

SCÉNÁŘE ZMĚNY KLIMATU VE VZTAHU K VÝNOSU PŠENICE OZIMÉ

Z. Žalud

Došlo: 4. května 2004

Abstract

ŽALUD Z.: *Climate change scenarios related to the winter wheat yields*. Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun., 2004, LII, No. 4, pp. 125-136

Impact of climate change on winter wheat yields using crop growth model has been tested in this study. Simulated results show that: (1) Wheat yields tend in general to increase (40 out of 42 applied climate change scenarios) on most locations in range between 7.5–25.3% in all three time periods. In case of CCSR scenario that predicts the most severe increase of air temperature yields would be reduced by 9.6% in 2050 and by 25.8% if the A2 emission scenario would become reality. Differences between individual scenarios are large and statistically significant and especially for the more distant time periods may lead to doubts about the trend of the yield shifts. (2) Site effect upon the final quantity of climate change impact of winter wheat yield was caused mainly by site-specific differences in the present soil and climatic conditions. Specific importance of site increases with increasing severity of imposed climatic changes and culminates for emission scenario A2 and time period 2100. The sustained tendencies benefiting two warmest sites has been found as well as better response to the change climatic conditions of sites with deeper soil profiles than those with less suitable soil conditions.

crop model, emission scenario, phenology and yield evaluation, simulation

Koncentrace CO_2 v zemské atmosféře stoupla za posledních 200 let asi o 30 % z hodnoty 280 ppm až na 360 ppm (AMTHOR, 1998; HOUGHTON, 2001). Tato změna je dáвана do přímé souvislosti s oteplováním atmosféry Země a s ovlivněním časového a prostorového rozložení srážek a evaporace (např. HOUGHTON, 2001). V souladu s tímto tvrzením lze konstatovat během 20. století nárůst průměrné roční teploty vzduchu ve většině zemí Evropy až o 0,8 °C (BENISTON a TOL, 1998). Atmosférický CO_2 , který je primárním zdrojem uhlíku pro rostliny, je v současné koncentraci pod optimem pro C_3 rostliny (HALL, 1979) a jeho zvyšující obsah podpoří fotosyntézu, i když některé experimenty potvrzují vysokou variabilitu citlivosti plodin v různých fenologických fázích (např. MITCHELL et al., 1999). Současné

výšší koncentrace CO_2 umožňují vzhledem k aktivitě stomat redukovat transpiraci, což je experimentálně potvrzeno především v podmínkách vyšší teploty vzduchu (BUNCE, 2000). Celkový efekt může vést ke zlepšení hospodaření s vodou v rostlině a nižšímu výskytu stresu suchem (KIMBALL, 1983). Různé experimenty potvrdily u pšenice ozimé zvýšení nárůstu biomasy o 33±6 % (CURE a ACKOCK, 1986) v podmínkách dvojnásobné koncentrace CO_2 . Nedávná rozsáhlá studie 156 experimentů (AMTHOR, 2001) s pšenicí ozimou provedených v období 1976–2001, tuto teorii podporuje. Experimenty v kontrolovaném prostředí (laboratoře a skleníky) naznačily 12–14 % nárůst výnosu na 100 ppm CO_2 , zatímco v polních podmínkách nárůst činil pouze 8–8,6 %. Posouzení dlouhodobých dopadů těchto změn je poměrně slo-

žitě vzhledem k vývoji pěstitelských technologií nebo jen uvážení pokroku ve šlechtění (IZAURRALDE et al., 2003). Hlavní význam této a obdobných studií lze vidět v posouzení udržitelnosti současných technologií pro očekávané klimatické podmínky a pomoc při definování priorit v zemědělském výzkumu s cílem zmírnit případné negativní dopady a také opatřit informace pro tzv. „decision makers“ na národních a globálních úrovních. Většina nedávných studií věnujících se dopadům změny klimatu v Evropě konstatuje až více než 20% nárůst výnosů pro rok 2050. Příčiny lze spatřit především v tzv. fertilizačním efektu CO_2 (ALEXANDROV a HOOGENBOOM, 2000; HARRISON et al., 2000; TUBIELLO et al., 2000). Přesto pro jižní část Evropy dominují především efekty klimatické, často s výrazným poklesem výnosů (např. SMITH a LAZO, 2001; OLESEN a BINDI, 2002). Za předpokladu pěstování stejných odrůd je výnos ovlivněn především zvýšenou teplotou, vyvolávající zkrácení fenologických fází (BATTS et al., 1997; BROWN a ROSENBERG, 1997). Kromě změn teplotních průměrů lze však očekávat i významný posun ve variabilitě teploty s takovými důsledky, jako jsou chladná období na počátku vegetace či nástupy vln veder především v období zrání (FERRIS et al., 1998; WHEELER et al., 2000). Očekávaná zvýšená radiace podpoří fotosyntézu (WOLF a VAN DIEPEN, 1995) a tím vlastní produkci (BROWN a ROSENBERG, 1997; HALL, 2001). Na druhé straně oba tyto faktory zvýší intenzitu evapotranspirace, což může vzhledem ke stresu suchem vést k poklesu výnosů (TRNKA et al., 2001).

Experimenty posuzující dopady změny klimatu na růst a vývoj plodin jsou časově i přístrojově extrémně náročné. Vzhledem k prostorové variabilitě pokusů a nejistotám v měřeních v polních podmínkách jsou výsledky často značně rozdílné (WOLF et al., 2002). S ohledem na tyto skutečnosti jsou stále častěji využívány tzv. růstové modely, které jsou schopny simulovat jak dopady zvýšeného CO_2 , tak i změny jednotlivých meteorologických prvků na regionální úrovni navzdory jejich nedostatkům, které popsali TUBIELLO a EWERT (2002). Růstové modely jsou založeny většinou na denních řadách meteorologických prvků, což vedlo k vývoji několika metod jejich přípravy založených buď na přímé modifikaci skutečných měřených dat (ALEXANDROV a HOOGENBOOM, 2001), aplikaci analogových historických řad (EASTERLING et al., 1992) nebo modifikaci parametrů stochastického generátoru (SEMENOV a PORTER, 1995; ŽALUD a DUBROVSKÝ, 2002), které byly odvozeny z naměřených dat a modifikovány podle daného scénáře změny klimatu. Tyto scénáře založené na globálních cirkulačních modelech (GCM) jsou vyvíjeny na několika světových pracovištích a jejich výstupy jsou umístěny v rámci IPCC

(Intergovernmental Panel on Climate Change) serveru datového centra na <http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk>. Rozdíly mezi jednotlivými GCM lze vyjádřit jejich různými výstupy pro různé (lokální, regionální nebo kontinentální) plochy, zahrnutím různých emisních scénářů vývoje, či dopady na výnos plodin v jednotlivých časových periodách. Z tohoto pohledu představují růstové modely pouze jeden ze subsystémů integrovaný do široké metody posouzení dopadů změny klimatu. Cílem předkládané studie není jejich kontinuitní časové ani prostorové posouzení. Práce se zaměřuje na tři referenční období (2025, 2050 a 2100), na využití sedmi GCMs a dvou emisních scénářů. Studie je zaměřena na konkrétní lokality v České republice (ČR), pro které bylo možno získat nezbytná kvalitní data pro aplikaci růstových modelů.

MATERIÁL A METODY

Dlouhodobé polní experimenty (Tab. I), jejichž údaje byly využity pro studii, byly zvoleny podle principů prostorového pokrytí celého území ČR, zastoupení základních půdních typů a výrobních oblastí. Aplikované scénáře změny (Tab. II), které byly vytvořeny pomocí distribučního centra IPCC a velikost jejich gridů, pokrývajících území ČR, jsou znázorněny na Obr. 1. Pro definování scénářů změny klimatu vycházely příslušné instituce z referenčního období 1961–1990 a byly vytvořeny pro 90leté období (2010–2099). Meteorologické řady obsahují globální radiaci, srážky, průměrnou teplotu vzduchu a jeho denní teplotní amplitudu. Při validaci jednotlivých scénářů platí, že roční cykly průměrné teploty a globální radiace jsou v dobré shodě u většiny scénářů, zatímco srážky jsou mírně nadhodnocovány a amplituda teploty mírně podhodnocována. Detailněji se danou problematikou zabývá práce DUBROVSKÉHO et al. (2003). Standardizované scénáře, obsahující čtyři meteorologické charakteristiky, jsou znázorněny na Obr. 2.

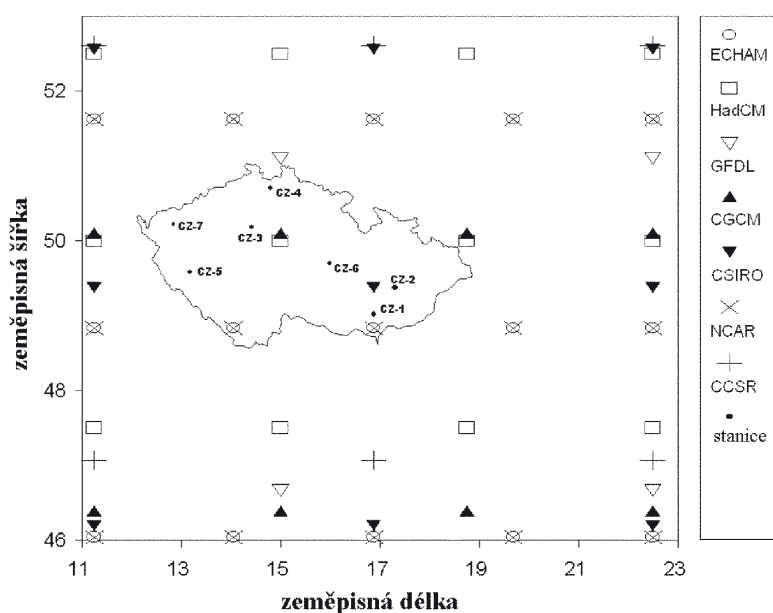
Speciální a relativně nový směr výzkumu v dopadech změny klimatu je dán vytvořením tzv. emisních SRES scénářů připravených IPCC. V práci je uvažován tzv. pesimistický scénář vývoje světových emisí skleníkových plynů označovaný jako A2, scénář založený na předpokladech silného ekonomického růstu a omezené mezinárodní spolupráce a tzv. optimistický scénář označovaný jako B2, což je scénář vývoje světových emisí skleníkových plynů založený na globální spolupráci a orientaci k ochraně životního prostředí. Předpokládaná koncentrace CO_2 pro rok 2100 pro scénář A2 je 826 ppm a pro scénář B1 548 ppm (Tab. III). Propojením výstupů scénářů změny klimatu a emisními scénáři s růstovými modely je naplněn základní cíl práce – posouzení dopadů změny klimatu na výnos pšenice ozimé. Výběr nejkvalitnějšího růstového modelu byl součástí předchozí studie (EIT-

I: Lokální podmínky sedmi experimentálních lokalit. Klimatické údaje jsou vztaženy k období 1961–1990.

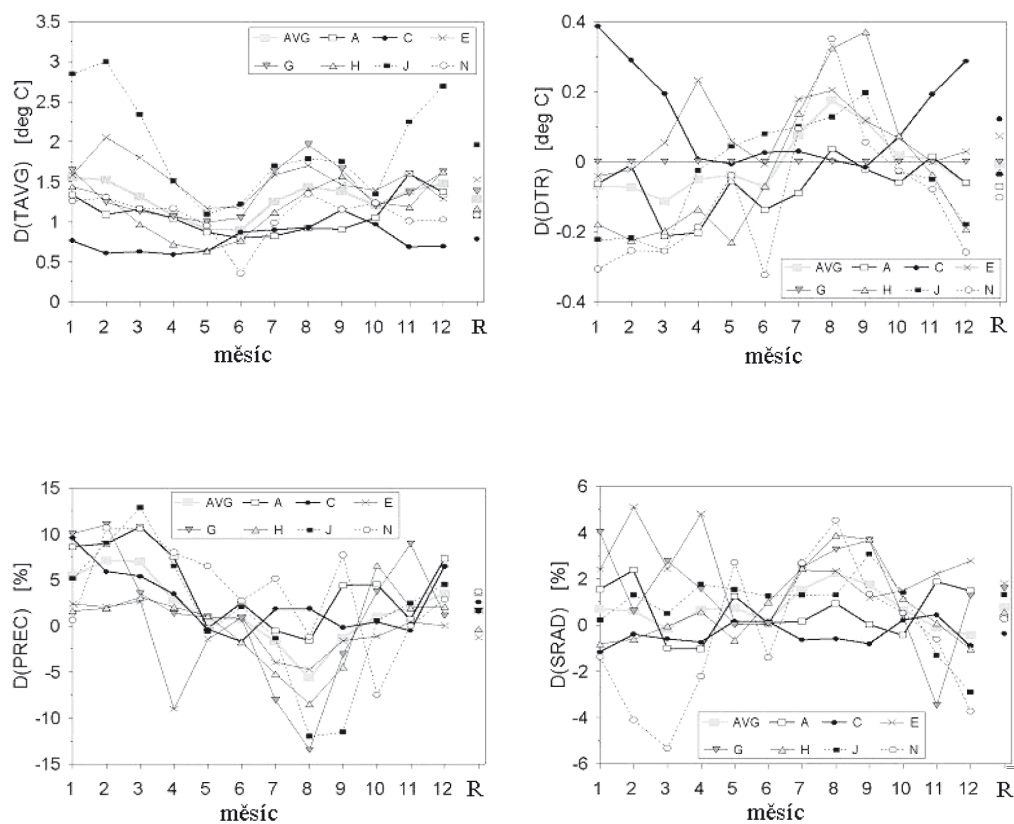
Indikativ stanice (využit v Obr. 1)	CZ_1	CZ_2	CZ_3	CZ_4	CZ_5	CZ_6	CZ_7
Jméno stanice	Lednice	Kroměříž	Sedlec	Chrastava	Staňkov	Domanínec	Krásné Údolí
Nadmořská výška (m)	170	204	300	345	370	565	647
Výrobní oblast	kukuřičná	řepařská	řepařská	obilnářská	obilnářská	bramborářská	pícninářská
Půdní typ - (FAO, 1988)	černozem	černozem	černozem	luvisol	luvisol	kambisol	kambisol
Efektivní hloubka půdy (cm)	140	155	150	150	180	130	135
Průměrná roční teplota vzduchu (°C)	9,5	9,1	8,2	7,6	8,2	6,8	6,4
Průměrný roční úhrn srážek (mm)	488	571	510	816	526	591	604
Průměrná roční suma globální radiace (MJ . m ⁻²)	3955	3914	3706	3487	3790	3787	3634

II: Seznam GCM využitých pro konstrukci scénářů změny klimatu

Akronym	Oficiální název modelu	Prostorové rozlišení (°, z.š. x z. d.)
CCSR	CCSR=NIES	5,6 x 5,6
CGCM	CGCM1	3,8 x 3,8
CSIRO	CSIRO-Mk2	3,2 x 5,6
ECHAM	ECHAM4=OPYC3	2,8 x 2,8
GFDL	GFDL-R15-a	4,5 x 7,5
HadCM	HadCM2	2,5 x 3,75
NCAR	NCAR DOE-PCM	2,8 x 2,8



1: Pozice GCM gridových bodů s ohledem na území ČR. Symboly jsou vztaženy ke středu sedmi GCM. Černé body vyjadřují středy experimentálních stanic, které byly využity pro evaluaci růstových modelů a dopadů změny klimatu.



2: Scénáře GCM pro ČR a) denní průměrná teplota (TAVG) b) denní amplituda teploty (DTR) c) srážky (PREC) d) globální radiace (SRAD - změny SRAD jsou založeny na změnách v oblačnosti u modelu HadCM). GCM jsou označeny jako: A = CSIRO, C = CGCM, E = ECHAM, G = GFDL, H = HadCM, J = CCSR, N = NCAR. Jako AVG je označen průměr ze všech scénářů změny klimatu.

III: Změny průměrné roční teploty vzduchu pro dva emisní scénáře a tři časové horizonty, které vycházejí z období (1961–1990)

Emisní scénář		2025	2050	2100
SRES-B1	CO ₂ (ppm)	420	467	548
	ΔT _G (°C)	+0,5	+0,8	+1,2
SRES-A2	CO ₂ (ppm)	438	535	826
	ΔT _G (°C)	+1,1	+2,1	+4,3

IV: Hodnoty genetických koeficientů pšenice ozimé (odrůda Hana) pro model CERES-Wheat

Genetické koeficienty	P1V	P1D	P5	G1	G2	G3	PHINT
Hodnoty	5,8	1,1	3,6	4,3	2,4	3,9	95,0

P1V – vernalizační citlivost ve dnech (0 - 9); P1D – citlivost fotoperiodismu = počet dnů s méně než 20 h (1 - 5); P5 – doba fáze trvání nalévání zrna ve dnech (1 - 5); G1 – počet zrn na jednotu váhy stébla (1 - 5); G2 – rychlost růstu zrna (g.m⁻².den⁻¹); G3 – standardní váha stébla v gramech a počtu klasů (1 - 5); PHINT – phylochron interval v teplotních dnech

ZINGER et al., 2003), na jejímž základě byl zvolen model CERES-Wheat (RITCHIE a OTTER-NACKE, 1985). Model umožňuje jak posouzení zvýšené koncentrace CO₂ (TUBIELLO et al., 1999), tak změn jednotlivých meteorologických prvků. Součástí použití modelu musí být jeho kalibrace a evaluace s využitím experimentálních dat. K tomuto účelu byly k dispozici pokusy Ústředního kontrolního zkušebního ústavu zemědělského ÚKZÚZ (Obr. 1), na kterých se po celou dobu prováděla nezbytná agrotechnická opatření, pedologická a meteorologická měření. Na dvou lokalitách (Sedlec a Chrastava) proběhla detailní kalibrace použité odrůdy pro CERES-Wheat model (počet experimentů: n = 27). Odrůda je v modelu charakterizovaná genetickými koeficienty, které zahrnují teplotní sumu k dosažení dané fenologické fáze, citlivost k jarovizaci a fotoperiodismu a trvání fáze plnění zrna. Ve studii byla využita pšenice ozimá (*Triticum aestivum* L.) odrůda Hana z důvodu jejího širokého využití datujícího se od roku 1985 a z toho vyplývající dostupnosti potřebných fyziologických experimentálních údajů. Tvoří je datum setí, vzcházení, kvetení, zralosti, výnosu, biomasy, počtu zrn na m², počtu zrn v klase, a hmotnost 1000 zrn. V Tab. IV jsou uvedeny vstupní hodnoty, které byly na základě těchto údajů spočítány a využity k simulacím v podmínkách změny klimatu.

Meteorologické vstupní údaje do modelu CERES-Wheat zahrnují globální radiaci (MJ.m⁻².den⁻¹), denní maximální a minimální teplotu vzduchu (°C) a denní úhrn srážek (mm). Evaluace modelu byla provedena na pěti stanicích s originálními vstupními údaji (n = 52) se zaměřením na fenologii a výnosotvorné faktory. Výstupy byly testovány s využitím Pearsonova koefi-

cientu korelace *r*, střední kvadratické chyby (*RMSE*) a modelového indexu *d* podle WILMOTA (1982). Index leží mezi 0 a 1; čím blíže je hodnota jedné, tím přesnější jsou výstupy modelu ve srovnání s pozorováním. Hodnoty *RMSE* a *d* jsou široce využívány a lze je považovat za optimální statistické vyhodnocení modelových a skutečných výstupů (např. DIEKKRÜGER et al., 1995; WEGEHENKEL, 2000).

Vlastní posouzení dopadů změny klimatu na výnos rostlin bylo provedeno metodou, kterou vyvinuli SEMENOV a PORTER (1995) a pro podmínky ČR upravili ŽALUD a DUBROVSKÝ (2002). Metoda je založena na vícenásobné simulaci s meteorologickými daty pro současné a očekávané klima. Vstupní údaje agrotechnické, fyziologické a pedologické jsou založeny na "reprezentačním" ročníku a 99letých sériích syntetických meteorologických řad vytvořených pomocí stochastického generátoru meteorologických dat Met&Roll (DUBROVSKÝ, 1997). Reprezenční ročník je definován sadou vstupních dat, kterou tvoří všechny nemeteorologické údaje nutné pro spuštění simulace (Tab. V). Zatímco tyto údaje jsou stejné pro všechny simulace, meteorologické jsou generovány vždy pro novou simulaci. Parametry generátoru jsou pro současné klima odvozeny z pozorovaných řad (1961–1990) nebo pro očekávané klima ze scénářů změny klimatu (Obr. 2, Tab. II).

VÝSLEDKY A DISKUSE

Evaluace modelu CERES-Wheat

Porovnání simulované a skutečné doby kvetení a fyziologické zralosti vykazovalo standardní odchylku menší než 3 %, což reprezentuje 8 dnů, zatímco většina odchylek ležela v rámci ± 5 % (±15 dnů). Většina od-

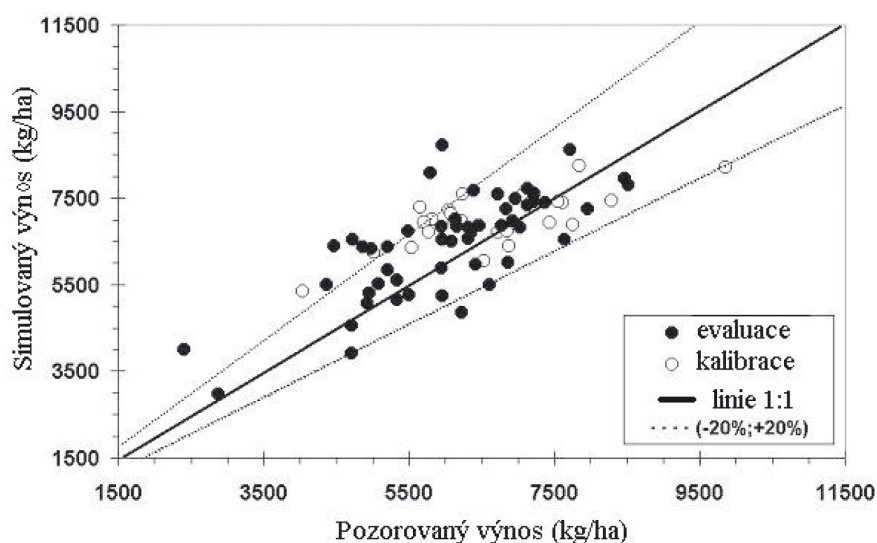
V: Charakteristiky reprezentačního ročníku

Indikativ stanice	CZ_1	CZ_2	CZ_3	CZ_4	CZ_5	CZ_6	CZ_7
Reprezentační ročník	1989	1996	1994	1992	1996	1993	1988
Den setí	29. září	4. říjen	5. říjen	1. říjen	1. říjen	7. říjen	1. říjen
Datum sklizně	9. červenec	8. srpen	3. srpen	28. červenec	1. srpen	17. srpen	19. srpen
Množství N hnojení (kg.ha ⁻¹)	90/3*	60/2*	75/2*	85/3*	100/3*	90/3*	60/2*
Počáteční dostupná půdní voda v půdním profilu (mm)	318	274	205	210	234	174	162
Velikost výsevu (semen.m ⁻²)	500	400	400	400	400	500	500

* Počet aplikací

chylek dvou důležitých výnosotvorných faktorů, váhy tisíce zrn a počtu zrn na m² byly menší než 20 % na všech sedmi testovaných lokalitách. Navzdory široké variabilitě experimentálních hodnot pouze 3, resp. 5 simulací mělo odchylku větší než 40 %. Nepřesnosti v simulacích fenologických a výnosotvorných parametrů ovlivnily preciznost výsledků evaluace výnosů (Obr. 3, Tab. VI), i když 77 % simulovaných výnosů

mělo odchylku menší než 20 %. Z pohledu statistických výstupů je možné označit vztah mezi pozorovanými a simulovanými hodnotami za vysoce průkazný a dokonce lepší než evaluace, které provedli DIEK-KRÜGER et al. (1995), LANDAU et al. (1998) nebo IGLESIAS et al. (2000), a srovnatelné s prací OTTER-NACKE et al. (1986) nebo nedávnými závěry ALEXANDROVA a EITZINGERA (2002).



3: Evaluace výnosu pšenice ozimé: přímá linie 1:1 je vyjádření ideální čáry mezi pozorovaným a simulovaným výnosem. Prázdné body jsou výsledky kalibrace pro Sedlec a Chrastavu; plné body jsou evaluační výstupy, které jsou založeny na datech ze zbývajících pěti lokalit.

VI: Hodnoty základních statistických veličin pro vybrané parametry evaluace: r = hodnota Pearsonova korelačního koeficientu; RMSE = střední kvadratická chyba (její odmocnina), d = index efektivit modelu podle Wilmota (1982).

Parameter		průměr	směrodatná odchylka	min.	max.	r	RMSE	d
kvetení (dny)	experiment	254	10,6	232	280	0,745**	8,4	0,999
	simulace	251	11,8	225	279			
zralost (dny)	experiment	302	12	277	330	0,857**	7,5	0,999
	simulace	299	14	272	339			
výnos (kg/ha)	experiment	6250	1224	2399	9862	0,728**	928	0,979
	simulace	6636	1063	2980	8720			
HTZ (g)	experiment	40,9	4,8	27,7	52,4	0,06	7,484	0,963
	simulace	38,7	5,1	20,0	52,6			
# zrn/m²	experiment	15794	3004	7364	21429	0,683**	2845	0,970
	simulace	17406	2925	10475	23670			

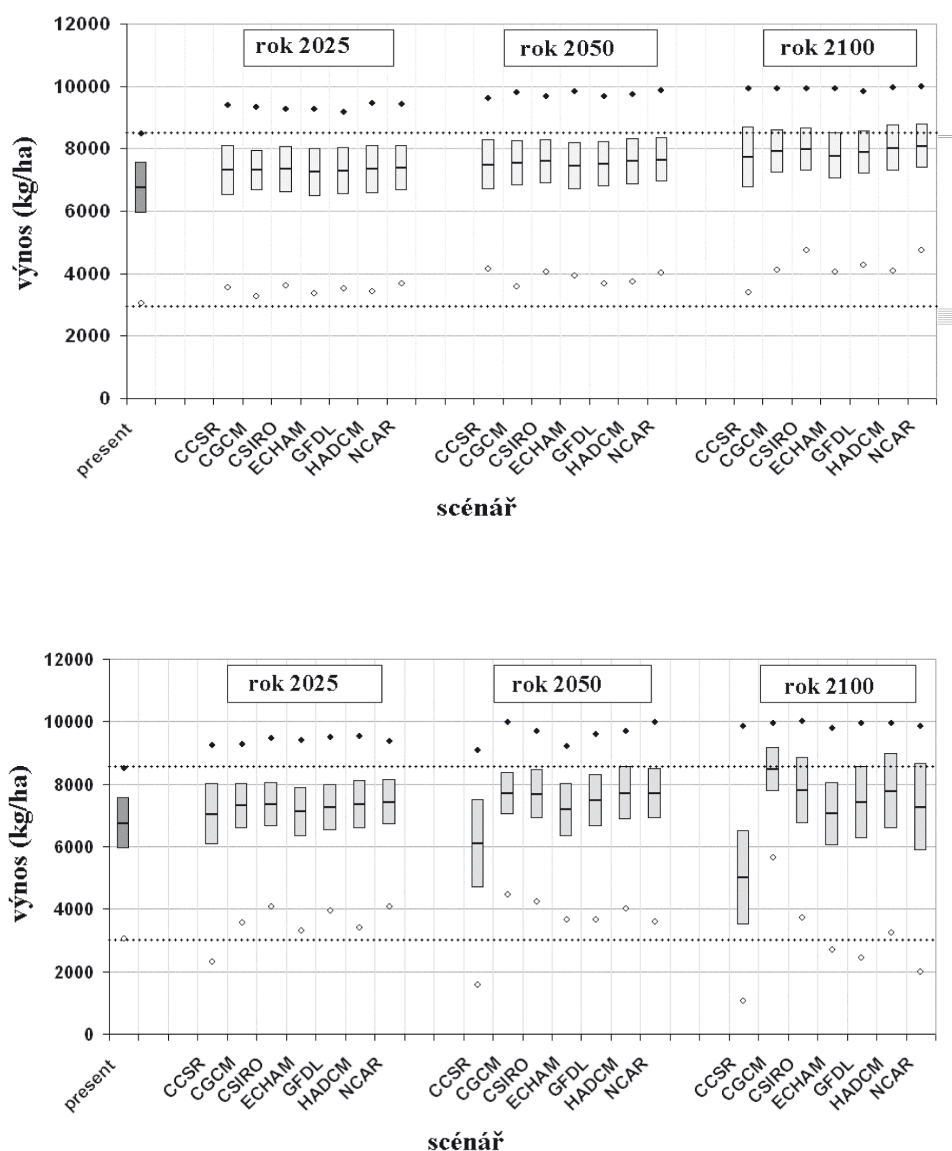
Dopady změny klimatu na výnos pšenice ozimé

Zvýšení teploty, které je predikováno všemi scénáři, by vedlo ke zkrácení vegetační doby (setí-fyziologická zralost) pšenice ozimé o 4–71 dnů, což je v souladu s obdobnými studiemi (např. HARRISON et al., 2000; TUBIELLO et al., 2000 nebo ALEXANDROV a EITZINGER, 2002). Změna roční průměrné teploty podle scénáře HadCM_B1_2050 a ECHAM_B1_2050 leží v intervalu 0,9–1,1 °C a to by vedlo ke zkrácení vegetační periody o 2,3–3,5 %. Tyto výsledky naznačují, že v období 2050–2100 lze očekávat v nadmořských výškách kolem 600 m obdobné podmínky jako v současnosti ve výškách 300 m n. m. Některé studie s pšenicí ozimou prováděné v teplotních gradientových komorách (WOLF et al., 1998) s odrůdou Minaret v Clermont Ferrandu (Francie) či Rothamstedu (Anglie), uvedené závěry (i přes respektování rozdílných klimatických podmínek) podporují.

V případě, že do výsledků nebude zahrnut stimulační efekt zvýšené koncentrace CO₂, je propad výnosů značný, především v nižších a středních polohách. Např. scénáře ECHAM_A2_2050 a HadCM_A2_2050 naznačují snížení výnosů až o 25 %. Obecně platí, že regiony se současnou nižší teplotou budou méně citlivé k tomuto nepřímému (bez vlivu CO₂) dopadu změny klimatu. Hlavní příčinou, kromě snížení doby vegetace, je urychlení vegetačního vývoje, které ovlivňuje respiraci stejně jako distribuci asimilátů.

Další obecný závěr je, že snížení srážek především v letních měsících společně s vyšším množstvím globální radiace vyvolá vyšší potenciální evapotranspiraci s projevy vyššího stresu suchem. V případě, že není zahrnut fertilizační efekt CO₂, dosáhnou výnosy 25–98 % současných hodnot.

Změny výnosů jsou však funkcí použitého scénáře (Obr. 4) a současně lokality (Obr. 5). Zvýšení výnosů s obsahem CO₂ souvisí s funkcí v modelu CERES-Wheat, která je v průměru 9,5 % na 100 ppm CO₂. Tato hodnota je v souladu s řadou experimentů publikovaných AMTHOREM (2001). Lokality ve vyšších nadmořských výškách vykazují vyšší nárůst výnosů v souvislosti s vyšší koncentrací CO₂. V případě změn klimatických podmínek a zahrnutím přímého i nepřímého vlivu zvýšené koncentrace CO₂ je možné očekávat mírný nárůst výnosů v rozsahu 4,3–10,0 % pro rok 2025, 6,5–14,3 % pro rok 2050 a 4,5–19,8 % pro rok 2100. Jak je ale zřejmé z Obr. 5b za platnosti emisního scénáře A2 a GCM CCSR je predikováno snížení výnosů o 9,6 a 25,8 % pro rok 2050, resp. 2100. Je však nutné podotknout, že v předkládané studii kromě změn klimatických podmínek a koncentrace CO₂ nebyla uvažována změna žádných jiných parametrů. Stejně tak nebylo zohledněno snížení výnosů ve vztahu k chorobám, škůdcům či plevelům, což jsou faktory, které konečné výnosy mohou výrazně ovlivnit.

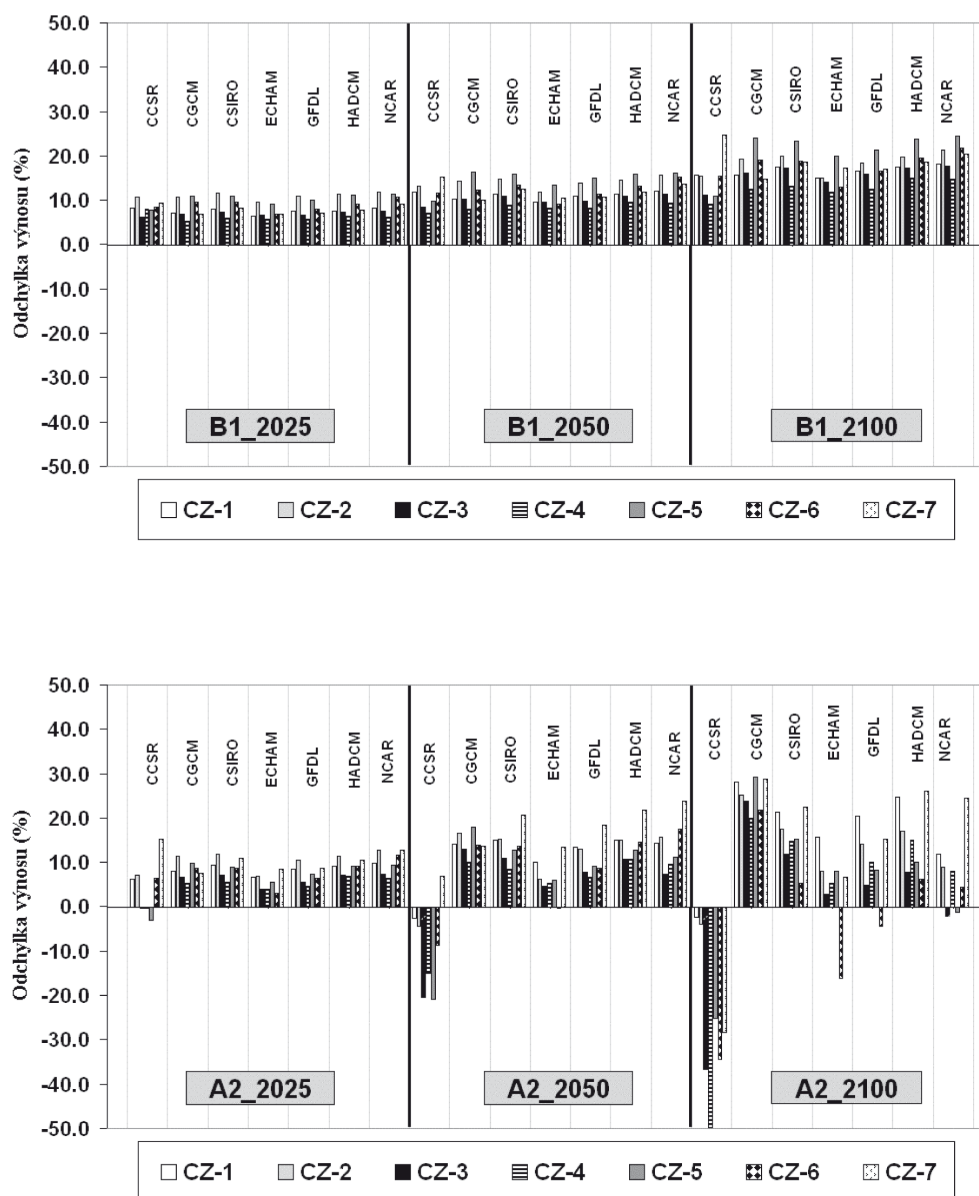


4: Přehled simulovaných výnosů pšenice ozimé pro současné klima v kombinaci emisního scénáře B1 (a) a emisního scénáře A2 (b) se sedmi GCM pro tři časové horizonty. Každý vertikální sloupec je znázorněním průměru $\pm$ směrodatná odchylka pro 99 simulací pro všechny lokality. Bílé body jsou nejnížší simulované výnosy získané ze všech simulací (celkem 693) pro jednotlivé scénáře, zatímco černé body vyjadřují jejich absolutní maximum. Tečkovaná linie souběžná s osou x je vyjádřením nejnížšího a nejvyššího výnosu za současných klimatických podmínek.

Rozdíly mezi lokalitami

Obr. 5 představuje, navzdory podobným trendům vývoje založených na jednotlivých emisních scénářích a časových horizontech, výrazný vliv místních podmínek, které hrají významnou roli ve stanovení absolutní hodnoty dopadů změny klimatu na výnos. Nejmenší diverzitu (5,4–11,4 %) očekávaného výnosu vykazuje dopad emisního scénáře B1_2025,

který je relativně nejpodobnější současným podmínkám. Na druhé straně rozdíly kulminují pro emisní scénář A2_2100. Výjimkou jsou scénáře CCSR založené na A2 pro roky 2050 a 2100, kde je dopad změny klimatu negativní. Jednotlivé lokality se liší svým půdním profilem a tak např. v lokalitách Kroměříž a Staňkov je nárůst výnosů z tohoto důvodu vyšší. Především však v podmínkách emisních scénářů



5: Odchylky průměrného výnosu očekávané za podmínek změny klimatu ve srovnání se současnými (1961–1990) výnosy pro dva emisní scénáře B1 (a) a A2 (b), tři časové periody a sedm GCM. Výsledky byly odvozeny individuálně pro každou ze sedmi lokalit jako průměrný výnos ze 99 simulací pro každou kombinaci lokalita – scénář – perioda.

nářů A2_2050 a A_2100 lze očekávat výrazný profit z obou lokalit. Zvýšení teploty rovněž napomůže lokalitě Krásné Údolí, která je v současnosti marginální oblastí pro pěstování pšenice ozimé. Trvalý zisk lze

rovněž pozorovat u stanic Lednice a Kroměříž, které již v současných podmínkách patří k neproduktivnějším oblastem.

SOUHRN

Ze studie je možné vyvodit dva základní závěry. Především konstatování, že výnos pšenice ozimé má obecnou tendenci na většině lokalit stoupat (40 z 42 aplikovaných klimatických scénářů) v rozsahu 7,5–25,3 % ve všech třech testovaných časových horizontech. V případě naplnění CCSR scénáře, který predikuje nevýraznější nárůst teploty, by byl výnos redukován o 9,6 % v roce 2050 a o 25,8 % v roce 2100 za podmínek emisního scénáře A2. Rozdíly mezi jednotlivými lokalitami jsou značné a statisticky významné, zvláště pro pozdější časová období. Druhým závěrem je posouzení vlivu místních podmínek, které potvrzují, že významnou roli hrají právě lokální půdní a klimatické vlivy. Místní významnost vzrůstá se zvyšující se změnou klimatu a kulminuje pro emisní scénář A2 v roce 2100. Byla nalezena setrvalá tendence profitu dvou nejteplejších lokalit stejně jako lokalit s hlubším půdním profilem.

růstový model, emisní scénáře, evaluace fenologie a výnosu, simulace

PODĚKOVÁNÍ

Práce mohla být provedena s podporou výzkumného záměru řešeného na Mendelově zemědělské a lesnické univerzitě v Brně č.: J 08/98: 432100001.

LITERATURA

- ALEXANDROV, V., EITZINGER, J., CAJIC, V., OBERFOSTER, M. Potential Climate Change Impacts on Selected Agricultural Crops in North-east Austria. *Global Change Biology*, 2002, 8(4): 372-389
- ALEXANDROV, A., HOOGENBOOM, G. The impact of climate variability and change on crop yield in Bulgaria, *Agric. For. Meteorol.*, 2000, 104: 315-327
- AMTHOR, J. S. Effects of atmospheric CO₂ concentration on wheat yield: review of results from experiments using various approaches to control CO₂ concentration, *Field Crops Research*, 2001, 73: 1-34
- AMTHOR, J. S. Perspective on the relative insignificance of increasing atmospheric CO₂ concentration to crop yield, *Field Crop Research*, 1998, 58: 109-127
- BATTS, G. R., MORISON, J. I. L., ELLIS, R. H., HADLEY, P., WHEELER, T. R. Effects of CO₂ and temperature on growth and yield of crops of winter wheat over four seasons, *European Journal of Agronomy*, 1997, 7: 43-52.
- BENISTON, M., TOL, R. J. S. Europe In: Watson, R. T., Zinyowera, M. C., Moss, R. H. (Eds.), *The Regional Impacts of Climate change: an Assessment of Vulnerability. A Special Report of IPCC Working Group II.*, 1998, Cambridge University Press, Cambridge
- BROWN, R. A., ROSENBERG, N. J. Sensitivity of crop yield and water use to change in a range of climatic factors and CO₂ concentrations: a simulation study applying EPIC to the central USA. *Agric. For. Meteorol.*, 1997, 83: 171-203
- BUNCE, J. A. Responses of stomatal conductance to light, humidity and temperature in winter wheat and barley grown at three concentrations of carbon dioxide in the field, *Global Change Biology*, 2000, 6, 371-382
- CURE, J. D., ACKOCK, B. Crop responses to carbon dioxide doubling: a literature survey. *Agric Forest Meteorol.*, 1986, 38: 127-145
- DIEKKRÜGER, B., SÖNDGERATH, D., KERSENBAUM, K. C., MCVOY, C. W. Validity of agroecosystem models A comparison of results of different models applied to the same data set, *Ecological Modelling*, 1995, 81: 3-29
- DUBROVSKÝ, M. Creating daily weather series with use of the weather generator. *Environmetrics*, 1997, 8: 409-424
- DUBROVSKÝ, M., KALVOVÁ, J., NEMEŠOVÁ, I., Climate Change Scenarios for the Czech Republic Based on Transient GCM Simulations. *Climate Research* 2003, (in press)
- EITZINGER, J., TRNKA, M., HÖSCH, J., ŽALUD, Z., DUBROVSKÝ, M. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions, *Ecological Modelling*, 2004, 171: 3: 223-246
- FERRIS, R., ELLIS, R. H., WHEELER, T. R., HADLEY, P. Effect of high temperature stress at anthesis on grain yield and biomass of field-grown crops of wheat. *Annals of Botany* 1998, 82: 631-639
- HALL, A. E. A model of leaf photosynthesis and respiration for predicting carbon dioxide assimilation in different environments. *Oecologia* 1979, 143: 299-316
- HALL, A. E. *Crop Responses to Environment*, CRC Press, Boca Raton, 2001, p. 232
- HARRISON, P. A., PORTER, J. R., DOWNING, T. E. Scaling-up the AFRCWHEAT2 model to assess

- phenological development for wheat in Europe, *Agric. For. Meteorol.*, 2000, 101: 167-186
- HOUGHTON, J. T., DING, Y., GRIGGS, D. J., NOGUER, M., VAN DER LINDEN, P. J., XIAOSU, D. (eds.) Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, UK, 2001, pp. 944
- IGLESIAS, A., ROSENZWEIG, C., PEREIRA, D. Agricultural impacts of climate change in Spain: Developing tools for a spatial analysis, *Global Environmental Change*, 2000, 10: 69-80
- IZAURRALDE, R. C., ROSENBERG, N. J., BROWN, R. A., THOMSON, A. M., Integrated assessment of Hadley Center (HadCM2) climate change impacts on agricultural productivity and irrigation water supply in the conterminous United States Part II. Regional agricultural production in 2030 and 2095, *Agric. For. Meteorol.*, 2003, 117: 97-122
- KIMBAL, B. A. Carbon dioxide and agricultural yield. An assemblage of analysis of 430 prior observations. *Agronomy Journal* 1983, 75: 779-788
- LANDAU, S., MITSCHELL, R. A. C., BARNETT, V., COLLS, J. J., CRAIGON, J., MOORE, K. L., PAYNE, R. W. Testing winter wheat simulation models' predictions against observe UK grain yields, *Agric. For. Meteorol.*, 1998, 89: 85-99
- MITCHELL, R. A. C., BLACK, C. R., BURKART, S., BURKE, J. I., DONNELLY, A., TEMMMERMAN, L. DE, FANGMEIER, A., MULHOLLAND, B. J., THEOBALD, J. C. AND VAN OIJEN, M. Photosynthetic responses in spring wheat grown under elevated CO₂ concentrations and stress conditions in the European, multiple-site experiment, 'SPACE-wheat', *European Journal of Agronomy*, 1999, 10: 205-214.
- OLESEN, J. E., BINDI, M. Cosequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy, *European Journal of Agronomy*, 2002, 16: 239-262
- OTTER-NACKE, S., GODWIN, D. C., RITCHIE, J. T. Testing and validation the CERES-wheat model in diverse environments agRISTARS Technical Report, YM-15-00407, JSC-20244, Johnson Space Center Houston, TX, USA, 1986
- RITCHIE, J. T., OTTER-NACKE, S. Description and performance of CERES-Wheat: A user-oriented wheat yield model, in ARS Wheat Yield Project. ARS-38, edited by W.O. Willis, U.S. Department of Agriculture-Agricultural research service, 1985: 159-175
- SEMOV, M. A., PORTER, J. R. Climatic variability and the modeling of crop yields. *Agric. For. Meteorol.*, 1995, 73: 265-283
- SMITH, J. B. LAZO, J. K. A summary of climate change impact assessments from the U.S. country studies program, 2001, 50: 1-29
- TRNKA, M., ŽALUD, Z., DUBROVSKÝ, M. Role of the solar radiation in spring barley production process. In. Mezinárodní konference „Extrémny prostredia - limitujúce faktory bioklimatologických procesov“, Slovenská bioklimatologická spoločnosť SAV, Račková dolina 10. – 12. 9. 2001, CD – ROM
- TUBIELLO, F. N., DONATELLI, M., ROSENZWEIG, C., STOCKLE, C. O. Effects of climate change and elevated CO₂ on cropping systems: model predictions at two Italian locations, *European Journal of Agronomy*, 2000, 13: 179-189
- TUBIELLO, F. N., EWERT, F. Simulating the effects of elevated CO₂ on crops: approaches and applications for climate change, *European Journal of Agronomy*, 2002, 18: 57-74
- TUBIELLO, F. N., ROSENZWEIG, C., KIMBALL, B. A., PINTER, JR., P. J., WALL, G. W., HUSANKER, D. J., LAMORTE, R. L., GARCIA, R. L. Testing CERES-Wheat with free-air carbon dioxide enrichment (FACE) experiment data: CO₂ and water interactions. *Agron. Journal*, 1999, 91: 247-255
- WEGEHENKEL, M. Test of a modeling system for simulating water balances and plant growth using various different complex approaches, *Ecological Modelling*, 2000, 129: 39-64
- WHEELER, T. R., CRAUFURD, P. Q., ELLIS, R. H., PORTER, J. R., VARA PRASAD, P. V. Temperature variability and the yield of annual crops, *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2000, 82: 159-167
- WILMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance, *Bulletin of American Meteorological Society*, 1982, 64, 1309-1313
- WOLF, J., VAN DIEPEN, C. A. Effects of climate change on grain maize yield potential in the European Community. *Climatic Change* 1995, 29: 299-331
- WOLF, J. et al. Model evaluation of experimental variability to improve predictability of crop yields under climatic change Final report of the EU MODEXCROP project. University of Essex, UK; Royal Veterinary and Agricultural University, Copenhagen, Denmark; Wageningen University Research Center, Wageningen, The Netherlands, 1998, 165 p.
- WOLF, J., VAN OIJEN, M., KEMPENAAR, C. Analysis of the experimental variability in wheat responses to elevated CO₂ and temperature, *Agriculture Ecosystem&Environment*, 2002, 93: 227-247
- ŽALUD, Z., DUBROVSKÝ, M. Modelling climate

Adresa

Doc. Ing. Zdeněk Žalud, Ph.D., Ústav krajinné ekologie, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně,
Zemědělská 1, 613 00 Brno, Česká republika