

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE  
FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ

Katedra hospodářské úpravy lesa

DISERTAČNÍ PRÁCE

**Růst a produkce hlavních střeoevropských dřevin v podmínkách  
změny klimatu: Simulace a doporučení pro management lesa**

**Growth and yield of main Central European forest tree species under  
climate change: Simulations and recommendations for forest  
management**

**Autor:**

**Ing. Tomáš Čihák**

**Školitel:**

**doc. RNDr. Tomáš Hlásny, PhD.**

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma „Růst a produkce hlavních středoevropských dřevin v podmínkách změny klimatu: Simulace a doporučení pro management lesa“ vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací a doporučení školitele. Souhlasím se zveřejněním disertační práce dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek jejich obhajoby.

V Lavičkách dne 18. 6. 2018

Podpis autora: 

Děkuji svému školiteli doc. RNDr. Tomášovi Hlásnému, PhD. za jeho odborné vedení po celou dobu studia. Děkuji prof. Ing. Róbertu Marušákovi PhD. za koordinaci projektu PROCLIM, v jehož rámci byla řešena i předkládaní práce. Děkuji rovněž Mgr. Ivanu Barkovi Ph.D. za pomoc se zpracováním dat, tvorbou skriptů pro automatizované simulace a přípravou databáze a organizací VÚLHM v. v. i. a ÚHÚL za poskytnutí dat. A děkuji i své rodině, zejména manželce Pavle, za podporu při mém studiu.

## Abstrakt

Produkce lesních porostů vykazuje v posledních letech výrazné změny. Mezi hlavní příčiny těchto změn patří např. vyšší depozice dusíku, změny v managementu lesa nebo vliv klimatických změn. Zejména změny v časové a prostorové distribuci srážek a s tím související častější výskyt suchých období negativně ovlivňují stav a produkci lesních porostů. Předkládaná práce si klade za cíl vyhodnotit možný vliv budoucích změn klimatu na produkci hlavních hospodářských dřevin v České republice a navrhnout odpovídající adaptační opatření. Řešení práce spočívá ve vyhodnocení simulací růstu lesa prováděných pomocí modelu dynamiky lesa Sibyla. Vývoj klimatu do roku 2100 byl hodnocen na základě projekcí podle deseti regionálních klimatických modelů. Hodnoceny byly dřeviny smrk ztepilý, borovice lesní, buk lesní a duby letní a zimní. Vývoj lesa byl simulován při současně používaném managementu a při managementu zahrnujícím některé postupy adaptace na změnu klimatu. Součástí řešení práce byla kalibrace růstového modulu modelu Sibyla pro podmínky ČR. Analýzou rozsáhlého empirického materiálu a jeho porovnáním se simulovanými hodnotami byl zjištěn významný odklon simulovaných tloušťkových a výškových přírůstků od reálných. Výrazně rychlejší reálný výškový přírůstek se projevil i v nesouladu simulovaného a měřeného štíhlostního koeficientu stromů. Pro zmírnění tohoto jevu jsme navrhli sérii korekčních koeficientů, které zlepšují spolehlivost výstupů simulací pomocí modelu Sibyla v ČR. Ze simulací vývoje lesa v podmínkách změny klimatu vyplynulo, že nejvýraznější snížení produkce lze očekávat u smrku ztepilého v nižších a středních polohách. Naopak v důsledku posunu jeho produkčního optima do vyšších nadmořských výšek zde lze očekávat nárůst produkce. Obdobná reakce byla pozorována u buku. Minimální odezvu na změny klimatu vykazují duby (*Quercus sp.*) a borovice lesní. U dubů lze očekávat vznik vhodných produkčních podmínek až do pátého lesního vegetačního stupně. Díky jejich odolnosti vůči změnám klimatu se tak jedná o dřevinu s vysokým potenciálem při adaptačních procesech. Z porovnání výsledků simulací řízených standardním a adaptivním managementem vyplynulo zejména snížení míry poškozování porostů v důsledku snížení doby obmýtí. Naopak, přímý vliv na produkční funkci nebyl významný. Na základě dosažených výsledků byla navržena opatření podporující adaptaci lesů na změnu klimatu s ohledem na produkční funkci lesa, které zahrnují zejména úpravu dřevinné skladby korespondující se simulovaným posunem produkčního optima a snížení doby obmýtí.

**Klíčová slova:** model Sibyla, kalibrace, klimatické změna, produkce, adaptace

## **Abstract**

Forest production has shown significant changes in recent years. The main causes of these changes include, for example, increased nitrogen deposition, changes in forest management or effects of climate change. Forest health and production are adversely affected by changed precipitation patterns and increased temperature, and especially by the increased incidence of extreme events. With respect to these developments, this thesis aims to evaluate the possible impact of future climate change on the production of major tree species in the Czech Republic and propose adaptation measures to mitigate the impacts. We use forest dynamics models Sibyla to evaluate forest development under climate change and different managements. The future climate is considered based on ten regional climate model outputs. The target three species are spruce, pine, beech and oaks (*Quercus sp.*). Part of the research focuses on the calibration of the Sibyla growth module for the conditions of the Czech Republic.

Based on the analysis of extensive empirical data and their comparison with simulated values we found significant difference between measured and simulate height and diameter increments. Significantly higher real height growth rate also negatively affected the agreement of observed and simulated tree stem shapes. To correct this effect, we proposed a set of correction coefficients, which improve the match of simulated and observed values and increase the reliability of simulation outputs for the Czech Republic. Simulations driven by climate change scenarios indicated that spruce might experience the greatest decrease in productivity. At the same time, species production optimum was projected to shift to higher elevations. Similar response was observed in beech. Oaks and pine production was affected by climate change only marginally. Oaks were found to maintain or improve their productivity up to 5<sup>th</sup> forest vegetation zone. Oaks` resistance to changing climate thus highlights their potential in climate change adaptation efforts. Comparison of simulations driven by standard management and by adaptive management showed that adaptive management significantly reduced the rate of forest damage, what was mainly related to the reduced rotation period. Contrary, direct effect on forest productivity was not pronounced. Based on these findings we proposed measures, which might mitigate the adverse effect of climate on forest productivity in the Czech Republic. The measures mainly include adjustment of tree species composition to track the shift of species production optima and reduction of rotation period.

**Key words:** model Sibyla, calibration, climate change, production, adaptation

## Obsah

1. Úvod .....	8
2. Cíle práce.....	12
3. Rozbor problematiky .....	14
3.1. Klimatické projekce a scénáře změny klimatu.....	15
3.2. Probíhající a očekávané změny klimatu v regionu střední Evropy s důrazem na Českou republiku .....	18
3.3. Klimatické databáze a zdroje dat .....	25
3.4. Vliv změny klimatu na lesy.....	26
3.5 Modely dynamiky lesa .....	37
3.6 Adaptace lesů a lesního hospodářství na změnu klimatu .....	41
4. Metodika.....	47
4.1 Porostní data.....	47
4.2 Klimatická data .....	52
4.3 Model Sibyla .....	53
4.4 Design simulací .....	59
4.5 Kalibrace růstového procesu.....	60
5. Výsledky .....	63
5. 1 Analýza dat o změně klimatu na simulačních plochách.....	63
5. 2 Růst a tvarové charakteristiky kmene empirických vzorníků.....	67
5. 3 Kalibrace růstového procesu.....	72
5. 3. 1 Testování kalibračních postupů na úrovni vybraných ploch.....	73
5. 3. 2. Prostorové a stanovištní jednotky tvořící rámce výpočtu korektorů ...	75
5. 3. 3 Kalibrace na úrovni plochy a stanovištních resp. geografických jednotek .....	77
5. 3. 4 Omezení kalibračních koeficientů přípustnými tvarovými charakteristikami kmene .....	80
5. 3. 5 Odvození kalibračních koeficientů pomocí přírůstkových křivek.....	82
5. 3. 6 Souhrnné výsledky kalibrace.....	83
5. 4. Vliv změny klimatu na produkční ukazatele lesa.....	85
5. 4. 1 Simulace na úrovni výzkumných ploch.....	85
5. 4. 2 Zobecnění výsledků simulací pro Českou republiku .....	98
6. Diskuse.....	107
6.1 Použité scénáře změny klimatu.....	108

<b>6.2 Rozdíly měřené a simulované růstové dynamiky .....</b>	<b>109</b>
<b>6.3 Kalibrace růstového procesu modelu Sibyla .....</b>	<b>111</b>
<b>6.4 Vliv změny klimatu na produkci a východiska pro adaptační opatření.....</b>	<b>114</b>
<b>7. Závěr .....</b>	<b>118</b>
<b>8. Seznam literatury a použitých zdrojů .....</b>	<b>120</b>
<b>9. Seznam příloh .....</b>	<b>140</b>
<b>10. Přílohy .....</b>	<b>141</b>

## 1. Úvod

Změny v růstu a zdravotním stavu lesních porostů střední Evropy jsou pozorovány delší dobu (SPIECKER ET AL. 1996, ĎURSKÝ ET AL. 2006, KAHLE (ED.) 2008, CHARRU ET AL. 2010, KINT ET AL. 2012, BOŠELA ET AL. 2014, PRETZSCH ET AL. 2014). Hlavní důvody, proč k těmto změnám dochází, spočívají ve zvýšených depozicích dusíku (DE VRIES ET AL. 2014, JANDL ET AL. 2012, DE VRIES ET AL. 2006, SOLBERG ET AL. 2004), deficienci dostupných živin v půdě (ŠRÁMEK ET AL. 2013) a ve změnách klimatu (NEMANI ET AL. 2003, WALTHER ET AL. 2002). V některých případech může tyto změny iniciovat vliv dlouhodobé imisní zátěže ať už stávající nebo jako vliv jejich reziduí z minulosti (RYDVAL & WILSON 2012).

Opakující se stresové epizody ovlivňují stav lesů stále častěji, přičemž lesní dřeviny reagují často specifickým způsobem v závislosti na druhu dřeviny a aktuálních klimatických a trofických charakteristikách stanoviště (LOMSKÝ ET ŠRÁMEK 2004, VEJPUSTKOVÁ ET AL. 2017). Zejména klimatické stresory mohou působit synergicky, případně s časovou prodlevou a vliv jednotlivých faktorů lze jen obtížně rozeznat (ALLEN ET AL. 2010). Vliv těchto faktorů na růst lesních porostů a potažmo produkční a mimoprodukční funkce nelze hodnotit pouze negativně. V některých případech porosty mohou reagovat zrychlením přírůstu, jindy může mít změna klimatických podmínek pozitivní vliv na zdravotní stav a produkci porostů (SABATÉ ET AL. 2002). Pozitivní efekt zvýšené produkce je nicméně často negován zvýšenou mortalitou lesních porostů (ALLEN ET AL. 2010). Změny v růstu a produkci je proto nutné posuzovat také v kontextu disturbancí (REYER ET AL. 2017).

Klimatické podmínky limitují výskyt a rozšíření všech živočišných a rostlinných druhů po celou dobu jejich existence. V historii Země docházelo k jejich změnám velmi často a spolu s horotvornými a vulkanickými procesy jsou limitujícími faktory rozšíření všech organismů na Zemi (ABE - OUCHI ET AL. 2013). Jen v holocénu, tedy období od konce posledního zalednění do současnosti, které je z hlediska vývoje biodiverzity relativně dobře zmapované, docházelo k významným změnám v druhovém složení lesních ekosystémů opakovaně (BREWER ET AL. 2002).

Změny klimatu, ke kterým dochází v posledních desetiletích, souvisí z mnoha faktory, z nichž se jako velmi významná jeví zvyšující se koncentrace skleníkových plynů



v ovzduší (LUYSSAERT ET AL. 2007, IPCC 2013). Důležité jsou rovněž změny ve využívání krajiny, jako je zvyšování zastavěné plochy, necitlivé zásahy do vodního režimu krajiny a nevhodné postupy obhospodařování zemědělské půdy (NITSCHKE & INNES 2008). Všechny tyto faktory mají společného jmenovatele a tím je činnost člověka. Proto je v kontextu výše uvedených skutečností vhodné použití termínu antropogenní klimatická změna (AKZ).

Jako nejvýznamnější projev AKZ lze označit změny v distribuci a množství srážek v průběhu roku a nárůst teploty vzduchu. Tyto jevy, spojené s častěji se vyskytujícími vlnami veder a sucha, budou mít v budoucnu vliv na vývoj a přežívání lesních ekosystémů v Evropě. V středoevropském prostoru je v průběhu tohoto století možné očekávat nástup klimatu podobného mediteránnímu (ALESSANDRI ET AL. 2014), s čímž souvisí i expanze bioklimatických podmínek vhodných pro mediteránní dřeviny, jako jsou kupříkladu některé druhy dubů (HANEWINKEL ET AL. 2013).

Nejnovější klimatické projekce zpracované v projektu CzechAdapt (CZECHGLOBE 2017) ukazují, že počet dní v horké vlně, který na většině území lesů dosahoval v období 1981-2010 přibližně 6-15 dnů, vzroste v období kolem roku 2050 na 20 – 40 dnů. Počet tropických dnů (denní maximální teplota nad 30°C) se mezi uvedenými obdobími zvýší z 0 – 10 na 10 – 30.

Tyto skutečnosti vyústily do potřeby přijetí souboru opatření, kterými je možné zmírňovat negativní dopady změny klimatu na lesy, tzv. adaptační opatření. Problematikou adaptace lesních porostů na AKZ se dlouhodobě zabývá ve svých studiích řada autorů (SPITTLEHOUSE & STEWART 2003, MILLAR ET AL. 2007, BOLTE ET AL. 2009, LINDNER ET AL. 2010). Na republikové úrovni tvoří adaptace lesních porostů na globální klimatické změny součást Národního lesnického programu (NLP), (ÚHÚL 2013). V rámci Cíle II „Zlepšení a ochrana životního prostředí“ jsou v klíčové aktivitě (KA) č. 6. „Snížení dopadů očekávané globální klimatické změny a extrémních meteorologických jevů“ shrnuta základní adaptační opatření na zmírnění dopadů AKZ. S problematikou adaptace bezprostředně souvisí i KA 7 (Zachování a zlepšení biologické diverzity v lesích) a KA 8 a 9 (Rozvoj monitoringu lesů resp. zlepšení zdravotního stavu a ochrany lesa). Usnesením vlády ČR č. 34/2017 byl rovněž schválen Národní akční plán na adaptace na změnu klimatu (MŽP 2017), který řeší rovněž meziresortní spolupráci při zmírňování dopadů AKZ. Adaptace na změnu klimatu je v širším smyslu definována jako „očekávání nepříznivých vlivů a realizace přiměřených opatření pro vyhnutí se, nebo zmírnění těchto

vlivů, nebo využití příležitostí, které mohou vzniknout“ (EUROPEAN COMMISSION, 2014). Adaptace lesů na změnu klimatu zahrnuje soubor opatření, která zohledňují nestabilitu klimatických podmínek a směřují ke zvýšení flexibility hospodaření v lesích a snižování rizik poškození nebo zničení lesních porostů.

Při realizaci adaptačních opatření je nutné přijímat a realizovat rozhodnutí ovlivňující vnitřní a vnější strukturu lesů tak, aby byly schopny čelit budoucím podmínkám. Odhad budoucího vývoje je však zatížen vysokou mírou nejistot a účinnost, resp. návratnost investic do opatření zmírňujících dopady AKZ, není jistá. Ze současné úrovně poznání však jednoznačně vyplývá, že strategie “nedělat nic“ je rizikovější, než investovat do adaptačních opatření. Z důvodu informační nejistoty, ve které je zapotřebí přijímat rozhodnutí o managementu lesa, je důležitou součástí adaptace zvýšení flexibility hospodaření, zejména maximálním využíváním přírodních procesů, zvýšením druhové a genetické diverzity porostů a počtu využívaných dřevin, jakož i snížení dob obmýti zranitelných dřevin. S využitím těchto postupů je možné průběžně upravovat a přehodnocovat způsoby hospodaření s ohledem na nové poznatky, měnící se stav lesa a případné změny cíle hospodaření (požadavky na jiné sortimenty, rostoucí zájem o mimoprodukční funkce lesa apod.). Výhodou střední Evropy je, že skýtá větší možnosti adaptace než např. oblast mediteránní (LINDNER ET AL. 2010).

K hodnocení dopadů změny klimatu na lesy a k testování dlouhodobých dopadů různých adaptačních opatření jsou již tradičně využívány modely dynamiky lesa (MDL). Důležitým předpokladem využití MDL při tomto typu aplikací je jejich klimatická citlivost, tedy schopnost správně reagovat na měnící se klimatické parametry. Pro modelování vývoje lesa v podmínkách změny klimatu je v rámci předkládané práce využíván MDL SIBYLA (FABRIKA 2005). Jedná se o hybridní model koncipovaný na základě MDL SILVA (PRETZSCH ET AL. 2002), jehož vhodnost pro využití v regionu střední Evropy byla ověřena ve více studiích (HLÁSNY ET AL. 2011A, 2014A, 2015, ŠPULÁK & SOUČEK 2010).

Lesy v České republice zaujímají plochu cca. 2 668 392 ha, což je přibližně 33 % z celkové plochy státu. V zastoupení převažují jehličnaté dřeviny (76,5%) a porosty s podílem jehličnanů vyšším než 75% tvoří 64,2% celkové porostní plochy. V porovnání s přirozeným výskytem je tak současné zastoupení listnáčů přibližně o 39,4 % nižší oproti přirozené skladbě. Podíl jehličnanů má nicméně trvalý sestupný trend. Nejvýznamnější hospodářskou dřevinou je smrk ztepilý, který pokrývá 50,6% porostní půdy (MZE 2015).

Celková těžba se v letech 2004 – 2015 pohybuje v rozmezí 15,06 – 18,06 mil. m<sup>3</sup> b. k. a významnou měrou se na ní podílí nahodilá těžba. Po největší kalamitní epizodě posledních let, orkánu Kyril, bylo v roce 2007 porostů vytěženo 12,7 mil. m<sup>3</sup> dřeva, v roce 2008 pak 7,7 mil. m<sup>3</sup> (ČSÚ 2015). Největší podíl nahodilých těžeb tvoří hmyzová a živelní, které tvoří v posledních deseti letech průměrný podíl 9,3 resp. 25,9% z celkové roční těžby. Nejvyšší podíl živelní těžby byl zaznamenán právě následkem orgánu Kyril v roce 2007 s podílem 68,4%. Následující gradace hmyzových nahodilých těžeb kulminovala v roce 2009, kdy dosáhla maxima 16,9%. Jako alarmující lze označit téměř dvojnásobný nárůst hmyzové nahodilé těžby v roce 2015 (14,3%) a rovněž zvýšení živelních těžeb na 27,1%. Nejvýznamnějším biotickým škůdcem v České republice je podkorní hmyz, reprezentovaný zejména lýkožroutem smrkovým, l. lesklým a l. menším. V České republice lze jeho výskyt charakterizovat jako stav trvalého přemnožení. Pravděpodobný počátek tohoto stavu lze datovat do roku 2003, kdy byly porosty oslabeny extrémním suchem. Gradaci podkorního hmyzu podporují další extrémní epizody, jako je orkán Kyril v synergickém efektu s nezvykle vysokými teplotami roku 2007, vichřice Emma a Ivan v roce 2008 nebo teplotně nadprůměrné roky 2014 resp. 2015 (KNÍŽEK ET AL. 2016). Na gradaci podkorního hmyzu se významně podílí faktory, při kterých je možné usuzovat na vliv AKZ. Patří sem prodlužování vegetační doby a častější výskyt delších období s nadprůměrnými teplotami (vlny veder) a změny v distribuci srážek v průběhu roku. Spolu se souběžným oslabením dřevin v důsledku sucha pak tyto faktory významně zvyšují citlivost resp. mortalitu lesních porostů.

Současný stav lesních porostů v České republice je v souvislosti s předpokládanou klimatickou změnou výzvou pro vědeckou komunitu i praktické lesníky, aby přijali včas a v potřebné míře odpovídající opatření na zmírnění dopadů AKZ. Les svojí existencí plní významné funkce, které je nutné při procesu adaptace na KZ brát v úvahu. V případě hospodářského lesa se jedná zejména o funkci produkční, nelze ale přehlížet ani význam dalších přínosů, jako jsou funkce vodoochranné, půdoochranné a klimatické. Funkci produkční nelze v kontextu AKZ chápat jen jako prostředek k zabezpečení dostatku dřevní hmoty, ale současně i jako možnost jak deponovat uhlík v lesních ekosystémech a zpomalit tak jeho unikání do ovzduší. Naplnění těchto cílů lze dosáhnout jen včasným přijetím odpovídajících managementových a pěstebních opatření.

Hlavní motivací k řešení této disertační práce je rozšíření poznatků o možném vlivu změny klimatu na lesní ekosystémy a přispění k formulaci adaptačních postupů, které by napomohly ke zmírnění dopadu AKZ na lesní ekosystémy v ČR. K úspěšnému dosažení

těchto cílů má významně napomoci využití nejnovějších metod modelování dynamiky lesních ekosystémů a vývoje klimatu. Za hlavní přínos předkládané práce považuje autor možnost využití výsledků při formulování adaptačních opatření ke zmírnění dopadu AKZ na lesní ekosystémy. Navržená opatření by v budoucnu měla napomoci udržení lesních ekosystémů v takovém stavu, aby mohly být zachovány všechny jejich funkce v odpovídajícím rozsahu i pro budoucí generace.

Řešení předkládané práce probíhalo v rámci projektu NAZV QJ1220316 „Hodnocení očekávaných změn v růstu a mortalitě lesních porostů, dopadů na produkční funkci lesů ČR a návrh adaptační strategie (PROCLIM)“.

## 2. Cíle práce

Cílem práce je vyhodnotit možný vliv změny klimatu na produkci hlavních dřevin v České republice. Na základě těchto zjištění budou vypracována doporučení pro management lesa tak, aby byly minimalizovány negativní dopady klimatické změny.

Dílní cíle práce jsou:

- Zpracovat dostupná data o přírůstech z většího počtu ploch v České republice a zpracovat je do struktury vhodné pro simulace v růstovém simulátoru Sibyla.
- Pro simulační plochy zpracovat klimatická data, včetně scénářů změny klimatu do roku 2100.
- Realizovat komplexní simulace na modelových plochách a porovnáním simulovaných a měřených hodnot odvodit kalibrační rovnice resp. koeficienty pro simulátor Sibyla.
- Vypracovat kalibraci simulátoru růstu lesa Sibyla pro hlavní hospodářské dřeviny v České republice.
- Vyhodnotit vliv změny klimatu na produkci hlavních hospodářských dřevin v České republice.
- Odvodit závěry, které mohou podpořit tvorbu ucelených doporučení pro management lesa orientovaný na adaptaci lesů České republiky na změnu klimatu.

Takto formulované cíle mají přispět k rozšíření poznatků o reakci hlavních hospodářských dřevin na změnu klimatu, vytvoření doporučení pro management lesa

s cílem zmírňovat očekávané negativní dopady změny klimatu, úprava modelu dynamiky lesa Sibyla pro podmínky České republiky a podpora širšího využívání modelů při managementu lesa.

Hypotézy, ze kterých řešení práce vychází, jsou tyto:

- S ohledem na množství prací, které indikují recentní zrychlení růstu většího počtu hospodářských dřevin ve střední Evropě předpokládáme že růst dřevin na experimentálních plochách použitých při řešení vyjádřený v intencích tloušťkového a výškového přírůstu bude vyšší než přírůst simulovaný pomocí modelu Sibyla. Na základě této skutečnosti předpokládáme nutnost aplikace korekčních koeficientů vyšších než 1 (nebo korekčních funkcí s obdobným vlivem).
- Ohledně reakcí růstu a produkce hlavních hospodářských dřevin předpokládáme charakteristické odezvy zdokumentované např. v pracích HLÁSNY ET AL. (2011A, 2011B), které zahrnují pokles produkce v nižších nadmořských výškách související se sníženou dostupností vláhy a nárůst produkce ve vyšších nadmořských výškách, související zejména s prodloužením vegetační sezóny.
- Z hlediska mezidruhových rozdílů v reakci produkce dřevin na změny klimatu očekáváme na základě obecných poznatků ekologie lesa zejména pokles produkce smrku a buku a udržení produkce borovice a dubů.

### 3. Rozbor problematiky

Hlavní příčinou antropogenní změny klimatu je skleníkový efekt, tedy proces, při kterém atmosféra propouští k povrchu Země sluneční záření a zpětné tepelné záření absorbuje. Největší vliv na vznik skleníkového efektu má vodní pára, z hlediska AKZ však jsou relevantní zejména CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub> a rovněž freony (KADRNOŽKA 2008).

IPCC 2013 uvádí, že koncentrace oxidu uhličitého se zvýšila na úroveň nejvyšší za min. posledních 800 tis. let. V porovnání s preindustriální érou je koncentrace vyšší min. o 40%. Za hlavní důvod tohoto zvýšení je označováno využívání fosilních paliv. Jako sekundární emise jsou označovány vstupy CO<sub>2</sub> související se změnou využívání půdy. U CH<sub>4</sub> a NO<sub>2</sub> jsou v porovnání s preindustriální érou koncentrace vyšší o 150 resp. 20%.

Hlavní příčinou současných změn klimatu jsou přírodní a antropogenní látky a procesy měnící energetickou bilanci země. Pomocí těchto faktorů je vyjadřováno celkové radiační působení (radiative forcing, RF), pomocí kterého jsou vyjadřovány změny toků energie v atmosféře (HANSEN ET AL. 1997). Celkový RF je kladný a jeho nejvyšší příspěvek je způsoben zvýšením atmosférické koncentrace CO<sub>2</sub>.

Důsledky zvyšování skleníkového efektu resp. RF mají vliv na změny teploty oceánů a atmosféry (HANSEN ET AL. 2010, LEVITUS ET AL. 2000). IPCC 2014 uvádí, že období 1983 – 2012 je na severní polokouli pravděpodobně nejteplejší za posledních 1400 let. V období 1880 – 2012 vzrostla teplota v průměru o 0,85 °C, přičemž v letech 1998- 2012 došlo k nárůstu o 0,05 °C v periodě 1951 – 2012 pak o 0,15 °C. Přibližně od roku 1950 je pozorován nárůst výskytu extrémních klimatických jevů. Dochází ke snížení počtu chladných dnů a nocí a naopak ke zvýšení počtu teplých dnů a nocí (EASTERLING ET AL. 2000). Rovněž dochází ke zvýšení frekvence výskytu extrémních srážek (FRICH ET AL. 2002, TRENBERTH ET AL. 2011). Tyto skutečnosti jsou pravděpodobně příčinou změn v kryosféře Země ve smyslu odtávání ledovců a s tím spojené zvyšování hladiny oceánů. Zvyšování teplot, jako hlavní projev klimatických změn vykazuje setrvalý trend a nepředpokládá se, že by v blízké budoucnosti došlo k jeho změně. Vliv AKZ se projevuje i ve střední Evropě a jejich dopady mají prokazatelný vliv i na území České republiky (např. PRETEL (EDS.) 2011).

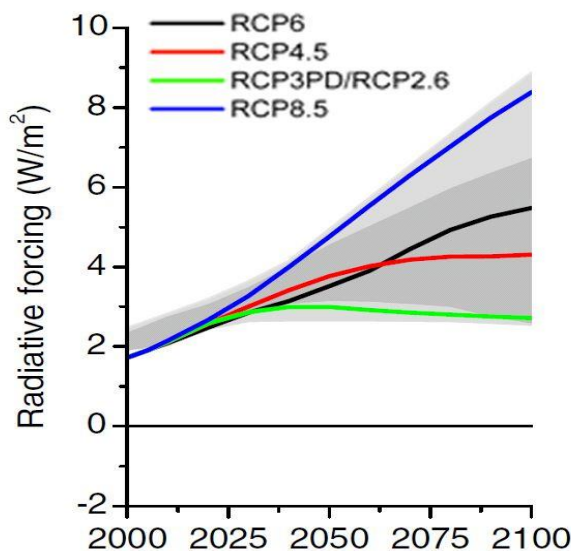
### 3.1. Klimatické projekce a scénáře změny klimatu

Pro predikci změn koncentrací skleníkových plynů byly vypracovány tzv. emisní scénáře (SRES), (NAKIČENOVIC & SWART, 2000). Emisní scénáře popisují změny v produkci skleníkových plynů na základě různých socioekonomických změn (obr. 3. 1.). Scénář A1 předpokládá rychlý růst ekonomiky, spojený s rozvojem nových technologií. Růst populace předpokládá do roku 2050. SRES A2 počítá s pomalejším ekonomickým rozvojem, ale s růstem populace až do roku 2100. Všechna opatření jsou prováděna na regionální úrovni. Podle SRES B1 bude populace vykazovat růst do roku 2050. Opatření pro zmírnění AKZ jsou prováděna na celosvětové úrovni. Růst ekonomiky je střední, významný je rozvoj nových technologií. Scénář B2 předpokládá vývoj s orientací na regionální řešení a trvale udržitelný rozvoj. Ekonomika se vyvíjí pomalejším tempem než u SRES A1 a B1, Pro potřeby simulací změn klimatu byly vytvořeny další „přechodové scénáře“. Např. SRES A1B předpokládá vyvážené využívání jak fosilních paliv, tak alternativních zdrojů energie SRES, A1F1 naopak intenzivní využívání fosilních paliv.

Novější studie již nepoužívají při projekcích změn klimatu řady SRES, ale pracují se scénáři koncentrací RCP (representative concentration pathways, reprezentativní směry vývoje koncentrací), (MOSS ET AL. 2010). Scénáře jsou označeny RCP2.6, RCP4.5, RCP6, a RCP8.5. Číslem je označena změna hodnoty radiačního působení způsobeného nárůstem koncentrací antropogenních skleníkových plynů (ASP) v roce 2100. RCP2.6 předpokládá maximální roční koncentrace ASP v období 2010-2020 a poté počítá s poklesem, scénář předpokládá podstatnou redukci emisí ASP. RCP4.5 předpokládá maximum v roce 2040 s následnou stabilizací před rokem 2100. Podle RCP6 se nepředpokládá výrazná změna v technologiích na snižování emisí a se stabilizací koncentrací po roce 2100. Scénář RCP8,5 předpokládá plynulý nárůst ASP po celé 21. století. Z hlediska příčin a důsledků se nejvíce podobá SRES A2 (obr. 3. 2.), (RCP DATABASE 2009). Některé studie potvrzují, že klimatické projekce vývoje teplot vzduchu, založené na SRES A1B se pohybují mezi výsledky RCP4.5 a RCP8.5. Vývoj teplot podle tohoto SRES se nejvíce blíží výstupům RCP6.0 (ROGELJ ET AL. 2012, JACOB ET AL. 2014).



Obr. 3.1 Základní klasifikace emisních scénářů SRES (upraveno podle IPCC 2013)



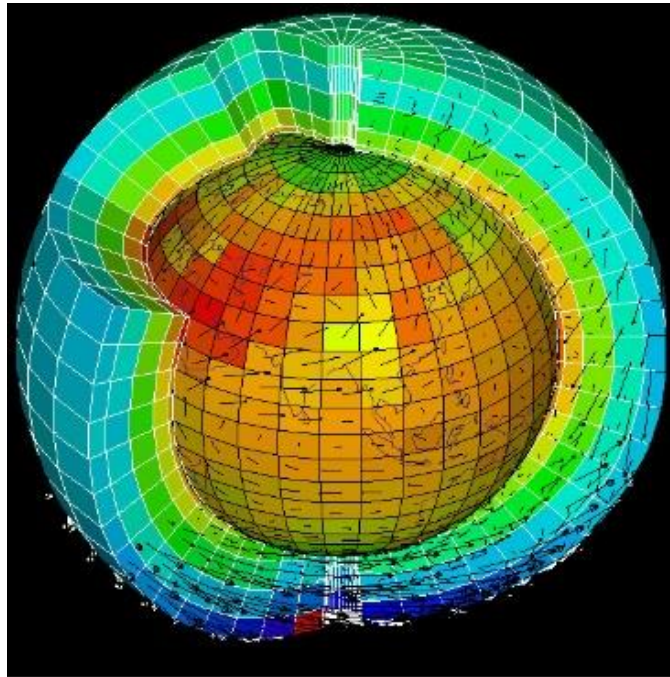
Obr. 3.2 Změna ve vývoji radiačního působení podle jednotlivých RCP (podle IPCC 2017)

*Poznámka: V období řešení disertační práce nebyly pro Českou republiku k dispozici scénáře změny klimatu řízené RCP, proto je v předkládané práci použita skupina 10 scénářů (resp. regionálních klimatických modelů) řízených scénářem emisí skleníkových plynů SRES A1B.*

Hlavním nástrojem pro popis vývoje klimatu a jeho změn jsou v současnosti globální klimatické modely (GCM), (Obr. 3. 3.). Jejich síla spočívá v komplexnosti, díky kterým jsou schopny kvantifikovat vliv fyzikálních procesů na chování klimatického systému Země jako celku (FARDA 2010). Nevýhody těchto modelů spočívají ve vysoké náročnosti



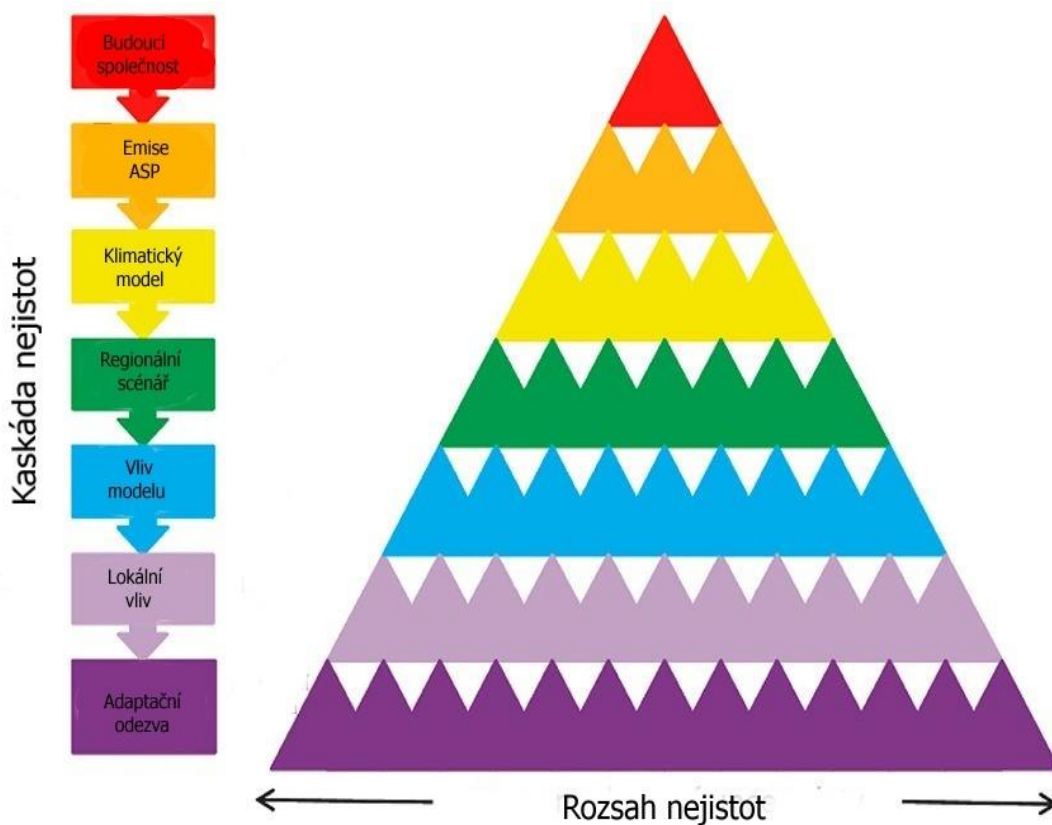
na výpočetní čas a archivační kapacity. Modelování probíhá na vertikální a horizontální úrovni s různým stupněm rozlišení pro oblast souše a moře. GCM v současnosti dosahují rozlišení mezi 2 – 4° zeměpisné šířky resp. délky. Toto rozlišení je nicméně pro projekce klimatu na regionální úrovni nedostačující.



Obr. 3.3 Příklad globálního klimatického modelu (zdroj: PINTEREST 2017)

Pro vyhodnocení dopadu klimatických změn na krajinu a lidskou společnost na regionální úrovni je proto nutné zjistit regionální charakter klimatických změn. K tomu jsou využívány regionální klimatické modely (RCM). Pomocí RCM jsou prováděny projekce pro menší území, přičemž hodnoty veličin na okrajové oblasti jsou převzaty z některého GCM (tzv. řídicí model) (CRHOVÁ ET AL. 2014).

Je zřejmé, že využití informací získaných ze scénářů změny klimatu je zatížen celou řadou nejistot (ZHANG ET AL. 2011). Hlavní oblasti a rozsah nejistot při projekcích klimatu uvádí např. FALLOON ET AL. (2014). Obr. 3. 4. zobrazuje nárůst rozsahu nejistot od zvoleného emisního scénáře přes GCM a RCM, až po lokální dopady AKZ a adaptace. Použití pouze jednoho scénáře skýtá jen omezenou informaci o možné variabilitě budoucího vývoje klimatu. Z tohoto důvodu se pro projekce regionálního vývoje klimatu standardně využívá větší množství kombinací GCM a RCM resp. řídicího SRES nebo RCP.



Obr. 3.4 Zdroje a rozsahy nejistot při projekcích klimatu (upraveno, podle FALLOON ET AL. 2014).

### 3.2. Probíhající a očekávané změny klimatu v regionu střední Evropy s důrazem na Českou republiku

Projekce klimatu pro Evropu vymezují hlavní problémy, kterým bude společnost v budoucnu nucena čelit a s jejichž projevy se setkáváme i v současnosti. Ve střední a jižní Evropě to budou stále častěji se opakující vlny vysokých teplot v souběhu s nedostatkem srážek (BENISTON ET AL. 2007). S tím jsou spojena další rizika jako zvýšený výskyt požárů. Změny v distribuci srážek mohou způsobovat vyšší četnost extrémních hydrologických a meteorologických jevů, jako jsou povodně nebo sněhové kalamity.

Mezi nejčastější projevy AKZ patří růst teploty vzduchu, změna v distribuci a množství srážek a zvýšený výskyt extrémních meteorologických a hydrologických jevů, jako jsou vichřice, povodně nebo dlouhotrvající periody sucha (BARCZA ET AL. 2009, WIESNER ET AL. 2009, GIMMI ET AL. 2010). Projekce změny klimatu naznačují, že vlny horka a sucha budou v budoucnu v naší zeměpisné šířce častější a intenzivnější (SCHÄR ET AL. 2004, GIORGI & COPPOLA 2007, ŠTĚPÁNEK ET AL. 2016), stejně jako vichřice nebo poškozování

lesních porostů sněhem (RÄISÄNEN ET AL. 2004). Dopady klimatických změn nejsou pouze negativní. Díky postupnému zvyšování průměrných teplot dochází k prodloužení vegetační doby (MENZEL & FABIAN 1999, CHMIELEWSKI & RÖTZER 2001), což může pozitivně ovlivnit produkční charakteristiky lesních porostů, zejména ve vyšších vegetačních stupních a nižších zeměpisných šířkách.

PRETEL ET AL. (2011) analyzoval změny základních meteorologických veličin na území ČR. Teplota vzduchu vykazuje vzestupný trend, který se v posledních desetiletích zrychluje. Dvacet nejteplejších roků naměřených na stanici Klementinum spadá do období po roce 1980 a osm z nich do období po roce 2000. Přes výrazné meziroční rozdíly, vykazují průměrné roční územní teploty v posledních padesáti letech vzestup v řádu 0,3°C / 10 let. Nárůst je rychlejší v létě (0,4 °C) a pomalejší na podzim (0,1°C). Mezi roky 2001 – 2011 se teplota zvýšila o 0,8°C a v souladu s výše uvedenými skutečnostmi klesá výskyt dnů s nižšími teplotami (ledové, arktické dny) a narůstá počet dní s vysokými teplotami (letní a tropické dny). Úhrny srážek vykazují výraznou variabilitu v průběhu roku (měsíční sumy), ale minimální změny v ročních úhrnech. Charakter ročního chodu srážek s maximálními hodnotami v létě a minimálními v zimě zůstává zachován, dochází však k výrazné redistribuci měsíčních úhrnů srážek, které je výraznější v letním období (pokles od dubna do června, nárůst od července do září).

HANEL ET AL. (2011) předpokládá na území ČR nárůst teplot v průběhu celého roku. Nejnižší nárůst lze obvykle očekávat v jarním období, nejvyšší v zimě a pro časový horizont 2085 také v létě. V průměru teplota narůstá o cca 1,2-3°C pro časové horizonty 2025, 2055 a 2085. Rozdíly mezi různými regiony ČR jsou obvykle nižší než 0,2°C. Nejvyšší nárůst teploty lze očekávat na jihu republiky v období 2085. Projekce vývoje srážkových úhrnů předpokládá mírný nárůst v průběhu celého roku s výjimkou letního období. Růst srážek je obvykle do 10%, pro časový horizont 2085 obvykle do 20%. Nárůst srážkových úhrnů lze očekávat v zimním období (tab. 3. 1.).

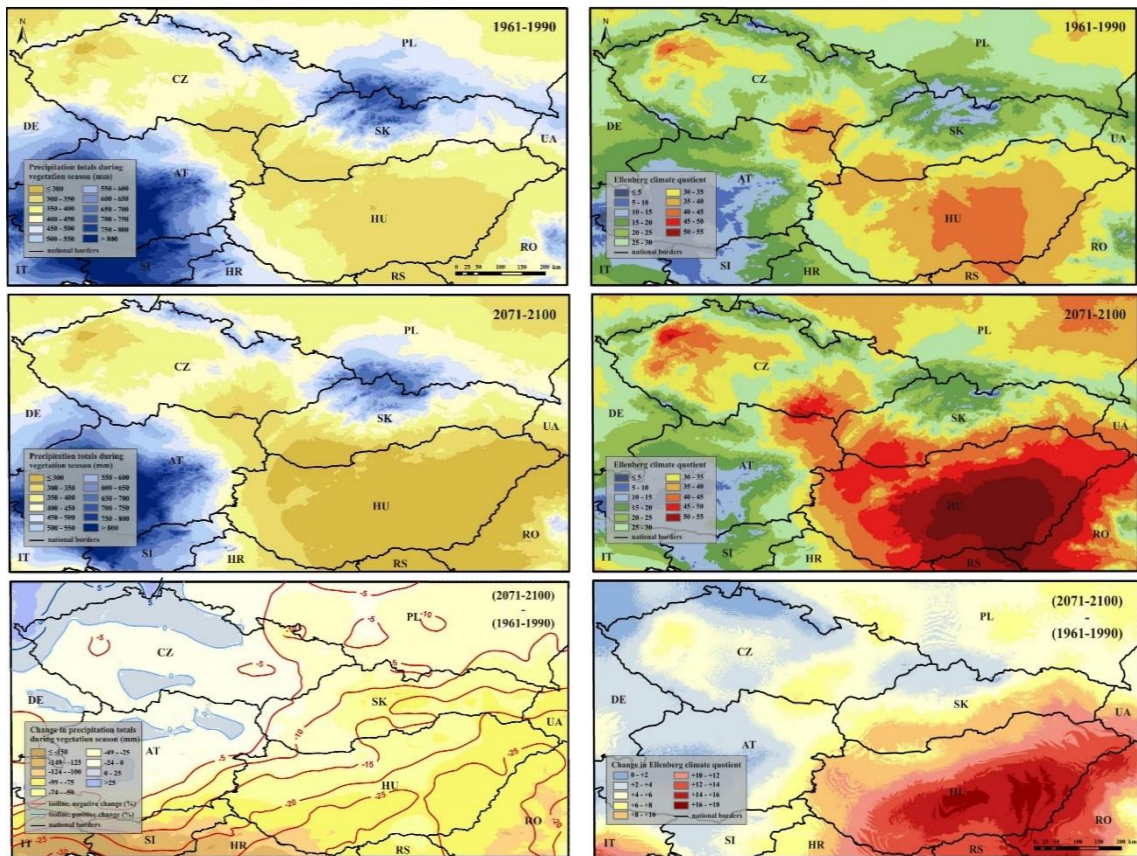
Tabulka 3.1: Změny průměrných teplot a úhrnů srážek na území ČR podle projekcí sady RCM ENSEMBLES (HANEL ET AL. 2011)

Srážky %	Zima	Jaro	Léto	Podzim	Rok	Teplota °C	Zima	Jaro	Léto	Podzim	Rok
<b>2025</b>	4,83	1,32	2,79	5,75	3,35	<b>2025</b>	1,3	1,06	1,1	1,27	1,18
<b>2055</b>	8,05	5,21	-1,9	6,19	3,94	<b>2055</b>	2,56	1,91	1,1	1,27	2,24
<b>2085</b>	13,74	9,71	-6,6	7,51	5,49	<b>2085</b>	3,5	2,58	3,26	3,37	3,18

NIKULIN ET AL. (2011) uvádí zvýšení frekvence výskytu vln horka v jižní Evropě na 1 – 2 roky, ve Skandinávii na 5 let. Extrémně chladné výkyvy počasí by v období 2071 – 2100 měly téměř vymizet. Extrémní srážkové epizody v severní a střední Evropě se budou v letním období vyskytovat v periodách 6 – 10 let.

Mapy současného a vývoje budoucího klimatu pro region střední Evropy (HLÁSNY ET AL. 2014A) ukazují, že do konce 21. století stoupne teplota vzduchu ve střední Evropě přibližně o 4°C v porovnání s obdobím 1961 až 1990. Projekce změn ve srážkových úhrnech jsou značně variabilní, od +5 do -15% oproti referenčnímu období. Mírný nárůst srážkových úhrnů je předpokládán v oblasti České republiky a klesá směrem na jihovýchod (obr. 3.5).

TRNKA ET AL. (2016) ve své studii monitoruje výskyt sucha ve střední Evropě v období 1961 – 2014 na základě 4 různých indexů sucha. Hodnocená oblast zahrnuje území ČR, Slovenska a SV Rakouska. Pro vyhodnocení indexů využil dat z celkem 411 meteorologických stanic. Upozorňuje na rozdíly v dopadech různých kategoriích sucha. Klasifikace podle okruhu dopadů klasifikuje sucho meteorologické, zemědělské, hydrologické a sociální. Jedním z rozlišujících znaků je čas, po kterém se důsledky sucha začnou projevovat. Zatímco důsledky zemědělského sucha se mohou projevit v řádu dní resp. týdnů, vliv hydrologického a sociálního sucha lze hodnotit až v delším časovém rozsahu. Autor upozorňuje na vyšší frekvenci výskytu epizod sucha po roce 2000 ve srovnání s předchozím obdobím (od roku 1947). Nejvyšší nárůst epizod sucha byl zaznamenán v kontinentální oblasti a nadmořských výškách od 200 – 600 m n. m. a v Panonské oblasti v nadm. výškách do 200 m n. m. Naopak vyšší frekvence a srážkové souhrny byly zjištěny v nadm. výšce od 1000 m n. m. Výsledky studie lze interpretovat tak, že zatímco v nižších resp. středních polohách narůstá výskyt epizod sucha rychleji, ve vyšších nadm. výškách naopak problémy s vláhou nemusí vůbec nastat. Nárůst výskytu sucha na konci 20. a počátkem 21. století není způsoben ani tak nedostatkem srážek, jako spíše zvýšenou evaporací. Rovněž nárůst teploty vzduchu nemá tak výrazný vliv jako pokles vzdušné vlhkosti resp. nárůst intenzity slunečního záření.



Obr. 3.5 Vlevo: Distribuce srážek (duben–září) ve střední Evropě v letech 1961 - 1990 na základě měřených meteorologických dat (nahore) a distribuce srážek vypočítaná jako průměr 10 regionálních klimatických modelů pro období 2071 – 2100 (uprostřed). Rozdíl a procentuální změna mezi uvedenými obdobími (dole). Vpravo: Distribuce Ellenbergova klimatického koeficientu ve střední Evropě v letech 1961-1990 na základě měřených meteorologických údajů (nahore), a vypočítaná jako průměr 10 regionálních klimatických modelů pro období 2071 – 2100 (uprostřed). Rozdíl mezi uvedenými obdobími (dole). Zdroj: HLÁSNÝ ET AL. (2014A).

ŠTĚPÁNEK ET AL. 2016 prezentuje aktuální projekci vývoje klimatu pro oblast České republiky. Klimatické projekce byly realizovány na základě 11 RCM klimatické databáze Euro – CORDEX a dvou emisních scénářů RCP4.5 a RCP8.5. Výsledky projekcí předpokládají nárůst průměrné teploty v ČR na konci 21. století o 2,1°C podle RCP4.5 resp. o 4,1°C podle RCP8.5. Nárůst teplot bude do roku 2050 podobný nezávisle na emisním scénáři. Teploty v letech 2021 – 2040 budou v průměru o 1 °C vyšší než v periodě 1981 – 2010. Vyšší nárůst teplot lze očekávat v zimním období, kdy by podle RCP8.5 měly být teploty na konci 21. století oproti referenčnímu období 1981 – 2010 vyšší o 4,9°C. Pro maximální teploty je očekávaný nárůst 2,3°C pro roční a 3,4°C pro

zimní období (RCP4.5) a 4.6 °C resp. 6.0 °C ( RCP8.5). Srážkové úhrny nevykazují tak výrazné změny jako teplota vzduchu a roční variabilita je výraznější než dlouhodobý trend. Lze předpokládat slabý růst v rozsahu 7 – 13% pro RCP4.5 resp. 6 – 16% pro RCP8.5. Výraznější nárůst srážkových úhrnů lze očekávat na konci 21. století v zimním období, kdy pro RCP8.5 předpokládají projekce nárůst o 35%. V letním období by nemělo docházet k výraznějším změnám. Nejmenší změny ve srážkových úhrnech jsou předpokládány v oblasti jižní Moravy. Výsledky jednotlivých RCM nicméně vykazují vysokou variabilitu pro období 2041 – 2060 (RCP4,5) a 2061 – 2080 (RCP8.5). Srážkové úhrny v posledním desetiletí nevykazují signifikantní změny v ročních úhrnech, výrazně se však mění rozložení srážek během roku. Projekce předpokládají nárůst počtu dní s úhrnem srážek vyšším než 10 mm o 0,6 dne za deset let, pro období 2021 – 2060 a přibližně 0,5 dne v období 2061 – 2100. V období 2081 – 2100 projekce předpokládají nárůst počtu tropických dní a vln veder (RCP8.5).

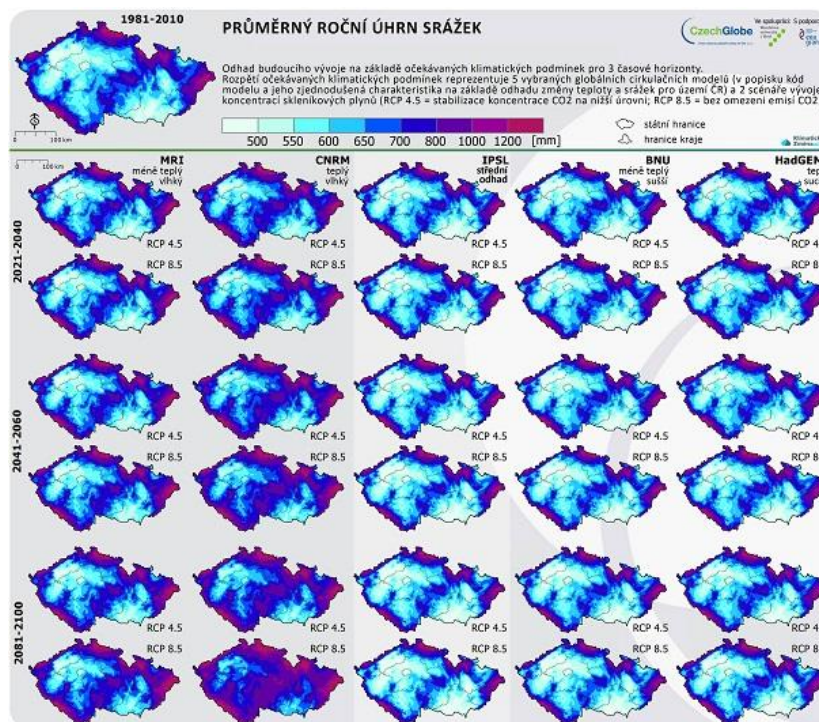
Rozsah předpokládaných změn v hlavních klimatických charakteristikách na území České republiky je na obr. 3.6 – 3.8 (CZECHGLOBE 2017). Projekce jsou vytvořeny pomocí pěti RCM a emisních scénářů RCP 4.5 a 8.5 a jsou zpracovány pro časové horizonty 2021 – 2040, 2041 – 2060 a 2081 – 2100. Tradiční oblasti s nejnižšími úhrny srážek zahrnují v ČR oblast Podkrušnohorských pánví, Rakovnicko – Kladenskou pahorkatinu, severní část Západočeské pahorkatiny, severozápadní část Polabí, Jihomoravské úvaly a Polskou nížinu. Střední odhady pro časový horizont 2081 - 2100 předpokládají významnější zvětšení oblastí s ročními úhrny 550 – 600 mm v oblasti Středočeské a Západočeské pahorkatiny, v Hornomoravských úvalech a předhůří Českomoravské vrchoviny. Snížení srážkových úhrnů je předpokládáno ve středních polohách, jako je Českomoravská vrchovina. Naopak výrazné změny nejsou očekávány v horských sudetských oblastech, ani v oblasti Beskyd (obr. 3. 6.).

Významné změny lze očekávat v nárůstu průměrných ročních teplot, kdy podle středních odhadů lze na celém území ČR s výjimkou vrcholových partií horských oblastí, předpokládat nárůst na hodnoty vyšší než 12°C. Nejvyšší nárůst teplot lze předpokládat v oblasti Moravských úvalů, Polabské nížiny, Polské nížiny a Podkrušnohorských pánví (obr. 3. 7.).

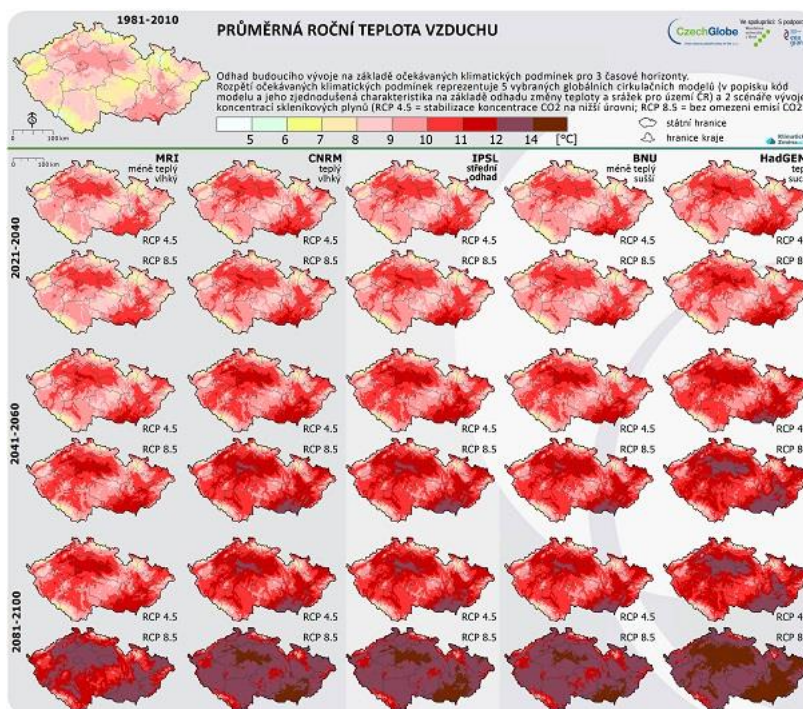
Na obr. 3. 8. jsou vylíšeny oblasti ohrožené extrémním suchem. Geografické umístění nevykazuje v zásadě rozdíly mezi jednotlivými RCM v časových periodách, rozdíly lze však nalézt v pravděpodobnosti výskytu. Alarmující je rovněž rozloha území tímto jevem

ohrožené. V blízké budoucnosti, lze předpokládat nárůst pravděpodobnosti výskytu extrémního sucha nejen v oblastech s tradičně nízkými srážkovými úhrny, ale i v nových v oblastech, jako je Lužická pahorkatina, Předhoří Českomoravské vrchoviny, Orlické hory nebo Český les. Pesimistické projekce předpokládají vysoké riziko výskytu prakticky na celém území ČR s výjimkou horských oblastí.

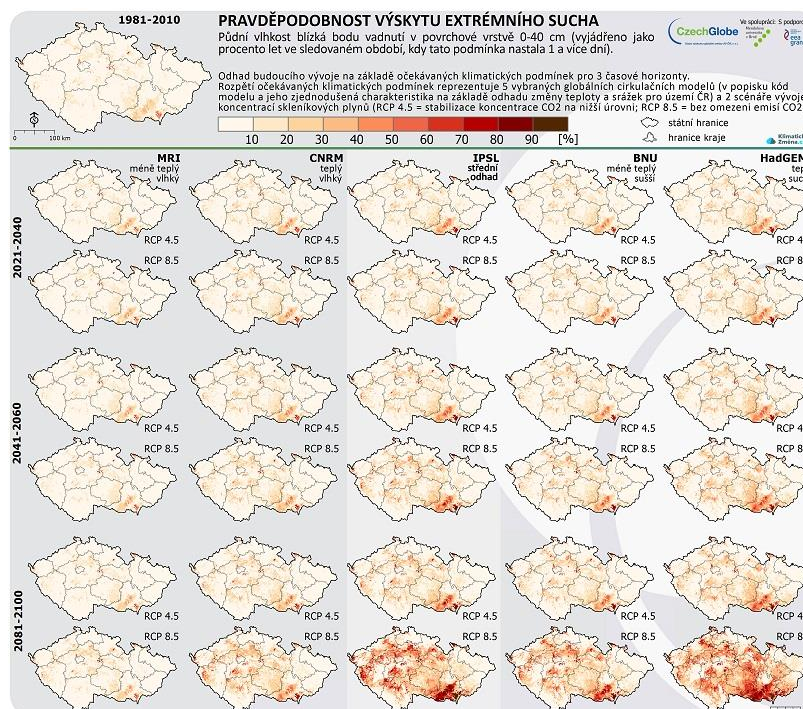
Mapové výstupy prezentují variabilitu jednotlivých klimatických prvků mezi klimatickými modely a mezi RCP. Jak je vidět na obr. 3. 6., variabilita srážkových úhrnů mezi RCM je poměrně vysoká, naopak rozdíly mezi použitými RCP jsou pro jednotlivé časové horizonty relativně nevýznamné. Oproti tomu teploty vykazují daleko vyšší variabilitu v závislosti na použitém RCP, zejména u projekcí na období 2041 – 2100. Vliv použitého RCM není tak výrazný. V případě projekcí pravděpodobnosti výskytu extrémního sucha, se na variabilitě projevuje vliv RCM i RCP. Opět výrazněji v projekcích pro vzdálenější časové horizonty.



Obr. 3.6: Variabilita ročního úhrnu srážek mezi pěti regionálními klimatickými modely ve třech časových obdobích. Pro každé období a model je uvedena projekce řízená RCP 4.5 a 8.5 (zdroj: CZECHGLOBE 2017).



Obr. 3.7: Variabilita průměrné roční teploty vzduchu mezi pěti regionálními klimatickými modely ve třech časových obdobích. Pro každé období a model je uvedena projekce řízena RCP 4.5 a 8.5 (zdroj: CZECHGLOBE 2017).



Obr. 3.8: Variabilita hodnot pravděpodobnosti výskytu extrémního sucha mezi pěti regionálními klimatickými modely ve třech časových obdobích. Pro každé období a model je uvedena projekce řízena RCP 4.5 a 8.5 (zdroj: CZECHGLOBE 2017).



### 3.3. Klimatické databáze a zdroje dat

Klimatické projekce jsou přístupné v různých klimatických databázích. Liší se podle rozlišení, počtu výstupů klimatických modelů a rovněž podle použitých řídicích SRES nebo RCP. Databáze projektu PRUDENCE (CHRISTENSEN ET CHRISTENSEN 2007) např. obsahuje přibližně 70 simulací provedených pomocí patnácti regionálních modelů se dvěma emisními scénáři A2 a B2. Jako řídicí GCM byly použity modely HadCM, HadAM, ECHAM a ARPEGE. Odkazy na podobné projekty z různých oblastí světa jsou k dispozici na internetových stránkách projektu CLIVAR (CLIVAR 2016).

Novější projekce klimatu prováděné se vstupními emisními scénáři RCP jsou k dispozici na webových stránkách mezinárodního projektu CORDEX. Výstupy RCM pro oblast střední Evropy obsahují výstupy z regionu 4 (Evropa) a regionu 12 (Mediterranean), (CORDEX 2016). V ČR se na oblast AKZ resp. jejich projekcí a dopadů na společnost zaměřují např. organizace CzechGlobe v rámci projektu CzechAdapt nebo vědecký tým z VÚV v rámci projektu „Podpora dlouhodobého plánování a návrhu adaptačních opatření v oblasti vodního hospodářství v kontextu změn klimatu“. Výstupy klimatických projekcí jsou k dispozici i formou webových mapových aplikací (CZECHGLOBE 2017, VÚV 2017).

V předkládané studii byly použity projekce klimatu vybrané ze souhrnu provedeného v rámci projektu ENSEMBLES (HEWITT ET GRIGS, 2004, VAN DER LINDEN ET AL. 2009). Uvedená klimatická data, upravená pro oblast střední Evropy, jsou pro období 2010 – 2100 k dispozici v databázi FORESEE (DOBOR ET AL. 2013).

### 3.4. Vliv změny klimatu na lesy

#### 3.4.1 Recentní změny v růstu

Změny produkčních charakteristik jsou pozorovány u většiny evropských hospodářských dřevin. Následující přehled shrnuje výsledky několika studií zaměřených na recentní změny v produkci a růstu způsobených antropogenními faktory. Výčet nezahrnuje všechny studie na dané téma, přináší ale základní souhrn informací o změnách v produkci hlavních hospodářských dřevin ve střední Evropě a nastiňuje možnosti, jak tyto projevy sledovat a kvantifikovat. Zároveň skýtá nezbytná východiska pro interpretaci výsledků simulací dopadů vlivu změny klimatu na produkci dřevin realizovaných v této disertační práci, které je zapotřebí posuzovat v kontextu již pozorovaných změn.

PRETZSCH (1996) provedl porovnání růstových trendů smrku, borovice, buku a dubu v oblasti jižního Německa. Studie byla provedena v oblasti, která byla od 70 – tých let 20. století vystavena vysoké imisní zátěži. Autor upozorňuje na skutečnost, že přestože od roku 1980 dochází u lesních dřevin k zvýšené defoliaci, od roku 1950 vykazují lesní dřeviny zrychlující výškový a objemový přírůst. I tak ale existují mezi jednotlivými druhy dřevin rozdíly a výrazně se projevuje vliv stanoviště. U smrku ztepilého ve vyšších nadmořských výškách tak byl zaznamenán pokles výškového ( $I_h$ ) a objemového přírůstu ( $I_v$ ) oproti smrkovým plochám nižších poloh, kde smrkové porosty vykazovaly výškový a objemový přírůst až o 250% vyšší oproti růstovým tabulkám. Na chudých stanovištích v borových porostech dosahoval  $I_v$  a BAI (*Basal Area Increment*, přírůst na výčetní základně) podobný rozdíl oproti růstovým tabulkám jako u smrku v nižších polohách. V tomto případě se však jednalo o porosty se ztrátou asimilačního aparátu nižší než 60%. Duby a buky nevykazovaly signifikantní reakci na ztrátu olistění, porovnání dvou inventarizačních šetření v posledních dvou dekadách však prokázalo nárůst zásoby porostů v rozsahu 10-20% a zrychlení  $i_v$  oproti tabulkovým hodnotám v rozsahu od 10 – 40%.

MUND ET AL. (2002) provedl analýzu přírůstu v šesti různověkových porostech smrku v severovýchodním Bavorsku. Hodnoty přírůstu byly porovnány s hodnotami z růstových tabulek. Autor vylíčil čtyři období s rozdílnou dynamikou přírůstu. Stejně hodnoty průměrného stromového objemového přírůstu zaznamenal do roku 1940. Období od roku 1970 do poloviny 80. let je charakterizováno poklesem přírůstu poté následuje

opětovné zvýšení přírůstu v dekádě 1984 – 1994. Průměrný přírůst u porostů starších 70 let je stejný nebo vyšší nezávisle na věku. Ve srovnání s růstovými tabulkami reprezentujícími přírůst před rokem 1960, je  $I_v$  vyšší o 150 – 350%. Objem vzorníků byl o 60 – 480% vyšší, než objem z růstových tabulek. Oproti tomu objemový přírůst na úrovni porostu buď mírně poklesl nebo vykazoval jen mírný nárůst 70 – 150%. Jako hlavní faktor ovlivňující přírůst před rokem 1980 uvádí autor pěstební a hospodářsko – úpravnické vlivy, zejména probírkové zásahy nebo meliorační vápnění porostů. Vliv zvyšujících se koncentrací  $CO_2$  a depozic dusíku se ve větší míře projevuje v porostech s nižší hustotou, kde mohou stromy díky rozvinutějšímu asimilačnímu aparátu vliv těchto faktorů efektivněji využít.

Dynamikou růstu smrku ztepilého, borovice lesní a buku lesního resp. příčinami změn v trendech růstu těchto dřevin v Evropském prostoru se zabýval KAHLE ET AL. (2008). Ve své práci shrnuje výsledky projektu RECOGNITION, na kterém spolupracovalo 24 evropských států. Pro výzkum byla využita Evropská síť monitoračních ploch programu ICP Forests. V projektu bylo zjištěno, že většina zkoumaných porostů borovice lesní ve střední Evropě vykazuje v posledních desetiletích signifikantně vyšší výškový přírůst než v minulosti. Hlavní příčinou je výrazné zlepšení výživy způsobené zejména zvýšenou antropogenní depozicí dusíku. Srážky a dostupnost vody významně ovlivňují krátkodobé kolísání přírůstu, u dlouhodobějších změn není jejich význam tak zřejmý. U změn teplot a velikosti koncentrací nebyl zaznamenán přímý vliv na změny v přírůstu v minulosti. Analýzou současného stavu růstu porostů bylo zjištěno, že v období 1960 – 2000 se roční výškový přírůst zvýšil u smrku o 23%, u borovice a buku o 25%. Tloušťkový přírůst v prvních 50 letech života, se v porostech založených ve čtyřicátých a padesátých letech dvacátého století zvýšil oproti stejným porostům založeným na začátku dvacátého století u smrku o 16%, u borovice o 13% a u buku o 27%.

Na základě dendrometrických měření ze třech period NIL (národní inventarizace lesa) v severozápadní Francii, vytvořil CHARRU ET AL. (2010) dva regresní modely pro přírůst kruhové výčetní základny buku (BAI). Byla modelována závislost změny BAI na trofických charakteristikách stanoviště, počtu jedinců a horní výšce porostu. V experimentu bylo využito celkem 925 inventarizačních ploch měřených v období od roku 1977 do 2003. Výsledky obou modelů vykazují mírné odlišnosti. V zásadě však ukazují zrychlení BAI v letech 1979 – 1992 v rozmezí +8,82 – 10,4% a následný pokles o -4,9%. V roce 2004 došlo k opětovnému nárůstu BAI o 5,8%.

V oblasti severní Belgie provedl rozsáhlou studii změn přírůstu kruhové výčetní základny (BAI) buku, dubu a borovice lesní KINT ET AL. (2012). Jedná se o oblast temperátního Atlantického klimatu s nadmořskou výškou v rozsahu od 7 do 300 m n. m. Analýza prokázala zrychlení přírůstu u dubu v průběhu 20. století. Přírůst na kruhové základně se v letech 1901 – 2008 zrychlil o 123%. V případě buku bylo zaznamenáno zrychlení růstu od počátku století do časných 60. let o 34% a poté začal klesat. V roce 2008 dosahoval pouze 15% hodnot z počátku století. 80. let 20. století. V případě borovice nebyly prokázány signifikantní změny v přírůstu. Zrychlení přírůstu je dle autora způsobeno klimatickými změnami a zvýšenou depozicí dusíku. Výsledky rovněž ukazují na možné problémy s pěstováním buku v souvislosti se zpomalováním jeho přírůstu od 60. let minulého století.

Výzkum změn radiálního přírůstu (RI) jedle v závislosti na faktorech prostředí a koncentracích  $\text{NO}_3$  a  $\text{SO}_2$  ve čtyřech regionech západních Karpat provedl BOŠELA ET AL. (2014). Jako nejdůležitější faktory ovlivňující pozitivně RI uvádí snížení koncentrací  $\text{SO}_2$  a  $\text{NO}_3$  v ovzduší, spolu s nárůstem teplot v měsících dubnu, červnu a červenci. Přestože mezi plochami existují rozdíly, ve všech čtyřech případech bylo zaznamenáno rapidní zrychlení přírůstu v posledních dvou až třech dekadách, které dosahuje hodnot od 150 do 300% oproti předchozím rokům.

Změnami v přírůstu lesních porostů smrku a buku v Německu od roku 1870 do současnosti se věnoval PRETZSCH ET AL. 2014. Jeho výzkum je založen na empirických měřeních z 58 smrkových a 22 bukových ploch. Statistické vyhodnocení produkčních charakteristik porostu prokázalo jejich závislost jak na věku porostu, tak na roce ve kterém bylo vyhodnocení provedeno. Průměrný roční objemový přírůst vykazuje za období 1960 – 2000 nárůst o 10% pro smrk a 30% pro buk a to při poklesu počtu jedinců na ha (o 17% u smrku a 21% u buku).

Tabulka 3.2: Přehled vybraných prací zaměřených na hodnocení recentních změn v růstu, produkci nebo dalších ukazatelích vývoje porostů ve vztahu k pozorovaným změnám klimatu.  $I_d$ : průměrný tloušťkový přírůst,  $I_h$ : průměrný výškový přírůst,  $I_v$ : průměrný objemový přírůst,  $V$ : zásoba porostu, BAI: přírůst na kruhové výčetní základně,  $H_{max}$ : horní výška porostu,  $DBH_{avg}$ : tloušťka středního kmene,  $V_{avg}$ : objem středního kmene, RI: radiální přírůst.

<b>Autor</b>	<b>Dřevina</b>	<b>Region</b>	<b>Veličina</b>	<b>Změna</b>
PRETZSCH 1996	smrk	jižní Německo	$I_h, I_v$	250%
	buk, dub		$V$	10-20%
KAHLE ET AL. 2008	smrk	střední Evropa	$I_h$	+23%
	borovice		$I_h$	+25%
	smrk		$I_d$	+16%
	borovice		$I_d$	+13%
	buk		$I_d$	+27%
CHARRU ET AL. 2010	buk	SZ Francie	BAI (%)	+10,4 až -5%
KINT ET AL. 2012	buk	severní Belgie (Flandry)	BAI (%)	15-34%
	dub			123%
	borovice			beze změn
PRETZSCH ET AL. 2014	smrk	střední Evropa	$H_{max}$	+6%
	buk		$H_{max}$	+9%
	smrk		$DBH_{avg}$	+6%
	buk		$DBH_{avg}$	+14%
	smrk		$V_{avg}$	+34%
	buk		$V_{avg}$	+20%
	smrk		$V$	+6%
	buk		$V$	+9%
BOŠELA ET AL. 2014	jedle	střední Evropa, SZ Karpaty	RI	Od 150-300%

Změny v přírůstu se ve větší nebo menší míře týkají všech hlavních hospodářských dřevin. Všechny studie (tab. 3. 2.) prezentované v této kapitole zaznamenaly jeho zrychlení. Tyto změny způsobují různé faktory, jako jsou depozice oxidů dusíku a síry, stav výživy nebo vývoj klimatických charakteristik. Nelze jednoznačně prohlásit, že trend zrychleného přírůstu, bude mít trvalý charakter a nejedná se pouze o dočasnou epizodu způsobenou např. mírným nárůstem teploty nebo reakcí na pokles imisního zatížení. Vzhledem k široké oblasti výskytu těchto změn je však nelze brát na lehkou váhu a je nutné přijmout včas a v dostatečné míře odpovídající managementové a pěstební opatření, které budou na tyto změny reagovat.

### **3.4.2 Očekávaný vliv změny klimatu na produkci dřevin v regionu střední Evropy**

Mnoho studií zabývajících se vlivem AKZ na dynamiku lesních ekosystémů se zaměřuje na změny v produkci (TATARINOV ET CIENCIALA 2009; RÖTZER ET AL. 2013; REYER ET AL. 2014), struktuře porostů (RUIZ-BENITO ET AL. 2014) v distribuci druhů lesních dřevin (DELZON 2013; HANEWINKEL ET AL. 2013) nebo ve schopnosti lesního ekosystému alokovat uhlík (MÄKIPÄÄ ET AL. 1999; HLÁSNY ET AL 2011A, 2015). Další práce odhadují vývoj ekonomických ztrát resp. výnosů (HANEWINKEL ET AL. 2013) nebo změny v zranitelnosti lesních ekosystémů (LINDNER ET AL. 2010). Důležitou součástí podobných studií je i testování různých druhů managementů lesních porostů (SEIDL 2011; ALBERT ET AL. 2015; HLÁSNY ET AL. 2015, 2016).

V následujícím přehledu je uveden přehled prací věnovaných využití modelů při hodnocení vlivu změny klimatu na produkci, růst nebo akumulaci uhlíku lesních porostů. Pozornost byla věnována studiím zásadnějšího významu, hodnotící stejné dřeviny, jako v předkládané práci a využívající podobný koncept modelování nebo studie významné z hlediska interpretace našich výsledků. Tyto informace jsou zásadní pro návrh experimentu realizovaného v rámci disertační práce.

#### **STUDIE KAHLE ET AL. (2008)**

**Metody:** Projekce vývoje lesních porostů byla provedena s pomocí 4 procesních modelů. EFIMOD (CHERTOV ET AL. 1999, KOMAROV ET AL. 2003), EFM (THORNLEY 1991), FinnFor (KELLOMÄKI & VÄISÄNEN 1997) a modelu Q (AGREN & BOSATTA 1998). Jako emisní scénář vývoje koncentrací byla zvolena střední varianta vývoje koncentrací

skleníkových plynů, definovaná v IPCC 1999. Pro vývoj depozic dusíku byly testovány tři varianty vývoje, minimální, střední a vysoká. Pro simulaci vývoje klimatu byly použity jednak empiricky zjištěné hodnoty (tam kde byly k dispozici), jednak modelová data. Pro rekonstrukci klimatických podmínek od roku 1920 – 1980 byla použita databáze CRU (NEW ET AL. 2000), projekce vývoje klimatu do budoucna byla provedena na základě výstupu klimatického modelu GCM HadCM3.

**Výsledky:** Výsledky simulací naznačují, že role faktorů prostředí na přírůst se v budoucnu budou měnit. Zejména v období blízké budoucna (2000 – 2080), se bude zvyšovat role rostoucích koncentrací CO<sub>2</sub> a dále, zejména v severních šířkách, bude hrát významnou roli nárůst teplot. Současně bude vzrůstat výskyt, resp. vliv častějších epizod spojených s vodním stresem a nedostatkem živin (s výjimkou dusíku). Zvýšený přírůst a s ním spojená vyšší akumulace dendromasy bude v blízké budoucnu vyžadovat změny v pěstování a managementu lesa. Tyto změny by měly spočívat ve zkrácení doby obměny a ve zvýšení četnosti resp. intenzity výchovných zásahů. Tato opatření bude nutné přijmout v blízké době zejména v oblasti střední Evropy, ale v budoucnu bude nutné podobným způsobem změnit management lesních porostů i v Evropě severní. Pro dosažení udržitelného způsobu hospodaření bude v budoucnu nutné věnovat vyšší pozornost otázkám výživy lesních porostů.

#### **STUDIE PRETZSCH ET AL. (2014)**

**Metody:** V rámci studie byly provedeny simulace růstu na 36 smrkových a 22 bukových plochách v oblasti střední Evropy, pomocí procesního modelu BALANCE (PRETZSCH 2008). Simulace byla provedena pro historické a současné klimatické a stanovištní podmínky.

**Výsledky:** Simulace ukázala pokles zásoby v případě kdy klimatický scénář z období 1901 – 1930 byl nahrazen současným (1981 – 2010). Tento výsledek byl zaznamenán jak pro buk, tak pro smrk, významněji se však projevil u smrku. Výsledky naznačují, že sledované změny v teplotách, sumách srážek a délce vegetační sezony nemohou zcela vysvětlit změny v růstových trendech buku a smrku pozorovaných v současnosti. Při zahrnutí změn v atmosférických koncentracích CO<sub>2</sub> a depozicích N do modelu porosty vykazovaly rapidní zrychlení růstu. Výrazněji se tento efekt projevil na nutričně lépe zásobovaných stanovištích než na chudších.

### **STUDIE HANEWINKEL ET AL. (2013)**

**Metody:** Autoři své závěry opírají o výsledky modelování podle tří SRES A1B, B2 a A1F1 a čtyř RCM v simulačním modelu EFISCEN (SCHELHAAS ET AL. 2007). Hlavní hospodářské dřeviny byly rozděleny do sedmi skupin podle produkčního významu a jejich zastoupení v Evropě bylo modelováno s pomocí údajů z ploch ICP Forests (FISCHER ET AL. 2010).

**Výsledky:** Očekávané klimatické změny významně ovlivní distribuci ekonomicky významných dřevin v lesích. HANEWINKEL (2013) odhaduje, že ekonomická ztráta, dosažená změnou dřevinné skladby, se do roku 2100 může v Evropě (s výjimkou ruské části), pohybovat mezi 14 – 50% (v průměru 28%). Hlavní změna spočívá v rozšíření středozemního typu lesa s převahou dubu. Tyto lesní porosty mají nízkou ekonomickou návratnost, současně se výrazně sníží i alokace uhlíku. Všechny tři klimatické scénáře předpokládají pokles rozlohy lesů produkčních jehličnatých dřevin. U smrku je to přibližně 50% pokles oproti současné rozloze u borovice pokles o 40%.

### **STUDIE RÖTZER ET AL. (2013)**

**Metody:** Simulace byly provedeny pomocí 9 RCM z projektu ENSEMBLES pod SRES A1B s modelem dynamiky lesa BALANCE se zaměřením na bukové porosty západního Německa. Studie byla zaměřena na objasnění změn v produkci a schopnosti využití vody způsobených KZ.

**Výsledky:** Autoři upozorňují, že lze v těchto porostech očekávat na konci 21. století pokles čisté primární produkce o 30%. Schopnost využití vody bude snížena o přibližně 13%. Jako hlavní důvody uvádí zvýšení mortality a dostupnosti vody a vyšším stresem způsobeným suchem.

### **STUDIE REYER ET AL. (2014)**

**Metody:** Autoři provedli analýzu změn v čisté primární produkci (NPP) uhlíku vlivem AKZ pro hlavní evropské hospodářské dřeviny (smrk ztepilý, borovice lesní, buk lesní a dub letní resp. zimní). Do analýzy nebyly zahrnuty vlivy disturbancí a managementu. Simulace vývoje byly provedeny na vybraných monitoračních plochách druhé úrovně, programu ICP Forests. Výsledky jsou k dispozici pro hlavní Evropské bioklimatické zóny. Plochy reprezentují širokou škálu stanovišť od lokalit s mediteránním klimatem až po boreální lesy. Celkem byl hodnocen vývoj na 132 plochách. Projekce zahrnuje



varianty s fyziologickou reakcí dřevin na zvýšený obsah CO<sub>2</sub> v ovzduší (persistence, aklimace).

**Výsledky:** Roční přírůst zásoby uhlíku v Mg ha<sup>-1</sup> rok<sup>-1</sup> jehličnatých dřevin dosahoval kladných hodnot mediánů napříč zkoumanými klimatickými zónami, listnaté dřeviny vykazovaly pokles. U smrku, buku a dubu byl zaznamenán mírný pokles produkce na gradientu sever – jih, u borovice nebyl tento trend zaznamenán. Vliv aklimace na produkci nebyl pro kontinentální oblast (zahrnující i ČR) prokázán.

#### **STUDIE HLÁSNY ET AL. (2011A)**

**Metody:** Autoři studie analyzovali dopad klimatických změn na růst a přirozenou mortalitu lesních dřevin a koloběh uhlíku v lesních ekosystémech. Hodnoceny byly dřeviny smrk ztepilý, buk lesní a dub v gradientu umístěném od Panonské nížiny po západní Karpaty. Zkoumány byly periody 2021 – 2050 a 2071 – 2100. Jako referenční období byla použita perioda od roku 1961 – 1990. Simulace růstu lesa byly provedeny pomocí růstového simulátoru Sibyla (FABRIKA & ĎURSKÝ 2005) a pro modelování uhlíkového cyklu byl použit model BIOME-BGC (WHITE ET AL. 2000).

**Výsledky:** Projekce růstu prokázaly výrazný vliv klimatických změn na přírůst buku a smrku, nikoliv však tak výrazný na přírůst dubu. Buk a smrk ve vyšších polohách jejich rozšíření vykazoval zlepšení přírůstu, pokles byl zaznamenán u buku v nižších polohách a na hranicích jeho přirozeného rozšíření. Změny v produkci dubu v nižších polohách od 1 do 3 LVS jsou zanedbatelné pro všechna tři posuzovaná období. Nejvýraznější změna, zvýšení produkce o 8%, byla zaznamenána v 6 LVS. Nutno ovšem podotknout, že se jedná o oblast v současné době mimo areál rozšíření dubu. Mortalita byla víceméně stejná ve všech LVS.

Změny v produkci smrku a buku, napříč LVS mají podobný průběh. Oba druhy vykazují pokles produkce na spodní hranici jejich rozšíření, zatímco ve vyšších LVS vykazují smrk a buk nárůst produkce. Jako produkční optimum buku lze stanovit prostor od 3 do 5 LVS. Simulované změny produkce v 7 – 8 LVS stupni, jsou negativní a indikují vyšší mortalitu než očekávaný přírůst. Jedná se nicméně o prostor nad hranicí přirozeného výskytu buku. V blízké budoucnosti (2021-2050) lze očekávat pokles produkce od 5 – 10% v 1 a 2 LVS. Ve 3 – 4 LVS je očekávaný pokles produkce cca 10%. Produkce v 5. LVS zůstává prakticky beze změn, nárůst od 15 do 40% lze očekávat v 6. a 7. LVS. Mortalita se stabilně pohybuje v rozmezí ±4 – 5% ve všech LVS.

Z hlediska pěstování buku v budoucnosti se jeví jako nejvíce problematický 1. a 2. LVS kde lze v období 2050- 2100 očekávat pokles produkce až o 50% a nárůst mortality mezi 20-40% v porovnání s periodou 2021-2050.

V případě smrku simulace ukazují, že v blízké budoucnosti lze očekávat pokles produkce ve 4. LVS a naopak nárůst v 6. – 8. LVS. Prakticky žádné rozdíly v produkci nebyly zaznamenány v 5. LVS. Produkční optimum smrku v období 2051 – 2100 se nachází v rozmezí od 5. do 7. LVS. V nižších LVS dochází k dalšímu poklesu produkce a nárůstu mortality.

### **STUDIE SEIDL (2011)**

**Metody:** Autor vyhodnotil míru zranitelnosti lesních porostů vlivem klimatických změn v oblasti Rakouských východních Alp. Pro simulaci vývoje klimatu byl použit klimatický model ECHAM 5 řízený ES A1B, A2 a B1. Ve studii bylo zahrnuto 9 rozdílných typů stanovišť ve 25 klimatických regionech. Pro modelování změn dynamiky lesa byl použit hybridní model PICUSv1.4. Jako indikátory zranitelnosti lesních ekosystémů byly vybrány čtyři faktory. Produktivita, dřevní zásoba, zásoba uhlíku, biodiverzita a míra disturbancí. Zkoumán byl vliv jejich změn na změnu ekologické niky dřevin a dále vliv na socioekonomické charakteristiky a management lesních porostů. Pomocí multikriteriální analýzy byl kvantifikován souhrnný dopad zkoumaných faktorů a jejich vliv na ekologické a socioekonomické parametry lesních ekosystémů. Míra zranitelnosti je klasifikována do čtyř tříd (vysoká, střední, nízká a žádná).

**Výsledky:** Do kategorie vysoké zranitelnosti je v období 2001-2010 zařazeno 5% plochy zkoumané oblasti. Tato hodnota však drasticky vzrostla na 39,6% v období 2051 – 2100. Ve stejném období byl rovněž zaznamenán pokles plochy v kategorii „žádná zranitelnost“ na 15,1%. Z hlediska vegetační stupňovitosti je nejvíce ohrožena oblast na rozhraní pahorkatin a sub-montánní oblasti, kde je v období druhé poloviny 21. století zařazeno do kategorie „vysoké zranitelnosti“ 71,9 – 82,2% plochy. Z ohledem na půdní vlastnosti patří mezi nejvíce ohrožené porosty na rendzinách a kambizemích se střední hloubkou půdy na vápencovém podloží (50% plochy ve druhé polovině 21. století).

### **STUDIE TATARINOV & CIENCIALA (2009)**

**Metody:** Projekce vývoje zásob uhlíku v porostech buku, dubu, smrku a borovice byly provedeny pomocí procesního modelu BIOME-BGC (THORNTON 1998). Byly

aplikovány 2 emisní scénáře vývoje depozic dusíku a koncentrace CO<sub>2</sub>. Pro první scénář byl použitý průměrný vývoj koncentrací CO<sub>2</sub> ze SRES A1 a B2 a depozice N jako „prolongování“ vývoje depozic v letech 1990 – 2000 s následnou stabilizací koncentrací. Kontrolní scénář předpokládá vývoj bez významných změn. Pro simulace klimatických změn byly použity 3 RCM.

**Výsledky:** V podmínkách temperátních lesů střední Evropy lze předpokládat snížení akumulace uhlíku v jehličnatých porostech a zvýšení v porostech listnatých. Jako hlavní faktor ovlivňující vyrovnanost toků uhlíku v lesních ekosystémech byla vyhodnocena dynamika depozic dusíku. Významný vliv má rovněž výskyt extrémně vysokých teplot v letním období. Výraznější pokles akumulovaného uhlíku byl zaznamenán u jehličnatých dřevin. Pro studium vlivu klimatických změn je vhodnější využití měsíčních souhrnných dat.

Tabulka 3.3: Přehled vybraných prací zaměřených na hodnocení budoucích změn v produkci nebo dalších ukazatelích vývoje porostů ve vztahu k predikovaným změnám klimatu.

<b>Autor</b>	<b>Dřevina</b>	<b>Region</b>	<b>Období</b>	<b>Veličina</b>	<b>Změna</b>
KAHLE ET AL. 2008	smrk	Evropa	1960 -2040	NPP	8,8%
	borovice		2000 –	NPP	8,8%
	smrk		2080	NPP	11,4%
	borovice			NPP	7,2%
HANEWINKEL ET AL. (2013)	dub		2100	Plocha výskytu	+100%
	smrk		2100		-43 – -60%
	borovice		2100		-60%
RÖTZER ET AL. (2013)	buk	JZ Německo	2099	NPP	-30%
HLÁSNY ET AL. (2011A)	dub	Česká republika	2021 – 2100	NPP	±1 – 3%
	buk 1-2 LVS		2021 – 2050		-5 – -10%
	buk 6 – 8 LVS				+ 15 - +40%
SEIDL (2011)		Rakousko, východní Alpy	2051-2100	Plocha vysoce zraniteln ých porostů	+39,6%
TATARINOV & CIENCIALA (2009)	Buk, smrk	Česká republika	2100	NPP	-2 – -6%

### 3.5 Modely dynamiky lesa

Les je složitý systém, ve kterém probíhá řada procesů a jejich interakcí. Jejich výzkum bylo donedávna možné provádět převážně na bázi empirického pozorování. V současnosti jsou stále častěji ke studiu této problematiky využívány různé ekosystémové modely. Integrace modelů do ekosystémového výzkumu umožňuje efektivně kvantifikovat a studovat vliv komplexních interakcí a zpětných vazeb v rámci systému (LIU ET AL. 2007). Model může pomoci určit, které proměnné resp. interakce jsou v rámci komplexního systému hnací silou. Využitelnost modelů je dále podpořena rychle rostoucí datovou základnou empiricky zjišťovaných dat. Proces získávání informací je v současnosti výrazně efektivnější. Jestliže v minulosti byly výzkumy často limitovány objemem dostupných dat, v současnosti je situace opačná a lze mluvit o éře „hojnosti“ (HAMPTON ET AL. 2013). Příkladem mohou být např. metody DPZ, které jsou schopny s vysokým časovým a prostorovým rozlišením poskytovat údaje o strukturálních charakteristikách lesa ale i průběhu mnoha biofyzikálních procesů.

Významným trendem, který by bez modelování nebyl možný je i „upscaling“, tedy přenos informací resp. postupů z nižších jednotek na vyšší, využívaný často v souvislosti s problematikou klimatických změn, vymírání rostlinných a živočišných druhů, nebo pro kvantifikaci uhlíku v ekosystémech. Modely hrají nezastupitelnou roli při studiu těchto změn v dlouhodobých časových řadách. Využití modelů není možné, bez předchozího empirického výzkumu, který má epistemologickou přednost před modelováním. Budoucí vývoj by však měl směřovat k využití celého „arsenálu“ přístupů, tedy větší integraci modelování do výzkumu ekosystémů a vyvážené využití obou přístupů (SEIDL 2017).

MDL je v současnosti k dispozici celá řada a orientace mezi nimi může být složitá. Proto někteří autoři vypracovali různé druhy klasifikací, které mohou uživateli pomoci při výběru vhodného modelu. Jeden ze způsobů členění uvádí KURTH (1994). Modely se dle této klasifikace dělí na empirické, procesní a strukturální.

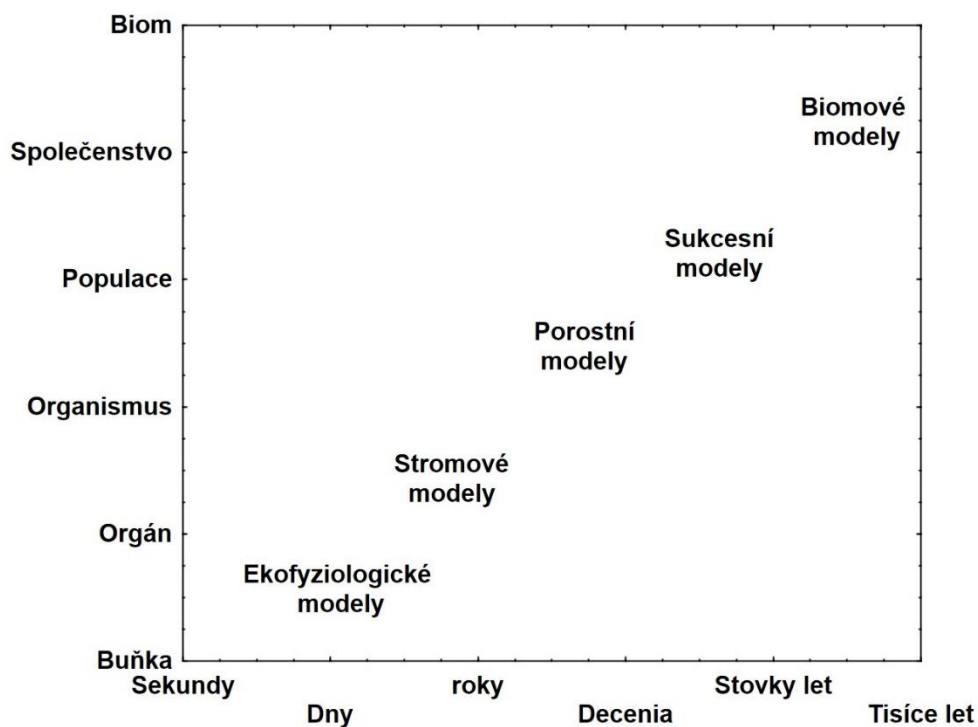
Empirické modely jsou založeny na empirických měřeních, na jejichž základě jsou statisticky odvozeny zákonitosti, kterými se řídí modelový růst. Empirické přírůstové modely jsou obvykle založeny na bázi dlouhodobých inventarizačních měření. Interakce jsou zahrnuty v těchto modelech využitím korekčních a kompetičních indexů (PRETZCH ET AL. 2015).

Procesní modely vycházejí při modelování přímo s fyziologických procesů rostlin. V současnosti procházejí nejdynamičtějším rozvojem. Příkladem procesního modelu je např. model BALANCE (GROTE AND PRETZSCH 2002, RÖTZER ET AL. 2010), FORCLIM (BUGMANN 1996) nebo BIOME-BGC (WHITE ET AL. 2000). Procesní modely simulují fyziologické procesy ovlivňující růst a to, jak jsou tyto procesy ovlivňovány prostředím. Strukturální modely vycházejí z morfologie růstu jednotlivých orgánů rostlin. Cílem tohoto druhu modelování je dosažení co nejvěrnějšího obrazu stromu resp. rostliny. K tomu jsou obvykle využívány tzv. Lindenmayerovy systémy (L – systémy, LINDENMAYER 1968). Příkladem takového modelu je systém GROGRA (FABRIKA & PRETZSCH. 2011, KURTH 1994).

Samostatnou skupinu tvoří tzv. semi – empirické resp. hybridní modely, které kombinují vlastnosti empirických a procesních modelů (SEELY ET AL. 2015; WIKIPEDIA 2018). Do této skupiny patří např. modely PICUS (SEIDL 2005) nebo Sibyla. Hybridní modely existují ve dvou variantách. První kombinuje postupy procesních a empirických modelů, druhá využívá empirické a mechanistické postupy (PRETZSCH ET AL. 2015). Modely se dále dělí podle úrovně modelování na stromové, frekvenční, porostní a krajinné. U stromových modelů rozeznáváme podle toho, jestli vyžadují informaci o poloze stromů či nikoliv, modely distančně závislé a distančně nezávislé. Distančně závislémi modely jsou např. SILVA (PRETZSCH ET AL. 2002) a Sibyla (FABRIKA 2005). Frekvenční modely slouží pro kvantifikaci změn početnosti stromů v tloušťkových resp. věkových třídách (ROBERTS 1996). Porostní modely vyhodnocují změny dynamiky na porostní úrovni a pracují s charakteristikami střední výška, střední tloušťka, výčetní základna atd. Krajinné modely pracují na úrovni rozsáhlejších geografických jednotek. Příkladem je např. model ILand (SEIDL ET AL. 2012).

Jiný systém diferenciací modelů uvádí PRETZSCH (2009). Tento systém klasifikuje modely na základě délky modelovaného období a komplexnosti modelu. Ekofyziologické modely popisují činnost buněk a orgánů. Tyto procesy probíhají v časovém horizontu sekund až dní. Stromové modely pracují na úrovni jedinců a popisované jevy trvají v řádu roků. Popis vývoje populace v lesních ekosystémech je zpracováván pomocí porostních modelů a časové rozsahy se zde pohybují v řádu desetiletí. Sukcesní a biomové modely pracují v řádu století a jsou využívány k popisu vývoje společenstev resp. biomů. Se složitostí modelovaného systému klesá míra znalostí, proto jsou nejpřesnější

ekofyziologické modely, naopak projekce sukcesních resp. biomových modelů vykazují nejvyšší míru nejistot. Systém klasifikace je zobrazen na obr. 3. 9.



Obr. 3.9: Klasifikace růstových modelů podle PRETZSCHE (2009). Na ose X je hierarchická úroveň, osa Y zobrazuje délku časové řady, na které probíhá modelování.

SEELY ET AL. (2015) shrnuje vlastnosti modelů vhodných pro simulaci vývoje lesa v podmínkách klimatické změny. Vhodný model by měl být schopen reprezentovat dopady změny klimatu na produktivitu lesů a na mortalitu související se suchem a měl by zahrnovat možnost simulovat různé způsoby managementu lesa. Důležitou vlastností je rovněž dostatečný rozsah výstupů potřebných pro správu lesa a jednoduchá kalibrace. Autor rozlišuje tři skupiny modelů používaných pro modelování vlivu klimatických změn na lesy. Prvním jsou dynamické modely globální vegetace, druhým jsou statistické modely odvozené z analýzy klimatu a třetím procesní modely.

Dynamické modely globální vegetace jsou primárně určeny k vyhodnocení vlivu klimatických změn na biogeochemické a hydrologické procesy regulující dynamiku růstu vegetace. Jsou navrženy tak, aby předpovídaly obecná pravidla rozvoje vegetace ve velkých časových a prostorových měřítkách. Nevýhodou je omezená použitelnost pro hodnocení alternativních adaptačních strategií.

Výhodou modelů z druhé skupiny, mezi které patří např. model Forest Vegetation Simulator (CROOKSTON ET AL. 2010) je, že mají obvykle nízké nároky na kalibraci. Nevýhody spočívají v omezených možnostech podchycení základních mechanismů reakce na AKZ. Další problémy mohou být způsobeny tím, že jejich fungování vychází z předpokladu, že současná distribuce druhů je ovlivněna pouze klimatem. Modely mají rovněž sporné výsledky v případě, že dojde k projevům AKZ, které jsou mimo rozsah jeho statistických základů.

Třetí skupinu tvoří procesní modely, které simulují vývoj lesa a produkci pomocí fyziologických a fyzikálních principů ve spojení se simulovanými edafickými podmínkami. Zahrnují širokou škálu modelů od komplexních výzkumných ekosystémových modelů (např. ECOSYS, GRANT ET AL 2006) přes méně složité modely orientované na řízení, jako je CABALA (BATTAGLIA ET AL. 2004) až po relativně zjednodušené modely určené pro širokou aplikaci, jako je 3PG (LANDSBERG ET AL. 1997).

Složitější modely obsahují obvykle velké množství parametrů specifických pro danou lokalitu a druh, což může stěžovat jejich kalibraci. Zjednodušené modely mají většinou nižší požadavky na kalibraci, ale nejsou schopné dostatečně podchytit složitosti managementu souvisejícího s klimatickými změnami.

Kompromisní přístup umožňují "hybridní" modely založené na procesech, ve kterých jsou empirické údaje zadané v modelu používány k "samokalibraci" alespoň některých parametrů algoritmu spojených s ekosystémovými procesy. To umožňuje zachovat adekvátní složitost modelu při minimalizaci kalibračního zatížení (GIRARDIN ET AL. 2008).

Rozvoj simulátorů vývoje lesa bude s největší pravděpodobností spjat s vývojem a zdokonalováním procesních modelů. Jejich souhrn a možnosti jejich využití prezentuje FONTES ET AL. (2010). Rozšířenou informaci se zaměřením na použití pro modelování růstu smíšených porostů podává PRETZSCH ET AL. (2015).

Podobně jako při modelování změn klimatu, je v některých případech vhodné při predikcích pracovat s více modely a jejich výsledky porovnávat. Příkladem takové studie je využití procesních modelů Q, FINNFOR, EFIMOD a EFM ve studii KAHLE ET AL. (2008). Hlavním důvodem těchto postupů je zohlednění nejistot a hodnocení rizik při modelování pomocí MDL.



MDL nacházejí široké uplatnění v mnoha oblastech a nepoužívají se pouze k modelování růstu a vývoje zásoby, ale slouží i ke kvantifikaci uhlíku a živin v lesních ekosystémech. Uplatňují se při kvantifikaci rizik, plynoucích z využití různých pěstebních a hospodářsko - úpravnických opatření, ale i pro predikci změn v lesních ekosystémech způsobených klimatickými změnami. Studie zaměřené na procesy související z vývojem lesních ekosystémů si v současnosti bez využití MDL nelze představit. S rozšiřováním znalostí bude jejich význam dále narůstat. Vývoj modelů by měl v budoucnu směřovat k vytvoření integrovaného systému znalostí a využívání a tvorbu modelů, které budou schopny překlenovat problematiku ekologie, využívání krajiny a produkce (PRETZSCH ET AL. 2008).

### **3.6 Adaptace lesů a lesního hospodářství na změnu klimatu**

Pojem adaptace v lesnictví lze chápat jako udržitelný management lesních porostů, ve kterém je zahrnuta i problematika AKZ. Adaptace na změnu klimatu je v širším smyslu definována jako „očekávání nepříznivých vlivů a realizace přiměřených opatření pro vyhnutí se nebo zmírnění těchto vlivů, nebo využití příležitostí, které mohou vzniknout“ (EUROPEAN COMMISSION 2014). Adaptace lesů na změnu klimatu zahrnuje soubor opatření, které zohledňují nestabilitu klimatických podmínek a směřují k zvýšení flexibility hospodaření v lesích a snižování rizik poškození nebo zničení lesních porostů.

SPITTLEHOUSE & STEWART (2003) definuje tři oblasti, na které je třeba se při adaptaci zaměřit a pro každou oblast vymezuje její rizika a krátkodobá a dlouhodobá adaptační opatření. Z hlediska lesního hospodářství je nejvýznamnější první oblast, kterou je efekt pravidelných vln vysokých teplot a epizod sucha na přírůst lesních dřevin. Největší rizika spatřují v redukci přírůstu, nárůst škod vlivem požárů a přemnožení biotických škůdců, pokles kvality a množství vytěženého dřeva, redukce přirozené obnovy a nárůst výskytu invazních druhů. Jako krátkodobá opatření navrhuje autor využití odolnějších proveniencí lesních dřevin, zavedení technologií zpracování dřeva, které budou schopny efektivně využívat i dřevo nižší kvality, zavedení klimatických proměnných do růstových modelů lesa a definování principů krajiny odolné vůči požárům. Dlouhodobá opatření zahrnují modifikace semenářských oblastí a transferu osiva mezi nimi, zavádění alternativních genotypů lesních dřevin a nových druhů. V oblasti pěstební a hospodářsko-úpravnické je to zvýšení podílu zdravotních výchovných a obnovních zásahů a změna v délce obnovní

doby porostů. Posledním opatřením jsou změny krajiny zaměřené na minimalizaci šíření biotických škůdců.

BOLTE ET AL. (2009) shrnul adaptační opatření, pomocí kterých lze následky nepříznivých period zmírnit. Jeho koncept „adaptivního lesního hospodářství“ je založen na třech základních principech. Jsou to zachování struktury lesa, aktivní adaptace a pasivní adaptace.

Princip ochrany struktury lesa spočívá v zachování porostu ve stávajícím stavu. Jedná se o rizikový postup, který může způsobit výrazné ztráty na lesních porostech a měl by se používat jen tam, kde není očekáván velký vliv KZ a porosty jsou přirozeně rezistentní vůči klimatickému stresu. Porosty by měly být vyššího věku a stávající stav by měl zaručovat zachování ekonomické hodnoty a rovněž plnění ostatních mimoprodukčních funkcí. Stav porostu by měl rovněž zaručovat vysokou pravděpodobnost přežití a to i za cenu dodatečných pěstebních opatření.

Strategie aktivní adaptace předpokládá taková pěstební opatření (prořezávky, probírky atd.), pomocí kterých lze dosáhnout změn ve struktuře a dřevinné skladbě tak, aby byl výsledný porost schopen čelit důsledkům klimatických změn. Mezi tato opatření patří např. úprava (resp. zkrácení) obnovní doby. Dalším příkladem je přechod na smíšené porosty s vhodnou směsí tolerantních a citlivých dřevin a to jak původních tak introdukovaných, případně jiných proveniencí. Tyto druhy resp. provenience mohou být potenciálně lépe adaptované na KZ než původní druhy. Kritéria pro použití této strategie jsou nízký věk a nízká tolerance vůči klimatickým a stanovištním změnám, dále ohrožení okolních porostů biotickými, nebo abiotickými činiteli nebo snížená schopnost plnění mimoprodukčních funkcí porostu.

Princip pasivní adaptace využívá přirozených přírodních procesů. Minimalizuje vstupy, ale eliminuje možnost zasahovat do vývoje porostu. Použití přichází v úvahu u porostů s nízkou ekonomickou a funkční hodnotou, nebo tam kde nelze provést odpovídající adaptační opatření, např. z důvodu obtížné dostupnosti. Postupy pasivní adaptace je rovněž vhodné použít tam, kde lze očekávat lepší ekonomické zhodnocení než při použití předchozích dvou principů.

Adaptační možnosti pro lesní hospodářství rozděluje LINDNER ET AL. (2010) na dvě základní skupiny. První jsou vnitřní adaptivní kapacity dřevin a ekosystému, do druhé

skupiny patří socio-ekonomické faktory a možnosti jejich implementace přímo do plánování adaptačních opatření.

Všechny dřeviny procházejí přirozeným vývojem a v jeho průběhu se často musely vypořádat s dlouhodobými změnami prostředí. Tyto vlastnosti jsou často v běžném prostředí nepostižitelné a projevují se až v okamžiku působení stresových faktorů.

BRANG ET AL. (2014) ve svém návrhu adaptačních opatření vychází z konceptu přírodě blízkého způsobu hospodaření. Shrnuje základní okruhy, kterým je třeba věnovat pozornost. Jsou to zvýšení druhové a strukturní diverzity, zvýšení genetické variability v rámci druhu, nárůst rezistence proti biotickým a abiotickým stresorům, přemístění vysoce rizikových porostů a konečně udržování nižší zásoby porostů.

Smíšené porosty vykazují větší odolnost proti disturbancím biotického a abiotického charakteru, což je dáno odlišností v reakci jednotlivých druhů na stres. Kalamitní škůdci jsou ve většině případů monofágní nebo oligofágní a poškození jedné dřeviny ve smíšených porostech tak nemusí nutně znamenat rozpad celého porostu. Kombinace strukturní a druhové diverzity napomáhá zvýšení odolnosti vůči stresujícím faktorům. Pro její udržení je důležitá ochrana přirozeného zmlazení. Hlavním faktorem je v tomto případě snížení početních stavů spárkaté zvěře, z adaptačních opatření však nelze vyjmout ani práci s nárosty a důsledné uplatňování vhodných výchovných zásahů. Vliv zvýšené druhové diverzity nemusí být striktně pozitivní. SCHUME ET AL. (2004) např. upozorňuje na zvýšené nároky na vodu ve směsích smrku a buku, podobné problémy lze předpokládat i v případě dalších dřevinných směsí. Genetickou diverzitu lze v porostech zvýšit zaváděním různých proveniencí stejného druhu dřeviny a rovněž ochranou přirozeného zmlazení a nárostů. Zvýšení rezistence porostů proti stresorům lze rovněž dosáhnout zaváděním vhodných introdukovaných dřevin. Zvýšení odolnosti jednotlivých stromů proti stresu suchem lze dosáhnout včasným uvolněním vybraných jedinců a umožnění rozvoje kořenového systému a koruny (KOHLE ET AL. 2010).

Ohrožené porosty jsou definovány nejen dřevinnou skladbou, ale i jejich lokalizací v terénu. Přemístěním těchto porostů je v tomto případě myšleno zakládání potenciálně ohrožených porostů na takových místech, kde lze, v případě jejich rozpadu nebo poškození, realizovat taková těžební opatření, kterými bude možné minimalizovat škody a dosáhnout přijatelného ekonomického zhodnocení.

LINDNER ET AL. (2014) shrnuje adaptační postupy pro oblast střední Evropy. V souvislosti s očekávanými změnami v dostupnosti vody upozorňuje na nutnost nahrazení dřevin náročných na vodu druhy tolerantními k suchu a adaptovanými na vyšší teploty. Očekávaný pokles produkce způsobený těmito změnami navrhuje nahradit zaváděním introdukovaných dřevin jako je např. douglaska nebo přemístěním smrkových porostů na vhodnější stanoviště. Upozorňuje na nedostatek znalostí o vhodných introdukovaných dřevinách. Rovněž upozorňuje, že na klimatické extrémny jako je prodlužování vegetační doby a dlouhodobé vlny veder a sucha nejsou ve velké většině běžné druhy dřevin adaptovány. Jako opatření proti následkům vichřic, navrhuje snížení „limitní“ výšky porostů, zároveň upozorňuje, že v oblastech s tradičně uplatňovaným dlouhým obmýtím, může být prosazování tohoto adaptačního opatření obtížné.

Adaptace na KZ v České republice je součástí národního lesnického programu (NLP) jako klíčová akce 6 (KA 6) a má napomoci snížení dopadů očekávané globální klimatické změny a extrémních meteorologických jevů. KA 6 doporučuje pěstování prostorově a druhově rozrůzněných porostů s pestrou dřevinnou skladbou a větší využívání přirozené obnovy a přírodních procesů. NLP doporučuje prodloužení zákonné lhůty k zalesnění a zajištění porostů z důvodu lepšího využití přirozené obnovy. Dalším doporučeným postupem je zabránění degradaci lesních půd a maximalizovat množství deponovaného uhlíku v půdě. S touto problematikou souvisí rovněž optimalizace uhlíkového cyklu v půdních horizontech, zásobách dřeva stojících porostů a výrobcích ze dřeva. Toho lze dosáhnout uplatňováním opatření udržujících vysokou a stabilní produkci dřevní hmoty. Pro úspěšnou adaptaci lesních porostů je rovněž nezbytná podpora druhů a ekotypů lépe snášejících projevy klimatické změny. V oblasti lesnické typologie by bylo vhodné posoudit možnost změny současných LVS a provést vyhodnocení antropicky podmíněných změn prostředí ve vazbě na stávající typologický systém. Jako další adaptační opatření uvádí NLP snížení obmýtl u dřevin nejvíce ohrožených klimatickou změnou a podporu ekologicky vhodného zalesňování zemědělských půd.

Návrh adaptačních opatření v oblasti lesnictví obsahuje rovněž Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR (MŽP, 2015). Hlavní možnosti LH při adaptaci na KZ spatřují autoři v diferenciaci forem hospodaření dle stanoviště a v příklonu k přírodě bližším formám hospodaření. Důležitá je rovněž změna druhové a prostorové skladby porostů s důrazem na zvýšení stability a odolnosti. Jako významnou součást adaptačních opatření vidí rovněž vazbu na další sektory, zejména vodní hospodářství.

Struktura adaptačních opatření víceméně kopíruje ustanovení NLP. Pozornost je věnována rovněž určení priorit podpory adaptačních opatření, kam patří stanovení rizikových oblastí pro prioritní využití adaptačních postupů a jejich implementace do OPRL. Upozorňuje rovněž na nutnost vypracování závazných hospodářských doporučení pro dané oblasti.

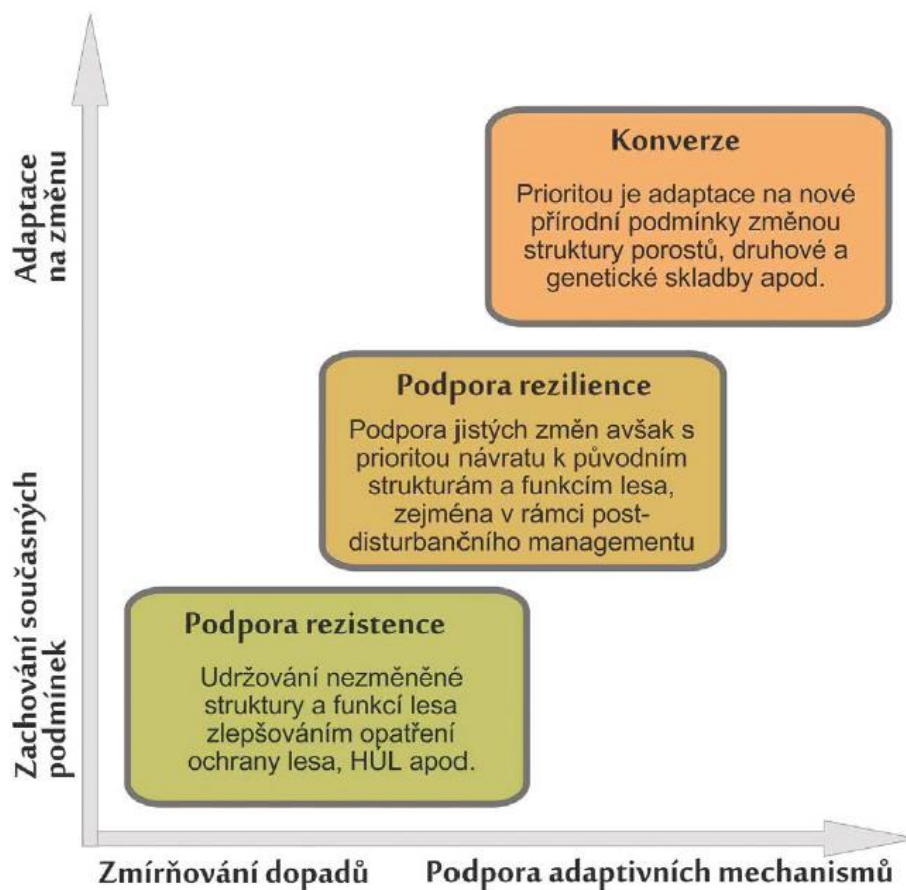
Praktická opatření pro adaptaci hospodaření některých dřevin v podmínkách České republiky jsou k dispozici již v současnosti. HLÁSNY ET AL. 2016A shrnuje základní adaptační opatření pro smrk. V případě této dřeviny se jedná, vzhledem k jeho vysoké zranitelnosti, o postupy často směřujícími ke snížení jeho zastoupení resp. nahrazení odolnějšími druhy dřevin. Rámce adaptačních opatření lze shrnout do tří základních skupin.

Podpora rezistence se vztahuje zejména na porosty věkově blízké obnovní době. Rezistenci, ve smyslu schopnosti odolávat změnám prostředí, lze aplikovat pouze v omezené míře a krátkodobě.

Podpora resilience zahrnuje podporu schopnosti porostů vrátit se po disturbanci do původního stavu. Spočívá mimo jiné v udržení vhodných cílových druhů dřevin v porostu i navzdory tomu, že podmínky prostředí nemusí být v daném období pro tyto druhy příznivé.

Třetím adaptačním rámcem je konverze. Tento adaptační koncept vychází z předpokladu, že lesní hospodář akceptoval projevy AKZ a stav resp. strukturu porostů přizpůsobuje novým podmínkám. Daný přístup se jeví jako nejvhodnější ke snižování rizik spojených s produkcí dřeva (obr. 3.10).

Adaptační postupy zaměřené na smrk zahrnují zejména „konverzní“ postupy. Hospodářská opatření jsou zpracována pro cílové hospodářské soubory (CHS) s dominancí smrku. Jsou ve většině případů preventivní a zaměřené na posílení adaptačních schopností v současnosti zdravých porostů tak, aby vliv AKZ byl minimalizován a naopak v maximální míře bylo využito příznivých vlivů.



Obr. 3.10: Hierarchie adaptačních opatření zaměřených na lesní porosty (zdroj: HLÁSNY ET AL. 2016A)

NOVÁK ET AL. (2017) navrhuje adaptační opatření zaměřená na dub letní a dub zimní. Oproti smrku vykazují duby nižší zranitelnost a vyšší toleranci k poškození suchem. Potenciál dubu není v ČR využitý. Současné zastoupení 7,9% je oproti přirozenému zastoupení cca 20% silně redukováno. Z produkčního hlediska je relevantní jeho využití v podmínkách ČR od 1. – 5. LVS, byť v 5. LVS lze s dubem počítat již jen jako doplňující dřevinou v cílové skladbě. I opatření v nižších polohách je zaměřeno na odklon od pěstování dubu v monokulturách. Zachování současné produkce lze očekávat na celém území a zásadně tak zvýhodňuje dub oproti smrku, buku a jedli. Adaptační opatření jsou zvláště vypracována pro porosty s dominancí dubu a porosty kde je dub jen jako přimíšená dřevina. Zohledněn je rovněž stav porostů z hlediska kvality dřevní suroviny. Z hlediska pěstebních a managementových opatření zahrnují adaptační postupy zejména zvýšení biodiverzity formou vnášení více druhů dřevin do porostní skladby a u méně kvalitních porostů pak snížení doby obmýtí. Hospodářská opatření jsou stejně jako v případě smrku ztepilého vypracována pro CHS.

## 4. Metodika

Metodika vychází z cílů disertační práce a zahrnuje okruhy činností, které na sebe navazují. Řešení práce předpokládá využití a zpracování několika datových zdrojů. Simulace vývoje lesa v podmínkách změny klimatu jsou prováděny v simulátoru biodynamiky lesa Sibyla, proto je součástí metodiky i jeho popis s důrazem na hlavní procesy řídící vývoj porostu (růst, mortalita, regenerace, management).

Datové zdroje použité v této práci jsou následující:

- Dlouhodobá dendrometrická měření z pokusných ploch VÚLHM a z výzkumných a zkušných ploch ÚHÚL. Ty slouží jako vstupní informace pro definici počátečního designu porostů v modelu Sibyla a k provedení kalibrace růstového procesu pro podmínky České republiky.
- Vstupní klimatická data pocházejí ze dvou zdrojů. Prvním jsou empirická měření z let 1964 - 2012 z meteostanic ČHMÚ, druhým scénáře změny klimatu pro období 2010-2100 vypracované a zpřístupněné v rámci projektu ENSEMBLES (HEWITT & GRIGS, 2004, VAN DER LINDEN ET AL. 2009).

Tato data jsou využita v rámci následujících metodických kroků:

- Vyhodnocení shody mezi simulovanými a měřenými přírůsty a odvození korekčních koeficientů pro dosažení lepší shody simulovaných a měřených hodnot
- Vytvoření schématu pro využití korekčních koeficientů v rámci České republiky
- Využití modelu Sibyla s kalibrovaným růstovým procesem pro hodnocení vývoje lesa při stabilním (nezměněném) klimatu a klimatu definovaném scénáři změny klimatu
- Vyhodnocení dopadů změny klimatu na vybrané produkční ukazatele
- Souhrnné vyhodnocení výsledků a vyvození závěrů pro management lesa

### 4.1 Porostní data

Projekce vývoje lesních ekosystémů jsou prováděny na základě údajů ze skutečných porostů, resp. ploch. Tato data pocházejí ze dvou zdrojů. Prvním jsou poloprovozní a

trvalé plochy ÚHÚL a druhým plochy pro hodnocení vlivu péstitelských opatření VÚLHM.

Zdrojový soubor naměřených dat je poměrně rozsáhlý. Jejich kvalita je však často sporná. V mnoha případech na sebe při opakovaném měření nenavazují počty stromů. Další problémy plynou z nízkého počtu zjišťovaných veličin. Z těchto důvodů je jejich použitelnost pro hledání příčinných vazeb a modelování vývoje lesa omezená.

### **Trvalé výzkumné plochy**

Trvalé výzkumné plochy (TVP), byly založeny pracovníky VÚLHM Jíloviště- Strnady, VÚLH Zvolen a zaměstnanci lesnických fakult vysokých škol. Při jejich zakládání byly použity moderní metody zakládání ploch a měření dendrometrických veličin. Na ploše byly všechny stromy s výčetní tloušťkou vyšší než 7 cm označeny trvale číslem. Díky identifikaci jednotlivých stromů mohlo být dosaženo přesných zjištění produkčních a růstových veličin. Soubor TVP sloužil mimo jiné ke konstrukci růstových modelů hlavních dřevin pro ČR.

### **Trvalé zkusné plochy**

Dalším druhem ploch jsou tzv. trvalé zkusné plochy (TZP). Plochy zakládány pracovníky ÚHÚL v 70. letech 20. století měly primárně sloužit ke sledování změn způsobených antropogenním znečištěním ovzduší v různých stanovištních podmínkách a pásmech ohrožení imisemi. Většina ploch byla založena v 60 – 80 ti letých porostech. TZP byly v terénu stabilizovány vyznačením hranic a očíslováním stromů s výčetní výškou větší než 7 cm. Velikost ploch je v rozmezí 0,15 – 0,50 ha s minimálním počtem 200 – 250 jedinců při prvním měření. Kromě měření tloušťek a výšek se na plochách hodnotil tvar koruny, zdravotní stav a v pětiletých intervalech se prováděly odběry půdních vzorků pro chemické analýzy.

### **Plochy pro hodnocení vlivu péstitelských opatření**

Plochy pro hodnocení vlivu péstitelských opatření tvoří série pokusů, založených převážně v porostech smrku a borovice v letech 1958 – 1988. Plochu tvoří soubor dílčích podploh s různou intenzitou zásahů. V každém souboru je ponechána jedna kontrolní bezzásahová plocha. V současnosti je k dispozici 34 smrkových, 16 borových a 10 ploch ostatních dřevin. Plochy založené v letech 1958 – 1988 obsahují série měření s délkou od 11 do 50 let. Měření je prováděno v pětiletých intervalech, u mladších porostů v intervalech jednoho roku.



Smrkové plochy pokrývají výškový rozsah od čtvrtého do osmého vegetačního stupně na kyselých, svěžích a bohatých stanovištích. Borové plochy byly zakládány v oblastech významných pro pěstování této dřeviny, jako je Západočeská a Středočeská pahorkatina, Polabí, Severočeská pískovcová plošina a Jihočeské pánve. Zjišťovány byly informace o mortalitě, výčetní tloušťce a výšce. Výčetní tloušťky jsou měřeny celoplošně, výšky změřené výběrově pro jednotlivé tloušťkové stupně jsou prokládány výškovou křivkou.

### **Databáze ploch**

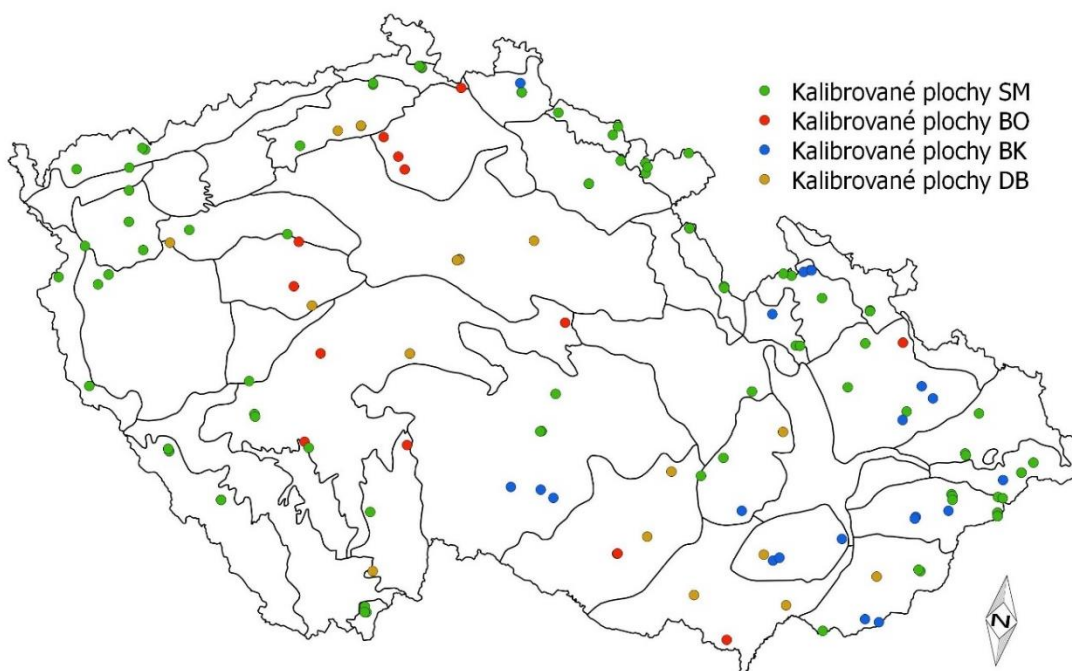
Pro práci s daty je připravena databáze v prostředí MS Access se strukturou sestávající z pěti tabulek, vzájemně propojených pomocí jedinečných identifikátorů ploch. Toto řešení umožňuje zadávat informace o měřených plochách jak automatizovaně, tak i manuálně pomocí předpřipraveného formuláře.

Základní funkcí vytvořené databáze je získat přehled ve vytvořených datech a možnost automatizovaného výběru ploch, jež budou použity pro simulace resp. kalibraci. Základním kritériem výběru bylo zastoupení zájmové dřeviny nad 85% a min. 4 opakovaná měření.

Protože všechny plochy uložené v databázi mají definované souřadnice, je možné propojením databáze na GIS vizualizovat distribuci ploch vybraných na základě různých kritérií, překrývat polohy ploch s jinými prostorovými daty a načítat do databáze další data.

V rámci překládané práce bylo použito 180 vybraných ploch, jejichž počet byl pro účely kalibrace zredukován na 153 ploch. Hlavními důvody pro vyřazení ploch byl malý počet jedinců resp. velikost plochy, příliš dlouhé časové intervaly měření nebo nekonsistence v měřených hodnotách.

Konečná datová sada použita v této práci tak zahrnuje smrk ztepilý (100 ploch), borovice lesní (14 ploch), buk lesní (21 ploch) a duby (18 ploch). V rámci celého souboru měření se jedná o 100 197 tloušťkových a 43 355 výškových přírůstků. Plochy byly založeny v letech 1958 – 1989. Nejmladší posuzované vzorníky jsou ve věku 15 let nejstarší 174 let. Rozmístění ploch v ČR je zobrazeno na obr. 4. 1.



Obr. 4.1: Rozmístění simulačních ploch v ČR. Znáznorněny jsou hranice přírodních lesních oblastí.

Největší podíl tvoří smrkové plochy od třetího do sedmého lesního vegetačního stupně (LVS) a rovnoměrným zastoupením ploch v kyselé a živné ekologické řadě. Stanoviště ovlivněná vodou jsou zastoupena pouze okrajově. Bukové plochy pokrývají rozsah od druhého do šestého LVS rovněž s rovnoměrným výskytem na stanovištích živné a kyselé řady. Borové plochy jsou rozmístěny od nultého do čtvrtého LVS s převahou stanovišť kyselé řady. Dubové plochy pokrývají LVS od prvního do čtvrtého s rovnoměrným zastoupením ploch na živných, kyselých a vodou ovlivněných stanovištích (tab. 4. 1A resp. 4. 1B).

Tabulka 4.1: Zastoupení kalibračních ploch v edafických kategoriích (tab. A.) a lesních vegetačních stupních (tab. B.) podle dřevin.

Dřevina	Počet ploch v edafické řadě			Počet ploch v lesních vegetačních stupních							
	Kyselá	Živná	Ovl. vodou	0	1	2	3	4	5	6	7
<b>SM</b>	47	42	11				16	14	34	30	6
<b>BO</b>	10	3	1	4	1	2	5	2			
<b>BK</b>	9	12	—			2	4	6	8	1	
<b>DB</b>	7	5	6		6	8	3	1			

**Tab. A**

**Tab. B**

Informace o skutečných a modelových přírůstech, stejně jako měřené údaje jsou sumarizovány v tabulkách, z kterých se vychází při dalších analýzách. V případě empirických měření se jedná o přibližně 260 tis. záznamů. Souhrnné porovnání modelových a skutečných přírůstů obsahuje cca. 143 tis. záznamů. Informace o počtu kalibračních ploch a počtu měření  $d$  a  $h$  obsahuje tabulka 4.2.

Tabulka 4.2: Počet kalibračních ploch a měření tlouštěk a výšek pro kalibrované dřeviny.

Dřevina	Počet ploch	Počet měření $d$	Počet měření $h$
Buk	21	4773	729
Dub	18	3816	687
Smrk	100	87 553	41 360
Borovice	14	4055	579
Celkem	153	100 197	43 355

## 4.2 Klimatická data

Pro hodnocení vlivu změny klimatu na produkci hlavních dřevin bylo vybráno 180 základních pokusných ploch (porostů). Pro tyto plochy byly na základě dat ČHMÚ propočteny klimatické charakteristiky denní úhrn srážek a průměrná teplota vzduchu v období 1961 – 2010. Data byla agregována, tak aby bylo možné je použít jako vstupní proměnné v simulátoru Sibyla. Tyto proměnné jsou:

- počet dní vegetačního období (dní v roce s průměrnou denní teplotou nad 10°C)
  - roční teplotní amplituda (rozdíl mezi minimální a maximální teplotou v roce v °C)
  - průměrná denní teplota ve vegetačním období v °C
  - úhrn srážek podobu vegetačního období v mm
- index aridity podle de Martoneho v mm °C<sup>-1</sup>

Vstupní proměnná půdní vlhkost (půdní vlhkost, relativní hodnota v intervalu 0 – 1) byla odvozena ze souboru lesních typů (SLT) dané plochy.

Data ČHMÚ přepočtená na polohy simulačních ploch byla použita pro přepočet scénářů změny klimatu, která jsou distribuována v pravidelné síti a jsou zpřístupněna v rámci databáze FORESEE (DOBOR ET AL. 2013).

Propočet byl proveden pomocí regrese dat z let 1961– 2010, která jsou k dispozici v obou klimatických databázích.

Pro popis budoucího klimatu bylo použito 10 RCM z výše uvedené databáze (Tab 4. 3.) řízených SRES A1B.

Tabulka 4.3: Klimatické modely použité pro hodnocení dopadů změny klimatu na produkci hlavních dřevin.

Název modelu (RCM-GCM)	Název instituce
ALADIN-ARPEGE	National Centre for Meteorological Research
CLM-HadCM3Q0	Swiss Federal Institute of Technology Zürich
HadRM3Q0- HadCM3Q0	Hadley Centre for Climate Prediction and Research
HIRHAM5-ARPEGE	Danish Meteorological Institute
HIRHAM5-ECHAM5	Danish Meteorological Institute
RACMO2-ECHAM5	Royal Netherlands Meteorological Institute
RCA-ECHAM5	Sweden's Meteorological and Hydrological Institute
RCA-HadCM3Q0	Sweden's Meteorological and Hydrological Institute
REGCM3-ECHAM5	The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics
REMO-ECHAM5	Max-Planck-Institute for Meteorology

Podle 10 scénářů změny klimatu byly vyhodnoceny změny v roční teplotní amplitudě, průměrné teplotě vzduchu ve vegetačním období, úhrnech srážek ve vegetačním období a délce vegetační sezóny.

### 4.3 Model Sibyla

Simulace růstu lesa jsou prováděny pomocí MDL Sibyla (FABRIKA & ĎURSKÝ 2005). Jedná se o empirický, stromový, distančně závislý hybridní model konstruovaný na bázi modelu SILVA (PRETZSCH ET AL. 2002).

Původní model SILVA byl parametrizován na základě dat z ploch ze Švýcarska a Německa. Křivky stanovištního potenciálu jsou založeny na datech z 330 ploch, obsahujících 3120 časových bodů. Nejstarší data jsou z roku 1873. SCHMID ET AL. (2005) ověřil využití modelu na trvalých zkušných plochách kolinní a alpínské oblasti Švýcarska. Studie prokázala vhodnost využití modelu, autoři nicméně upozorňují na závislost mezi velikostí diferencí mezi modelovým a empirickým měřením a nadmořskou výškou resp. klimatem. Nejvyšší shody mezi modelovými a empirickými daty byly dosaženy v kolinní oblasti. Se vzrůstající nadm. výškou se zvyšovaly i difference. Využití modelu

v extrémních klimatických podmínkách tak může být problematické a vnést do výsledků simulací závažné chyby.

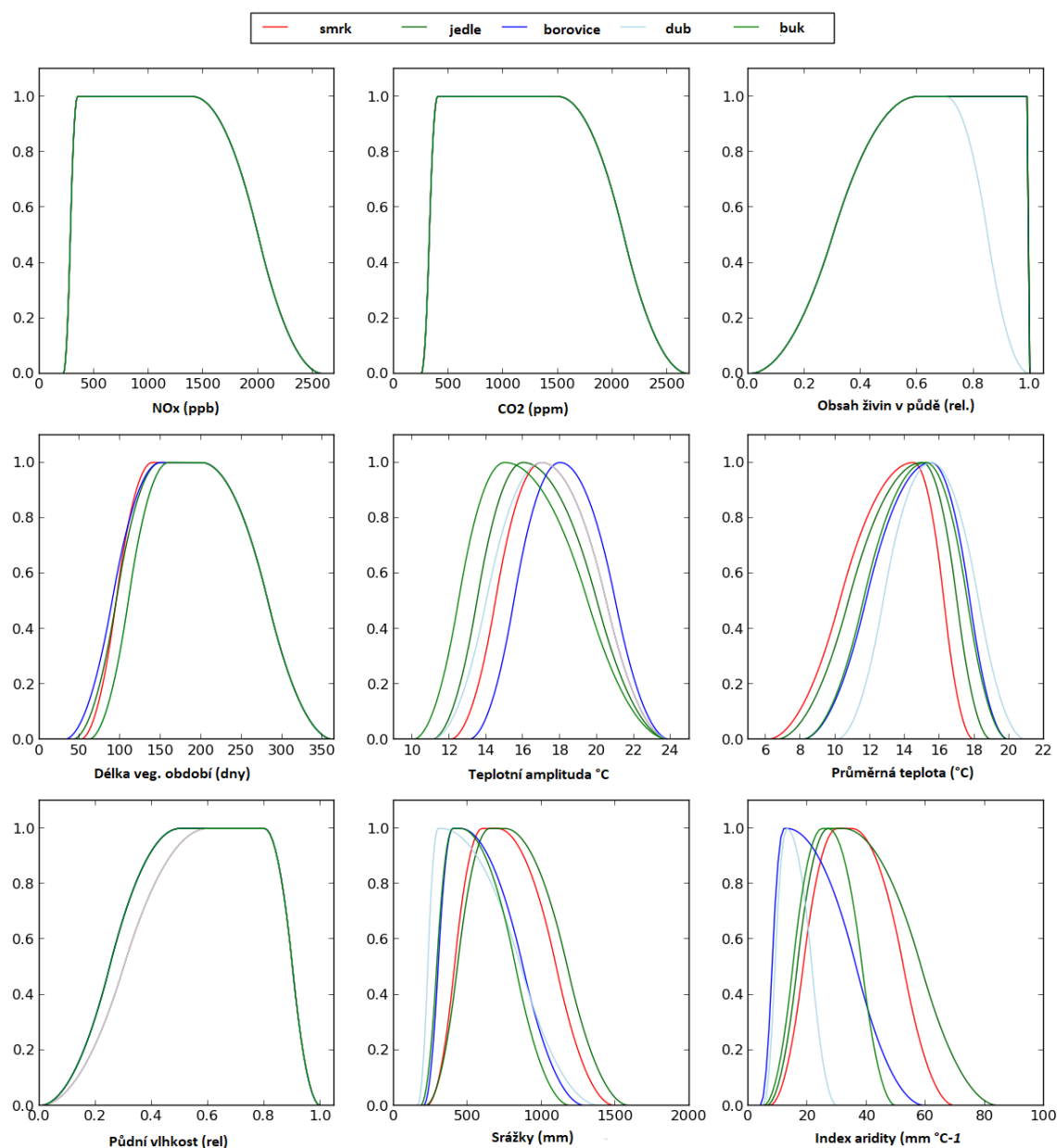
Při parametrizaci modelu Sibyla byl datový základ rozšířen o údaje z opakovaných měření provedených na 1189 plochách NIL, která byla v síti 4×4 km na Slovensku založena v roce 1994. Parametrizace modelu Sibyla provedená na rozsáhlé empirické datové základně dává předpoklady k úspěšnému využití simulátoru v podmínkách střední Evropy. Model Sibyla byl původně k dispozici pouze pro 32 - bitové počítače. V současnosti je k dispozici 64 – bitová verze s rozšířenými funkcionalitami (Sibyla Triquetra, <http://sibyla.tuzvo.sk/>). Vhodnost modelu Sibyla k modelování růstu a produkce lesů mírného pásma byla ověřena např. ve studiích FABRIKA & VACULČIAK (2008), ŠPULÁK & SOUČEK (2010), HLÁSNY ET AL. (2011A), BOŠELA ET AL. (2013), VACEK ET AL. 2013, HLÁSNY ET AL. (2014B), AMBROŽ ET AL. (2015), VACEK (2015) nebo HLÁSNY ET AL. (2015).

Sibyla obsahuje sadu modulů, jejichž činnost je vzájemně propojená. Jedná se o generátor struktury, 3D-model a konkurenční, růstový, mortalitní, kalamitní a probírkový model. Data, se kterými model pracuje, jsou uložena v databázi MS Acces. Databáze obsahuje vstupní a výstupní tabulky, pro modelování vývoje lesa.

Simulátor umožňuje definovat počáteční design porostů na základě různých druhů vstupních dat. Nejpřesnější je simulace vývoje na základě stromových údajů, je ale možné ho využít jako klasické růstové tabulky, nebo provádět projekce na základě údajů ze svěřkovacího zápisníku, případně pro simulace využít jen porostní údaje z LHP (dřevina, zásoba, střední tloušťka resp. výška).

K transformaci růstových funkcí jsou definovány stanovištní proměnné, které ovlivňují přírůst a pro ně jsou pomocí transformační funkce (KAHN 1994), vylišeny oblasti ekologického optima a suboptima resp. pesima. Stanovištní proměnné, ovlivňující přírůst jsou obsah NO<sub>x</sub> a CO<sub>2</sub> v ovzduší, zásobené stanoviště živinami, počet dní vegetačního období, roční teplotní amplituda, průměrná teplota ve vegetačním období, půdní vlhkost, suma srážek ve vegetačním období a de Martoneho index aridity. Pomocí agregační funkce je definován celkový nutriční, termální a humidní efekt a na jejich základě jsou pak odvozeny koeficienty pro modifikaci parametrů růstové funkce (obr. 4. 2.). Vliv stanoviště v simulacích nejvíce ovlivňují průměrné teploty, teplotní amplituda a suma srážek.

K simulaci vývoje přirozeného zmlazení využívá model Sibyla samostatný modul. Vychází ze vztahu odvozeném REINEKEM (1933), který odvozuje počet stromů na základě tloušťky středního kmene, který je v submodulu nahrazený plochou stromu a umožňuje tak jeho aplikaci i na jedince menší než 1,3m. Zahrnuje empirickou část, která modeluje hustotu zmlazení porostu a procesní část, která modeluje produkci semen jednotlivých stromů. Procesní část predikuje produkci semen na základě parametrů, jako jsou klíčivost, absolutní hmotnost a čistota semen, sypavost plodů apod. Empirická část modeluje hustotu zmlazení v závislosti na druhu dřeviny, zápoji a střední tloušťce porostu. V případě, že jsou pro to předpoklady, umožňuje Sibyla přidat jedince zmlazení hned na začátku simulace, aniž by proběhla úroda semen a růst semenáčků. Model je stanovištně specifický. Skutečná úroda je redukována pomocí korektorů vyjadřujících další podmínky pro vyklíčení a přežití náletu a zastoupením jednotlivých dřevin MERGANIČ & FABRIKA (2011).



Obr. 4.2: Transformace stanovištních proměnných na relativní hodnoty v modelu Sibyla

Další důležitou součástí modelu Sibyla je disturbanční modul, který definuje pravděpodobnost výskytu vybraných škodlivých činitelů. To lze provést buď pomocí grafického rozhraní anebo tak, že se pravděpodobnost přežití zadá přímo do tabulky DAMAGE. Pravděpodobnost výskytu disturbančního činitele se zadává pro pětileté periody. Aby byl vývoj porostu reprezentativní, je vhodné simulaci provádět ve více opakováních (ĎURSKÝ 1997). Pravděpodobnost přežívání je definována na porostní úrovni, zvláště pro každý druh dřeviny a v různověkých porostech nelze proto použít odlišné pravděpodobnosti pro jednotlivé stromy.



Pro vyřešení tohoto problému byla naprogramovaná samostatná aplikace (Autor: I. Barka, NLC-LVÚ Zvolen, nepublikováno, použito se svolením autora), která určuje pro jednotlivé dřeviny a věkové stadia pravděpodobnost odumření v důsledku působení souboru disturbančních činitelů (nikoli pro jednotlivé činitele). Simulace byly rozděleny na 10 – leté období, po kterých je simulace přerušena a je provedeno vyhodnocení výsledků. V porostu bylo určeno zastoupení jednotlivých dřevin na základě kruhové základny (podíl kruhové základny jednotlivých dřevin a celkové kruhové základny porostu). Následně byla na základě věku a aktuálního zastoupení smrku pro každý strom v porostu stanovena hodnota pravděpodobnosti uhynutí resp. výskytu nahodilé těžby. Pravděpodobnosti byly odvozené s LHE Slovenska a modifikované pro podmínky České republiky. Pravděpodobnosti jsou uvedené v Tab. 4.4 a 4.5.

Pro každý strom je vygenerováno náhodné číslo v rozpětí 0 až 1 a pokud je tato hodnota nižší nebo rovná pravděpodobnosti výskytu nahodilé těžby, je pro strom stanoven věk odumření v rámci následujícího decenia. Věk odumření je určen generováním náhodného celého čísla. Údaj pro daný strom je uložen do pole MORTALITA v tabulce INITIAL databáze růstového simulátoru Sibyla a simulace pak pokračovala dalším deceniem. Strom odumře v roce, ve kterém dosáhl stanovený věk odumření.

Tabulka 4.4: Pravděpodobnost odumření stromu v závislosti na dřevině a věkové třídě

	<b>Podle věkových tříd</b>					
<b>Věk</b>	<b>Buk</b>	<b>Borovice</b>	<b>Dub</b>	<b>Jedle</b>	<b>Modřín</b>	<b>Smrk</b>
<b>30</b>	0,0055	0,0543	0,0157	0,0764	0,0077	0,0996
<b>40</b>	0,0059	0,0351	0,0112	0,0512	0,0110	0,1137
<b>50</b>	0,0073	0,0218	0,0098	0,0337	0,0164	0,1282
<b>60</b>	0,0103	0,0180	0,0117	0,0260	0,0210	0,1484
<b>70</b>	0,0119	0,0171	0,0129	0,0238	0,0261	0,1639
<b>80</b>	0,0146	0,0201	0,0137	0,0261	0,0263	0,1865
<b>90</b>	0,0178	0,0258	0,0147	0,0319	0,0312	0,1987
<b>100</b>	0,0204	0,0275	0,0165	0,0330	0,0314	0,2048
<b>110</b>	0,0199	0,0266	0,0169	0,0337	0,0347	0,2002
<b>120</b>	0,0165	0,0205	0,0154	0,0348	0,0318	0,1970
<b>130</b>	0,0136	0,0188	0,0146	0,0363	0,0374	0,1958
<b>140</b>	0,0121	0,0163	0,0152	0,0413	0,0341	0,2095
<b>150</b>	0,0094	0,0118	0,0153	0,0369	0,0257	0,1993
<b>160</b>	0,0058	0,0027	0,0124	0,0260	0,0051	0,1683

Tabulka 4.5: Pravděpodobnost odumření stromu v závislosti na dřevině kumulativní

Věk	Kumulativní					
	Buk	Borovice	Dub	Jedle	Modřín	Smrk
30	0,0055	0,0543	0,0157	0,0764	0,0077	0,0996
40	0,0114	0,0875	0,0268	0,1237	0,0185	0,2020
50	0,0186	0,1074	0,0363	0,1532	0,0346	0,3043
60	0,0287	0,1235	0,0476	0,1752	0,0549	0,4075
70	0,0403	0,1385	0,0599	0,1948	0,0795	0,5046
80	0,0542	0,1559	0,0728	0,2158	0,1037	0,5970
90	0,0711	0,1777	0,0864	0,2408	0,1317	0,6771
100	0,0901	0,2003	0,1015	0,2659	0,1590	0,7432
110	0,1082	0,2215	0,1167	0,2907	0,1882	0,7946
120	0,1229	0,2375	0,1303	0,3153	0,2140	0,8351
130	0,1348	0,2519	0,1430	0,3402	0,2434	0,8674
140	0,1453	0,2640	0,1560	0,3674	0,2692	0,8952
150	0,1534	0,2727	0,1690	0,3908	0,2880	0,9161
160	0,1583	0,2747	0,1793	0,4067	0,2916	0,9302

Porost (plocha) je v simulátoru definován na základě stanovištních proměnných. Kalkulace přírůstu je v MDL realizována pomocí modulu PROROK a probíhá v ročních intervalech, přičemž lze pro každý rok nastavit rozdílné růstové proměnné v závislosti na vývoji klimatu. Pro tento typ simulací je třeba vyplnit vstupní tabulky INITIAL, PLOTS a SITES. Tabulka INITIAL obsahuje iniciální informace o dendrometrických charakteristikách stromů, tabulka PLOTS informace o velikosti simulované plochy a tabulka SITES stanovištní charakteristiky porostu pro jednotlivé roky simulací. V případě že se v porostu provádějí výchovné zásahy je nutné je definovat v tabulce THINNING. Výstupy simulací jsou sumarizovány v tabulce TREES, kromě toho je k dispozici rozšířená informace o simulaci na úrovni stromu v souboru prorok. dbf, který obsahuje navíc informace o přírůstu. Soubor není součástí databáze, vytváří se samostatně a aktualizuje se při každé nové simulaci.

Proces simulace obsahuje stochastickou složku a lze nastavit počet opakování, aby byla lépe podchycena variabilita přírůstu na konkrétní lokalitě.

#### 4.4 Design simulací

Na základě vlastností modelu byl sestaven design experimentu, který umožňuje v kombinaci s klimatickými daty vyhodnotit vliv AKZ na vývoj lesních porostů a vyhodnocení změn v jejich produkci.

Design simulací je založen na struktuře uvedené níže. Výsledky jsou v této struktuře ukládány do databáze a slouží jako datová základna pro další analýzy.

1. Prostorovou jednotou simulací je **Plocha**
  - a. Plochy pro sledování vlivu pěstebních opatření
    - i. Zásah
    - ii. Kontrola
  - b. Poloprovozní a výzkumné plochy ÚHÚL
2. Na plochách jsou simulovány různé **Porostní charakteristiky**, hlavním výstupem jsou:
  - a. Zásoba hlavního porostu
  - b. Celková objemová produkce
  - c. Mortalita
3. Plocha a porostní charakteristika jsou kombinovány s různými **klimatickými časovými řadami**
  - a. 10 scénářů změny klimatu
  - b. Referenční klima sloužící pro simulaci vývoje porostu v podmínkách beze změny klimatu
4. Kombinace všech předchozích variant je simulována při **5 počátečních porostních strukturách** (důvodem jsou chybějící informace o pozicích části stromů, které musely být vygenerovány)
5. Kombinací všech faktorů (1 plocha × 3 porostní charakteristiky × 11 klimatických řad × 5 struktur) vznikne pro jednu plochu 165 časových sérií vývoje porostu. Z nich jsou dále odvozovány různé charakteristiky vyjadřující vliv změny klimatu:
  - a. Poměr simulací při scénářích změny klimatu a simulací při referenčním klimatu

- b. Rozdíl simulací při scénářích změny klimatu a simulací při referenčním klimatu

Výstupy simulací obsahují informace o přírůstu všech základních stromových veličin a rovněž údaje o produkčních charakteristikách porostů, jako je celková objemová produkce a objem hlavního a podružného porostu. Tato skutečnost, spolu s faktem, že MDL Sibyla umožňuje definovat změny klimatických a trofických podmínek v průběhu času, dává předpoklady k úspěšnému využití tohoto simulátoru k vyhodnocení růstových změn souvisejících s klimatickou změnou. Porovnání modelových přírůstu se skutečnými údaji z dlouhodobých experimentů pak tvoří vhodný datový základ pro kalibraci modelu pro území ČR.

#### 4.5 Kalibrace růstového procesu

Kalibrací růstového procesu se rozumí úprava výškových resp. tloušťkových přírůstů tak, aby byla dosažena co největší shoda mezi modelovými a empirickými daty. Sibyla obsahuje modul EXPERT, který umožňuje provedení kalibrace pomocí tzv. kalibračních rovnic nebo korektorů. Kalibrace se provádí na úrovni plochy, výsledky je pak možné sumarizovat a přenést na vyšší prostorové jednotky, definované buď stanovištně, nebo prostorově. Základní kalibrační rovnice v lineárním tvaru je definovaná jako rovnice regrese ve tvaru  $i_{\text{real}} - i_{\text{model}} = a + b * i_{\text{model}}$ . Výsledek je k modelovému přírůstu přidáván aditivně. Kalibrační korektor je kalkulován podle vzorce 4. 1 a k přírůstu je přidán multiplikativně. Zatímco kalibrační rovnice mění přírůst v závislosti na velikosti difference model-skutečnost, v případě korektoru se jedná o konstantu. Při kalibraci nelze kombinovat použití korektorů a rovnic.

Vzorec 4. 1. Vzorec pro výpočet kalibračního koeficientu ( $i_{\text{skutečný}} - \text{empiricky zjištěný } I_d$  resp.  $I_h$  za časový interval,  $i_{\text{modelový}} - \text{modelový } I_d$  resp.  $I_h$  za časový interval, korektor – hodnota kalibračního koeficientu.

$$\text{korektor} = \sum_{i=1}^n \frac{i_{\text{skutečný}}}{i_{\text{modelový}}}$$

Před kalibrací bylo nutné provést korekci empirických dat ve smyslu odstranění nekonzistentních hodnot. Tyto korekce byly prováděny na úrovni stromu (vzorníku) a na úrovni porostu (plochy). S ohledem na zpracovávání dlouhodobých dat, ze kterých byla část měřena před desetiletími, je třeba značnou část nekonzistence v datech přičíst jejich

dodatečnému zpracovávání, jakož i hrubým chybám při měření. Pro tvorbu kalibračních rovnic resp. korektorů je proto vhodné použít pouze ty vzorníky, které jsou na ploše po celé kalibrační období.

Při kalibraci, je nutné stanovištně definovat kalibrovanou plochu v simulátoru. Jak je uvedeno výše pro kalibrování jsou vybrány porosty s minimálně 4 opakovanými měřeními a zastoupením kalibrované dřeviny min. 85% (rozumí se ve stejné etáži porostu).

Na základě dat ČHMÚ jsou definovány klimatické podmínky pro jednotlivé roky simulace v tabulce SITES. Vstupní dendrometrické hodnoty na úrovni stromů (rok 0), jsou převzaty z prvního roku měření na kalibrované ploše (tabulka INITIAL). Poté je provedena první simulace vývoje, která probíhá ve stejném časovém úseku, jako empirická měření na kalibrované ploše. Na základě výstupů simulace (tab. TREES resp. prorok.dbf), je provedeno porovnání mezi modelovými a empirickými přírůsty a na jejich základě jsou kalkulovány kalibrační rovnice resp. korektory pro danou plochu. Ty jsou nadefinovány do kalibračního modulu Sibyla a je provedena opětovná simulace, kdy je do modulu prorok, zadán název kalibračního modelu. Diference původního a kalibrovaného modelu jsou poté porovnány. Pokud kalibrace proběhla úspěšně, měla by se střední hodnota jejich diferencí blížit nule resp. být nižší než jejich střední hodnota před kalibrací. V případě že tento předpoklad není splněn, je nutné provést opětovnou kontrolu přírůstu u posuzovaných vzorníků a jedince, kteří vykazují anomálie v přírůstu vyřadit a celá proces kalibrace opakovat, dokud není dosaženo optimálního výsledku. Další možností je změna kalibrační metody, tedy využití kalibračního korektoru místo rovnice a naopak.

Výsledkem kalibrace jsou korektory resp. koeficienty kalibrační rovnice pro tloušťkový a výškový přírůst na kalibrované ploše. Souhrnné výstupy kalibrací dílčích ploch z podobných stanovištních resp. geografických podmínek lze po zprůměrování aplikovat na vyšší prostorové jednotky, jako jsou PLO a SLT. Pro geografické resp. stanovištní jednotky, u kterých nejsou k dispozici kalibrační koeficienty, jsou k dispozici průměrné korektory parametrizované pro celé území ČR.

V průběhu řešení byl rovněž testován způsob kalibrace pomocí upravených přírůstů. Empirická resp. modelová měření byla proložena Richards – Chapmanovou růstovou funkcí. Z takto vzniklých růstových křivek byly odvozeny přírůstové funkce jak pro empirická tak modelová měření. Výpočet korektorů  $d$  a  $h$  byl pak proveden na základě

přírůstů z těchto funkcí. Korektory byly vytvořeny pro dřeviny smrk ztepilý a buk lesní na úrovni ČR.

Pro kalkulaci korektorů větších geografických celků byly vytvořeny tzv. spojené přírodní lesní oblasti (SPLO). SPLO byly vytvořeny pro všechny kalibrované dřeviny. SPLO lze chápat jako další úroveň geograficko – stanovištní jednotky, která spojuje do větších územních celků PLO s podobnými růstovými a stanovištními podmínkami. Vzhledem k počtu ploch a jejich umístění, byly SPLO použity pouze pro smrk ztepilý. Přírodní lesní oblasti (PLO) byly sloučeny na základě výsledků shlukové analýzy, kde jako vstupní hodnoty byly použity hodnoty korektorů, zastoupení kalibrované dřeviny a podílu lesních vegetačních stupňů a ekologických řad v dané PLO. Korektory na úrovni SPLO lze využít v případech, kdy není k dispozici kalibrační koeficient pro danou PLO.

## 5. Výsledky

V následující kapitole jsou shrnuty výsledky řešení předkládané práce. V první podkapitole jsou uvedeny hlavní trendy změn teplot vzduchu a úhrnů srážek na základě projekcí vývoje klimatu na plochách resp. experimentálních porostech (viz kapitola 4. 2), na kterých je hodnocen vývoj lesa v podmínkách změny klimatu. Tyto data tvoří vstupní materiál pro simulace vývoje lesa, podávají rámcovou informaci o tom, jakým směrem se budoucí klima bude vyvíjet, a jsou důležité zejména z hlediska interpretace výsledků simulací.

V další podkapitole jsou shrnuty získané poznatky o rozdílech v přírůstu a tvarových charakteristikách kmene mezi hodnotami simulovanými modelem Sibyla a hodnotami získanými analýzou empirických dat. Tato kapitola tvoří východisko pro výpočet kalibračních koeficientů růstového procesu modelu Sibyla. Následně jsou prezentovány výsledky kalibračního procesu růstového procesu modelu Sibyla realizovaného v souladu s metodickými postupy uvedenými v kapitole 4. 5. Jsou zde sumarizovány nejdůležitější poznatky, které byly při kalibraci modelu získány.

V části zabývající se simulacemi vývoje lesa v podmínkách změny klimatu jsou prezentovány výsledky simulací na úrovni vybraných ploch a zhodnocení vlivu změny klimatu na vybrané produkční ukazatele. Kromě vlivu změny klimatu je také hodnocen vliv managementu zahrnujícího vybrané postupy adaptace na změnu klimatu. Výstupy těchto simulací tvoří základní datový materiál pro souhrnné zpracování a vyhodnocení změn hlavních produkčních charakteristik tedy COP a bonity. Poslední podkapitola se opírá o výsledky realizovaných simulací a literární přehled zpracovaný v kapitole 3.6 a obsahuje souhrn adaptačních opatření na změnu klimatu v podmínkách ČR. Nejedná se o vyčerpávající přehled adaptačních opatření, ale o vybrané aspekty, k jejichž formulaci přispěla předložená práce.

### 5. 1 Analýza dat o změně klimatu na simulačních plochách

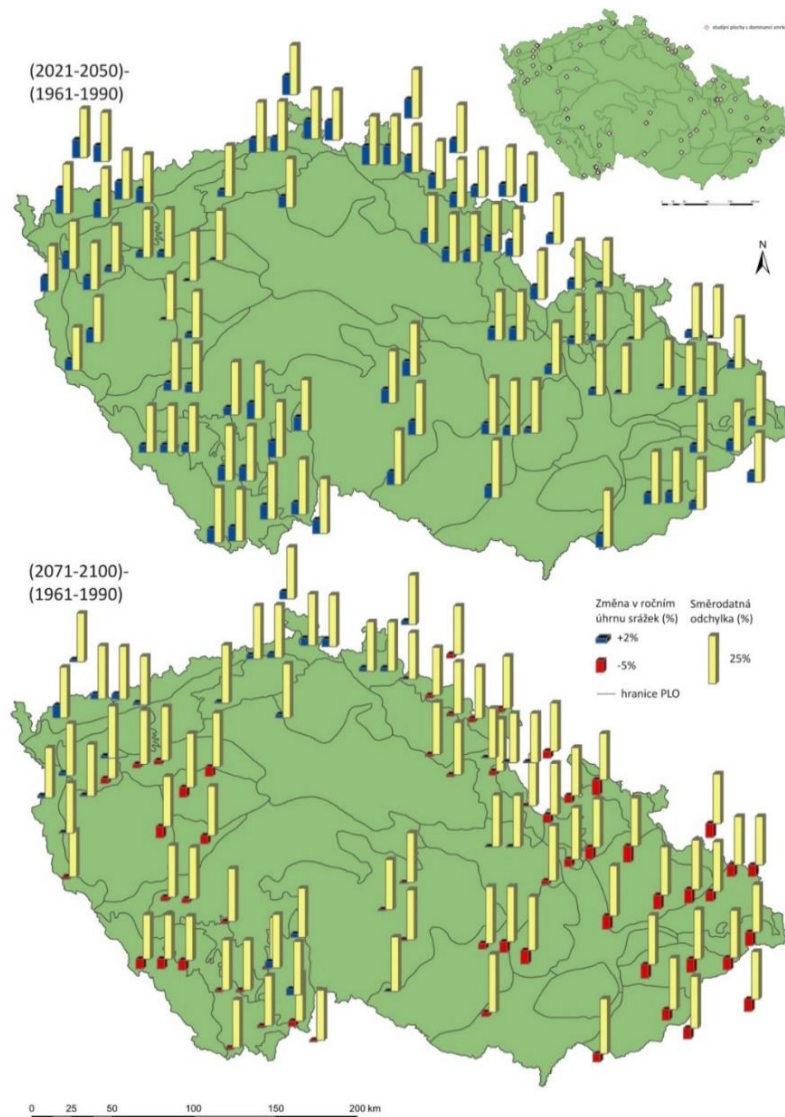
Předpokládaná změna teploty vzduchu podle použitých scénářů změny klimatu v období 2021-2050 je  $+1,7 \pm 0,46^{\circ}\text{C}$  a  $+3,5 \pm 0,62^{\circ}\text{C}$  pro období 2071 – 2100, v porovnání s referenčním klimatem (1961 – 1990) v rámci celého území. V případě srážek jsou projekce budoucího klimatu mezi modely značně variabilní. Předpokládaná změna

ve srážkových úhrnech je  $-2,9 \pm 56,41$  mm v období 2021 – 2050 a  $-27,5 \pm 72,64$  mm v období 2071 – 2100, v porovnání s referenčním klimatem (1961 – 1990). Předpokládá se, že srážkové úhrny vzrostou během zimního období ( $+11,2 \pm 15,16$  mm;  $+25,1 \pm 17,93$  mm) a jarního období ( $+3,6 \pm 15,82$  mm;  $+3,0 \pm 21,13$  mm). Naproti tomu se předpokládá pokles ve srážkových úhrnech během letního období ( $-27,9 \pm 36,29$  mm;  $-64,6 \pm 35,03$  mm).

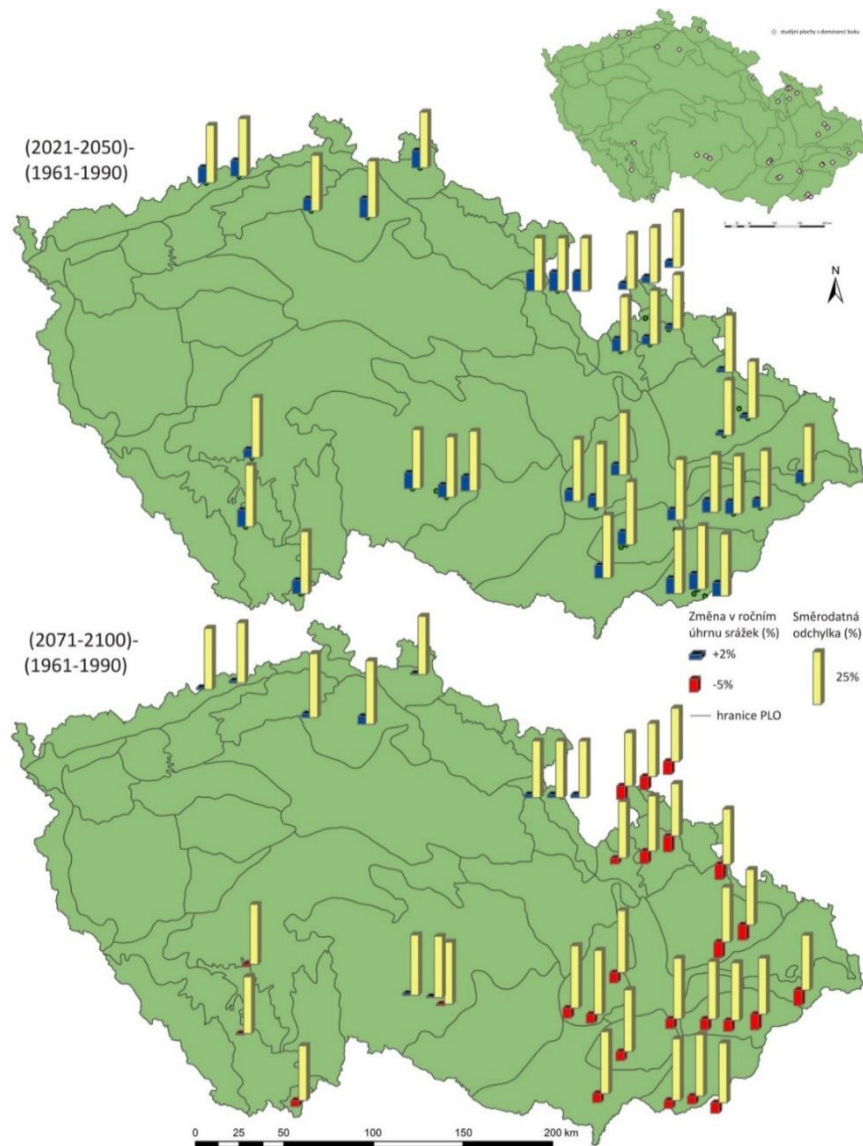
Projekce změn ve vývoji klimatu na vybraných simulačních plochách jsou uvedeny na obrázcích 5. 1 a 5. 2 Pro jednotlivé plochy byly spočteny rozdíly průměrných úhrnů srážek za tři období, 1961 – 1990, 2021 – 2050 a 2071 – 2100. Vyhodnocení prostorové variability změny klimatu na simulačních plochách, je významné z hlediska interpretace výsledků simulací, u kterých je možné předpokládat odlišnou odezvu mezi západní a východní částí republiky. Tento regionální prostorový trend v kombinaci se stanovištními a porostními charakteristikami ovlivňuje změny produkčních charakteristik hodnocených na jednotlivých plochách.

Rozdíly budoucích období a referenčního období jsou vyneseny pro plochy se zastoupením buku a smrku. Hodnoty jsou určeny jako průměr 10 použitých scénářů změny klimatu. Z těchto průměrných hodnot je následně spočten průměr za uvedené 30 – ti leté období. Obdobně je vypočítaná průměrná směrodatná odchylka vyjadřující mezimodelovou variabilitu a tím i míru neurčitosti budoucího vývoje klimatu pro jednotlivé plochy. Teplota vzduchu nebyla tímto způsobem zpracována, protože prostorová variabilita nárůstu teplot je velice nízká (nárůst v jednotlivých obdobích je jak mezi scénáři, tak prostorově víceméně konstantní).





Obr. 5.1: Polohy ploch pro simulaci růstu smrkových porostů v ČR a mezimodelová (vyplyvající z rozdílů klimatických scénářů) variabilita změny úhrnů srážek ve vegetační sezóně (% změny) na plochách. Změna je určena jako průměr výstupů 10 – ti klimatických modelů.



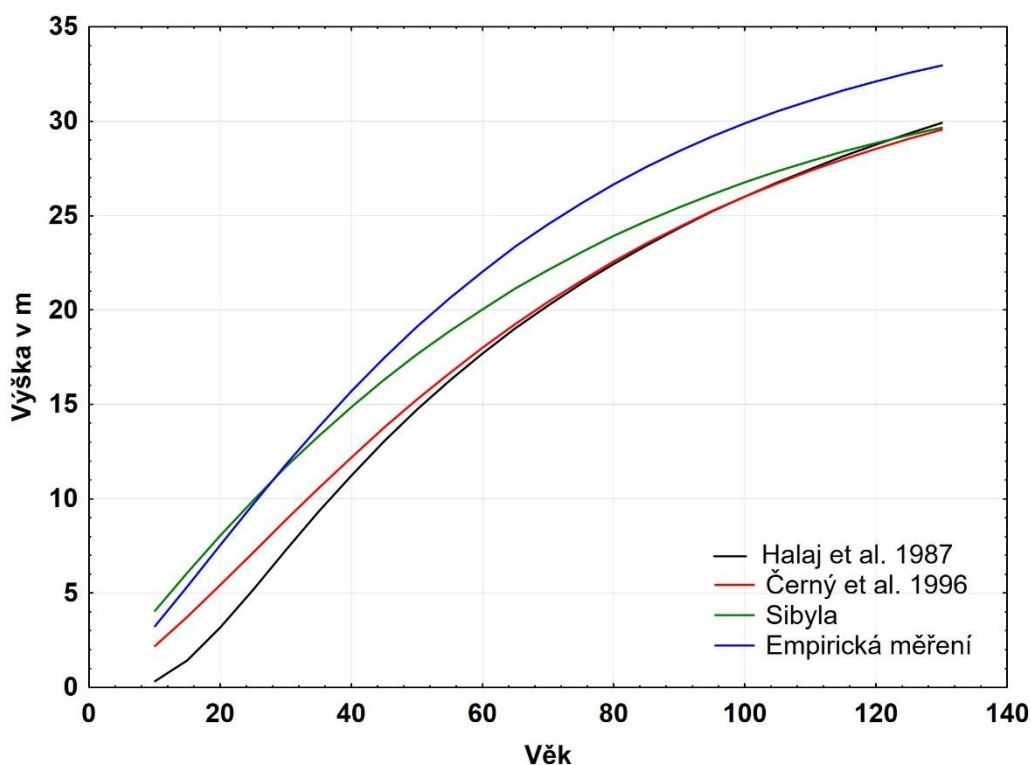
Obr. 5.2: Polohy ploch pro simulaci růstu bukových porostů v ČR a mezimodelová variabilita změny úhrnů srážek ve vegetační sezóně (% změny) na plochách. Změna je určena jako průměr výstupů 10 – ti klimatických modelů.

Z map je zřejmé, že blízká budoucnost je charakteristická mírným nárůstem úhrnů srážek ve vegetační sezóně, který je výraznější v západní části republiky. Tento nárůst je provázen nárůstem teploty přibližně o 1,5°C.

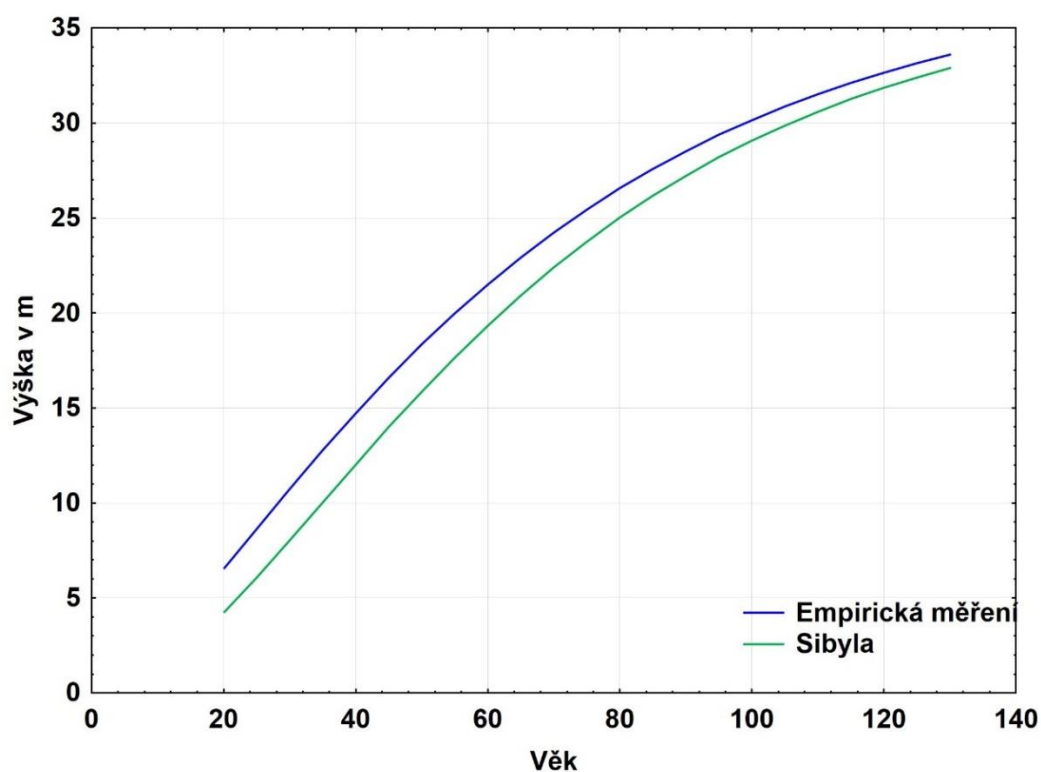
Situace ve vzdálené budoucnosti se výrazně liší a téměř na celém území, resp. na všech plochách, dochází ke snížení úhrnů srážek v porovnání s referenčním obdobím. Mírný nárůst je projektován jen v severozápadní části republiky. Tyto změny jsou provázeny nárůstem teploty přibližně o 3,5°C. Tento vývoj naznačuje výrazně vyšší klimatickou exponovanost a vyšší riziko sucha, pro porosty ve východní části republiky.

## 5. 2 Růst a tvarové charakteristiky kmene empirických vzorníků

Pro posouzení rozdílu měřené a simulované růstové dynamiky byly parametrizovány střední růstové funkce výšek resp. tloušťek smrku a buku. Jako vstupní data byla použita pouze empirická měření, kde byly k dispozici jak tloušťky, tak výšky. Růstové křivky byly parametrizovány na základě dat ze 21 ploch a 152 středních hodnot pro buk a ze 100 ploch a 852 středních hodnot pro smrk. Data byla proložena Richards – Chapmanovou růstovou funkcí (vzorec 5. 1 a 5. 2). Křivka byla parametrizována ze středních hodnot  $d$  a  $h$  vypočítaných pro konkrétní plochu v daném věku. Na obr. 5. 3 jsou prezentovány výškové křivky pro smrk spolu s porovnáním se střední výškovou bonitou z RT HALAJ ET AL. (1987) a ČERNÝ ET AL. (1996). Pro porovnání je na obrázku uvedena i růstová funkce odvozená ze simulací pomocí modelu Sibyla. Stejným způsobem byly parametrizovány růstové funkce pro buk lesní a to jak pro tloušťky a tak výšky (tab. 5. 1). Na obr. 5.4 jsou obdobné funkce pro buk lesní (zde pouze empirická měření a model Sibyla).



Obr. 5.3: Porovnání středních bonitních křivek RT ČERNÝ ET AL. (1996), HALAJ ET AL. (1987) a střední bonity parametrizované na základě dat ze souboru empirických měření a výstupů modelu Sibyla využitých pro kalibraci. Dřevina smrk ztepilý.



Obr. 5.4: Porovnání středních výškových bonitních křivek parametrizovaných na základě dat ze souboru empirických měření a výstupů modelu Sibyla využitých pro kalibraci. Dřevina buk lesní.

Tvary použitých funkcí jsou následovné:

$$d = a \times (1 - e^{(-b*t)^{(1/c)}}) \quad [5.1]$$

$d$  – výčetní tloušťka,  $t$  – věk,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – parametry funkce

$$h = a \times (1 - e^{(-b*t)^{(1/c)}}) \quad [5.2]$$

$h$  – výška stromu,  $t$  – věk,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – parametry funkce

Tabulka 5.1: Parametry Richards – Chapmannovy přírůstové funkce odvozené z měřených a simulovaných přírůstků smrku ztepilého a buku lesního.  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – parametry modelu, sm. chyba – směrodatná chyba,  $R^2$ : koeficient determinance. Empirické: odvozené z měřených dat použitých v této práci, Modelové: Výstupy modelu Sibyla.

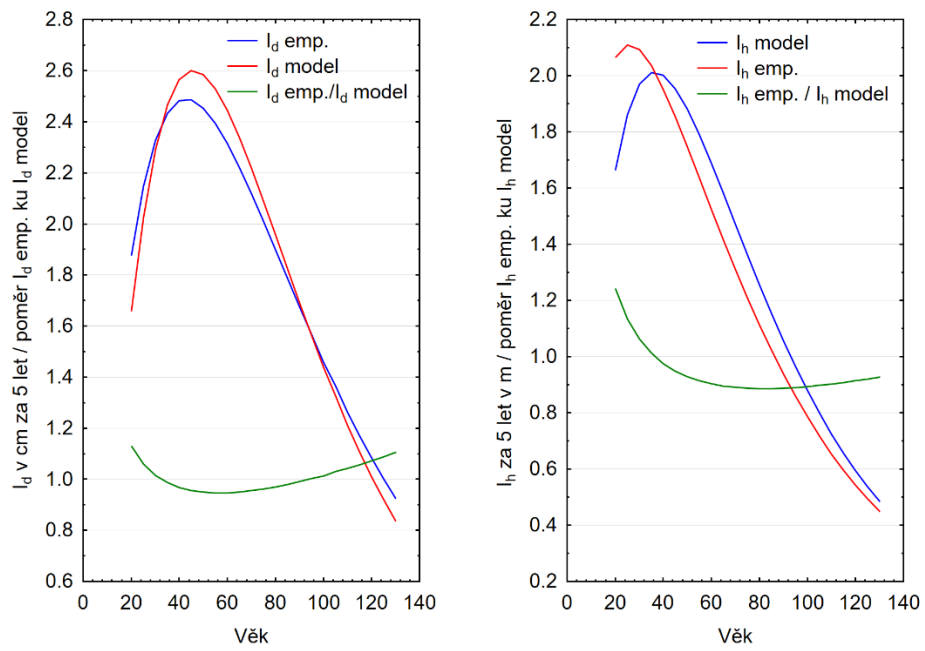
Dřevina	Veličina	Hodnoty	$R^2$	$a / \pm \text{sm.ch}$	$b \pm \text{sm.ch}$	$c \pm \text{sm.ch}$
smrk ztepilý	$d$	Empirické	0,55	56,504±1	0,008±0	1,120±0,01
smrk ztepilý	$h$	Empirické	0,72	36,783±0,21	0,02±0	0,7±0,01
smrk ztepilý	$d$	Modelové	0,56	54,813±0,92	0,008±0	1,071±0,01
smrk ztepilý	$h$	Modelové	0,69	34,46±0,16	0,016±0	0,891±0,01
buk lesní	$d$	Empirické	0,85	55,62±0,34	0,018±0	0,481±0
buk lesní	$h$	Empirické	0,85	37,97±2,46	0,02±0	0,63±0,1
buk lesní	$d$	Modelové	0,84	52,607±0,31	0,021±0,02	0,398±0,4
buk lesní	$h$	Modelové	0,88	37,238±2,29	0,022±0	0,474±0,07

### 5.2.1 Přímé porovnání hodnot výškových a tloušťkových přírůstků

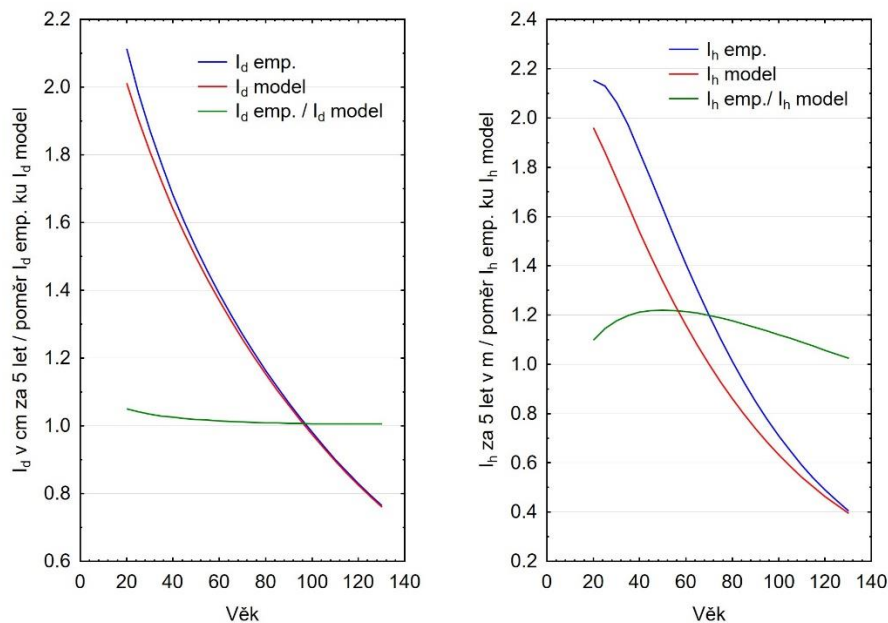
Z porovnání přírůstových funkcí odvozených z výše prezentovaných funkcí růstových a z jejich rozdílů, jsou patrné rozdíly jednak mezi dřevinami, ale rovněž mezi výškovými resp. tloušťkovými přírůsty (obr. 5. 5 resp. 5. 6).

Empirický  $I_h$  u buku lesního kulminuje ve věku mezi 25 – 30 – tím rokem kdy dosahuje roční hodnoty 0,42 m. U modelového přírůstu dochází ke kulminaci přírůstu s cca 10 – ti letým zpožděním s hodnotou 0,4 m. Modelové hodnoty jsou vyšší než empirické až do věku 130 let, kdy se začínají přibližovat skutečným přírůstům.

Poměr empirických a modelových přírůstků  $h$  u smrku vykazuje nárůst do 50 ti let věku (maximální hodnotou 1,22), poté postupně klesají. Ve srovnání s bukem dosahují výrazně vyšších hodnot. Odezva rozdílů modelových a empirických hodnot na věk je nelineární u obou posuzovaných druhů dřevin (obr. 5. 5 resp. 5. 6).



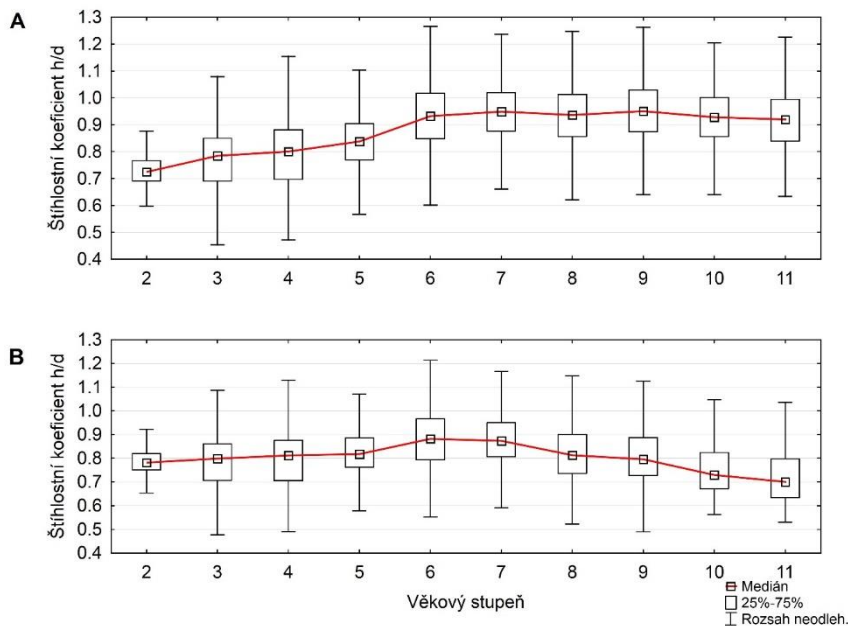
Obr. 5.5: Přírůstová funkce parametrizovaná na modelových a empirických datech pro  $d$  (vlevo) a  $h$  (vpravo). Zelená křivka označuje poměr mezi empirickým a modelovým přírůstem v daném věku. Dřevina buk lesní



Obr. 5.6: Přírůstová funkce parametrizovaná na modelových a empirických datech pro  $d$  (vlevo) a  $h$  (vpravo). Zelená křivka označuje poměr mezi empirickým a modelovým přírůstem v daném věku. Dřevina smrk ztepilý

### 5.2.2 Porovnání tvarových charakteristik kmene

Na základě zjištění z předešlých kapitol je zřejmé, že rozdíly v přírůstech budou ovlivňovat i tvarové charakteristiky kmene a to zejména v případě smrku ztepilého, kde jsou difference mezi modelovými (Sibyla) a empirickými daty nejvyšší. Na obr. 5. 7 jsou prezentovány změny hodnot štíhlostního koeficientu modelových a empiricky měřených vzorníků (jedná se o stejný soubor vzorníků jako v analýze prezentované výše). Zatímco mediány modelových hodnot štíhlostního koeficientu kulminují v šestém věkovém stupni a poté vykazují sestup, empirické hodnoty mají od stejného věku téměř stejné hodnoty a mírný pokles je zaznamenán až od věku 110 let.



Obr. 5.7: Změny v hodnotách štíhlostního koeficientu v závislosti na věku porostu. Graf A-skutečná měření, graf B-výstupy modelu Sibyla, dřevina smrk ztepilý.

Nejvyšší rozdíly mezi modelem a empirickými daty byly zaznamenány u výškových přírůstků smrku ztepilého. U ostatních dřevin nebyly tyto difference zaznamenány. Vyšší hodnoty diferencí  $h$  u smrku prezentované níže jsou způsobeny právě rychlejším růstem skutečných vzorníků oproti modelovým. Přestože jejich aplikace způsobuje nárůst hodnot ŠK, zejména u starších vzorníků, jedná se o proces, díky kterému se růst modelových vzorníků přibližuje empirickým.

### 5.3 Kalibrace růstového procesu

Při analýze dat prezentované v předešlé kapitole byly zaznamenány významné rozdíly mezi růstovou dynamikou a tvarovými charakteristikami kmene modelových a skutečných vzorníků. Využití prezentovaných vztahů pro odvození korekčních rovnic nebo konstant (korektorů), kterými je možné modifikovat (kalibrovat) růstový proces modelu Sibyla před jeho použitím pro simulace vývoje lesa se proto jeví opodstatněné.

Kromě metody výpočtu korektorů přímo z empirických dat je prezentován i doplňující postup, kdy byly na základě modelových a empirických výšek a tlouštěk parametrizovány růstové funkce a korektory byly pak odvozeny z poměrů přírůstků přírůstkových funkcí. Díky tomuto postupu lze snížit vliv odlehlých hodnot měření a chyb, které vzhledem k charakteru vstupních dat není možné odhalit. Postup je výrazně náročnější na množství



a kvalitu vstupních dat. Proto bylo možné tímto způsobem vypočítat pouze korektory pro buk a smrk na republikové úrovni.

Pro dřeviny smrk ztepilý, borovice lesní, buk lesní a duby (*Quercus sp.*) byly vypočítány korektory tloušťek a výšek pro celorepublikovou a v odůvodněných případech (resp. v případě s dostatečným množstvím dat) i pro regionální geografickou resp. stanovištní úroveň (SPLO, PLO, LT).

### 5. 3. 1 Testování kalibračních postupů na úrovni vybraných ploch

Cílem této kapitoly bylo podrobněji se seznámit s fungováním kalibračního modulu modelu Sibyla a vybrat vhodný postup pro kalibraci na dalších plochách. Testování různých nastavení kalibračního modelu bylo realizováno pouze na 10 – ti plochách s kvalitními kalibračními daty, lze však předpokládat, že výsledky tohoto metodického kroku jsou v jisté míře zobecnitelné. Testovány byly kalibrační postupy používající jak kalibrační rovnice, tak korektory. Souhrn testovaných postupů obsahuje tab. 5. 2. Kalibrační postupy byly zvoleny tak aby pokryly co nejširší spektrum kalibračních možností modelu.

Tabulka 5.2: Přehled testovaných kalibračních postupů. Písmenem X jsou označeny použité kalibrační metody. Písmena B až E označují kalibrační rovnice polynomů 1 (přímky) až 4 – tého stupně. Rovnice G – H jsou rovnice přímky.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
<b>Rovnice H</b>		X	X	X	X			X		
<b>Rovnice D</b>		X	X	X	X		X			
<b>Korektor H</b>						X				X
<b>Korektor D</b>						X			X	

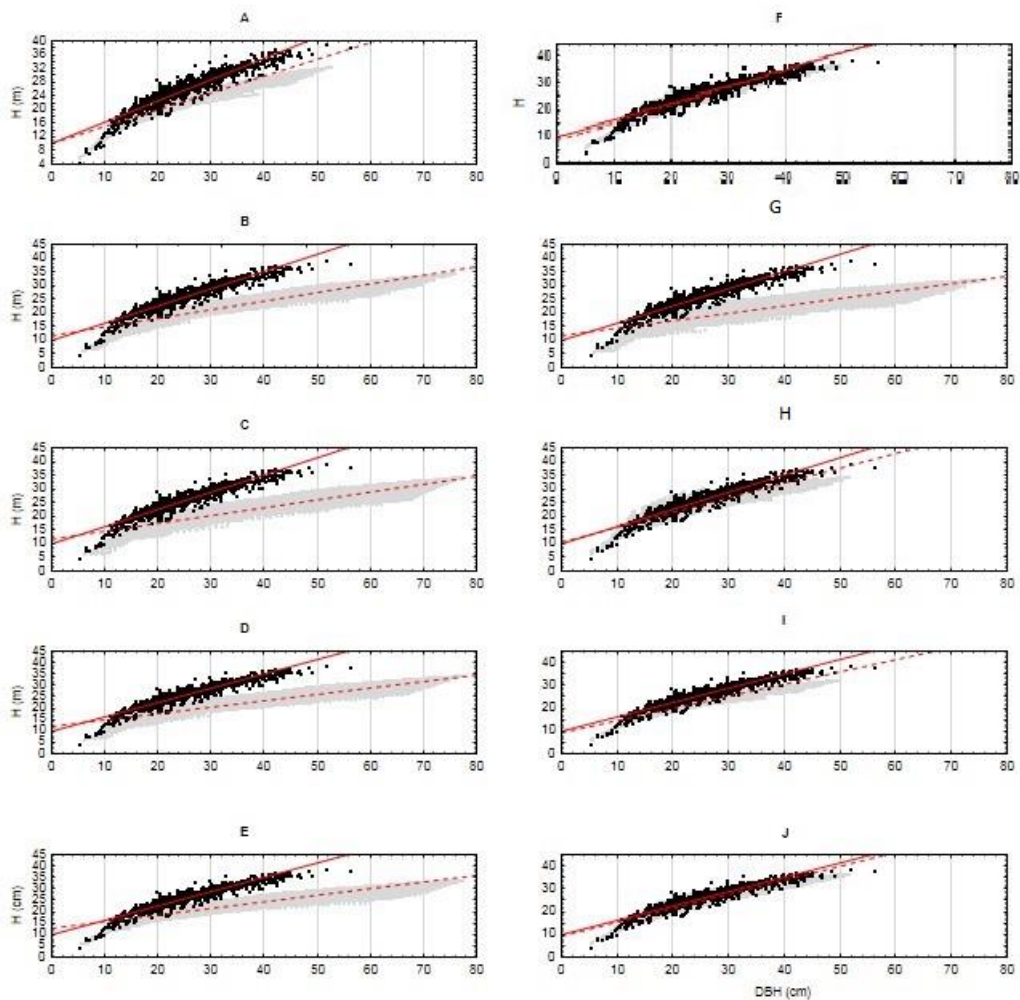
Na obr. 5. 8. jsou prezentovány výsledky použití prezentovaných kalibračních postupů na ploše Frýdek 1. Nejlepších výsledků resp. nejnižších hodnot diferencí po kalibraci bylo dosaženo při aplikaci korektorů – a to i na plochách, kde nelineární tvar empirického pole diferencí přírůstků naznačoval vhodnost použití kalibrační funkce. Podobných výsledků

bylo dosaženo i na ostatních plochách. Proto byla v rámci dalšího řešení práce zvolena kalibrační metoda využívající korektory.

V rámci testování na uvedené podskupině ploch bylo zjištěno, že v některých případech je vhodnější použít pouze korektor  $d$  samostatně, případně přiřadit korektoru  $h$  stejnou hodnotu jako má korektor  $d$ , aby nedošlo k deformaci tvaru kmene. V úvahu připadají také další postupy, při kterých jsou korektory  $d$  a  $h$  funkčně provázány tak, aby byly zachovány přípustné dimenze stromů.

Nejnižších průměrných hodnot diferencí mezi skutečnými a modelovými přírůsty při porovnání kalibračních rovnic bylo dosaženo při využití rovnice přímky ačkoli, jak bylo uvedeno, nejlépe se osvědčila metoda korektorů.

Navzdory těmto výsledkům nelze postup kalibrace pomocí rovnic zavrhnout jako nevhodný. Metoda výrazně rozšiřuje možnosti kalibračních postupů a vždy je nutné se řídit při výběru vhodné metody rozložením diferencí měřených a simulovaných hodnot.



Obr. 5.8: Změny v dendrometrických charakteristikách ( $h$  v m) na ploše Frýdek 1 po aplikaci různých kalibračních postupů (označení písmeny viz. tab. 1). Černě jsou označeny empirická měření, šedě modelové hodnoty.

### 5. 3. 2 Prostorové a stanovištní jednotky tvořící rámce výpočtu korektorů

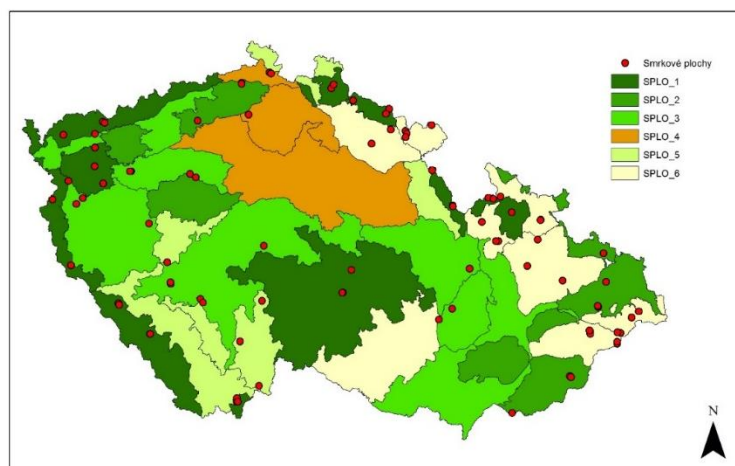
Základními prostorovými jednotkami, pro které byly korektory vypočítány, jsou PLO, lesní typy a celá republika. Další jednotkou pro výpočet korektorů pro geografické celky menší než republika jsou tzv. spojené přírodní lesní oblasti (SPLO). SPLO byly využity v případech, kdy kvůli nedostatku dat nebylo možné určit hodnotu korektoru pro PLO. Korektory byly vypočítány jako střední hodnoty z ploch nacházejících se v dané oblasti resp. stanovištní jednotce.

Nejvýznamnější SPLO z hlediska pěstování smrku je oblast č. 1, zastoupenou PLO č. 1, 3, 11, 13, 14, 16, 21, 22, 25 a 27. Zjednodušeně ji lze popsat jako horské oblasti

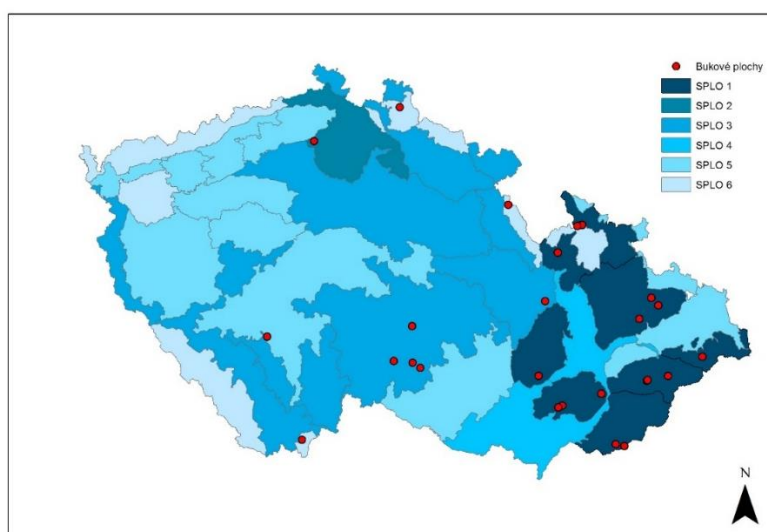
Hercynského pásma. Podíl zastoupení smrku je zde 776 764 ha, což je 53,65 % z celkového podílu zastoupení smrku v ČR.

Nejvýznamnější SPLO pro buk lesní zahrnuje PLO č. 36, 28, 29, 30, 38, 40 a 41. Porostní plocha buku je zde 74 150 ha tj. 47,76% z celkového zastoupení buku v ČR. SPLO pro dub, zahrnuje PLO č. 2, 5, 6, 8, 9, 10, 33, 36 a 38 a zahrnuje 48,45% z celkového zastoupení dubu v ČR. Mapy SPLO pro kalibrované dřeviny jsou na obr. 5. 9 – 5. 12.

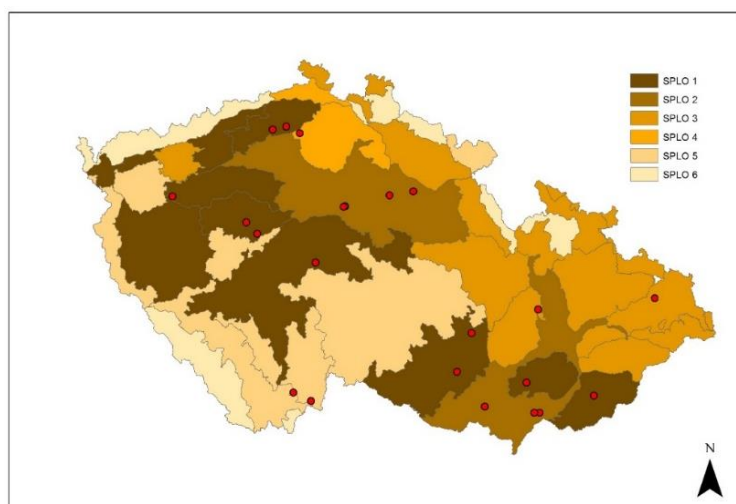
U borovice, dubu a buku je hodnota korektoru kalkulována jen pro ty úrovně, kde je k dispozici dostatek dat. U borovice byl aplikován pouze republikový korektor. U buku je korektor kalkulován na úrovni vybraných PLO, SLT a republikové úrovni. Pro dub na úrovni vybraných SLT, PLO a republikové úrovni.



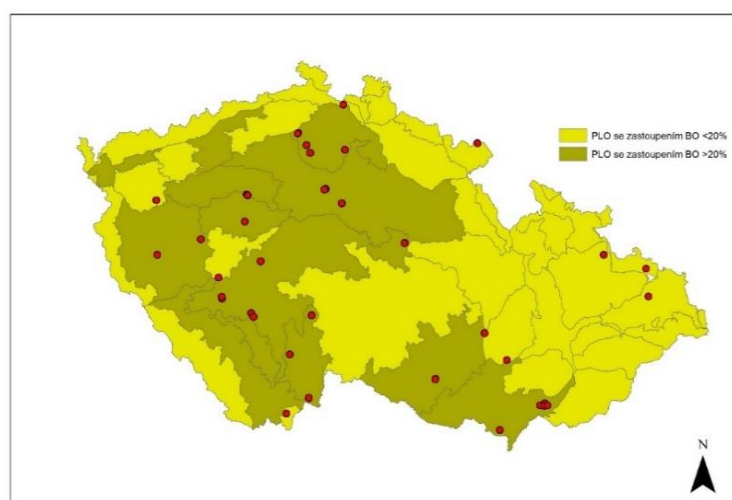
Obr. 5.9: Spojené přírodní lesní oblasti pro smrk ztepilý



Obr. 5.10: Spojené přírodní lesní oblasti pro buk lesní



Obr. 5.11 Spojené přírodní lesní oblasti pro dub



Obr. 5.12: Spojené přírodní lesní oblasti pro borovici lesní

### 5. 3. 3 Kalibrace na úrovni plochy a stanovištních resp. geografických jednotek

Na všech plochách byly odvozeny kalibrační koeficienty  $d$  a  $h$ . Kalibraci na úrovni plochy vždy předcházela analýza vstupních dat, jejímž cílem bylo odstranit zjevně chybná měření. U každé plochy bylo vždy provedeno několik simulací s různými hodnotami korektorů, tak aby bylo dosaženo minimálních hodnot diferencí mezi modelovými a empirickými daty. Tato data byla poté sumarizována a použita pro výpočet korektorů vyšších stanovištních a geografických jednotek. Využití korektoru pro danou jednotku je limitováno dostatečným pokrytím daty. V hierarchii aplikace korektoru mají přednost stanovištní jednotky před geografickými. Základní jednotkou je SLT v rámci dané PLO

pokud nejsou pro danou PLO dostupné korektory, lze použít korektor pro SLT dané SPLO nebo pro SLT na úrovni ČR. Geografické jednotky začínají na úrovni PLO, přes SPLO až po úroveň celé ČR. Výsledky tohoto způsobu kalibrace jsou uvedeny v tabulce 5.3.

Tabulka 5.3: Základní popisné charakteristiky korektorů

Dřev.	Kor.	Jednotka	LT	PLO	SPLO	N	Medián	Kvant. (5%)	Kvant. (95%)	Sm. odch.
SM	<i>d</i>	LT PLO	6B	41		3524	1,08	0,31	2,53	0,65
SM	<i>d</i>	LT PLO	6S	28		6802	0,98	0,19	2,5	0,67
SM	<i>d</i>	LT SPLO	4B		2	1129	1,09	0,22	2,5	0,65
SM	<i>d</i>	LT SPLO	5S		2	1431	1,16	0,31	2,74	0,72
SM	<i>d</i>	LT SPLO	6B		2	3524	1,08	0,31	2,53	0,64
SM	<i>d</i>	LT ČR	5K			18566	0,93	0,26	2,06	0,56
SM	<i>d</i>	LT ČR	3K			1728	0,96	0,24	2,29	0,61
SM	<i>d</i>	LT ČR	6S			7305	0,96	0,19	2,46	0,67
SM	<i>d</i>	LT ČR	6B			3524	1,08	0,31	2,53	0,65
SM	<i>d</i>	LT ČR	4B			1995	0,99	0,23	2,47	0,66
SM	<i>d</i>	PLO		41		6004	1,08	0,27	2,5	0,65
SM	<i>d</i>	PLO		28		7275	0,99	0,19	2,5	0,68
SM	<i>d</i>	SPLO			1	48909	1,09	0,27	2,86	0,78
SM	<i>d</i>	SPLO			2	31328	1,05	0,25	2,5	0,67
SM	<i>d</i>	ČR				87553	1,06	0,26	2,68	0,73
SM	<i>h</i>	LT PLO	6B	41		3061	1,6	0,85	2,64	0,57
SM	<i>h</i>	LT PLO	6S	28		2822	1,58	0,84	2,89	0,62
SM	<i>h</i>	LT SPLO	4B		2	148	1,49	0,75	2,98	0,7
SM	<i>h</i>	LT SPLO	5S		2	140	1,41	0,55	2,79	0,71

Dřev.	Kor,	Jednotka	LT	PLO	SPLO	N	Medián	Kvant. (5%)	Kvant. (95%)	Sm. odch
SM	<i>h</i>	LT SPLO	6B		2	3061	1,6	0,85	2,64	0,57
SM	<i>h</i>	LT ČR	5K			13544	1,19	0,55	2,4	0,57
SM	<i>h</i>	LT ČR	3K			205	1,95	0,85	4,62	1,16
SM	<i>h</i>	LT ČR	6S			2925	1,57	0,82	2,9	0,63
SM	<i>h</i>	LT ČR	6B			3061	1,6	0,85	2,64	0,57
SM	<i>h</i>	LT ČR	4B			260	1,49	0,65	3,41	0,83
SM	<i>h</i>	PLO		41		4301	1,49	0,82	2,58	0,56
SM	<i>h</i>	PLO		28		2873	1,57	0,84	2,89	0,62
SM	<i>h</i>	SPLO			1	28756	1,4	0,61	3,13	0,82
SM	<i>h</i>	SPLO			2	11733	1,56	0,83	2,73	0,59
SM	<i>h</i>	ČR				41360	1,46	0,66	3	0,76
BK	<i>d/h</i>	LT ČR	3H			761	1,29	0,39	2,3	0,56
BK	<i>d/h</i>	LT ČR	4B			1238	1	0,26	256	0,71
BK	<i>d/h</i>	LT ČR	5S			668	1,16	0,23	2,99	0,81
BK	<i>d/h</i>	PLO		16		688	1,16	0,23	2,99	0,81
BK	<i>d/h</i>	PLO		28		675	1,05	0,38	2,57	0,68
BK	<i>d/h</i>	PLO		29		1158	1	0,25	2,57	0,71
BK	<i>d/h</i>	PLO		36		432	1,06	0,22	1,98	0,55
BK	<i>d/h</i>	PLO		40		486	0,91	0,21	2,5	0,72
BK	<i>d/h</i>	PLO		41		342	1,08	0,5	2,46	0,59
BK	<i>d/h</i>	ČR				4773	1,1	0,29	2,5	0,69
DB	<i>d/h</i>	LT ČR	1O			3812	0,95	0,23	2,25	0,61
DB	<i>d/h</i>	LT ČR	2B			3808	0,95	0,23	2,25	0,61
DB	<i>d/h</i>	PLO		5		916	1,02	0,28	2,35	0,62
DB	<i>d/h</i>	PLO		17		794	1	0,32	2,3	0,62
DB	<i>d/h</i>	ČR				3816	0,95	0,23	0,25	0,61
BO	<i>d/h</i>	ČR				2480	0,97	0,22	4,25	16,18

*Poznámka: Bylo zjištěno, že růstový proces modelu Sibyla reaguje na aplikaci korektoru s hodnotou do 1,5 minimálně. Při aplikaci korektoru 1,5 se rychlost přírůstu zvýšila o násobek korektoru. Při testovací simulaci provedené na ploše Želivka (11 let, SLT 3S) byla zjištěna po aplikaci korektoru  $h$  1,5 změna výšky ve 130 – ti letech u hlavního porostu do 20 – ti %. Stromy sociálního postavení 3 resp. 4 na změnu korektoru nereagovaly vůbec.*

### **5. 3. 4 Omezení kalibračních koeficientů přípustnými tvarovými charakteristikami kmene**

V průběhu řešení bylo zjištěno, že v porovnání s korektorem  $d$ , dosahují korektory výšek u smrku vysokých hodnot. Např. pro PLO 41, SLT 6B (bohatá smrková bučina) by měl korektor  $d$  hodnotu 1,08 oproti korektoru  $h$  1,6 nebo na pro SLT 3K (kyselá dubová bučina) hodnotu korektoru  $d$  0,96 oproti hodnotě 1,95 korektoru  $h$ . Výraznější rozdíl mezi korektory  $d$  a  $h$  negativně ovlivňuje tvarové charakteristiky kmene, které se mohou odchýlit i od biologicky přípustných limitů.

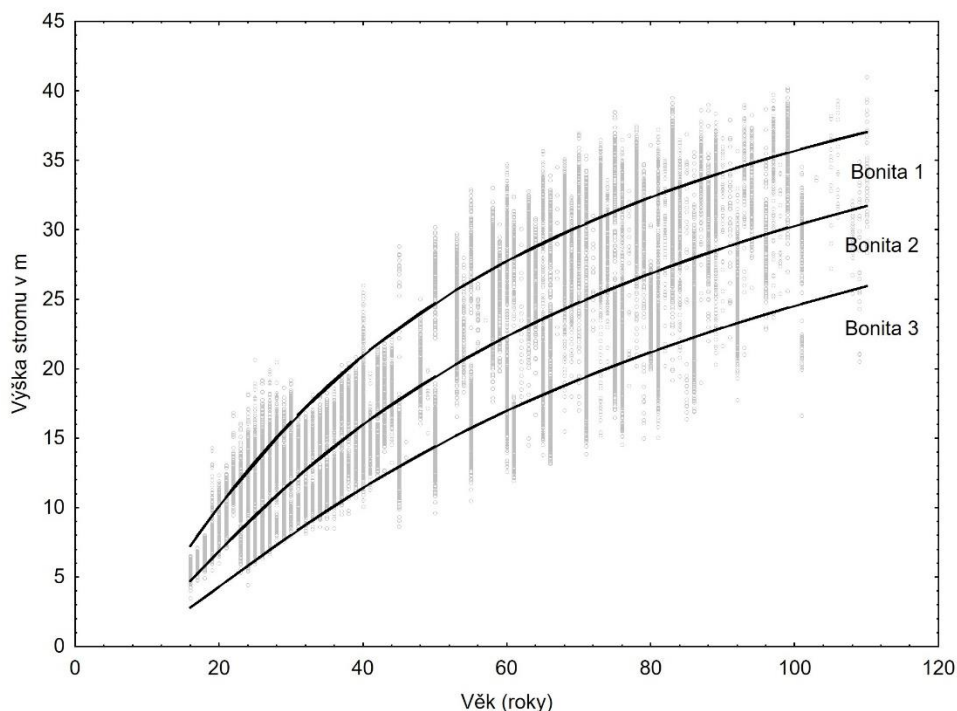
Proto bylo provedeno porovnání přírůstů  $h$  a  $d$  a rovněž porovnání modelových a skutečných hodnot tloušťek a výšek. Výsledkem bylo určení vztahů mezi tloušťkovým a výškovým přírůstem (empirickým a modelovým) a na základě těchto informací pak vytvoření postupu, jak kalibrační koeficient pro výškový přírůst vypočítat na základě tloušťkového koeficientu. Vzhledem k tomu že empirická měření výšek nebyla k dispozici pro všechny vzorníky, byly do hodnocení zahrnuty pouze ty stromy, kde byly měřeny jak výšky, tak tloušťky.

Postupy pro určení vztahu mezi štíhlostním koeficientem a výčetní tloušťkou na různých bonitách uvádí např. KONŮPKA ET AL. (1987) na základě bonitních křivek HALAJE (1987). V současnosti je používán v ČR systém RT ČERNÝ ET AL. (1986). Ani jeden z těchto bonitních systémů však neodpovídá empiricky měřeným datům využívaným v této práci. Na obr. 5. 3. je porovnání středních bonit z obou výše uvedených prací pro dřevinu smrk a střední bonity parametrizované pomocí Richards – Chapmanovy růstové funkce na empirických datech použitých v této práci. Ta vykazuje odlišný růstový trend ve všech věkových obdobích porostu.

Bonitní systém navržený na základě dostupných empirických dat pro účely této práce obsahuje pouze tři bonity a k parametrizaci byly použity stromová měření (obr. 5. 13). K parametrizaci křivky byla tentokrát použita Korfova růstová funkce. Střední bonita č.



2 viz vzorec č. 5. 3). Tyto funkce byly použity pro výpočet optimální hodnoty korektoru  $h$  tak aby neovlivňoval negativně tvarové charakteristiky kmene při modelování růstu.



Obr. 5.13: Bonity pro smrk ztepilý odvozené ze „stromových měření“ zpracovávaných v této práci.

$$h = 61,2282 \times 12,8011 / ((1 - 1,7056) \times t^{(1,7056-1)}) \quad [5.3]$$

Výpočet střední výškové bonity (č. 2) smrku ztepilého,  $h$  – výška stromu,  $t$  – věk

Nejprve byla pomocí lineárního modelu vyčíslena hodnota  $h$  jako funkce věku a bonity. Štíhlostní koeficient byl pak vypočítán jako podíl těchto funkcí ( $f(h) / (d)$ ). Koeficienty regresní funkce pro výpočet  $h$  obsahuje tab. 5. 4.

Tab. 5. 4: Koeficienty lineárních regresních modelů pro výpočet  $d$  a  $h$ , jako funkce bonity ( $q$ ) a věku ( $t$ ). Černě jsou označeny koeficienty, červeně směrodatná chyba.

Model	A	B	C	R <sup>2</sup>
h= f(t,q)	13,817	0,266	-4,157	0,86
	(0,490)	(0,004)	(0,169)	

Na základě stromových dat, u kterých bylo k dispozici měření tloušťkových a výškových přírůstků, byl vytvořen pomocí lineární regrese model k výpočtu hodnoty výškového kalibračního korektoru na základě hodnot tloušťkového korektoru. Cílem bylo přiblížit se co nejvíce skutečným hodnotám štihlостního koeficientu a přiblížit tak modelová data reálnému poměru tloušťky a výšky. Rovnice lineárního modelu je:

$$Kor_h = 1,233548 + 0,237719 \times Kor_d \quad [5.4]$$

Vzorec pro výpočet korektoru  $h$ ,  $Kor_h$  – korektor  $h$ ,  $Kor_d$  – korektor  $d$

V případě smrku ztepilého se k hodnotě republikového tloušťkového kalibračního koeficientu 1,06 (odvozeno přímo z dat porovnáním měřených a simulovaných hodnot) váže hodnota výškového koeficientu 1,48 (odvozeno z hodnot korektoru  $d$  tak, aby byla dosažená maximální shoda s měřeného a simulovaného štihlостního koeficientu). Korekční koeficienty odvozené uvedeným způsobem pro další prostorové a stanovištní jednotky jsou uvedeny v tab. 5. 5.

### 5. 3. 5 Odvození kalibračních koeficientů pomocí přírůstových křivek

V rámci řešení práce byl rovněž testován alternativní postup, kdy jsou korektory odvozeny z hodnot přírůstových funkcí parametrizovaných z modelových a skutečných dat  $d$  a  $h$ . Postup předpokládá dostatečné množství naměřených hodnot ve všech věkových stupních. S ohledem na rozložení vstupních dat bylo možné tímto způsobem vypočítat korektory pouze pro dřeviny smrk a buk na republikové úrovni. V první fázi byla provedena parametrizace růstových křivek  $d$  a  $h$  z modelových a empirických měření. K proložení dat byla použita Richards – Chapmanova růstová funkce (Vzorec 5.2).

Parametry růstových funkcí pro jednotlivé dřeviny obsahuje tab. 5. 1. V grafech 5. 5 a 5. 6 je zobrazen průběh přírůstové funkce a hodnoty korektoru pro danou veličinu resp. dřevinu v závislosti na věku. Poměr empirických a modelových přírůstků  $h$  u smrku vykazují nárůst do 50 ti let věku, poté postupně klesají. Ve srovnání s bukem dosahují výrazně vyšších hodnot, ale je nižší oproti hodnotám korektorů vypočítaných přímo z dat

(Vzorec 4. 1). Pokud by hodnoty přírůstků odvozené z těchto funkcí byly použity pro kalkulaci korektorů byla by střední hodnota korektoru  $h$  pro smrk ztepilý na úrovni ČR 1,16 a korektoru  $d$  1,01. Střední hodnota korektoru  $h$  pro buk lesní pak 0,94 a pro  $d$  1,01. Je ovšem zapotřebí mít na zřeteli nelineární průběh poměru dvou funkcí v závislosti na věku, co však při korekci růstového procesu v modelu Sibyla není možné využít.

### 5. 3. 6 Souhrnné výsledky kalibrace

Pro dřeviny smrk ztepilý, buk lesní, duby (*Quercus* sp.) a borovici lesní byly vypočítány korektory  $d$  a  $h$ . Hodnoty korektorů byly počítány pro oblast celé ČR a tam kde bylo k dispozici dostatečné množství dat i pro další geografické resp. stanovištní úrovně (SPLO, PLO, SLT) nebo jejich kombinace. Dále byl analyzován vliv poměru hodnot korektoru  $d$  a  $h$  na tvarové charakteristiky kmene a hodnoty korektoru  $h$  byly upraveny pomocí postupu prezentovaného v kap. 5. 3. 4. Kromě toho byl otestován postup výpočtu korektoru pomocí přírůstků získaných z přírůstových křivek. Všechny hodnoty korektorů pro dřeviny resp. oblasti použité pro další simulace jsou uvedeny v tab. 5. 4. Střední hodnota korektoru  $d$  na úrovni ČR pro jednotlivé dřeviny se pohybuje v rozmezí 0,95 - 1,1. Nejvyšších hodnot dosáhla u smrku a buku (shodně 1,1). Korektory dubu a borovice dosahují hodnoty 0,95 resp. 0,97. Korektor  $h$  u smrku dosahuje hodnoty 1,46. U ostatních dřevin byla aplikována stejná hodnota korektoru jakou má korektor  $d$ .

Úprava korektorů pomocí postupu zohledňujícím ŠK měla za následek snížení korektoru  $h$  (který byl při odvození přímo z dat nepřírozně vysoký) v 10 - ti případech. Ve čtyřech případech zůstala hodnota stejná. Pro následné simulace byly použity pro smrk korektory získané postupem zohledňujícím tvarové charakteristiky kmene. U ostatních dřevin byly aplikovány korektory vypočítané bez těchto úprav. Střední hodnota korektoru  $h$  pro ČR vypočítaná tímto způsobem je 1,46.

Tabulka 5.4: Hodnoty korektorů  $d$  a  $h$  a jejich zobecnění pro Českou republiku. Korektory jsou definovány na následujících hierarchických úrovních 1) SLT PLO, 2) SLT SPLO, 3) SLT ČR, 4) PLO, 5) SPLO, 6) ČR (sloupec Úroveň). Kor.  $h_1$  – hodnota korektoru po úpravě ŠK. Kor  $h_2$  hodnota korektoru  $h$  bez úpravy ŠK, Kor  $h_3$  – hodnota korektoru z přírůstové funkce, Kor.  $d_3$  – hodnota korektoru  $d$  z přírůstové funkce

Úroveň	Kor. $d_1$	Kor. $d_3$	Kor. $h_1$	Kor. $h_2$	Kor. $h_3$	Jednotka	SLT	PLO	SPLO	Dřevina
1	1,077	1,01	1,489	1,60	1,16	SLT PLO	6B	41		SM
1	0,976		1,465	1,58		SLT PLO	6S	28		SM
2	1,089		1,492	1,49		SLT SPLO	4B		2	SM
2	1,156		1,508	1,41		SLT SPLO	5S		2	SM
2	1,077		1,489	1,60		SLT SPLO	6B		2	SM
3	0,926		1,454	1,19		SLT ČR	5K			SM
3	0,964		1,463	1,95		SLT ČR	3K			SM
3	0,957		1,461	1,57		SLT ČR	6S			SM
3	1,077		1,489	1,60		SLT ČR	6B			SM
3	0,994		1,470	1,49		SLT ČR	4B			SM
4	1,080		1,490	1,49		PLO		41		SM
4	0,992		1,469	1,57		PLO		28		SM
5	1,087		1,492	1,40		SPLO			1	SM
5	1,053		1,484	1,56		SPLO			2	SM
6	1,060		1,485	1,46		ČR				SM
1	1,29		0,94	1,29			1,01	SLT ČR	3H	
1	1,00	1,00			SLT ČR	4B				BK
1	1,16	1,16			SLT ČR	5S				BK
2	1,160	1,160			PLO			16		BK
2	1,05	1,05			PLO			28		BK
2	1,00	1,00			PLO			29		BK
2	1,056	1,056			PLO			36		BK
2	0,91	0,91			PLO			40		BK
2	1,075	1,075			PLO			41		BK
3	1,1	1,1			ČR					BK
1	0,95		0,95			SLT ČR	1O		DB	
1	0,95		0,95			SLT ČR	2B		DB	
2	1,020		1,020			PLO		5	DB	
2	0,995		0,995			PLO		17	DB	
3	0,947		0,947			ČR			DB	
1	0,945		0,945			ČR			BO	

## 5. 4. Vliv změny klimatu na produkční ukazatele lesa

### 5. 4. 1 Simulace na úrovni výzkumných ploch

Jako východisko pro celorepublikové hodnocení dopadů změny klimatu byly realizovány simulace vývoje lesa na úrovni reprezentativních porostů rozmístěných v rámci celé České republiky (Kapitola 4. 1). Celkově byly simulace vývoje provedeny na 180 – ti plochách. Tyto porosty se v převážné míře shodují s plochami použitými pro kalibraci. Pro simulace byl použitý model s růstovým procesem kalibrovaným pomocí koeficientů popsaných v předešlé kapitole.

*Poznámka: Část simulací byla realizována autorem práce. Zobecnující informace prezentované v další kapitole však byly odvozeny ze simulací realizovaných na větším počtu ploch (180) a tyto simulace byly realizovány v rámci projektu NAZV ProClim (ČZU FLD, koordinátor prof. Ing. Róbert Marušák PhD.), na kterém se autor podílel jako řešitel.*

Simulace vývoje lesa byly provedeny za použití 10 – ti scénářů změny klimatu a při stabilním neměnném klimatu odpovídajícím klimatickým podmínkám období 1961-1990 (Kapitola 4. 2). Při všech simulacích byl aktivován disturbanční modul popsaný v kapitole 4. 3. Simulace vývoje lesa byly realizovány při dvou různých managementech:

- Při současně realizovaném managementu podle Zákona o lesích č. 289/1995 Sb. a navazujících předpisů zejména vyhlášek č. 83 a 84/1996 Sb.
- Při variantě současně realizovaného managementu, která zahrnuje dva důležité prvky adaptace na změnu klimatu. Jedná se o zavedení vyššího podílu stanovištně vhodných dřevin (jako náhrada smrku a zvýšení druhové diverzity porostů) a snížení doby obmýtí smrku v průměru o 20 let (s ohledem na stanoviště). Tyto dva prvky byly zařazeny s ohledem na jejich význam při adaptaci lesa v České republice v souladu s certifikovanou metodikou HLÁSNY ET AL. (2016A), na které se autorsky podílel i autor disertační práce. Obecně adaptace zahrnuje mnohem širší spektrum postupů, které však není možné hodnotit pomocí modelu Sibyla, resp. pomocí modelů obecně (např. využití genetické variability dřevin při adaptaci na změnu klimatu)

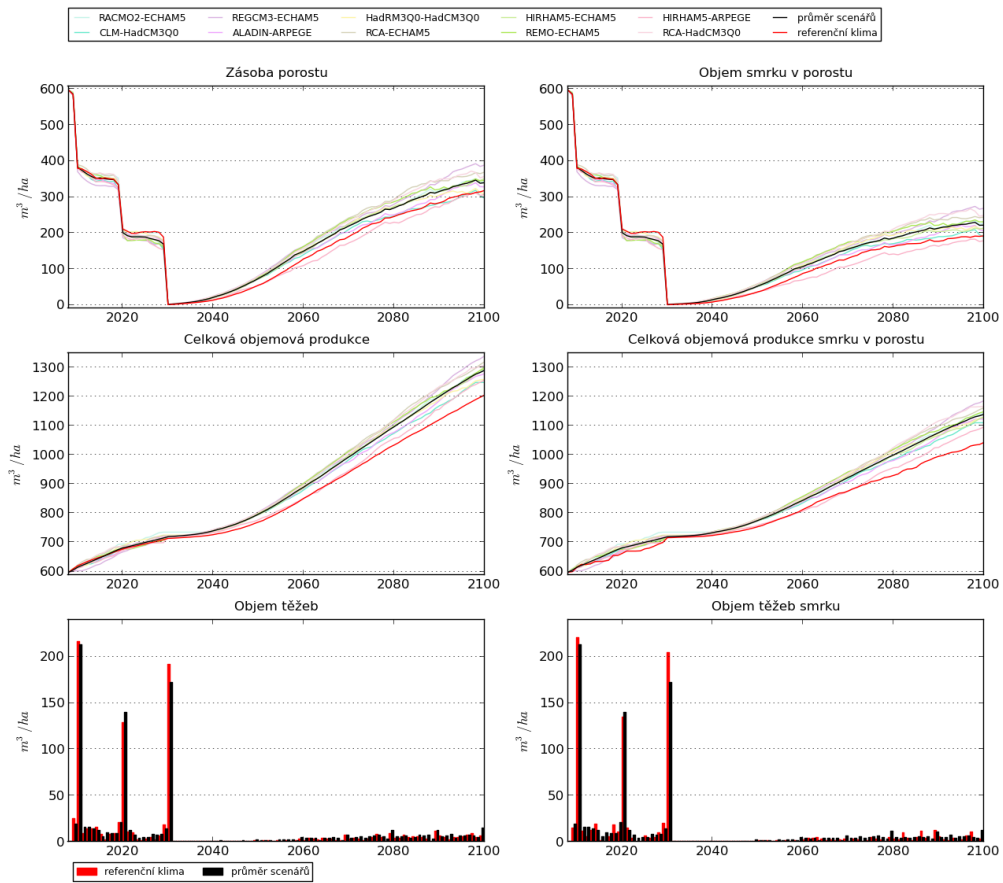
Pro ilustraci jsou uvedeny výsledky simulací vývoje lesa na tří stanovištně odlišných plochách z databáze pěstitelských ploch VÚLHM Vimperk, Petříkovice a Zaječiny.

Výsledky z dalších ploch zde neuvádíme, protože by se jednalo o značně redundantní informace a dále se zaměřujeme na zobecnění výsledků na republikovou úroveň.

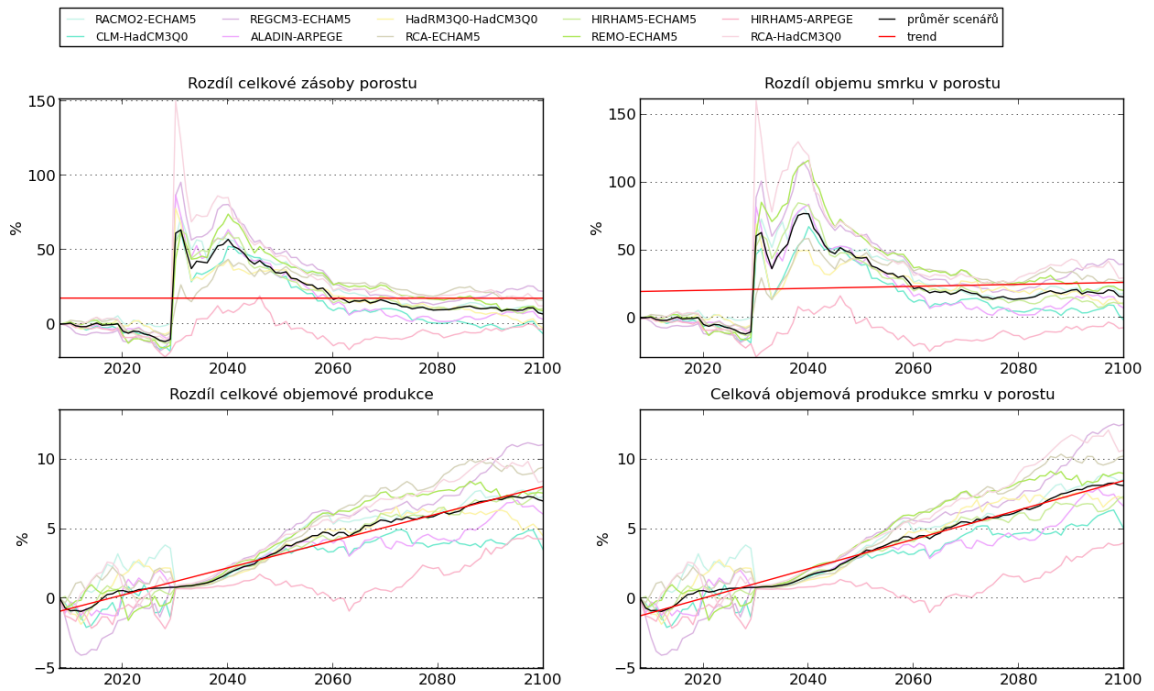
### **Plocha Vimperk**

Plocha byla vytěžena ve třech etapách na začátku simulační periody. Po rok 2030 docházelo k mírné divergenci vývoje porostu v souvislosti s rozdílným vývojem klimatu. Do tohoto období zásoba porostu v důsledku změny klimatu mírně narůstala a celková objemová produkce mírně klesala, tyto změny však nebyly významné. V důsledku zmýcení porostu se meziscénářový rozptyl stabilizoval na nule, a v období po zmýcení porostu do konce simulační periody v roce 2100 docházelo k postupné divergenci vývoje dle jednotlivých klimatických scénářů (obr. 5. 14).

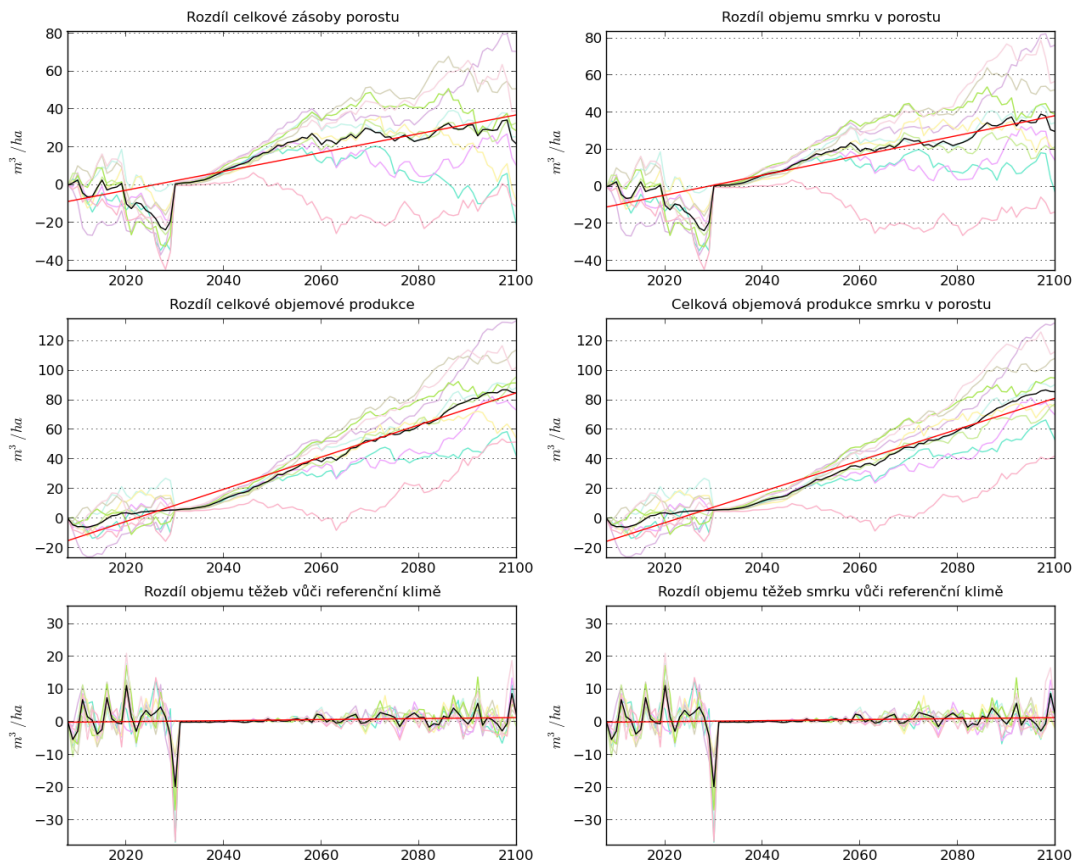
Vliv změny klimatu je z důvodu vysoké nadmořské výšky porostu pozitivní. Zásoby porostu nevykazovaly výrazný trend, po zmýcení se však udržuje konstantně na úrovni +10 % nad úrovní simulací realizovaných při stabilním (nezměněném) klimatu. Celková objemová produkce konstantně narůstá v rozmezí 5 – 13 % ke konci století, s průměrem 8 %. Celkový objem těžeb se ke konci století zvyšuje, nárůst je však nevýrazný (obr. 5. 15 a 5.16).



Obr. 5.14: Vývoj vybraných produkčních ukazatelů plochy Vimperk II kontrola v podmínkách změny klimatu při standardním managementu a aktivaci mortalitního modulu.



Obr. 5.15: Změna vybraných produkčních ukazatelů v % v důsledku změny klimatu na ploše Vimperk II kontrola při standardním managementu a aktivaci mortalitního modulu



Obr. 5.16: Změna vybraných produkčních ukazatelů v  $m^3$  v důsledku změny klimatu na ploše Vimperk II kontrola při standardním managementu a aktivaci mortalitního modulu

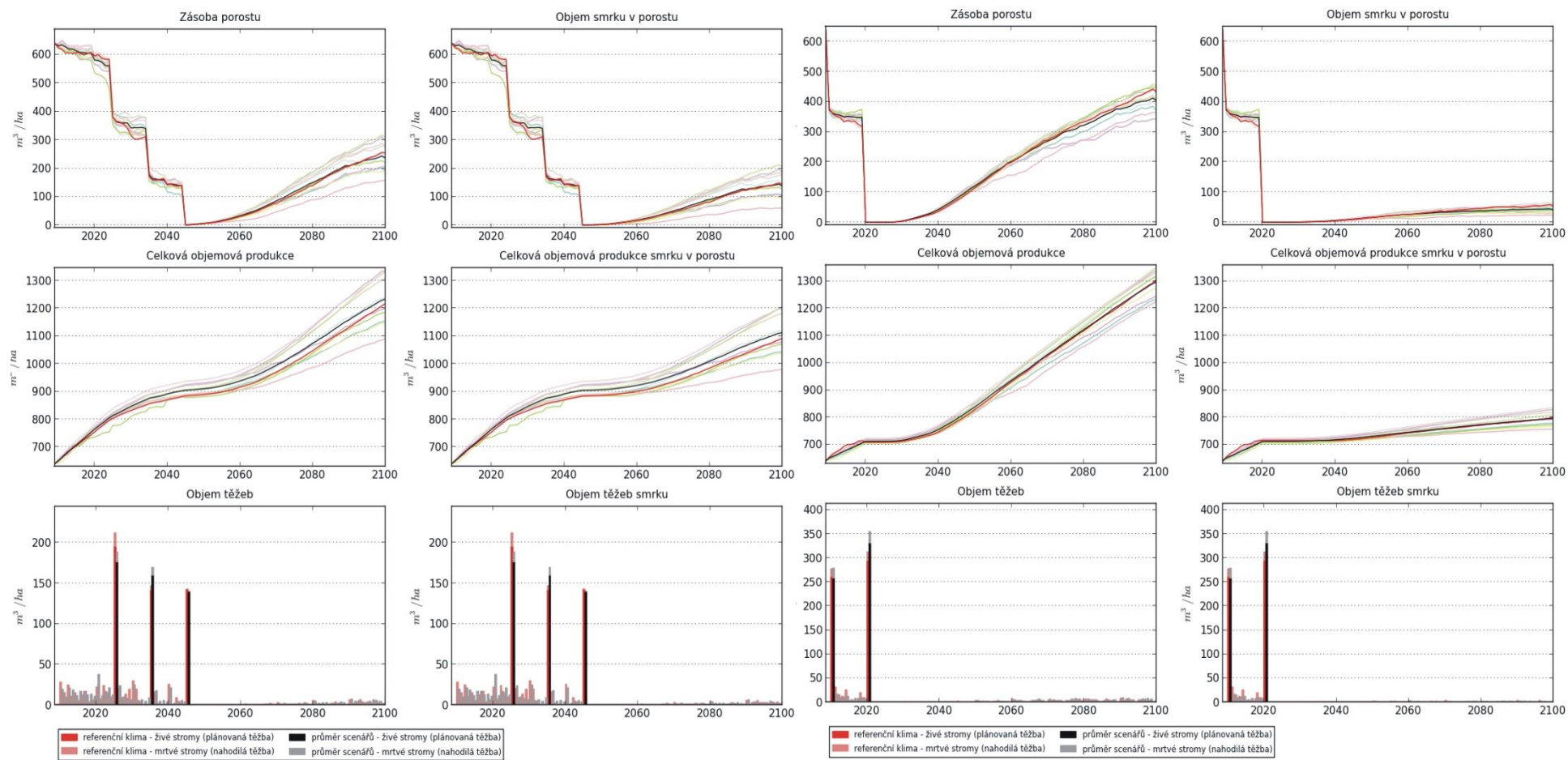


## **Plocha Petříkovice**

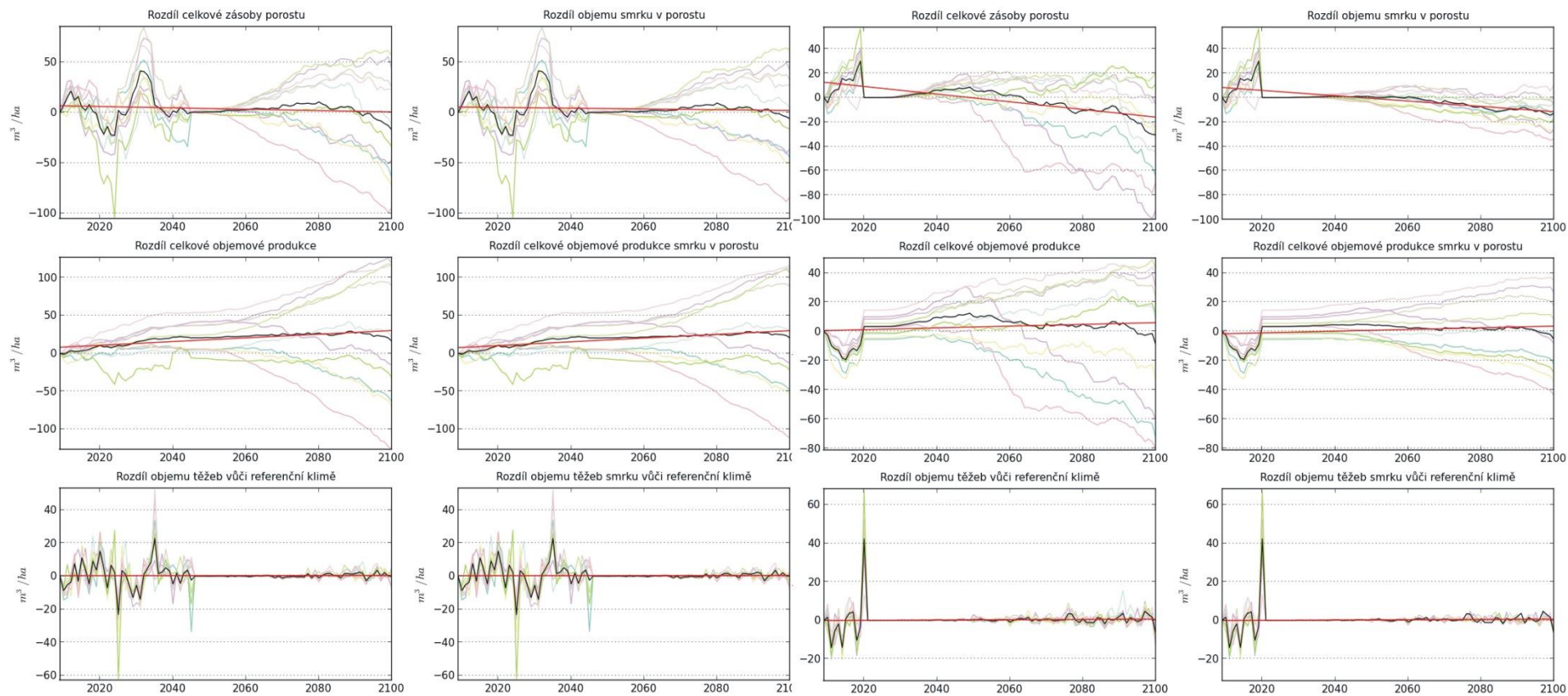
Věk porostu na počátku simulace byl 73 let. Obnovní těžba proběhla při standardním managementu ve třech etapách od roku 2025 do roku 2045. V adaptivním managementu byla první těžba provedena v roce 2010 a k domýcení porostu došlo v roce 2020. Porost byl obnoven smrkem, bukem a jedlí v poměru 70:20:10 (standardní management) resp, smrkem, bukem, jedlí, modřínem, douglaskou a klečí v poměru 10:30:20:20:10:10 (adaptivní management). Kalibrační koeficienty byly aplikované jen pro dřeviny uvedené v předešlé kapitole.

Při aplikaci obou managementů je vývoj plochy do roku domýcení charakterizován relativně vysokými objemy nahodilých těžeb. Po obnově porostu se míra poškozování porostu škodlivými činiteli výrazně snížila v důsledku přítomnosti mladších věkových stupňů a snížením zastoupení zranitelného smrku. Díky snížení zastoupení smrku v porostu při alternativním managementu došlo k celkové stabilizaci porostu (Obr. 5. 17). Vliv změny klimatu na celkovou zásobu porostu při standardním i alternativním managementu je přibližně stejný a projevil se jejím mírným poklesem po roce 2080. Celková objemová produkce je při alternativním managementu vyrovnanější, ale při standardním managementu dochází ke konci století k výraznějším poklesu, který pravděpodobně bude pokračovat i po roce 2100 (Obr. 5. 18 – 5. 19).

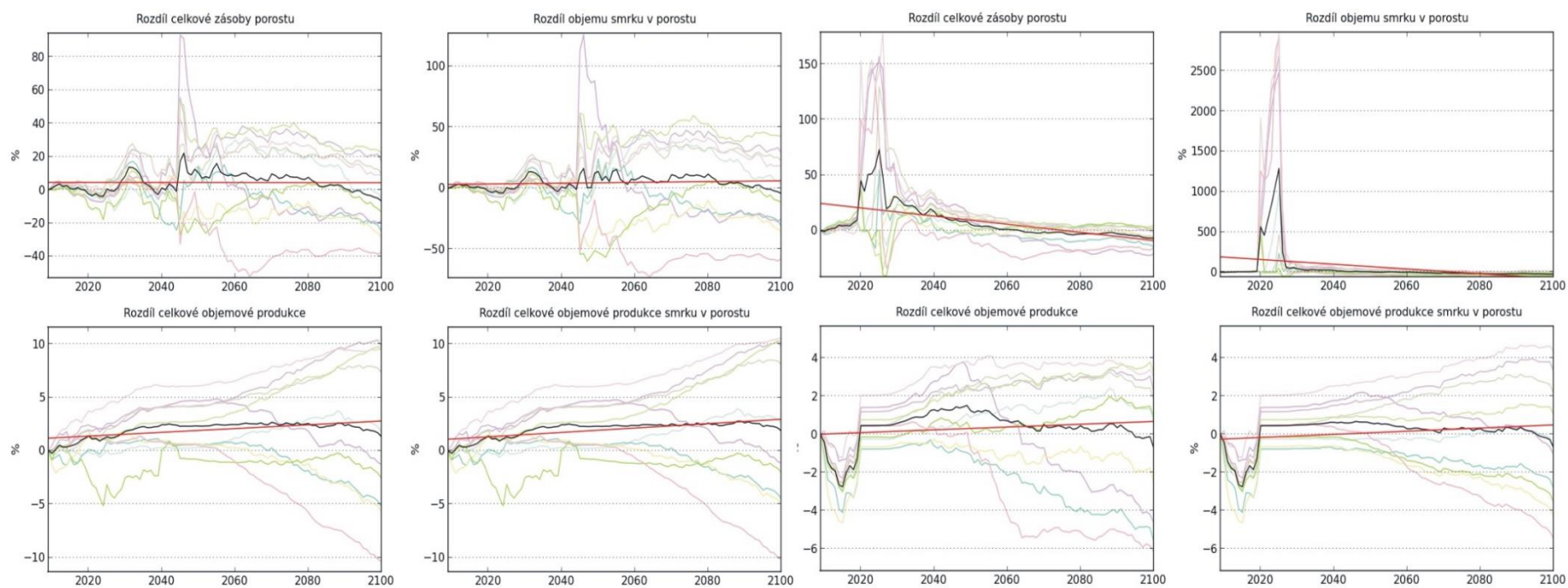
Simulace s použitím kalamitního modulu byly realizovány při standardním managementu a bez vlivu změny klimatu. Z obr. 5. 20 je možné vidět, že vývoj zásoby v porostu se v průběhu v průběhu tří etap jeho smýcení výrazně liší. Vysoký podíl průběžných nahodilých těžeb výrazně ovlivnil výši těžeb plánovaných. V období prvních 30 let po domýcení porostu, kdy je jeho vývoj ovlivňován disturbancemi jen okrajově, není mezi dvěma simulacemi vývoje zásoby porostu rozdíl. Rozdíl se objevuje až po roce 2080, kdy je zásoba porostu simulovaná bez aktivace kalamitního módu logicky větší.



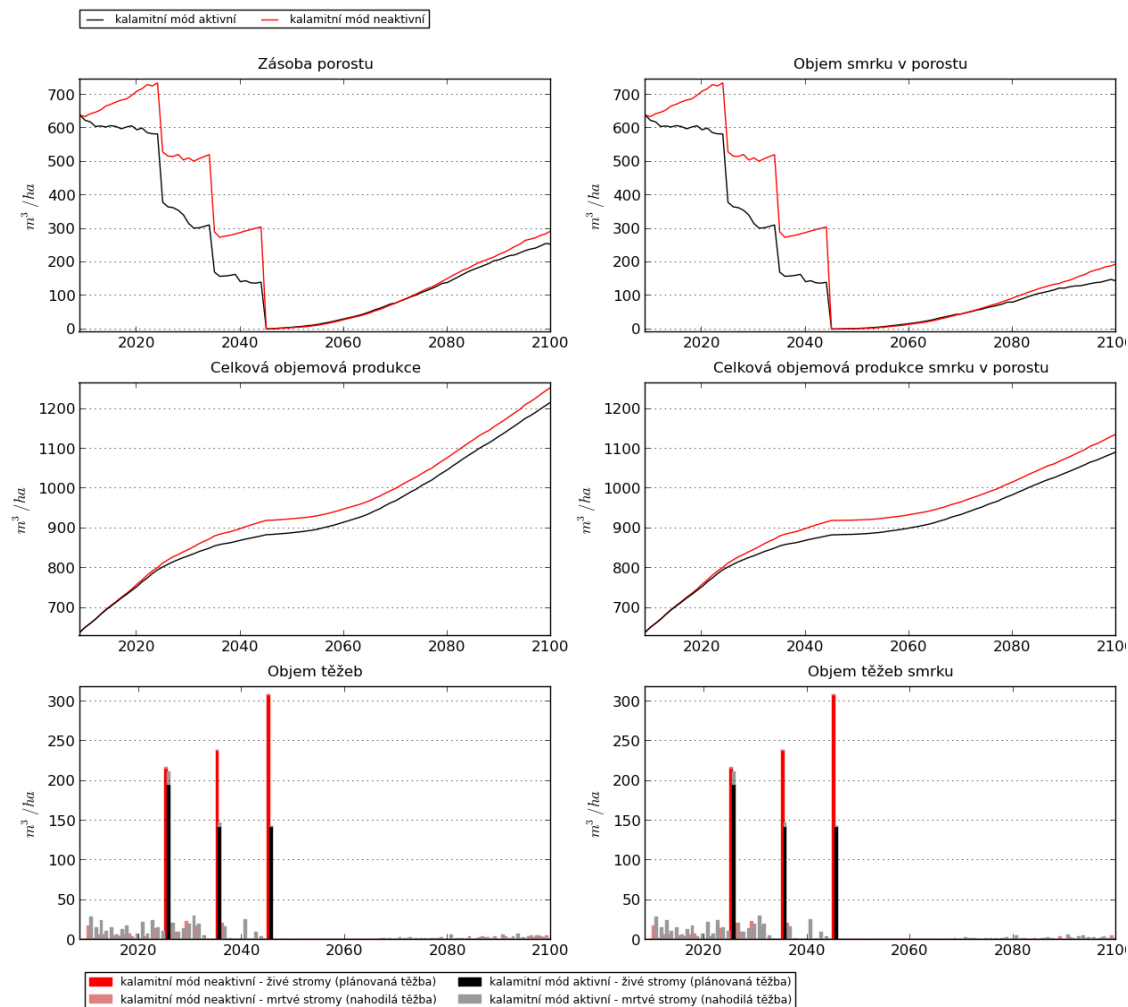
Obr. 5.17: Porovnání vývoje porostu Petřkovice 1 při standardním managementu (levý panel) a managementu zahrnujícím postupy adaptace na změnu klimatu (pravý panel). Simulace jsou realizovány při 10 scénářích změny klimatu a stabilním (nezměněném) klimatu.



Obr. 5.18: Porovnání časového vývoje rozdílů produkčních charakteristik porostu Petřikovice 1 při standardním managementu (levý panel) a managementu zahrnujícím postupy adaptace na změnu klimatu (pravý panel) ( $\text{m}^3/\text{ha}$ ). Simulace jsou realizovány při 10 scénářích změny klimatu a stabilním (nezměněném) klimatu



Obr. 5.19: Porovnání časového vývoje rozdílů produkčních charakteristik porostu Petřikovice 1 při standardním managementu (levý panel) a managementu zahrnujícím postupy adaptace na změnu klimatu (pravý panel) (%). Simulace jsou realizovány při 10 scénářích změny klimatu a stabilním (nezměněném) klimatu.



Obr. 5.20: Porovnání výsledků simulací realizovaných s aktivací a bez aktivace kalamitního modulu na ploše Petřkovice při standardním managementu lesa a nezměněném klimatu.

## **Plocha Zaječiny II**

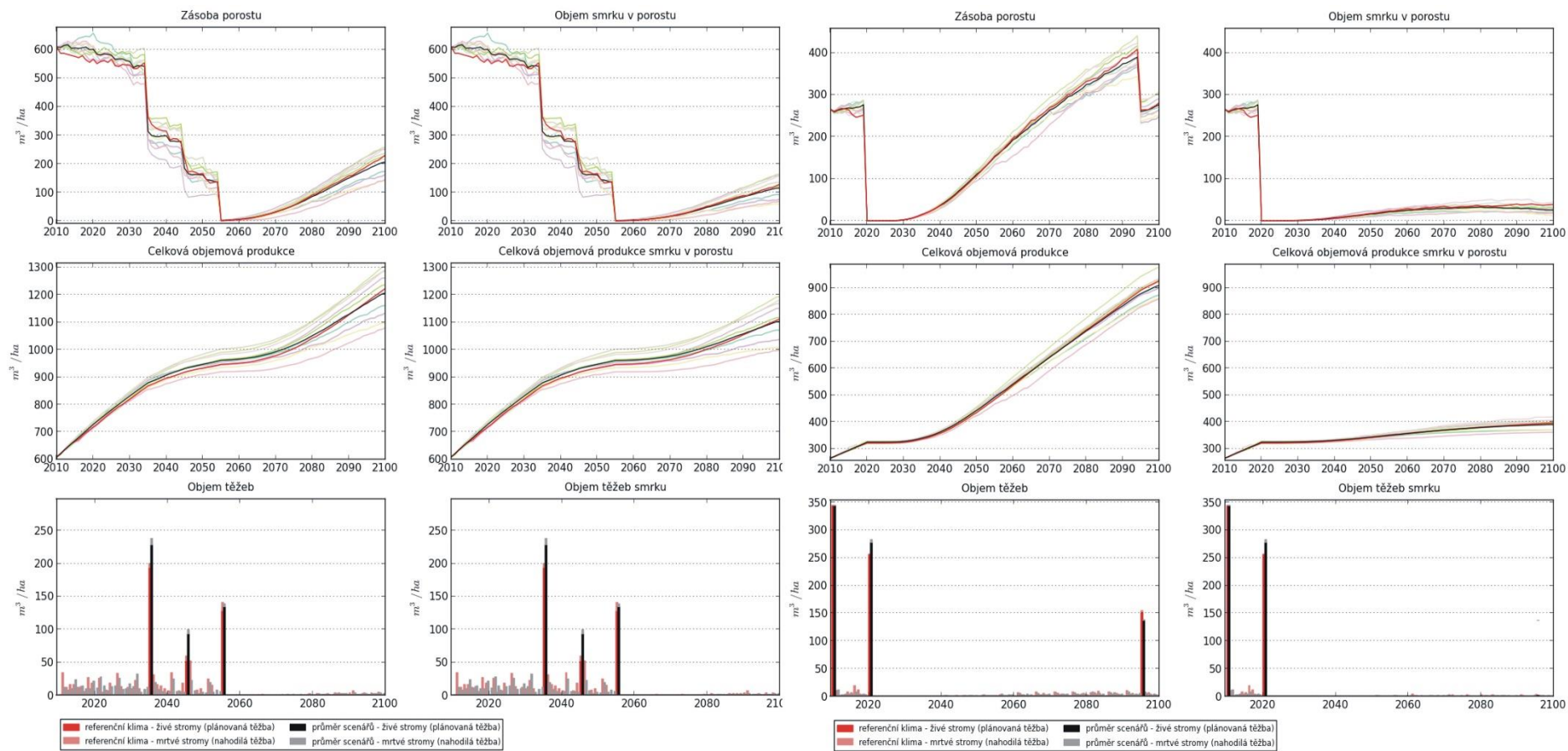
Počáteční věk simulace byl 62 let. Porost byl při standardním managementu vytěžený ve třech etapách v letech 2035, 2045 a 2055. U převážně smrkového porostu bylo vysoké riziko rozpadu, proto byl porost při adaptivním managementu vytěžen ve dvou fázích v letech 2010 a 2020 ve věku 62 a 70 let. V důsledku zkrácené doby obmýti se v rámci simulační periody realizovala i další těžba v roce 2090. Objem nahodilých těžeb je po celou dobu vývoje porostu malý.

Při standardním managementu je z důvodu vysokého věku porostu, ke kterému se vážou vysoké rizika poškození, patrný mimořádně vysoký objem nahodilých těžeb do roku 2055. Po tomto období se z důvodu celkového „omlazení“ porostu nahodilé těžby téměř nevyskytují (obr. 5. 21).

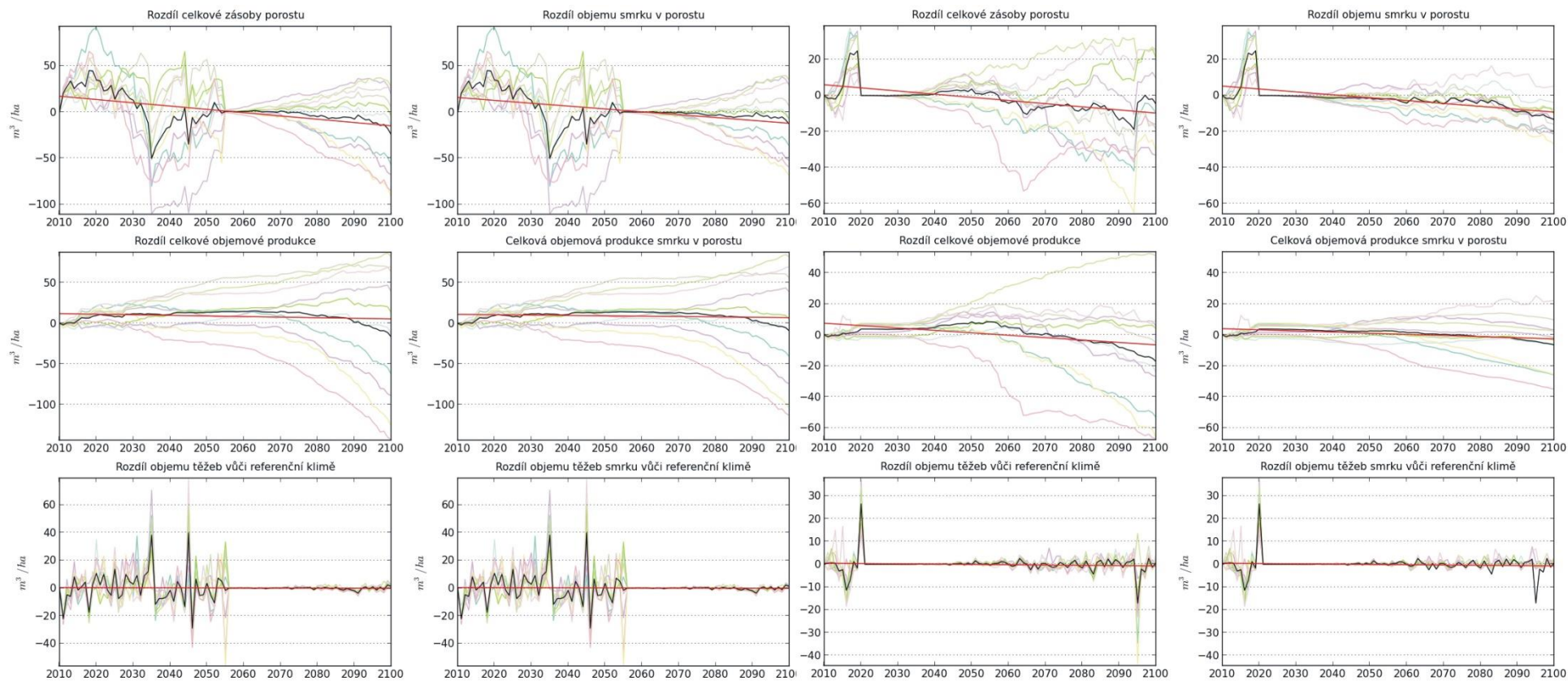
Vliv změny klimatu je patrný jak z rozdílů tak i podílů těžeb realizovaných při scénářích změny klimatu a stabilním (nezměněném) klimatu. Hodnocené produkční ukazatele mají vyrovnanou až mírně klesající tendenci, zejména ke konci století (5. 22).

Procentuální meziscénářová variabilita změn COP i zásoby porostu je výrazně nižší u alternativního managementu než u standardního, což vytváří lepší východisko pro plánování v podmínkách změny klimatu (5. 23).

Prezentované simulace byly realizovány ve stejném designu jako předešlá plocha Petříkovice a charakter odezvy jednotlivých produkčních ukazatelů na aktivaci kalamitního modulu se výrazněji neliší. Zásoba porostu byla aktivací kalamitního módu zásadně ovlivněna. Významně se liší i průběh vývoje celkové objemové produkce, které je bez aktivovaného kalamitního modulu výrazně vyšší. Obdobný je i průběh podílů a rozdílů simulací, včetně charakteristického přechodného nárůstu procentuálních rozdílů zásoby porostu po jeho domýcení (obr. 5. 24).

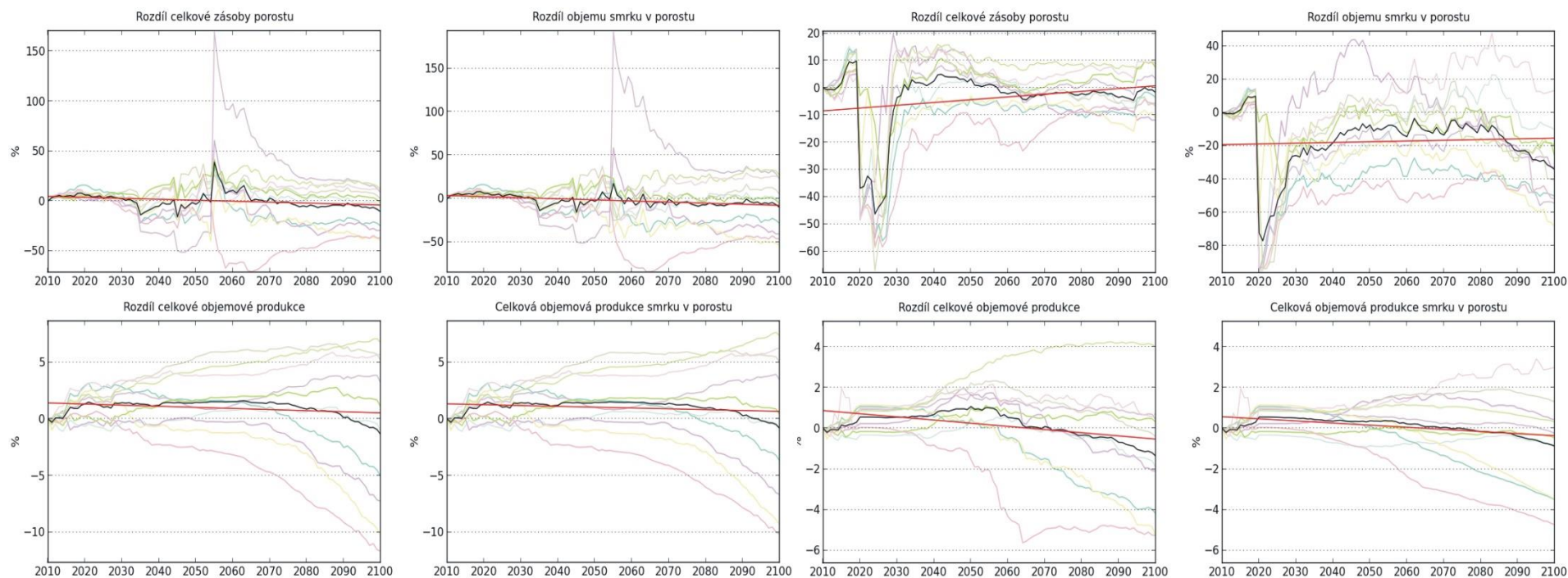


Obr. 5.21: Porovnání vývoje porostu Zaječiny II při standardním managementu (levý panel) a managementu zahrnujícím postupy adaptace na změnu klimatu (pravý panel). Simulace jsou realizovány při 10 scénářích změny klimatu a stabilním (nezměněném) klimatu.

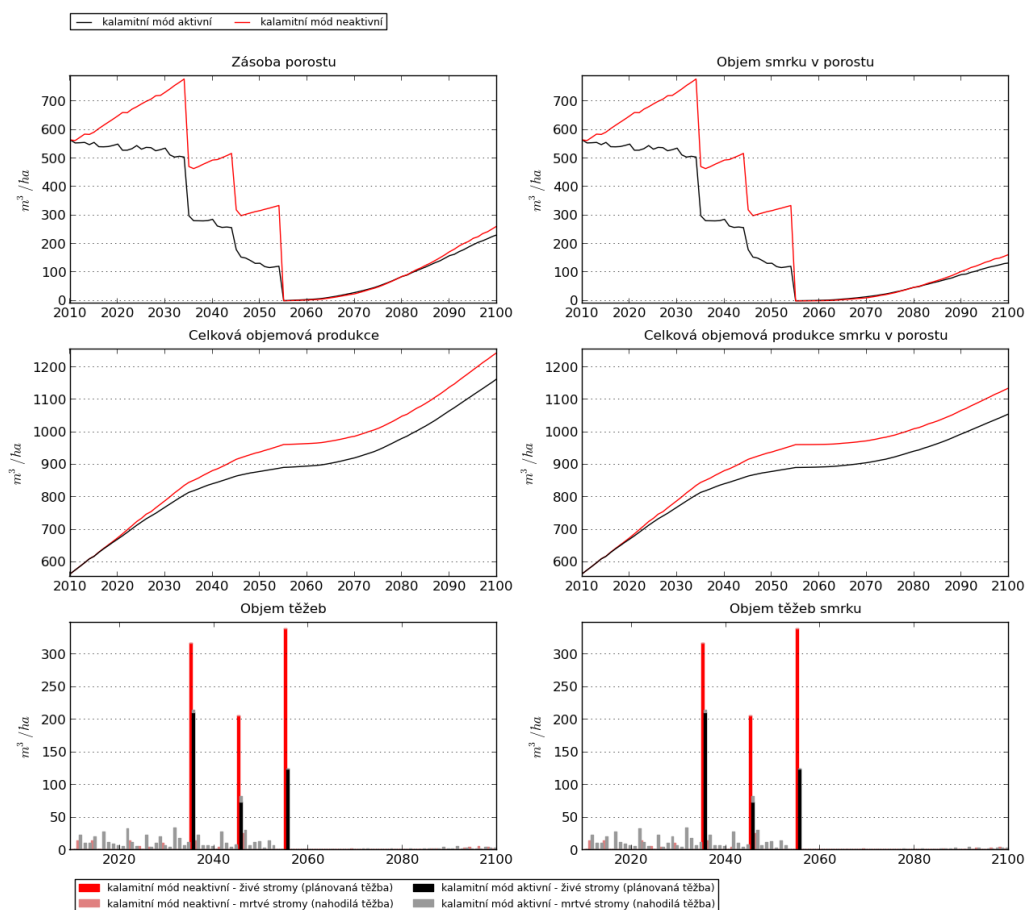


Obr. 5.22: Porovnání časového vývoje rozdílů produkčních charakteristik porostu Zaječiny II při standardním managementu (levý panel) a managementu zahrnujícím postupy adaptace na změnu klimatu (pravý panel) ( $m^3/ha$ ). Simulace jsou realizovány při 10 scénářích změny klimatu a stabilním (nezměněném) klimatu.





Obr. 5.23: Porovnání časového vývoje rozdílů produkčních charakteristik porostu Zaječiny II při standardním managementu (levý panel) a managementu zahrnujícím postupy adaptace na změnu klimatu (pravý panel) (%). Simulace jsou realizovány při 10 scénářích změny klimatu a stabilním (nezměněném) klimatu.



Obr. 5.24: Porovnání výsledků simulací realizovaných s aktivací a bez aktivace kalamitního modulu na ploše Zaječiny při standardním managementu lesa a nezměněném klimatu.

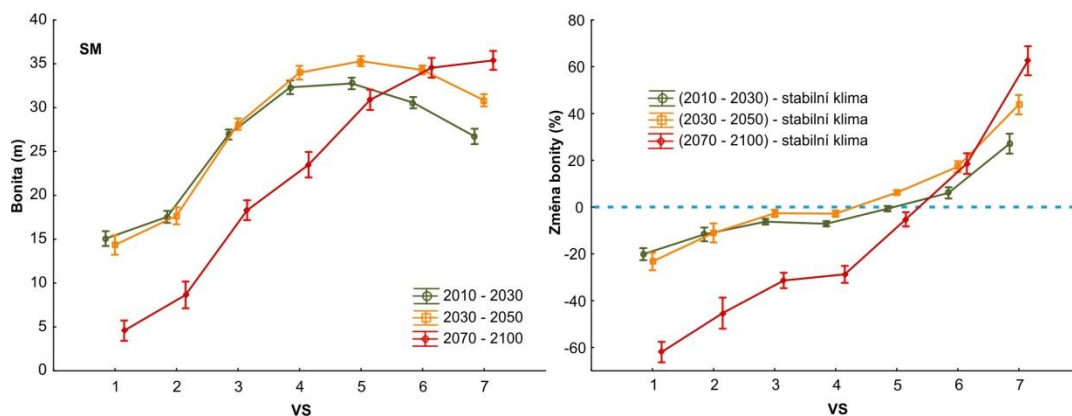
## 5. 4. 2 Zobecnění výsledků simulací pro Českou republiku

### 5. 4. 2. 1 Vliv změny klimatu na bonitu dřevin

Pro kvantifikaci změn bonity (vyjádřené střední výškou dřeviny ve 100 letech věku porostu) byl použit zjednodušený přístup, který nevyžadoval komplexní simulace po jednotlivých vegetačních stupních. V první fázi byly určeny bonity stanovišť pro jednotlivé dřeviny. Bonity byly hodnoceny pomocí ekologických charakteristik stanovišť (klima, ovzduší, půda), přičemž byl použit postup implementovaný v modelu Sibyla. Pomocí transformačních a agregačních funkcí (FABRIKA 2005) byly určeny pro každý rok stabilního klimatu i scénářů změny klimatu maximální výšky 100 – letých stromů, které by za daných stanovištních podmínek mohly tyto stromy dosáhnout v daném roce.

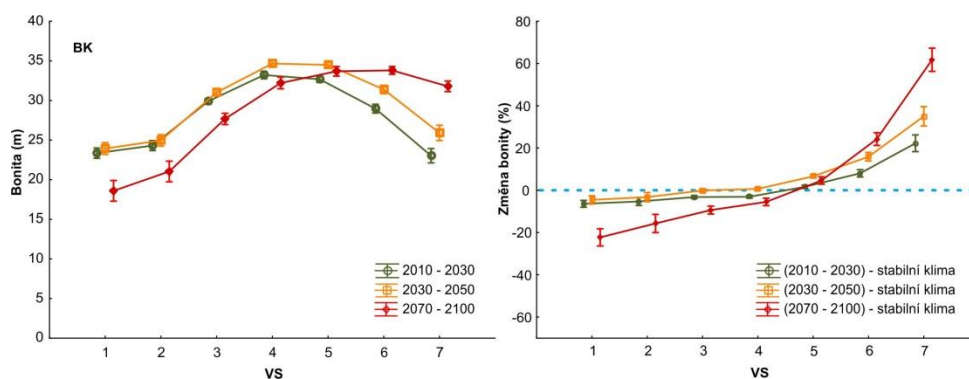
Následně byla pro každou plochu v prvním roce (2010) stanovena maximální výška dřeviny ve věku 20 let a k této byl v každém roce připočten maximální výškový přírůst jednotlivých dřevin v daném věku (věk byl v každém roce zvyšován).

Z takto dosažených výsledků vyplynulo, že bonita smrku v období 2010 – 2030 kulminuje ve 4, až 5, LVS a následně klesá. V blízké budoucnosti (2030 – 2050) nedochází oproti předchozímu období v 1, až 4, LVS k významným změnám. Postupný nárůst bonity lze pozorovat v 5. až 7. LVS. V období 2070 - 2100 změna klimatu vyvolala v nižších vegetačních stupních výrazný pokles bonity o 2 – 8 m. V 5. a 6. LVS nedošlo ke změnám. Ve vyšších nadmořských výškách je možné v důsledku oteplení, nárůstu délky vegetační sezóny a dalších procesů, pozorovat výrazný nárůst bonity (obr. 5. 25).



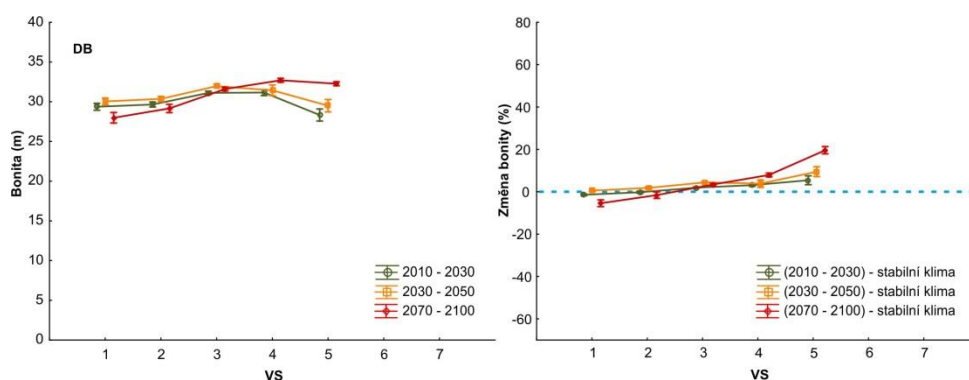
Obr. 5.25: Vývoj bonity smrku v jednotlivých vegetačních stupních České republiky v podmínkách změny klimatu ve třech časových obdobích (levý panel) a změna bonity při simulacích v podmínkách změny klimatu oproti simulacím při stabilním nezměněném klimatu

V případě buku je produkční optimum výraznější a v prvních dvou obdobích se nachází v 5. LVS. Rozdíl mezi obdobími 2010 – 2030 a 2030 – 2050 není významný. Kritický pokles bonity až o 5 metrů je projektován v nižších LVS. V 5. a 6. LVS jsou změny relativně nevýznamné a v 7. LVS je patrný významný nárůst (obr. 5. 26).

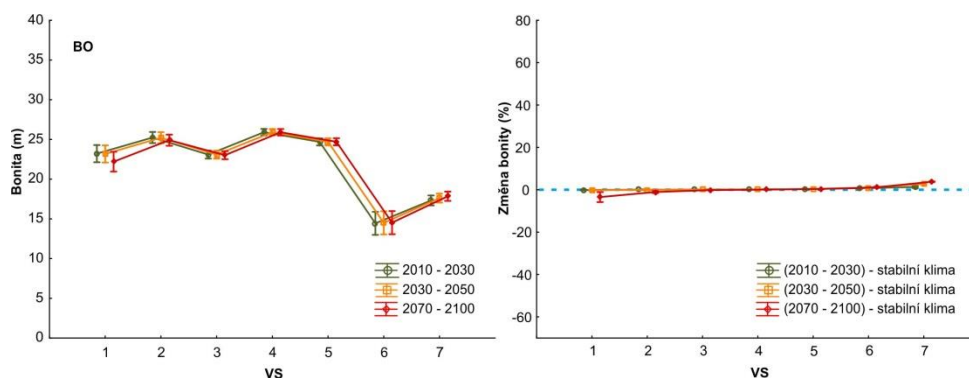


Obr. 5.26: Vývoj bonity buku v jednotlivých vegetačních stupních České republiky v podmínkách změny klimatu ve třech časových obdobích (levý panel) a změna bonity při simulacích v podmínkách změny klimatu oproti simulacím při stabilním nezměněném klimatu

V porovnání se smrkem a bukem nejsou pro dub změny produkčního optima tak výrazné. Mezi obdobími 2010 – 2030 a 2030 – 2070 nejsou významné rozdíly a lze v nich předpokládat mírný nárůst bonity v 5. LVS. Pro období 2070-2100 lze předpokládat mírný pokles v 1. LVS a výraznější nárůst v 5. LVS, kde dosahuje hodnoty přibližně 5 m oproti současnosti (obr. 5. 27). Z hodnocení změny bonit, se vymyká borovice lesní, kde nebyl zaznamenán žádný rozdíl ve změně bonity mezi posuzovanými obdobími. Tato skutečnost je pravděpodobně způsobena vysokou tolerancí této dřeviny, která jí umožňuje prosperovat na stanovištích vymezených širokou ekologickou amplitudou. Nezanedbatelná je v tomto ohledu i vysoká tolerance ke stresu suchem (obr. 5. 28).

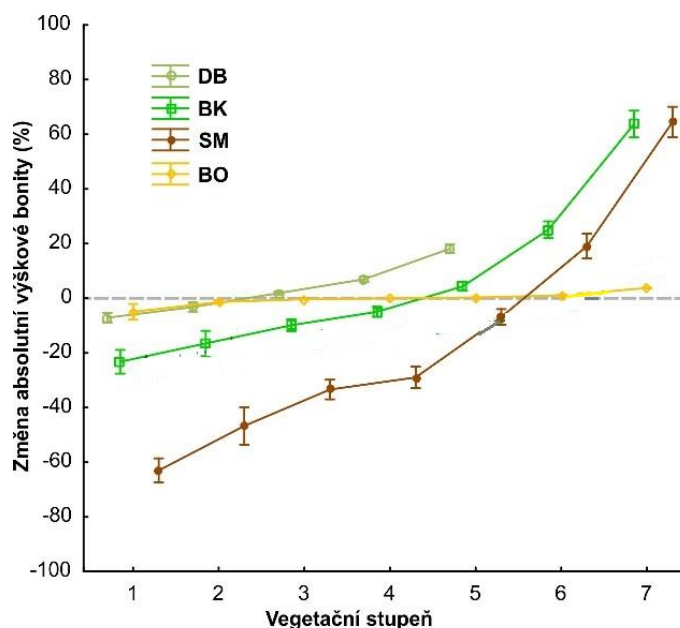


Obr. 5.27: Vývoj bonity dubu v jednotlivých vegetačních stupních České republiky v podmínkách změny klimatu ve třech časových obdobích (levý panel) a změna bonity při simulacích v podmínkách změny klimatu oproti simulacím při stabilním nezměněném klimatu



Obr. 5.28: Vývoj bonity borovice v jednotlivých vegetačních stupních České republiky v podmínkách změny klimatu ve třech časových obdobích (levý panel) a změna bonity při simulacích v podmínkách změny klimatu oproti simulacím při stabilním nezměněném klimatu

Obrázek 5. 29 ukazuje procentuální změnu bonity pro pět hospodářsky významných dřevin v jednotlivých vegetačních stupních. Reakce borovice, která má značně širokou ekologickou amplitudu, je v rámci České republiky nevýrazná a u této dřeviny je možné očekávat zachování produkční funkce v podmínkách změny klimatu. Reakce dubu byla hodnocena jen do 5. LVS. protože nárůst ve vyšších stupních se pohyboval řádově ve stovkách procent, což souvisí se skutečností, že při referenčním klimatu zde klimatické podmínky pro tuto dřevinu nebyly vyhovující. Reakce je relativně nevýrazná, od minimálního poklesu v 1. LVS po nárůst do 20 % v 5. LVS. Relativně nevýrazná je i reakce jedle, u které se pokles ve 3. – 7. LVS pohybují v rozpětí  $\pm 10$  %, ačkoli změna je s výjimkou 7. LVS negativní. Reakce buku je do 4. LVS negativní s poklesem v rozpětí 5 – 20 %, pak prudce stoupá. Nejvýraznější reakce byla pozorována u smrku, jehož produkční potenciál může klesnout v nejnižších polohách až o 60 % a v nejvyšších polohách narůst o 40 – 60 %. Reakce je negativní do 5. LVS.



Obr. 5.29: Procentuální změna bonity hlavních dřevin v důsledku změny klimatu v závislosti na vegetačním stupni. Je prezentován výsledek odpovídající průměru 10 scénářů změny klimatu.

### 5. 3. 2. 2 Celková objemová produkce

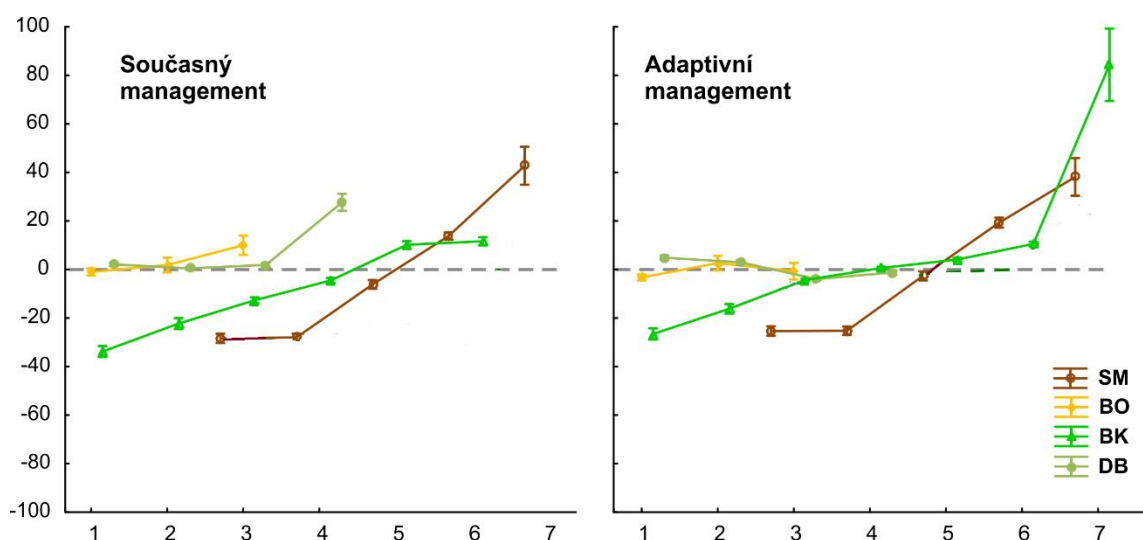
Celková objemová produkce (COP) dřevin se v důsledku vlivu změny klimatu mění. Změny jsou, zejména u smrku a buku, charakterizovány poklesem v nižších nadmořských výškách a nárůstem ve vyšších a rozdíly jsou patrné i v závislosti na aplikovaném managementu. Při analýze změn COP byly provedeny simulace vývoje porostu jen pro dřeviny, které se v porostech buď v současnosti vyskytují, nebo s ohledem na stanoviště mohou vyskytovat. Odezvové funkce dřevin proto nepokrývají celé rozpětí vegetačních stupňů (obr. 5. 30). Pro chybějící část gradientu je však možné potřebné informace odvodit ze změn v bonitě (Kap. 5. 3. 2. 1).

Při aplikaci současného managementu lze u smrku předpokládat vlivem klimatické změny pokles COP ve 3 – 5 LVS. Zatímco v 5 LVS dochází jen k mírnému poklesu do 10 – ti % v případě 2 a 3 vegetačního stupně lze předpokládat snížení produkce shodně o hodnotu cca 30%. Nejvýraznější nárůst lze předpokládat v 7 LVS kdy může COP vykazat nárůst až o 40%. V 6 LVS není změna tak výrazná a dosahuje hodnot mezi 10 – 20%.

Při aplikaci současného managementu na buk lesní dochází k poklesu produkce již 1 LVS (-30 – -35%). Až do 4 LVS se pak propad produkce snižuje, aby ve 4 LVS dosáhl hodnoty -5%. V 5 – 6 LVS lze na základě simulací predikovat shodně nárůst +10%.

Duby (*Quercus sp.*) a borovice lesní vykazují při současném managementu nevýraznou odezvu na klimatické změny v 1 – 3 LVS. Pouze ve 3 LVS lze u borovice pozorovat mírný nárůst produkce do 10 – ti %. Výrazný nárůst produkce byl zaznamenán v případě dubu ve 4 LVS kdy nárůst COP dosáhl 30%.

Je možné vidět, že aplikace adaptivního managementu má pozitivní vliv zejména na buk, kde se záporné hodnoty změny COP (ve 3 – 5 LVS) oproti standardnímu managementu posunuly blíže k nule, a ve 3. a 4 LVS se produkce prakticky rovná hodnotám bez vlivu klimatické změny. Nárůst produkce v 7 LVS není způsoben managementem ale výhradně klimatickou změnou. Oproti tomu duby a borovice vykazují při aplikaci adaptivního managementu minimální změny. Produkce smrku se vlivem adaptivního managementu mírně zvyšuje až do 5 LVS. Nejvyšší nárůst vykazuje v 6 LVS. V 7 vegetačním stupni naopak dochází k mírnému poklesu.



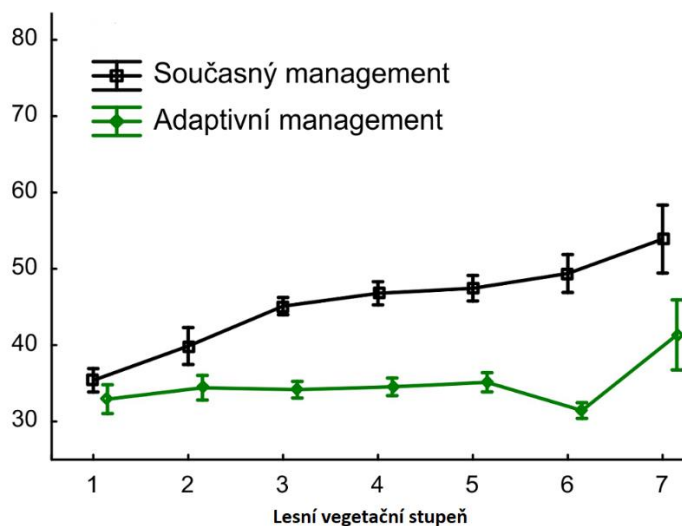
Obr. 5.30: Procentuální změna celkové objemové produkce hlavních dřevin v důsledku změny klimatu při rozdílných způsobech hospodaření v závislosti na LVS. Výsledky odpovídají průměru 10 scénářů změny klimatu.

Obdobným způsobem je možné interpretovat vývoj dalších porostních charakteristik, jako jsou přírůst nebo zásoba porostu, tyto informace jsou však do značné míry redundantní.

#### 5. 4. 2. 3 Objem nahodilých těžeb

Způsob jakým druh managementu ovlivňuje zranitelnost porostů škodlivými činiteli, je důležitým ukazatelem, na jehož základě lze porovnávat způsoby hospodaření a je klíčové v podmínkách změny klimatu. Tento ukazatel byl hodnocen pomocí dvou proměnných, které vhodně ilustrují rozdíly mezi managementy – poměr zásoby porostu k objemu nahodilých těžeb a poměr nahodilých těžeb k celkovým těžbám.

Tyto analýzy byly realizovány po vegetačních stupních a pro současný management i adaptivní management. Vliv změny klimatu hodnocen nebyl, protože mortalitní pravděpodobnosti odvozené z dat za období 2000-2010 byly do budoucna považované za konstantní. Tento předpoklad bylo za potřeby přijmout z důvodu neznámého vývoje budoucího disturbančního režimu lesů. Jisté změny v poškozování souvisejí se změnou dřevinného složení v důsledku změny klimatu, tento vliv je však na celkový objem nahodilých těžeb zanedbatelný (obr. 5.31).

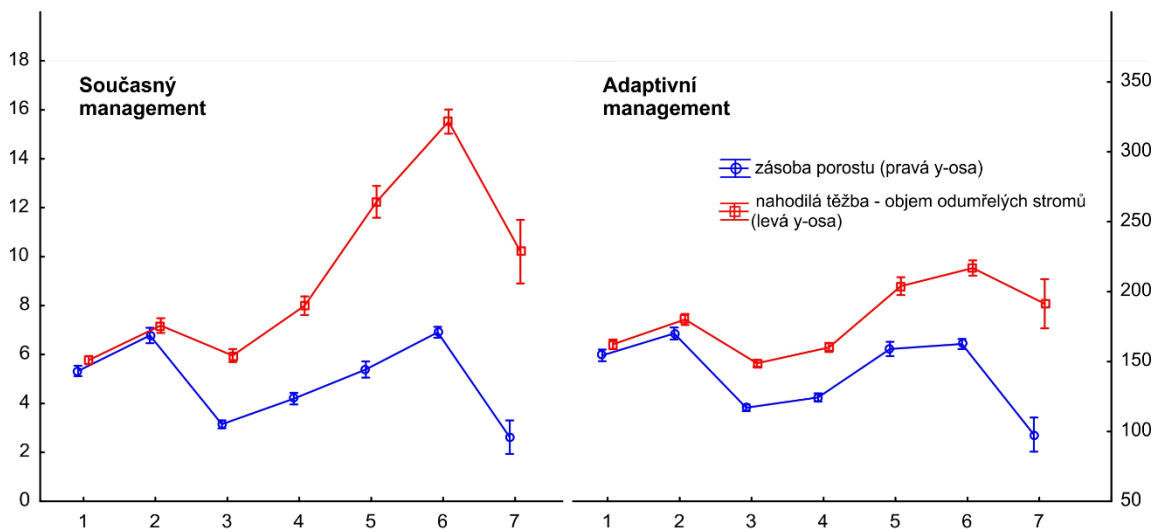


Obr. 5.31: Poměr nahodilých a celkových těžeb při současném a adaptivním managementu



Na obr. 5. 32 je možné vidět, že poměr nahodilých těžeb k celkovým je při standardním managementu výrazně vyšší než u adaptivního managementu, což je s ohledem na minimální rozdíly produkčních charakteristik, hlavní přínos navrženého způsobu hospodaření. Rozdíly se zvětšují směrem k vyšším vegetačním stupňům, přičemž v 5 – 7 LVS je tento rozdíl až 20 %. Nižší hodnoty v nižších LVS u standardního managementu jsou způsobeny vyšším zastoupením méně zranitelných listnatých dřevin.

Druhý použitý indikátor míry poškozování porostů je vztah zásoby porostu k objemu nahodilých těžeb. Současný management vykazuje objemy nahodilých těžeb vyšší než adaptivní management a rozdíl je významný zejména od 4. LVS (nejvýrazněji v 6. LVS).



Obr. 5.32: Vztah zásoby porostu a objemu nahodilých těžeb ( $\text{m}^3/\text{ha}^{-1}$ ) pro různé druhy managementu podle LVS. Z důvodu rozdílného rozsahu hodnot jsou použity dvě osy.

## 5. 5. Souhrn výsledků simulací a důsledky pro adaptaci na změnu klimatu

Návrhy adaptačních opatření vycházející z výsledků předkládané práce jsou do značné míry limitovány možnostmi modelu Sibyla. Autor práce se proto zaměřil zejména na změnu dřevinného složení. Východiskem pro tyto návrhy jsou změny produkčního potenciálu a rizika poškození lesních porostů. Z výsledků simulací částečně vychází i návrhy adaptačních opatření v certifikovaných metodikách HLÁSNY ET AL. (2016A) a NOVÁK ET AL. (2017).

Reakce na působení klimatických změn se mezi dřevinami liší a je výrazně ovlivněna druhem aplikovaného managementu. Nejvýraznější odezvu na vliv KZ vykazuje smrk ztepilý. Do budoucna je nutné počítat s poklesem produkce ve 3. a 4. LVS. V pátém LVS lze při aplikaci adaptivního managementu předpokládat udržení stejné produkce. Ve vyšších vegetačních stupních lze díky posunu produkčního optima vlivem KZ očekávat zvýšení produkce. Výraznější nárůst lze předpokládat v 6. LVS. Aplikací vhodných adaptačních opatření lze významně ovlivnit výši nahodilých těžeb. V aplikovaném adaptivním managementu jsou tato opatření charakterizována zejména změnou dřevinné skladby, zaměřenou na širší využití dřevin odolných ke stresu suchem a rovněž dřevin zpevňujících. Významnou roli hraje rovněž snížení doby obmýtí, díky kterému lze rychleji obnovit nevyhovující porosty.

Na opačném konci škály citlivosti dřevin vůči projevům klimatické změny stojí duby (*Quercus sp.*) a borovice lesní. Jedná se o dřeviny, které vykazují v produkčních charakteristikách minimální odezvu na působení KZ a to od 1. do 3. LVS. Výrazné změny v tomto ohledu nepřináší ani využití adaptivního managementu s výjimkou dubu, kde ve 4 LVS po aplikaci adaptivního managementu vykazuje snížení COP. Ta je v tomto případě způsobena zejména zvýšením druhové diverzity zaváděním dalších melioračních a zpevňujících dřevin a rovněž širším využitím buku lesního. Prezentované výsledky jsou omezeny na současný areál rozšíření hodnocených dřevin, přesto lze v případě dubů, předpokládat možnost jejich využití i v 5 - tém LVS. Zde však již pouze jako doplňující zpevňující dřeviny.

Za hlavní potenciál využití borovice lesní považuje autor její využití jako náhrady za smrk ztepilý ve 3. LVS. Limitujícím faktorem je ale ohrožení suchem, proto by se mělo při pěstování borových porostů počítat s doplněním dřevinné skladby o další odolnější dřeviny.

Aplikací adaptivního managementu lze dosáhnout u buku lesního zvýšení COP od 1. až do 5. LVS. Nejvyšší (relativní) zvýšení produkce lze ale očekávat v 7. LVS, kde se buk v současnosti vyskytuje spíše sporadicky. Při jeho opětovném zavádění do lesních porostů lze však díky posunu produkčního optima do vyšších nadmořských výšek docílit zvýšení jeho produkce. Buk lesní představuje důležitou dřevinu s potenciálem využití zejména při rekonstrukcích smrkových porostů. Při kombinaci s dubem, je třeba brát

ohled na rozdílnou klimatickou citlivost. Na stanovištích ohrožených suchem může být výskyt buku tímto faktorem limitován.

Vliv ohrožení lesních porostů větrem, suchem a biotickými škůdci bude vlivem KZ narůstat. Adaptační opatření prezentovaná v této práci mají ve většině případů konverzní charakter, jedná se tedy převážně postupy zaměřené na přeměnu stávajících porostů charakterizovanou vnášením dřevin tolerantních ke stresu suchem a rovněž dřevin zpevňujících. Přeměny lze na ohrožených stanovištích významně urychlit snížením doby obmýtí. Zavedením těchto opatření lze významně snížit zranitelnost porostů a následně i rozsah nahodilých těžeb.

Podrobněji rozebíráme možnosti využití výsledky práce při adaptaci na změnu klimatu v následné diskusi (Kapitola 6.4).

## **6. Diskuse**

Předkládaná práce byla zaměřena na posouzení očekávaných změn v produkci lesních porostů způsobených vlivem klimatické změny. S pomocí těchto zjištění pak byly vypracovány návrhy doporučení pro management lesa, která mohou zmírnit dopady klimatické změny. K dosažení těchto cílů, bylo třeba shromáždit dostatečné množství informací o přírůstech z většího množství ploch v ČR a zpracovat je tak, aby byly použitelné pro simulace v růstovém simulátoru Sibyla. Dále bylo nutné pro plochy zpracovat klimatická data, včetně scénářů změn klimatu do roku 2100. Na plochách pak byly realizovány komplexní simulace a na základě rozdílů mezi empirickými a modelovými přírůsty byly odvozeny kalibrační koeficienty pro simulátor Sibyla. Dále byly provedeny simulace podle 10 – ti regionálních klimatických modelů a podle standardního managementu a adaptivního managementu. Na základě výstupů simulací pak byly odvozeny závěry, které mají podpořit tvorbu ucelených doporučení pro management lesa zohledňující adaptaci lesů v ČR na změnu klimatu. Tyto doporučení již byly publikovány v certifikované metodice HLÁSNY ET AL. (2016A), které je autor předložené práce spoluautorem. V této práci jsou uvedeny pouze doporučení, které se opírají o výsledky řešení práce, zatímco ve zmíněné metodice je zpracován ucelenější systém adaptací.

## 6.1 Použité scénáře změny klimatu

Úvodní část práce byla věnovaná rozboru prací věnovaných projekcím změny klimatu pro území České republiky. Význam této části řešení spočíval v tom, že scénáře změny klimatu byly přímo využity při řešení, formou řídicích dat použitého modelu dynamiky lesa. Znalost mechanismů způsobujících změnu klimatu a principy tvorby projekcí vývoje klimatu považujeme v kontextu řešení za velice důležitou z hlediska správné interpretace výsledků. Důležitým je taktéž pochopení a interpretace meziscénářové variability očekávaného vývoje klimatu, která určuje rámce projekcí vývoje produkčních ukazatelů. Simulace vývoje klimatu prezentovaná v této práci předpokládá pro období 2021 – 2050 průměrný nárůst teplot o 1,7°C a pro období 2071 – 2100 o 3,5°C. Podobné výsledky uvádí i HANEL ET AL. (2011), který předpokládá průměrné zvýšení 1,2 – 3°C pro časové horizonty 2025, 2055 a 2085. Nárůst teplot do roku 2050 je v jeho studii o něco rychlejší. V roce 2055 předpokládá nárůst teplot o 2,24°C. Srážkové úhrny mají v zimním a jarním období stoupat, k poklesu bude docházet v letním období. Studie HANEL ET AL. (2001) předpokládá ještě v období do roku 2025 v letním období nárůst o 2,79%. Rozdíl je rovněž v nárůstu srážek v zimním období kdy autor předpokládá nižší nárůst srážek než výsledky simulací prezentované v této práci. Celkově projekce klimatu prezentované v této práci počítají oproti porovnávané studii s vyšším nárůstem srážek. ŠTĚPÁNEK ET AL. (2016) předpokládá na konci 21. století teploty v průměru o 4,9°C vyšší oproti referenčnímu období. Nárůst srážek lze podle tohoto autora předpokládat v rozsahu 7 – 11 resp. 6 – 16 v závislosti na použitém RCP. Oproti předkládané studii nepočítá s výraznými změnami v úhrnech srážek v letním období. Výsledky porovnávaných studií vykazují odlišnosti způsobené použitím rozdílných emisních scénářů stejně jako klimatických modelů, v obecných trendech změn se však neodlišují. Navzdory skutečnosti, že na některých plochách byl projektován nárůst úhrnů srážek, nárůst teploty způsobí zvýšení odparu, který může eliminovat případné pozitivní vlivy nárůstu srážek (TRNKA ET AL. 2016).

V této práci byla použita starší generace scénářů změny klimatu řízená scénářem emisí skleníkových plynů A1B. Důvodem bylo, že příprava řešení této práce probíhala v období, kdy projekce založené na tzv. Representative Concentration Pathways nebyly pro zájmové území běžně dostupné ve formě přímo využitelné pro dopadové studie (např.

po korekci biasu). Použití pouze jednoho emisního scénáře také napovídá, že celková neurčitost výsledků simulací může být podhodnocena. Naopak, jistou výhodou je, že výsledky práce jsou porovnatelné s množstvím předešlých prací, ve kterých byly scénáře řízené emisním scénářem A1B hojně využívány. V dalších studiích již počítáme s využíváním podskupiny projekcí změny klimatu řízených RCP4.5 a RCP8.5, které v dostatečné míře zachycují variabilitu budoucího vývoje klimatu a jsou standardně využívány v různých dopadových studiích.

## 6.2 Rozdíly měřené a simulované růstové dynamiky

Jako východisko k odvození kalibračních koeficientů jsme realizovali podrobnější analýzu empirických a simulovaných řad přírůstů. Ačkoli tato problematika není z hlediska práce stěžejní, vplynuly z ní jisté závěry, kterým zde věnujeme pozornost.

Empirická dendrometrická měření byla získána z monitoračních a pokusných ploch VÚLHM a ÚHÚL na kterých byly k dispozici dlouhodobá dendrometrické měření, většinou v 5 – ti letých intervalech. Plochy byly vybrány tak, aby maximálně reprezentovaly přírodní resp. růstové podmínky v ČR. Jedná se o dlouhodobá měření, jejichž kvalita a konzistentnost může být v některých případech sporná, např. z důvodu vývoje dendrometrických pomůcek. Výhodou jsou naopak délka časových řad a reprezentativnost přírodních podmínek, které plochy pokrývají.

Nejvýraznější rozdíl mezi modelovými a empirickými přírůsty byl zjištěn u výškových přírůstů smrku ztepilého. Odklon nebyl pozorován jen u velikosti přírůstu ale i u tvaru kmene vyjádřeném štíhlostním koeficientem. Největší rozdíl byl zjištěn u mladších porostů. Rovněž střední bonitní křivka parametrizovaná na empirických datech vykazuje oproti růstovým tabulkám ČERNÝ ET AL. (1996) rychlejší přírůst. Tyto závěry jsou podpořeny rozsahem použitého empirického materiálu, který byl u smrku největší.

Obecně z prezentovaných analýz nelze jednoznačně usuzovat na recentní změny v růstové dynamice dřevin, i když některé výsledky k tomu svádějí. Dendrometrická měření použitá v této práci pochází z období po roce 1958, přičemž růstové procesy v modelu Sibyla byly kalibrovány na základě empirického materiálu ze Slovenska získaného v období 1996-2002. Je proto třeba vzít v úvahu i skutečnost, že rozdíly simulovaných a měřených přírůstů souvisí s rozdílnou růstovou dynamikou mezi Slovenskem a Českou republikou související např. s klimatickými a edafickými rozdíly.

Výsledky proto neumožňují jednoznačně se vyjádřit k recentním změnám v růstu. Tato skutečnost však nemá vliv na význam a možnosti využití odvozených kalibračních koeficientů, které zpřesňují výsledky simulací pro Českou republiku. Simulovaný růst navíc závisí na vhodném nastavení stanovištních proměnných v simulátoru, což může být poměrně velkým zdrojem neurčitosti. Využití velkého množství ploch však mohlo tento vliv do jisté míry kompenzovat.

Jisté východisko pro interpretaci změn v růstu skýtá porovnání růstových funkcí odvozených z empirických dat s funkcemi ČERNÝ ET AL. (1996), Některé z pozorovaných rozdílů zároveň dobře korespondují s odbornou literaturou. Tento přístup rozhodně není ekvivalentem přístupu založeného na konzistentních dendrochronologických datech nebo jiném empirickém materiálu pokrývajícím dostatečně dlouhé časové období, s jistou rezervou ho však lze pro rámcové posouzení růstových změn použít.

KAHLE ET AL. (2008) uvádí u smrku průměrný nárůst  $I_h$  o 23% a  $I_d$  o 16%. Průměrná hodnota korektoru výšek, kalkulovaná na základě přírůstových křivek je 1,16 a korektoru tloušťek 1,01. Změny korektoru  $d$  v závislosti na věku naznačují podobný trend jako v porovnávané studii, kdy ke zrychlení  $I_d$  došlo zejména v mladších porostech do 50 – ti let věku. Rozdíly ve zrychlení přírůstu smrku mohou být způsobeny tím, že se v této studii jedná o lokální data pouze z ČR, která jsou porovnáвана s výstupy analýz shrnující růstové změny na řádově vyšším území a jejich variabilita je proto odlišná. U buku a borovice autor uvádí zrychlení  $I_h$  o 25% a  $I_d$  27 resp. 13%. V případě těchto dřevin jsou naše výsledky odlišné. U těchto dřevin je průměrná hodnota korektoru 0,97 pro borovici a 1,1 pro buk. Stejně jako v předchozím porovnání je tato skutečnost pravděpodobně způsobena lokálními odlišnostmi v růstu. Zrychlení přírůstu na BAI u buku v letech 1979 – 1992 v oblasti severozápadní Francie zjistil CHARRU ET AL. (2010). Zrychlení nicméně nevykazuje setrvalý trend a s ohledem na různé přírodní podmínky jsou však možnosti tohoto porovnání omezené. KINT ET AL. (2012) na základě šetření provedeného v Belgii uvádí u dubu zrychlení přírůstu BAI v letech 1901 – 2008 o 123 %. V případě buku uvádí zrychlení od počátku 20 – tého století do 60 – tých let o 34%. Poté přírůst začíná zpomalovat až do současnosti. Mírné zpomalení tloušťkového přírůstu buku, lze zaznamenat i na základě našich analýz, přestože změny nejsou tak markantní. Podobně jako v naší studii, nebyly zaznamenány změny v přírůstu u borovice lesní. PRETZSCH ET AL. (2014) zaznamenal zrychlení objemového přírůstu smrku a buku o 10 resp. 30%.

Zrychlení přírůstu u buku bylo zaznamenáno ve více studiích zejména ze západní Evropy. Výsledky naší studie však tyto předpoklady pro buk na území ČR zcela nepotvrzují. V případě smrku, ke zrychlení přírůstu dochází. Jako hlavní důvody zrychlení přírůstu smrku však autoři neuvádějí pouze AKZ, ale rovněž zlepšení stavu životního prostředí po imisním zatížení a např. zvýšené depozice dusíku, které můžeme pozorovat i na území ČR (HŮNOVÁ ET AL. 2014). V případě dubu, jsou výsledky nejednoznačné a pravděpodobně jsou více než u jiných dřevin závislé na konkrétní lokalitě. Minimální změny v růstu vykazuje borovice lesní, což odpovídá závěrům předkládané práce.

### **6.3 Kalibrace růstového procesu modelu Sibyla**

Z výsledků řešení vyplynulo, že kalibrace růstového procesu v modelu Sibyla při využití v podmínkách České republiky je nezbytná a dojde díky ní k nezanedbatelnému zvýšení shody mezi výstupy simulací a empirickými hodnotami. Tento postup je v souladu s obecnými doporučeními a postupy pro využívání jak empirických tak i procesních modelů (např. SEELY ET AL. 2015, SEIDL 2016). Kromě samotné kalibrace dojde i k validaci a určení rámců spolehlivosti výsledků simulací. Pro podchycení dynamiky studovaného ekosystému je nezbytné testování modelu na lokálních datech (GONZÁLES – GARCÍA ET AL. 2016). Opodstatněnost tohoto přístupu potvrzuje např. SCHMID ET AL. (2005), který na příkladu modelu SILVA poukazuje na závislost velikostí diferencí mezi modelovým a empirickým měřením a nadmořskou výškou resp. klimatem a potřebu korekce tohoto jevu.

Značná variabilita a různý charakter zdrojových dat vedly k tomu, že jsme v práci věnovali problematice kalibrace růstového procesu značnou pozornost. Součástí toho úsilí bylo i testování více kalibračních postupů a jejich kritické zhodnocení jak z hlediska matematické podstaty postupů, tak i z hlediska charakteru výstupů. Kromě toho, v této práci byly důkladně prozkoumány možnosti kalibrace růstového procesu pomocí modulu Expert, čemuž doposud nebyla věnovaná dostatečná pozornost. Součástí řešení proto bylo i základní testování efektu různých kalibračních parametrů na výsledky simulací.

V rámci řešení byly testovány tři způsoby kalibrace. První způsob využíval pro výpočet empiricky zjištěné a modelové přírůsty, bez dalších úprav (kromě odstranění nekonzistentních měření a odlehlých hodnot). Při druhém přístupu byly upraveny hodnoty korektoru výšek tak aby se minimalizoval negativní vliv na tvarové

charakteristiky kmene. Při posledním způsobu byla jak modelová tak empirická měření proložena růstovou funkcí a korektory byly vypočítány na základě přírůstků odvozených z přírůstkových funkcí. Hlavním důvodem proč byly testovány různé způsoby výpočtu korektorů, byly vysoké hodnoty korektorů  $h$  u smrku odvozené přímo ze zdrojových dat, což při jejich použití vedlo k deformaci tvaru kmene. Další řešení se proto orientovalo na nalezení postupu pro dosažení hodnot korektoru  $h$ , který by v kombinaci s korektorem  $d$ , generoval přípustné tvarové charakteristiky kmene. V každém případě by v dalším výzkumu bylo vhodné důkladněji prošetřit důvody vysokých hodnot výšek stromů v empirických datech, které se přenesly do nerealistických hodnot korektorů  $h$ .

Přes veškerou snahu se při použití prvních dvou způsobů nepodařilo dosáhnout takových hodnot korektoru  $h$ , aby při simulacích nedocházelo k nepřipustným změnám štíhlostního koeficientu. Je to způsobeno odlišnými růstovými trendy modelových a empirických dat. Jedná se zejména o porosty starší 60 – ti let, kde se výrazně mění trend změn hodnot ŠK mezi empirickými a modelovými daty. Hodnoty korektoru rovněž mohou výrazně ovlivňovat chybná empirická měření, která s ohledem na stáří dat v současnosti již nelze identifikovat. V případě smrku a buku, a hodnot výšek byly největší rozdíly zaznamenány u mladých porostů. Se stoupajícím věkem se rozdíly snižují. Po zvážení dopadů aplikace takto vysokých hodnot korektorů  $h$  na tvarové charakteristiky kmene je vhodnější v simulacích použít pro výšky hodnoty korektoru  $d$  a zachovat tak tvarové charakteristiky definované v modelu Sibyla. Dosažení takových hodnot korektoru, které minimalizují změny štíhlostního koeficientu, bylo v tomto ohledu dosaženo pouze při způsobu výpočtu z hodnot růstových křivek, ale tento způsob výpočtu je limitován vysokou náročností na množství vstupních dat a proto jsou možnosti jeho aplikace omezeny na smrk ztepilý a buk lesní na úrovni ČR. Další výhodou kalibrace pomocí RK lze označit eliminování vlivu odlehlých hodnot, které mohou být způsobeny např. chybami měření (i tento je však u předchozích postupů v jisté míře potlačený propočtem hodnot korektorů na vyšší prostorové jednotky).

Hodnoty korektorů  $d$  smrku s věkem klesají a vyšších hodnot dosahují na stanovištích ovlivněných vodou. Mírně vyšší hodnoty ve srovnání s kyselými stanovišti dosahují i na živných stanovištích. Nejvyšší hodnoty byly zaznamenány v sedmém LVS a v porostech do 20 - ti let věku. Vyšší hodnota korektoru v sedmém LVS může být způsobena nižší



variabilitou vstupních dat, jedná se o oblast, kde bylo k dispozici šest ploch a z toho tři jsou z pěstebního pokusu Kristiánov, tedy stejné lokality.

Pro některé stanovištní jednotky bylo k dispozici jen několik ploch, zobecnění korektoru na úroveň těchto jednotek proto může být problematické. Z hlediska uživatele proto není vždy vhodné použít zde navržené korektory pro nižší hierarchické jednotky. S ohledem na charakter řešeného problému může být výhodnější použití republikového korektoru, nebo doplnění kalibračních dat o další měření a odvození vlastních korektorů. Tento přístup může být v značné míře usnadněn dodržáním metodických postupů navržených v této práci.

Hodnoty korektoru v některých případech vykazují závislost na věku. Bylo by vhodné implementovat do kalibračního modulu SIBYLy i proces, kterým by bylo možné kalibrovat přírůst tak aby zohledňoval věk porostu a umožnil tak flexibilnější kalibraci.

Zrychlený výškový přírůst oproti tloušťkovému negativně ovlivňuje tvarové charakteristiky kmene. K dosažení reálných hodnot tvarových charakteristik je proto nutné použít takové hodnoty výškového korektoru, které se co nejvíce blíží hodnotám korektoru tloušťkového přírůstu. To ale ne vždy odpovídá kalibračním datům. Zahrnutí faktoru věku do kalibračního procesu by mohlo částečně tento problém odstranit. Pozornost je však nutné věnovat i kalibrované dřevině. Při porovnání poměru empirických a modelových přírůstů, je při kalibraci pomocí RK patrný rozdíl v průběhu změn korektoru  $h$  mezi bukem a smrkem.

S ohledem na dosažené výsledky v podmínkách ČR obecně nedoporučujeme využití modelu Sibyla bez kalibrace, zejména v aplikacích kde mohou tvarové charakteristiky kmene negativně ovlivnit výsledek simulací. Tato skutečnost nemusí být nutně problematická např. v aplikacích zaměřených na různé ukazatele biodiverzity. I zde je však nutné vzít v potaz, že z dlouhodobého hlediska se mohou simulace nepřírozně odklánět od reálného stavu porostu z důvodu narušení kompetičních vztahů. Možností je také zanedbat tento jev a považovat ho za jeden z příspěvků k celkové neurčitosti výstupů simulací, korektnost tohoto přístupu je však sporná.

Zvýšené hodnoty korektoru  $h$  byly zaznamenány na většině kalibrovaných ploch. Pro simulace v podmínkách ČR je nejvhodnější použít pouze takové kalibrační koeficienty, které jsou založeny na korektorech vypočítaných z časových řad přírůstů, které pokrývají

celé období života porostu. V případě tloušťkových přírůstků, lze takové řady vytvořit pomocí dendrochronologických analýz. U výškových přírůstků je takový postup výrazně náročnější nebo spíše v širším měřítku nemožný (kmenová analýza). Je nutné si uvědomit, že v ČR prakticky neexistují plochy, které by byly kontinuálně měřeny od založení porostu do mytního věku. Proto jsme i v naší analýze museli vycházet z nepravých časových řad. Změny hodnot výškových korektorů v závislosti na věku mohou být zčásti vysvětleny i tímto způsobem. V pěstebních a managementových aplikacích modelu Sibyla, lze bez problémů doporučit využití korektorů založených na růstových křivkách pro dřeviny smrk a buk. V případě borovice a dubu pak korektory na úrovni ČR. V případě nižších typologických a geografických jednotek, doporučujeme, pokud jsou k dispozici, provést porovnání výsledků simulací na lokálních datech. Zejména to platí pro smrk ztepilý, kde vykazují zejména hodnoty korektorů  $h$  vysokou variabilitu.

#### **6.4 Vliv změny klimatu na produkci a východiska pro adaptační opatření**

Adaptační opatření se v různé míře týkají většiny oborů lesnické činnosti. V oblasti pěstování lesa a managementu lesních porostů se zvyšuje význam přirozené obnovy. Pro zavádění nových druhů dřevin resp. odolnějších ekotypů je ale zásadní význam obnovy umělé. Změnu dřevinné skladby porostů je možné urychlit využitím kalamitních holin. Volbou vhodných a správně načasovaných zásahů, lze dosáhnout zlepšení vodní a živinové bilance. Předpokládaný nárůst frekvence disturbancí a jejich negativní vliv na produkci, lze částečně zmírnit zaváděním optimalizačních modelů, které zohledňují jak produkční a ekonomické ukazatele tak rizika hospodaření. V oblasti ochrany lesa lze očekávat nárůst invazních (často nových) druhů škůdců. Důležitou roli budou mít modely na hodnocení predispozic lesních porostů k různým druhům poškození a rovněž využívání principů integrovaného managementu škůdců. Pro aplikaci efektivních a včasných opatření, je nezbytné dobudování odpovídající dopravní infrastruktury.

Z výsledků simulací vyplynulo, že reakce borovice, která má značně širokou ekologickou amplitudu, je v rámci České republiky nevýrazná a u této dřeviny je možné očekávat zachování současné produktivity. Reakce dubu je také relativně nevýrazná, od minimálního poklesu v 1. LVS po nárůst do 20 % v 5. LVS. Reakce buku je do 4. LVS negativní s poklesem v rozpětí 5 – 20%, pak prudce stoupá. Nejvýraznější reakce byla

pozorována u smrku, u kterého se může produkční potenciál snížit v nejnižších polohách až o 60 %, a v nejvyšších polohách narůst o 40–60%. Reakce je negativní do 5. LVS.

Výsledky naznačují, že na pěstování smrku v 1 – 2 LVS, je, vzhledem k očekávanému kritickému poklesu produkce, nutné plně rezignovat. Tento závěr koresponduje s obecnými principy hospodaření a orientaci na zlepšování stanovištní vhodnosti dřevin. Kritický pokles produkce se tedy týká cca 36 655 hektarů současných porostů se zastoupením smrku (SIL 2016). Ve 3 – 4 LVS je nutné počítat s poklesem produkce související se snižováním dostupnosti vláhy. Důsledkem bude jednak přirozený ústup smrku ze stanovišť pro pěstování smrku nevhodných a jeho náhrada dřevinami vhodnějšími do změněných stanovištních podmínek. Tato změna může být jak přirozená, tak může být důsledkem managementu cíleně snižujícího zastoupení smrku. Z hlediska produkce je 5 LVS pro pěstování smrku relativně bezproblémový. Produkce by neměla vykazovat výrazné změny a to ani při zachování současného managementu. Od šestého vegetačního stupně pak lze očekávat zlepšení produkčních vlastností smrku způsobeném zejména zvýšení teploty vzduchu při zachování současných hodnot srážkových úhrnů. Zlepšení produkčních možností smrku ve vyšších nadmořských výškách potvrzuje např. SEIDL ET AL. (2011). Důležitou skutečností však je, že uvedené hodnocení se opírá jen o změny produkčních ukazatelů. Z hlediska pěstování smrku, zejména v monokulturách, však bude rozhodující vliv škodlivých činitelů, který bude v podmínkách změny klimatu narůstat. Z tohoto pohledu je i širší využití smrku ve výše zmíněném „bezproblémovém“ 5. LVS sporné. Tato problematika souvisí s vývojem disturbančních režimů v důsledku změny klimatu, které jsou pro naše podmínky značně nepříznivé (nárůst biotického poškozování, nárůst vlivu sucha a požárů, vyšší intenzita vichřic apod.).

Častější výskyt epizod sucha bude negativně ovlivňovat produkci buku lesního zejména v 1 – 2 LVS. K podobným závěrům dospěl i HLÁSNÝ ET AL. (2011B), který upozorňuje i na pravděpodobný nárůst mortality o 20 – 40%. Zaváděním buku do směsí s vhodnými dřevinami lze ve 3 – 5 LVS dosáhnout zachování současné produkce. Pozitivní vliv zde mohou mít i doposud ne zcela probádané fyziologické mechanismy jako je hydraulický lift. V případě směsí smrku s bukem z něj může profitovat smrk (ŠACH & ČERNOHOUS 2015). Ve směsích buku s dubem pak buk (PRETZSCH ET AL. 2013). Novější studie však poukazují i na možné rizika širšího využívání buku (jako důležité rekonstrukční dřeviny smrkových monokultur), které souvisí s pozorováními jeho suchem podmíněné mortality

ve více regionech Evropy (MÁTYÁS ET AL. 2010; CZÚCZ ET AL. 2011; PEÑUELAS ET AL. 2007) a také s rostoucím biotickým poškozováním (MÁTYÁS ET AL. 2010; CSÓKA ET AL. 2016).

Nejmenší odezvu na působení KZ vykazují v produkci duby (*Quercus* sp.) a borovice lesní. HANEWINKEL ET AL. (2012) uvádějí, že ke konci století bude v průměru 34% rozlohy lesa v Evropě vhodného pouze pro mediteránní druhy dubů, které jsou výrazně méně profitabilní než současné druhy této dřeviny, což představuje významné riziko pro lesní hospodářství. Duby skýtají oproti borovici daleko širší možnosti uplatnění. Z velké části je to způsobeno zejména vyšší odolností proti stresu suchem (NOVÁK ET AL. 2017). Potenciál širšího využití dubů je dále zdůrazněn jejich nízkým zastoupením v současné dřevinné skladbě (ca 7% oproti 20% v přirozené skladbě), jakož i očekávanou změnou klimatických podmínek, která může duby zásadním způsobem zvýhodnit oproti zranitelným nebo na vláhu náročnějším dřevinám jako jsou smrk, jedle nebo buk. Změna klimatických podmínek, která je charakterizovaná zvýšením teploty, snížením dostupnosti vláhy a zvýšenou frekvencí a intenzitou extrémů počasí, může vytvořit podmínky pro využití domácích druhů dubu až do současného 5. LVS. S ohledem na charakter očekávaných změn klimatu. Narůstá rovněž význam introdukovaných druhů (*Q. rubra*) a druhů vyskytujících se v současné dřevinné skladbě jen sporadicky (*Q. cerris*).

REYER ET AL. (2014) předpokládá v Evropě u jehličnatých dřevin nárůst zásoby uhlíku a u listnatých dřevin pokles. Výsledky nicméně nejde generalizovat a konkrétně v případě smrku byl zaznamenán vyšší nárůst produkce v severní Evropě, tedy v oblasti kde vliv klimatické změny může znamenat vytvoření výhodnějších podmínek, než nabízí současné klima. Nárůst zásoby na gradientu jih – sever, lze s jistou rezervou chápat jako obdobu výškového gradientu v ČR. Na základě projekcí změn COP prezentovaných v naší práci, docházíme k závěru, že u produkce smrku lze ve vyšších LVS očekávat zvýšení produkce, což odpovídá výsledkům, předloženým v porovnávané studii. Nárůst produkce ve vyšších nadm. výškách obecně předpokládá v souvislosti s posunem LVS a prodloužením vegetační doby např. WALTHER ET AL. (2002). V případě borovice očekává autor pokles produkce na extrémních stanovištích a na jižním okraji jejího výskytu. Jinak je borovice prezentována jako dřevina odolná vůči vlivu klimatických změn. Buk a dub vykazují v závislosti na klimatické zóně variabilní reakce na projevy změny klimatu. V kontextu

střední Evropy ale lze buk hodnotit jako dřevinu odolnou k projevům klimatické změny. To potvrzují i výsledky naší práce, kdy v závislosti na aplikovaném managementu lze očekávat setrvalou produkci nebo její nárůst, byť až od 4. LVS.

V případě dubu autor upozorňuje na nedostatečné pokrytí zkoumané oblasti plochami s výskytem dubu a vyšším podílem ploch na stanovištích extrémně ohrožených projevy změny klimatu. Obecně u listnáčů předpokládá pokles produkce. Výsledky naší práce speciálně v případě dubu tyto závěry nepotvrzují. Projekce naznačují buď zachování současné produkce, nebo její zvýšení. Význam dubu jako produkční dřeviny bude zřejmě v podmínkách ČR narůstat a vzhledem ke změnám klimatu, je možné očekávat i vytvoření podmínek pro pěstování některých druhů běžných pro mediteránní oblast (ALESSANDRI ET AL. 2014, HANEWINKEL ET AL. 2013).

Projekce růstu pro území Slovenska prezentované v práci HLÁSNY ET AL. (2011A), ukazují výrazný vliv AKZ na přírůst smrku a buku, nižší efekt byl pak zaznamenán u dubu. V případě dubu nedochází od 1. do 5. LVS ve změnách v produkci oproti referenčnímu období. Velikost odchylek se pohybuje kolem  $\pm 3\%$ . Nárůst produkce je významnější až v 6. LVS, tedy v oblastech v současnosti mimo přirozený výskyt. V souvislosti s projevy AKZ v budoucnosti se může tato skutečnost jevit jako jedna z možností pro adaptační opatření. Výstupy této práce naznačují významný nárůst (více než 20%) produkce již od 4. LVS (vyšší LVS nebyly do analýzy zahrnuty) při aplikaci současného managementu. Změny v produkci buku vykazují pokles do 5. – 6. LVS. Poté lze očekávat nárůst produkce až do 8. LVS. Výsledky naší práce, předpokládají nárůst produkce na rozhraní mezi 4. a 5. LVS a výrazně nižší růst produkce v 5. – 6. LVS. Významného navýšení produkce lze dosáhnout aplikací adaptivního managementu. U smrku ztepilého lze očekávat v období 2021 – 2050 nárůst produkce od 5. LVS. V období 2071 – 2100 až od 6. LVS. Naše výsledky předpokládají stejnou nebo narůstající produkci od 5. LVS. Oblasti ČR vymezené 4. – 6. LVS jsou z hlediska pěstování smrku resp. produkce klíčové a proto je nezbytné v tomto prostoru věnovat zvýšenou pozornost odpovídajícím adaptačním opatřením. Tuto skutečnost dokládají např. výsledky studie SEIDL (2011).

RÖTZER ET AL. (2013) předpokládá pro oblast západního Německa na konci 21. století pokles NPP buku lesního až o 30%. V případě naší studie byl, bez ohledu na aplikovaný management, zjištěn pokles COP zejména v 1 – 3 LVS. Při využití adaptačních opatření

lze očekávat zvýšení produkce v 6. a 7. LVS. Se závěry prezentované v porovnávané studii se tak lze ztotožnit jen částečně. Hlavním důvodem rozdílů jsou pravděpodobně odlišné klimatické podmínky obou studií. Výsledky rovněž může ovlivňovat využití různých typů MDL.

## 7. Závěr

Cílem práce bylo vyhodnotit pomocí empirického modelu vývoje lesa očekávaný vliv změny klimatu na produkci hlavních hospodářských dřevin v České republice. Na základě těchto zjištění pak vypracovat doporučení, které je možné zohlednit při tvorbě ucelených strategií a postupů adaptace lesů na klimatické změny. Těchto cílů bylo dosaženo tak, že byla shromážděna data o přírůstech z vybraných monitoračních a pokusných ploch v České republice. Data byla upravena do vhodné struktury tak, aby na nich bylo možné provést simulace v růstovém simulátoru SIBYLA. Pro simulační plochy byla zpracována klimatická data včetně scénářů změny klimatu, založených na emisním scénáři A1B. Na plochách byly provedeny simulace a na základě výsledků byly pomocí porovnání modelových a empiricky zjištěných dat odvozeny kalibrační koeficienty pro dřeviny smrk ztepilý, borovici lesní, buk lesní a duby (*Quercus sp.*). S pomocí kalibrovaného růstového modulu byly provedeny simulace vývoje lesa. Ten byl simulován na základě deseti regionálních klimatických scénářů. Na základě výstupů simulací pak byly vyhodnoceny změny v produkci a byla navržena rámcová adaptační doporučení.

K hlavním zjištěním patří výraznější odklon simulované růstové dynamiky od měřených dat, zejména pomalejší výškový přírůst. Pro korekci tohoto jevu jsme vypracovali sérii korekčních koeficientů, kterých využití při realizaci simulací v České republice doporučujeme. Následné simulace vývoje lesních porostů při různých scénářích změny klimatu prokázali, v souladu s hypotézami zformulovanými v úvodu práce, pokles produkce v nižších polohách a nárůst ve vyšších s výraznými mezidruhovými rozdíly. Ačkoli tento výsledek byl očekáván a je v souladu s vědeckou literaturou, kvantifikace těchto dopadů a jejich ilustrace formou vhodných grafů může přispět k lepší formulaci adaptačních opatření pro území České republiky. Samotná navržená doporučení se zaměřila pouze na oblasti, ke kterým se bylo možné vyjádřit na základě realizovaných

simulací – tedy k úpravě dřevinné skladby s ohledem na posun produkčního optima a případně k vhodnosti snížení doby obmýetí (zejména u smrku), což se projeví významným snížením míry poškozování porostů.

## 8. Seznam literatury a použitých zdrojů

ABE-OUCHI, A.; SAITO, F.; KAWAMURA, K.; RAYMO, M. E.; OKUNO, J.; TAKAHASHI, K.; BLATTER, H. Insolation-driven 100,000 - year glacial cycles and hysteresis of ice-sheet volume. *Nature*, 2013, 500 (7461), s. 190-193.

AGREN, G. I.; BOSATTA, E. *Theoretical ecosystem ecology: understanding element cycles*. Cambridge University Press, 1998.

ALBERT, M.; HANSEN, J.; NAGEL, J.; SCHMIDT, M.; SPELLMANN, H. Assessing risks and uncertainties in forest dynamics under different management scenarios and climate change. *Forest Ecosystems*, 2015, 2(1), s. 1-21.

ALESSANDRI, A.; DE FELICE, M.; ZENG, N.; MARIOTTI, A.; PAN, Y.; CHERCHI, A.; LEE, J. Y.; WANG, B.; HA, K. J.; RUTI, P.; ARTALE, V. Robust assessment of the expansion and retreat of Mediterranean climate in the 21 st century. *Scientific reports*, 2014, 4, 7211.

ALLEN, C. D.; MACALADY, A. K.; CHENCHOUNI, H.; BACHELET, D.; MCDOWELL, N.; VENNETIER, M.; KITZBERGER, T.; RIGLING, A.; BRESHEARS, D. D.; HOGG, E. H. (T.); GONZALEZ, P.; FENSHAM, R.; ZHANG, Z.; CASTRO, J.; DEMIDOVA, N.; LIM, J. H.; ALLARD, G.; RUNNING, S. W.; SEMERCI, A.; COBB, N. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259 (4), s. 660-684.

AMBROŽ, R.; VACEK, S.; VACEK, Z.; KRÁL, J.; ŠTEFANČÍK, I. Current and simulated structure, growth parameters and regeneration of beech forests with different game management in the Lány Game Enclosure, *Forestry Journal*, 2015, 61 (2), s. 78-88.

BARCZA, Z.; HASZPRA, L.; SOMOGYI, Z.; HIDY, D. Estimation of the biospheric carbon dioxide balance of Hungary using the BIOME-BGC model. *Időjárás*, 2009, 113:203-219.



BATTAGLIA, M.; SANDS, P.; WHITE, D.; MUMMERY, D. A linked carbon, water and nitrogen model of forest growth for silvicultural decision support. *Forest Ecology and Management*. 2004, 193, s. 251–282.

BENISTON, M.; STEPHENSON, D. B.; CHRISTENSEN, O. B.; FERRO, C. A. T.; FREI, C.; GOYETTE, S.; HALSNAES, K.; HOLT, T.; JYLHÄ, K.; KOFFI, B.; PALUTIKOF, J.; SCHÖLL, R.; SEMMLER, T.; WOTH, K. Future extreme events in European climate: An exploration of regional climate model projections. *Climatic Change*, 2007, 81 (SUPPL. 1), s. 71-95.

BOŠELA, M.; PETRÁŠ, R.; ŠEBEŇ, V.; MECKO, J.; MARUŠÁK, R. Evaluating competitive interactions between trees in mixed forests in the Western Carpathians: Comparison between long-term experiments and Sibyla simulations. *Forest Ecology and Management*, 2013, 310: s. 577–588.

BOŠELA, M.; PETRÁŠ, R.; SITKOVÁ, Z.; PRIWITZER, T.; PAJTÍK, J.; HLAVATÁ, H.; SEDMÁK, R.; TOBIN, B. Possible causes of the recent rapid increase in the radial increment of silver fir in the Western Carpathians. *Environmental Pollution*, 2014, 184, s. 211-221.

BOLTE, A.; AMMER, C.; LÖF, M.; MADSEN, P.; NABUURS, G. J.; SCHALL, P.; SPATHELF, P.; ROCK, J. Adaptive forest management in central Europe: Climate change impacts, strategies and integrative concept. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2009, 24 (6), s. 473-482.

BRANG, P.; SPATHELF, P.; LARSEN, J. B.; BAUHUS, J.; BONČINA, A.; CHAUVIN, C.; DRÖSSLER, L.; GARCÍA-GÜEMES, C.; HEIRI, C.; KERR, G.; LEXER, M. J.; MASON, B.; MOHREN, F.; MÜHLETHALER, U.; NOCENTINI, S.; SVOBODA, M. Suitability of close-to-nature silviculture for adapting temperate European forests to climate change. *Forestry*, 2014, 87 (4), s. 492-503

BREWER, S.; CHEDDADI, R.; DE BEAULIEU, J.L.; REILLE, M.; ALLEN, J.; ALMQVIST-JACOBSON, H.; AMMANN, B.; TH, A.S.; ANDREEV, A.A.; ARGANT, J.; ATANASSOVA, J.; BALWIERZ, Z.; BARTLEY, D.D.; DE BEAULIEU, J.-L.; BECKETT, S.C.; BEHRE, K.E; BENNETT, K.D; BERGLUND, B.; BEUG, H.J.; BEZUSKO, L.; BINKA, K.; BIRKS, H. H.; BIRKS,

H.J.B.; BJÖRCK, S.; BLIAKHARTCHOUK, T.; BOGDEL, I.; BOHNCKE, S.; BORTENSCHIAGER, S.; BOTTEMA, S.; BOZILOVA, E.; BRADSHAW, R.; BROWN, A.P.; BRUGIAPAGLIA, E.; CARRION, J.S.; CHERNAVSKAYA, M.; CLERC, J.; CLET, M.; COUTEAUX, M.; CRAIG, A.J.; CSERNY, T.; CWYNAR, L.C.; DAVID, F.; DE VALK, E.J.; DICKSON, J.H.; DIGERFELDT, G.; DIOT, M.F.; DRAXLER, I.; ELINA, G.; FILIMONOVA, L.; FILIPOVITCH, L.; GAILLARD, M.J.; GIHHARD, P.; GÖRANSSON, H.; GRÖNLUND, E.A.G.; GUEUNET, P.; GUNOVA, V.; HALL, V.A.; HALLSDOTTIR, M.; HARMATA, K.; HICKS, S.; HUCKERBY, E.; HUNTLEY, B.; HUTTUNEN, A.; HYVÄRINEN, H.; ILVES, E.; JACOBSON, G.L.; JAHNS, S.; JANCZYK-KOPIKOWA, Z.; JANKOVSK, V.; JOHANSEN, J.; KABAILIENE, M.; KARLSSON, S.T.; KELLY, M.G.; KHOMUTOVA, V.; KÖNIGSSON, L.K.; KOFF, T.; KOMUTOVA, V.; KRISAI, R.; KREMENETSKI, C.; KRUPINSKI, K.M.; KVAVADZE, E.; LATALOWA, M.; LAZAROVA, M.A.; LIIVRAND, E.; LOTTER, A.F.; LOWE, J.J.; MAKOHONIENKO, M.; MAMAKOWA, K.; MANGERUD, J.; MARISCAL, B.; MARKGRAF, V.; MCKEEVER, M.; MILECKA, K.; MITCHELL, F.J.G.; MOAR, N.T.; MUNUERA, M.; NIKLEWSKI, J.; NILSSEN, E.J.; NORYSKIEWICZ, B.; ODGAARD, B.V.; OEGGL, K.; OSIPOVA, I.M.; PANOVA, N.K.; PANTALEON-CANO, J.; PAUS, A.A.; PAVEL, T.; PEGLAR, S.; PENALBA, M.C.; PENNINGTON, W.; PEREZ-OBOL, R.P.; PUSHENKO, M.; RALSKA-JASIEWICKOWA, M.; RAMFJORD, H.; REGNÉL, J.; REILLE, M.; RIERA I MORA, S.; ROBERTSSON, A.M.; RYBINCKOVA, E.; SAARSE, L.; SARMAJA-KORJONEN, K.; SARV, A.; SCHNEIDER-DRESCHLER, R.; SIVERTSEN, S.; SMITH, A.G.; SPIRIDONOVA, E.A.; STANCIKAITE, M.; STEFANOVA, J.; STEVENSON, A.C.; STEWART, D.A.; SVOBODOVA, H.S.; SZCZEPANEK, K.; TARASOV, P.; THELAUS, M.T.; TOBOLSKI, K.; SP, T.; TURNER, C.; TURNER, J.; TZEDAKIS, P.C.; VAN DER KNAAP, W.O.; VASARI, A.; VASARI, Y.; VERBRUGGEN, C.; VERGNE, V.; VESKI, S.; VISET, L.; VODICKOVA, V.; VUORELA, I.; WACNIK, A.; WAHLMÜLLER-OEGGL, N.; WALKER, M.J.C.; WALLER, M.P.; WATSON, C.S.; WATTS, W.A.; WEBB, J.A.; WEST, R.G.; WHITLOCK, C.; WHITTINGTON, G.; WINTER, H.; YA, Y.; YLL, E.I.; ZELIKSON, E.M.; ZERNITSKAJA, V.P. The spread of deciduous *Quercus* throughout Europe since the last glacial period. 2002. *Forest Ecology and Management*, 156 (1-3), s. 27-48.

BUGMANN, H. K. M. A simplified forest model to study species composition along climate gradients. *Ecology*, 1996, 77 (7), s. 2055–2074.

CLIVAR 2016. on line na <http://www.clivar.org/>, stránka navštívena 6. 4. 2018

CORDEX 2016 on line na <http://www.cordex.org/>, stránka navštívena 6. 4. 2018

CZECHGLOBE. 2017. <http://www.klimatickazmena.cz/cs/>, stránka navštívena 6. 4. 2018

CRHOVÁ, L.; HOLTANOVÁ, E.; KALVOVÁ, J., & FARDA, A. Performance of ALADIN-Climate/CZ over the area of the Czech Republic in comparison with ENSEMBLES regional climate models. 2014, *Studia Geophysica et Geodaetica*, 58(1), s. 148-169.

CROOKSTON, N. L.; REHFELDT, G. E.; DIXON, G. E.; WEISKITTEL, A. R.; Addressing climate change in the forest vegetation simulator to assess impacts on landscape forest dynamics. *Forest Ecology and Management*. 2010; 260: s. 1198–1211.

CSÓKA, GY.; PÖDÖR, Z.; NAGY, GY.; HIRKA, A. CANOPY RECOVERY OF PEDUNCULATE OAK, TURKEY OAK and beech trees after severe defoliation by gypsy moth (*Lymantria dispar*): Case study from Western Hungary. *Forestry Journal*, 2016, 61: s. 143–148.

CZÚCZ, B.; GÁLHIDY, L.; MÁTYÁS, C. 2011. Present and forecasted xeric climatic limits of beech and sessile oak distribution at low altitudes in Central Europe. *Ann For Sci*, 2011, 68, s. 99–108.

ČERNÝ, M.; PAŘEZ, J.; MALÍK, Z. Růstové a taxační tabulky hlavních dřevin České republiky. Smrk, borovice, buk, dub. 1996, Jílové u Prahy, IFER, 245 s.

ČSÚ 2015 Český statistický úřad, 2015. Těžba dřeva podle druhů dřevin a typu nahodilé těžby. Zdroj:[https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/cs/index.jsf?page=vystup-objekt&pvo=LES05&z=T&f=TABULKA&katalog=30841&c=v3~8\\_\\_RP2015](https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/cs/index.jsf?page=vystup-objekt&pvo=LES05&z=T&f=TABULKA&katalog=30841&c=v3~8__RP2015), stránka navštívena 6. 4. 2018.

DELZON, S.; URLI, M.; SAMALENS, J. - C., LAMY, J.- B.; LISCHKE, H.; SIN, F.; ZIMMERMANN, N. E.; PORTÉ, A. J. Field evidence of colonisation by holm oak, at the Northern Margin of its distribution range, during the anthropocene period. *PLoS ONE*, 2013, 8 (11), art. no. e80443,

DE VRIES, W.; REINDS, G. J.; GUNDERSEN, P.; STERBA, H. The impact of nitrogen deposition on carbon sequestration in European forests and forest soils. *Global Change Biology*, 2006, 12 (7), s. 1151-1173.

DE VRIES, W.; DOBBERTIN, M. H.; SOLBERG, S.; VAN DOBBEN, H. F.; SCHAUB, M. Impacts of acid deposition, ozone exposure and weather conditions on forest ecosystems in Europe: an overview. *Plant and Soil*, 2014, 380(1-2), s. 1-45.

DOBOR, L.; BARCZA, Z.; HLÁSNY, T.; HAVASI, A. Creation of the FORESEE database to support climate change related impact studies. *International Scientific Conference for PhD Students*. 2013, November, 23, 2012 Győr, s. 137-142.

ĎURSKÝ, J. Modellierung der Absterbeprozesse in Rein- und Mischbeständen aus Fichte und Buche. *Allg. Forst- und Jagdzeitung*, 1997, 168. Jg., H. 6/7, s. 131-134.

ĎURSKÝ, J.; ŠKVARENINA, J.; MINĎÁŠ, J.; MIKOVÁ, A. Regional analysis of climate change impact on Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.) growth in Slovak mountain forests [Analýza regionálnych dopadov zmeny klímy na rast smreka obyčajného (*Picea abies* L. Karst.) v horských lesoch Slovenska], *Journal of Forest Science*, 2006, 52 (7), s. 306-315.

EASTERLING, D. R.; MEEHL, G. A.; PARMESAN, C.; CHANGNON, S. A.; KARL, T. R.; MEARN, L. O. Climate extremes: Observations, modeling, and impacts. *Science*, 2000, 289 (5487), s. 2068-2074

EUROPEAN COMMISSION Evropská Komise 2014. Strategie EU pro přizpůsobení se změně klimatu. COM (2013) 2016.

FALLOON, P.; CHALLINOR, A.; DESSAI, S.; HOANG, L.; JOHNSON, J.; KOEHLER, A. K. Ensembles and uncertainty in climate change impacts. *Frontiers in Environmental Science*. 2014, Vol. 2/33. ISSN: 2296-665X

FABRIKA, M.; VACULČIAK, T. Modelling natural disturbances in tree growth model Sibyla. In: STŘELCOVÁ, K., MÁTYÁS, C., KLEIDON, A., LAPIN, M., MATEJKA, F., BLAŽENEC, M., ŠKVARENINA, J., HOLÉCY, J. (eds.), *Bioclimatology and Natural Hazards*. 2008, Springer, Netherlands: s. 155-164.

FABRIKA, M. Simulátor biodynamiky lesa Sibyla, Koncepcia, konštrukcia a programové riešenie. 2005, Technická Univerzita vo Zvolene. 238 s.

FABRIKA, M.; ĎURSKÝ, J. Algorithms and software solution of thinning models for Sibyla growth simulator. *Journal of Forest Science*. 2005, 51, s. 431–445.

FABRIKA, M.; PRETZSCH, H. Analýza a modelovanie lesných ekosystémov. Technická Univerzita vo Zvolene, 2011, 599 s., ISBN-978-80-228-2181-0.

FARDA, A.; DÉUÉ, M.; SOMOT, S.; HORÁNYI, A.; SPIRIDONOV, V. & TÓTH, H. Model ALADIN as regional climate model for Central and Eastern Europe. *Studia Geophysica et geodaetica*, 2010, 54(2), s. 313-332.

FISCHER, R. ET AL. The condition of Forest in Europe. 2010 Executive report (ICP Forests and European Commission, 2010).

FONTES, L.; BONTEMPS J-D.; BUGMANN H.; VAN OIJEN M.; GRACIA C.; KRAMER K.; LINDNER M.; RÖTZER T.; SKOVSGAARD J. P. Models for supporting forest management in a changing Environment. *Forest Systems*, 2010, 19(SI), s. 8-29.

FRICH, P.; ALEXANDER, L. V.; DELLA - MARTA, P.; GLEASON, B.; HAYLOCK, M.; TANK KLEIN, A. M. G.; PETERSON, T. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, 2002, 19 (3), s. 193-212.

GIMMI, U.; WOHLGEMUT, T.; RIGLING, A.; HOFFMANN, C. W.; BURGI, M. Land-use and climate change effects in forest compositional trajectories in a dry Central-Alpine valley. *Annals of Forest Science*, 2010, 67.

GIORGI, F.; COPPOLA, E. European climate-change oscillation (ECO). *Geophysical Research Letters*, 2007, 34 (21), art. no. L21703.

GIRARDIN, M. P.; RAULIER, F.; BERNIER, P.; TARDIF, J. Response of tree growth to a changing climate in boreal central Canada: A comparison of empirical, process-based, and hybrid modelling approaches. *Ecol Modell.* 2008; 213: s. 209–228.

GONZÁLEZ-GARCÍA, M.; ALMEIDA, A.C.; HEVIA, A.; MAJADA, J.; BEADLE, C. APPLICATION OF A PROCESS-BASED MODEL FOR PREDICTING THE PRODUCTIVITY OF EUCALYPTUS NITENS BIOENERGY PLANTATIONS IN SPAIN. *GLOB. CHANG. BIOL. BIOENERGY*, 2016, 8, s. 194–210.

GRANT, R. F.; ZHANG, Y.; YUAN, F.; WANG, S.; HANSON, P. J.; GAUMONT-GUAYE, D. et al. Intercomparison of techniques to model water stress effects on CO<sub>2</sub> and energy exchange in temperate and boreal deciduous forests. *Ecol Modell.* 2006; 196: s. 289–312.

GROTE, R.; PRETZSCH, H. A model for individual tree development based on physiological processes. *Plant Biology*, 2002, 4(2), s. 167-180.

HALAJ, J., PÁNEK, F., PETRÁŠ, R. Výškový rast smreka na podklade nových rastových tabuliek (1980). *Lesnictví*, 1987, 33 (10): s. 905 - 918.

HANEL, M.; KAŠPÁREK, L.; MRKVIČKOVÁ, M.; HORÁČEK, S.; VIZINA, A.; NOVICKÝ, O.; FRIDRICHIVÁ, R. Odhad dopadů klimatické změny na hydrologickou bilanci v ČR a možná adaptační opatření. 2011. Praha, Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka v. v. i., ISBN 978-80-87402-22-1, 108 s.

HANSEN, J.; SATO, M.; RUEDY, R. Radiative forcing and climate response. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 1997. 102 (D6), art. no. 96JD03436, s. 6831-6864.

HANSEN, J.; RUEDY, R.; SATO, M.; LO, K. Global surface temperature change. *Reviews of Geophysics*, 2010, 48 (4), art. no. RG4004,

HANEWINKEL, M.; CULLMANN, D. A.; SCHELHAAS, M. J.; NABUURS, G. J.; ZIMMERMANN, N. E. Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land. *Nature Climate Change*, 2013, 3(3), s. 203-207.

HAMPTON, S. E.; STRASSER, C. A.; TEWKSBURY, J. J.; GRAM, W.; K., BUDDEN, A. E.; BATCHELLER, A. L.; DUKE, C. S.; PORTER, J. H. Big data and the future of ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2013. 11:s. 156–62.

HEWITT, CD.; GRIGGS, D. J. Ensembles-based Predictions of Climate Changes and their Impacts. 2004, *Eos*, 85, 566.

HLÁSNY, T.; BARCZA, Z.; FABRIKA, M.; BALÁZS, B.; CHURKINA, G.; PAJTÍK, J.; SEDMÁK, R.; TURČÁNI, M. Climate change impacts on growth and carbon balance of forests in Central Europe. *Climate Research*, 2011a, 47, s. 219-136.

HLÁSNY, T.; HOLUŠA, J.; ŠTĚPÁNEK, P.; TURČÁNI, M.; POLČÁK, N. Expected impacts of climate change on forests Czech Republic as a case study. *Journal of Forest Science*, 2011b, 57 (10), s. 422-431

HLÁSNY, T.; BARCZA, Z.; BARKA, I.; MERGANIČOVÁ, K.; SEDMÁK, R.; KERN, A.; PAJTÍK J.; BALÁZS, B.; FABRIKA, M.; CHURKINA, G. Future carbon cycle in mountain spruce forests of Central Europe: modelling framework and ecological inferences. *For Ecol Manag*, 2014a, 328, s55–68.

HLÁSNY, T.; MÁTYÁS, C.; SEIDL, R.; KULLA, L.; MERGANIČOVÁ, K.; TROMBIK, J.; DOBOR, L.; BARCZA, Z.; KONÔPKA, B. Climate change increases the drought risk in Central European forests: What are the options for adaptation?. *Forestry Journal*, 2014b, 60 (1), s. 5-18.

HLÁSNY, T.; BARKA, I.; KULLA, L.; BUCHA, T.; SEDMÁK, R.; TROMBIK, J. Sustainable forest management in a mountain region in the Central Western Carpathians, northeastern Slovakia: the role of climate change. *Regional Environmental Change*, 2015, s. 1-13.

HLÁSNY, T.; TROMBIK, J.; DOBOR, L.; BARCZA, Z.; BARKA, I. Future climate of the Carpathians: climate change hot-spots and implications for ecosystems. *Regional Environmental Change*, 2016. 16 (5), s. 1495-1506.

HLÁSNY, T.; MARUŠÁK, R.; NOVÁK, J.; BARKA, I.; ČIHÁK, T.; SLODIČÁK, M. Adaptace hospodaření ve smrkových porostech České republiky na změnu klimatu s důrazem na produkci lesa. 2016a. Strnady, VÚLHM, Lesnický průvodce, 15/2016: 59 s.

HŮNOVÁ, I.; MAZNOVÁ, J.; KURFÜRST, P. Trends in atmospheric deposition fluxes of sulphur and nitrogen in Czech forests. 2014, *Environmental Pollution*, 184, s. 668-675.

CHARRU, M.; SEYNAVE, I.; MORNEAU, F.; BONTEMPS, J.- D. Recent changes in forest productivity: An analysis of national forest inventory data for common beech (*Fagus sylvatica* L.) in north-eastern France. *Forest Ecology and Management*, 2010, 260 (5), s. 864-874.

CHERTOV, O. G.; KOMAROV, A. S.; TSIPLIANOVSKY, A. M. A combined simulation model of Scots pine, Norway spruce and Silver birch ecosystems in the European boreal zone. *Forest Ecology and Management*, 1999, 116(1), s. 189-206.

CHMIELEWSKI, F. M.; RÖTZER, T. Response of tree phenology to climate change across Europe, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108 (2), s. 101-112.

CHRISTENSEN, JH.; CHRISTENSEN, O. B. A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. *Climatic Change*, 2007, 81, s. 7–30.

IPCC. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T. F., D., Qin, G.- K., Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, 2013, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.



IPCC Climate change 2014 Synthesis report, Summary for policy makers, on line na [http://ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5\\_SYR\\_FINAL\\_SPM.pdf](http://ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf), stránka navštívena 15. 3. 2018

IPCC 2017. on line na [http://sedac.ciesin.columbia.edu/ddc/ar5\\_scenario\\_process/RCPs.html](http://sedac.ciesin.columbia.edu/ddc/ar5_scenario_process/RCPs.html) Stránka navštívena 1. 3. 2018.

JACOB, D.; PETERSEN, J.; EGGERT, B.; ALIAS, A.; CHRISTENSEN, O. B.; BOUWER, O. B.; BRAUN, A.; COLETTE, A.; DÉQUÉ, M.; GEORGIEWSKI, G.; GEORGOPOULOU, E.; GOBIET, A.; MENUT, L.; NIKULIN, G.; HAENSLER, A. EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 2014 14:s. 563-578

JANDL, R.; SMIDT, S.; MUTSCH, F.; FÜRST, A.; ZECHMEISTER, H.; BAUER, H.; DIRNBÖCK, T. Acidification and nitrogen eutrophication of Austrian forest soils. *Applied and Environmental Soil Science*, 2012, art. no. 632602.

KAHLE, H. P. (ED.). Causes and consequences of forest growth trends in Europe: Results of the recognition project, 2008, (Vol. 21). Brill.

KAHN, M. Modellierung der Höhenentwicklung ausgewählter Baumarten in Abhängigkeit vom Standort. *Forstliche Forschungsber.* 1994, Munchen, Vol. 141, 221 s.

KADRNOŽKA, J. Globální oteplování země. Příčiny, průběh, důsledky, řešení. 2008, nakl. VUTIUM Brno, 467 s., ISBN 978-80-214-3498-1.

KELLOMÄKI, S.; VÄISÄNEN, H. Modelling the dynamics of the forest ecosystem for climate change studies in the boreal conditions. *Ecological modelling*, 1997, 97(1), s. 121-140.

KINT, V.; AERTSEN, W.; CAMPIOLI, M.; VANSTEENKISTE, D.; DELCLOO, A.; MUYS, B. Radial growth change of temperate tree species in response to altered regional climate and air quality in the period 1901-2008 *Climatic Change*, 2012, 115 (2), s. 343-363.

KNÍŽEK M.; LIŠKA J.; MODLINGER R. (EDS.). Výskyt lesních škodlivých činitelů v roce 2015 a jejich očekávaný stav v roce 2016. Strnady, Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i., 2016, 2016, 66 s. Zpravodaj ochrany lesa. Supplementum 2016.

KOHLER, M.; NAGELE, G.; SOHN, S.; BAUHUS, J. The impact of different thinning regimes on the drought tolerance of Norway Spruce (*Picea abies*). *Eur. J. For. Res.* 2010, 129, s. 1109–1118.

KOMAROV, A.; CHERTOV, O.; ZUDIN, S.; NADPOROZHSKAYA, M.; MIKHAILOV, A.; BYKHOVETS, S.; ZUDINA & ZOUBKOVA, E. EFIMOD 2 a model of growth and cycling of elements in boreal forest ecosystems. *Ecological Modelling*, 2003, 170(2), s. 373-392.

KONÔPKA, J.; PETRÁŠ, R.; TOMA, R. Štíhlostný koeficient hlavných drevín a jeho význam při statickej stabilite porastov. *Lesnictví*, 1987; 33, 50, č. 10. s. 887-903.

KURTH, W. Growth grammar interpreter GROGRA 2.4-a software tool for the 3-dimensional interpretation of stochastic, sensitive growth grammars in the context of plant modelling. Introduction and reference manual. *Berichte des Forschungszentrums Waldokosysteme der Universitat Gottingen*, 1994, Ser. B, Vol. 38, 192 s.

LANDSBERG, J.; WARING, R. H. A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation - use efficiency, carbon balance, and partitioning. *For Ecol Manage.* 1997; 95: s.209–228.

LEVITUS, S.; ANTONOV, J. I.; BOYER, T. P.; STEPHENS, C. Warming of the world ocean. *Science*, 2000, 287 (5461), s. 2225-2229.

LINDENMAYER, A. Mathematical models for cellular interactions in development II. Simple and branching filaments with two-sided inputs. *Journal of theoretical biology*, 1968, 18(3), s. 300-315.

LINDNER, M.; MAROSCHEK, M.; NETHERER, S.; KREMER, A.; BARBATI, A.; GARCIA-GONZALO, J.; SEIDL, R.; DELZON, S.; CORONA, P.; KOLSTRÖM, M.; MARCHETTI, M.;

LEXER, M. J. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(4), s. 698-709.

LINDNER, M.; FITZGERALD, J. B.; ZIMMERMANN, N. E.; REYER, C.; DELZON, S.; VAN DER MAATEN, E.; SCHELHAAS, M.-J.; LASCH, P.; EGGERS, J.; VAN DER MAATEN-THEUNISSEN, M.; SUCKOW, F.; PSOMAS, A.; POULTER, B.; HANEWINKEL, M. Climate change and European forests: What do we know, what are the uncertainties, and what are the implications for forest management? *Journal of Environmental Management*, 2014, 146, s. 69 -83.

LIU, J.; DIETZ, T.; CARPENTER, S. R.; ALBERTI, M, FOLKE, C.; MORAN, E.; PELL, A. N.; DEADMAN, P.; KRATZ, T.; LUBCHENCO, J.; OSTROM, E.; OUYANG, Z.; PROVENCHER, W.; REDMAN, C. L.; SCHNEIDER, S. H.; TAYLOR, W. W. Complexity of coupled human and natural systems. *Science*. 2007, 317:s. 1513–16.

LOMSKÝ, B.; ŠRÁMEK, V. Different types of damage in mountain forest stands of the Czech Republic. *J. For. Sci.*, 2004, 50: s 533-537.

LUYSSAERT, S.; INGLIMA, I.; JUNG, M.; RICHARDSON, A.D.; REICHSTEIN, M.; PAPALE, D.; PIAO, S. L.; SCHULZE, E.-D.; WINGATE, L.; MATTEUCCI, G.; ARAGAO, L.; AUBINET, M.; BEER, C.; BERNHOFER, C.; BLACK, K. G.; BONAL, D.; BONNEFOND, J.-M.; CHAMBERS, J.; CIAIS, P.; COOK, B.; DAVIS, K.J.; DOLMAN, A.J.; GIELEN, B.; GOULDEN, M.; GRACE, J.; GRANIER, A.; GRELE, A.; GRIFFIS, T.; GRÜNWARD, T.; GUIDOLOTI, G.; HANSON, P. J.; HARDING, R.; HOLLINGER, D.Y.; HUTYRA, L.R.; KOLARI, P.; KRUIJT, B.; KUTSCH, W.; LAGERGREN, F.; LAURILA, T.; LAW, B.E.; LE MAIRE, G.; LINDROTH, A.; LOUSTAU, D.; MALHI, Y.; MATEUS, J.; MIGLIAVACCA, M.; MISSON, L.; MONTAGNANI, L.; MONCRIEFF, J.; MOORS, E.; MUNGER, J.W.; NIKINMAA, E.; OLLINGER, S.V.; PITA, G.; REBMANN, C.; ROUPSARD, O.; SAIGUSA, N.; SANZ, M.J.; SEUFERT, G.; SIERRA, C.; SMITH, M.-L.; TANG, J.; VALENTINI, R.; VESALA, T.; JANSSENS, I. A. CO<sub>2</sub> balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database. *Global Change Biology*, 2007, 13 (12), s. 2509-2537.

MÁTYÁS, C.; LASZLO, N.; JÁRMAY, É. U. Genetic background of response of trees to aridification at the xeric forest limit and consequences for bioclimatic modelling introduction : xeric limits and genetics. 2010. Forstarchiv, 81(4), s. 130–141.

MENZEL, A.; FABIAN, P. Growing season extended in Europe, Nature, 1999, 397 (6721), s. 659.

MERGANIČ, J.; FABRIKA, M. 2011: Modelling natural regeneration in Sibyla tree growth simulator. Der Deutsche Verband Forstlicher Forschungsanstalten (DVFFA), Sektion Ertragskunde, Jahrestagung, s. 5–10.

MÄKIPÄÄ, R.; KARJALAINEN, T.; PUSSINEN, A.; KELLOMÄKI, S. Effects of climate change and nitrogen deposition on the carbon sequestration of a forest ecosystem in the boreal zone. Canadian Journal of Forest Research, 1999, 29 (10), s. 1490-1501

MILLAR, C. I.; STEPHENSON, N. L.; STEPHENS, S. L. Climate change and forests of the future: Managing in the face of uncertainty. Ecological Applications, 2007, 17, s. 2145-2151.

MOSS, R. H.; EDMONDS, J. A.; HIBBARD, K. A.; MANNING, M. R.; ROSE, S. K.; VAN VUUREN, D. P.; CARTER, T. R.; EMORI, S.; KAINUMA, M.; KRAM, T.; MEEHL, G. A.; MITCHELL, J. F. B.; NAKICENOVIC, N.; RIAHI, K.; SMITH, S. J.; STOUFFER, R. J.; THOMSON, A. M.; WEYANT, J. P.; WILBANKS, T. J. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. 2010, Nature, 463 (7282), s. 747-756.

MŽP 2015. On-line na [https://www.mzp.cz/cz/zmena\\_klimatu\\_adaptacni\\_strategie](https://www.mzp.cz/cz/zmena_klimatu_adaptacni_strategie), stránka navštívena 26. 3. 2017

MŽP 2017. On-line na [http://www.mzp.cz/cz/news\\_170116\\_NAP](http://www.mzp.cz/cz/news_170116_NAP), stránka navštívena 26. 3. 2017.

MZE 2015. Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2015. 132 s. Ministerstvo zemědělství ČR 2016. ISBN 978-80-7434-324-7.

MUND, M.; KUMMETZ, E.; HEIN, M.; BAUER, G. A.; SCHULZE, E.- D. Growth and carbon stocks of a spruce forest chronosequence in central Europe. *Forest Ecology and Management*, 2002, 171 (3), s. 275-296.

NAKIĆENOVIĆ, N.; SWART, R. Special report on emissions scenarios. *Special Report on Emissions Scenarios*, Edited by Nebojsa Nakicenovic and Robert Swart, 2000, pp. 612. ISBN 0521804930. Cambridge, UK: Cambridge University Press, July 2000., 1.

NEMANI, R. R.; KEELING, C. D.; HASHIMOTO, H.; JOLLY, W. M.; PIPER, S. C.; TUCKER, C. J.; MYNENI, R. B.; RUNNING, S. W. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 2003, 300 (5625), s. 1560-1563.

NEW, M.; HULME, M.; JONES, P. Representing twentieth-century space-time climate variability. Part II: Development of 1901-96 monthly grids of terrestrial surface climate. *Journal of climate*, 2000, 13(13), s. 2217-2238.

NITSCHKE, C. R.; INNES, J. L. Integrating climate change into forest management in South-Central British Columbia: An assessment of landscape vulnerability and development of a climate-smart Framework. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256 (3), s. 313-327.

NOVÁK, J.; HLÁSNY, T.; MARUŠÁK, R.; DUŠEK, D.; SLODIČÁK, M. Využití dubů při adaptaci lesů ČR na změnu klimatu: Pěstování a hospodářská úprava lesa, Strnady, 2017. VÚLHM, *Lesnický průvodce* 11/2017: 49 s.

PEÑUELAS, J.; OGAYA, R.; BOADA, M.; S. JUMP, A. Migration, invasion and decline: changes in recruitment and forest structure in a warming-linked shift of European beech forest in Catalonia (NE Spain). *Ecography*, 2007, 30 (6): s. 829–837.

PINTEREST. On line na: <https://cz.pinterest.com/smeasterbrook/climate-modeling/>, stránka navštívena 15. 3. 2018

PRETEL, J. (eds.). Zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních opatření. Technické shrnutí výsledků projektu 2007 – 2011. 2011, Projekt VaV – SP/1a6/108/07. 67 s. online na:[http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ok/klimazmena/files/vav\\_TECHNICKE\\_SHRNUTI\\_2011.pdf](http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ok/klimazmena/files/vav_TECHNICKE_SHRNUTI_2011.pdf)

PRETZSCH, H. Growth trends of forests in Southern Germany, 1996, in SPIECKER, H.; MIELIKÄINEN, K.; KÖHL, M.; SKOVSGAARD, J. P. Growth trends in European forests: studies from 12 countries. European Forest Institute Research Report 5. 1996. 372 p. ISBN-3642611788.

PRETZSCH, H.; BIBER, P.; ĎURSKÝ, J. The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation. *For Ecol Manage*, 2002, 162:3–21.

PRETZSCH, H.; GROTE, R.; REINEKING, B.; RÖTZER, T. H. Models for forest ecosystem management: a European perspective. *Annals of botany*, 2008, 101(8), s. 1065-1087.

PRETZSCH, H. *Forest Dynamics, Growth and Yields*, Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2009, 664 s., ISBN-978-3-540-88306-7.

PRETZSCH, H.; BIBER, P.; SCHÜTZE, G.; UHL, E.; RÖTZER, T. Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870, *Nature Communications*, 2014, 5, art. no. 4967.

PRETZSCH, H.; FORRESTER, D. I.; RÖTZER, T. Representation of species mixing in forest growth models: A review and perspective. *Ecological Modelling*, 2015, 313, s. 276-292.

PRETZSCH, H.; SCHÜTZE, G.; UHL, E. Resistance of European tree species to drought stress in mixed versus pure forests: Evidence of stress release by inter-specific facilitation. *Plant Biology*, 2013. 15 (3), s. 483-495.

RÄISÄNEN, J.; HANSSON, U.; ULLERSTIG, A.; DÖSCHER, R.; GRAHAM, L. P.; JONES, C.; MEIER, H. E. M.; SAMUELSSON, P.; WILLÉN, U. European climate in the late twenty-first

century: Regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios. *Climate Dynamics*, 2004, 22 (1), s. 13-31. DOI: 10.1007/s00382-003-0365-x

RCP DATABASE. RCP Database (2.0). 2009. dostupné on.line na: <http://tntcat.iiasa.ac.at:8787/RcpDb/dsd?Action=htmlpage&page=welcome#intro>, stránka navštívena 16. 5. 2016.

REINEKE, L. H. Perfecting a stand density index for even-aged forests. *Journal of Agricultural Research*, 1933. 46 (7), s. 627–638.

REYER, C.; LASCH-BORN, P.; SUCKOW, F.; GUTSCH, M.; MURAWSKI, A.; PILZ, T. Projections of regional changes in forest net primary productivity for different tree species in Europe driven by climate change and carbon dioxide. *Annals of Forest Science*, 2014, 71 (2), s. 211-225.

REYER, C.; BATHGATE, S.; BLENNOW, K.; BORGES, J. G.; BUGMANN, H.; DELZON, S.; FAIAS, S. P.; GARCIA-GONZALO, J.; GARDINER, B.; GONZALEZ-OLABARRIA, J. B.; GRACIA, C.; HERNÁNDEZ, J. G.; KELLOMÄKI, S.; KRAMER, K.; LEXER, M. J.; LINDNER, M.; MAATEN E.; MAROSCHEK, M.; MUYS, B.; NICOLL, B.; PALAHI, M.; PALMA, L. H. N.; PAULO, J. A.; PELTOLA, H.; PUKKALA, T.; RAMMER, W.; RAY, D.; SABATÉ, S.; SCHELHAAS, M. J.; SEIDL, R.; TEMPERLI, C.; TOMÉ, M.; YOUSEFPOUR, R.; ZIMMERMANN, N. E.; HANEWINKEL, M. Are forest disturbances amplifying or canceling out climate change-induced productivity changes in European forests?. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(3), 034027.

ROBERTS, D., W. Landscape vegetation modelling with vital attributes and fuzzy systems theory. *Ecological Modelling*, 1996, 90.2: s. 175-184.

ROGELJ, J.; MEINSHAUSEN, M.; KNUTTI, R. 2012. Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates. *Nature Clim Change*. 2012, 2: s.248–253.

RÖTZER, T.; DIELER, J.; METTE, T.; MOSHAMMER, R.; PRETZSCH, H. Productivity and carbon dynamics in managed Central European forests depending on site conditions and thinning regimes. *Forestry*, 2010, 83 (5), s. 483-496.

RÖTZER, T.; LIAO, Y.; GOERGEN, K.; SCHÜLER, G.; PRETZSCH, H. Modelling the impact of climate change on the productivity and water-use efficiency of a central European beech forest. *Climate Research*, 2013, 58 (1), s. 81-95.

RUIZ-BENITO, P.; MADRIGAL-GONZÁLEZ, J.; RATCLIFFE, S.; COOMES, D. A.; KÄNDLER, G.; LEHTONEN, A.; WIRTH, C.; ZAVALA, M. A. Stand Structure and Recent Climate Change Constrain Stand Basal Area Change in European Forests: A Comparison Across Boreal, Temperate, and Mediterranean Biomes. *Ecosystems*, 2014, 17 (8), s. 1439-1454.

RYDVAL, M.; WILSON, R. The impact of industrial SO<sub>2</sub> pollution on North Bohemia conifers. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2012, 223 (9), s. 5727-5744.

SABATÉ, S.; GRACIA, C. A.; SÁNCHEZ, A. Likely effects of climate change on growth of *Quercus ilex*, *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris* and *Fagus sylvatica* forests in the Mediterranean region. *Forest Ecology and Management*, 2002, 162 (1), s. 23-37.

SEELY, B.; WELHAM, C.; SCOULLAR, K. Application of a hybrid forest growth model to evaluate climate change impacts on productivity, nutrient cycling and mortality in a montane forest ecosystem, 2015, *PLoS ONE*, 10 (8), art. no. e0135034

SEIDL, R.; LEXER, M. J.; JAGER, D.; HONNINGER, K. Evaluating the accuracy and generality of a hybrid patch model. *Tree Physiol.* 2005, 25 (7), s. 939–951.

SEIDL, R.; RAMMER, W.; LEXER, M. J. Climate change vulnerability of sustainable forest management in the Eastern Alps. *Climatic Change*, 2011, 106 (2), s. 225-254.



SEIDL, R.; RAMMER, W.; SCHELLER, R. M.; SPIES, T. A. An individual-based process model to simulate landscape-scale forest ecosystem dynamics. *Ecological Modelling*, 2012. 231, s. 87-100.

SEIDL, R. To Model or not to Model, That is no Longer the Question for Ecologists, 2017, *Ecosystems*, 20 (2), s. 222-228.

SCHÄR, C.; VIDALE, P. L.; LÜTHI, D.; FREI, C.; HÄBERLI, C.; LINIGER, M. A.; APPENZELLER, C. The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, 2004, 427 (6972), s. 332-336.

SCHLHAAS, M. J.; EGGERS, J.; LINDNER, M.; NABUURS, G. J.; PUSSINEN, A.; PAIVINEN, R.; ZUDIN, S. Model documentation for the European forest information scenario model (EFISCEN 3. 1. 3). 2007, (No. 26). Alterra.

SCHMID, S.; ZINGG, A.; BIBER, P.; BUGMANN, H. Evaluation of the forest growth model SILVA along an elevational gradient in Switzerland. *European Journal of Forest Research*, 2005, 125,1: s. 43–55.

SCHUME, H.; JOST, G.; HAGER, H. Soil water depletion and recharge patterns in mixed and pure forest stands of European beech and Norway spruce. *J. Hydrol.* 2004, 289, s. 258–274.

SIL 2016. on line na <http://eagri.cz/public/app/uhul/SIL> stránka navštívena 12.6.2018

SOLBERG, S.; ANDREASSEN, K.; CLARKE, N.; TØRSETH, K.; TVEITO, O. E.; STRAND, G. H.; TOMTER, S. The possible influence of nitrogen and acid deposition on forest growth in Norway. *Forest Ecology and Management*, 2004, 192, 2-3: s. 241-249.

SPIECKER, H.; MIELIKÄINEN, K.; KÖHL, M.; SKOVSGAARD, J. P. Growth trends in European forests: studies from 12 countries. *European Forest Institute Research Report* 5. 1996. 372 s. ISBN-3642611788.

SPITTLEHOUSE, D. L.; STEWART, R. B. Adaptation to climate change in forest management. *Journal of ecosystems and management*, 2003, 4(1), s. 1-11.

ŠACH, F.; ČERNOHOUS, V. Hydraulický lift buku pro smrk: potenciaálně významný ekosystémový proces pro pěstování smrkových porostů v souvislosti s klimatickou změnou oteplování. *Zprávy lesnického výzkumu* 2015. vol. 60.1 s. 53-63

ŠPULÁK, O.; SOUČEK, J. The Sibyla model and development of beech forests affected by air pollution. *Central European Journal Biology*, 2010, 5: s. 371-383.

ŠRÁMEK, V.; JURKOVSKÁ, L.; FADRHOŇSOVÁ, V.; HELLEBRANDOVÁ-NEUDERTOVÁ, K. Forest soil chemistry in relation to the forest site classification categories used in the czech republic-results of the eu "biosoil" forest soil monitoring project [Chemismus lesních půd ČR podle typologických kategorií-výsledky monitoringu lesních půd v rámci projektu EU "BIOSOIL"] *Zprávy Lesnického Výzkumu*, 2013, 58 (4), s. 314-323.

ŠTĚPÁNEK, P.; ZAHRADNÍČEK, P.; FARDA, A.; SKALÁK, P.; TRNKA, M.; MEITNER, J.; RAJDL, K. Projection of drought-inducing climate conditions in the Czech Republic according to Euro-CORDEX models. *Climate Research*, 2016, 70(2-3), s. 179-193.

TATARINOV, F. A.; CIENCIALA, E. Long-term simulation of the effect of climate changes on the growth of main Central-European forest tree species. *Ecological Modelling*, 2009, 220 (21), s. 3081-3088.

THORNLEY, J. H. M. A transport-resistance model of forest growth and partitioning. *Annals of Botany*, 1991, 68(3), s. 211-226.

THORNTON, P. E. Description of a numerical simulation model for predicting the dynamics of energy, water, carbon and nitrogen in a terrestrial ecosystem. Ph.D. Thesis. Univ. Montana, 1998, Missoula, MT.

TRENBERTH, K. E. Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 2011, 47 (1-2), s. 123-138.

TRNKA, M.; BALEK, J.; ZAHRADNÍČEK, P.; EITZINGER, J.; FORMAYER, H.; TURŇA, M.; NEJEDLÍK, P.; SEMERÁDOVÁ, D.; HLAVINKA, R.; BRÁZDIL, R. Drought trends over part of Central Europe between 1961 and 2014. *Climate Research*, 2016, 70(2-3), s. 143-160.

ÚHÚL 2013. <http://www.uhul.cz/nase-cinnost/narodni-lesnický-program/> stránka navštívena 3. 3. 2018

VACEK, Z.; VACEK, S.; REMEŠ, J.; ŠTEFANČÍK, BULUŠEK, D.; BÍLEK, L. The structure and development of stands in NNR Trčkov - protected landscape area Orlické hory, Czech Republic. *Lesnický Časopis, Forestry Journal*. 2013, 59, s. 248–263 /

VACEK, Z.; VACEK, S.; BÍLEK, L.; REMES, J.; & STEFANCIK, I. Changes in horizontal structure of natural beech forests on an altitudinal gradient in the Sudetes. *Dendrobiology*, 2015, 73. s. 33-45.

VAN DER LINDEN, P.; J. F. B. MITCHELL (eds.) ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, 2009, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK. 160 s.

VEJPUSTKOVÁ, M.; ČIHÁK, T.; SAMUSEVICH, A.; ZEIDLER, A.; NOVOTNÝ, R.; ŠRÁMEK, V. Interactive effect of extreme climatic event and pollution load on growth and wood anatomy of spruce. *Trees*, 2017, 31(2): s. 575-586.

VÚV 2017 online dostupné na: <http://rscn.vuv.cz/aplikace/>; stránka navštívena 15.3.2018

WALTHER, G.-R.; POST, E.; CONVEY, P.; MENZEL, A.; PARMESAN, C.; BEEBEE, T. J. C.; FROMENTIN, J.-M.; HOEGH-GULDBERG, O.; BAIRLEIN, F. Ecological responses to recent climate change, *Nature*, 2002, 416 (6879), s. 389-395.

WIESNER, G.; MATYSSEK, R.; LUZIAN, R.; ZWERGER, P.; PANDUR, P.; OBERHAUBER, W.; GRUBER, A. Effects of atmospheric and climate change at the timberline of the Central European Alps. *Annals of Forest Science*, 2009, 66-4, s. 1-12.

WHITE, M. A.; THORNTON, P. E.; RUNNING, S. W.; NEMANI, R. Parameterization and sensitivity analysis of the BIOME BGC terrestrial ecosystem model: net primary production controls. *Earth Interact*, 2000, 4: s. 1–85.

WIKIPEDIA.On–line na [https://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid\\_models\\_of\\_forest\\_production](https://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid_models_of_forest_production), stránka navštívena 10. 3. 2018

ZHANG, X. C.; LIU, W. Z.; LI, Z.; CHEN, J. Trend and uncertainty analysis of simulated climate change impacts with multiple GCMs and emission scenarios. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151 (10), s. 1297-1304.

## **9. Seznam příloh**

Seznam zkratk: .....	141
Seznam tabulek:.....	142
Seznam obrázků:.....	143
Seznam vzorců.....	146

## 10. Přílohy

### Seznam zkratk:

AKZ: Antropogenní klimatická změna

BAI: přírůst na kruhové výčetní základně (basal area increment)

CHS: cílový hospodářský soubor

*d*: výčetní tloušťka

DBH<sub>avg</sub>: Tloušťka středního kmene

DPZ: Dálkový průzkum Země

ES: Emisní scénář

GCM: Globální klimatický model (General circulation model resp. Global climate model)

*h*: výška stromu

H<sub>max</sub>: horní výška porostu

I<sub>d</sub>: průměrný tloušťkový přírůst

IPCC: Mezinárodní panel pro klimatickou změnu

I<sub>h</sub>: průměrný výškový přírůst

I<sub>v</sub>: průměrný objemový přírůst

KA: Klíčová aktivita NLP

KZ: Klimatická změna

LVS: Lesní vegetační stupeň

LH: Lesní hospodářství

MDL: Model dynamiky lesa

MŽP: Ministerstvo životního prostředí

NLP: Národní lesnický program

NPP: Čistá primární produkce (Net primary production)

NIL, NFI: Národní inventarizace lesů, National forest inventory

PLO: Přírodní lesní oblast

RCM: Regionální klimatický model (Regional climatic model)

RCP: Reprezentativní směry vývoje koncentrací (Representative concentration pathways)

RI: Radiální přírůst

SPLO: Spojená přírodní lesní oblast

SRES: Emisní scénáře používané před RCP (Special Report on Emissions Scenarios)

V: zásoba porostu

V<sub>avg</sub>: objem středního kmene

VÚV: Výzkumný ústav vodohospodářský

## Seznam tabulek

Tabulka 3.1: Změny průměrných teplot a úhrnů srážek na území ČR podle projekcí sady RCM ENSEMBLES (HANEL ET AL. 2011).....	19
Tabulka 3.2: Přehled vybraných prací zaměřených na hodnocení recentních změn v růstu, produkci nebo dalších ukazatelích vývoje porostů ve vztahu k pozorovaným změnám klimatu. $I_d$ : průměrný tloušťkový přírůst, $I_h$ : průměrný výškový přírůst, $I_v$ : průměrný objemový přírůst, $V$ : zásoba porostu, $BAI$ : přírůst na kruhové výčetní základně, $H_{max}$ : horní výška porostu, $DBH_{avg}$ : tloušťka středního kmene, $V_{avg}$ : objem středního kmene, $RI$ : radiální přírůst. ....	29
Tabulka 3.3: Přehled vybraných prací zaměřených na hodnocení budoucích změn v produkci nebo dalších ukazatelích vývoje porostů ve vztahu k predikovaným změnám klimatu. ....	36
Tabulka 4.1: Zastoupení kalibračních ploch v edafických kategoriích (tab. A.) a lesních vegetačních stupních (tab. B.) podle dřevin. ....	51
Tabulka 4.2: Počet kalibračních ploch a měření tlouštěk a výšek pro kalibrované dřeviny. ...	51
Tabulka 4.3: Klimatické modely použité pro hodnocení dopadů změny klimatu na produkci hlavních dřevin. ....	53
Tabulka 4.4: Pravděpodobnost odumření stromu v závislosti na dřevině a věkové třídě.....	57
Tabulka 4.5: Pravděpodobnost odumření stromu v závislosti na dřevině kumulativní .....	58
Tabulka 5.1: Parametry Richards – Chapmannovy přírůstové funkce odvozené z měřených a simulovaných přírůstů smrku ztepilého a buku lesního. $a$ , $b$ , $c$ – parametry modelu, $sm$ . chyba – směrodatná chyba, $R^2$ : koeficient determinance. Empirické: odvozené z měřených dat použitých v této práci, Modelové: Výstupy modelu Sibyla. ....	69
Tabulka 5.2: Přehled testovaných kalibračních postupů. Písmenem X jsou označeny použité kalibrační metody. Písmena B až E označují kalibrační rovnice polynomů 1 (přímky) až 4 – tého stupně. Rovnice G – H jsou rovnice přímky. ....	73
Tabulka 5.3: Základní popisné charakteristiky korektorů ( <i>kor.</i> ).....	78
Tabulka 5.4: Hodnoty korektorů $d$ a $h$ a jejich zobecnění pro Českou republiku. Korektory jsou definovány na následujících hierarchických úrovních 1) SLT PLO, 2) SLT SPLO, 3) SLT ČR, 4) PLO, 5) SPLO, 6) ČR (sloupec Úroveň). $Kor. h_1$ – hodnota korektoru po úpravě ŠK. $Kor. h_2$ – hodnota korektoru $h$ bez úpravy ŠK, $Kor. h_3$ – hodnota korektoru z přírůstové funkce, $Kor. d_3$ – hodnota korektoru $d$ z přírůstové funkce.....	84

## Seznam obrázků

Obr. 3.1 Základní klasifikace emisních scénářů SRES (upraceno podle IPCC 2013).....	16
Obr. 3.2 Změna ve vývoji radiačního působení podle jednotlivých RCP (podle IPCC 2017)	16
Obr. 3.3 Příklad globálního klimatického modelu (zdroj: PINTEREST 2017) .....	17
Obr. 3.4 Zdroje a rozsahy nejistot při projekcích klimatu (upraveno, podle FALLOON ET AL. 2014).....	18
Obr. 3.5 Vlevo: Distribuce srážek (duben-září) ve střední Evropě v letech 1961 - 1990 na základě měřených meteorologických dat (nahore) a distribuce srážek vypočítaná jako průměr 10 regionálních klimatických modelů pro období 2071 – 2100 (uprostřed). Rozdíl a procentuální změna mezi uvedenými obdobími (dole). Vpravo: Distribuce Ellenbergova klimatického koeficientu ve střední Evropě v letech 1961-1990 na základě měřených meteorologických údajů (nahore), a vypočítaná jako průměr 10 regionálních klimatických modelů pro období 2071 – 2100 (uprostřed). Rozdíl mezi uvedenými obdobími (dole). Zdroj: HLÁSNY ET AL. (2014A). .....	21
Obr. 3.6: Variabilita ročního úhrnu srážek mezi pěti regionálními klimatickými modely ve třech časových obdobích. Pro každé období a model je uvedena projekce řízená RCP 4.5 a 8.5 (zdroj: CZECHGLOBE 2017).....	23
Obr. 3.7: Variabilita průměrné roční teploty vzduchu mezi pěti regionálními klimatickými modely ve třech časových obdobích. Pro každé období a model je uvedena projekce řízená RCP 4.5 a 8.5 (zdroj: CZECHGLOBE 2017). .....	24
Obr. 3.8: Variabilita hodnot pravděpodobnosti výskytu extrémního such mezi pěti regionálními klimatickými modely ve třech časových obdobích. Pro každé období a model je uvedena projekce řízená RCP 4.5 a 8.5 (zdroj: CZECHGLOBE 2017). .....	24
Obr. 3.9: Klasifikace růstových modelů podle PRETZSCHE (2009). Na ose X je hierarchická úroveň, osa Y zobrazuje délku časové řady, na které probíhá modelování. ....	39
Obr. 3.10: Hierarchie adaptačních opatření zaměřených na lesní porosty (zdroj: HLÁSNY ET AL. 2016).....	46
Obr. 4.1: Rozmístění simulačních ploch v ČR. Znázorněny jsou hranice přírodních lesních oblastí. ....	50
Obr. 4.2: Transformace stanovištních proměnných na relativní hodnoty v modelu Sibyla.....	56
Obr. 5.1: Polohy ploch pro simulaci růstu smrkových porostů v ČR a mezimodelová (vyplývající z rozdílů klimatických scénářů) variabilita změny úhrnů srážek ve vegetační	

sezóně (% změny) na plochách. Změna je určena jako průměr výstupů 10 klimatických modelů. .....	65
Obr. 5.2: Polohy ploch pro simulaci růstu bukových porostů v ČR a mezimodelová variabilita změny úhrnů srážek ve vegetační sezóně (% změny) na plochách. Změna je určena jako průměr výstupů 10 klimatických modelů. ....	66
Obr. 5.3: Porovnání středních bonitních křivek RT ČERNÝ ET AL. (1996), HALAJ ET AL. (1987) a střední bonity parametrizované na základě dat ze souboru empirických měření a výstupů modelu Sibyla využitých pro kalibraci. Dřevina smrk ztepilý.....	67
Obr. 5.4: Porovnání středních výškových bonitních křivek parametrizovaných na základě dat ze souboru empirických měření a výstupů modelu Sibyla využitých pro kalibraci. Dřevina buk lesní. ....	68
Obr. 5.5: Přírůstová funkce parametrizovaná na modelových a empirických datech pro <i>d</i> (vlevo) a <i>h</i> (vpravo). Zelená křivka označuje poměr mezi empirickým a modelovým přírůstem v daném věku. Dřevina buk lesní.....	70
Obr. 5.6: Přírůstová funkce parametrizovaná na modelových a empirických datech pro <i>d</i> (vlevo) a <i>h</i> (vpravo). Zelená křivka označuje poměr mezi empirickým a modelovým přírůstem v daném věku. Dřevina smrk ztepilý .....	71
Obr. 5.7: Změny v hodnotách štíhlostního koeficientu v závislosti na věku porostu. Graf A- skutečná měření, graf B-výstupy modelu Sibyla, dřevina smrk ztepilý.....	72
Obr. 5.8: Změny v dendrometrických charakteristikách na ploše Frýdek 1 po aplikaci různých kalibračních postupů (označení písmeny viz. tab. 1). Černě jsou označeny empirická měření, .....	75
Obr. 5.9: Spojené přírodní lesní oblasti pro smrk ztepilý .....	76
Obr. 5.10: Spojené přírodní lesní oblasti pro buk lesní.....	76
Obr. 5.11 Spojené přírodní lesní oblasti pro dub .....	77
Obr. 5.12: Spojené přírodní lesní oblasti pro borovici lesní .....	77
Obr. 5.13: Bonity pro smrk ztepilý odvozené ze „stromových měření“ zpracovávaných v této práci. ....	81
Obr. 5.14: Vývoj vybraných produkčních ukazatelů plochy Vimperk II kontrola v podmínkách změny klimatu při standardním managementu a aktivaci mortalitního modulu.....	87
Obr. 5.15: Změna vybraných produkčních ukazatelů v % v důsledku změny klimatu na ploše Vimperk II kontrola při standardním managementu a aktivaci mortalitního modulu.....	88



Obr. 5.16: Změna vybraných produkčních ukazatelů v m <sup>3</sup> v důsledku změny klimatu na ploše Vimperk II kontrola při standardním managementu a aktivaci mortalitního modulu.....	88
Obr. 5.17: Porovnání vývoje porostu Petříkovice 1 při standardním managementu (levý panel) a managementu zahrnujícím postupy adaptace na změnu klimatu (pravý panel). Simulace jsou realizovány při 10 scénářích změny klimatu a stabilním (nezměněném) klimatu. ....	90
Obr. 5.18: Porovnání časového vývoje rozdílů produkčních charakteristik porostu Petříkovice 1 při standardním managementu (levý panel) a managementu zahrnujícím postupy adaptace na změnu klimatu (pravý panel) (m <sup>3</sup> /ha). Simulace jsou realizovány při 10 scénářích změny klimatu a stabilním (nezměněném) klimatu. ....	91
Obr. 5.19: Porovnání časového vývoje rozdílů produkčních charakteristik porostu Petříkovice 1 při standardním managementu (levý panel) a managementu zahrnujícím postupy adaptace na změnu klimatu (pravý panel) (%). Simulace jsou realizovány při 10 scénářích změny klimatu a stabilním (nezměněném) klimatu. ....	92
Obr. 5.20: Porovnání výsledků simulací realizovaných s aktivací a bez aktivace kalamitního modulu na ploše Petříkovice při standardním managementu lesa a nezměněném klimatu. ....	93
Obr. 5.21: Porovnání vývoje porostu Zaječiny II při standardním managementu (levý panel) a managementu zahrnujícím postupy adaptace na změnu klimatu (pravý panel). Simulace jsou realizovány při 10 scénářích změny klimatu a stabilním (nezměněném) klimatu. ....	95
Obr. 5.22: Porovnání časového vývoje rozdílů produkčních charakteristik porostu Zaječiny II při standardním managementu (levý panel) a managementu zahrnujícím postupy adaptace na změnu klimatu (pravý panel) (m <sup>3</sup> /ha). Simulace jsou realizovány při 10 scénářích změny klimatu a stabilním (nezměněném) klimatu. ....	96
Obr. 5.23: Porovnání časového vývoje rozdílů produkčních charakteristik porostu Zaječiny II při standardním managementu (levý panel) a managementu zahrnujícím postupy adaptace na změnu klimatu (pravý panel) (%). Simulace jsou realizovány při 10 scénářích změny klimatu a stabilním (nezměněném) klimatu. ....	97
Obr. 5.24: Porovnání výsledků simulací realizovaných s aktivací a bez aktivace kalamitního modulu na ploše Zaječiny při standardním managementu lesa a nezměněném klimatu.....	98
Obr. 5.25: Vývoj bonity smrku v jednotlivých vegetačních stupních České republiky v podmínkách změny klimatu ve třech časových obdobích (levý panel) a změna bonity při simulacích v podmínkách změny klimatu oproti simulacím při stabilním nezměněném klimatu .....	99

Obr. 5.26: Vývoj bonity buku v jednotlivých vegetačních stupních České republiky v podmínkách změny klimatu ve třech časových obdobích (levý panel) a změna bonity při simulacích v podmínkách změny klimatu oproti simulacím při stabilním nezměněném klimatu .....	100
Obr. 5.27: Vývoj bonity dubu v jednotlivých vegetačních stupních České republiky v podmínkách změny klimatu ve třech časových obdobích (levý panel) a změna bonity při simulacích v podmínkách změny klimatu oproti simulacím při stabilním nezměněném klimatu .....	100
Obr. 5.28: Vývoj bonity borovice v jednotlivých vegetačních stupních České republiky v podmínkách změny klimatu ve třech časových obdobích (levý panel) a změna bonity při simulacích v podmínkách změny klimatu oproti simulacím při stabilním nezměněném klimatu .....	101
Obr. 5.29: Procentuální změna bonity hlavních dřevin v důsledku změny klimatu v závislosti na nadmořské výšce. Je prezentován výsledek odpovídající průměru 10 scénářů změny klimatu. ....	102
Obr. 5.30: Procentuální změna celkové objemové produkce hlavních dřevin v důsledku změny klimatu při rozdílných způsobech hospodaření. Výsledky odpovídají průměru 10 scénářů změny klimatu. ....	103
Obr. 5.31: Poměr nahodilých a celkových těžeb při současném a adaptivním managementu .....	104
Obr. 5.32: Vztah zásoby porostu a objemu nahodilých těžeb ( $\text{m}^3/\text{ha}^{-1}$ ) pro různé druhy managementu podle LVS. Z důvodu rozdílného rozsahu hodnot jsou použity dvě osy. ....	105

## Seznam vzorců

Vzorec 4.1: Vzorec pro výpočet kalibračního koeficientu .....	60
Vzorec 5.1: $d$ – výčetní tloušťka, $t$ – věk, $a$ , $b$ , $c$ – parametry funkce. ....	68
Vzorec 5.2: $h$ – výška stromu, $t$ – věk, $a$ , $b$ , $c$ – parametry funkce. ....	68
Vzorec 5. 3: Výpočet střední výškové bonity (č. 2) smrku ztepilého, $h$ – výška stromu, $t$ – věk. ....	81
Vzorec 5.4: Vzorec pro výpočet korektoru $h$ , $Kor_h$ – korektor $h$ , $Kor_d$ – korektor $d$ . ....	82