

CITLIVOST RŮSTOVÝCH SIMULAČNÍCH MODELŮ NA VYPOČTENÉ HODNOTY GLOBÁLNÍHO SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ

P. Kapler, M. Trnka, Z. Žalud, J. Eitzinger

Došlo: 11. ledna 2006

Abstract

KAPLER, P., TRNKA, M., ŽALUD, Z., EITZINGER, J.: *Crop model sensitivity to the estimated daily global solar radiation data*. Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun., 2006, LIV, No. 4, pp. 21–32

The results of the previous studies have suggested that the estimated R_G values are loaded with an error, which might compromise the precision of the subsequent crop model applications. Therefore a detailed analysis of the error propagation was made using two crop models i.e. CERES-Barley and CERES-Wheat. Database of meteorological data originating from 8 stations in Austria and Czech Republic was used in order to carry out the analysis. It has been found that even application of the method based on sunshine duration that yield the lowest bias in R_G estimates significantly influences number of key crop model outputs. It has been also noted that in 5–6 seasons out of 100 cases the deviation greater than $\pm 10\%$ is to be expected whilst the occurrence of $\pm 25\%$ could not be also ruled out. The precision of the yield estimates and other crop model outputs is lower than expected but still acceptable for most application with mean bias error in range of 2.0–4.1% when estimates based on the diurnal temperature range and cloud cover are used. In this case yield deviations over $\pm 10\%$ occurred in about 20% cases (depending on the crop) whilst the probability of significant yield departure ($\pm 25\%$) doubled of that found for the previous method. The methods based on the diurnal temperature range and daily precipitation sum showed an increase of the systematic bias of yield of winter wheat and considerably higher number of seasons with yield departures over $\pm 25\%$. Utilisation of the methods based on the diurnal temperature range only for the purposes of seasonal yield forecasting or climate change impact assessment is questionable as the probability of significant yield departure is very high (as well as the systematic error). These findings should act as an incentive to the further research aimed at development of more precise and widely applicable methods of estimating daily R_G based more on the underlying physical principles and/or remote sensing approach. Overall decrease of the existing uncertainties in the R_G estimates would clearly result into increase of the reliability of subsequent applications that use R_G as input variable.

global radiation, crop yields, sensitivity analysis, crop models, CERES-Barley, CERES-Wheat

Růstové simulační modely jsou často využívány jako nástroj interdisciplinárního výzkumu např. pro hodnocení výnosového potenciálu daného regionu, předpověď výnosu plodin nebo jako nástroj hodnocení dopadů změny klimatu. Pro tyto aplikace jsou nezbytným vstupem dlouhodobé řady denních sum energie slunečního záření (R_G), neboť právě tento meteorologický prvek reprezentuje využitelnou ener-

gii produkčních i mimoprodukčních procesů ovlivňujících růst a vývoj plodin. R_G je nepostradatelnou vstupní proměnnou pro všechny modely simulující rostlinný růst, protože je jedním z řídících vstupů pro výpočet fotosyntézy, tedy procesu konverze slunečního záření na chemickou energii. R_G je rovněž klíčovým faktorem pro výpočet potenciální a aktuální evapotranspirace, která je základem programů sta-

novujících vodní bilanci. Počet dostatečně dlouhých homogenních řad měřených sum energie globálního slunečního záření je dosud nízký, poměr mezi počtem stanic vybavených pro měření R_G a počtem stanic pro měření standardních meteorologických prvků (teplota, srážky, oblačnost) kolísá od 1:10 v Německu či 1:20 v České republice a Rakousku po 1:500 v globálním měřítku. Síť stanic poskytujících kompletní sady vstupních meteorologických dat pro růstové modely je tedy nedostatečná. Chybějící data mohou být nahrazena buď daty měření na nejbližší stanici, substituována výsledky dálkového průzkumu Země, či odhadnuta jinou metodou (např. stochastickými generátory meteorologických dat, lineární interpolací nebo pomocí semi-/empirických vztahů mezi denním úhrnem slunečního záření a jinými meteorologickými prvky).

Studie pro stanovení R_G prováděné v podmínkách evropského regionu prokázaly vysoký vliv i malé vzdálenosti (související s členitou konfigurací terénu a dalšími faktory), což omezuje možnost použití dat z nejbližší stanice (TRNKA *et al.*, 2005). Dostupnost družicových měření je prostorově i časově omezena, jen zřídka jsou k dispozici pro období do roku 1980, což omezuje jejich použitelnost v některých typech dlouhodobých simulačních pokusů (WYSER *et al.*, 2002). Stochasticky generovaná data mohou být úspěšně využita pro výzkum a simulaci možných budoucích scénářů při teoretickém předpokladu naplnění určitých podmínek, ale nemohou být použita ani pro validaci samotných modelů, ani pro simulační analýzu konkrétního období (DUBROVSKÝ, 1997). Nejčastěji užívaný přístup získání potřebných dat je založen na empirických vztazích, což dokládá mj. existence celé řady rovnic k výpočtu R_G z běžně měřených meteorologických prvků.

V literatuře se uvádí, že suma odchylek R_G se během vegetačního období rovná nule (např. HUNT *et al.*, 1998) a mohou být zanedbány vzhledem k možným nedostatkům dalších parametrů. Toto tvrzení je založeno na předpokladu, že odchylky jsou v období rozděleny rovnoměrně a jejich suma se blíží nule. Podle našeho názoru však nelze tyto odchylky zanedbat, neboť vztah mezi sumou R_G a reakcí modelovaných plodin je založen na soustavě nelineární vztahů, jak ostatně uvádí např. NONHEBEL (1993). Proto jsme provedli nepřímou validaci sedmi metod výpočtu R_G na osmi stanicích dosazením vypočtených hodnot do dvou růstových modelů. Jako reference pak sloužily simulace provedené s využitím naměřených hodnot R_G .

Výběr testovaných R_G metod se řídil 1. dostupností dat pro jejich výpočet (vybrané metody používají

výhradně denních hodnot běžně měřených na většině meteorologických stanic), 2. možností jejich praktického využití, což bylo posouzeno zvláště dostupností nezbytných empirických koeficientů a 3. podle jejich dřívějšího či plánovaného začlenění do růstově-modelových studií ve střední Evropě. Výčet zvolených metod je sice omezený, nicméně jde o celé spektrum metod vycházejících z běžně měřených meteorologických prvků tak, aby bylo možno srovnat a posoudit efektivitu jednotlivých prediktorů. Kterákoli z vybraných metod může být použita bez předchozí kalibrace lokálně měřenými hodnotami R_G , ačkoli by taková kalibrace zvýšila její přesnost. V této studii byly empirické koeficienty všech metod převzaty z literatury, neboť lokálně měřené hodnoty R_G pro kalibraci nejsou na většině stanic dostupné.

MATERIÁL A METODY

Nepřesnost vstupních dat může při nelineárnosti algoritmů růstových modelů vážně deformovat výstupy modelů. Studie zabývající se systematickými chybami modelů předpokládaly rovnoměrné rozložení odchylek hodnot R_G v celém simulovaném časovém úseku, což podle zjištění autorů nekoresponduje s realitou. Bylo zjištěno, že absolutní hodnoty systematických (stejně jako náhodných) chyb dopočítávaného slunečního záření v průběhu jednotlivých měsíců vegetačního období značně kolísají (TRNKA *et al.*, 2005). Pro potvrzení úvodní hypotézy bylo nutno postupovat v následujících krocích: 1. Příprava vhodné databáze hodnot R_G co nejbližší reálným datům, 2. citlivostní analýza výstupů růstových modelů na různé metody výpočtu solární radiace, 3. diskuse o souvislostech případných nepřesností výstupů modelů a strategie pro omezení jejich četnosti.

Obr. 1 lokalizuje osm stanic, jejichž data byla použita v této práci. Stanice reprezentují významné zemědělské výrobní oblasti České republiky a Rakouska a byly vybrány jako nejspolehlivější ze souboru šestnácti původně uvažovaných stanic. Kritériem výběru byla existence souvislé řady denních dat o délce alespoň šesti let následujících meteorologických prvků: minimální, maximální a průměrné denní teploty vzduchu, úhrnu srážek, oblačnosti, sumy slunečního záření a celkové doby slunečního svitu. Celkem devadesát čtyři ročníky pozorovaných dat, jakož i charakteristiky všech osmi stanic měřících sluneční záření byly získány z Českého hydrometeorologického ústavu a Rakouské meteorologické služby. Protože studie byla zaměřena na oblast intenzivně kultivovaných nížin (pod 750 m n.m.), byly ječmen jarní a pšenice ozimá vybrány pro své majoritní zastoupení mezi pěstovanými plodinami.



1: Lokalizace meteorologických stanic, které byly v této studii použity jako zdroj meteorologických dat

Výpočty denních sum R_G byly založeny na čtyřech typech metod lišících se od sebe vstupními meteorologickými údaji: 1. skutečná doba slunečního svitu, 2. oblačnost a teplota vzduchu, 3. teplota vzduchu a denní úhrn srážek a 4. pouze teplota vzduchu. Lokální úpravy a kalibrace jednotlivých metod nebyly uvažovány

a empirické koeficienty vyžadované některými rovnicemi byly odvozeny z dostupné literatury. Detaily a analýza všech sedmi použitých metod výpočtu R_G jsou zahrnuty v předchozích pracích autorů (KAPLER, 2003, TRNKA *et al.*, 2005); dále v textu jsou metody zmiňovány pod označením Met. (1–7), viz Tab. I.

I: Přehled testovaných metod výpočtu R_G podle nezbytných vstupních údajů, autoři a označení pro tuto studii

Nutná vstupní data	Označení	Autoři
Skutečná doba slunečního svitu	Met. (1)	Ångström - Prescott (1924, 1940)
	Met. (2)	Klabzuba <i>et al.</i> (1999)
Oblačnost a teplota	Met. (3)	Supit a Van Kappel (1998)
Teplota vzduchu a denní úhrn srážek	Met. (4)	Winslow <i>et al.</i> (2001)
	Met. (5)	Thornton a Running (1999)
Teplota vzduchu	Met. (6)	Donatelli a Campbell (1998)
	Met. (7)	Hargreaves <i>et al.</i> (1985)

Vliv rozdílných hodnot R_G na simulovaný výnos plodin byly studovány na výstupech dvou růstových modelů CERES-Barley (OTTER-NACKE *et al.*, 1991) pro ječmen jarní a CERES-Wheat (GODWIN *et*

al., 1989) pro pšenici ozimou. Oba modely jsou součástí prostředí DSSAT verze 3.5 (HOOGENBOOM *et al.*, 1994). Fenologický vývoj v modelech CERES je funkcí teploty a v zimním období navíc i fotoperiody

a účinků jarovizace. Akumulace sušiny je aproximována lineární funkcí založenou na přijaté fotosyntetické aktivní radiaci (FAR) a poměru využitelnosti této radiace, přičemž hodnota FAR představuje přibližně polovinu příchozí denní solární radiace. Množství FAR zachycené rostlinou pak závisí na zachytaném koeficientu a LAI (Leaf Area Index) v daný den. Modely CERES berou v úvahu celou řadu dalších procesů, např. mobilizaci a redistribuci asimilátů či dynamiku vývoje kořenového systému (EITZINGER *et al.*, 2004).

Provedené simulace vycházely z pozorovaných řad meteorologických dat, přičemž měřené hodnoty R_G byly nahrazovány R_G vypočtenými podle Met. (1–7), zatímco ostatní meteorologické prvky zůstaly nezměněny. Pro řádné zmapování účinků odchylek vypočtených hodnot R_G pro různé půdní podmínky byly simulace provedeny na třech typech půd. Charakteristiky půdních typů byly převzaty z lyzimetru FORCA ve Vidni (Federal Office and Research Centre for Agriculture). Zvolené půdy reprezentují převládající a nejúrodnější půdní typy nížin středoevropského regionu: 1. černozem na sprašových sedimentech, pro potřeby této studie označena jako černozem typická (podle klasifikace USDA hlinitá na spraši), 2. černozem na štěrkopiscích, zde uváděna jako černozem písčité (USDA: písčitohlinitá) a 3. kalkarická fluvisol, zde fluvisol (USDA: jílovitohlinitá s příměsí prachu). Vlastnosti těchto půd jsou publikovány v práci EITZINGER *et al.*, 2004. Parametry použitých kultivarů (ječmen jarní AKCENT a pšenice ozimá HANA) byly odvozeny v předchozích pracích kolektivu autorů (TRNKA *et al.*, 2004) a vycházejí z předchozí kalibrace a verifikace modelu CERES pro zájmovou oblast. Rádi bychom podotkli, že růstové modely obecně nezohledňují vliv plevelů, chorob či škůdců na plodiny.

Výsledky simulací růstových modelů po aplikaci sedmi metod výpočtu R_G byly srovnány s kontrolní simulací (založenou na měřených hodnotách R_G) a hodnoceny prostřednictvím čtyř ukazatelů: 1. střední chyba (MBE) jako indikátor systematických chyb, Rov. (1), 2. střední kvadratická chyba (RMSE) pro představu o velikosti nahodilých chyb, Rov. (2), 3. sklon regresní křivky procházející nulou a 4. koeficient determinace regresní křivky. Relativní hodnoty MBE a RMSE byly určeny jako poměr daného parametru a průměru dosaženého během dané sekvence simulací modelu.

$$MBE = \frac{\sum(Q_m - Q_v)}{N} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(Q_m - Q_v)^2}{N}}, \quad (2)$$

kde Q_m zastupuje simulace s pozorovanými a Q_v s vypočtenými hodnotami energie globální radiace a N je počet provedených simulací. MBE i RMSE byly vypočítány pro každý sledovaný parametr a vyjádřeny absolutně (např. mm v případě transpirace či kg/ha pro výnos zrna a hodnotu biomasy v čase zralosti) i relativně (%).

VÝSLEDKY

V případě obou plodin rozdíl mezi měřenými a vypočítanými hodnotami globálního záření nijak neovlivnil simulované termíny kvetení či zralosti, což lze vysvětlit tím, že určení fáze vývoje plodiny v růstových modelech typu CERES je řízeno hlavně teplotou vzduchu a fotoperiodou. Pokud jde o produkční parametry vybraných plodin, byly naopak zjištěné rozdíly mezi metodami velmi výrazné. Protože výsledky jednoznačně ukázaly na vyšší citlivost modelu CERES-Barley oproti modelu CERES-Wheat (přičemž ani jeden z modelů neposkytl zcela uspokojivé výsledky po dosažení vypočítaných hodnot R_G), je možné se na základě tohoto zjištění omezit na analýzu výstupů právě modelu CERES-Barley.

Jak dokládá Tab. II, metody výpočtu založené na teplotě vzduchu vykazují významně vyšší systematické odchylky než první tři metody. Při analýze výstupů modelu CERES-Barley (Obr. 2), vyšlo najevo, že se výsledky simulací při použití měřených a vypočítaných hodnot globální radiace ve většině případů statisticky významně liší a jsou významně ovlivňovány půdními charakteristikami. Jak se předpokládalo, Met. (1) se ukázala být nejpřesnější a výstupy simulačního modelu (pro evapotranspiraci, transpiraci, LAI_{max} a množství biomasy v době zralosti) se významně neliší od kontrolních simulací získaných při využití měřených hodnot R_G bez ohledu na půdní typ. V případě simulace výnosu zrna vedlo použití Met. (1) ke statisticky nevýznamnému rozdílu pouze na černozemním půdním typu, naproti tomu na fluvisolním typu všechny simulace s vypočítanými hodnotami R_G vedly k výsledkům statisticky významně odlišným od kontrolních simulací. MBE pro čtyři klíčové parametry (Tab. III) byla ve srovnání s MBE pro vstupní data mírně vyšší, avšak náhodná chyba byla poloviční. Aplikace Met. (3) založené na oblačnosti a denní teplotní amplitudě vedla k nárůstu simulovaného výnosu průměrně o 4 %. Podobné byly i výsledky při použití Met. (5) vycházející z denní teplotní amplitudy a úhrnu srážek. Metody (4), (6) a (7) nadhodnocují výnos a zaznamenávají podstatně vyšší výskyt náhodných chyb. Za povšimnutí stojí, že hodnoty MBE a RMSE pro klíčové výstupní parametry modelu (Tab. III) při aplikaci Met. (1–7) jsou nižší, než odpovídající odchylky mezi pozorovanými a vypočítanými hodnotami R_G (Tab. II).

Písečná černožem	Met.1	Met.2	Met.3	Met.4	Met.5	Met.6	Met.7
ET potenciální							
ET aktuální							
transpirace							
evaporace							
maximální LAI							
biomasa v obd. zralosti							
výnos							

Černožem	Met.1	Met.2	Met.3	Met.4	Met.5	Met.6	Met.7
ET potenciální							
ET aktuální							
transpirace							
evaporace							
maximální LAI							
biomasa v obd. zralosti							
výnos							

Fluvisol	Met.1	Met.2	Met.3	Met.4	Met.5	Met.6	Met.7
ET potenciální							
ET aktuální							
transpirace							
evaporace							
maximální LAI							
biomasa v obd. zralosti							
výnos							

2: Znárodnění statisticky významných odchylek ve výstupech modelu CERES-Barley. Srovnání simulací provedených s měřeními a sedmi testovanými metodami vypočtenými hodnotami R_G . Normalita rozdělení hodnot byla testována Kolmogorov-Smirnovovým testem. Odchytky byly následně posouzeny párovým t -testem případně Wilcoxonovým neparametrickým testem. Bílá barva značí simulace bez statisticky významného rozdílu, šedá zastupuje statisticky významný rozdíl na 5 % a černá barva na 1% hladině významnosti.

Jak je zřejmé z Tab. III, užití hodnot R_G vypočítaných podle Met. (1) neovlivňuje významně hodnotu vypočtené transpirace (Obr. 2). Výskyt náhodných chyb, vyjádřený pomocí RMSE, je rovněž nízký. Metody (2) a (5) vykazují sice též uspokojivé výsledky, nicméně hodnota MBE (a v případě Met. (5) také RMSE) je ve srovnání s Met. (1) dvakrát vyšší. U metod (4), (6) a (7) se MBE průměrně pohybuje mezi 7,7 % a 9,8 % s výskytem nahodilých chyb až 10 %. Při analýze výstupů LAI_{max} a celkového množství biomasy v období zralosti byly výsledky pozorování obdobné. Zatímco výstupy Met. (1) vykazaly průměrnou hodnotu MBE 0,7 %, Met. (7) dokonce více než 8 %. RMSE u všech testovaných metod přesáhla 10 %, u metod (6) a (7) dokonce více než 13 %. Ačkoli relativní odchylka množství biomasy je nízká, vyjádřeno v konkrétních číslech jde o průměrné pod- či nadhodnocení o 60–105 kg/ha dle Met. (1) a 700–900 kg/ha dle Met. (7) v závislosti na půdním typu.

Odchylka v simulovaných výnosech byla nejvyšší v případě Met. (6) a (7). Mimo Met. (1) vykazalo užití vypočítaných hodnot R_G významné změny hodnot simulovaného výnosu. Statistické testy prokázaly, že tyto rozdíly jsou statisticky významné pro všechny simulace, s výjimkou Met. (1) na černožemi. MBE metod založených na době slunečního svitu byla –

2,2 % pro Met. (2) a 1,2 % pro Met. (1), což odpovídá odchylce 60–120 kg/ha podle půdního typu. MBE Met. (3) a (5) leží mezi 3,6 % a 4,2 %, zatímco v případě ostatních metod je téměř dvojnásobná, což odpovídá 550 kg/ha. Jak vyplývá z Obr. 3, Met. (1) vykazuje 17 případů odchylky vyšší než ± 10 % a ve čtyřech případech (z 291) dokonce ± 25 %. Aplikace Met. (2) zdvojnásobuje výskyt odchylek ± 10 %, ale pouze ve třech případech přesahuje ± 25 %. Met. (3) přesahuje odchylky ± 10 % a ± 25 % v 68 případech (což je 24 % všech simulací). Ostatní metody (zejména Met. (7) a (6)) vykazují statisticky významný nárůst (3–9krát) odchylek vyšších než ± 25 %. Výskyt odchylek vyšších než ± 10 % a ± 25 % je rovněž výrazně ovlivněn typem půd. Na písčité černožemi byl např. počet let s odchylkou simulovaného výnosu nad ± 25 % pouze třetinový ve srovnání s černožemi typickou. I když nebyla zjištěna přímá souvislost mezi odchylkou výpočtu R_G a simulovaného výnosu, existuje statisticky významná závislost (Pearsonův korelační koeficient $r > 0,7$) mezi odchylkou transpirace a odchylkou mezi měřeními a vypočtenými hodnotami R_G na dané lokalitě. Je zřejmé, že navýšení R_G způsobuje zvýšení evapotranspirace a v případě dostatečného zásobení vodou intenzivnější průběh fotosyntézy, což vede k vyšším hodnotám LAI_{max} , množství biomasy

a výnosu zrna. Naopak při nedostatku vody model simuluje výnos podstatně nižší než odpovídá skutečnosti v důsledku intenzivnějšího stresu z nedostatku vláhy. Snížení R_G vede naopak k razantnímu poklesu simulovaného výnosu, neboť v oblasti střední Evropy je již tak nízké množství globální radiace výrazným limitujícím faktorem. Byla zjištěna vysoce významná korelační závislost mezi odchylkami aktuální transpirace a odchylkami výnosu (Pearsonův korelační koeficient $r = 0,62$ až $0,85$).

Souhrnně jsou výsledky studie prezentovány na Obr. 4, který zobrazuje vybrané metody v pořadí podle dostupnosti vstupních dat a spolehlivosti dosažených výstupů simulačních modelů. Diagram ukazuje nárůst velikosti systematických chyb, stejně jako narůstající počet ročníků s očekávaným výskytem statisticky významných odchylek. Tyto výsledky byly dosaženy

bez jakékoli místně specifické kalibrace metod výpočtu R_G , tj. byly založeny výhradně na již dostupných koeficientech a konstantách vzešlých z předchozích studií. Zakládají se na modelových simulacích z osmi lokalit při užití tří různých půdních profilů a databázi meteorologických dat z dlouhodobých měření. Ostatní vstupní parametry zůstaly pro všechny simulační běhy nastaveny výchozím způsobem beze změny. Praktickým výstupem studie je doporučení nejvhodnější metody odhadu energie globální radiace pro použití v nejrůznějších biologických i jiných aplikacích pro substituci chybějících řad měřených hodnot. S ohledem na dostupnost požadovaných vstupních meteorodat na dané lokalitě je možno dle Obr. 4 lehce určit nejvhodnější metodu splňující požadovaná spolehlivostní kritéria.

II: Přehled metod výpočtu R_G ; jako měřítko spolehlivosti metod jsou použity hodnoty regresních koeficientů, roční hodnoty MBE a RMSE vzhledem k pozorovaným hodnotám; výsledky jsou založeny na validaci dat z osmi stanic a 97 kompletních ročníků pozorování

Parameter	Met. (1)	Met. (2)	Met. (3)	Met. (4)	Met. (5)	Met. (6)	Met. (7)
	Ångström Prescott (1924, 1940)	Klabzuba <i>et al.</i> (1999)	Supit a van Kappel (1998)	Winslow <i>et al.</i> (2001)	Thornton a Running (1999)	Donatelli a Campbell (1998)	Hargreaves <i>et al.</i> (1985)
Roční průměr							
^{a)} R ²	0,96	0,94	0,91	0,86	0,82	0,82	0,83
^{b)} SI	0,99	1,03	0,99	0,97	0,92	0,99	0,99
^{c)} MBE	1,1	5,20	1,7	1,70	3,00	2,90	6,32
^{d)} RMSE	14,50	20,39	24,71	28,60	29,74	32,03	32,05
Vegetační období ječmene jarního (IV-VII)							
R ²	0,90	0,91	0,77	0,67	0,62	0,61	0,61
SI	1,00	0,99	0,99	1,01	0,99	1,03	1,02
MBE	0,1	0,4	2,0	6,0	2,5	8,1	9,6
RMSE	11,4	12,6	17,2	23,1	23,5	26,5	26,5
Vegetační období pšenice ozimé (X-VII)							
R ²	0,97	0,94	0,91	0,87	0,85	0,85	0,84
SI	0,99	1,02	0,99	1,01	0,99	1,02	1,01
MBE	1,3	3,4	1,4	3,6	6,3	4,0	8,1
RMSE	15,0	20,1	23,9	30,0	32,1	33,6	33,7

^{a)} Hodnota koeficientu determinace přímky lineární regrese

^{b)} Hodnota sklonu regresní přímky procházející počátkem

^{c)} Relativní hodnota roční střední chyby (MBE)

^{d)} Relativní hodnota roční střední kvadratické chyby (RMSE)

III: Spolehlivost výstupů modelu CERES-Barley při srovnání výstupů simulací provedených s měřenými a vypočtenými hodnotami R_G ; pro srovnání použity hodnoty regresních koeficientů, roční hodnoty MBE a RMSE. Výsledky jsou založeny na validaci dat z osmi stanic, tří půdních typů a 97 kompletních ročníků pozorování meteorologických dat, tzn. bylo provedeno 291 simulací.

Parametr	Met. (1) Ångström- Prescott (1924, 1940)	Met. (2) Klabzuba <i>et al.</i> (1999)	Met. (3) Supit a van Kappel (1998)	Met. (4) Winslow <i>et al.</i> (2001)	Met. (5) Thornton a Running (1999)	Met. (6) Donatelli a Campbell (1998)	Met. (7) Hargreaves <i>et al.</i> (1985)
Transpirace							
^{a)} R^2	0,93	0,91	0,84	0,80	0,78	0,77	0,74
^{b)} SI	1,00	0,99	1,03	1,08	1,03	1,10	1,10
^{c)} MBE(%)	0,6	-1,4	3,2	7,7	2,93	9,8	9,5
^{d)} RMSE(%)	5,1	6,3	9,1	12,9	10,7	15,3	16,2
LAI_maximální							
^{a)} R^2	0,95	0,94	0,90	0,87	0,83	0,85	0,81
^{b)} SI	1,00	0,98	1,01	1,07	1,02	1,09	1,08
^{c)} MBE(%)	0,3	-1,99	1,7	7,0	2,4	8,9	8,2
^{d)} RMSE(%)	6,2	7,7	9,6	13,9	13,1	16,1	17,1
Množství biomasy v době zralosti							
^{a)} R^2	0,96	0,94	0,91	0,88	0,87	0,86	0,85
^{b)} SI	1,01	0,98	1,03	1,07	1,03	1,09	1,09
^{c)} MBE(%)	0,7	-2,3	3,0	6,3	2,8	7,8	8,2
^{d)} RMSE(%)	4,9	6,2	8,2	11,8	9,9	13,9	15,4
Výnos							
^{a)} R^2	0,95	0,93	0,88	0,86	0,86	0,83	0,81
^{b)} SI	1,01	0,98	1,04	1,07	1,04	1,09	1,10
^{c)} MBE(%)	1,2	-2,2	4,2	6,7	3,6	8,4	9,2
^{d)} RMSE(%)	5,7	7,0	10,3	13,8	11,2	16,2	18,1

^{a)} Hodnoty koeficientu determinace přímky lineární regrese

^{b)} Hodnoty sklonu regresní přímky procházející počátkem

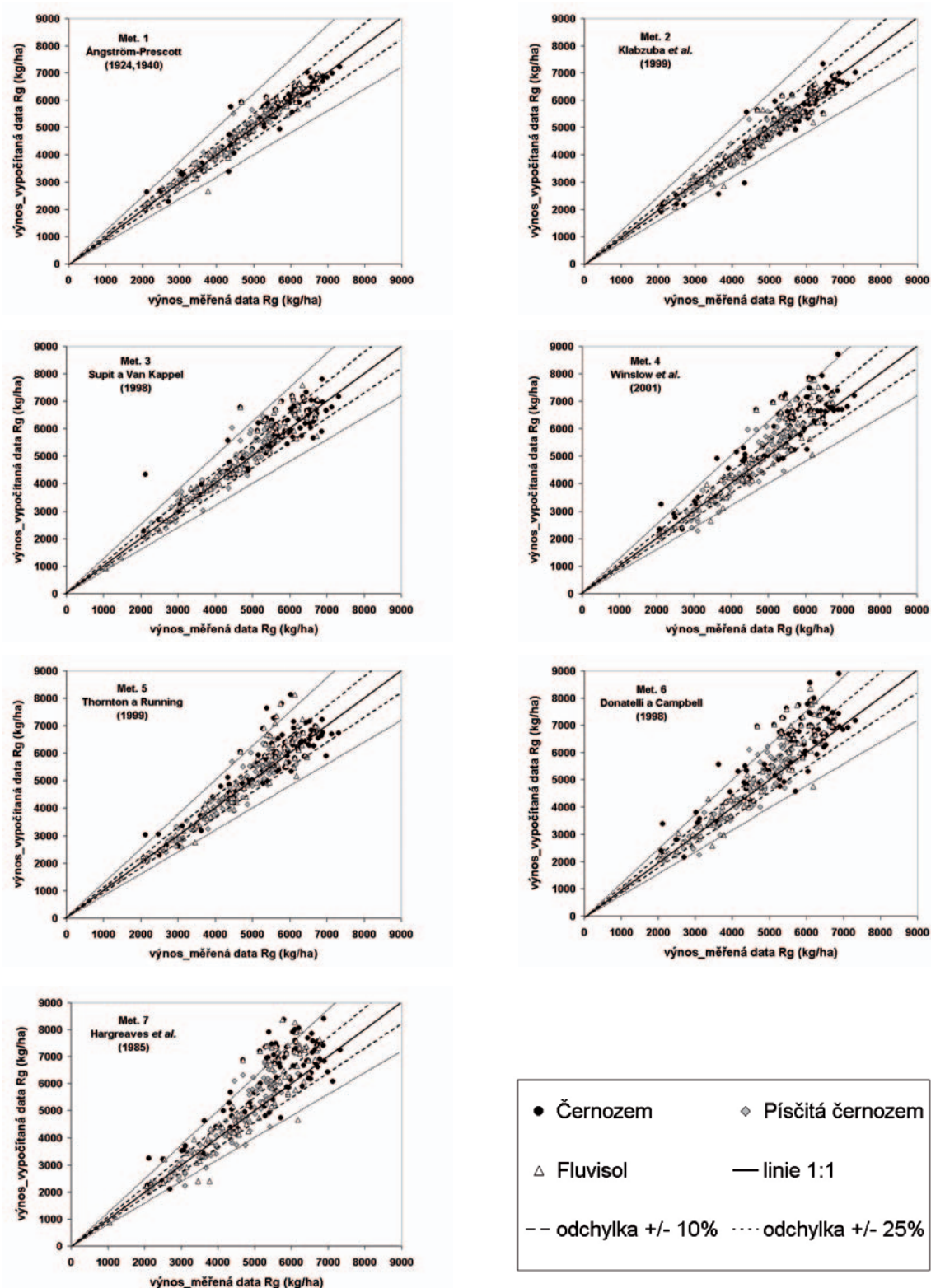
^{c)} Relativní hodnoty střední chyby (MBE)

^{d)} Relativní hodnoty střední kvadratické chyby (RMSE)

DISKUSE

Někteří autoři (např. LLASAT A SNYDER, 1998; XIE *et al.*, 2003) soudí, že vliv nepřesného výpočtu R_G na výsledek konečného výstupu simulačního modelu je zanedbatelný. Jejich studie udávají, že odchylka hodnoty R_G o 4 % způsobilo chybu v simulované potenciální evapotranspiraci 1,6–3,6 % v závislosti na ročním období. LINDSEY A FARNSWORTH (1997) zjistili, že užití oblačnosti jako výchozího prvku pro výpočet R_G vede k průměrnému podhodnocení potenciální evapotranspirace o 14 %. V některých případech byla zaznamenána odchylka až 39 %, což je mnohem více, než bylo zjištěno v naší studii u kterékoli ze sedmi testovaných metod. NONHEBEL (1993)

při analýze vlivu odchylky vypočítané R_G na simulovaný výnos pšenice jarní konstatuje, že navýšení hodnoty R_G o 10 % vede k 5% zvýšení potenciálního výnosu, zatímco stejné snížení simulovalo výnos až o 9 % nižší. BROWN A ROSENBERG (1997) zkoumali výnos pšenice simulovaný modelem EPIC – zvýšení R_G o 15 % navýšilo výnos pouze o 5 %. Podobných výsledků bylo dosaženo v této práci pro aktuální evapotranspiraci. Všechny zmiňované studie předpokládaly neměnný rozsah systematické chyby při výpočtu R_G během všech testovaných vegetačních období. Ve skutečnosti je ale odchylka výpočtu R_G v průběhu vegetačního období vysoce variabilní (TRNKA *et al.*, 2005), což výrazně ztěžuje kvantifikaci jejího vlivu na výstup modelů.



3: Srovnání výnosů ječmene jarního simulovaných modelem CERES-Barley. Srovnání provedeno při použití měřených dat a sedmi testovaných metod odhadu R_G . Grafy prezentují výsledky simulací pro tři půdní typy.

Klesající přesnost - zvýšená dostupnost vstupních dat	Dostupná vstupní data	Vhodná metoda výpočtu R_G	Střední chyba (MBE) výnosu zrn (%)	Procentuální výskyt sezonních odchylek $> \pm 10\%$	Procentuální výskyt sezonních odchylek $> \pm 25\%$
	Trvání sluneč. svitu + spolehlivé hodnoty Angströmových koeficientů	Met.(1) Ångström - Prescott	ječmen jarní: 1.6 pšenice ozimá: 0.8	ječmen jarní: 6.0 pšenice ozimá: 5.0	ječmen jarní: 1.4 pšenice ozimá: 0.4
	Skutečná doba slunečního svitu	Met.(2) Klambzuba <i>et al.</i>	ječmen jarní: -2.2 pšenice ozimá: -0.7	ječmen jarní: 12.8 pšenice ozimá: 10.3	ječmen jarní: 1.1 pšenice ozimá: 0.0
	Oblačnost + Maximální a minimální teplota vzduchu + spolehlivé hodnoty Supitových koeficientů	Met.(3) Supit a van Kappel	ječmen jarní: 4.2 pšenice ozimá: 2.0	ječmen jarní: 24.1 pšenice ozimá: 19.1	ječmen jarní: 1.8 pšenice ozimá: 2.1
	Maximální a minimální teplota vzduchu + denní úhrn srážek	Met.(5) Thornton a Running	ječmen jarní: 3.6 pšenice ozimá: 4.2	ječmen jarní: 24.1 pšenice ozimá: 22.7	ječmen jarní: 5.3 pšenice ozimá: 3.9
	Maximální a minimální teplota vzduchu	Met.(6) Donatelli a Campbell	ječmen jarní: 8.4 pšenice ozimá: 9.9	ječmen jarní: 43.3 pšenice ozimá: 41.8	ječmen jarní: 12.4 pšenice ozimá: 7.4

4: Diagram pro základní hodnocení některých z testovaných metod výpočtu denních úhrnů energie solární radiace z dostupných dat podle simulovaných výnosů ječmene jarního a pšenice ozimé. Srovnává základní statistické parametry dosažené při dosazení měřených hodnot R_G a jejich substitucí výsledky jednotlivých metod výpočtu R_G .

Poznámka: Zobrazuje výsledky testů dat z osmi stanic při hodnocení tří půdních typů, nicméně v obdobných podmínkách se dá očekávat podobné chování simulačních modelů.

AGGARWAL (1995) studoval vliv nepřesností různých faktorů (včetně R_G) na výstupy modelu WT-GROWS při simulaci výnosů pšenice v semiaridních, tropických a subtropických oblastech Indie. Shledal, že ve srovnání s úhrnem srážek je vliv nepřesných hodnot R_G nevýznamný. Testy modelu ALMANAC ukázaly významnou variabilitu výnosů nezavlažované kukuřice (-12 % až +17 %) v osmi texaských okresech při snížení R_G o 11 % během vegetačního období, zatímco při zvýšení R_G o 10 % byl výnos ovlivněn o -8 % až +3 % oproti kontrolním hodnotám (XIE *et al.*, 2003). Také v průběhu této studie byly měřené hodnoty R_G pokusně modifikovány. DE JONG A STEWART (1993) použili hodnoty R_G odvozené pomocí denního rozsahu teplot vzduchu a úhrnu srážek (při RMSE 10,7–14,3 %) pro růstový model WOFOST. Rozdíl v simulovaném potenciálním výnosu pšenice (neovlivněném vodním či nutričním stresem) na základě měřených a vypočítaných hodnot R_G byl průměrně 344 až 643 kg/ha v závislosti na lokalitě. Z toho lze odvodit, že více než 88 % výnosů bylo simulová-

no s odchylkou menší než $\pm 15\%$, což za obdobných podmínek (výsledky metod (4) a (5)) přibližně koresponduje s našimi závěry. RIVINGTON *et al.* (2002) zjistil na základě práce s modelem CropSyst v jižní Anglii, že nejlepší výsledky je dosahováno, je-li jako prediktor R_G použita doba slunečního svitu.

I když se Met. (6) projevila jako nejméně vhodná, každá z testovaných metod vykazovala významnou odchylku. Je proto třeba velmi pečlivě analyzovat výsledky simulačních modelů založených na vstupu odhadnutých hodnot R_G . Z dosažených výsledků vyplývá, že užití doby slunečního svitu jako prediktoru R_G sice odchylku minimalizuje, ale i tento přístup vede v některých případech k odchylkám simulovaného výnosu větším než 25 %. V zásadě se tak potvrdila vstupní hypotéza, tedy že vliv nepřesnosti hodnot R_G je v některých ročnících oslaben a v jiných propagován vlivem nelineárního charakteru vztahů v růstových modelech. Možnost obtížně predikovatelné chyby v simulovaných výnosech způsobený vstupními R_G daty nepostihuje pouze modely typu CERES. Je totiž

nepochybné, že také např. statistické modely užívající R_G jako nezávislou proměnnou mohou být její nepřesností olivněny (např. LANDAU *et al.*, 1998). Tato zjištění by měla být podnětem k dalšímu vývoji přesných a široce aplikovatelných metod výpočtu denních hodnot R_G založených více na fyzikálních principech, stejně jako je důležité zvýšení hustoty sítě stanic pro přímé měření globální radiace. Snížení dosavadních nedostatků ve výpočtu hodnot R_G by pak mělo vyústit ve zpřesnění následných aplikací.

Tato studie se striktně zabývá zkoumáním chování růstových simulačních modelů v podmínkách středoevropského regionu (viz. Obr. 1); ačkoli je možné její výsledky srovnávat v rámci diskuse s obdobnými výzkumy v jiných částech světa, považují autoři za vhodné podotknout, že vzhledem ke specifickým klimatickým podmínkám zájmového území není možno použít rozhodovacího schématu pro výběr nejvhodnější metody (Obr. 4) v jiných geografických či klimatických podmínkách bez předchozí náležité verifikace.

SOUHRN

Vypočítané hodnoty energie globálního záření (R_G) pro použití jako vstup do růstových modelů jsou zatíženy chybami, které mohou ovlivnit přesnost a kvalitu výstupů právě těchto růstových simulačních modelů. Byla provedena detailní analýza výskytu chyb za použití často užívaných růstových modelů CERES-Barley a CERES-Wheat a databáze meteorologických dat z osmi stanic reprezentujících hlavní výrobní oblasti České republiky a Rakouska. Bylo prokázáno, že nahrazení měřených hodnot R_G – byť aplikací Met. (1) s nejnižší odchylkou – významně ovlivňuje klíčové parametry modelových výstupů. V 5–6 % případů lze očekávat odchylku vyšší než ± 10 %, přičemž ani výskyt významnějších chyb (± 25 %) není zanedbatelný. Při aplikaci metody založené na denním rozsahu teplot a oblačnosti (Met. (3)) je přesnost simulovaných výnosů a dalších výstupů modelů nižší, avšak stále akceptovatelná. V tomto případě se výskyt chyby nad ± 10 % zvyšuje přibližně na 20 % případů (v závislosti na plodině), při zdvojnásobení pravděpodobnosti výskytu významné odchylky (± 25 %) oproti Met. (1). Využití metod založených pouze na denním rozsahu teplot vzduchu pro účely předpovědi výnosů, popř. pro hodnocení vlivu klimatické změny, je sporné, neboť pravděpodobnost výskytu významných odchylek (stejně jako systematických chyb) je velmi vysoká.

Tato zjištění by měla být podnětem k dalšímu vývoji přesných a široce aplikovatelných metod odhadu denních úhrnů R_G založených spíše na fyzikálních principech. Jednou z možností může být užití běžně měřených meteorologických prvků (např. teplota a tlak vodních par) v kombinaci s např. denní sumou srážek či průměrnou oblačností. Snížení nedostatků ve výpočtu hodnot R_G by mělo vést ke zvýšení spolehlivosti všech následně aplikovaných výpočtů.

metody výpočtu globální radiace, růstové simulační modely, citlivostní analýza, výnos plodin

Studie byla vypracována s podporou projektu GAČR 521/03/D059. Autoři by rádi poděkovali Rakouské meteorologické službě (ZAMG) a Českému hydrometeorologickému ústavu (Ozonové a sluneční observatoři v Hradci Králové) za poskytnutí dat nezbytných pro tuto studii.

LITERATURA

- AGGARWAL, P. K.: Uncertainties in crop, soil and weather inputs used in growth models implications for simulated outputs and their applications. *Agricultural systems*, 1995, 48, 361–384.
- ÅNGSTRÖM, A.: Solar and terrestrial radiation. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 1924, 50, 121–125.
- BROWN, A. R., 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. 1997.
- DE JONG, R., STEWART, D. W.: Estimating global solar radiation from common meteorological observations in western Canada. *Can. J. Plant. Sci.*, 1993, 73, 509–518.
- DONATELLI, M., CAMPBELL, G. S.: A simple method to estimate global radiation. *Proceedings of the 5th ESA conference*, Nitra, 1998, 133–134.
- DUBROVSKÝ, M.: Creating Daily Weather Series With Use of the Weather Generator. *Environmetrics*, 1997, 8, 409–424.
- DUBROVSKÝ, M., NEMEŠOVÁ, I., KALVOVÁ, J.: Uncertainties in Climate Change Scenarios for the Czech Republic. *Climate Research* (in press), 2004.
- 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, Volume 171, Issue 3, pp 223–246.
- GODWIN, D. C., RITCHIE, J. T., SINGH, U., HUNT, L.: A User's Guide to CERES Wheat V2.10. *International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, AL*, 1989.
- HARGREAVES, G. L., HARGREAVES, G. H., RILEY, P.: Irrigation water requirement for the Senegal River Basin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1985, ASCE 111, 265–275.
- HOOGENBOOM, G., JONES, J. W., WILKENS, P. W., BATCHELOR, W. D., BOWEN, W. T., HUNT, L. A., PICKERING, N. B., SINGH, U., GODWIN, D. C., BEAR, B., BOOTE, K. J., RITCHIE, J. T., WHITE, J. W.: Crop models, DSSAT Version 3.0. *International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer, University of Hawaii, Honolulu*, 1994, 692 pp.
- HUNT, L. A., KUCHAR, L., SWANTON, C. J.: Estimation of solar radiation for use in crop modelling. *Agric. For. Meteorol.*, 1998, 91, 293–300.
- KAPLER, P.: Metody výpočtu globální radiace. *Diplomová práce*, MZLU Brno, 2003.
- KLABZUBA, J., BUREŠ, R., KOŽNAROVÁ, V.: Model výpočtu denních sum globálního záření pro použití v růstových modelech. *Proceedings of the "Bioklimatologické pracovní dny"*, Zvolen, 1999, 121–122.
- LINDSEY, S. D., FARNSWORTH, R. K.: Sources of solar radiation estimates and their effect on daily potential evaporation for use in streamflow modelling. *J. Hydrol.*, 1997, 201, 348–366.
- LLASAT, M. C., SNYDER, R. L.: Data error effect on net radiation and evapotranspiration estimation. *Agric. For. Meteorol.*, 1998, 91, 209–221.
- NONHEBEL, S.: The importance of weather data in crop growth simulation models and assessment of climate change effects. *Ph.D. Thesis*, Wageningen Agriculture University, 1993, 144 pp.
- OTTER-NACKE, S., RITCHIE, J. T., GODWIN, D. C., SINGH, U.: A user's guide to CERES-BarleyV2.10. *International Fertilizer Development Center Simulation manual*, 1991, IFDC-SM-3. 87 pp.
- PRESCOTT, J. A.: Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Trans. R. Soc. South Australia*, 1940, 64, 114–118.
- RIVINGTON, M., MATTHEWS, K. B., BUCHAN, K.: A comparison of methods for providing solar radiation data to crop models and decision support systems. *1st biennial meeting of the International Environmental Modelling and Software Society*, 24–27 June, Lugano, Switzerland, 2002, 3, 193–198.
- SUPIT, I., VAN KAPPEL, R. R.: A simple method to estimate global radiation. *Solar Energy*, 1998, 63, 147–160.
- THORTON, P. E., RUNNING, S. W.: An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity and precipitation. *Agric. For. Meteorol.*, 1999, 93, 211–228.
- TRNKA, M., DUBROVSKÝ, M., ŽALUD, Z.: Climate change impacts and adaptation strategies in spring barley production in the Czech Republic. *Climatic Change*, 2004, Vol. 64, 227–255.
- TRNKA, M., ŽALUD, Z., EITZINGER, J., DUBROVSKÝ, M.: Quantification of uncertainties introduced by selected methods for daily global solar radiation estimation. *Agric. For. Meteorol.*, 2005, Vol. 131, 54–76.
- WINSLOW, J. C., HUNT, E. R., PIPER, S. C.: A globally applicable model of daily solar irradiance estimated from air temperature and precipitation data. *Ecol. Modelling*, 2001, 143, 227–243.
- WYSER, K., O'HIROK, W., GAUTIER, C., JONES, C.: Remote sensing of surface solar irradiance with correction for 3D cloud effect. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80, 272–284.
- XIE, Y., KINIRY, J. R., WILLIAMS, J. R.: The ALMANAC model's sensitivity to input variables. *Agricultural Systems*, 2003, 78, 1–16.

Adresa

Ing. Pavel Kapler, Ing. Mgr. Miroslav Trnka, Ph.D., Doc. Ing. Zdeněk Žalud, Ph.D., Ústav agrosystémů a bioklimatologie, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Česká republika, e-mail: pavel.kapler@centrum.cz, e-mail: mirek_trnka@yahoo.com, e-mail: zalud@mendelu.cz, Josef Eitzinger, Ao. Univ. Prof. Dipl. Ing. Dr. nat. techn., Universität für Bodenkultur Wien, Department Wasser, Atmosphäre und Umwelt (WAU), Gregor Mendel Straße 33, A-1180 Wien, Österreich, e-mail: josef.eitzinger@boku.ac.at

