

PROSTOROVÁ ANALÝZA DOPADŮ ZMĚNY KLIMATU NA VÝNOS PŠENICE OZIMÉ

Daniela Semerádová^{1,2}, Miroslav Trnka^{1,2}, Martin Dubrovský^{2,1} Zdeněk Žalud^{1,2}

¹Ústav agrosystémů a bioklimatologie, Zemědělská 1, MZLU Brno, 613 00 Brno,
zalud@mendelu.cz

²Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v.v.i. Boční II 1401, 141 31 Praha 4

Abstract:

It is obvious that production stability and quality would be influenced under changed climatic conditions and that these changes will be locally depended. In order to assess trends, magnitude and effect of climate change on yield of winter wheat we applied evaluated crop growth model CERES-Wheat. The experimental database was also used to verify whether the model correctly simulates differences in crop growth processes caused by varying farming techniques, climatic and soil conditions. In order to carry out spatial analysis for the whole Czech Republic, the model was run for all combinations of 125 weather stations using 394 characteristic soil profiles using special software package. The results were then interpolated into a 500 x 500 m grid matrix using ArcInfo GIS. The interpolation was from methodological reasons carried at first for the whole territory but then reanalyzed only for the grids on the arable land. The impacts of climate change were evaluated using combination of two emission scenarios (SRES - A2, SRES - B1), and three Global Circulation Models (GCMs - ECHAM, HadCM and NCAR) and two assumptions about the climate system sensitivities (low, high) to increased greenhouse gases. Two time periods (2020 and 2050) were taken in account. The magnitude of the observed change of the yield clearly depends to an extend on the scenario used and the reference time period because the differences between the individual scenarios are large. Impact of the changed weather conditions on the winter wheat yields (indirect = not including CO₂ fertilization effect) would lead to the yield depression, which would be the most severe in the lowland and midland sites. Generally the sites in the regions with presently low air temperatures would be the ones least affected by the indirect effect of climate change. The main reason for the yield reduction lays in temperature increase that besides shortening of the vegetation duration through speeding up the developmental processes also influences the respiration rates as well as assimilate partitioning. Lower amount of precipitation during some months is not sufficient to cover the increased evapotranspiration demand caused not only by the higher temperatures but in some GCMs also by increased solar radiation sums. Combination of the changed climatic conditions and increased CO₂ concentration on crop yields would lead to the inverse trend in the grain yields. If the fertilizing effect is not included the wheat would reach less 100 % of the present values while when the stimulating effect is accounted for yields might increase by as much as 15 % by 2050 in comparison with the present conditions.

Keywords: winter wheat, yield, climate change, GIS

1. Úvod

Mezi základní limitující faktory udržitelnosti ekosystémů patří z globálního pohledu variabilita a změna klimatu. Na rozdíl od řady publikovaných prací na přelomu století, které byly poznamenány „Principem předběžné opatrnosti“, tak jak byl definován v rámcové úmluvě o změně klimatu OSN z roku 1992, se současná vědecká komunita prakticky shoduje v

prokazatelném trendu v nárůstu teploty stejně jako v popisu jeho fyzikálních příčin. Změna klimatu se projevuje řadou dopadů v jednotlivých ekosystémech, které se však vyznačují různou resiliencí, odolností a schopností adaptace. Mezi přirozeně nejzranitelnější ekosystémy patří i agrosystémy, neboť se vyznačují relativně nízkou úrovní stability, vysokým příjmem dodatečné energie a z toho rezultující velmi nízkou vlastní adaptací na vnější

zásahy. Příspěvek se zabývá problematikou zkoumající vazby mezi změnou klimatu a pěstováním pšenice ozimé (*Triticum aestivum* L.). Výjimečnost této plodiny je v jejím zastoupení ve struktuře obilnin i plodin pěstovaných na orné půdě, kde jak v celosvětovém měřítku, tak i v rámci České republiky (ČR) je na prvním místě. Rozsahem svých ploch tak přímo ovlivňuje ekonomiku většiny zemědělských podniků. V ČR v osevu obilnin zaujímá pšenice okolo 38 %, podíl osevu na orné půdě je 30 % s celkovou výměrou kolísající kolem 800 000 ha. Pěstování pšenice je významně ovlivněno prostorovou variabilitou meteorologických prvků a změnou klimatu. Mezi prostředky jak posoudit klimatické dopady byly využity střednědobé experimenty s pšenicí z vybraných stanic Ústředního zkušebního ústavu zemědělského (ÚKZÚZ), růstový model CERES-Wheat, scénáře změny klimatu založené na Globálních cirkulačních modelech (GCM), dva emisní scénáře (tzv. A2 a B1) a vybrané moduly Geografických informačních systémů (GIS) umožňující provedení prostorové vizualizace a analýzy výsledků pro současné i očekávané klimatické podmínky ČR. Právě zvládnutí software GIS a jeho aplikace se v moderních způsobech hospodaření v oblasti plánování, hodnocení i vědeckých analýz v oblasti rostlinné produkce se stává v řadě zemí základem ekologických a ekonomických přístupů. Příspěvek je zaměřen na aplikace metod GIS pro zpracování a využití dat, které byly dlouhodobě sumarizovány na Ústavu agrosystémů a bioklimatologie na MZLU v Brně a získání nových informací o dopadech změny klimatu na růst a vývoj pšenice ozimé.

2. Materiál a metody

Podstatou provedení prostorové analýzy je bodová kalibrace a evaluace modelu CERES – Wheat. Pro kalibraci modelu je nutné, aby v něm byla obsažena nezbytná vstupní data. Základní skladba meteorolo-

gických veličin obsahuje: denní sumu globální radiace (MJ.m^{-2}), denní minimum a maximum teploty vzduchu ($^{\circ}\text{C}$) a denní úhrn srážek (mm). Výsledky lze zpřesnit dosazením hodnot napětí vodní páry v 7 00 hodin (kPa) a denní průměrnou rychlost větru (m.s^{-1}). Vstupní údaje pedologické pro model CERES - Wheat tvoří vybrané fyzikální, chemické a fyzikálně-chemické vlastnosti půdy. Fenologický vývoj i výnosotvorné prvky jsou vloženy do šesti (resp. sedmi genetických koeficientů) a nezbytnou součástí jsou data popisující agrotechniku pěstování pšenice.

Základní meteorologické údaje pro evaluaci růstového modelu pochází z naměřených hodnot stanic ČHMÚ, Státní rostlinolékařské správy (SRS) a Ústředního kontrolního zkušebního ústavu zemědělského (ÚKZUZ). Půdní data byla stanovena prostřednictvím půdních sond, fyziologická pomocí stanovení jednotlivých koeficientů pro odrůdu Hana a agrotechnická (s důrazem na termín setí, hnojení, výsevek, předplodinu) na základě detailních popisů jednotlivých polních experimentů.

Evaluace růstových modelů byla provedena porovnáním simulovaných hodnot evaluačních parametrů s pozorovanými hodnotami CERES-Wheat. Model byl evaluován na sedmi vybraných stanicích ÚKZUZ kde jsou umístěny pokusy ORO (ověřování registrace odrůd), které lze bezesporu označit jako nejkvalitnější pokusy z pohledu vedení porostů v celé ČR. Konkrétní lokality byly zvoleny tak, aby prostorově pokryly celé území státu, a tím se zachytily očekávané změny dopady klimatu v různých klimaticko-půdních podmínkách. Detailní metodika a výsledky evaluace modelu je uvedena v práci TRNKA *et al.* 2004.

2.1. Příprava databáze pro prostorovou analýzu

Na rozdíl od bodové analýzy (např. evaluace modelu na konkrétní lokalitě) vyžaduje vyjádření prostoru nejen lokální údaje, ale i údaje plošné (např. BLACKMORE *et al.* 2003). Nalezení vhodného způsobu a propojení s geografickými daty dává výstupům další (prostorový) rozměr a bývá často klíčem k nalezení nových vazeb mezi informacemi, jež jinak nelze postihnout. Pro zpracování prostorové analýzy dopadů změny klimatu na výnos pšenice ozimé byla všechna potřebná data převedena do gridového vektorového formátu o rozlišení 500 x 500 m pro celé území ČR.

Většina nutných vstupních (např. meteorologické údaje, půdní charakteristiky, geografické údaje), ale i výstupních (např. výnos) dat má charakter spojitě se měnící veličiny, proto rozdělení prostoru do pravidelné sítě buněk (gridový model) je vhodným přístupem správy těchto dat v GIS. Rastrový formát dat, který se nabízí svou podstatou uložením dat pomocí sítě buněk, však pro kódování polohy využívá seřazení buněk do řádků a sloupců a atributové informace jsou zpravidla uchovávány ve více tematických vrstvách. Pokud by však každá buňka sítě byla polohově určena souřadnicemi (vztahujícími se ke středu buňky) a opatřena identifikátorem, který umožňuje propojovat libovolné popisné informace do nových tabulek, došlo by ke spojení výhod obou datových přístupů GIS (vektorového a rastrového), a navíc by taková datová struktura mohla být využita i v prostředí jiného softwarového nástroje. Tento formát se označuje jako vektorový grid a byl použit pro správu celé databáze.

2.2. Gridová vektorová síť

Samotná matrice pro prostorovou analýzu vznikla pokrytím ČR gridovou sítí 500 x 500 m. Cílem bylo vytvořit syntetic-

kou vrstvu základních klimatických a pedologických dat, spjatých s geografickou informací, která by sloužila jako vstup pro další aplikace a využití.

Každé buňce v gridové síti ČR byla v prvním kroku přiřazena nadmořská výška. Jako výchozí data pro nadmořskou výšku byl použit rastrový formát digitálního modelu terénu, pořízený v rámci projektu The Shuttle Radar Topography Mission (STMR), upravený firmou ArcData. Rastr je v prostorovém rozlišení 3 úhlové vteřiny, tedy přibližně 90 x 60 m s udávanou přesností 12 metrů ve výšce. Tento rastr byl v prostředí ArcInfo – Spatial Analyst převzorkován na rozlišení 500 x 500 m s důrazem na přesný překryv buněk rastrové a gridové vektorové sítě a informace přeneseny z rastru do gridové matrice.

2.3. Půdní data v rámci ČR

Dalším krokem byla syntéza geografických dat s půdní databází. Využita byla pedologická databáze Komplexního průzkumu půd - KPP (původně 1226 půdních sond) a digitální polygonová vrstva půdních typů 1:1 000 000 (TOMÁŠEK, 1995; Česká geologická služba, 2000). Databáze obsahují informaci nejen o půdním typu, subtypu, varietě, ale také o půdním druhu, základních hydrolimitech apod. Další potřebné informace bylo možné na základě uvedených databází dopočítat, jako např. maximální množství využitelné vody v půdním profilu.

Nejprve byla do gridové matrice integrována informace z polygonové vrstvy o prostorovém rozmístění půdních typů. Další pedologické údaje byly doplněny informacemi z KPP. Bodová databáze KPP původních 1226 sond byla analyzována jednak vzhledem ke správnosti uvedených geografických souřadnic, tak i kompletnosti dat nutných pro sestavení vstupních půdních souborů pro CERES-Wheat. Z 835 sond s ověřenou kvalitou všech zá-

znamů bylo následně vybráno 394 reprezentativních sond (průměrná vzdálenost k nejbližšímu sousedovi 6350 m), ze kterých byla sestavena základní vstupní databáze půdních charakteristik pro simulační růstový model. Gridovým buňkám matrice, obsahujícími již půdní typ z výše popsané polygonové vrstvy, byly detailní půdní vlastnosti těchto 394 sond KPP přiřazeny metodou nejkratší vzdálenosti v případě shody půdního typu. V případě neshody byly sondy přiřazovány ručně. Tím bylo dosaženo prostorové lokalizace vstupních půdních souborů *.sol pro CERES-Wheat, které byly využity pro simulaci na daném půdním typu resp. subtypu.

2.4. Klimatická data v rámci ČR

Následně byla do gridové sítě buněk 500x500 m vložena klimatologická data z období 1961 – 2000 popisující teplotní a srážkové poměry ČR. Údaje průměrné roční teploty a průměrného ročního úhrnu srážek vychází z 234 stanic ČHMÚ (s rozmístěním charakteru náhodné distribuce; průměrná vzdálenost k nejbližšímu sousedovi 11000 m). K vytvoření spojitého povrchu z bodových měření byla použita interpolační metoda jednoduchého krigování, s využitím závislosti obou veličin na nadmořské výšce (Simple Cokriging).

Krigování je definováno jako nejlepší (= minimalizace rozptylu) nestranný (= průměrná chyba je rovna nule) lineární (= lineární kombinace vstupních hodnot) odhad. Je to lokální interpolátor, který aplikuje stejnou interpolační funkci opakovaně na malou část měřených dat, na okolí interpolovaného bodu. Navíc umožňuje optimalizovat výběr bodů okolí, ze kterých je nová hodnota odhadována. K této optimalizaci se provádí tzv. strukturální analýza. Ta vychází z předpokladu, že změna sledované náhodné proměnné je závislá pouze na vzdálenosti mezi dvěma místy, přičemž lze očekávat, že blízké objekty si jsou více podobné než objekty vzdálenější (jev pro-

storové autokorelace). Vynesením této závislosti do grafu získáme tzv. experimentální semivariogram (na ose x vzdálenost mezi jednotlivými body, na ose y čtverec vzájemných odchylek hodnot interpolované proměnné pro všechny dvojice bodů). Je to strukturální funkce, která je mírou prostorové autokorelace. Experimentální semivariogram je následně aproximován a proložen nejhodnější teoretickou funkcí.

Prostředí ArcGIS umožňuje výsledný interpolovaný povrch exportovat do sítě buněk rastrového formátu v požadovaném rozlišení, v tomto případě v souladu s rozlišením gridové matrice 500 x 500m. Překryvem s vektorovou sítí buněk byla gridová matrice doplněna o údaje průměrné roční teploty a průměrného ročního úhrnu srážek za období 1961 – 2000.

Pro simulace modelem CERES-Wheat jsou však potřeba podrobnější údaje v denním kroku (maximální a minimální teplota vzduchu, denní úhrn srážek, globální radiace). Tato data byla zpracována pro období 1961 – 2000 a vycházela ze 125 stanic ČHMÚ. V případě, že stanice nebyla vybavena pyranometrem, byly použity údaje skutečné doby slunečního svitu a přepočteny pomocí Angstroemovy metody. Pro větší reprezentativnost výsledků a především pro srovnatelnost výsledků simulací se simulacemi pro změněné klima bylo pro každou stanicí připraveno stochastickým generátorem meteorologických dat Met&Roll (DUBROVSKÝ, 1997) 99 souborů (ročníků) *.wth. Parametry generátoru byly odvozeny právě od zmíněné pozorované čtyřicetileté řady.

2.5. Landuse a správní jednotky

Výchozím předpokladem byla i možnost prostorových analýz vzhledem ke krajinnému krytu a proto byla do gridové sítě buněk zanesena rovněž informace landuse. Použita byla volně dostupná rastrová

vrstva databáze Corine Land Cover (CLC2000) 100m – verze 8/2005 (EEA, 2005). Tato databáze je výsledkem programu Corine (COoRdination of INformation on the Environment), který byl vytvořen Evropskou komisí s cílem shromáždění, koordinace a zajištění kvalitních informací o životním prostředí a přírodních zdrojích srovnatelných v rámci států Evropy. Databáze landuse byla vytvořena interpretací snímků z družice Landsat a klasifikací do 44 tříd, z nichž se na území ČR vyskytuje 28. Projekt převzala Evropská agentura životního prostředí (EEA) a probíhá neustále v rámci nových projektů aktualizace a identifikace změn CLC. Pomocí nadstavby ArcGIS Spatial Analyst byla základní vrstva CLC2000 s rozlišením 100 m převzorkována na požadované rozlišení 500 m a překryta s gridovou maticí.

2.6. Scénáře změny klimatu

Zdrojem dat pro vytvoření scénářů změny klimatu jsou tzv. globální cirkulační modely (GCM), jejichž výstupy jsou měsíční řady jednotlivých meteorologických prvků pro změněné klima (nejčastěji rok 2020 resp. 2025, 2050, 2100). Data GCM jsou prostřednictvím datového centra IPCC zveřejňovány na webové stránce <http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk> jako údaje měsíční. Samotné scénáře změny klimatu, které se skládají ze změn měsíčních průměrů klimatických charakteristik (aditivní změny pro teploty, multiplikační změny pro srážky), byly odvozeny metodou „pattern scaling“ (např. Dubrovský et al., 2005). Pro růstový model CERES-Wheat bylo nutné pomocí stochastického generátoru meteorologických dat (Dubrovský et al., 1996) připravit údaje denní.

I vzhledem k nejistotám v projekcích budoucího klimatu byla pro analýzu v prostoru použita sada scénářů změny klimatu, která kombinuje standardizované scénáře ze tří modelů GCM (model HadCM verze 3, který je při studiu dopadů

změny klimatu nejčastěji používaným modelem na světě, model ECHAM verze 5, a model NCAR - DOE-PCM), které již dlouhá léta patří mezi nejpoužívanější modely v Evropě i v České republice a dva odhady změny globální teploty (Tab. 1). „Nízký“ odhad vychází z předpokladu optimistického emisního scénáře SRES - B1 a nízké klimatické citlivosti (tj. rovnovážné změně globální teploty při zdvojnásobení koncentrace CO₂) vyjádřené hodnotou low 1,5 °C. „Horní“ odhad vychází z předpokladu pesimistického emisního scénáře SRES - A2 a vysoké klimatické citlivosti (vyjádřené hodnotou high 4,5 °C). Z výstupů každého modelu byly vytvořeny 4 kombinace (použity mezní hodnoty scénářů) změn průměrných měsíčních hodnot denní amplitudy teploty vzduchu, atmosférických srážek, globálního záření, denní minimální teploty vzduchu, průměrné denní teploty vzduchu, denní maximální teploty vzduchu, tlaku par a rychlosti větru pro časové horizonty roku 2020 a 2050 (Obr. 1 a 2). Je nutné podotknout, že scénáře neuvažují přirozené kolísání klimatu, přičemž příspěvky přirozené a antropogenní variability klimatu se mohou vzájemně kompenzovat, případně sčítat.

Za účelem přípravy meteorologických řad pro očekávané klima je nutné znát odhady vývoje emisí CO₂ (zvoleny byly SRES - A2 = pesimistický vývoj a SRES - B1 = optimistický vývoj) a následně měsíční změny průměrných klimatických údajů podle příslušného scénáře změny klimatu tak, aby co nejvěrněji kopírovaly obraz předpokládaných denních hodnot meteorologických prvků pro změněné klima v daných časových horizontech. Použity byly hodnoty (Tab.2) počítány prostřednictvím MAGICC (Model for the Assessment of Greenhouse gas Induced Climate Change, Wigley, 1994).

Všechny modely vykazují v měsíčních hodnotách nárůst teploty vzduchu což je

v souladu i s výsledky ostatních GCM (DUBROVSKÝ *et al.*, 2005b). Většina modelů vykazuje pro území ČR přibližně stejné roční množství srážek, kdy se odchylky pohybují od -5 do + 5 %, ale současně jejich posun v rozdělení ve prospěch srážek zimních a jarních. Naopak pro měsíce červen až srpen lze očekávat srážkový pokles pro oba zvolené časové horizonty. Změna bude tedy jak kladná, tak i záporná, v závislosti na ročním období a zvoleném scénáři.

2.7. Odhad dopadů změny klimatu

Stanovení růstu a vývoje pro současné klima a posouzení dopadů změny klimatu vychází z metody (Obr. 3), kterou vyvinuli SEMENOV a PORTER (1995) a pro podmínky ČR upravili ŽALUD a DUBROVSKÝ (2002), dále testoval TRNKA *et al.*, (2004a,b). Vícenásobné simulace proběhly s klimatickými soubory ze 125 stanic ČHMÚ (pro každou stanicí bylo generováno 99 ročníků syntetickým meteorologických dat, parametry generátoru pro současné klima byly odvozeny z naměřených údajů na těchto stanicích pro období 1961 – 2000, pro změněné klima byly modifikovány dle příslušného scénáře změny klimatu) v kombinaci s 394 půdními soubory.

Pro podmínky změny klimatu byla analýza provedena stejně jako pro současné klima až na změnu meteorologických vstupních údajů. Ty byly pro růstový model CERES-Wheat odvozeny ze zmíněných tří klimatických scénářů ECHAM, HadCM a NCAR, podle emisních scénářů SRES - A2 a SRES - B1 a pro dva časové horizonty 2020 a 2050.

2.7.1. Výnosová studie

Na základě výsledků simulací byla stanovena hodnota výnosu limitovaného živinami a vodou, který lze charakterizovat jako výnos dosažitelný při dodržení agrotechnických zásad a při vyloučení negativního vlivu chorob a škůdců. Při využití

scénářů GCM a ponecháním koncentrace CO₂ na současné úrovni (350 ppm) je možné pomocí modelu CERES-Wheat stanovit dopad a vliv meteorologických prvků tzv. nepřímý vliv, naopak při zvýšení či zdvojnásobení jeho koncentrace v atmosféře je studován vliv přímý. Kombinovaný stav je očekávaná situace vzniklá spojením přímého a nepřímého vlivu. Pro území ČR byla primárně zpracována mapa rozložení výnosů pro současné klima. Tato datová vrstva je využita jako referenční pro stanovení diferencí v podmínkách změněného klimatu.

2.7.2. Lokalizace výstupů pro území ČR

Vstupní databáze, která byla připravena v gridu 500 x 500 m, nabízí možnost provést interpolace vstupních klimatických údajů, jejich hodnoty lokalizovat na úrovni jednotlivých gridů vektorové sítě (každý grid má jednoznačně definované klimatické a půdní parametry nutné pro vstup do růstového modelu) a nechat proběhnout simulace pro každý grid samostatně. Pro statistický korektní odhad pravděpodobnosti skutečného vývoje, je však nutné provést aspoň 99 opakování (ročníků) v rámci stochastického generátoru počasí. Takový postup by vyžadoval detailní odladění interpolační techniky, automatizaci, eventuelně jinou přímou integraci s generátorem. Z tohoto důvodu byla zvolena metodika, kdy simulace probíhá jako kombinace 125 klimatických a 394 půdních souborů (x 99 ročníků). Vybrané výstupy jsou pak zpětně vhodně zvolenou interpolační technikou svázány s polohovými atributy a graficky prezentovány.

Tímto postupem získává v podstatě každá klimatologická stanice 394 půdních atributů. Použitá interpolační technika pak posuzuje každý grid vektorové sítě, identifikuje jeho přiřazení k půdnímu typu a jedné z 394 půdních sond a vybere klima-

tologické stanice v okruhu 100m v kombinaci s tímto půdním souborem (resp. výsledky simulačních běhů pro tyto stanice a půdní soubory). Hodnotu vybraného výstupního parametru odhaduje pro tento grid metodou inverzní vzdálenosti. Všechny výnosové analýzy byly provedeny pro celé území ČR, bez ohledu na využití krajiny, a následně jen pro gridy obsahující ornou půdu.

3. Výsledky a diskuze

3.1. Nepřímý vliv změny klimatu na výnos

Nepřímý vliv zvýšené koncentrace CO₂ na vodou limitovaný výnos pro tři hodnocené GCM scénáře je prezentován v Tab. 3 a v porovnání se současným stavem (Obr. 4 a 5) pro rok 2050 na Obr. 6 až 9. U výnosu pšenice ozimé je patrný negativní vliv změněných klimatických podmínek (zejména vyšší stres suchem). Pokud byly použity scénáře HadCM a ECHAM (SRES - A2 i SRES - B1) došlo u ozimé pšenice k poklesu výnosu v celorepublikovém průměru o řádově desetiny procentního bodu. Simulace s použitím scénáře NCAR vedla dokonce ještě k negativnějším důsledkům. Tento pokles je pravděpodobně způsoben nárůstem srážek v měsících důležitých pro optimální setí (tzn. pozdní podzim). Vynucené pozdější setí pak vede k vývoji během období zvýšených teplot a nevyhnutelně tak dochází ke zkrácení trvání jednotlivých fenologických fází, což brání optimálnímu vývoji plodiny. Zároveň, ale platí, že změna setí (jako autonomní = přirozené, samovolné adaptační opatření) a rychlejší teplotně podmíněný vývoj umožní v naprosté většině sezón dokončení klíčových fenofází před obdobími v němž očekáváme dramatický pokles srážek spolu s nárůstem hodnot potenciální evapotranspirace.

3.2. Kombinovaný vliv změny klimatu na výnos

Kombinovaný vliv zvýšené koncentrace oxidu uhličitého naznačuje pozitivní trend vývoje výnosů v podmínkách změněného klimatu, i když velikost tohoto zvýšení závisí na použitém scénáři (Tab. 4, pro rok 2050 na Obr. 10 až 13). V případě ozimé pšenice se setkáváme s výrazným nárůstem až o 14 % okolo roku 2050 v případě SRES - B1 scénáře a s nárůstem přes 20 % v případě scénářů SRES - A2. Je zřejmé, že ozimá pšenice dokáže dobře využít měnících se klimatických podmínek k dosažení vyšší produkce. Obdobně GHAFARI *et al.*, (2002) konstatují, že změna klimatu povede pro přechodné střeoevropské klima k mírnému zvýšení výnosů ve srovnání s výnosy v současných klimatických podmínkách (VAN ITTERSUM *et al.*, 2003). Výsledky se však podle OLESENA *et al.*, (2007) výrazně liší podle použitých klimatických modelů a emisních SRES scénářů. Míra kombinovaného vlivu na území ČR je závislá i na klimatických a půdních podmínkách příslušného regionu. Výsledky na úrovni jednotlivých okresů ukazují, že největší relativní nárůst výnosů oproti současnosti bude soustředěn do oblastí, které mají příznivější půdní podmínky a současně jsou relativně dobře zásobeny srážkami (např. Kroměříž, Uherské Hradiště, Prostějov, Olomouc, Přerov, Brno-venkov apod.). Vyšší nárůst produktivity vyjádřený dosažitelnými výnosy v období mezi léty 2020-2050 je pak očekáván v oblasti Českomoravské vysočiny, severní Moravy a severních Čech, kde jsou právě suboptimální teplotní podmínky, ale více než dostatečné srážky a stále kvalitní půda. Obdobných výsledků bylo dosaženo i v rámci paralelní studie v několika oblastech v Rakousku (TRNKA *et al.*, 2008), kdy ozimé plodiny rovněž vykazují výrazně menší citlivost k negativním důsledkům změny klimatu, zatímco u jařin se v některých případech setkáváme dokonce s očekávaným poklesem produkce. Tyto

výsledky potvrzují závěry předcházejících prací ŽALUDA a DUBROVSKÉHO (2002) a TRNKY *et al.* (2004a,b) a poukazují na mimořádný význam autonomní adaptace. Většina předchozích analýz totiž autonomní adaptaci neuvažovala což vedlo k výraznému nadhodnocení nepřímého vlivu změny klimatu, protože hlavní část růstu rostlin byla směřována do období s výrazně negativní vodní bilancí. Naše analýzy ukazují na výrazné posuny termínu setí (a dalších operací) řádově až o dvacet dní v případě SRES - A2 a horizontu roku 2050. V kontextu Evropy je zvýšení výnosů pšenice ozimé nejvíce očekáváno v severní Evropě. Z řady studií (OLESEN *et al.*, 2006; AUDSLEY *et al.*, 2006) se průměrně výnos zvýší o 2 až 9 % procent pro rok 2020, 8 až 25 % pro rok 2050 a 10 až 30 % pro rok 2080.

4. Závěr

V centru praktického zemědělství v oblasti polní produkce je z ekonomického pohledu především hospodářský dopad změny klimatu, který byl přímo korelován s hodnotou skutečného a dosažitelného výnosu. Diference meteorologických prvků obsažené v použitých scénářích jsou zřetelně rozpoznatelné

Poděkování:

Příspěvek byl zpracován s podporou projektu „Dopady změny klimatu na růst a vývoj vybraných polních plodin“ (č. QG60051), který byl udělen Národní agenturou pro zemědělský výzkum. Autoři rovněž děkují Výzkumného záměru „Biologické a technologické aspekty udržitelnosti řízených ekosystémů a jejich adaptace na změnu klimatu“ uděleného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky (č. MSM6215648905).

5. Použitá literatura

- AUDSLEY, E., PEARN, KR., SIMOTA, C., COJOCARU, G. What can scenario modelling tell us about future European scale agricultural land use and what not? *Environ Sci Policy* 2006 vol 9, s. 148–162
Berry PM, Dawson TPTP
BLACKMORE B.S., GODWIN R. FOUNTAS S. The analysis of spatial and temporal trends in yield map data over six years, *Biosystems Engineering* 2003, Vol. 84 pp. 455–466.

v reakcích výnosu pšenice ozimé. Sušší a teplejší scénář vycházející z HadCM často nabízí zcela jiné varianty dopadů změny klimatu než scénáře založené na ECHAM či NCAR, které vykazují vyšší shodu změny teploty vzduchu a srážek. Současně je nutné si uvědomit, že otázky dopadů změny klimatu jsou v úzké korelaci nejen se změnou podnebí, ale i s pokroky dosaženými v oblasti šlechtění, agrotechniky či samotné změny ekonomických hospodářských poměrů či priorit státu. Zjištěné závěry naznačují, že hodnota dosažitelného výnosu se v podmínkách ČR bude ve většině kombinací klimatických a emisních scénářů pravděpodobně zvyšovat a současně existuje potenciál pro výrazný nárůst výnosů na základě kombinací kvalitnější agrotechniky, využití půdních i nových klimatických podmínek. Nicméně tyto pozitivní zprávy je nutné vnímat v perspektivě dalších jevů, ke kterým bude docházet a které nebyly předmětem předložené práce. Jedná se o např. změny infekčního tlaku jako důsledek rozšíření některých chorob a škůdců, či větší pravděpodobnost výskytu extrémních meteorologických událostí (především sucha), které mohou nepříznivě ovlivnit ekonomiku rostlinné výroby včetně pěstování pšenice ozimé.

- DUBROVSKÝ, M., BUCHTELE, J., ŽALUD Z. High-Frequency and Low-Frequency Variability in Stochastic Daily Weather Generator and Its Effect on Agricultural and Hydrologic Modelling. *Climatic Change* 2004, 63 (No.1-2), s.145-179
- DUBROVSKÝ, M., NEMEŠOVÁ, I., KALVOVÁ J. Uncertainties in climate change scenarios for the Czech Republic. *Climate Research* 2005, vol. 29, 139-156
- DUBROVSKÝ, M. Creating Daily Weather Series With Use of the Weather Generator. *Environmetrics*. 1997, no. 8, s. 409-424.
- DUBROVSKÝ, M. Met&Roll: the stochastic generator of daily weather series for the crop growth model. *Meteorological Bulletin*, 49, 97-105.
- GHAFFARI, A., COOK, H.F. LEE, H.C. Climate change and winter wheat management: A modelling scenario for South-Eastern England. *Clim. Change* 2002, vol: 55: 509-533.
- OLESEN, J.E., T.R. CARTER, C.H. DÍAZ-AMBRONA, S. FRONZEK, T. HEIDMANN, T. HICKLER, T. HOLT, M.I. MÍNGUEZ, P. MORALES, J. PALUTIKOV, M. QUEMADA, M. RUIZ-RAMOS, G. RUBÆK, F.SAU, B. SMITH, SYKES.M. Uncertainties in projected impacts of climate change on European agriculture and terrestrial ecosystems based on scenarios from regional climate models. *Climatic Change* (in press), 2007.
- OLESEN, J.E., CARTER, T.R., DIAZ-AMBRONA, C.H., FRONZEK, S., HEIDMANN, T., HICKLER, T., HOLT, T., MINGUEZ, M.I., MORALES, P., PALUTIKOF, J., QUEMADA, M., RUIZ-RAMOS, M., RUBÆK, G., SAU, F., SMITH, B., SYKES, M. Uncertainties in projected impacts of climate change on European agriculture and ecosystems based on scenarios from regional climate models. *Climatic Change* 2007, 81, 123-143.
- SEMENOV, M. A., PORTER, J. R. Climatic variability and the modeling of crop yields. *Agricultural and Forest Meteorology*. 1995, vol. 73, s. 265-283.
- TOMÁŠEK M: Atlas půd České republiky, ČGÚ, vyd. Praha, 1995. 36 s.
- TRNKA, M., DUBROVSKÝ, M., SEMERÁDOVÁ, D., ŽALUD, Z. Projections of uncertainties in climate change scenarios into expected winter wheat yields. *Theoretical and Applied Climatology*. 2004a, vol. 77, s. 229-249.
- TRNKA, M., DUBROVSKÝ, M., ŽALUD, Z. Climate change impact and adaptation strategies in spring barley production in the Czech Republic, *Climate Change*. 2004b, vol. 64, s. 227-255.
- TRNKA, M., HLAVINKA, P., DUBROVSKÝ, M., THALER, S., EITZINGER, J., SEMERÁDOVÁ, D., RISCHBECK, P., ŽALUD, Z., FORMAYER, H. Regional differences in the climate change impacts on the rainfed cereal production in the Central Europe - consequences, uncertainties and adaptation options. *Climate Change (submitted)*. 2008.
- VAN ITTERSUM, M. K., HOWDEN, S. M., ASSENG, S. Sensitivity of productivity and deep drainage of wheat cropping systems in a Mediterranean environment to changes in CO₂, temperature and precipitation. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2003, vol. 97, s. 255-273.
- WIGLEY, T. M. L. MAGICC (Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change): User's Guide and Scientific Reference Manual. National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, 1994.
- ŽALUD, Z., DUBROVSKÝ, M. Modelling climate change impacts on maize growth and development. *Theoretical and Applied Climatology*, 2002, vol. 72, no. 1-2, s. 85-102.

Tab. 1: Změny globální průměrné teploty (ΔT_G) pro dva emisní scénáře a tři časové periody. Změny jsou vztaženy k srovnávací periodě (1961-1990).

emisní scénář		2020	2050	2100
SRES - B1	CO ₂ (ppm)	420	467	548
	ΔT_G (°C)	+0.49	+0.76	+1.17
SRES - A2	CO ₂ (ppm)	438	535	826
	ΔT_G (°C)	+1.10	+2.08	+4.29

Tab. 2: Změna ročních hodnot teploty (aditivně) a srážek (procentuálně) do roku 2050 podle jedenácti nejfrekventovanějších GCM (zdroj: DUBROVSKÝ *et al.*, 2005b).

Rok Emisní scénář	Teplota (°C)				Srážky (mm)			
	2020		2050		2020		2050	
	B1	A2	B1	A2	B1	A2	B1	A2
UKMO - HadCM3	0,58	1,32	1,02	2,80	-0,5	-1,1	-0,8	-2,3
MPI - ECHAM5	0,48	1,10	0,86	2,34	0,2	0,3	0,3	0,7
NCAR - PCM	0,45	1,03	0,80	2,19	0,3	0,6	0,5	1,3

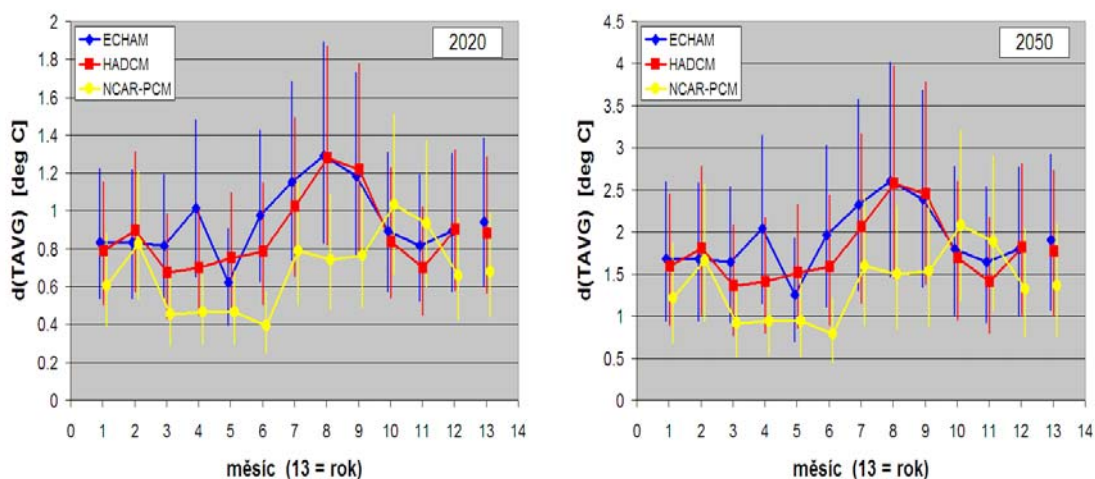
Tab. 3: Nepřímý vliv změněných klimatických podmínek na průměrný dosažitelný výnos na orné půdě v ČR pro pšenici ozimou. Výpočet zahrnuje všechny gridy orné půdy.

	GCM 1961- 2000	HadCM				ECHAM				NCAR			
		2020		2050		2020		2050		2020		2050	
		A2 high	B1 low	A2 high	B1 low	A2 high	B1 low	A2 high	B1 low	A2 high	B1 low	A2 high	B1 low
Výnos (kg/ha)	5370	5343	5287	5326	5287	5354	5354	5401	5354	5160	5237	5204	5161
Změna výnosu oproti současnosti (kg/ha)		-27	-82	-44	-82	-16	-16	31	-16	-210	-133	-165	-209
Změna výnosu oproti současnosti (%)		-0.5	-1.5	-0.8	-1.5	-0.3	-0.3	0.6	-0.3	-3.9	-2.5	-3.1	-3.9

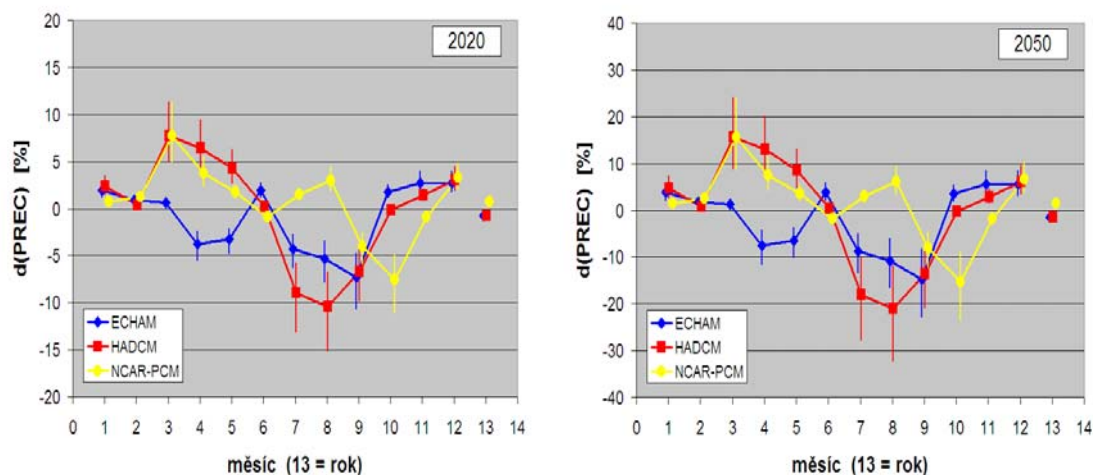
Tab.4: Kombinovaný vliv změněných klimatických podmínek na průměrný dosažitelný výnos na orné půdě v ČR pro pšenici ozimou.

	GCM 1961- 2000	HadCM				ECHAM				NCAR			
		2020		2050		2020		2050		2020		2050	
		A2 high	B1 low	A2 high	B1 low	A2 high	B1 low	A2 high	B1 low	A2 high	B1 low	A2 high	B1 low
Výnos (kg/ha)	5370	5746	5666	6663	6145	5751	5573	6528	6099	5765	5506	6408	5895
Změna výnosu oproti současnosti		377	296	1293	775	381	203	1158	730	395	136	1039	526

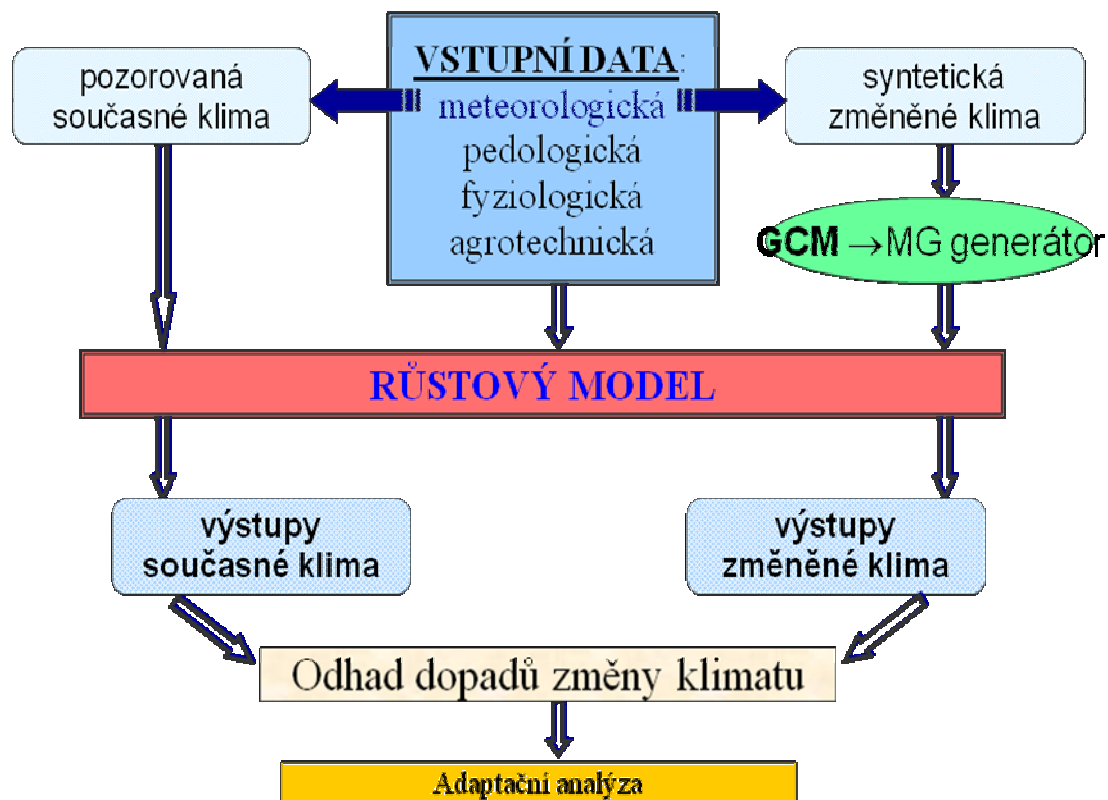
(kg/ha) Změna výnosu oproti současnosti (%)			7	6	24	14	7	4	22	14	7	3	19	10
--	--	--	---	---	----	----	---	---	----	----	---	---	----	----



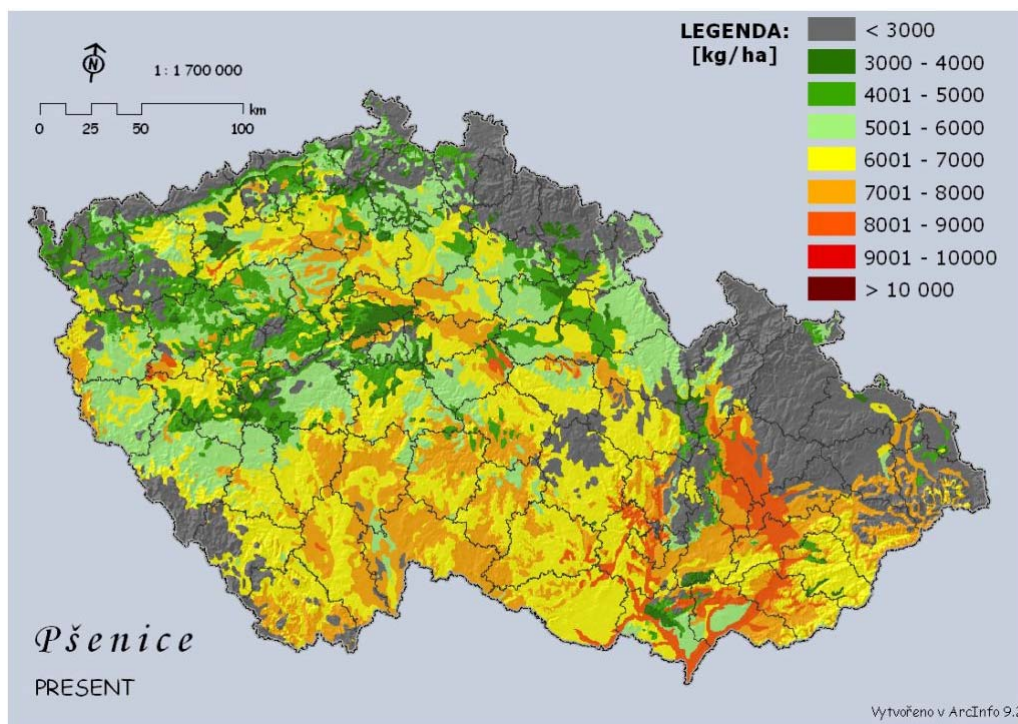
Obr. 1: Scénáře změny průměrné měsíční a roční teploty vzduchu pro rok 2020 a 2050 pro ČR podle modelů ECHAM, HadCM a NCAR. Křivky znázorňují střední odhad, svislé čáry vymezují rozsah hodnot odpovídající emisnímu scénáři SRES - B1, low - nízká citlivost (spodní úroveň) a SRES - A2, high - vysoká citlivost klimatického modelu (horní úroveň).



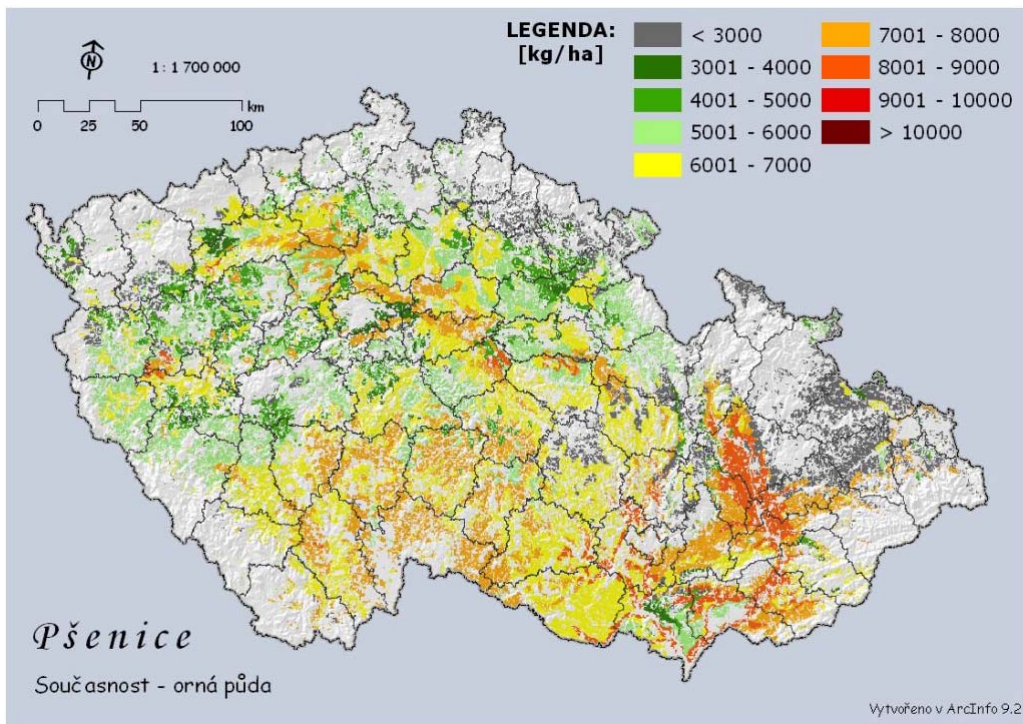
Obr. 2: Scénáře změny měsíčních a ročních srážkových úhrnů pro rok 2020 a 2050 pro ČR podle modelů ECHAM, HadCM a NCAR. Křivky znázorňují střední odhad, svislé čáry vymezují rozsah hodnot odpovídající emisnímu scénáři SRES - B1, low - nízká citlivost (spodní úroveň) a SRES - A2, high - vysoká citlivost klimatického modelu (horní úroveň).



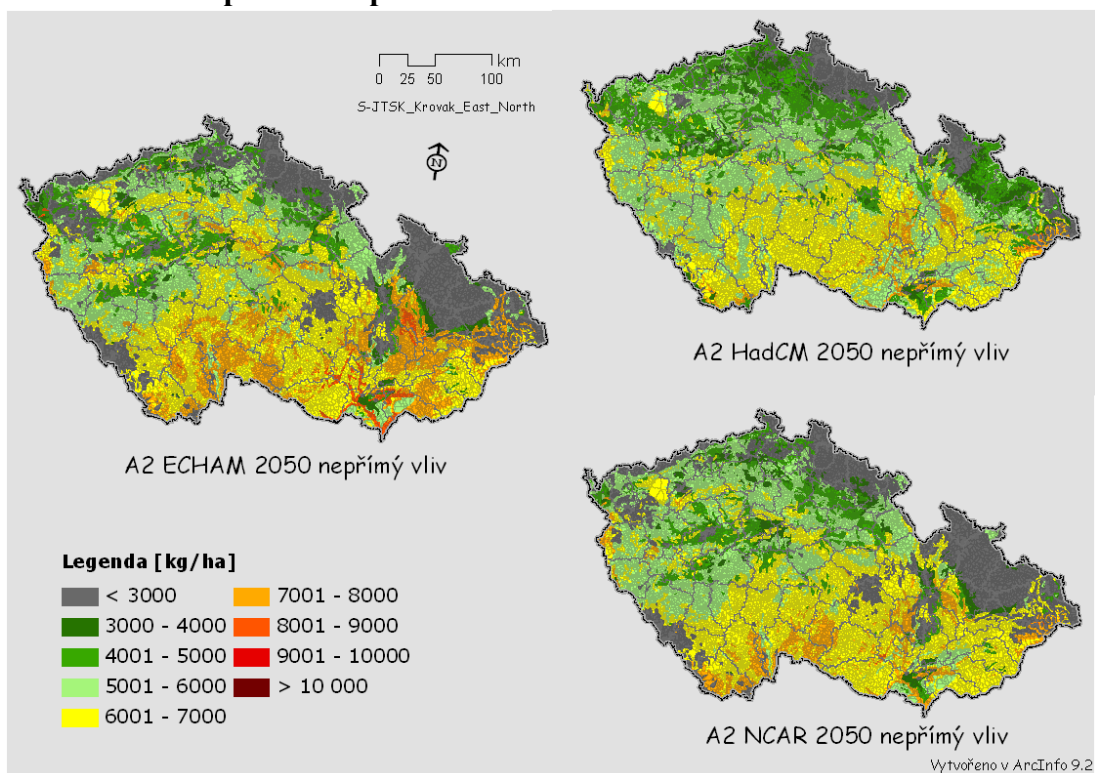
Obr. 3: Zjednodušené schéma využití růstových modelů při odhadu dopadů možné klimatické změny (SEMENOV a PORTER (1995) a pro podmínky ČR upravili ŽALUD a DUBROVSKÝ (2002)).



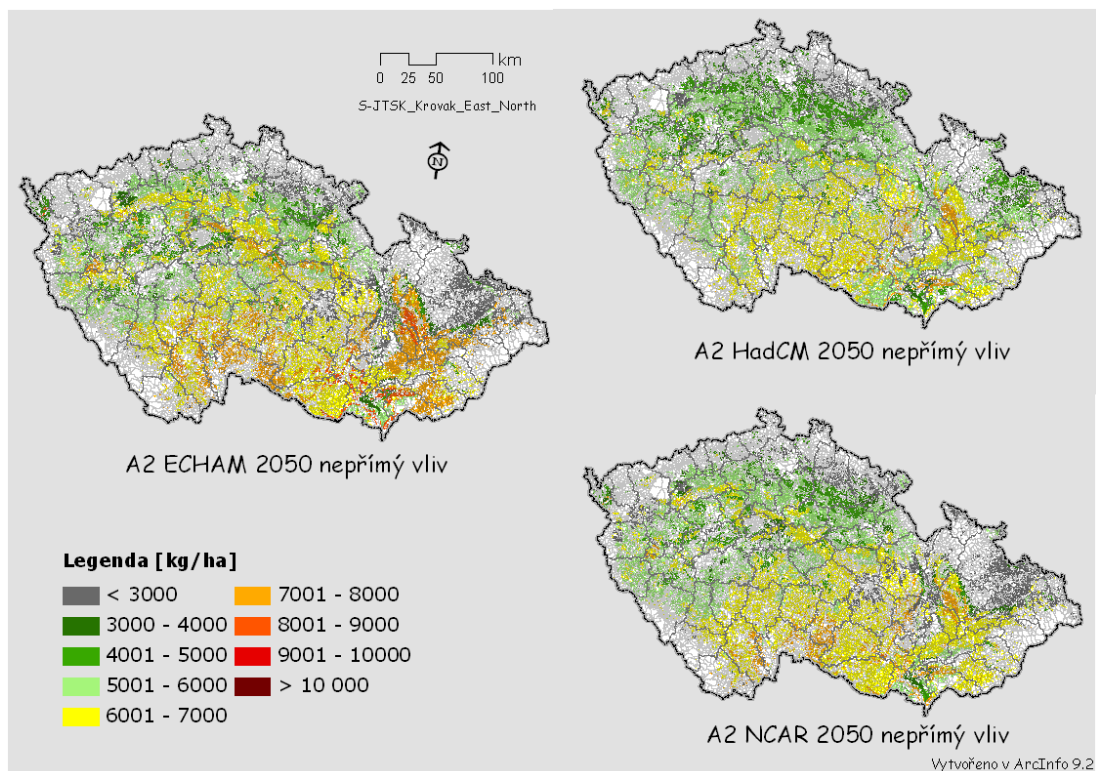
Obr. 4: Modelem CERES-Wheat simulovaný dosažitelný výnos (kg/ha) pšenice ozimé na území ČR pro současné klimatické podmínky. Jedná se o medián z 99 simulací pro každý grid o velikosti 500 x 500 m.



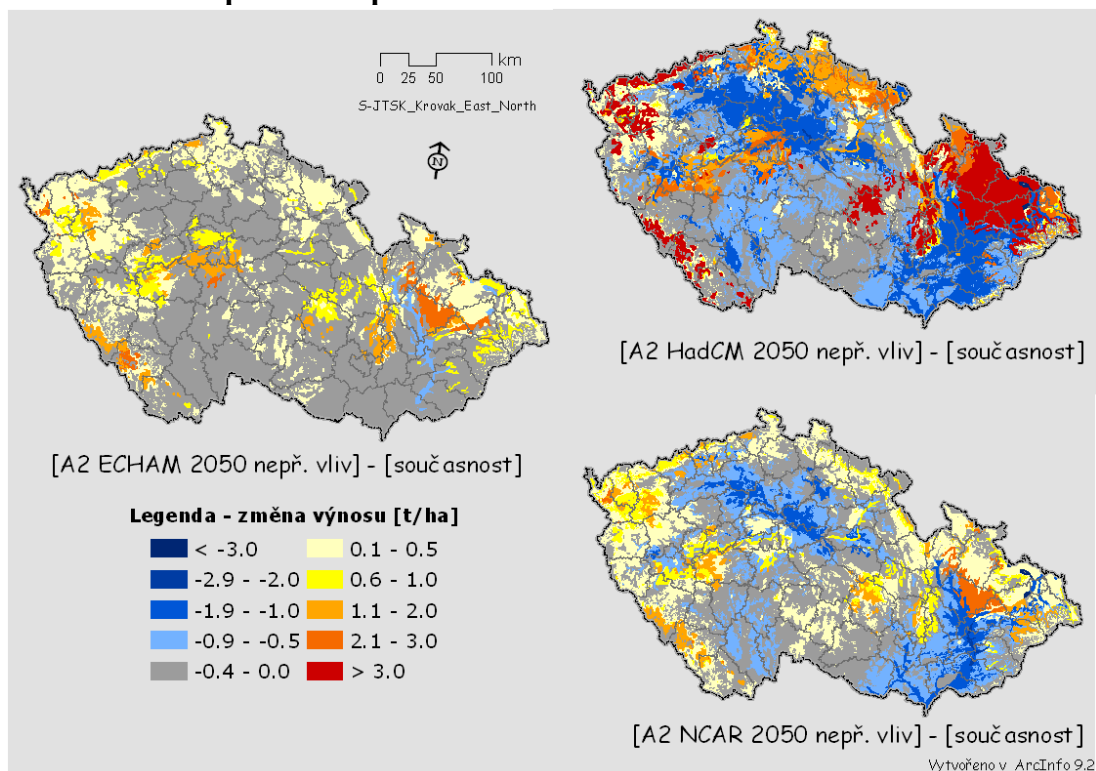
Obr. 5: Jako obr. 4 pro ornou půdu.



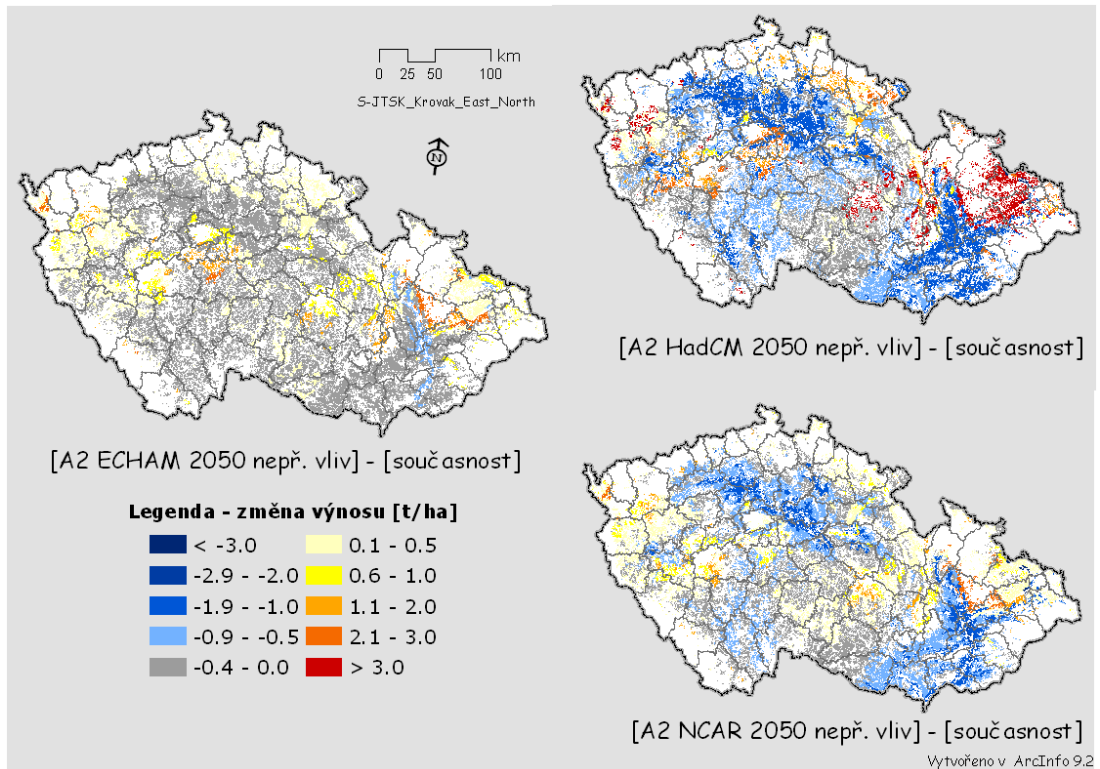
Obr. 6: Nepřímý vliv změny klimatu (pouze změna meteorologických prvků) na výnos pšenice ozimé oproti referenčnímu období (1961-2000) v kg/ha pro rok 2050, emisní scénář SRES - A2 a tři scénáře změny klimatu.



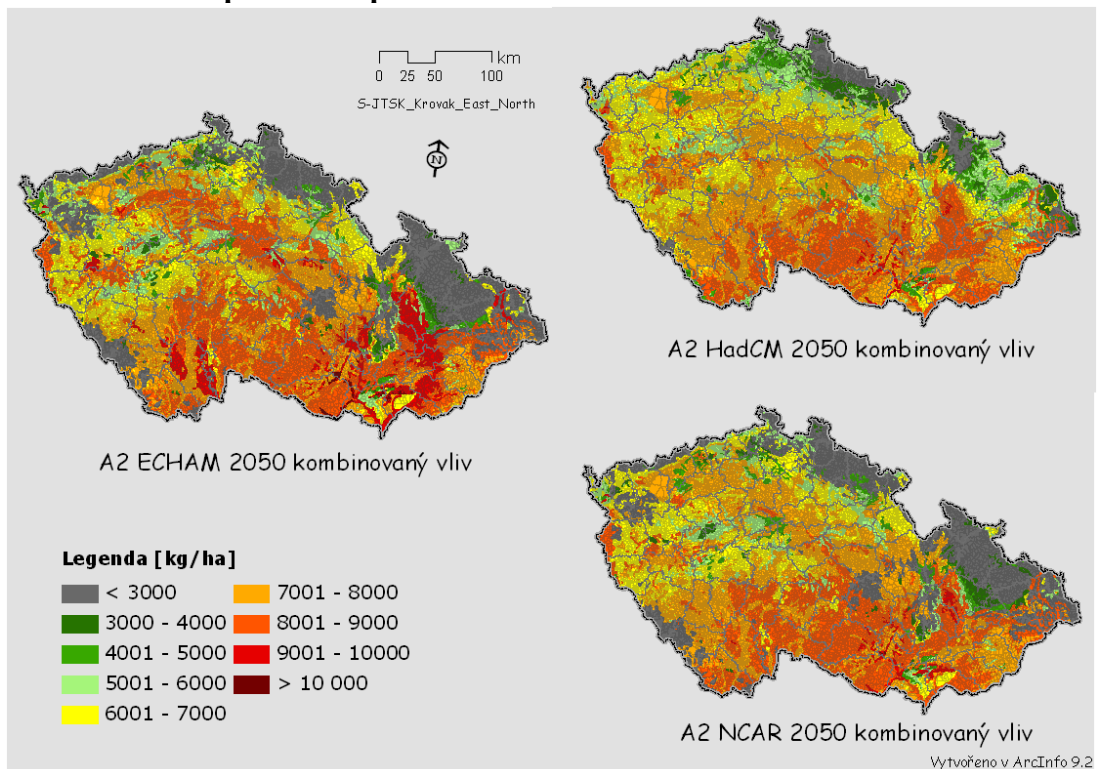
Obr. 7: Jako obr. 6 pro ornou půdu.



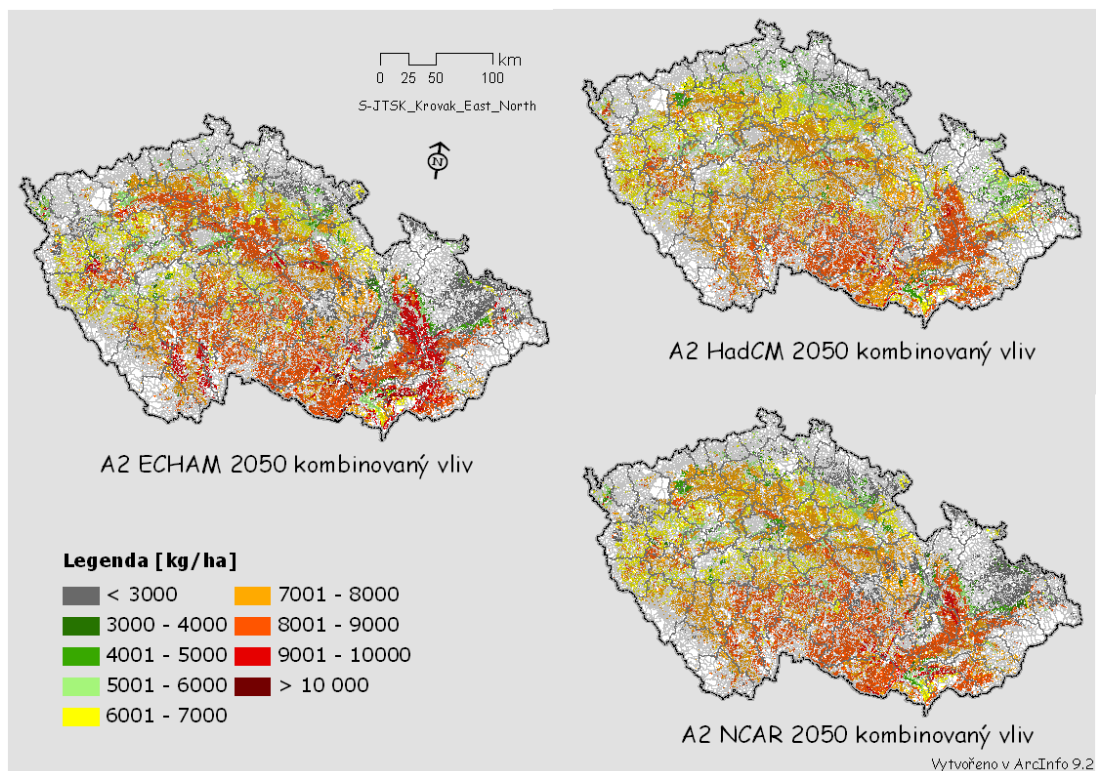
Obr. 8: Rozdíl mezi výnosovou hladinou pšenice ozimé v současném klimatu (1961-2000) a dopadem nepřímého vlivu v kg/ha pro rok 2050, emisní scénář SRES - A2 a tři scénáře změny klimatu.



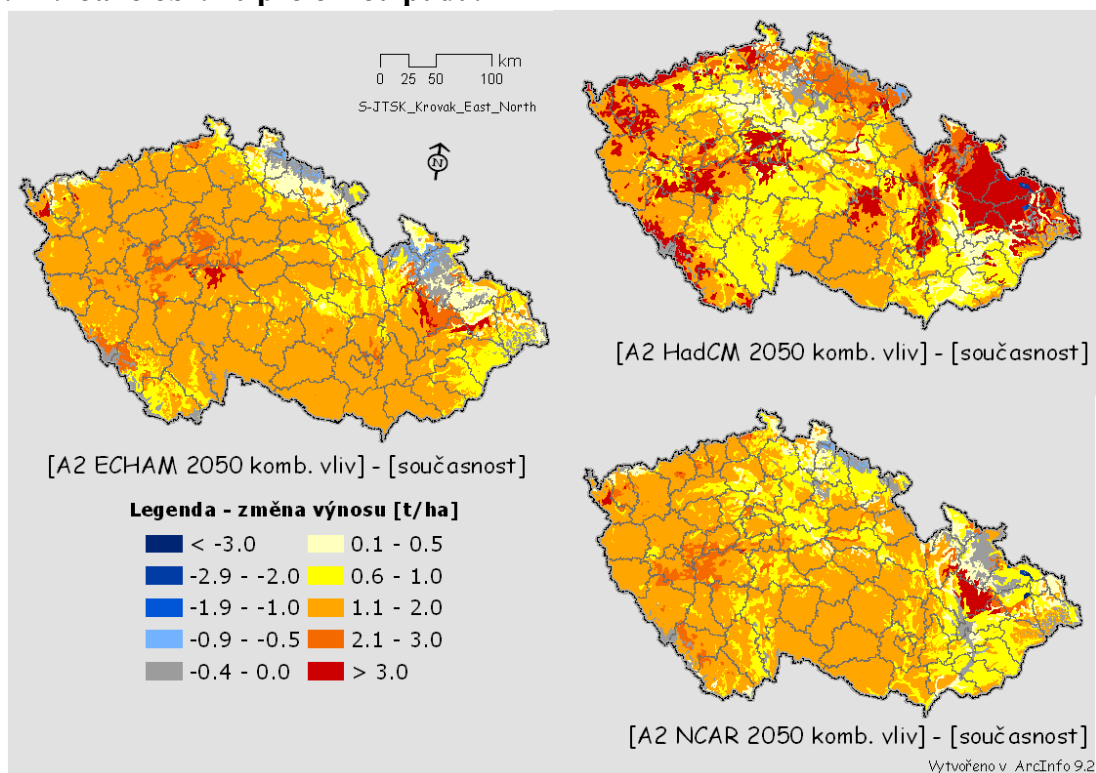
Obr. 9: Jako obr. 8 pro ornou půdu.



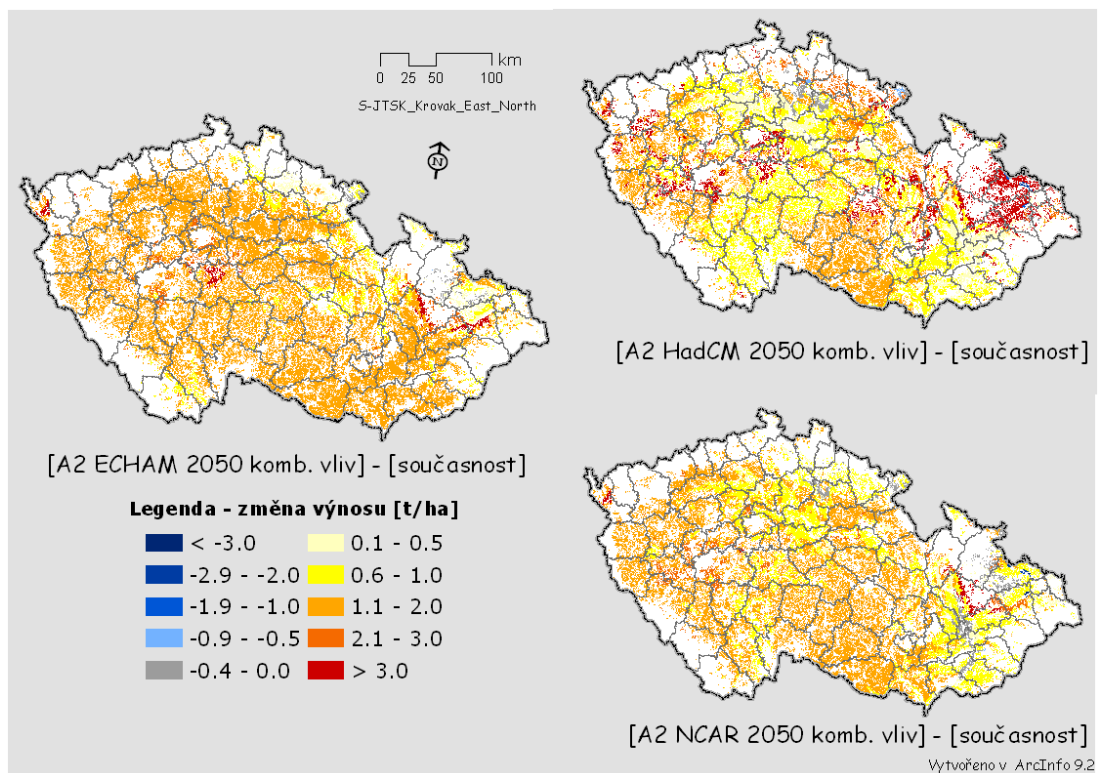
Obr. 10: Kombinovaný vliv změny klimatu na výnos pšenice ozimé oproti referenčnímu období (1961-2000) v kg/ha pro rok 2050, emisní scénář SRES - A2 a tři scénáře změny klimatu.



Obr. 11: Jako obr. 10 pro ornou půdu.



Obr. 12: Rozdíl mezi výnosovou hladinou pšenice ozimé v současném klimatu (1961-2000) v kg/ha a dopadem kombinovaného vlivu v kg/ha rok 2050, emisní scénář SRES - A2 a tři scénáře změny klimatu.



Obr. 13: Jako obr. 12 pro ornou půdu.