

MODELOVÁNÍ PODMÍNEK PRO PĚSTOVÁNÍ SMRKU, BUKU A DUBU

Tomáš Mikita, Petr Čermák, Miroslav Trnka, František Jurečka

Realizováno v rámci projektu EHP-CZ02-OV-1-019-2014

FRAMEADAPT Rámce a možnosti lesnických adaptačních opatření a strategií souvisejících se změnami klimatu

Výstup aktivity 1:

Návrhy obecných zásad adaptačních lesnických opatření na národní úrovni

Název programu:

CZ02 – Biodiverzita a ekosystémové služby / Monitorování a integrované plánování a kontrola v životním prostředí / Adaptace na změnu klimatu

Programová oblast:

PA 7 – Adaptace na změnu klimatu

Zprostředkovatel programu: Ministerstvo financí České republiky

Partner programu: Ministerstvo životního prostředí



Podpořeno grantem z Islandu, Lichtenštejska a Norska.

Supported by grant from Iceland, Liechtenstein and Norway

ÚVOD

Tento materiál prezentuje výsledky výzkumu realizovaného v rámci projektu FRAMEADAPT Rámce a možnosti lesnických adaptačních opatření a strategií souvisejících se změnami klimatu, zejména pak aktivity 1 Návrhy obecných zásad adaptačních lesnických opatření na národní úrovni. Původním cílem definovaným v záměru projektu bylo vymezení území vhodného pro pěstování smrku ztepilého jako hlavní hospodářské dřeviny, tento cíl byl v průběhu rozšířen o modelování podmínek pro buk a duby (dub zimní a letní dohromady, tak jak je agregováno v lesnickém výkaznictví).

POSTUP ŘEŠENÍ

V rámci projektu FRAMEADAPT byla provedena analýza klimatických dat s následným výpočtem klimatických charakteristik nejprve pro lesní vegetační stupně (LVS) a dále pak pro hlavní hospodářské dřeviny (dub, buk a smrk) pro období 1961–1990 a 1991–2014 s následnou možnou predikcí vývoje v blízké budoucnosti (období 2021–2040 a 2041–2060). Zdrojem dat o LVS byla databáze Ústavu pro hospodářskou úpravu lesů v Brandýse nad Labem (ÚHÚL) konkrétně lesnická typologie, data o rozšíření dřevin byla převzata z volně dostupných mapových výstupů ÚHÚL, zpracovaných na základě lesních hospodářských plánů (LHP). Současně byl proveden odhad možného vývoje klimatu v závislosti na nárůstu emisí radiačně aktivních plynů pro období 2021–2040, 2041–2060. Zpracování a analýza dat byla provedena v softwarech ArcGIS 10.3 a STATISTICA 10.

Odhad dopadů změny klimatu – příprava klimatických dat

Ve spolupráci s Czechglobe - Centrem výzkumu globální změny AV ČR provedena analýza klimatických dat s následným výpočtem průměrných klimatických charakteristik pro LVS pro období 1961–1990 a 1991–2014. Pro každý meteorologický prvek bylo zvoleno několik klimatických charakteristik, které nejlépe vystihují změnu v extremitě klimatu. Pro každou klimatologickou charakteristiku byla zvolena metodika výpočtu, která bude dodržena i pro výpočet stejných charakteristik pro budoucí klima. Pro každou meteorologickou stanici byla vypočtena daná klimatická charakteristika. Tyto charakteristiky byly poté interpolovány do mapy s prostorovým rozlišením 500 m pomocí vlastní interpolační metody vyvinuté pro potřeby tohoto projektu a uzpůsobené meteorologickým prvkům v ČR (Štěpánek et al. 2009, 2011). Pro každou charakteristiku byla zkoumána vhodná metoda a nejlepší nastavení dané interpolace (např. výběr vhodných prediktorů). Při vytváření predikce klimatu byla připravena řada nezávislých proměnných pro pravidelný grid o velikosti 500×500 m plošně pokrývající území ČR. Celkem bylo hodnoceno 21 proměnných zahrnujících průměrné roční teploty, srážky a globální radiaci, dále průměrné hodnoty teplot, srážek a radiace v měsících březen až květen, duben až červen a červen až srpen, půdní vlhkost v hloubce do 40 a do 100 cm, počet dní se stresem suchem v daných hloubkách, počet dní se stresem suchem, počet dní se srážkami menšími než 1 mm, počet dní s průměrnou teplotou nad 10°C v souvislém období za sebou, počet dní s maximální teplotou nad 30°C, počet dní s teplotou nad 5°C, dostatkem vláhy a globální radiace.

Použité globální cirkulační modely

Predikce klimatu byla provedena pomocí tzv. globálních cirkulačních modelů (GCM, z angl. Global Circulation Model), což jsou modely všeobecné cirkulace atmosféry spojené s modelem oceánu. Jedná se o počítačové modely klimatického systému, které slouží pro výpočet pravděpodobných budoucích klimatických podmínek. Jsou založeny na řešení pohybových a termodynamických rovnic, které popisují procesy v klimatickém systému, pomocí metod numerické matematiky. Protože řešení těchto rovnic je výpočetně velice náročné, k realizaci GCM je nutné použít ty nejrychlejší

superpočítače, které jsou v dnešní době k dispozici. Tato data jsou pak výpočetními centry poskytována dalším vědeckým týmům a sdílána prostřednictvím databází pod patronací Mezivládního panelu pro klimatickou změnu.

Z celkem 40 GCM, které jsou v současné době k dispozici, bylo pro potřeby projektu vybráno 5 modelů, které reprezentují celou šíři klimatického spektra:

IPSL (verze IPSL-CM5A-MR) – země původu: Francie; model reprezentující medián všech testovaných GCM nejlépe;

HadGEM (verze HadGEM2-ES) – země původu: Velká Británie; model reprezentující výraznější změnu rozložení srážek v našem regionu (úbytek letních a podzimních srážek a nárůst jarních srážek). Předchozí verze tohoto modelu byly použity ve většině studií na našem území citovaných mezivládním panelem pro změnu klimatu;

CNRM (verze CNMR-CM5) – země původu: Francie; model s podobnou změnou teplot jako HadGEM, ale nárůstem srážek ve všech měsících zejména na jaře a na podzim; předchozí verze tohoto modelu byla použita jako hlavní řídicí model tzv. Pretelovy zprávy z roku 2011;

BNU (verze BNU-ESM) – země původu: Čína; reprezentuje GCM modely předpovídající pro naše území relativně nižší nárůst teplot a redukci srážek ve všech měsících kromě léta;

MRI (verze MRI-CGCM3) – země původu: Japonsko; reprezentuje GCM modely předpovídající pro naše území relativně nižší nárůst teplot a nárůst srážek s výjimkou konce léta a podzimu.

Zvolené emisní scénáře

Predikce byla zároveň počítána pro 3 tzv. reprezentativní směry vývoje koncentrací (RCP, z angl. Representative Concentration Pathways). Jmenovitě se jednalo o RCP 2.6 (nízké emise), 4.5 (střední emise) a 8.5 (vysoké emise), kdy RCP 2.6 předpokládá razantní omezení vývoje koncentrace skleníkového plynu oxidu uhličitého v nadcházejících letech a je považován za poměrně nepravděpodobný. Současně je ale třeba konstatovat, že naplnění tzv. Pařížské dohody z podzimu roku 2015 vyžaduje vývoj emisí předpokládaných tímto scénářem. RCP 4.5 značí tzv. přechodný scénář budoucího vývoje, kdy emise nebudou striktně omezeny, ale zároveň bude regulován jejich růst a je považován za poměrně pravděpodobný. RCP 8.5 značí scénář s velmi vysokými emisemi oxidu uhličitého v budoucích letech, které nebudou nijak omezeny v budoucích letech.

VÝVOJ KLIMATU NA ÚZEMÍ ČR A ZMĚNY PODMÍNEK PRO PĚSTOVÁNÍ DŘEVIN

Klima v měřeném období 1991–2014 a v modelovaných obdobích 2021–2040, 2041–2060 bylo porovnáváno s klimatem klimatického normálu 1961–1990. Tato srovnávací rovina byla zvolena s vědomím, že se jedná o krátké období, kratší než pro klimatická srovnání zpravidla používáno. Důvody pro takto koncipované srovnání jsou tyto: (i) jde o období, které je rozhodující pro porosty, které aktuálně obhospodařujeme, porosty které jsou a budou vystaveny nejdříve dopadům klimatických změn; (ii) jde o období, pro které jsou k dispozici klimatická data z vysoké počtu klimatických stanic v ČR. Vzhledem k tomu, že cílem tohoto dílčího úkolu byl rámcově predikovat míru změny klimatických podmínek pro růst a pěstování dřevin, nikoliv změnu klimatu jako takovou, domníváme se, že jde o srovnávací rovinu, které je možnou, relevantní a pro pochopení rychlosti změn velmi demonstrativní.

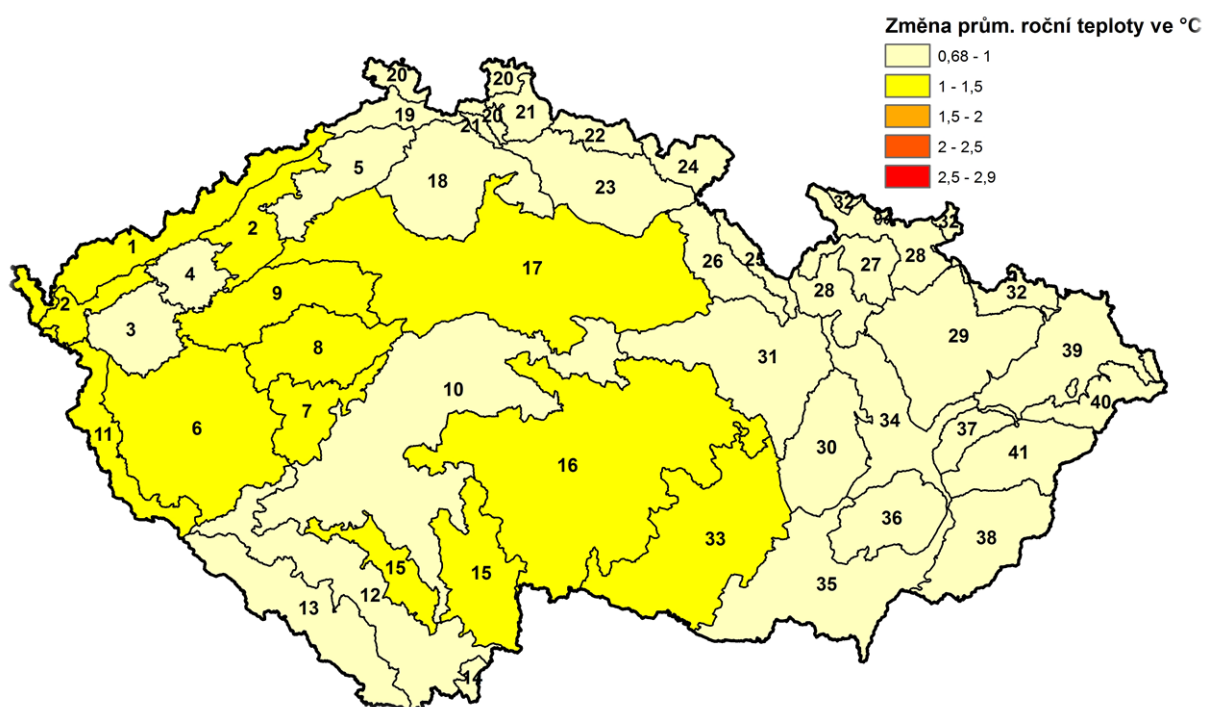
Z porovnání měřených hodnot průměrných ročních teplot a sumy ročních srážek je možné konstatovat, že v období 1991–2014 došlo k výrazným změnám oproti předchozímu období, tj. vůči klimatickému normálu 1961–1990. V případě průměrných teplot došlo takřka na celém území ČR k výraznému oteplení v průměru o 0,96°C s maximem až 1,55°C. Teploty beze změny, případně dokonce i s mírným ochlazením je možné sledovat pouze v oblasti Šumavy, respektive v její severní části. Výrazně odolnější vůči oteplení je také oblast Chřibů a části Dolnomoravského úvalu a pak horské oblasti Jeseníků a Krkonoš. V případě průměrné sumy ročních srážek došlo na území celé ČR spíše k mírnému nárůstu srážek v průměru o 34 mm za rok, nicméně v některých částech (především v oblasti Dolnomoravského a Hornomoravského úvalu, Polabí, Nízkého Jeseníku, Ostravska, východní části Krkonoš) došlo k poklesu, a to i o více než 20 mm.

V blízké budoucnosti všechny GCM prognózují další vzestup teplot a z jejich porovnání vyplývají pouze malé rozdíly v celkovém navýšení teplot (viz série map), mění se však plošná distribuce změn teplot u jednotlivých modelů. Výrazné rozdíly jsou naopak mezi výše zmíněnými scénáři vývoje emisí skleníkových plynů. V rámci dalších analýz však bylo pracováno pouze se scénářem RCP 4.5, který se jeví jako nejpravděpodobnější. Nejmenší průměrné oteplení na období 2041–2060 pak vykazuje model GCM MRI s hodnotou 1,95°C a naopak největší u modelu HadGEM2 s hodnotou 2,89°C oproti klimatickému normálu 1961–1990.

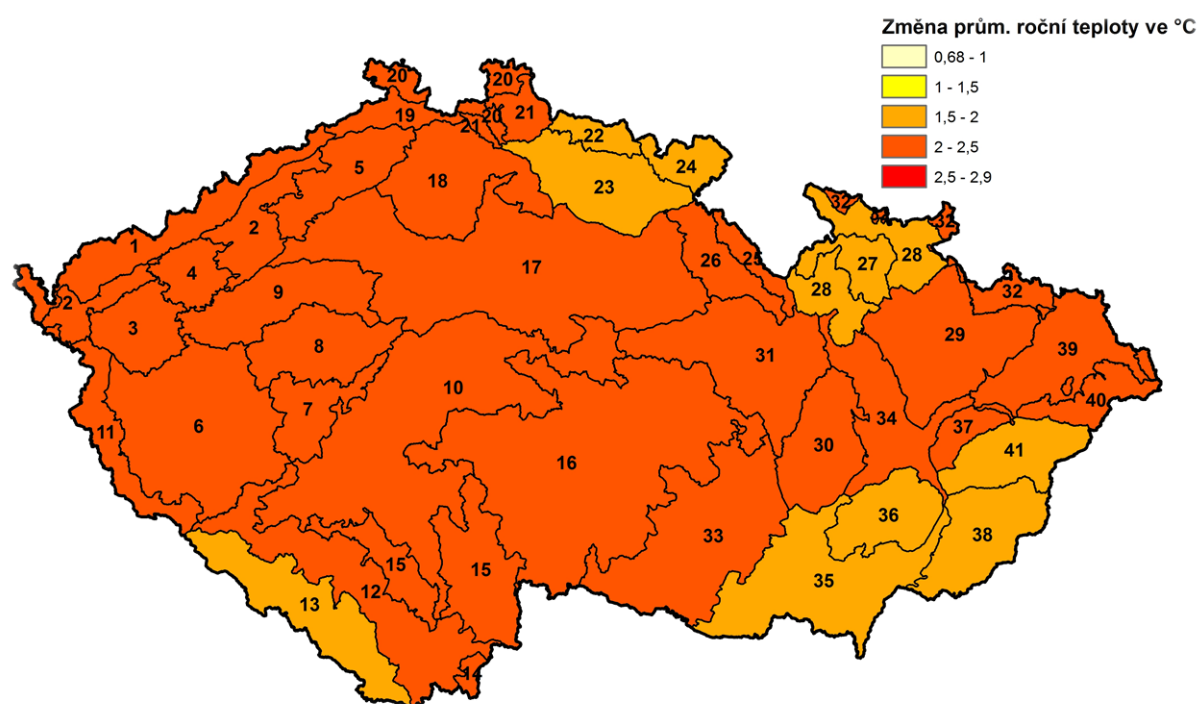
Vývoj průměrných ročních srážek je u jednotlivých GCM různý. Znatelný nárůst srážek pro takřka celé území ČR prognózují modely CNMR a MRI, modely BNU, HadGEM2 a IPSL předpokládají v průměru takřka neměnné srážky, avšak s výraznou prostorovou variabilitou – s lokálním nárůstem srážek na horách a převážně s poklesem v nížinách.

Vývoj klimatu v rámci jednotlivých PLO

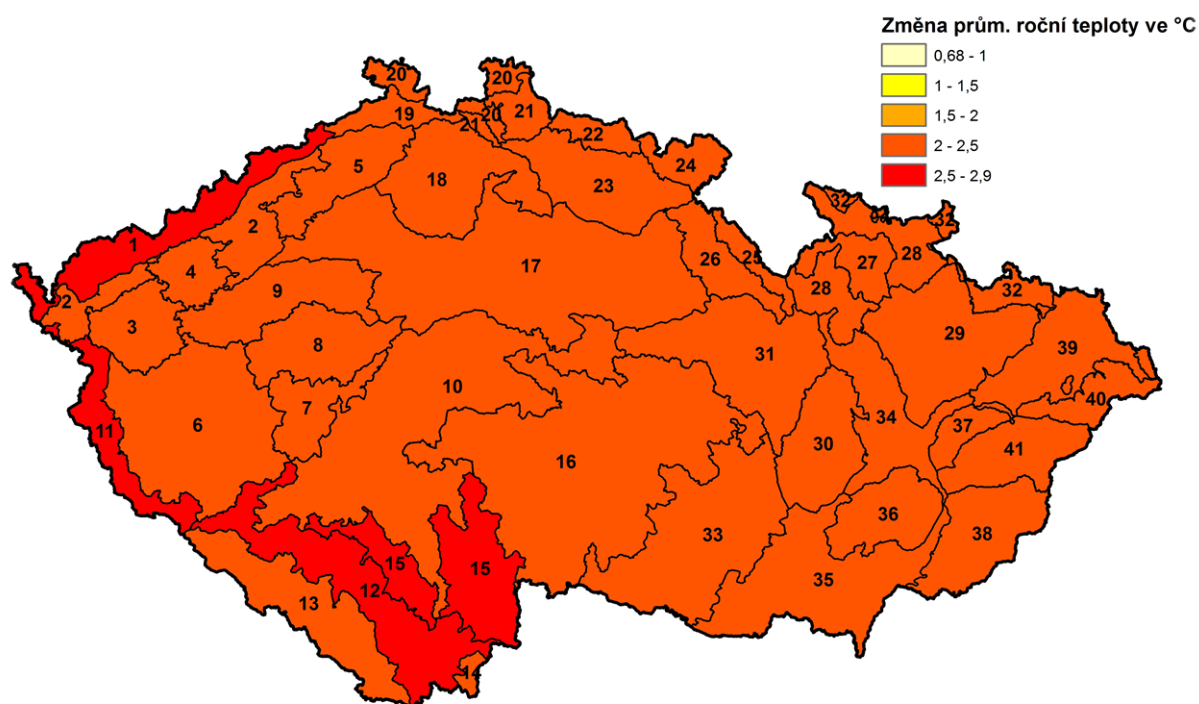
Vzhledem k množství vstupních dat byl pro možný vývoj klimatu v rámci PLO vybrán pouze jediný nejvíce pravděpodobný scénář a to IPSL ve variantě RCP 4.5, což znamená přechodný scénář vývoje. Tento scénář předpokládá v několika desetiletích zvýšení průměrné roční teploty v rozmezí 2–2,5°C (obr. 1–3) oproti klimatickému normálu 1961–1990 a zároveň pouze mírné zvýšení či mírné snížení celkového množství srážek (obr. 4–6), což povede na většině území ke zhoršení celkové vodní bilance. Nejvýraznější snížení množství srážek je možné očekávat na severovýchodě Moravy. Vlivem vyšších teplot však bude docházet ke zvýšení výparu a k negativní vodní bilanci.



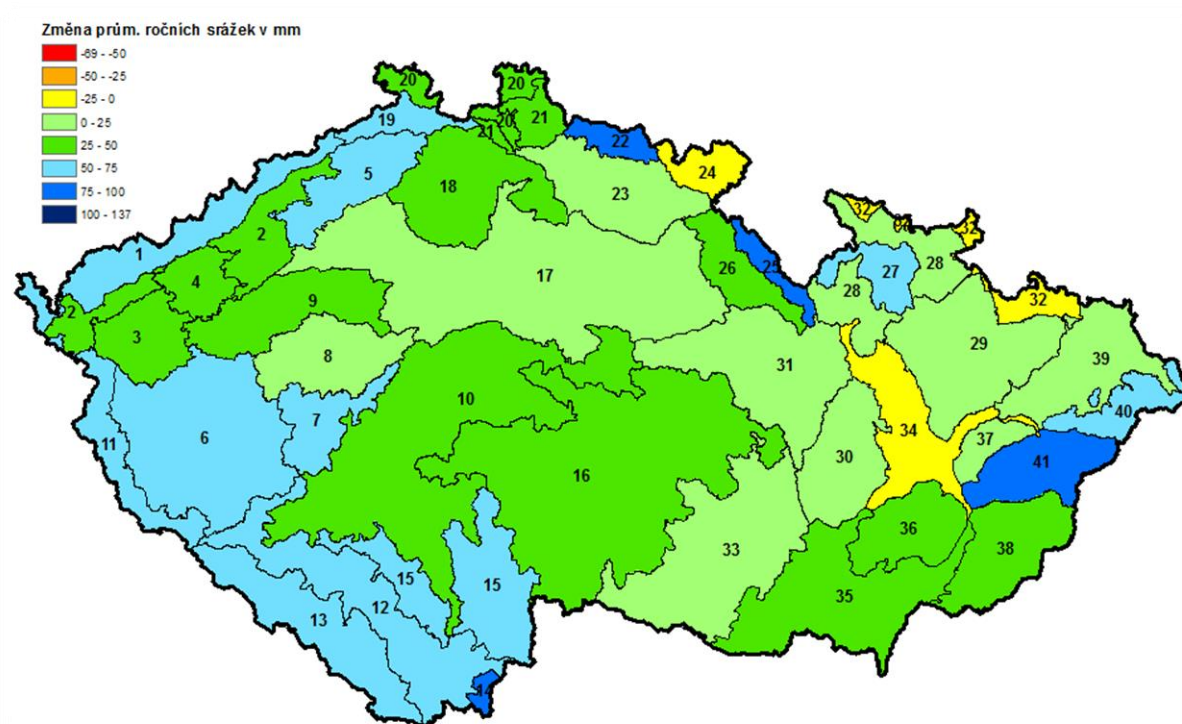
Obr. 1 Změna průměrné roční teploty mezi obdobími 1991–2014 a 1961–1990 za PLO



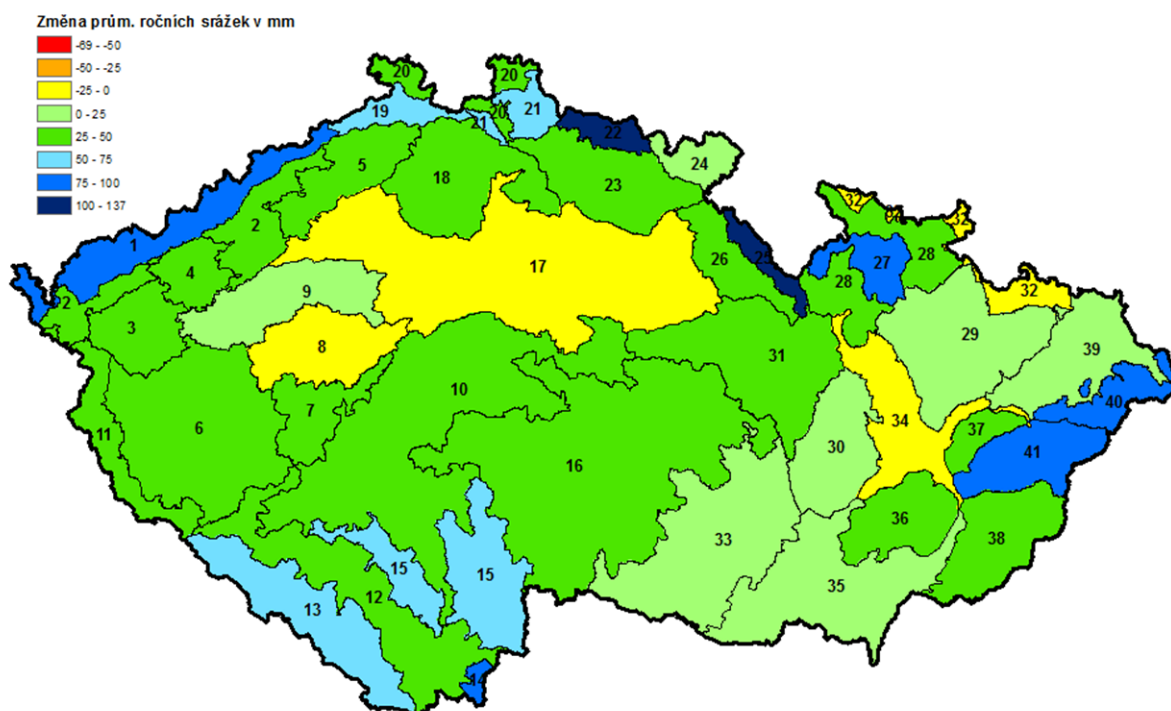
Obr. 2 Změna průměrné roční teploty mezi obdobími 2021–2040 a 1961–1990 za PLO



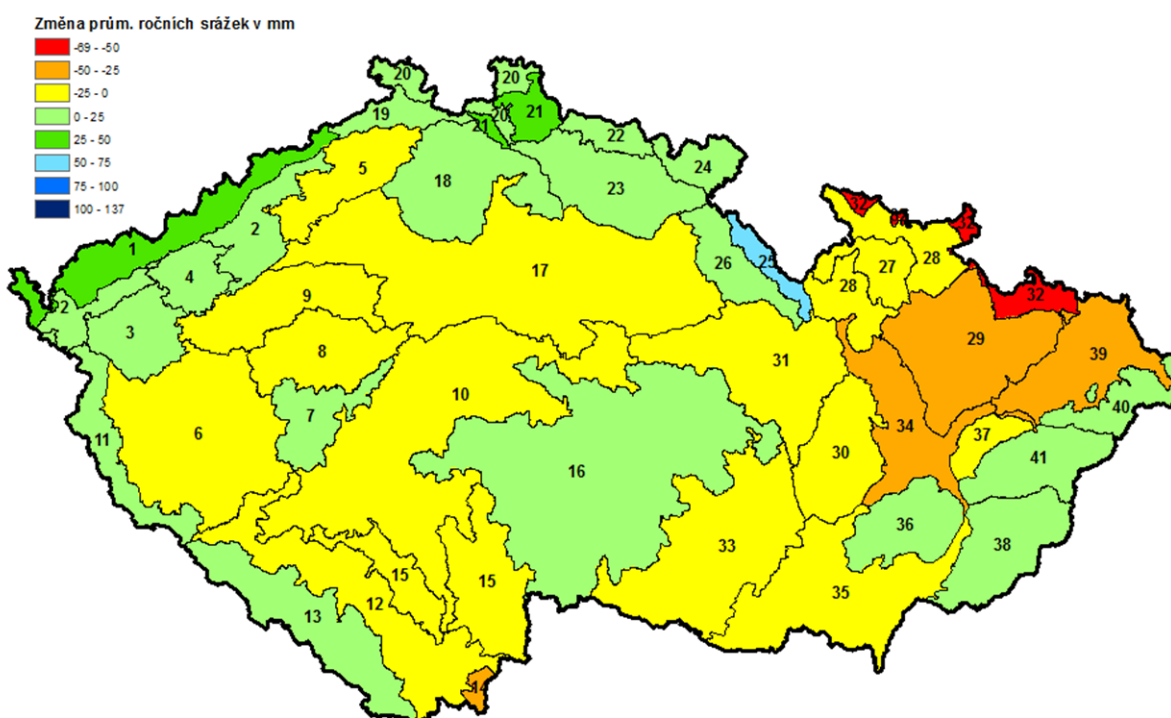
Obr. 3 Změna průměrné roční teploty mezi obdobími 2041–2060 a 1961–1990 za PLO



Obr. 4 Změna průměrné sumy ročních srážek mezi obdobími 1991–2014 a 1961–1990 za PLO



Obr. 5 Změna průměrné sumy ročních srážek mezi obdobími 2021–2040 a 1961–1990 za PLO

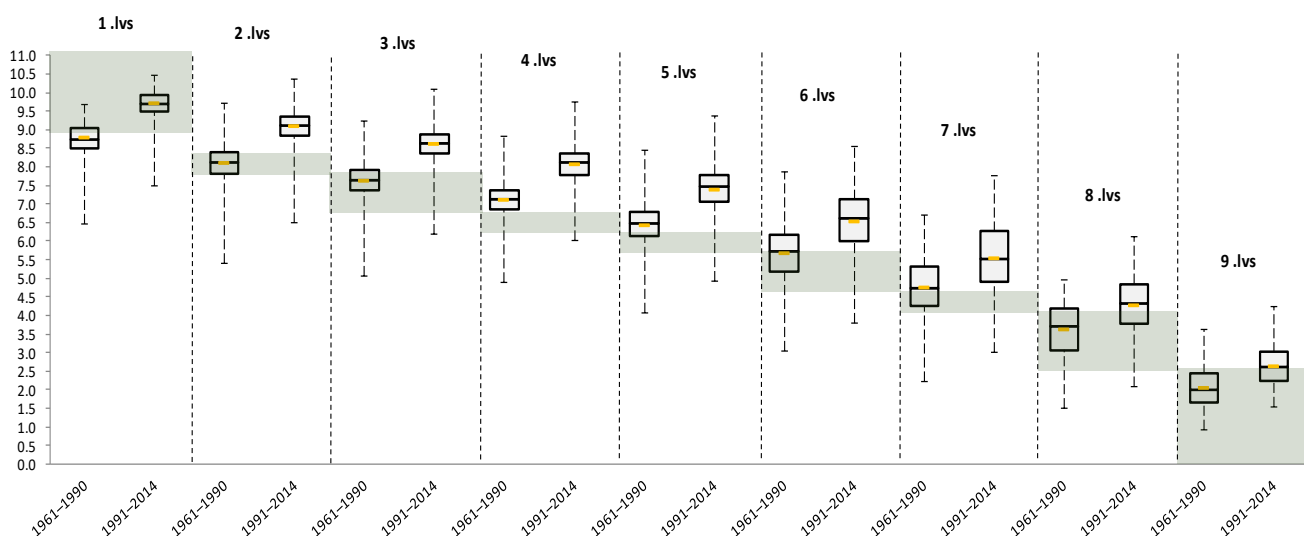


Obr. 6 Změna průměrné sumy ročních srážek mezi obdobími 2021–2040 a 1961–1990 za PLO

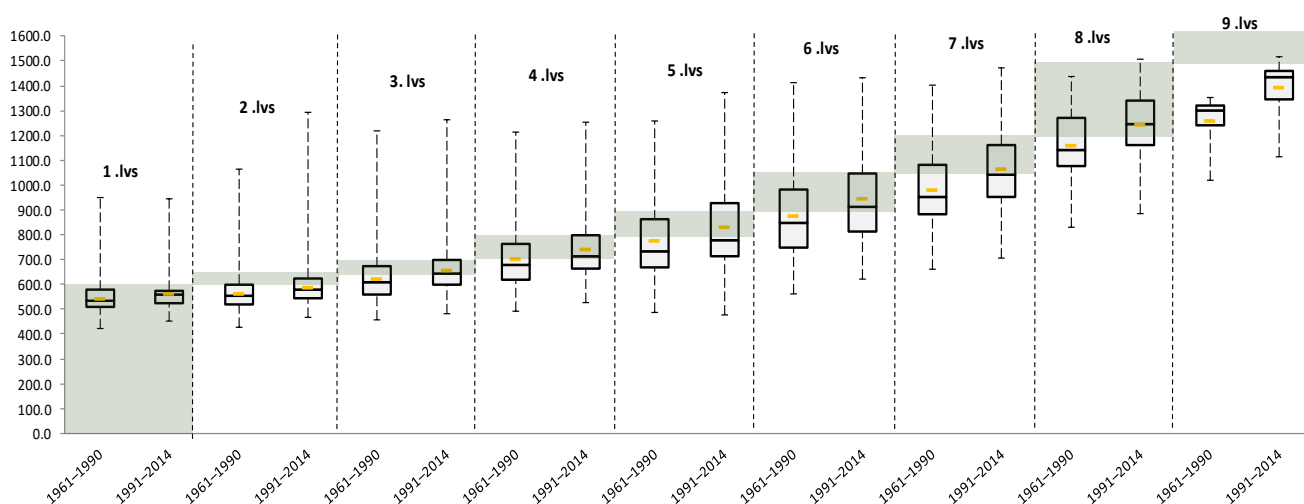
Změna klimatických charakteristik lesních vegetačních stupňů vlivem GKZ

Lesní vegetační stupeň (LVS) je plošně převažující klimaxová geobiocenóza determinovaná vegetací včetně náhradních geobiocenóz v určitém území, podmíněná makroklimatem a mezoklimatem v podmínkách měnící se nadmořské výšky (Randuška et al. 1986).

Na základě analýzy naměřených klimatických dat za období 1961–1990 a období 1991–2014 byla zjištěna výrazná změna v rozložení teplot a srážek v rámci jednotlivých LVS, kde došlo především u průměrných ročních teplot k výraznému nárůstu u všech LVS (obr. 7). Při porovnání měřených hodnot s literárními údaji (Plíva 1991), je většina intervalů za období 1991–2014 výrazně odlišná od předpokládaných hodnot. Za podstatné přitom považujeme hodnoty mezi 1. a 3. kvartilem, extrémní hodnoty jsou vzhledem k vysokému stupni generalizace a povaze dat velmi pravděpodobně chybami.



Obr. 7 Průměrné roční teploty u jednotlivých LVS za období 1961–1990 a 1991–2014 (krabicový graf - průměr + 1.–3. kvartil, svorky min-max, zeleně rozsah hodnot uváděných dle Plíva /1991/)



Obr. 8 Průměrná suma ročních srážek u jednotlivých LVS za období 1961–1990 a 1991–2014 (krabicový graf- průměr + 1.–3. kvartil, svorky min-max, zeleně rozsah hodnot uváděných dle Plíva /1991/)

V případě průměrné sumy ročních srážek nedošlo mezi obdobími k výraznějším změnám, celkově došlo spíše k mírnějšímu nárůstu srážek v rámci všech LVS (obr. 8). Při porovnání s literárními údaji (Plíva 1991) jsou uváděné hodnoty rovněž ve větší shodě se skutečností.

Jak je viditelné z obr. 7 a obr. 8, charakteristiky jednotlivých LVS nejsou jednoznačně definovatelné pouze na základě klimatu, neboť jak v případě teplot tak (a to zejména) u srážek, dochází k překryvu intervalů. Mimo důvodů vyplývajících z definice LVS (viz výše), je tento fakt důvodem, proč není možné v rámci modelování GKZ ve vztahu k růstu, zdraví a vitalitě dřevin mluvit o posunu vegetačních stupňů.

V případě oteplení, změny ročních úhrnů srážek (nebo úhrnů v klíčových obdobích vegetačních sezón) a změn distribuce srážek (zejména výskyt přísušků) dojde k významné změně podmínek pro růst a pěstování dřevin – lze tak očekávat na jedné straně rozsáhlé zdravotní problémy některých druhů v podmínkách na okraji jejich ekologických amplitud, na druhé straně pak šíření těchto či jiných druhů do oblastí, které se díky změně klimatu staly pro tyto druhy příhodnými. Vliv změny klimatických parametrů na dřeviny, jejich porosty a na celá lesní společenstva bude ovlivněn porostními a stanovištními poměry (hydrický a trofický režim, fyzikální vlastnosti půd, reliéf, expozice...). Ty mohou vliv klimatu brzdit či naopak eskalovat.

Sofistikovaná simulace vlivu klimatických změn na dřeviny zohledňující stanoviště je velmi komplikovaná, bylo by potřebné použít fyziologické a procesní modely, kterými lze modelovat reakci stromů na jednotlivé parametry v konkrétních podmínkách. Výsledky procesních modelů jsou však pak jen částečně ověřitelné empirickými daty (např. měření evapotranspirace a bilance CO₂). Dalším krokem by muselo být parametrizování výsledků v růstových modelech, například pomocí dat z dendrochronologického výzkumu. Teprve takto kalibrované růstové modely by mohly poskytnout kvalitní prognózy možných změn v růstu a druhové skladbě lesů (Kupka 2002).

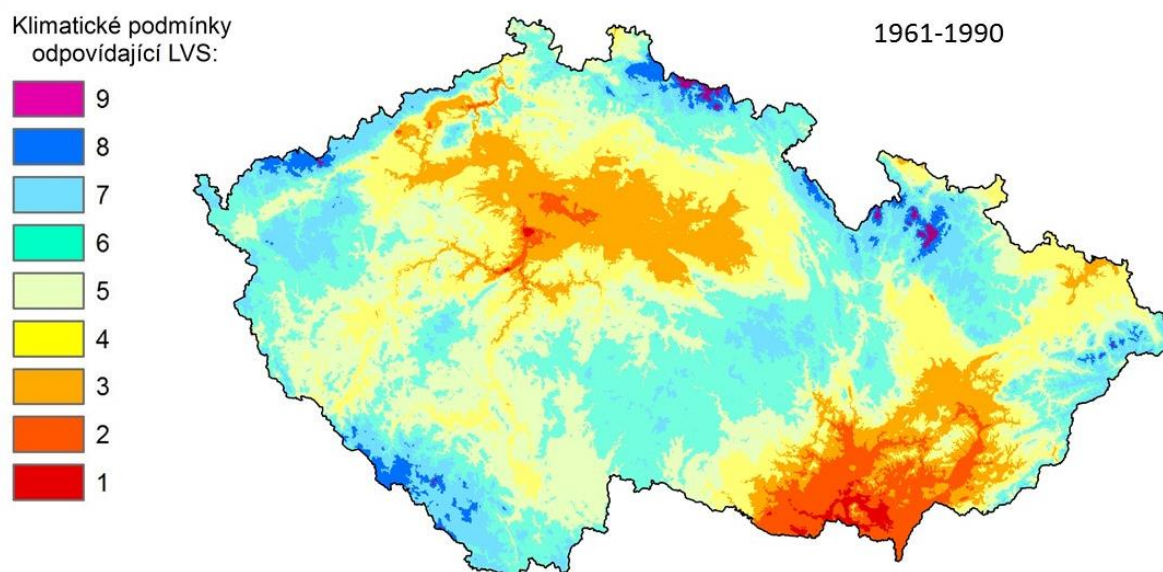
Samovolné šíření a ústup dřevin nelze v podmínkách střední Evropy v krátkém časovém horizontu (menším než obmýtlí porostů) očekávat na velkých plochách – dřeviny mají obecně limitované migrační schopnosti, střeoevropská krajina je vertikálně i horizontálně velmi členitá, navíc značně fragmentalizovaná.

Vícerozměrná analýza – Random Forest

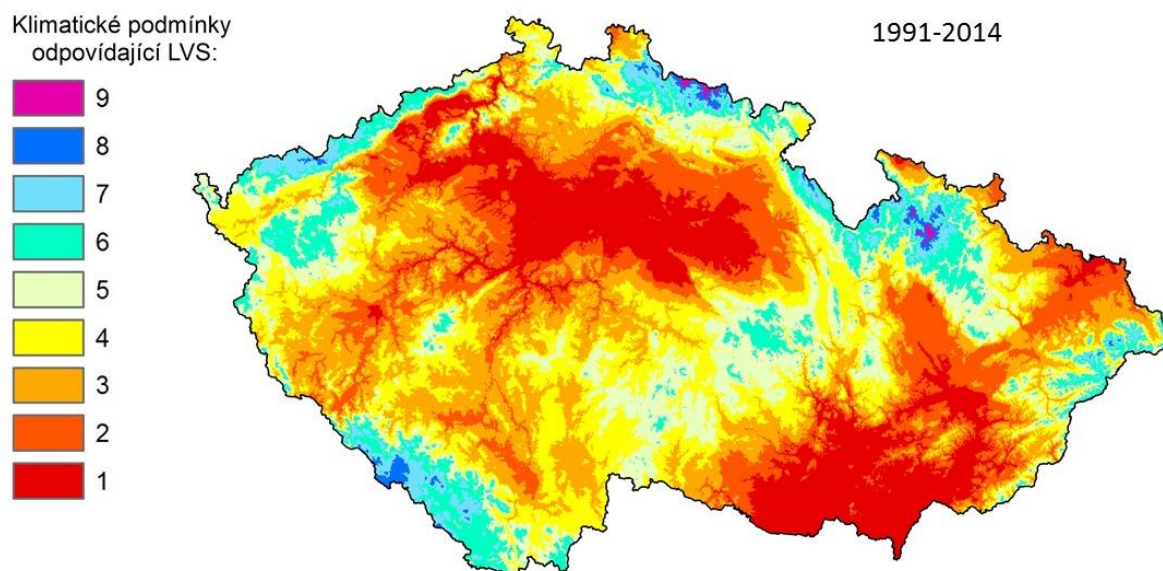
Pro potřeby vizualizace těchto změn byla provedena vícerozměrná statistická analýza LVS pomocí metody Random Forest pro období 1961–1990 s následnou klasifikací dat pro další sledovaná období. Pro modelování byla použita vícerozměrná statistická metoda Random Forest (Náhodný les) v softwaru STATISTICA 10. Náhodný les je kombinovaná učící metoda pro klasifikaci a regresi, která vytvoří více rozhodovacích stromů při učení a následně vydá modus (nejčastější hodnotu) tříd vrácených jednotlivými stromy. Termín pochází z náhodných rozhodovacích lesů, které zavedl (Ho 1995). Metoda kombinuje myšlenku "baggingu" (Breiman 1996) s náhodným výběrem příznaků (features), aby zkonstruovala skupinu stromů s řízenou variancí. Procedura užívání náhodných lesů patří mezi nejslibnější se rozvíjející metody. Principem metody je vytvoření skupiny M stromů P₁, ..., P_m, která by rozhodovala o zařazení objektu do daných tříd. Je tedy třeba vhodně zkombinovat klasifikační funkce jednotlivých stromů (Breiman 2001). Vytvořená klasifikační funkce je pak aplikovatelná na data se změnou nezávislých proměnných.

Pomocí metody Random Forest byly mezi nejvíce signifikantní proměnné v rámci analýzy určeny teplotní charakteristiky s nejvyšší významností průměrných teplot v období březen až květen. Vlivem nejednoznačného klimatického vymezení LVS však analýza vykazovala pouze malou úspěšnost predikce okolo 65 %, výsledky tak odrážejí pouze vliv změny teplot a nejsou příliš vypovídající. Z výsledků

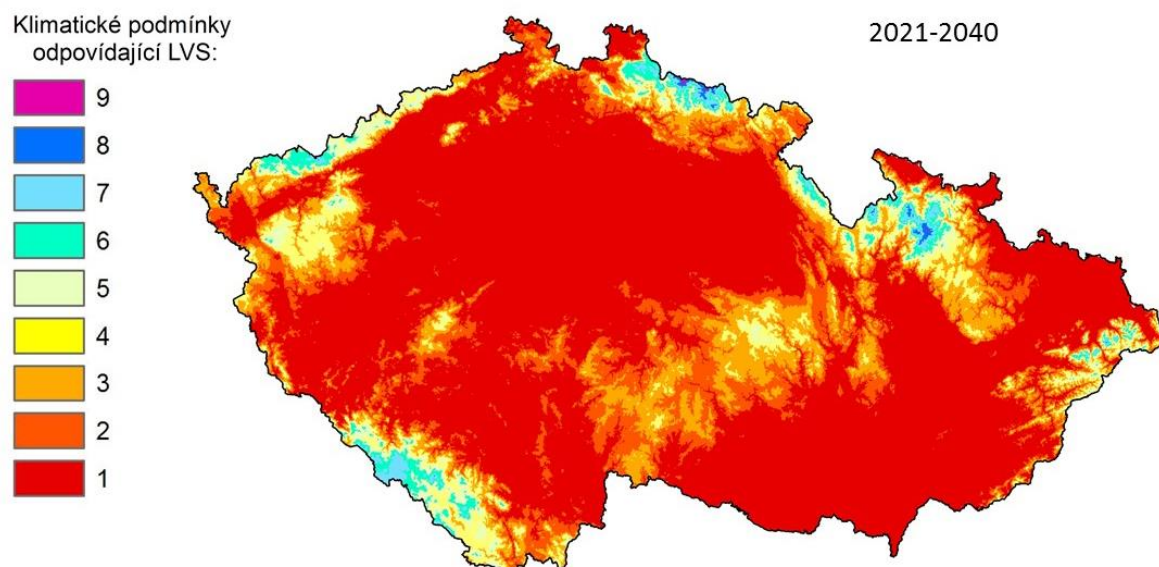
vyplývá postupné rozšiřování klimatických podmínek, které v normálovém období 1961–1990 odpovídaly 1. a 2. LVS a naopak postupné ubývání klimatických podmínek odpovídajících vyšším LVS s postupným zánikem klimatických podmínek 9. LVS (viz obr. 9–12).



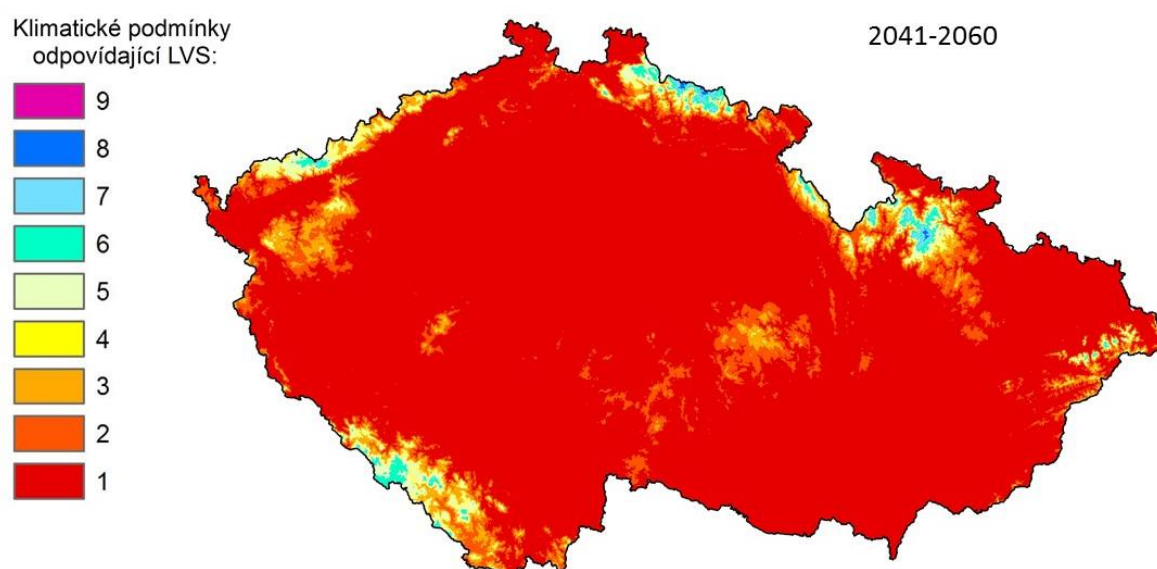
Obr. 9 Modelování klimatických podmínek LVS – období 1961–1990 = výchozí srovnávací úroveň (data ČHMÚ)



Obr. 10 Modelování klimatických podmínek LVS – období 1991–2014 (data ČHMÚ)



Obr. 11 Modelování klimatických podmínek LVS – období 2021–2040 (GCM IPSL)



Obr. 12 Modelování klimatických podmínek LVS – období 2041–2060 (GCM IPSL)

Modelování oblastí s vhodnými podmínkami pro pěstování dubu, buku a smrku

Byly zvoleny dva rozdílné přístupy. První jednodušší metoda byla založena na výpočtu tzv. De Martonneho indexu aridity (DeMartonne 1926) založeného na vzájemném poměru průměrných ročních srážek a průměrných ročních teplot navýšených o 10°C,

$$Iar = \frac{P}{T + 10}$$

kde P jsou průměrné roční srážky a T průměrná roční teplota vzduchu.

De Martonneho index byl vybrán jako jeden z indexů kombinujících teploty i srážky – je tak charakteristikou vyjadřující v současnosti nejvýznamnější klimatickou limitaci dřevin a to sucho.

Každá z dřevin má jiné ekologické nároky na klima, konkrétní zjištění hraničních hodnot je však obtížné. Dle literatury (shrnutí Vinš et al. 1996) je např. smrk dřevinou s původním rozšířením ohraničeným roční izohetou 800 mm nebo hodnotou de Martonneho indexu aridity $Iar > 60$. Jeho přirozené rozšíření v zonálních společenstvech ČR od 6. LVS po hranici lesa, na azonálních vodou ovlivněných stanovištích pak smrk sestupuje až do nejnižších nadmořských výšek (Plíva 2000). Jeho minimální nároky jsou nicméně poměrně vyhraněně definovány a jejich posun lze modelovat.

V případě dubu a buku jsou hraniční klimatické hodnoty pro jejich výskyt či bezpečný výskyt (bez nadměrného rizika odumírání) stále předmětem diskuzí. Obecně lze konstatovat, že dub letní a dub zimní jsou dřevinami níže položených, tj. teplejších oblastí České republiky. Jejich nároky na srážky a vodu v půdě se liší. U dubu letního existují dva vyhraněné ekotypy, a to lužní se značnými nároky na vláhu (snášejí i jarní záplavy) a lesostepní se schopností růstu na mělkých, v létě silně vysychavých, půdách. Dub zimní zvládá půdy s poměrně širokým rozpětím množství vody od vysychavých stanovišť až po stanoviště s normálním hydrickým režimem. Přirozené rozšíření dubů je v zonálních společenstvech do 5. LVS, s maximem rozšíření ve 2. a 3. LVS, kde také dosahují produkčního optima (Plíva 2000). Horní hranice rozšíření dubu zimního je limitována zejména teplotně, posun vhodných podmínek lze tedy opět relativně dobře modelovat.

Buk je dřevinou oceánického a suboceánického klimatu s ekologickým optimem ročních srážek mezi 800 až 1000 mm, nicméně celkově s poměrně širokou ekologickou amplitudou. Jeho rozšíření tak u nás sahá od 2. LVS do 7. LVS, místy i do spodních částí 8. LVS (Plíva 2000), významnou roli v přirozených lesích hraje jeho konkurenceschopnost na daném stanovišti ve srovnání s dalšími hlavními dřevinami, které ho doprovází. Toto široké rozšíření komplikuje vymezení hraničních hodnot klimatických parametrů – limitace klimatem je ze současného rozšíření obtížně odvoditelná. Modelování změn podmínek vhodných pro buk, respektive věrohodnost výstupů modelů navíc komplikují dosavadní poznatky o reakcích buku na změnu klimatu. Ukazuje se, že reakce mohou být velmi silně ovlivněny rozdíly mezi ekotypy, odlišnosti byly v některých případech zjištěny nejen mezi buky z různých geografických oblastí, ale i z různých nadmořských výšek, respektive vegetačních stupňů. Výstupy modelů lze na úrovni rámcového generalizovaného vymezení použít, při jeho použití pro menší území může být velmi problematické.

Vzhledem k uvedeným okolnostem byly proto nejprve definovány mezní hodnoty De Martonneho indexu aridity pro jednotlivé hospodářské dřeviny na území ČR. Současné skutečné rozšíření dřevin bylo převzato z databáze ÚHUL. Pro analýzu byly v případě dubu a buku byly vybrány veškeré lesní porosty na území ČR se zastoupením větším než 20 %, kde lze v převážné většině očekávat, že jde o porosty v podmínkách pro dřevinu ekologicky či produkčně optimální nebo alespoň o podmínky

optimu blízké. V případě smrku, který dosahuje vysokého zastoupení v řadě lokalit v nižších polohách prokazatelně vzdálených jeho nárokům na klima, jsme pro analýzu zahrnuli pouze lesní porosty na stanovištích od 5. LVS výše (schematicky vymezené jako dosud klimaticky víceméně bezpečné oblasti pro pěstování smrku). Výsledky v tab. 1 ukazují sice jednoznačné rozdíly mezi průměrnými hodnotami *Iar* jednotlivých dřevin, v případě maximálních a minimálních hodnot je však vidět značná variabilita a překryv intervalů mezi dřevinami, ta je vzhledem k prostorovému měřítku a silné generalizaci pravděpodobně dána z toho vyplývající chybami.

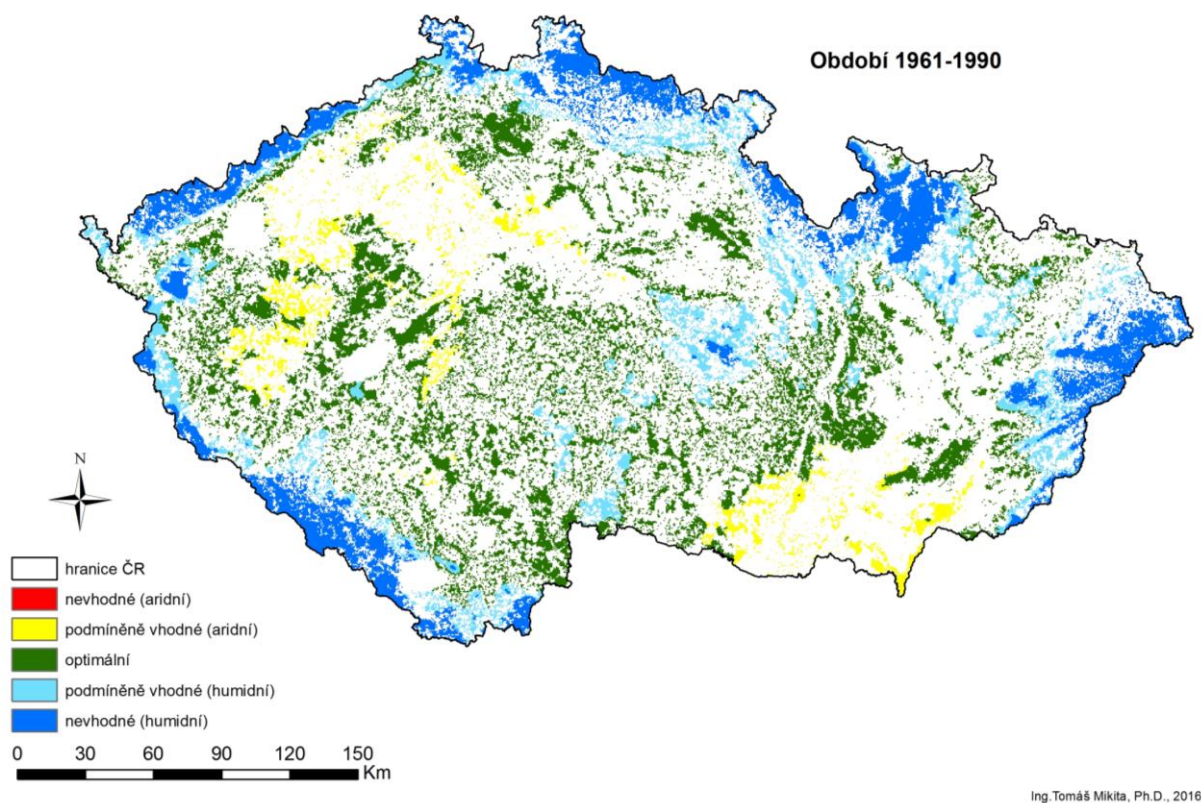
Tab. 1 Statistické vyhodnocení ekologických nároků dřevin

	De Martonneho index aridity							
	Min	Max	Prům.	Směr. Od.	prum-2SO	prum+2SO	prum-1SO	prum+1SO
Smrk	29,04	122,18	53,48	13,94	25,59	81,37	39,54	67,42
Buk	25,65	111,57	48,38	12,80	22,78	73,98	35,58	61,18
Dub	22,85	111,57	32,24	4,99	22,26	42,22	27,25	37,23

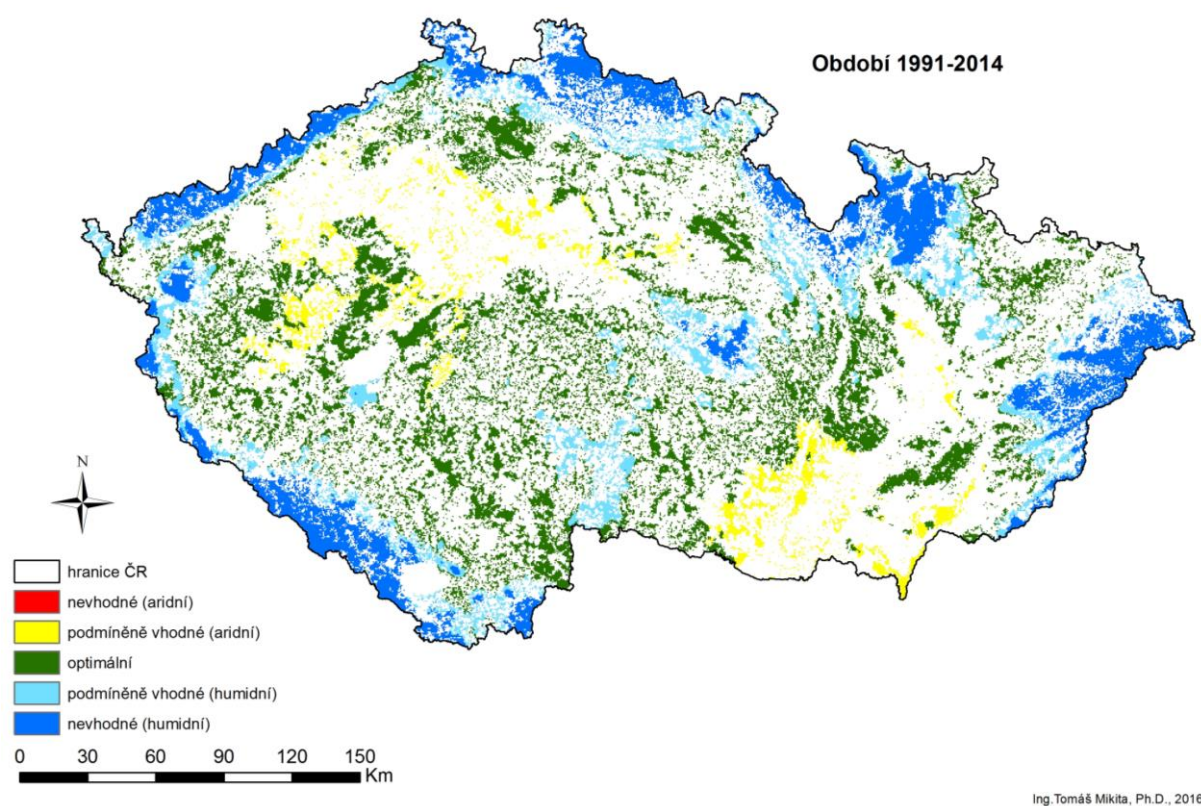
Z těchto důvodů byly hraniční hodnoty pro pěstování dřevin definovány na základě hodnot od průměru mínus směrodatná odchylka po průměr plus směrodatná odchylka. Vznikly tak mapy podmínek pro pěstování dřevin za jednotlivá období prezentované na následujících stranách (obr. 13–24).

Modelování vývoje vhodných klimatických podmínek nebylo realizováno pro další dvě významné hospodářské dřeviny – jedli bělokorou a borovici lesní. U borovice je nemožnost realizace takto koncipovaného modelu dána širokou ekologickou amplitudou – délka vegetační doby 90–200 dnů a roční úhrn srážek mezi 200 a 1800 mm. Tyto podmínky pokrývají celé území ČR, uplatnění borovice je dáno její konkurenceschopností, nikoliv klimaticky. U jedle je překážkou také její poměrně široká ekologická valence (2. až 7. LVS) a spolu s ní malý výskyt na území ČR a to zejména ve formě příměsi s malým zastoupením (nemožnost realizace výše popsaného prvního kroku modelování).

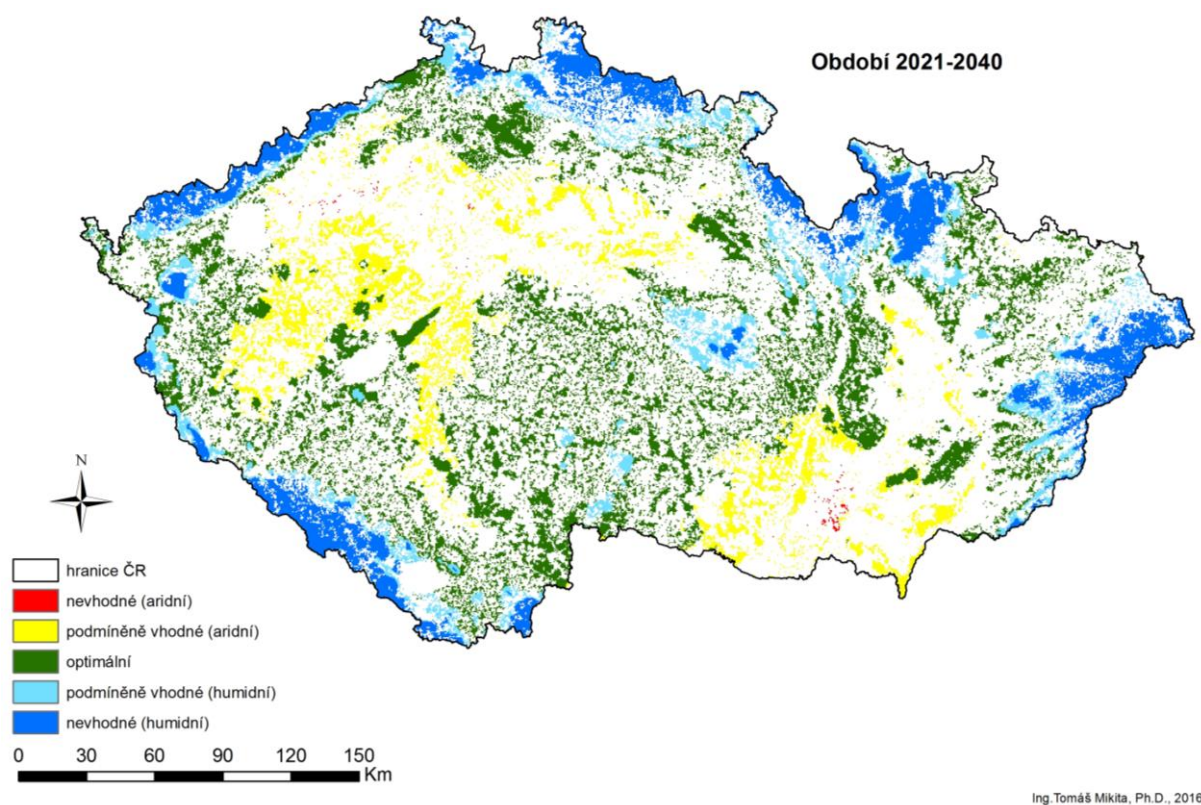
U všech tří dřevin dochází k výrazným změnám v prostorovém rozšíření optimálních podmínek. K největším změnám dochází v oblastech s podmínkami pro pěstování smrku, kdy v rámci několika desetiletí je možné předpokládat výrazné zmenšení oblastí vhodných pro pěstování smrku, které zůstanou pouze v nejvyšších polohách našich pohoří. V případě buku a dubu naopak dojde k rozšíření oblastí s optimálními podmínkami. Zároveň je však možné předpokládat i výskyt oblastí, které nebudou klimaticky vyhovující (ve srovnání s normálovým obdobím 1961–1990) ani pro pěstování dubu (např. na jižní Moravě).



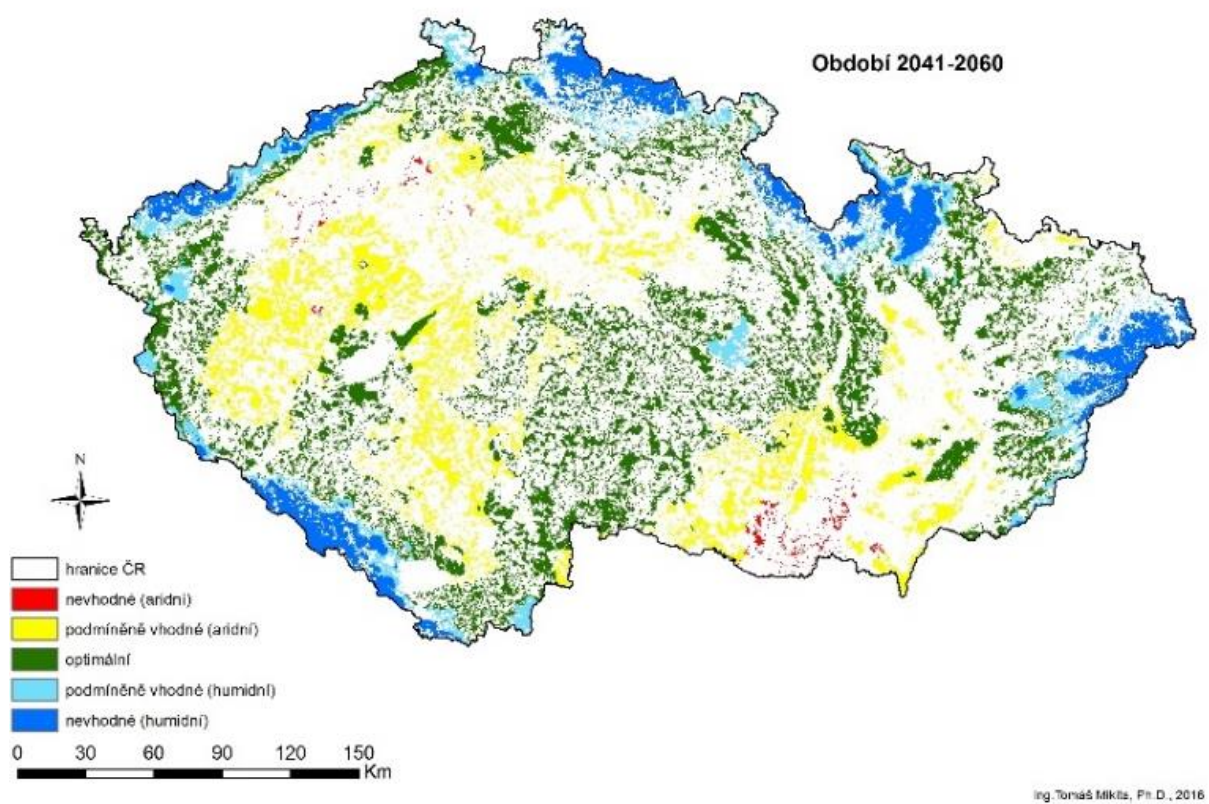
Obr. 13 Podmínky pro pěstování dubu pro období 1961–1990 (data ČHMÚ)



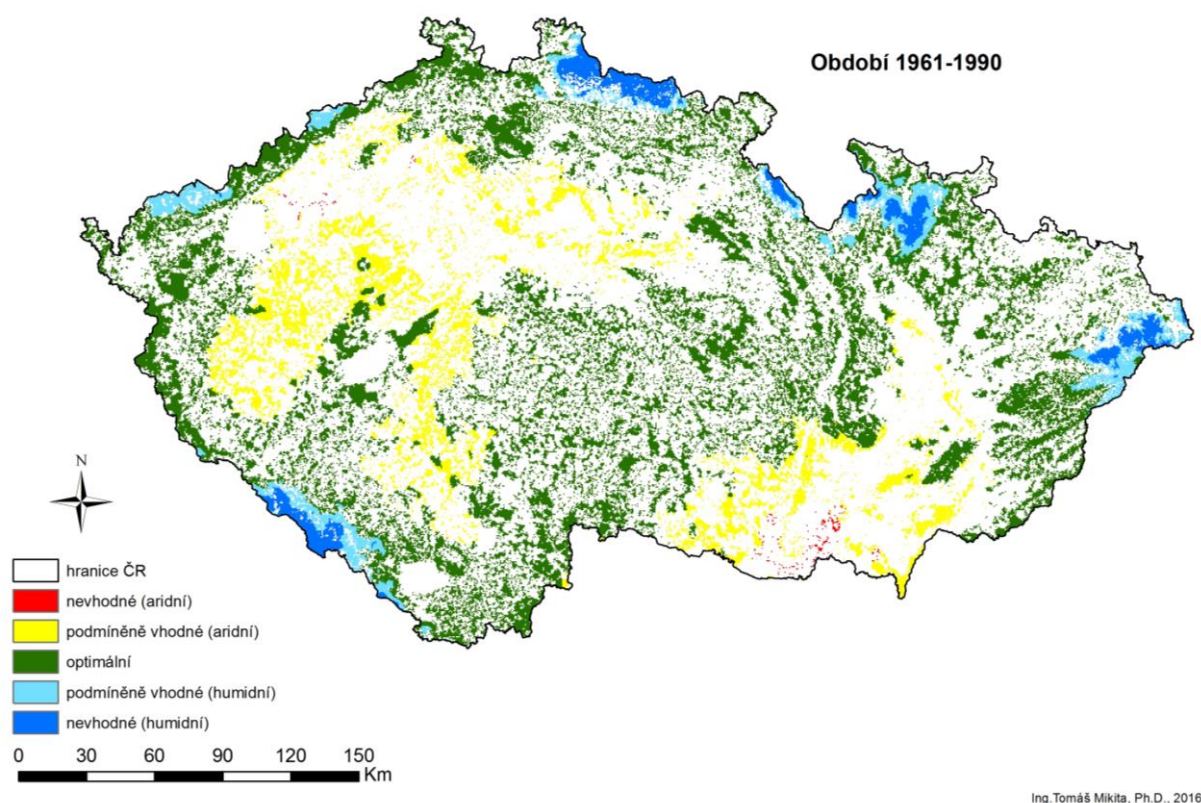
Obr. 14 Podmínky pro pěstování dubu pro období 1991–2014 (data ČHMÚ)



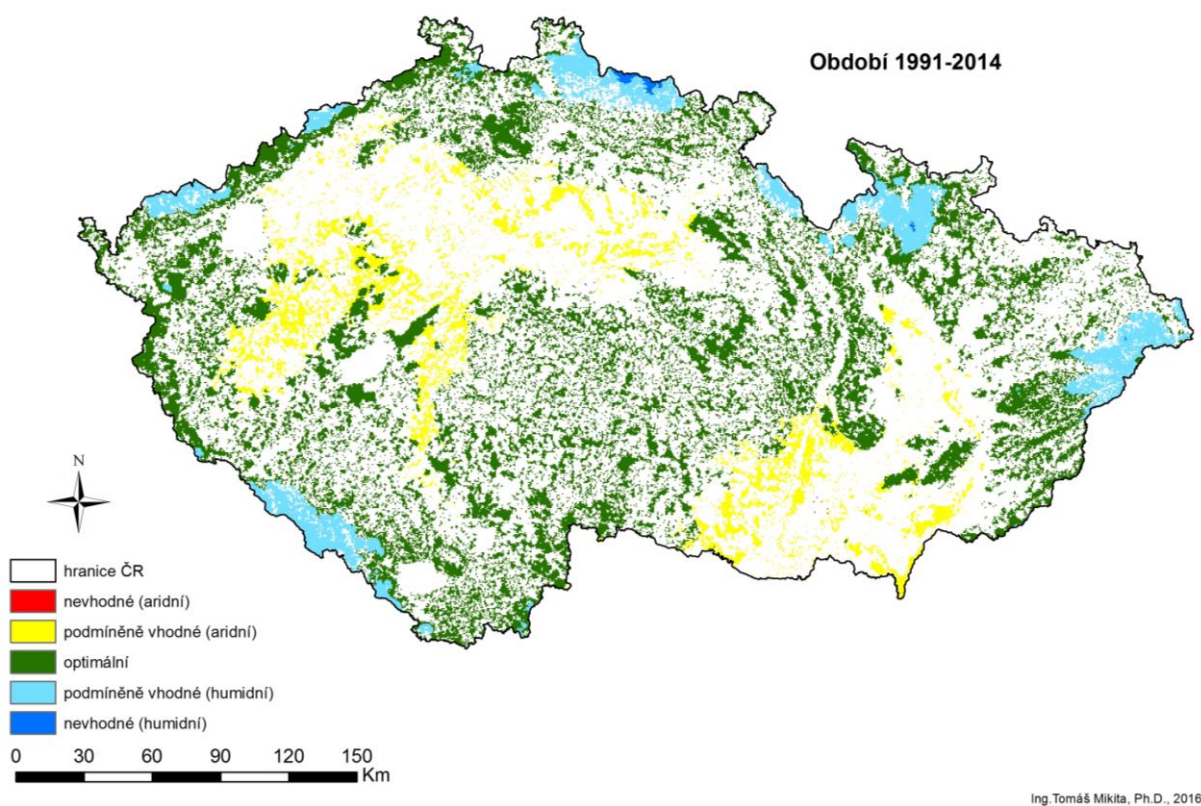
Obr. 15 Podmínky pro pěstování dubu pro období 2021–2040 (GCM IPSL)



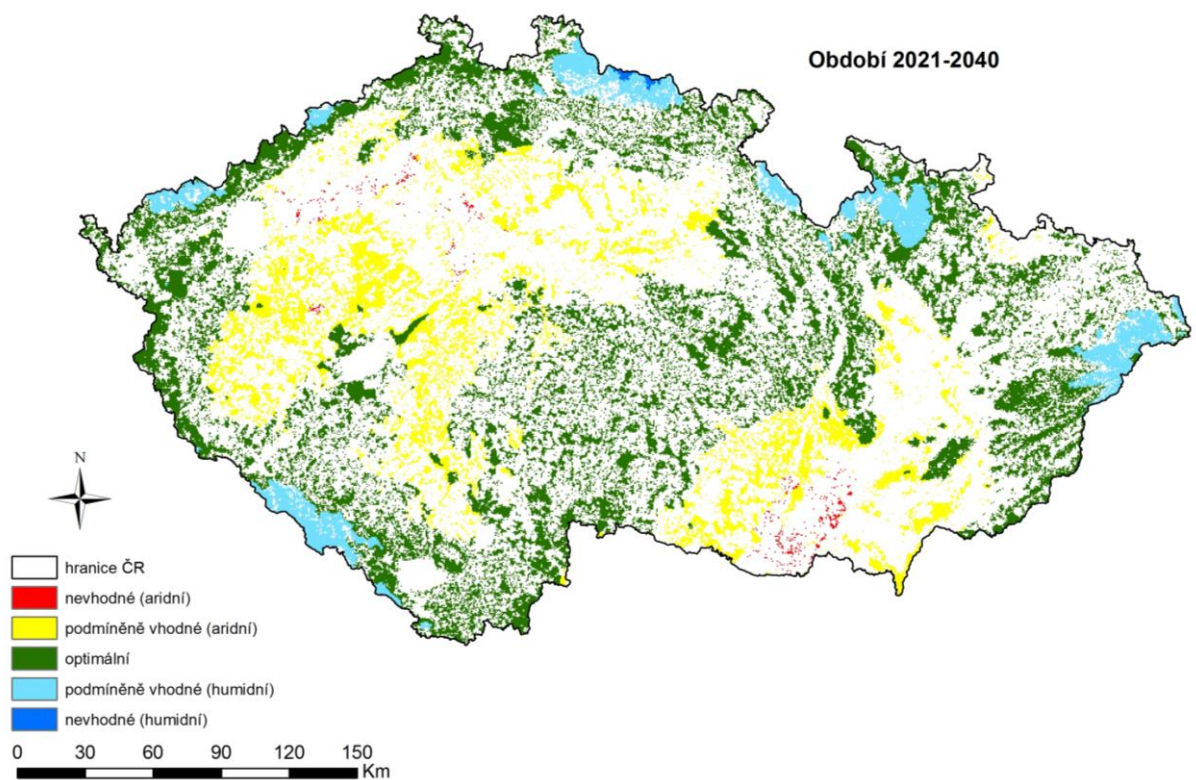
Obr. 16 Podmínky pro pěstování dubu pro období 2041–2060 (GCM IPSL)



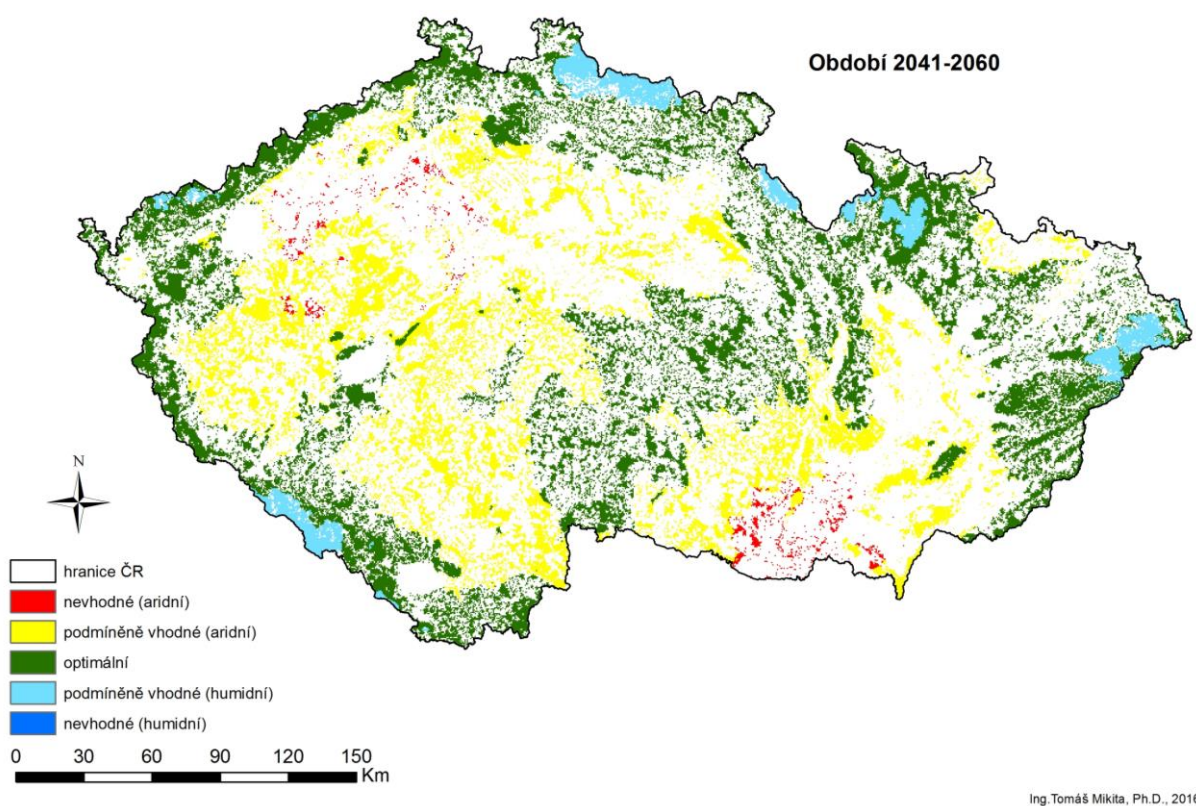
Obr. 17 Podmínky pro pěstování buku pro období 1961–1990 (data ČHMÚ)



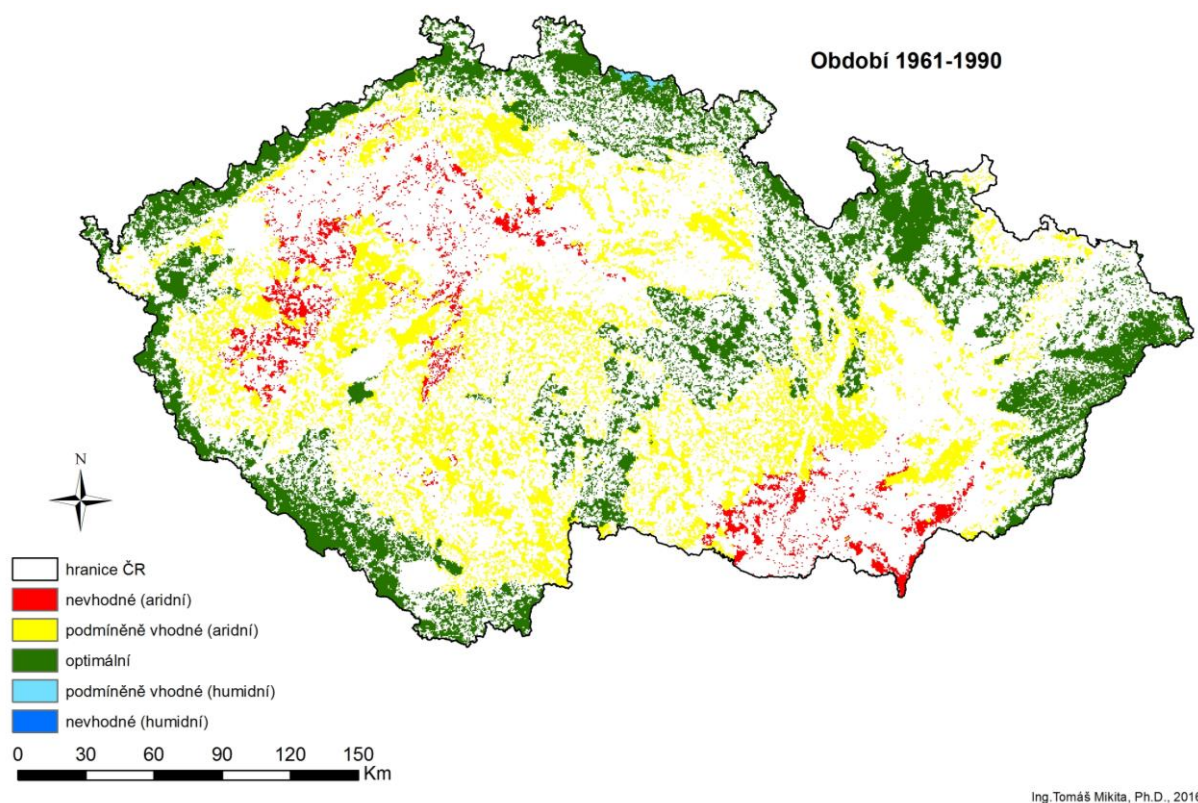
Obr. 18 Podmínky pro pěstování buku pro období 1991–2014 (data ČHMÚ)



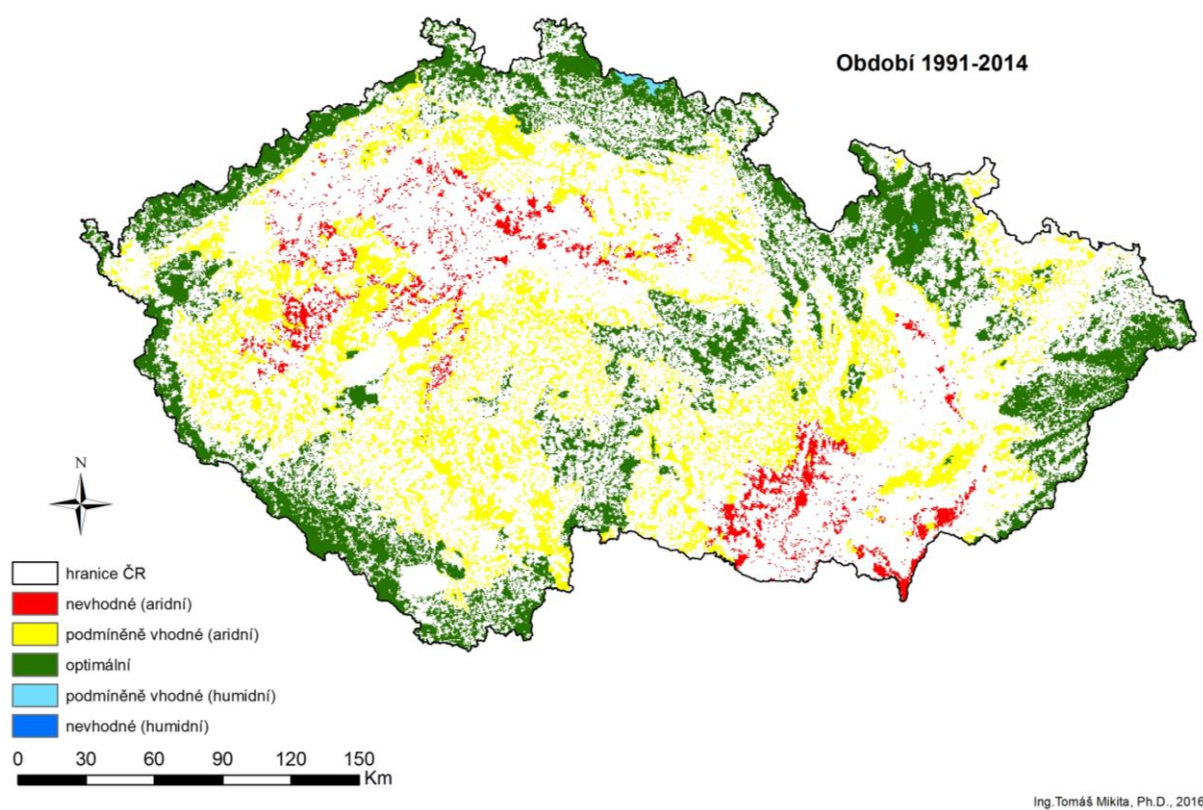
Obr. 19 Podmínky pro pěstování buku pro období 2021–2040 (GCM IPSL)



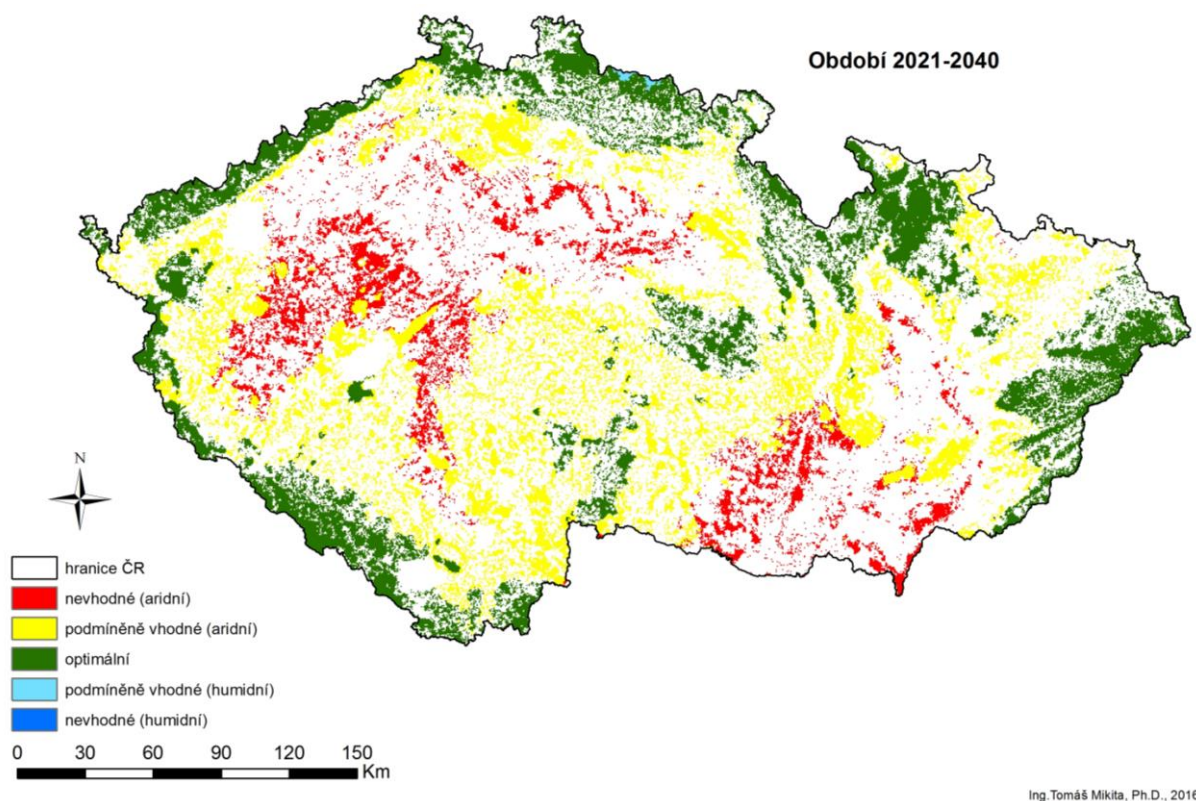
Obr. 20 Podmínky pro pěstování buku pro období 2041–2060 (GCM IPSL)



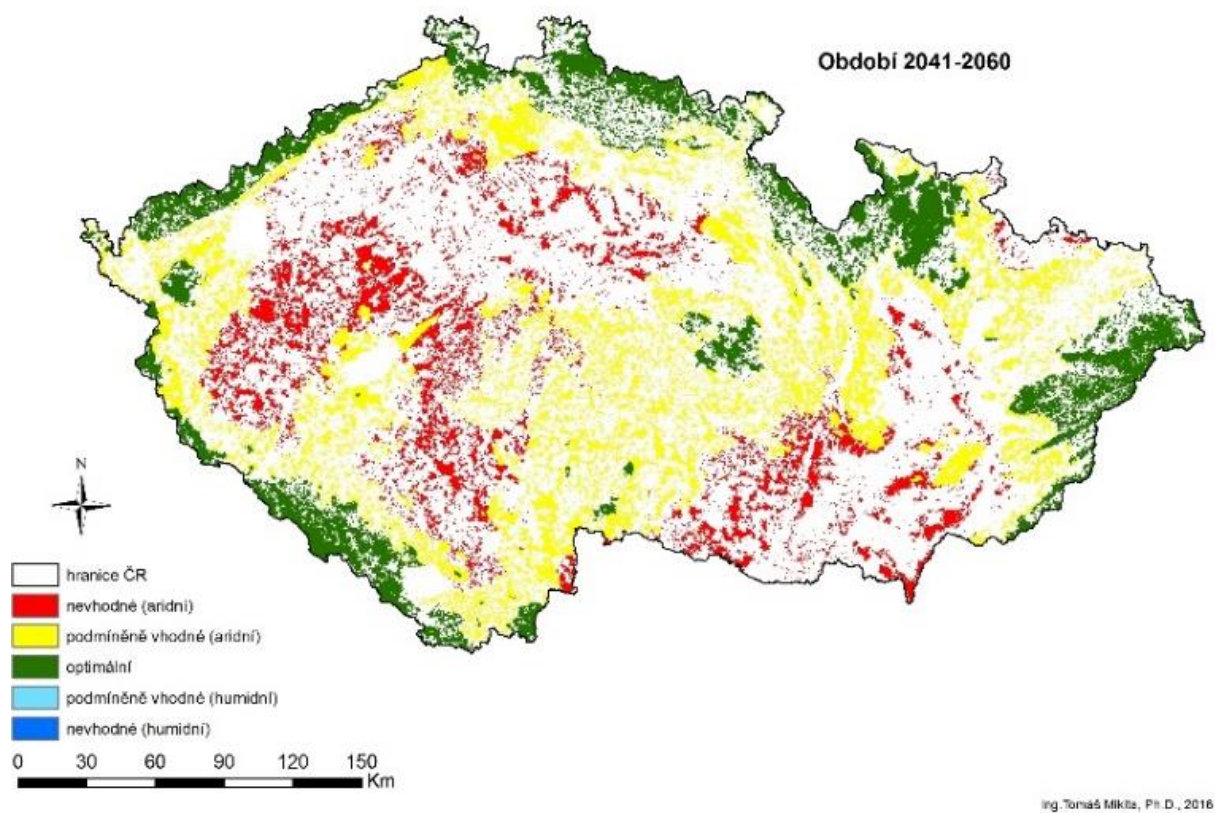
Obr. 21 Podmínky pro pěstování smrku pro období 1961–1990 (data ČHMÚ)



Obr. 22 Podmínky pro pěstování smrku pro období 1991–2014 (data ČHMÚ)



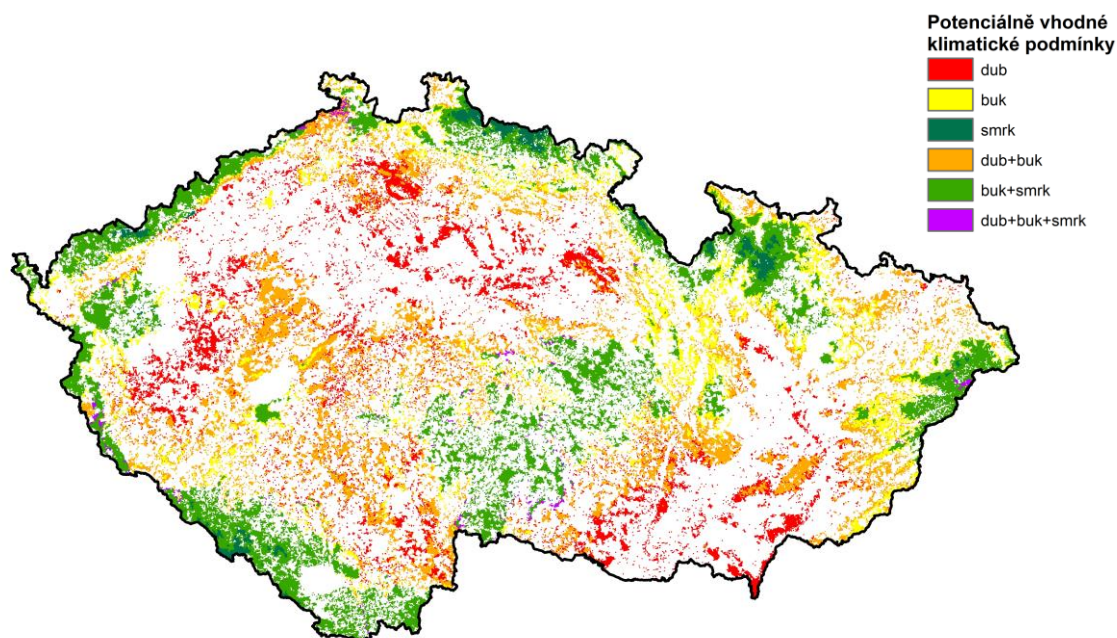
Obr. 23 Podmínky pro pěstování smrku pro období 2021–2040 (GCM IPSL)



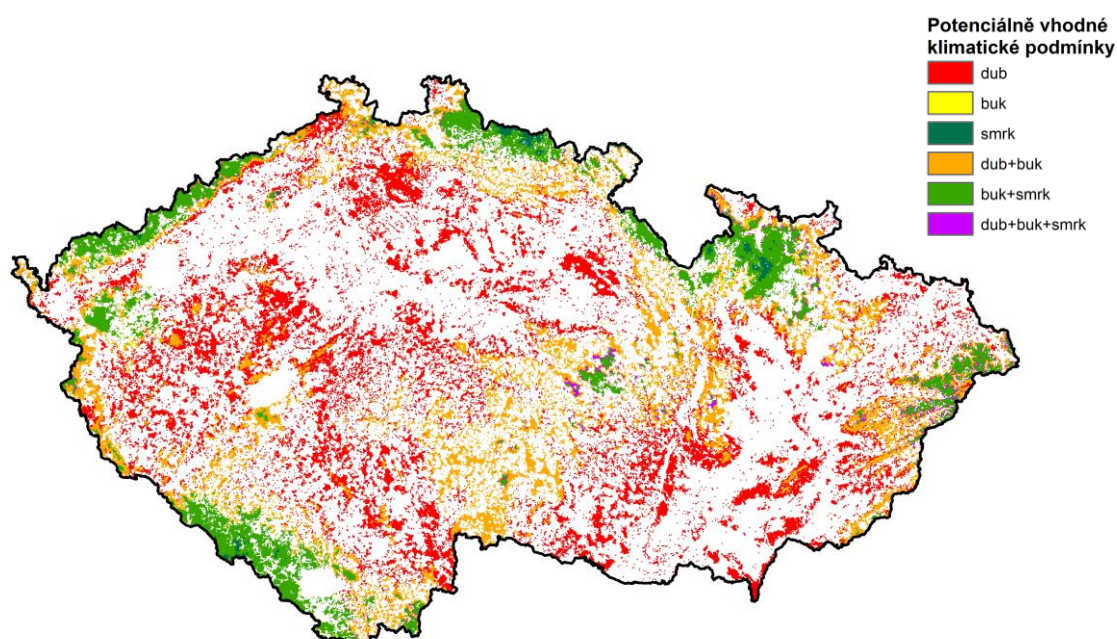
Obr. 24 Podmínky pro pěstování smrku pro období 2041–2060 (GCM IPSL)

Modelování podmínek pro pěstování dřevin na základě vícerozměrné statistické analýzy

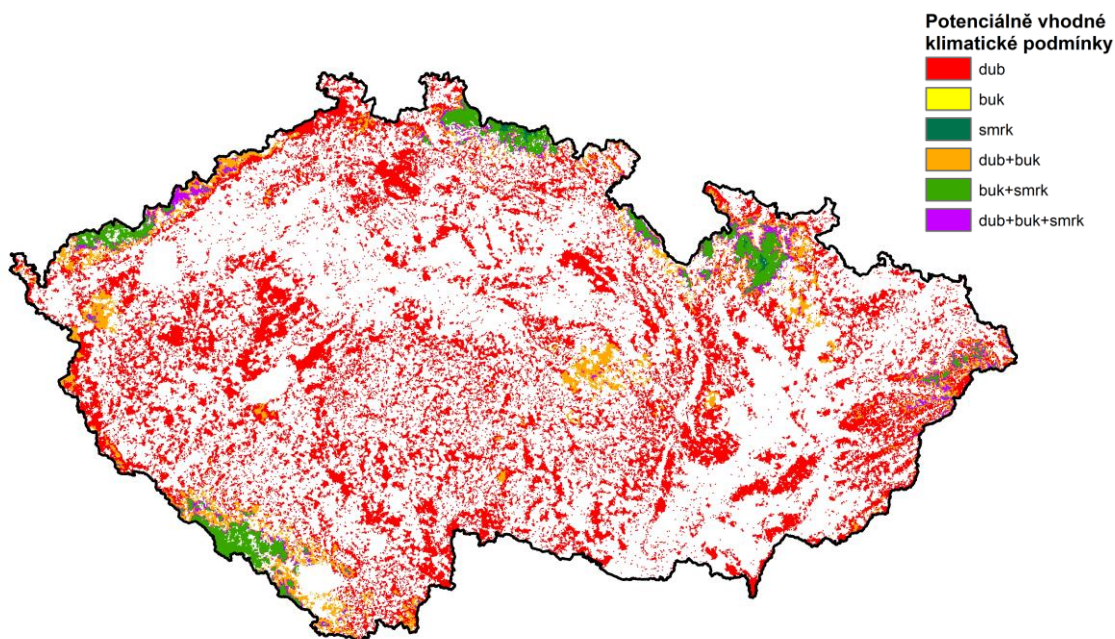
Vliv na výskyt určitého druhu dřeviny je dán celou škálou klimatických podmínek a jejich variabilitou v průběhu celého roku, nikoliv pouze ročními průměrnými hodnotami. Proto v dalším kroku byly modelovány optimální podmínky rozšíření dřevin s využitím vícerozměrné statistické analýzy (opět pomocí metody Random Forest), kdy vstupem byly veškeré nezávislé proměnné za období 1961–1990 vztažené k jednotlivým druhům dřevin. Výsledky byly následně aplikovány na další sledovaná období (obr. 25-28) podobně jako v případě LVS.



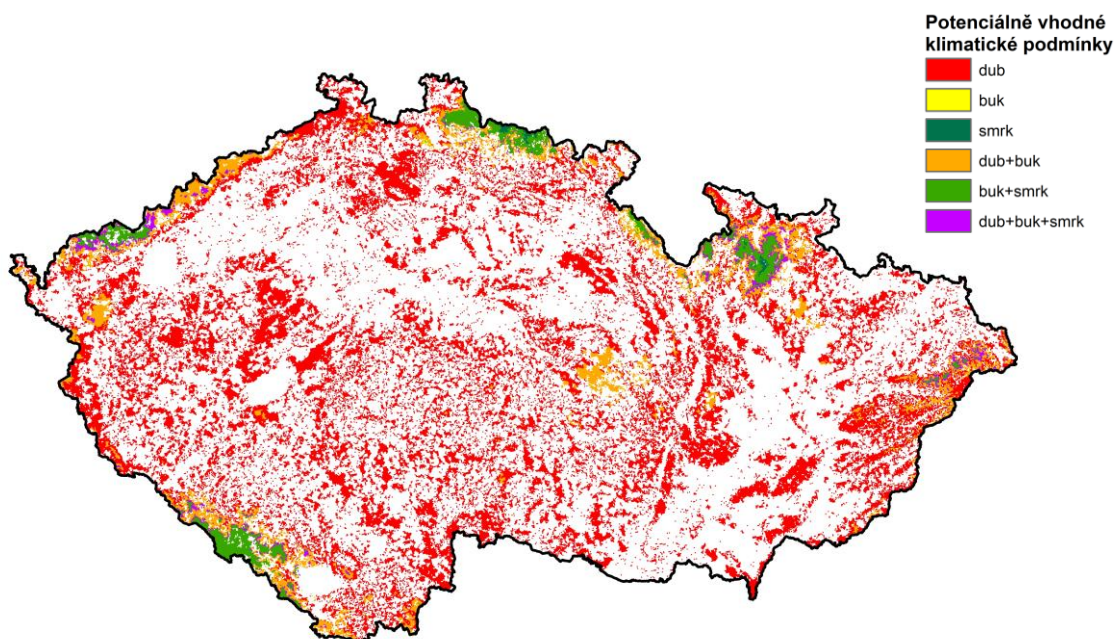
Obr. 25 Potenciálně vhodné klimatické podmínky pro pěstování dřevin 1961–1990 (data ČHMÚ)



Obr. 26 Potenciálně vhodné klimatické podmínky pro pěstování dřevin 1991–2014 (data ČHMÚ)



Obr. 27 Potenciálně vhodné klimatické podmínky pro pěstování dřevin 2021–2040 (GCM IPSL)



Obr. 28 Potenciálně vhodné klimatické podmínky pro pěstování dřevin 2041–2060 (GCM IPSL)

Výsledky vícerozměrné analýzy potvrzují očekávaný a v předchozích analýzách zjištěný trend úbytku oblastí vhodných pro pěstování smrku (z cca 37 % na cca 7 % PUPFL) s tím, že při kombinaci více klimatických proměnných pak pro období 2041–2060 dochází k velkému úbytku i oblastí klimaticky vhodných pro pěstování buku (z cca 43 % na cca 13 %), což může být dáno jednak zvýšením teplot, ale hlavně nepravidelností srážek a úbytkem srážek v jarním období (obr. 16–19). Naopak klimatické podmínky pro pěstování dubu budou dle klimatických modelů příznivé (vzestup z cca 20 % na 80 %).

Z celé škály klimatických proměnných byly jako významné pro rozšíření dubu identifikovány následující: průměrná roční teplota, průměrná teplota za vegetační období, počet dnů s teplotou vyšší než 10°C a dále pak počet dnů s Tmax nad 30°C. Úspěšnost predikce se pohybuje okolo 85 %.

V případě buku je hodnocení vlivu klimatických proměnných složitější vzhledem k jeho široké ekologické valenci. Pro úspěšné modelování bylo nutné brát v úvahu veškeré proměnné, přesto úspěšnost predikce byla pouze okolo 75 %.

Nejlepší výsledky pak byly dosaženy při modelování oblastí vhodných pro pěstování smrku (úspěšnost takřka 95 %), kdy jako nejvýznamnější proměnné byly určeny průměrná roční teplota vzduchu, dále pak teplota v jarních měsících od března do června, globální radiace v jarních měsících a dále pak počet dní s teplotou nad 10°C.

V případě vícerozměrné analýzy dat nebylo možné identifikovat oblasti, které by se natolik klimaticky výrazně odlišovaly od podmínek v období 1961–1990, že by „vypadly“ z nastavené škály – nelze tedy vymezit území, kde bude problematické udržet kteroukoliv z modelovaných dřevin.

Srovnání výsledků vícerozměrné analýzy u jednotlivých GCM

Pro modelování potenciálně vhodných klimatických podmínek pro pěstování dřevin byl použit model IPSL, který by měl nejlépe reprezentovat medián všech testovaných GCM. Při porovnání s dalšími dostupnými GCM nebyly pozorovány příliš velké změny v celkovém rozsahu rozšíření jednotlivých dřevin.

Již mezi obdobími 1961–1990 a 1991–2014 je vlivem změny klimatu možné pozorovat výraznou změnu v rozsahu rozšíření klimatických podmínek pro pěstování dřevin (viz tab. 2). Největší rozdíly se projevují v úbytku ploch vhodných pro pěstování smrku (pokles z 23,4 % pouze na 10,4 % území ČR, respektive pokles z 38,2 % na 21,8 % rozlohy lesů na PUPFL). Vlivem klimatu pak klesá také rozloha ploch vhodných pro pěstování buku (pokles z 60,1 % na 34,6 % území ČR, respektive z 78,5 % na 53,0 % rozlohy lesů na PUPFL) a naopak vzrostla rozloha oblastí vhodných pro pěstování dubu).

Tabulka 2. Podmínky pro pěstování dřevin – data ČHMÚ

Dřevina	Data ČHMÚ – celá ČR				Data ČHMÚ – pouze PUPFL			
	1961–1990		1991–2014		1961–1990		1991–2014	
	rozloha (ha)	%	rozloha (ha)	%	rozloha (ha)	%	rozloha (ha)	%
DB	3 028 527,4	38,4	5126413,5	65,0	487 380,5	18,6	1 205 349,5	46,0
DB+BK	2 216 188,0	28,1	1829735,3	23,2	786 097,5	30,0	825 402,4	31,5
BK	796 565,8	10,1	110415,1	1,4	345 882,9	13,2	18 342,3	0,7
BK+SM	1 648 339,1	20,9	670377,2	8,5	872 568,2	33,3	497 861,8	19,0
SM	118 301,9	1,5	31547,2	0,4	75 989,4	2,9	26 203,3	1,0
DB+BK+SM	78 867,9	1,0	118301,9	1,5	52 406,5	2,0	47 165,9	1,8
DB celkem	5 323 583,3	67,5	7074450,6	89,7	1 325 884,5	50,6	2 077 917,7	79,3
BK celkem	4 739 960,8	60,1	2728829,3	34,6	2 056 955,1	78,5	1 388 772,3	53,0
SM celkem	1 845 508,9	23,4	820226,2	10,4	1 000 964,2	38,2	571 230,9	21,8

Pro období 2041–2060 GCM modely předpovídají výrazné zmenšení oblastí vhodných pro pěstování smrku až na 4–5 % území ČR (respektive 7–11 % rozlohy lesů na PUPFL), zmenšení oblastí vhodných pro pěstování buku na 6–20 % území ČR (respektive 15–35 % rozlohy lesů na PUPFL) a naopak výrazné zvětšení oblastí vhodných pro pěstování dubu na 96–98 % území ČR (respektive 91–96% rozlohy lesů na PUPFL), viz tab. 3 – 7. Jak již bylo zmíněno, rozsah území vhodného pro dub však může s narůstajícími teplotami být omezen naopak podmínkami, které budou limitní (příliš aridní) rovněž pro tuto dřevinu, ale doposud se na našem území nevyskytují a nebylo je tak možné modelovat. Rozšíření potenciálně vhodných klimatických podmínek pro dřeviny vypočtené z jednotlivých GCM pro období 2021–2040 a 2021–2060 jsou v tabulkách 3–7.

Tabulka 3. Podmínky pro pěstování dřevin – GCM IPSL

Dřevina	IPSL – celá ČR				IPSL – pouze PUPFL			
	2021–2040		2041–2061		2021–2040		2041–2061	
	rozloha (ha)	%	rozloha (ha)	%	rozloha (ha)	%	rozloha (ha)	%
DB	7 011 356,3	88,9	7 137 545,0	90,5	2030751,9	77,5	2088399,0	79,7
DB+BK	520 528,1	6,6	512 641,4	6,5	298717,1	11,4	330161,0	12,6
BK	15 773,6	0,2	7 886,8	0,1	2620,3	0,1	2620,3	0,1
BK+SM	205 056,5	2,6	141 962,2	1,8	183422,8	7,0	131016,3	5,0
SM	7 886,8	0,1	7 886,8	0,1	7861,0	0,3	7861,0	0,3
DB+BK+SM	126 188,6	1,6	78 867,9	1,0	96952,0	3,7	60267,5	2,3
DB celkem	7 658 073,1	97,1	7 729 054,2	98,0	2426421,0	92,6	2478827,5	94,6
BK celkem	867 546,9	11,0	741 358,3	9,4	581712,2	22,2	524065,0	20,0
SM celkem	339 132,0	4,3	228 716,9	2,9	288235,8	11,0	199144,7	7,6

Tabulka 4. Podmínky pro pěstování dřevin – GCM BNU

Dřevina	BNU – celá ČR				BNU – pouze PUPFL			
	2021–2040		2041–2061		2021–2040		2041–2061	
	rozloha (ha)	%	rozloha (ha)	%	rozloha (ha)	%	rozloha (ha)	%
DB	6 995 582,7	88,7	7 145 431,7	90,6	2 038 612,9	77,8	2 096 260,0	80,0
DB+BK	481 094,2	6,1	449 547,0	5,7	256 791,9	9,8	285 615,4	10,9
BK	7 886,8	0,1	7 886,8	0,1	2620,3	0,1	5 240,7	0,2
BK+SM	205 056,5	2,6	134 075,4	1,7	175561,8	6,7	117 914,6	4,5
SM	7 886,8	0,1	7 886,8	0,1	7861,0	0,3	7 861,0	0,3
DB+BK+SM	189 283,0	2,4	141 962,2	1,8	138877,2	5,3	107 433,3	4,1
DB celkem	7665959,9	97,2	7736941,0	98,1	2434281,9	92,9	2489308,8	95,0
BK celkem	883320,5	11,2	733471,5	9,3	573851,2	21,9	516204,0	19,7
SM celkem	402226,3	5,1	283924,4	3,6	322300,0	12,3	233208,9	8,9

Tabulka 5. Podmínky pro pěstování dřevin – GCM CNMR

Dřevina	CNMR – celá ČR				CNMR – pouze PUFL			
	2021–2040		2041–2061		2021–2040		2041–2061	
	rozloha (ha)	%	rozloha (ha)	%	rozloha (ha)	%	rozloha (ha)	%
DB	6 561 809,3	83,2	6 680 111,1	84,7	1 831 607,2	69,9	1 847 329,1	70,5
DB+BK	938 528,0	11,9	938 528,0	11,9	482 139,8	18,4	545 027,6	20,8
BK	15 773,6	0,2	15 773,6	0,2	13 101,6	0,5	13 101,6	0,5
BK+SM	228 716,9	2,9	205 056,5	2,6	196 524,4	7,5	178 182,1	6,8
SM	15 773,6	0,2	15 773,6	0,2	10 481,3	0,4	10 481,3	0,4
DB+BK+SM	126 188,6	1,6	31 547,2	0,4	86 470,7	3,3	26 203,3	1,0
DB celkem	7 626 525,9	96,7	7 650 186,3	97,0	2 400 217,7	91,6	2 418 560,0	92,3
BK celkem	1 309 207,1	16,6	1 190 905,3	15,1	778 236,5	29,7	762 514,6	29,1
SM celkem	370 679,1	4,7	252 377,3	3,2	293 476,4	11,2	214 866,7	8,2

Tabulka 6. Podmínky pro pěstování dřevin – GCM Hadgem2

Model	Hadgem2 – celá ČR				Hadgem2 – pouze PUPFL			
	2021–2040		2041–2061		2021–2040		2041–2061	
	rozloha (ha)	%	rozloha (ha)	%	rozloha (ha)	%	rozloha (ha)	%
DB	7 192 752,5	91,2	7 350 488,3	93,2	2 132 944,6	81,4	2 222 035,6	84,8
DB+BK	362 792,3	4,6	323 358,4	4,1	214 866,7	8,2	212 246,3	8,1
BK	7 886,8	0,1	7 886,8	0,1	2 620,3	0,1	2 620,3	0,1
BK+SM	165 622,6	2,1	94 641,5	1,2	146 738,2	5,6	86 470,7	3,3
SM	7 886,8	0,1	7 886,8	0,1	7 861,0	0,3	7 861,0	0,3
DB+BK+SM	149 849,0	1,9	102 528,3	1,3	115 294,3	4,4	89 091,1	3,4
DB celkem	7 705 393,8	97,7	7 776 374,9	98,6	2 463 105,5	94,0	2 523 373,0	96,3
BK celkem	686 150,7	8,7	528 414,9	6,7	479 519,5	18,3	390 428,4	14,9
SM celkem	323 358,4	4,1	205 056,5	2,6	269 893,5	10,3	183 422,8	7,0

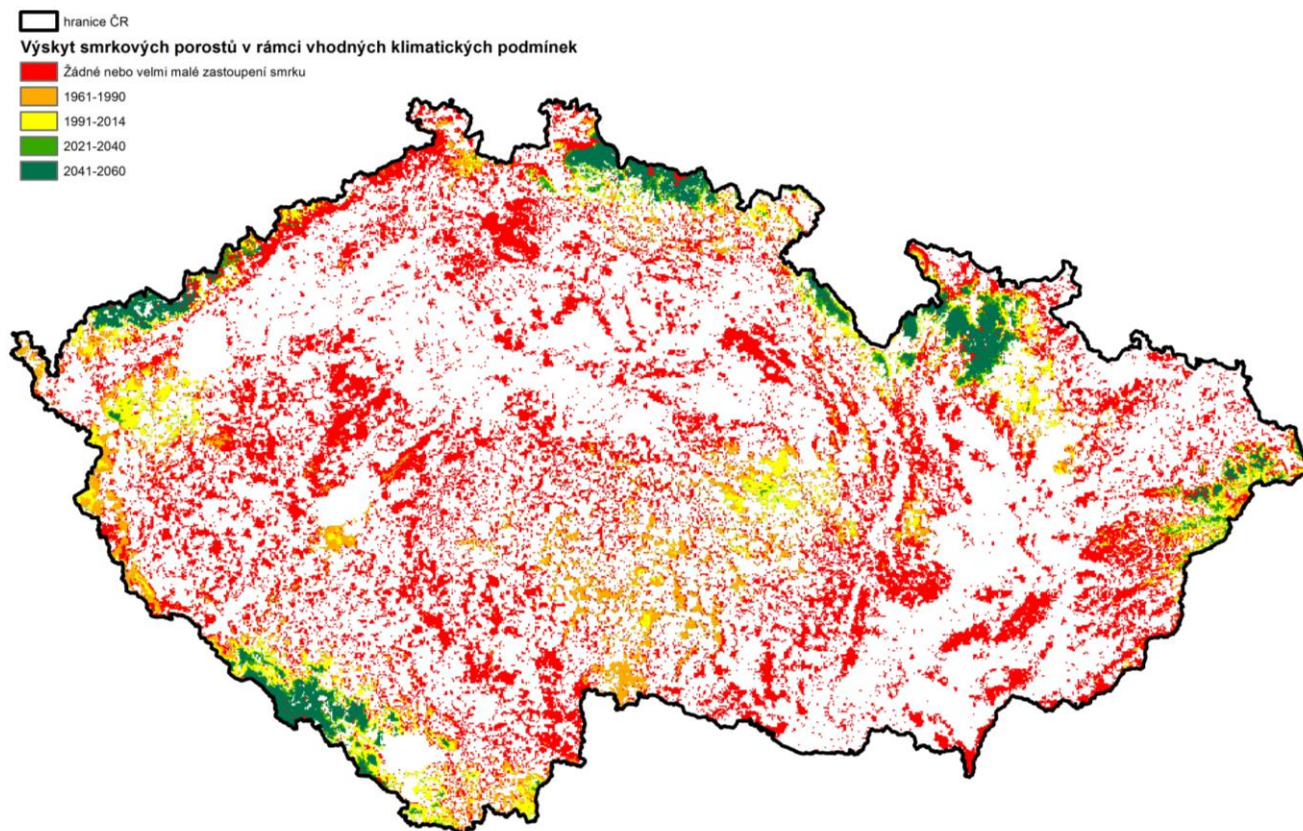
Tabulka 7. Podmínky pro pěstování dřevin – GCM MRI

Model	MRI – celá ČR				MRI – pouze PUPFL			
	2021–2040		2041–2061		2021–2040		2041–2061	
	rozloha (ha)	%	rozloha (ha)	%	rozloha (ha)	%	rozloha (ha)	%
DB	6 277 884,8	79,6	6 269 998,1	79,5	1 713 692,6	65,4	1 690 109,6	64,5
DB+BK	1 159 358,1	14,7	1 253 999,6	15,9	550 268,3	21,0	634 642,7	24,2
BK	7 886,8	0,1	39 434,0	0,5	2 620,3	0,1	23 582,9	0,9
BK+SM	291 811,2	3,7	236 603,7	3,0	243 690,2	9,3	201 765,0	7,7
SM	7 886,8	0,1	7 886,8	0,1	10 481,3	0,4	10 481,3	0,4
DB+BK+SM	141 962,2	1,8	78 867,9	1,0	99 572,4	3,8	60 267,5	2,3
DB celkem	7 579 205,2	96,1	7 602 865,6	96,4	2 363 533,2	90,2	2 385 019,8	91,0
BK celkem	1 601 018,4	20,3	1 608 905,2	20,4	896 151,2	34,2	920 258,1	35,1
SM celkem	441 660,2	5,6	323 358,4	4,1	353 743,9	13,5	272 513,8	10,4

Ze srovnání výsledků modelu IPSL se současným rozšířením smrkových porostů na území ČR vyplývá, že zatímco v letech 1961–1990 rostlo více jak 3/4 porostů s převahou smrku (se zastoupením nad 75 % smrku) v oblastech klimaticky vhodných pro jeho pěstování, v období 1991–2014 to již bylo pouze necelých 50 % a do poloviny století pak vhodné podmínky pro pěstování bude mít pouze 20 % současných porostů s převahou smrku. V případě lesních porostů se zastoupením smrku nad 40 %, bude situace ještě horší (viz. tab. 8, obr. 29).

Tab. 8 Podíl současných smrkových porostů rostoucích v klimaticky vhodných podmínkách

Vhodné klimatické podmínky (% rozlohy lesů v ČR)		
	zastoupení smrku nad 40%	nad 75%
1961–1990	53,9	75,5
1991–2014	31,8	48,7
2021–2040	16,2	27,2
2041–2060	11,4	20,4



Obr. 29 Výskyt současných smrkových porostů v rámci vhodných klimatických podmínek

ZÁVĚR

Prezentované mapy podmínek pro pěstování cílových hospodářských dřevin v rámci ČR nelze interpretovat tak, že v územích označených jako nevhodná území, jejich pěstování bude ale zcela zásadně podmíněno výběrem vhodných ekotypů, genotypů, proveniencí, vhodných porostních směrů, způsobu hospodaření, maximálním zohledněním aktuálních stanovištních poměrů a predikcí jejich vývoje. Prezentované mapy upozorňují na razanci probíhající a očekávané změny klimatu a s tím spojenou nutnost zapojení řady adaptačních opatření ke zmírnění následků globální klimatické změny. Výsledky těchto analýz jsou v současnosti potvrzovány chřadnutí smrkových porostů v řadě lokalit vlivem sucha během posledních let či vysokými nezdary zalesnění.

LITERATURA

- BREIMAN, L. (1996): Bagging predictors. *Machine Learning*, 24: 123–140.
- BREIMAN L. (2001): Random forests. *Machine Learning*, 45: 5–32.
- DE MARTONNE, E. (1926): Aréisme et indice aridité. *Comptes Rendus de L'Acad Sci, Paris*, 182: 1395–1398.
- HO, T. K. (1995): Random decision forest. *Proceedings of the 3rd International Conference on Document Analysis and Recognition*, August 14–18, Montreal, Canada: 278–282.
- KUPKA, I. (2002): Vliv možných klimatických změn na zastoupení dřevin v našich lesích. *Lesnická práce* 81(1).
- PLÍVA, K. 1991. Přírodní podmínky v lesním plánování. ÚHUL. Brandýs nad Labem.
- PLÍVA, K. 2000. Trvale udržitelné obhospodařování lesů podle souborů lesních typů. Ústav pro hospodářskou úpravu lesů, Brandýs nad Labem. 170 pp.
- RANDUŠKA, D., VOREL J., PLÍVA. K. (1986): *Fytocenológia a lesnícka typológia*. Bratislava. *Príroda*. 339 pp.
- ŠTĚPÁNEK, P., ZAHRADNÍČEK, P., SKALÁK, P. (2009): Data quality control and homogenization of air temperature and precipitation series in the area of the Czech Republic in the period 1961–2007. *Adv. Sci. Res.* 3, 23–26.
- ŠTĚPÁNEK, P., ZAHRADNÍČEK, P., HUTH, R. (2011): Interpolation techniques used for data quality control and calculation of technical series: an example of Central European daily time series. *Időjárás* 115(1–2): 87–98.
- VINŠ, B. et al. (1996): Dopady možné změny klimatu na lesy v České republice. *Národní klimatický program ČR*. Praha, ČHMÚ: 134.