národní
úložiště
šedé
literatury

Aplikace růstových modelů pro lokální hodnocení dopadů změny klimatu na vybrané plodiny

Hlavinka, Petr
2015

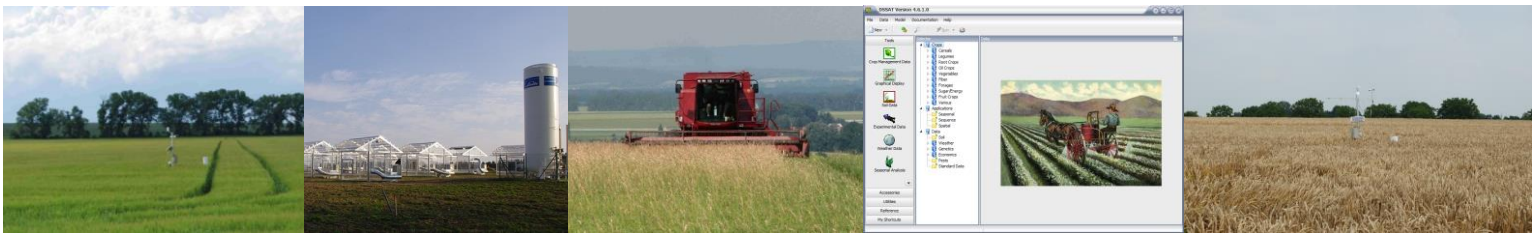
Dostupný z http://www.nusl.cz/ntk/nusl-201485

Dílo je chráněno podle autorského zákona č. 121/2000 Sb.

Tento dokument byl stažen z Národního úložiště šedé literatury (NUŠL).

Datum stažení: 26.04.2024

Další dokumenty můžete najít prostřednictvím vyhledávacího rozhraní nusl.cz .



METODIKA PRO PRAXI

Aplikace růstových modelů pro lokální hodnocení dopadů změny klimatu na vybrané plodiny

Petr Hlavinka a kol.

Poděkování:

„Metodika je výsledkem řešení výzkumného projektu Národní agentury pro zemědělský výzkum QJ1310123 „Růstové modely jako nástroj pro zvýšení produkčního potenciálu a potravinové bezpečnosti ČR v podmínkách změny klimatu“. Metodika vznikla na pracovišti Centra výzkumu globální změny AV ČR v.v.i, (CzechGlobe) s podporou MŠMT v rámci programu NPU I, číslo projektu LO1415.

© Centrum výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i. , 2015

PETR HLAVINKA, MIROSLAV TRNKA, JAN BALEK, MARTIN DUBROVSKÝ, EVA POHANKOVÁ, ZDENĚK ŽALUD

Aplikace růstových modelů pro lokální hodnocení dopadů změny klimatu na vybrané plodiny

METODIKA PRO PRAXI

Centrum výzkumu globální změny AV ČR v.v.i

2015

Aplikace růstových modelů pro lokální hodnocení dopadů změny klimatu na vybrané plodiny

Metodika je zaměřena na přehledný popis problematiky využití specializovaných softwarových nástrojů nazývaných růstové modely s důrazem na jejich aplikaci pro hodnocení dopadů změny klimatu na lokální úrovni. Ambicí této publikace je seznámit čtenáře se stručnou historií vývoje růstových modelů, jejich členěním, aktuálními trendy jejich vývoje a využití, ale v první řadě prezentovat metody přípravy vstupních databází, prvotního nastavení modelů, kalibraci jejich parametrů, přes ověření spolehlivosti prostřednictvím nezávislého vzorku dat (validace), propojení se scénáři očekávaného vývoje klimatu v budoucnu až po hodnocení dopadů změny podmínek na významné polní plodiny a vybrané reprezentativní lokality v České republice.

Using of crop growth models for local climate change impact assessment on selected crops

This publication is focused on the description of specialized software named as crop growth models and its using emphasizing the application for climate change impact assessment at local scale. The ambition of this publication is to introduce brief history of the crop growth models development, its classification, actual trends of their progress and applications and last but not least, present procedure leading to the preparation of the input datasets, the initial setup, parameters calibration, validation through set of independent datasets and consequently the implementation of climate change scenarios for assessment of possible impact of future conditions on selected important field crops and set of representative sites in the Czech Republic.

Oponenti:

Ing. Jan Haberle, CSc. - Výzkumný ústav rostlinné výroby v.v.i

Ing. Vladimíra Horáková - Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský

Metodika je určena především zemědělským podnikům, zemědělským poradcům a zástupcům veřejné správy.

Metodiku schválil Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský (ÚKZÚZ) Hroznová 2, 656 06 Brno pod č.j. 126993/2015)

OBSAH

I. Cíl metodiky 6

II. Vlastní metodika 7

1. Úvod 7

2. Historie vývoje růstových modelů, jejich popis, třídění a současné trendy využití 8

3. Lokální kalibrace a validace růstových modelů 12

4. Příprava vstupních meteorologických dat odpovídajících scénářům změny klimatu 17

5. Propojení růstových modelů a scénářů změny klimatu 20

6. Posouzení dopadů změny klimatu na vybrané polní plodiny 21

7. Závěr 32

III. Srovnání novosti postupů 34

IV. Popis uplatnění certifikované metodiky 34

V. Ekonomické aspekty 34

VI. Seznam použité literatury 35

VII. Seznam publikací, které předcházely metodice 37

I. CÍL METODIKY

Cílem předkládané metodiky je nabídnout přehled vybraných metod a prezentace příkladů lokálních výsledků o dopadech změny klimatu na vybrané polní plodiny, které byly získány prostřednictvím růstových modelů. Metodika je určena zejména čtenářům z řad zástupců zemědělské praxe, úředníků veřejné správy, vědeckých pracovníků a rovněž zástupcům širší odborné veřejnosti a je koncipována tak, aby umožnila vytvořit si představu o jednotlivých krocích vedoucích k určení dopadů budoucích klimatických podmínek na rostlinnou produkci. Cílem je rovněž zlepšit informovanost o možnostech lokální aplikace růstových modelů a jejich využití pro rozhodovací procesy na úrovni lokality, ale i vyšší územní jednotky a to jak z hlediska majitelů pozemků či hospodářů, tak odpovídajících správních orgánů. Jedním z hlavních cílů je prezentovat lokální výsledky tak, aby mohla být hledána vhodná adaptační opatření a to jak v současných, tak budoucích klimatických podmínkách.

II. VLASTNÍ METODIKA

1. Úvod

Úkolem zemědělského sektoru je plnění řady významných funkcí, které jsou z pohledu lidské existence naprosto klíčové. Mezi zcela zásadní úkoly můžeme zařadit produkci uspokojující potřebu potravin a surovin. Ačkoliv se jedná o velmi tradiční obor lidské činnosti, neustále se musí vyvíjet, aby dokázal reagovat na změny poptávky v důsledku velikosti populace, stravovacím návykům a preferencím, potřebám navazujících oborů využívajících produkty zemědělské prvovýroby, až po vliv vývoje přírodních podmínek, ekonomických podmínek, vývoje legislativního rámce, dotačních podmínek a nárokům vzhledem k ochraně přírody a životního prostředí. To platí jak pro aktivity rostlinné tak živočišné zemědělské produkce. Vzhledem k tématu předkládané metodiky budou v následujícím textu komentovány souvislosti týkající se zejména aspektů produkce polních plodin.

Z hlediska vývoje oboru patří mezi základní bilanční faktory snaha o zvyšování efektivity hospodaření, tj. optimalizace poměru mezi vstupy (energie, hnojiva, prostředky ochrany rostlin, práce, …) a úrovní dosažené produkce s důrazem jak na kvantitu tak kvalitu při únosné míře rizika (tj. s akcentem na stabilitu). Již řadu let je pak do popředí zájmu kladena i potřeba tzv. trvalé udržitelnosti rozvoje či hospodaření. To by se dalo definovat např. jako takové hospodaření, které uspokojuje potřeby současné populace bez omezení schopnosti budoucích generací naplňovat jejich potřeby. Ve spojení se zemědělskou činností by se trvalá udržitelnost dala definovat jako takové využití přírodních zdrojů pro zemědělskou produkci, které tyto zdroje neničí a při kterém základní potřeby producentů a spotřebitelů mohou být naplňovány dlouhodobě, sociálně, ekonomicky a environmentálně únosným způsobem. K naplňování výše uvedených snah bezesporu napomáhá neustálý vývoj a úroveň poznání díky intenzivním výzkumným aktivitám. Jako významné je třeba brát i zdokonalování vzdělávacího procesu či dostupnost nejnovějších technologií pro optimální zpracování půdy, zakládání porostů, jejich následné cílené ošetřování, sklizeň atd. Na druhé straně jsme ale svědky probíhajících změn životního prostředí, kdy např. dochází v řadě regionů a lokalit k postupné degradaci půdní úrodnosti, jakožto základní, zcela nenahraditelné podmínky pro produkci polních plodin. Jedná se např. o dopady vodní a větrné eroze, která odnáší cenné vrstvy půdního profilu z polí, významným faktorem je snižování obsahu a kvality organické hmoty v půdě díky menšímu podílu aplikace organických hnojiv či absenci víceletých pícnin, což je významnou podmínkou půdní úrodnosti. Současně v řadě případů dochází ke zhoršování fyzikálních vlastností půdy (struktura, utužení podorničí) vlivem nevhodného hospodaření apod. Tato degradace má kromě nevyčíslitelného dopadu na životní prostředí i svůj ekonomický rozměr v podobě odnosu živin z pozemků a celkovému poklesu půdní úrodnosti, což se projevuje např. zhoršenou využitelností dodaných průmyslových hnojiv či zvýšenou zranitelností a poškozením porostů nedostatkem či nadbytkem vody. Navíc jako velkou výzvu pro rostlinnou produkci lze bezesporu chápat měnící se podmínky v důsledku probíhající globální změny klimatu (Porter et al., 2014). Tento fenomén se již v řadě regionů projevil a dle aktuální úrovně vědeckého poznání lze předpokládat, že tento vývoj se nezastaví a klima se bude měnit i nadále v průběhu tohoto století. Popisu procedur vedoucích k tvorbě scénářů změny klimatu a charakteristice očekávaných změn vybraných meteorologických a klimatologických prvků budou věnovány vybrané části této metodiky stejně jako i očekávaným dopadům. V rámci úvodu pak je třeba zmínit, že na finální úroveň průměrných výnosů v daných regionech i výsledky pro jednotlivé ročníky a plodiny budou mít vliv kombinace pozitivních i negativních faktorů. Jejich vzájemný poměr bude různý pro jednotlivé regiony a plodiny z dlouhodobého hlediska (jako průměry) i z hlediska jednotlivých sezón (variabilita). Očekává se, že některé regiony a plodiny budou díky teplejším a

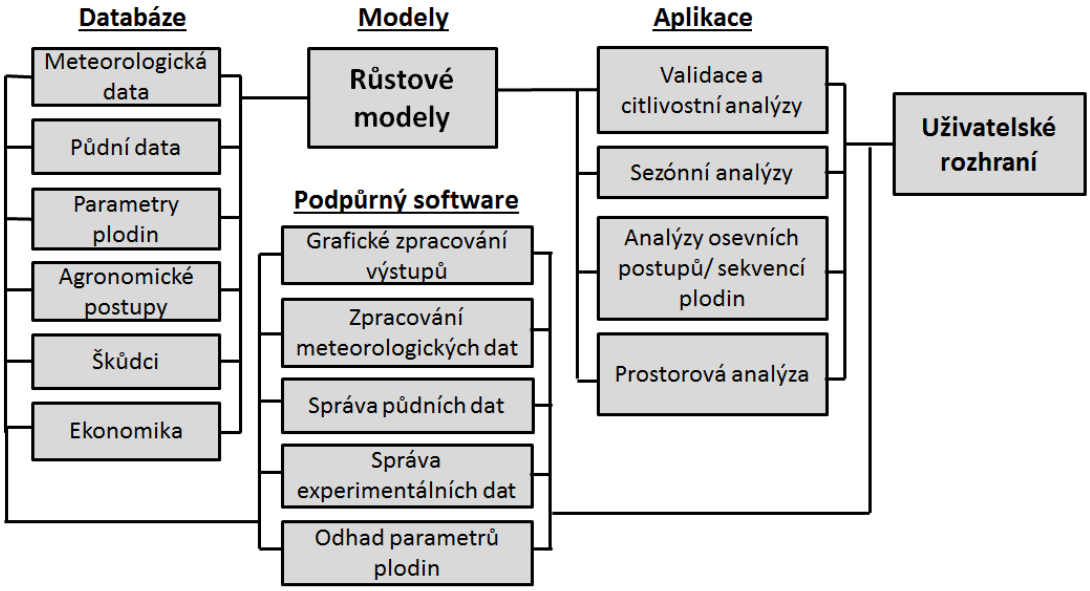
sušším podmínkám zvýhodněny (obecně chladnější regiony s dostatkem srážek a teplomilnější a k suchu tolerantní plodiny a odrůdy). V případě zemědělství v podmínkách střední Evropy (vč. České republiky), pak mezi výrazná budoucí rizika patří epizody zemědělského sucha a výskyt vysokých teplot vzduchu, které ať již společně se sníženou dostupností vody v půdě nebo samostatně mohou způsobovat dramatické propady produkce (např. Trnka et al., 2014).

Je třeba si uvědomit, že přesně kvantifikovat dopady budoucích klimatických a meteorologických podmínek je i přes veškeré dosavadní poznatky velmi komplikované. Jednou z možností jak tyto analýzy provádět, je využívat provedená pozorování systémů (provozní a pokusné porosty) v letech, kdy podmínky odpovídají tomu, jak předpokládáme, že bude v cílovém regionu ve zvoleném časovém budoucím horizontu. Pokud se jedná o převzetí výsledků z jiných regionů je zde často komplikace v podobě ne zcela srovnatelných půdních podmínek, odrůd a využívaných pěstitelských postupů. V případě vyhodnocování dopadů extrémních podmínek, které se již v minulosti v cílovém regionu objevily, odhady do budoucna mohou být provedeny tak, že se provede pokus o kvantifikaci frekvence takových situací pro dané období dle zvoleného scénáře změny klimatu. Tento přístup naráží na jisté omezení v podobě menšího počtu takovýchto dostupných pozorování a tudíž i spolehlivost zjištěných závěrů je omezena, případně že v nedávné minulosti nenastaly přesně takové kombinace podmínek, které lze v budoucnu očekávat (např. jiná koncentrace plynů v atmosféře). Jistou alternativou je využití tzv. manipulačních experimentů, kdy jsou v rámci pokusných porostů modifikovány podmínky tak, aby odpovídaly určitému předpokladu budoucích podmínek (např. formou zvyšování teploty v růstových komorách, změna koncentrace CO_2 ve vzduchu, redukce srážek apod.). Nevýhodou těchto manipulačních experimentů jsou vysoké náklady na technologické zázemí a vedení experimentů, což společně s jejich časovou náročností způsobuje, že je stále testován spíše nedostatečný počet možných kombinací očekávaných podmínek s dostupnými plodinami, odrůdami a způsoby hospodaření. Velmi vhodným doplněním těchto postupů a užitečnou alternativou jsou pak jednoznačně růstové modely, které jakožto specializované softwary mohou napomoci odpovědět na řadu otázek v souvislosti s dopady změněných podmínek prostředí (vč. klimatu), způsobem hospodaření, volbou plodin, odrůd apod. Kromě posouzení dopadů však nabízejí i vhodný podpůrný nástroj pro návrh a ověření možných adaptačních opatření pro zmírnění negativních důsledků a zvýšení efektivity produkce způsobem přijatelným i z hlediska ochrany životního prostředí.

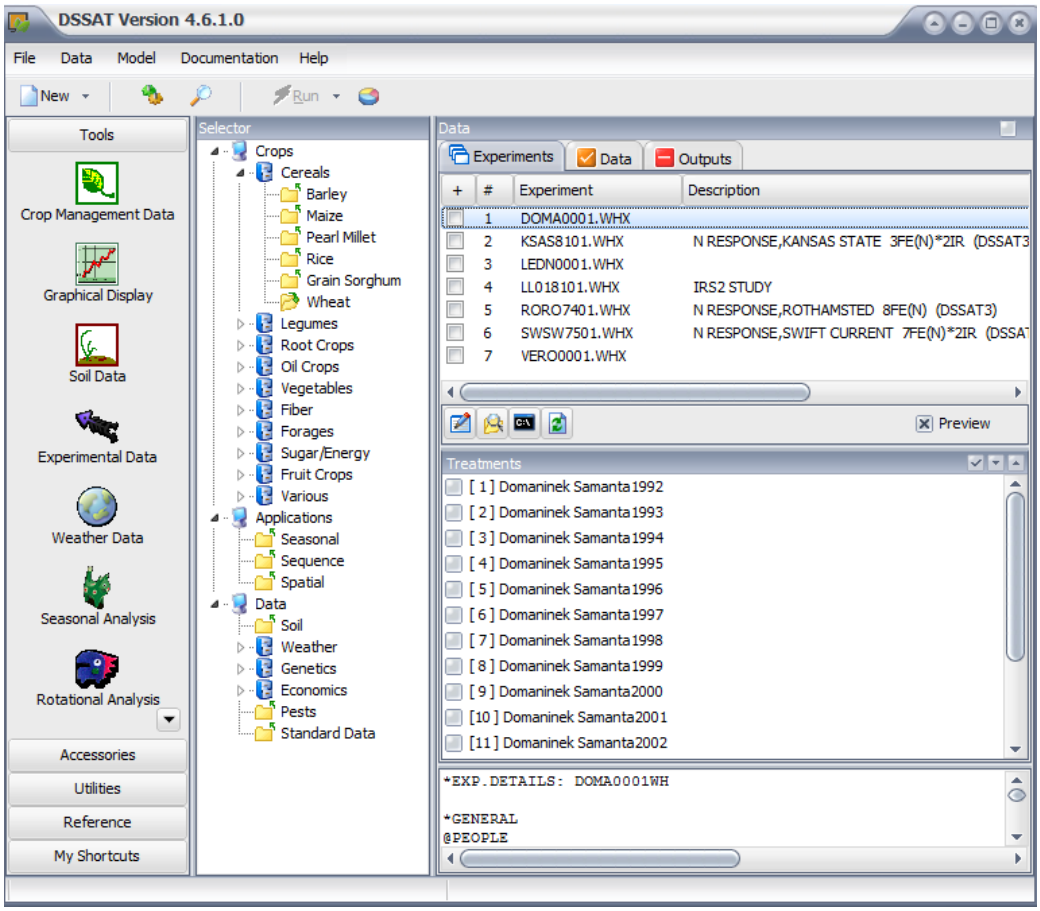
2. Historie vývoje růstových modelů, jejich popis, třídění a současné trendy využití

Specializované počítačové programy, které se snaží prostřednictvím definovaných algoritmů a výpočtů napodobit v různé míře komplexnosti chování v systému půda-rostlina-atmosféra, s důrazem na růst a vývoj plodin, označujeme jako růstové modely. Od doby prvních vizí o růstových modelech v 60. letech minulého století prodělala a stále prodělává tato oblast velmi dynamický vývoj, který souvisí s pokrokem v oblasti lidského poznání, ale rovněž vývojem výpočetní techniky. Velmi významnou úlohu v tomto procesu sehrála tzv. škola profesora de Wita (Holandsko), v rámci které byl v polovině 60. let prosazován přístup studia ekosystémů s důrazem na přesný popis obsažených vazeb. Výsledkem byly i první simulační modely (např. ELCROS, BACROS, SUCROS, MACROS, WOFOST). Druhou velmi významnou iniciativou byl mezinárodní projekt IBSNAT - International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer (s těžištěm aktivity v USA na University of Hawaii a University of Georgia). Mezi nejvýznamnější výsledky tohoto projektu lze zařadit vznik softwarového systému DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) sdružujícího růstové modely, databáze a podpůrné programy s cílem posloužit jako nástroj pro podporu rozhodovacích procesů v rostlinné produkci (Jones et al., 2003). Struktura systému DSSAT je patrná z Obr. 2.1, kde je prezentována provázanost jednotlivých částí vč. nezbytných vstupních databází, podpůrného softwaru, samotných růstových modelů a navazujících aplikací. Obecně se dá říci, že i v rámci jiných modelovacích nástrojů bývá využita podobná struktura. Databáze a celý systém je často možné spravovat a ovládat prostřednictvím uživatelského rozhraní (příklad pro DSSAT viz. Obr. 2.2), které bývá u jednotlivých modelů různé z hlediska uspořádání, přehlednosti a uživatelské přátelskosti. K tomu aby růstové modely mohly být spuštěny a používány, je třeba připravit všechna vstupní data do požadovaných formátů. Jedná se nejčastěji o údaje popisující půdní podmínky, chod meteorologických prvků (obyčejně denní minimální a maximální teplota vzduchu, suma globálního slunečního záření, úhrn srážek, rychlost větru a vlhkost vzduchu). Dále údaje o pěstebních opatřeních a parametrech modelovaných plodin a odrůd.

V současnosti se uvádí, že jsou na světě dostupné stovky růstových modelů. I přes obrovský pokrok v možnostech a komplexnosti těchto nástrojů existuje stále potenciál jejich dalšího zdokonalování a zpřesňování. V rámci aktuálních trendů jsou v posledních letech růstové modely využívány nejen pro modelování růstu a vývoje jednotlivých plodin (odděleně), ale i pro výpočty v rámci ucelených osevních postupů. Tento přístup nejen že se vyznačuje možností dosáhnout přesnějších výsledků (Kollas et al., 2015), ale nabízí i možnost modelovat půdní procesy způsobem, který se více blíží realitě a tak i komplexněji odhadovat dopady změny klimatu (např. Hlavinka et al., 2015). Další významným trendem posledních let je využívání ne pouze jediného růstového modelu, ale sady modelů (tzv. ansámblu modelů). Touto cestou lze jednak dosáhnout přesnějších výsledků (Palosuo et al., 2011; Rötter et al., 2012), ale současně, tak lze získat představu o nejistotě odhadu díky míře shody mezi růstovými modely. Pro úplnost je však třeba dodat, že jak v případě modelace osevních postupů, tak při využití ansámblů, je nutné realizovat procedury, které jsou mimořádně náročné.



Obr. 2.1 Schéma jednotlivých částí systému DSSAT využívaného pro podporu rozhodovacích procesů v rostlinné produkci, kdy klíčovou součástí je růstový model (upraveno dle publikace Jones et al., 2003)



Obr. 2.2 Ukázka uživatelského rozhraní růstového modelu na příkladu systému DSSAT.

Růstové modely se snaží napodobit nejvýznamnější procesy v rámci systému půda-rostlina-atmosféra, přičemž integrují rozhodovací postupy a rovnice popisující chování fyziologických procesů rostlin (fotosyntézy, respirace, distribuce a ukládání asimilátů, fenologický vývoj),

hydropedologických a chemických procesů v daných půdně klimatických podmínkách. Podle míry komplexnosti je můžeme rozdělit do tří skupin: i) prosté regresní modely, ii) minimalistické modely iii) dynamické růstové modely. Modely z každé skupiny mají svá opodstatnění, ale i svá specifika v podobě kombinace výhod a nevýhod či dostatků. První skupina modelů vzniká většinou při prvním kroku zkoumání systému, kdy jsou hledány vazby mezi pozorovanou proměnnou (např. výnos) a výskytem nejvýznamnějších podmínek (vliv teploty, vliv dostupnosti půdní vláhy, vliv výživy, atd.). Jejich výhodou je relativně menší náročnost na vstupní data, přičemž umožňují odhadnout limitující a optimální hodnoty daného parametru. Mezi omezení je nutné zařadit fakt, že nezohledňují vazby mezi jednotlivými faktory, mají limity v případě zobecnění nad úroveň dané lokality a v podstatě je ještě nemůžeme označit jako skutečné modely systému. V případě druhé skupiny, tzv. minimalistických modelů, se jedná o empirické modely popisující podrobněji chování systému v určitém rozsahu vnějších podmínek, přičemž kombinují nejvýznamnější faktory. Umožňují relativně dobře určit významné limitující podmínky či faktory a odhadnout jejich optimální úroveň. Jejich omezení vychází z faktu, že jsou náročnější na vstupní data a vyžadují sofistikovanější typy statistického softwaru. Na druhou stranu jsou již alespoň částečně zobecnitelné mimo podmínky, kde byli kalibrovány. Nástroje ze třetí skupiny tzv. dynamické růstové modely se snaží postihnout hlavní složky systému půda-rostlina-atmosféra, přičemž ambicí je využívat definované vazby tak, aby co nejvíce korespondovaly s realitou a to na funkčním nikoliv empirickém základu. Procesy jsou modelovány se stejnou časovou posloupností, jako se odehrávají v realitě. Tyto modely jsou nejlépe přenositelné mezi lokalitami s nutností kalibrace a validace v menší míře. Jejich nevýhodou je zejména náročnost na vstupní data, což komplikuje procesy kalibrace, validace a následné simulace modelů. Díky složitosti systému, jsou kladeny značné nároky na obsluhu z hlediska znalostí nastavení a ovládání softwaru. I přesto, že se stále jedná o zjednodušený pohled na realitu, který často pracuje v denním kroku, jedná se o vhodný nástroj pro hledání odpovědi na otázky typu, co se stane, když nastanou určité podmínky. V současné době se jedná o velmi významné nástroje pro hodnocení dopadů podmínek měnícího se klimatu a tvorbu strategických prognóz pro možné scénáře budoucího vývoje a v neposlední řadě pro hledání optimálních adaptačních opatření vedoucích k minimalizaci rizik a optimalizaci hospodaření v rámci rostlinné výroby.

Kromě predikce možných dopadů změny klimatu nacházejí růstové modely uplatnění i v jiných oblastech vědy a výzkumu, v rámci zemědělské praxe a rovněž jako nástroj využitelný a využívaný při výuce. V rámci vědy a výzkumu tyto počítačové programy napomáhají ověřit pochopení vztahů a nové poznatky v systému půda-rostlina-atmosféra. Následně pak odpovídat jak by dle známých předpokladů měl tento systém reagovat v modelových podmínkách (ty mohou být reálné či hypotetické) a identifikovat možné příležitosti a hrozby pro daný systém. V praxi je ambicí těchto nástrojů napomáhat při operativních (řešení aktuálních situací v oblasti optimalizace pěstitelských technologií, aplikace závlah, aplikace optimálního množství živin v nejlepším termínu, predikce výnosů apod.), i strategických (plánování dlouhodobých investic a opatření) rozhodovacích procesech. V rámci výuky tyto systémy umožňují studentům vyzkoušet si reakce studovaného systému velmi efektivním a atraktivním způsobem a tvoří tak vhodný doplněk ke standardním polním pokusům a demonstracím v rámci reálných porostů. Potenciální oblastí k propojení aplikace růstových modelů z hlediska vědy a praxe je spolupráce na poli šlechtitelství. Konkrétně jde o návrh optimálních vlastností plodin pro současné i budoucí klima (*in silico*) s důrazem na výši výnosu a jeho stabilitu a to i v případě výskytu nepříznivých situací (Semenov & Stratonovitch, 2015).

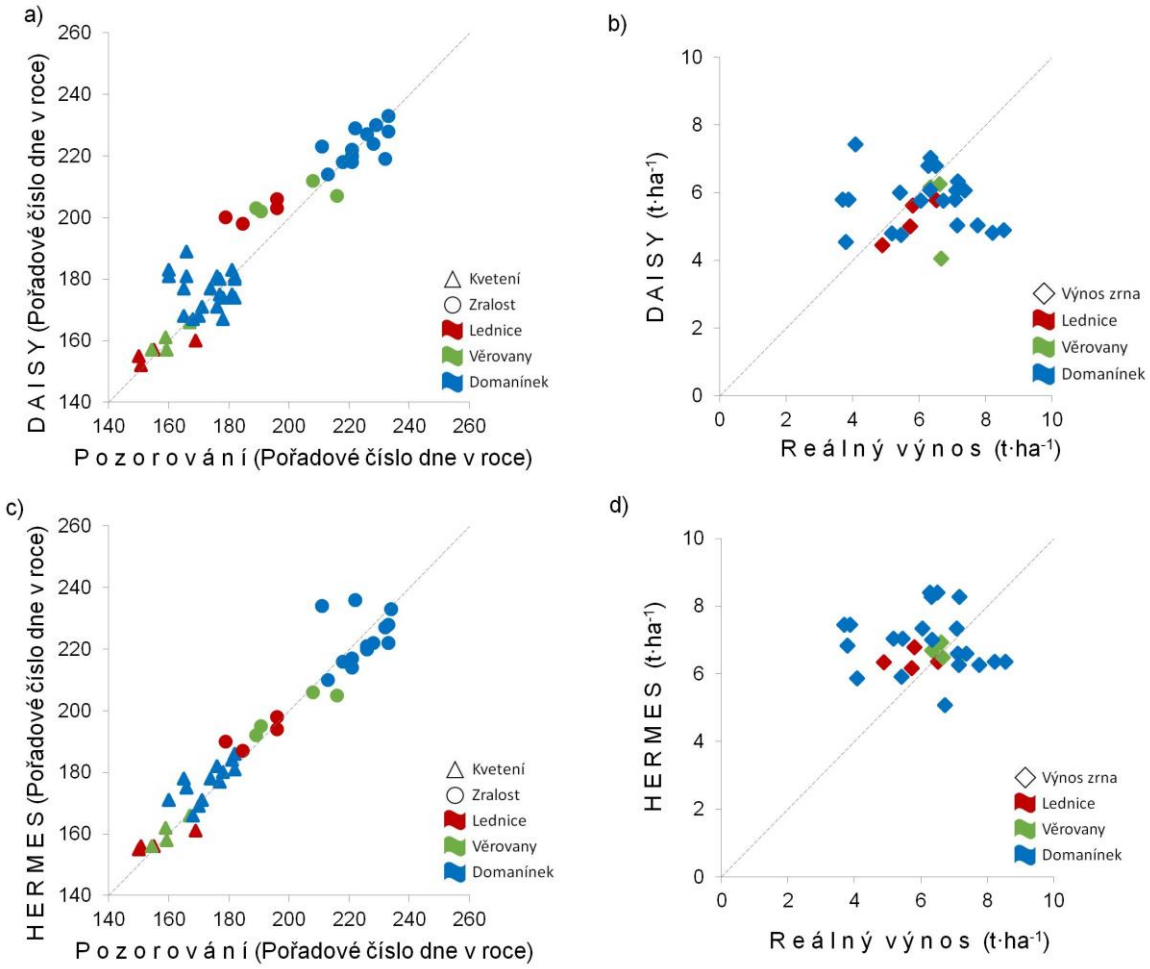
3. Lokální kalibrace a validace růstových modelů

Ačkoliv základním krokem práce s jakýmkoliv růstovým modelem je příprava všech potřebných vstupních databází, před reálnou aplikací je třeba ještě provést důkladné testování funkčnosti modelu, dále kalibraci a validaci pro cílové plodiny a dané půdně klimatické podmínky. Kalibrací rozumíme nastavení potřebných parametrů modelu, které popisují vlastnosti pěstovaných plodin či odrůd z hlediska rychlosti vývoje, průběhu fotosyntézy, spotřeby vody, tvorby biomasy, citlivosti ke stresovým faktorům apod. V průběhu kalibrace jsou výsledky modelu průběžně a často opakovaně (ve spojení s úpravou parametrů) konfrontovány s reálně pozorovanými daty z polních pokusů. Některé modely mají pro efektivní hledání optimálních hodnot parametrů speciální sady automatizovaných algoritmů (např. „GLUE Coefficient Estimator“ v případě systému DSSAT) nebo uživatel musí optimální hodnoty parametrů hledat na základě citlivostních analýz a nastavovat je ručně, případně je možné využít kombinace obou postupů. Po dosažení uspokojivých výsledků v rámci kalibrace se přistupuje k tzv. validačním běhům modelu (či validaci), kdy jsou výsledky modelu vyhodnoceny oproti datům z jiných polních pokusů či jiných let (se stejnou odrůdou), které nebyly použiti pro kalibraci. Pro účely kalibrace i validace tak mají zcela nezastupitelný význam kvalitně vedené polní pokusy, které jsou zdrojem dat umožňujících realizaci výše uvedených kroků a co nejpřesnější nastavení růstového modelu. Vzhledem k rozmanité variabilitě stanovištních podmínek, které jsou typické pro rostlinnou výrobu nejen v České republice, je ideální mít k dispozici poměrně rozsáhlé databáze. Čím kvalitnější experimentální data se podaří pro tyto účely získat, tím spolehlivější potom mohou být výstupy ze simulace růstovým modelem. Tato úvaha funguje i obráceně, kdy použití nekvalitní dat ke kalibraci vede k nižší přesnosti chování modelu. V případě kalibrace se obvykle postupuje tak, že se nejprve hledá optimální nastavení parametrů určujících délku trvání jednotlivých vývojových fází a to v pořadí od setí (např. nejprve termín vzcházení, nástup kvetení, nástup zralosti apod.) Následně lze kalibrovat pro správný odhad množství nadzemní biomasy, vývoje listové plochy, případně dalších známých proměnných jako jsou složky vodní bilance a dynamiky půdní vlhkosti a v neposlední řadě výnosu. Při použití růstových modelů je třeba počítat s určitou mírou nejistoty obsažené v simulovaných odhadech. Ta je způsobena faktem, že každý model (včetně těch nejkomplexnějších) je stále velkým zjednodušením reality (modely často fungují v denním kroku), že použitá data (meteorologická, půdní, fenologická, velikost listové plochy, výnosová …) mají různou přesnost a dokonce někdy mohou obsahovat skryté chyby. V krajních případech některá vstupní data nejsou k dispozici ve specificky požadované podobě vůbec (termín, místo, hloubka v půdě) a musejí být odvozena na základě kvalifikovaného odhadu. Na vině bývá často skutečnost, že řada dlouhodobých polních experimentů využívaná pro kalibraci a validaci modelů nebyla zakládána a vedena k tomuto účelu. Ke stanovení přesnosti modelu v daných podmínkách se většinou používá sada zvolených statistických indikátorů. Kromě korelačního koeficientu mezi pozorovanými a odhadovanými hodnotami to bývá např. ukazatel systematické chyby MBE (Mean Bias Error) a střední kvadratické chyby RMSE (Root Mean Square Error), pomocí kterého lze hodnotit průměrnou absolutní chybu (Davies & McKay 1989).

$$\text{MBE} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)}{n} \qquad \text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - S_i)^2}{n}}$$

kde S_i odpovídá odhadované hodnotě dané veličiny modelem, O_i odpovídá pozorované hodnotě dané veličiny, n je počet dvojic pozorovaných a odhadovaných hodnot.

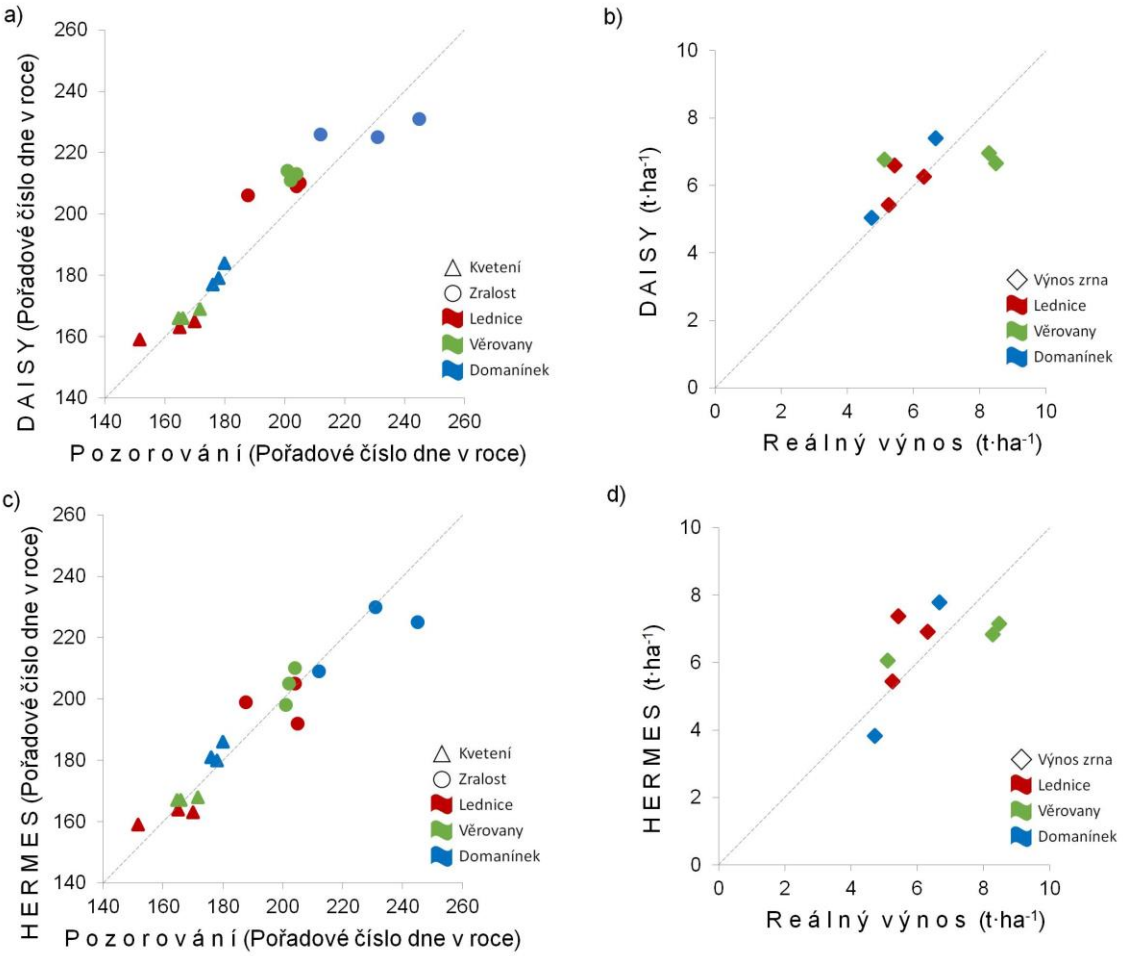
Příklady výsledků kalibrace růstových modelů DAISY a HERMES pro ječmen jarní uvádí Obr. 3.1. K tomuto účelu byla využita víceletá experimentální data pro odrůdu Tolar z polních pokusů Ústředního kontrolního a zkušebního ústavu zemědělského (ÚKZÚZ) ze tří půdně-klimaticky odlišných lokalit České republiky (Lednice, Věrovany a Domanínek) a také pozorovaná a naměřená data z polních pokusů v Domanínku vedených v letech 2011 až 2014 Ústavem agrosystémů a bioklimatologie Agronomické fakulty Mendelovy univerzity v Brně ve spolupráci s Centrem výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i. s ječmenem jarním (viz. Přehled v Tab. 3.1; odrůda Tolar 2011-2012, odrůda Bojos 2013-2014). Pokus v letech 2011-2014 byl veden speciálně pro účely kalibrace růstových modelů ve čtyřech variantách na základě kombinací 2 odlišných termínů setí (normální agrotechnický termín vs. opožděný agrotechnický termín setí o 14 dní) a 2 úrovněmi hnojení dusíkem (běžná dávka hnojení vs. zvýšená dávka hnojení). Výsledky validačních běhů v rámci této případové studii jsou zachyceny na Obr. 3.2 a srovnání dosažených výsledků ve vztahu ke kalibraci uvádí pro oba dva modely Tab. 3.2.



Obr.3.1 Grafické výsledky kalibrace růstového modelu DAISY (a,b) a HERMES (c,d) z hlediska nástupu fenologických fází kvetení a zralosti (a,c) a dosažených výnosů (b,d) na lokalitách Lednice, Věrovany a Domanínek. Jednotlivé termíny jsou definovány pomocí pořadového čísla daného dne od začátku roku.

Tab. 3.1 Přehled zahrnutých polních experimentů s ječmenem jarním z lokalit Lednice, Věrovany a Domanínek pro kalibraci a validaci růstových modelů DAISY a HERMES.

lokalita \ rok	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Lednice	kalibrace			kalibrace	kalibrace	kalibrace	validace	validace	validace								
Věrovany	kalibrace			kalibrace	kalibrace	kalibrace	validace	validace	validace								
Domanínek	kalibrace		kalibrace	kalibrace	kalibrace	kalibrace	validace	validace	validace					kalibrace	kalibrace	kalibrace	kalibrace

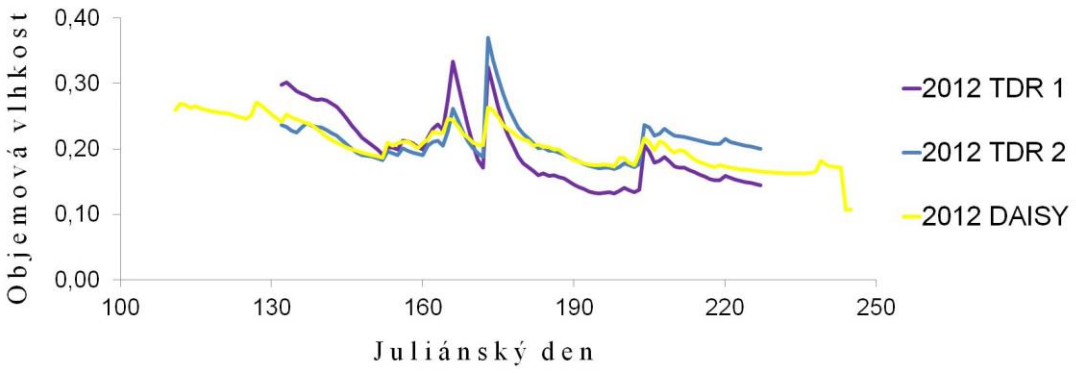


Obr.3.1 Grafické výsledky validace růstových modelů DAISY (a,b) a HERMES (c,d) z hlediska nástupu fenologických fází kvetení a zralosti (a,c) a dosažených výnosů (b,d) na lokalitách Lednice, Věrovany a Domanínek. Jednotlivé termíny jsou definovány pomocí pořadového čísla daného dne od začátku roku.

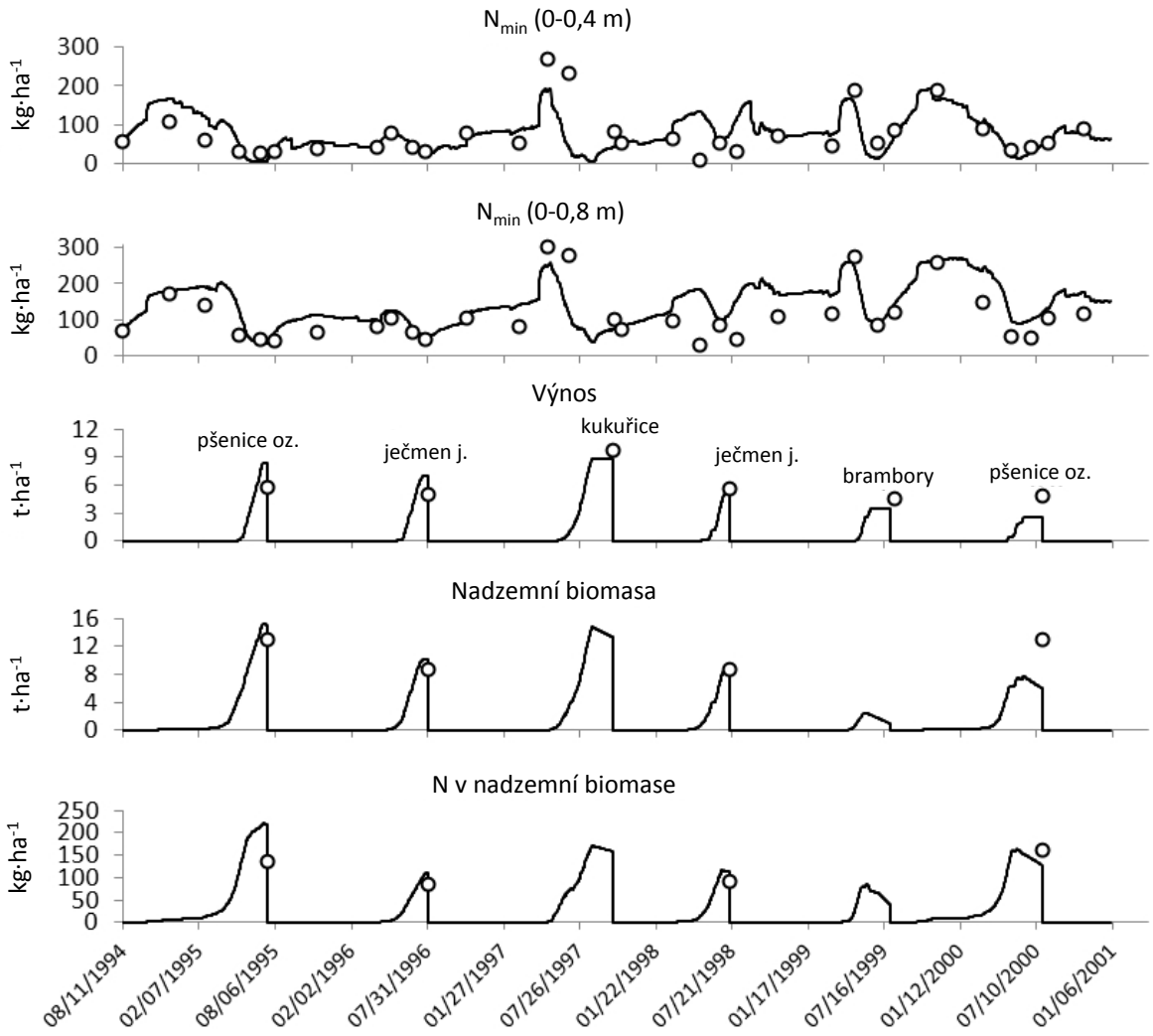
Tab. 3.2 Přehled dosažených výsledků modelů DAISY a HERMES v rámci kalibrace a validace pro ječmen jarní na lokalitách Lednice, Věrovany a Domanínek na základě statistických indikátorů střední systematické chyby MBE (Mean Bias Error) a průměrné absolutní chyby RMSE (Root Mean Square Error). Výsledky kalibračních běhů jsou uvedeny mimo závorky a validační výsledky uvnitř závorek.

			Kvetení (dny)	Zralost (dny)	Výnos zrna ($t \cdot ha^{-1}$)
MBE	Lednice	DAISY	0,0 (0,0)	13,0 (9,0)	-0,52 (0,43)
		HERMES	1,0 (0,0)	3,0 (0,0)	0,68 (0,91)
	Věrovany	DAISY	0,0 (0,0)	5,0 (10,0)	-1,06 (-0,50)
		HERMES	1,0 (0,0)	-1,0 (2,0)	-0,04 (-0,61)
	Domanínek	DAISY	4,0 (2,0)	0,0 (-2,0)	-0,41 (0,52)
		HERMES	5,0 (4,0)	0,0 (-8,0)	0,76 (0,10)
	Průměr	**DAISY**	**1,3 (0,5)**	**5,9 (5,9)**	**-0,66 (0,15)**
		HERMES	**2,0 (1,3)**	**0,5 (-2,1)**	**0,47 (0,14)**
RMSE	Lednice	DAISY	5,0 (5,0)	14,0 (11,0)	0,57 (0,68)
		HERMES	5,0 (6,0)	6,0 (10,0)	0,91 (1,18)
	Věrovany	DAISY	2,0 (2,0)	10,0 (11,0)	1,43 (1,61)
		HERMES	2,0 (3,0)	6,0 (4,0)	0,41 (1,26)
	Domanínek	DAISY	6,0 (2,0)	6,0 (12,0)	1,76 (0,56)
		HERMES	7,0 (5,0)	10,0 (12,0)	1,90 (1,02)
	Průměr	**DAISY**	**4,4 (3,1)**	**9,9 (11,3)**	**1,25 (0,95)**
		HERMES	**4,6 (4,4)**	**7,2 (8,6)**	**1,08 (1,15)**

V rámci kalibrace nemusí být hodnocená veličina reprezentována pouze jednou hodnotou za rok, jako to uvádějí příklady na Obr. 3.1 a v Tab. 3.2, ale může být využito i průběžně pozorovaných hodnot, jak je zřejmé na příkladu srovnání měřené (metoda TDR) a modelované (DAISY) dynamiky půdní vlhkosti na Obr. 3.3. Příklad pro více parametrů a více sezón v rámci nepřerušené simulace celého osevního postupu uvádí Obr. 3.4.



Obr. 3.3 Porovnání dynamiky půdní vlhkosti na základě měření metodou TDR (Time Domain Reflectometry) a odhadu pomocí modelu DAISY. Zachyceny jsou hodnoty v průběhu roku 2012 na lokalitě Domanínek pro hloubku 0-30 cm (TDR 1 odpovídá variantě s normálním termínem setí, TDR 2 je pro pozdější termín setí o 14 dní).



Obr. 3.4. Výsledky kalibrace růstového modelu HERMES pro nepřerušenou simulaci osevního postupu na stanici Lednice v letech 1995-2000. Kroužky zachycují obsah minerálního dusíku v půdních vrstvách 0-0,4 m a 0-0,8 m, dále dosažené výnosy, hmotnost nadzemní biomasy a obsah dusíku v nadzemní biomase. Linie zobrazují denní simulované hodnoty dynamiky obsahu minerálního dusíku v půdě, tvorby výnosu, nadzemní biomasy a vývoje obsahu dusíku v biomase (upraveno dle Hlavinka et al., 2014).

4. Příprava vstupních meteorologických dat odpovídajících scénářům změny klimatu

Jak již bylo uvedeno výše, růstové modely i jiné agroklimatické modely ke svým simulacím potřebují meteorologická data a tyto obvykle ve formě časových řad přízemních meteorologických veličin. V závislosti na simulovaných procesech se nejčastěji jedná o časové řady jednoho či více meteorologických prvků vybraných z následující množiny: PREC (denní úhrn srážek), TAVG (denní průměrná teplota), TMAX (denní maximální teplota), TMIN (denní minimální teplota), SRAD (denní úhrn globálního slunečního záření dopadajícího na zemský povrch), RHUM či VAPO (jako relativní či absolutní vlhkost vzduchu), WIND (denní průměrná rychlost větru). Požadovaný krok časové řady zpravidla bývá 1 den, některé modely však potřebuji data s časovým krokem 1 týden, 10 dní či 1 měsíc. V případě měsíčních řad se obvykle jedná o měsíční sumy (u srážek a slunečního záření) či průměry jednotlivých denních meteorologických charakteristik. Dále mohou některé modely požadovat i jiné charakteristiky (např. potenciální evapotranspiraci) či modifikace výše uvedených veličin (např. denní maximální hodnoty vlhkosti vzduchu či vlhkost vzduchu v konkrétní denní dobu).

Řádně kalibrované a validované růstové a agroklimatické modely lze z hlediska různého typu řad meteorologických prvků pro danou lokalitu využít k následujícím experimentům:

[A] studium vlivu přirozené variability počasí či klimatu na simulované procesy,

[B] krátkodobou/střednědobou/dlouhodobou prognózu charakteristik simulovaných procesů (např. výnosy zemědělských plodin, chod půdní vlhkosti),

[C] odhad dopadů očekávané změny klimatu na procesy simulované růstovými modely, případně citlivost simulovaných procesů na změny vybraných klimatických charakteristik.

Pro tyto experimenty jsou požadovány meteorologické řady následujícího typu:

[A] Řady reprezentující skutečný vývoj počasí (či stav klimatu). Můžou to být buď **[A1]** reálně pozorované (na meteorologických či jiných stanicích) řady příslušných meteorologických charakteristik nebo **[A2]** tzv. syntetické časové řady vytvořené pomocí specifického softwaru nazývaného jako stochastický generátor meteorologických dat (dále WG z anglického Weather Generator). Úkolem WG je vytvořit požadovaný počet syntetických řad s uživatelem definovanou délkou, které budou z hlediska vybraných statistických charakteristik jednotlivých meteorologických prvků shodné, avšak oproti měřeným hodnotám se mohou v jednotlivých dnech lišit. Pro požadované nastavení WG je provedena jeho kalibrace buď s použitím pozorovaných meteorologických řad, nebo jeho parametry byly interpolovány (odvozeny) z okolních stanic, pro něž jsou k dispozici meteorologická pozorování.

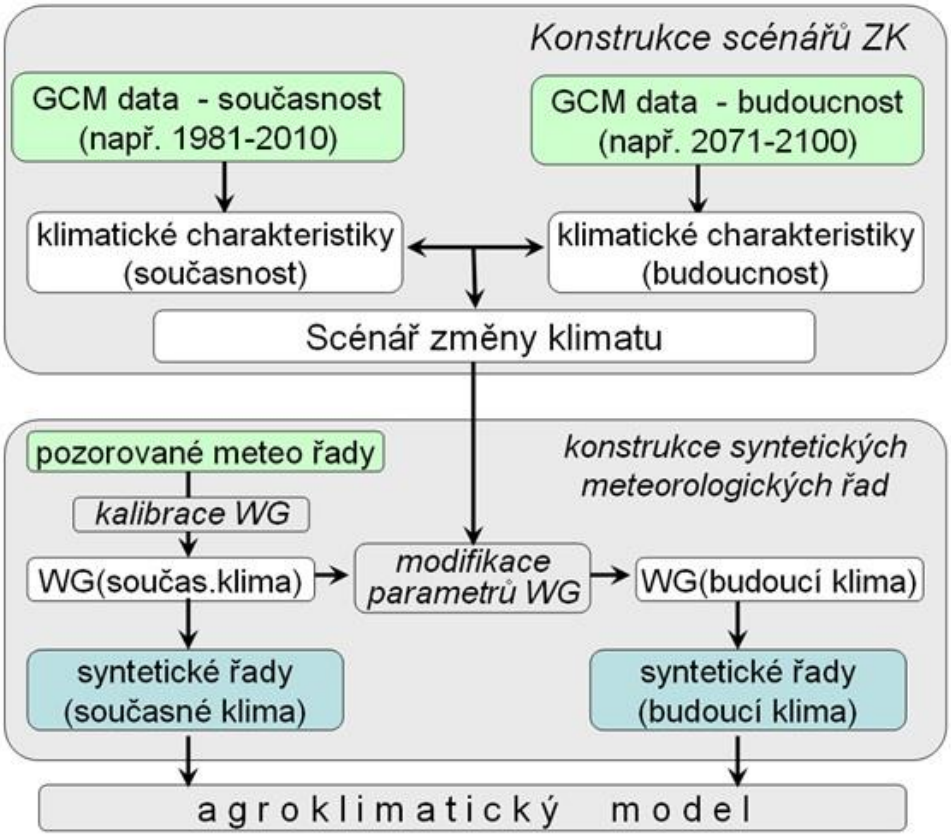
[B] Řady reprezentující předpovídaný vývoj počasí. Řady pro tento typ aplikace se skládají z pozorovaných hodnot (až do dne/týdne/měsíce, pro který jsou tato data k dispozici) a na ně pak navazují řady reprezentující předpovídaný vývoj počasí. K přípravě těchto řad lze rovněž použít stochastický generátor, který generuje syntetické řady, jež odpovídají dané předpovědi (deterministické či pravděpodobnostní). S pomocí WG lze vygenerovat několik možných realizaci syntetických řad odpovídajících dané předpovědi, jež mohou být použity k vícenásobné simulaci

daným růstovým modelem umožňující pravděpodobnostní předpověď charakteristik simulovaného procesu (například již zmíněných výnosů zemědělských plodin).

[C] K těmto experimentům jsou zapotřebí dvě časové řady: řady reprezentující současné klima a řady reprezentující budoucí klima. **[C1]** Řady reprezentující současné klima mohou být **[C1a]** pozorované řady (výhoda: pouze tyto řady mají statistickou strukturu odpovídající realitě; nevýhody: tyto řady mohou obsahovat chybějící či chybné hodnoty, jejichž výskyt komplikuje jejich využití, řady mohou být pro některé experimenty příliš krátké). **[C1b]** Druhou možností je použití syntetických řad vytvořených pomocí stochastického generátoru (výhody: WG může vytvořit libovolně dlouhou časovou řadu případně lze vygenerovat více realizací kratších, např. 30-tiletých řad reprezentujících současné a/nebo změněné klima, což umožňuje provést pravděpodobnostní předpověď studovaných procesů; při kalibraci WG je možné eliminovat vliv chybějících pozorování a při použití vhodných testů kvality i výskyt chybných pozorování; nevýhoda: statistická struktura syntetických řad nikdy nemůže na 100 % odpovídat struktuře skutečně pozorovaných meteorologických řad). **[C2]** Řady reprezentující budoucí klima: Analogicky k současnému klimatu, lze uvažovat dvě metody konstrukce těchto řad: **[C2a]** Časové řady pozorovaných hodnot meteorologických proměnných jsou přímo modifikovány podle scénářů změny klimatu. Pro teploty (průměrné, minimální, maximální) se používá aditivní (sčítání a odčítání o dané hodnoty) modifikace, zatímco pro radiaci, srážky a rychlost větru se požívá multiplikativní modifikace (tj. násobení danými parametry). Modifikace hodnot relativní vlhkosti, jež může nabývat hodnot pouze v rámci intervalu 0-100 % je poněkud složitější (aplikuje se aditivní modifikace na hodnoty vlhkosti transformované metodou "logit"). Podobný způsob modifikace lze aplikovat i na sluneční radiaci, jež může nabývat pouze hodnot v intervalu od nuly po hodnotu tzv. „extraterestrické radiace“, což je sluneční radiace, která dopadá na horní hranici atmosféry, atmosférou neprochází a není jí tedy nijak ovlivněna. **[C2b]** Meteorologické řady reprezentující změněné klima jsou vytvořeny stochastickým meteorologickým generátorem, který byl v prvním kroku kalibrován pomocí pozorovaných řad, a ve druhém kroku byly jeho parametry modifikovány podle scénáře změny klimatu. Kromě toho, že tato metoda nabízí možnost vytvoření libovolně dlouhých syntetických řad, je zde i další výhoda, kdy tato metoda umožňuje zohlednit změny nejen průměrných hodnot, ale i změny variability jednotlivých meteorologických prvků a parametrů definujících vztahy mezi proměnnými a časovou strukturou. Modifikace parametrů WG může být provedena buď pomocí tzv. scénářů změny klimatu (ZK), nebo po určitých, uživatelem definovaných, krocích (tzv. inkrementální scénáře) pomocí kterých lze provádět citlivostní analýzu. Při konstrukci syntetických řad reprezentujících změněné klima podle daného scénáře ZK lze použít dvě strategie: v prvním (jednodušším) případě se jednorázově modifikují parametry generátoru pomocí scénáře pro daný emisní scénář (např. RCP45) a konkrétní budoucí rok (např. 2050) a pak se s využitím nových modifikovaných parametrů vytvoří libovolně dlouhá časová řada reprezentující klima definované těmito parametry. Výsledné řady pak lze považovat za stacionární (v rámci dané časové řady se klima nemění) klimatické scénáře reprezentující zvolený emisní scénář a budoucí období. V druhém, složitějším případě se parametry generátoru plynule mění (v praxi je to provedeno tak, že se změní vždy k prvnímu lednu každého generovaného roku) v souladu s tím, jak roste globální teplota zemského povrchu pro daný emisní scénář. Tímto způsobem vznikají tzv. transientní scénáře, kdy pro každý jednotlivý rok syntetické řady se v tomto případě parametry generátoru mění pomocí scénáře ZK, který je dán jako součin standardizovaného scénáře ZK a změny globální teploty pro daný rok; této metodě škálování scénářů změny klimatu se říká metoda "pattern scaling".

Emisní scénáře udávají předpokládaný/možný vývoj emisí skleníkových plynů pro následujících několik desítek či stovek let (zpravidla nejméně do roku 2100). Emise jsou kvantifikovány na základě různých ekonomických a sociologických předpokladů o vývoji lidské společnosti. Vzhledem k

nejistotám vývoje rozhodujících faktorů (např. počet obyvatel, míra využití různých zdrojů energie) se vždy při studiu dopadů změny klimatu používá ne jeden emisní scénář, ale i více scénářů zohledňujících více možných trajektorií vývoje rozhodujících faktorů. V současné době se používají zejména scénáře typu RCP (např. RCP45 a RCP85), dříve to byly scénáře typu SRES (zejména SRES-A1, SRES-A2, SRES-B1, SRES-B2). Citlivost klimatu je následně rovnovážná odezva průměrné globální teploty zemského povrchu na zdvojnásobení (ekvivalentní) koncentrace CO_2 v atmosféře. Tyto hodnoty jsou následně využity při výpočtech tzv. Globálních klimatických modelů (anglicky: Global Climate Model, zkratka: GCM). Jedná se o typ modelů využívaný k simulaci klimatu nebo cirkulace atmosféry. Tyto modely vycházejí z pohybových rovnic, rovnic termodynamiky, stavové rovnice, rovnic přenosů radiační energie, rovnice tepelné bilance zemského povrchu a rovnice vodní bilance zemského povrchu. Výpočetní oblastí je zpravidla celý zemský povrch. Modely tohoto typu se využívají ke studiu přírodních (např. sluneční a sopečná činnost) i antropogenních (zejména změny koncentrace skleníkových plynů a charakteristik zemského povrchu) vlivů na klima. Druhou skupinou těchto modelů jsou Regionální klimatické modely (anglicky: Regional Climate Model, RCM). Modely tohoto typu se používají k simulaci klimatu na daném území. Podobně jako modely GCM jsou RCM modely založeny na využití rovnic popisujících fyzikální procesy v atmosféře. V porovnání s GCM modely však pracují na menší oblasti (např. oblast Evropy či Středomoří) avšak s větším časovým i prostorovým rozlišením: současné RCM modely pracují s rozlišením řádově 10 km (i větším) oproti 100 km (řádově) používaných v současných GCM modelech. Modely jsou často využívány k tzv. dynamickému downscalingu GCM modelů - v tomto režimu jsou simulace řízeny výstupy z GCM modelů a slouží tak k časoprostorovému upřesnění (downscalingu) "řídících" GCM simulací. Z výstupů těchto RCM simulací jsou pak odvozovány klimatické scénáře v jemnějším (oproti GCM) měřítku.

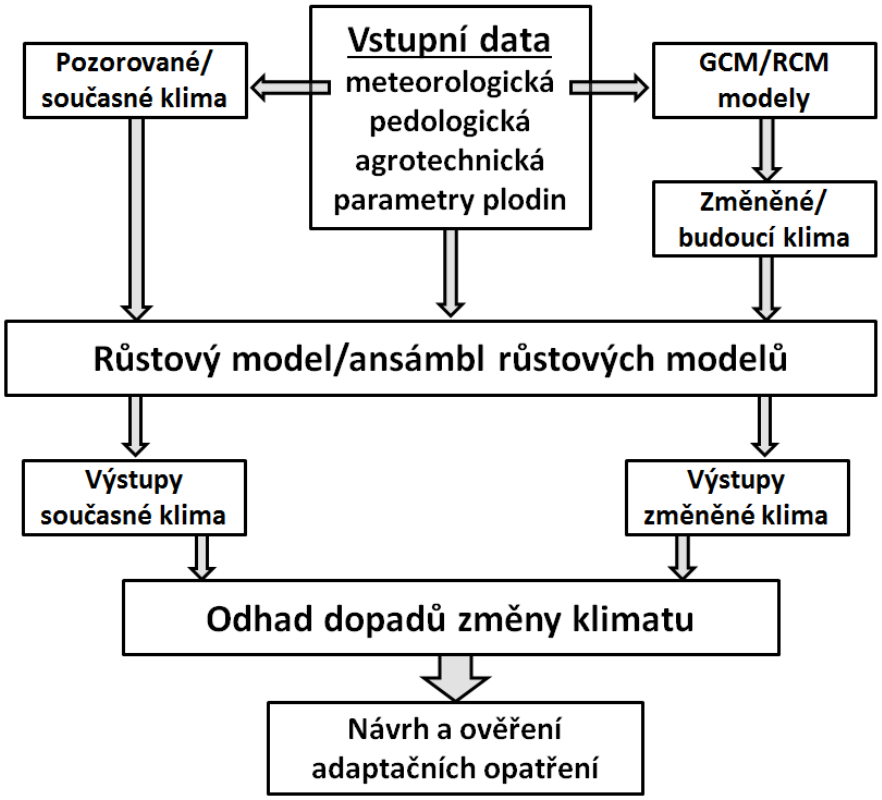


Obr.4.1 Schéma přípravy syntetických řad meteorologických prvků pro současné a budoucí klimatické podmínky dle zvoleného scénáře. V experimentu se předpokládá použití syntetických

meteorologických řad vytvořených stochastickým meteorologickým generátorem a scénáře změny klimatu odvozené z výstupů globálních klimatických modelů.

5. Propojení růstových modelů a scénářů změny klimatu

Jakmile jsou pro daný růstový model připravena veškerá vstupní data a je provedena kalibrace a validace s uspokojivými výsledky je možné přistoupit k navazujícím analýzám. Obr. 5.1 shrnuje jeden z nejčastějších způsobů využití růstových modelů, kdy dochází k propojení vstupních databází s vybraným modelem, případně s ansámblem růstových modelů za účelem hodnocení dopadů změny klimatu. Pro hodnocení vlivu změněných klimatických podmínek, je třeba mít k dispozici meteorologické řady popisující výchozí (nedávné či současné podmínky) zájmového území, ať již v podobě přímo měřených hodnot nebo syntetických řad (viz. popis v předchozí kapitole) a syntetické řady odpovídající změněným podmínkám např. dle GCM či RCM ve spojení se stochastickým generátorem meteorologických dat (viz. popis v předchozí kapitole). Pomocí výstupů mohou být následně kvantifikovány odhadované dopady změny klimatu na sledované procesy a dosažené výsledky následně využity pro návrh adaptačních opatření. Tato opatření by měla směřovat k efektivnějšímu, stabilnějšímu a šetrnějšímu způsobu hospodaření v předpokládaných klimatických podmínkách. Účinnost navrhovaných adaptačních opatření, která lze definovat prostřednictvím změny agrotechnických postupů (změna způsobu hospodaření), parametrů plodin (volba jiných odrůd či plodin) či ovlivnění půdních vlastností, pak může být vyhodnocena pomocí simulací růstového modelu nebo ansámblu růstových modelů s pozměněnými vstupními daty odpovídajícím způsobem.

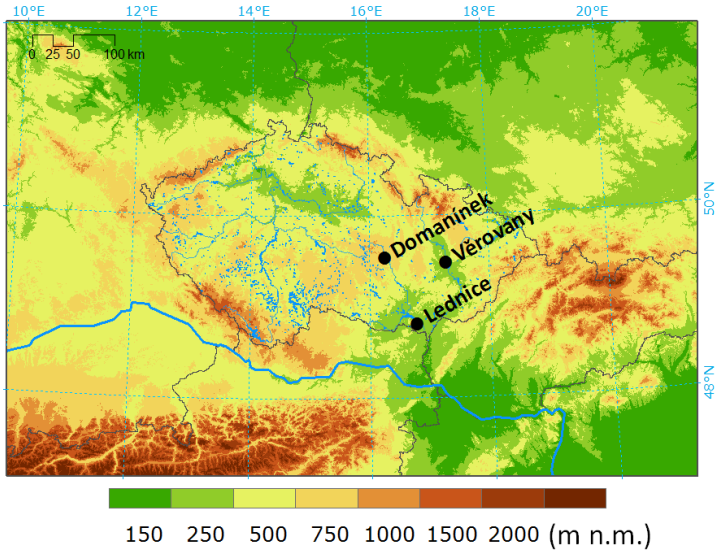


Obr. 5.1 Schéma propojení růstových modelů se vstupními daty včetně řad meteorologických prvků pro současné a budoucí klimatické podmínky (upraveno podle Semenov & Porter, 1995).

6. Posouzení dopadů změny klimatu na vybrané polní plodiny

Mezi hlavní oblasti využití růstových modelů patří analýzy dopadů změny klimatu na různých prostorových úrovních od konkrétních lokalit, přes úroveň regionů až po globální studie (např. Hlavinka et al., 2015; Rosenzweig et al., 2014). Je třeba si však uvědomit, že výsledky takových analýz jsou ovlivněny určitou míry nejistoty, která je způsobena nejistotou v oblasti budoucího vývoje emisí skleníkových plynů a reakcí klimatického systému (např. Dubrovský et al., 2005) a dále úrovní znalostí vazeb systému půda-rostlina-atmosféra a využitím zjednodušených předpokladů o realitě pro simulace cílových procesů. Toto zahrnuje například algoritmy fyziologických procesů, popis půdních profilů a procesů, zjednodušení v rámci odhadů iniciálních podmínek simulací a další faktory. Nejistota v oblasti projekcí klimatických podmínek je běžně řešena výpočtem simulací pro vhodně vybranou sadu klimatických scénářů. Pro popis nejistoty vlivem výběru růstového modelu je možné využít výpočet pomocí sady neboli ansámblu růstových modelů.

Pro podmínky České republiky se v posledních letech podařilo testovat, kalibrovat a validovat výpočty v rámci celých osevních postupů modelem HERMES (Hlavinka et al., 2014) s využitím experimentů z 12 lokalit Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělského (ÚKZÚZ) v různých půdně-klimatických podmínkách. Modelovány byly nejen výnosy a množství nadzemní biomasy, ale také např. obsah dusíku a organického uhlíku v půdě. Zjištěné parametry modelu a získané zkušenosti byly následně využity pro modelování dopadů změny klimatu a vlivu různého způsobu hospodaření v rámci 3 reprezentativních lokalit (viz. Obr. 6.1) od roku 1981 do roku 2080 (Hlavinka et al., 2015). Tato studie na příkladu lokalit Lednice (kukuřičná výrobní oblast), Věrovany (řepařská výrobní oblast) a Domanínek (bramborářsko-obilnářská výrobní oblast) hodnotila vodní bilanci, změnu termínů setí, nástupu kvetení a zralosti, míru stresu suchem a výnosy modelovaných plodin v nepřerušených osevních postupech (sekvence plodin: pšenice ozimá, ječmen jarní, kukuřice na siláž, pšenice ozimá, řepka ozimá). Pro období 1981-2010 byly na jednotlivých stanicích k dispozici potřebná naměřená meteorologická data v denním kroku. Pro následující období 2011-2080 bylo využito 5 tzv. transientních scénářů změny klimatu ve spojení s RCP 4.5 Navíc byly po roce 2010 aplikovány i 2 typy tzv. syntetických (tedy uměle vygenerovaných) řad meteorologických prvků, které nevykazovaly změny statistických ukazatelů oproti současnosti (pro hodnocení vývoje půdních procesů v důsledku hospodaření bez vlivu vývoje klimatu). Tyto dvě řady se lišily pouze v atmosférické koncentraci CO_2, která byla při výpočtech modelem HERMES využita: i) koncentrace CO_2 po 2010 konstantní vs. ii) nárůst koncentrace CO_2 po 2010 dle RCP 4.5. Při výpočtech modelem HERMES bylo po roce 2010 od každého ze 7 typů řad použito vždy 10 realizací pro získání většího počtu výstupů a možnosti lépe statisticky vyhodnotit výsledky. Charakter použitých řad meteorologických prvků je patrný z Tabulky 6.1 a Obr. 6.2. Díky rozdílné poloze a nadmořské výšce se od sebe vybrané lokality liší agroklimatickými podmínkami kdy pro Lednici, Věrovany a Domanínek za období 1981-2010 dosahovaly roční průměrné teploty vzduchu hodnot 9,9 °C, 9,0 °C a 7,2 °C a v případě ročních srážkových úhrnů 527 mm, 553 mm a 626 mm v uvedeném pořadí. Podmínky na stanici Lednice reprezentují nejteplejší a nejsušší regiony ČR, kde sucho bývá často limitujícím faktorem pro dosahované výnosy. Věrovany reprezentují nejvíce úrodné regiony a Domanínek pak chladnější a vlhčí podmínky. Pro hodnocení vývoje klimatu a následných dopadů na rostlinnou produkci byly využity transientní scénáře na základě 5 GCM modelů reprezentující skupinu CMIP3 použitých ze 4. Hodnotící zprávy IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Jmenovitě se jednalo o MPEH5, CSMK3, CGMR, GFCM21 IPCM4 ve spojení s emisním scénářem RCP 4.5 a citlivostí klimatu 3,0 °C při zdvojnásobení koncentrace CO_2 v atmosféře. Nejvyšší nárůst průměrných teplot vzduchu pro období v letech 2061-2080 (oproti 1981-2010) je odhadován +2,7 °C dle modelu IPCM4. Nejmenší změna průměrných teplot (+2,1 °C) je predikována modelem CGMR. Jako nejsušší bychom mohli označit scénář GFCM21 s průměrnou roční redukcí srážek o 16 % (průměrná hodnota pro všechny stanice) s největší poklesem srážek v období od května do září.



Obr. 6.1 Poloha vybraných reprezentativních stanic.

Z hlediska průměru srážkových úhrnů (za všechny stanice) byla jako nejvlhčí zjištěna prognóza dle

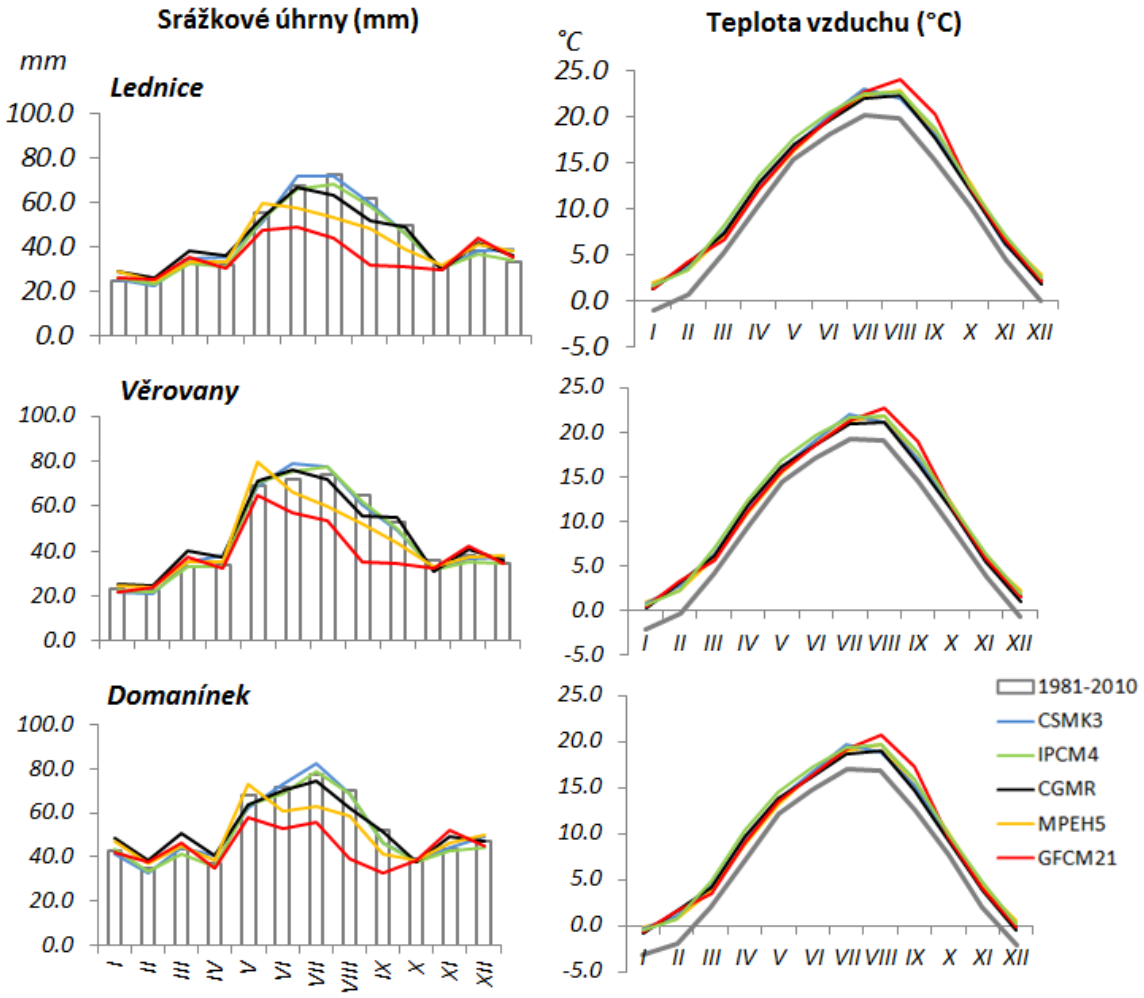
modelu CGMR, kdy se srážkové úhrny (vč. měsíčního rozložení) velmi podobají současným hodnotám (viz. Obr. 6.2).

Tabulka 6.1 Údaje o poloze 3 vybraných stanic a průměrné teplotě vzduchu a ročních úhrnech srážek pro období 1981-2010 a 2061-2080 dle 5 vybraných GCM modelů ve spojení s RCP 4.5 a klimatickou citlivostí 3°C. Průměrné hodnoty jsou v tabulce doplněny hodnotami ± směrodatné odchylky (uvedeno kurzívou).

	Poloha		
	z. délka (°)	z. šířka (°)	nadm. v. (m n.m.)
Lednice	16°46´	48°48´	170
Věrovany	17°16´	49°28´	215
Domanínek	16°15´	49°32´	572

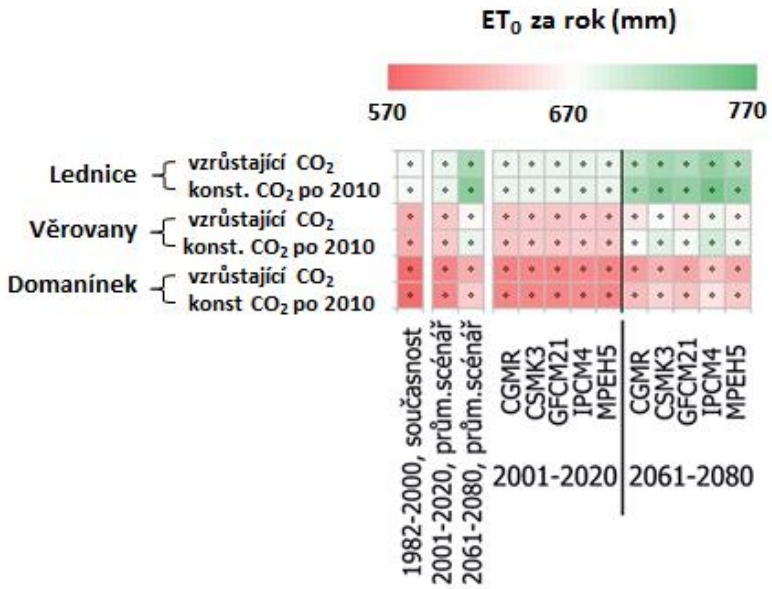
	Teplota vzduchu (°C)					
	1981-2010	2061-2080				
		MPEH5	CSMK3	CGMR	GFCM21	IPCM4
Lednice	9.9*±0.7*	12.2*±0.6*	12.2*±0.7*	12.0*±0.7*	12.4*±0.6*	12.6*±0.7*
Věrovany	9.0*±0.8*	11.3*±0.6*	11.3*±0.7*	11.1*±0.7*	11.4*±0.6*	11.7*±0.7*
Domanínek	7.2*±0.7*	9.4*±0.6*	9.4*±0.8*	9.2*±0.7*	9.6*±0.7*	9.8*±0.7*

	Srážkové úhrny (mm)					
	1981-2010	2061-2080				
		MPEH5	CSMK3	CGMR	GFCM21	IPCM4
Lednice	527*±94*	489*±69*	526*±77*	522*±74*	431*±59*	507*±74*
Věrovany	553*±100*	528*±67*	558*±71*	564*±71*	470*±58*	548*±70*
Domanínek	626*±92*	599*±71*	624*±76*	635*±77*	535*±62*	605*±74*



Obr. 6.2. Měsíční průměrné teploty vzduchu a úhrny srážek na třech vybraných stanicích za období 1981-2010 a očekávané hodnoty pro období 2061-2080 dle pěti vybraných scénářů změny klimatu.

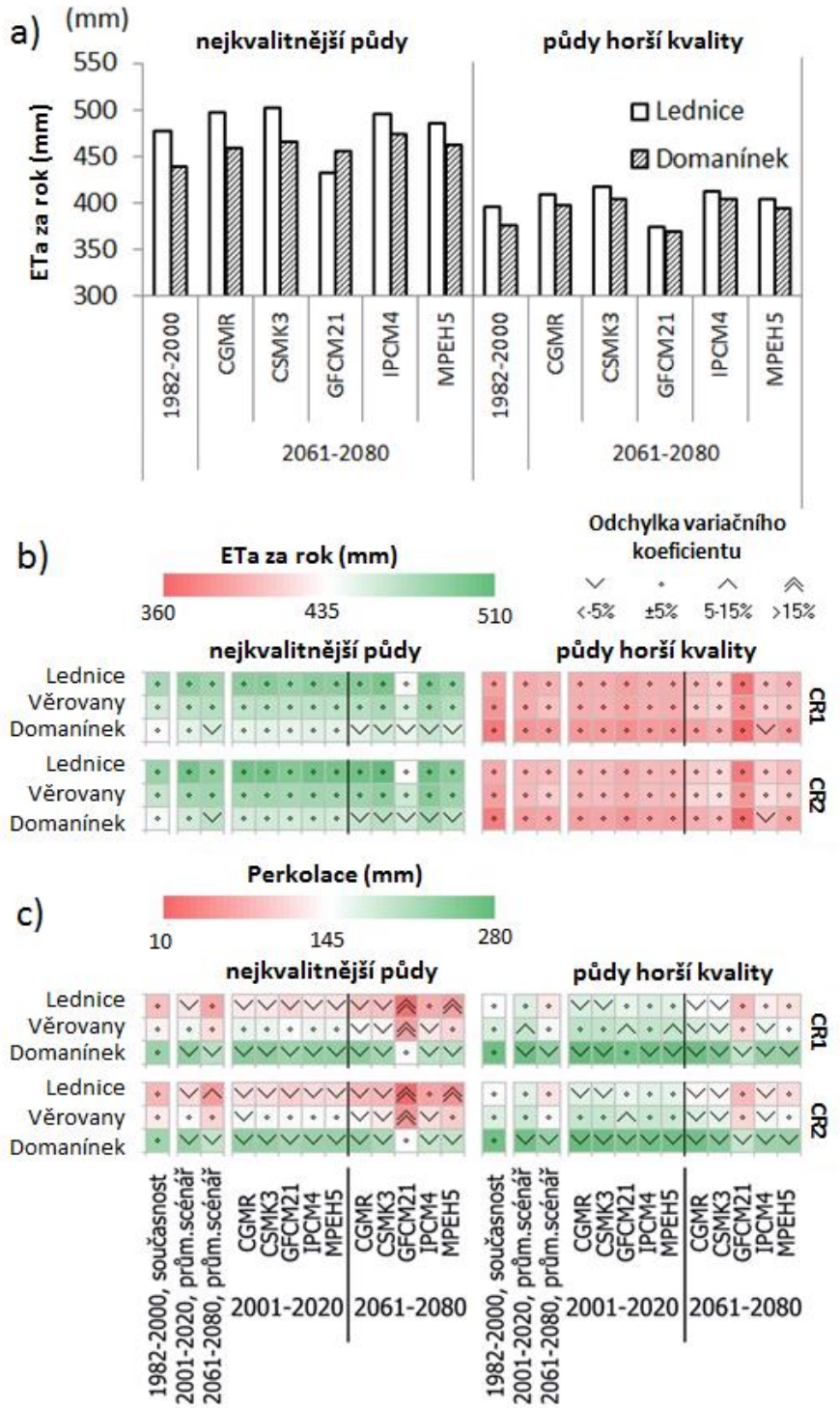
Při použití růstového modelu HERMES byly nejprve hodnoceny roční úhrny referenční evapotranspirace (ET_0) na vybraných lokalitách. Jedná se údaj popisující, kolik vody by se v rámci daného území za rok vypařilo a vytranspirovalo (voda, která fyziologicky odchází z průduchů rostlin v listech), pokud by vegetačním povrchem byl ideálně zavlažený trávník, který nikdy netrpí nedostatkem vody. Jedná se tedy o jakýsi hypotetický ukazatel atmosférických podmínek ovlivňujících výpar a transpiraci. Hodnoty pro současné i budoucí podmínky jsou zachyceny v Obr. 6.3, přičemž v průměru se pohybovaly v letech 1982-2000 (1982 volen jako první z důvodu prvního kompletně simulovaného/počítaného roku) od 575 mm v Domanínku po 674 mm v Lednici. Pro období 2061-2080 pak dle vybraných scénářů změny klimatu pravděpodobně dojde k nárůstu těchto hodnot o přibližně 50 mm vodního sloupce a v případě nejteplejšího scénáře (IPCM4) to bude až 60 mm. Tento nárůst je navíc ještě potlačován v důsledku narůstající koncentrace CO_2, která snižuje nároky rostlin na vodu. Pokud by CO_2 zůstala v průběhu tohoto století konstantní, úhrny ET_0 by byly o dalších cca 20 mm vodního sloupce vyšší.



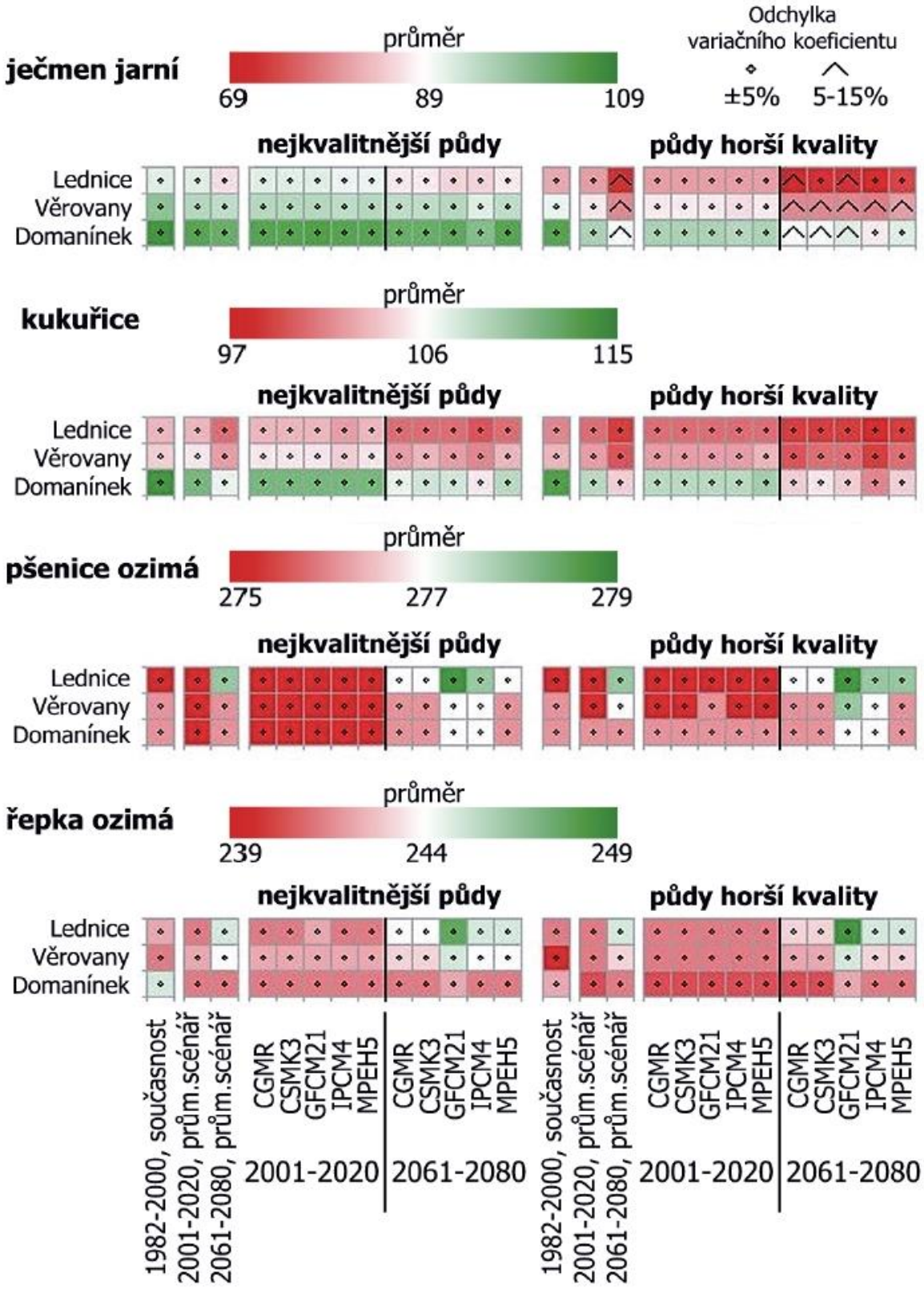
Obr. 6.3 Průměrné roční úhrny referenční evapotranspirace (ET_0) 1982-2000, 2001-2020 a 2061-2080 (upraveno dle Hlavinka et al., 2015).

V následujícím kroku byly hodnoceny průměrné simulované úhrny tzv. aktuální evapotranspirace (ETa), kdy jsou v rámci těchto hodnot zohledněny jak meteorologické podmínky jako je teplota vzduchu, sluneční záření, vlhkost vzduchu, rychlost větru a úhrny srážek, ale oproti ET_0 i vlastnosti konkrétních plodin a půdní charakteristika, které ovlivňuje dostupnost vláhy pro kořeny rostlin. Z dosažených výsledků je patrný rozdíl hodnot v případě kvalitní půdy s vyšší retenční kapacitou a méně kvalitní půdou s nízkou retenční kapacitou. Průměrné odhadované hodnoty za období z konce minulého století se pohybují od 374 mm v Domanínku s horší půdou po 478 mm pro Lednici s lepší půdou. Pro druhou polovinu 21. století je predikován 10 % pokles ETa v Lednici v případě scénáře dle GFCM21 v důsledku nedostatku vody a naopak nárůst o 50 mm v Domanínku dle scénáře IPCM4 v případě kvalitní půdy (viz. Obr. 6.4 a,b). Pokud by byla uvažována konstantní koncentrace CO_2 ve vzduchu mohli bychom např. v Domanínku očekávat nárůst roční ETa o dalších 18 mm. Změny ve vodní bilanci půdy se projeví i v případě prosakování vody do hlubších vrstev (tzv. perkolace), přičemž obecně můžeme v důsledku změn klimatických podmínek očekávat pokles těchto hodnot ve 2. pol. tohoto století (viz. Obr. 6.4 c).

Jednou z oblastí kde se změna agrometeorologických podmínek projeví, bude i načasování polních operací a termínů nástupu vývojových fází polních plodin. Díky časnějšímu nástupu jarního oteplení bude např. možné dříve zpracovávat půdu a zakládat jarní porosty. Situace pro odhadované termíny setí modelem HERMES za období 1982-2000, 2001-2020 a 2061-2080 je pro ječmen jarní, kukuřici na siláž, pšenici ozimou a řepku ozimou zachycena v rámci Obr. 6.5. Zejména v případě jarního ječmene můžeme v budoucnu očekávat dřívější nástup termínu setí díky urychlení nástupu optimálních teplot a půdní vlhkosti a toto urychlení bude více patrné v rámci chladnějších lokalit a na půdách s menší retenční kapacitou (např. až o 16 dní dřívější setí ječmene jarního v případě Domanínku dle průměru jednotlivých pěti GCM modelů). Tento posun částečně umožní plodinám vyhnout se obdobím s vysokou teplotou vzduchu a eliminovat i dopady sucha. Pokud by k tomuto posunu nemohlo dojít vyšší teploty by znamenaly nižší výnosy, díky zkrácení období růstu plodin a menšímu času pro tvorbu a akumulaci biomasy. Dle odhadu modelu HERMES vliv tohoto posunu termínu setí bude okolo roku 2061-2080 na úrovni 536 kg/ha výnosu ječmene jarního (u půdy horší kvality) a 500 kg/ha kukuřice na siláž (u nejkvalitnějších půd) v Domanínku. U ozimých plodin bude tento efekt obecně nižší.



Obr. 6.4 Odhadované hodnoty průměrných ročních úhrnů aktuální evapotranspirace ETa (a,b) a perkolace vody pod hloubku 80 cm (c) pro stanice Lednice, Věrovany a Domanínek za období 1982-2000, 2001-2020 a 2061-2080 dle měřených i odhadovaných hodnot na základě 5 GCM modelů. V grafech jdou vyneseny hodnoty pro kvalitní půdy (vč. vysoké retenční kapacity) a půdy horší kvality (s nízkou retenční kapacitou) (upraveno dle Hlavinka et al., 2015)..

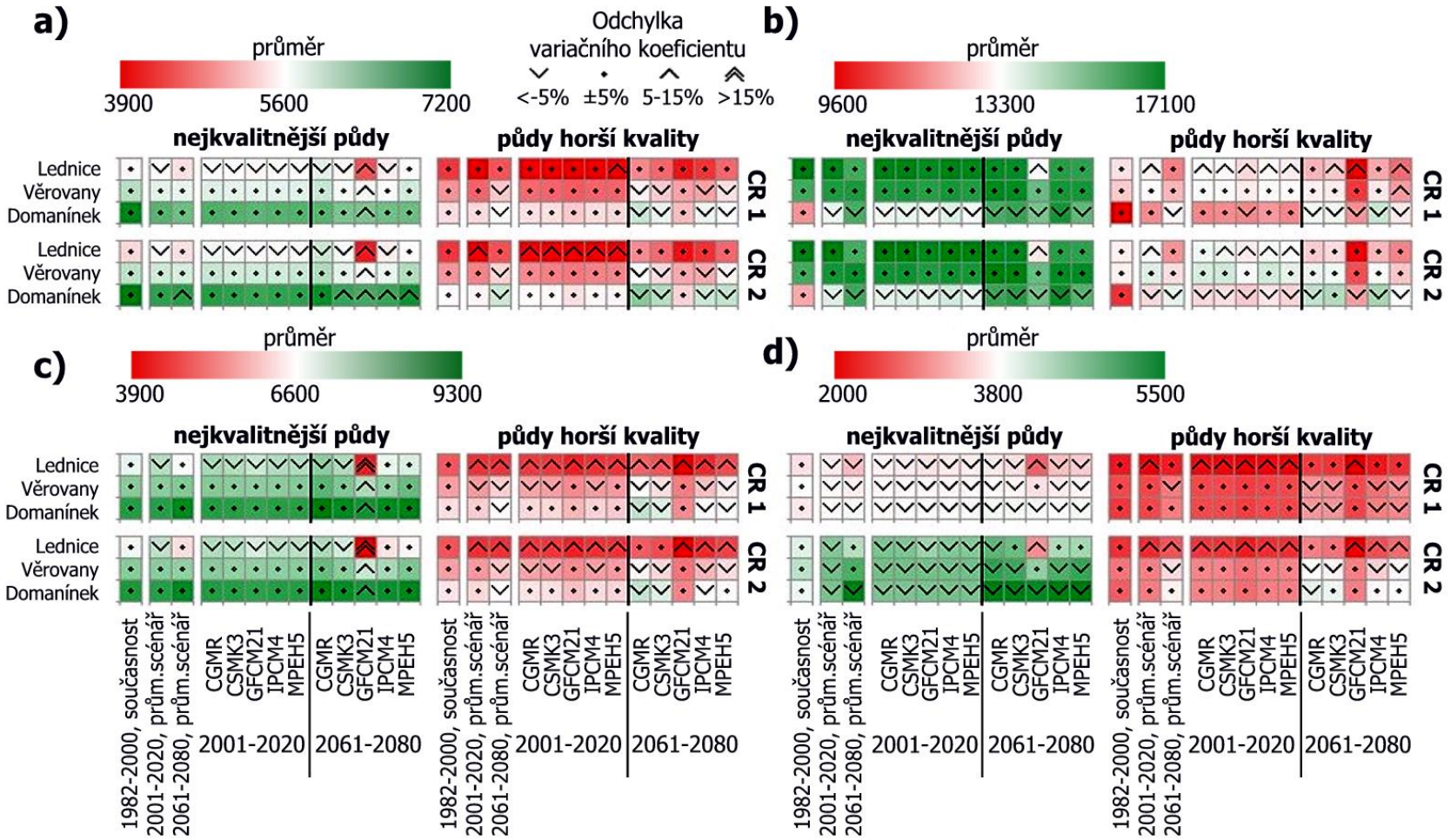


Obr. 6.5. Odhadované termíny setí ječmene jarního, kukuřice, pšenice ozimé a řepky ozimé vyjádřené jako pořadové číslo dne v roce (upraveno dle Hlavinka et al., 2015).

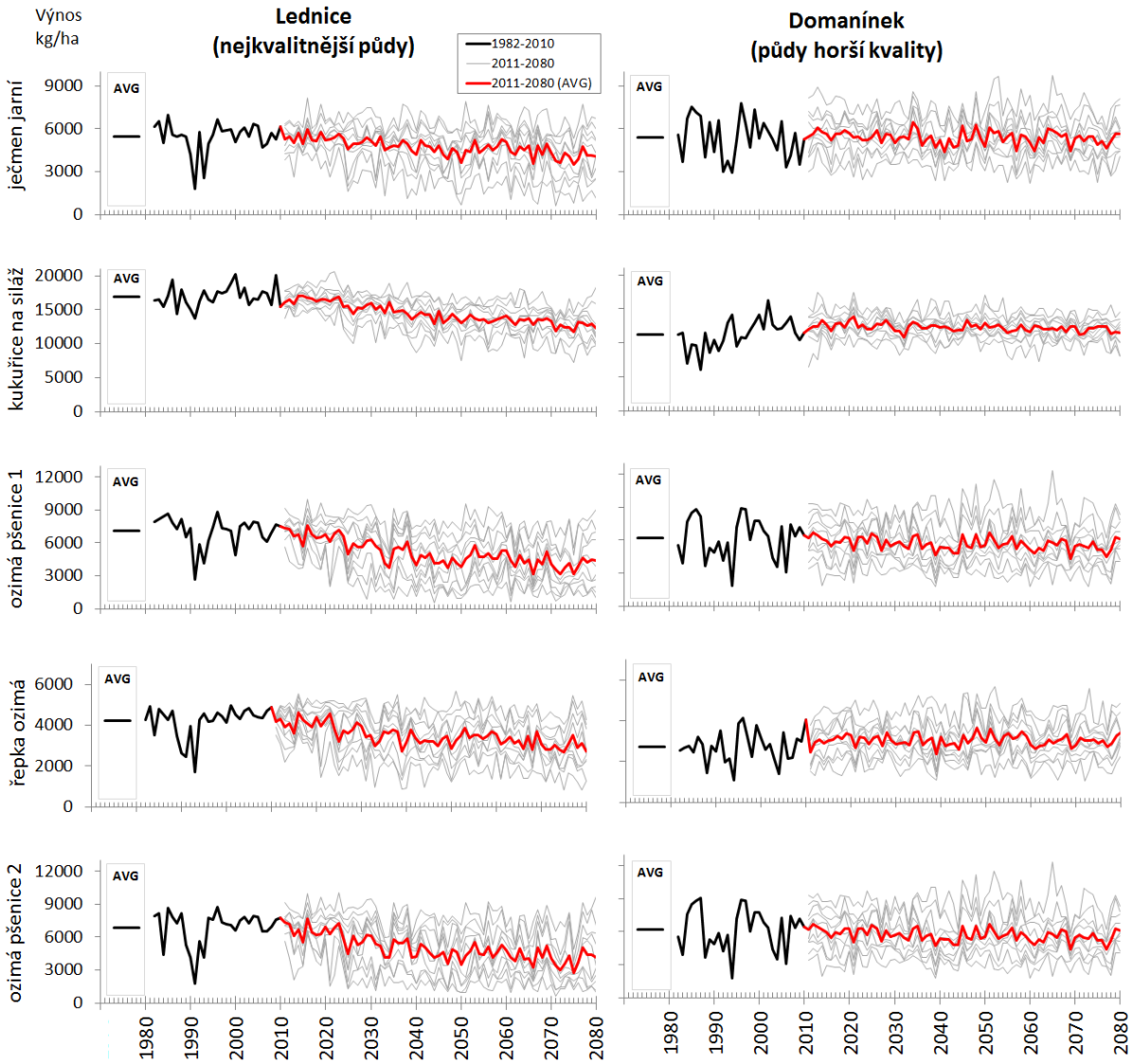
Změna agrometeorologických podmínek přinese i změnu délky trvání vegetace jednotlivých plodin (tj. čas od zasetí či vzejití po zralost). I v případě možnosti dřívějšího termínu setí lze do budoucna očekávat kratší trvání vegetace ječmene jarního a to až o 17 dní. V případě kukuřice na siláž je předpoklad zkrácení o 20 dní v případě Lednice a Věrovan, pro chladnější stanici Domanínek je to pak

zkrácení o 10 dní pokud by byl termín setí stejný jako v současnosti. V případě využití možnosti dřívějšího setí by redukce trvání byla v Lednici a Věrovanech o něco menší a pro Domanínek by hodnoty byly velmi podobné současnosti. Na tomto místě je však nutné upozornit na fakt, že v rámci prezentovaných prognóz jsou výsledky pří použití stejných odrůd jako v současnosti, přičemž je pravděpodobné, že pokud by došlo k oteplení, pěstitelé budou reagovat i volbou různě raných odrůd. V případě pěstování pšenice ozimé by do roku 2061-2080 došlo o zkrácení od setí po zralost až o 27 dní v případě Domanínku a scénáře IPCM4.

V případě výnosů jsou odhadovány do budoucna poměrně významné rozdíly v rámci stanic a pro jednotlivé scénáře změny klimatu (viz. Obr. 6.6) a půdní podmínky. Pokles výnosů je predikován v sušších oblastech (reprezentované stanicí Lednice) ve spojení se suchým scénářem (GFCM21). Toto bude dle výsledků případové studie doprovázeno nárůstem meziroční variability v případě méně kvalitních půd. Pokud by se prognózy dle scénáře GFCM21 v následujících dekádách naplnily (včetně redukce srážek od května do září) velmi silné negativní dopady mohou být očekávány relativně brzy (viz. Obr. 6.7). Pro lokality jako je Lednice, lze dle odhadů modelu HERMES očekávat, že v 19,5 %, 21,5 % a 47,0 % sezón by výnosy ozimé řepky, ječmene jarního a ozimé pšenice (v uvedeném pořadí) byly v průběhu let 2061-2080 pod úrovní 50% průměrných výnosů z období 1982-2000 a to v případě lokalit s kvalitnější půdou s vyšší retenční kapacitou. Negativní dopad by byl pro tyto lokality ječmen jarní a pšenici ozimou bez ohledu na půdní podmínky. Pozitivní vliv vzrůstající koncentrace CO_2 a změny termínu setí je z tohoto hlediska výnosů na úrovni několika stovek kilogramů. Z výsledků vyplývá, že ve velmi suchých budoucích podmínkách může osevní postup s meziplodinami znamenat určitou redukci výnosů díky navýšení vodního stresu v důsledku spotřeby vláhy meziplodinou. Naopak nárůst výnosů je očekáván pro kukuřici na siláž, která reprezentuje tzv. rostliny typu C_4 a pro většinu scénářů i u C_3 plodin v případě vlhčích lokalit. Rozdíl je více patrný v případě horších půd s nižší retenční kapacitou. V těchto regionech (reprezentovaných podmínkami ze stanice Domanínek) způsob hospodaření CR2 (s meziplodinami, zapravováním posklizňových zbytků a pravidelnou aplikací statkových hnojiv) má v rámci simulací pozitivní vliv na ječmen jarní, řepku ozimou i kukuřici na siláž. Z výše uvedeného je dobře patrná tzv. asymetrie dopadů změny klimatu, kdy negativní dopady budou patrné zejména v již suchých a teplých oblastech, zatímco zlepšení můžeme do budoucna očekávat v chladnějších a vlhčích oblastech díky posunu směrem k optimálním podmínkám. Toto pravidlo platí nejen pro oblasti v rámci ČR, ale bude platit i rostlinnou produkci v Evropském a světovém měřítku. Obdobně pak bude menší dopad na teplomilné a k suchu tolerantní druhy a odrůdy. Zde je nutné pro úplnost doplnit, že v rámci modelu HERMES není zohledněn vliv chorob a škůdců, jsou využity vlastnosti současných odrůd a pouze částečně je zohledněn vliv extrémních podmínek, přičemž je možné, že oproti modelu budou reálné škody např. v důsledku působení vysokých teplot v době citlivých růstových fází vážnější. V případě ne zcela správné reakce na vysoké teploty v citlivých fázích růstu se jedná a problém společný většině používaných modelů (Asseng et al., 2014; Gourdji et al., 2013), nicméně tyto podmínky lze v budoucnu dle studie Trnka et al., (2014) očekávat stále častěji a to i v případě optimističtějších scénářů vývoje klimatu. Bohužel je v řadě případů komplikované kvantifikovat přesné dopady extrémních situací, protože se jedná o málo časté situace a modely proto nemohou být v těchto ohledech adekvátně kalibrovány a testovány (Porter et al., 2014).



Obr. 6.6 Odhadované průměrné výnosy (kg/ha) ječmene jarního (a), kukuřice na siláž (b), pšenice ozimé (c) a řepky ozimé (d) pro období 1982-2000, 2001-2020 a 2061-2080 na základě pěti GCM modelů (CGMR, CSMK3, GFCM21, IPCM4, MPEH5). Očekávaná změna variability výnosů je zachycena prostřednictvím odchylky variačního koeficientu oproti období 1982-2000 (upraveno dle Hlavinka et al., 2015).

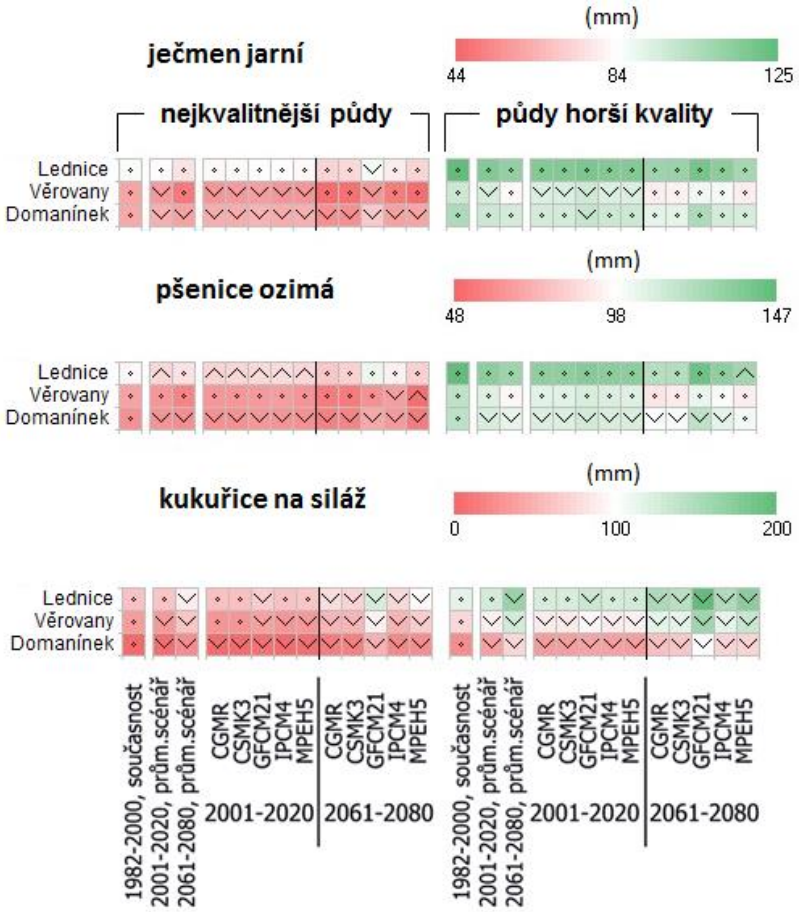


Obr. 6.7 Modelem HERMES predikované výnosy polních plodin v rámci modelovaného osevního postupu se způsobem hospodaření CR2 (s meziplodinami, zapravováním posklizňových zbytků a pravidelnou aplikací statkových hnojiv) pro stanici Lednice v kombinaci s kvalitními půdními podmínkami a pro stanici Domanínek v kombinaci s půdami horší kvality. Výsledky pro období 1982-2010 jsou založeny na měřených meteorologických datech. Pro období 2011-2080 byly simulace provedeny na základě 10 realizací scénáře využívajícího GCM modelu GFCM21 (šedé linky). Průměrné hodnoty jsou označeny jako AVG (upraveno dle Hlavinka et al., 2015).

Odhadovanou změnu průměrné úrovně výnosů pro pšenici ozimou a ječmen jarní pro Českou republiku a období okolo roku 2050 dle studie Eitzinger et al., (2013), při uvážení možných klimatických podmínek i pozitivního přímého vlivu vyšší koncentrace CO_2 lze pro obě plodiny vyjádřit nárůstem až o 1,5 (ječmen j.) a 2,0 (pšenice oz.) tuny na hektar v některých regionech. Z uvedených analýz rovněž vyplynulo, že pokud by nebyl započítán přímý vliv CO_2 (tj. stimulace fotosyntézy a zvýšení WUE), došlo by pravděpodobně k poklesu výnosů pšenice ozimé na většině orné půdy (v některých regionech i o více než jednu tunu na hektar). Výsledky uvedených analýz vycházejí z předpokladu udržení kvality půd ve stejném stavu jako v současnosti. Pokud by však došlo ke zhoršení půdních vlastností lze očekávat negativní vliv na budoucí výnosy. Do prognóz budoucích výnosů není zahrnut vliv šlechtění (vývoj a dostupnost nových odrůd), vývoj v oblasti agronomické

praxe, dostupných technologií, znalostí apod. Současně není započítán negativní vliv chorob a škůdců.

Dle známých výsledků je zřejmé, že v rámci ohrožených oblastí bude třeba hledat vhodná adaptační opatření pro eliminaci nepříznivých podmínek v rámci určitého počtu ročníků. To může být např. změna odrůdové či plodinové, změna zpracování půdy či aplikace závlah. I v této oblasti mohou být růstové modely velmi významným podpůrným nástrojem pro rozhodovací procesy, protože se dají použít pro hledání odpovědi na otázku, kolik vody je třeba prostřednictvím závlah dodat a jak velký přínos na úroveň výnosů takové opatření bude mít (viz příklady v rámci Obr. 6.8 a Tabulky 6.2).



Obr. 6.8 Průměrná odhadovaná potřeba vody pro závlahy pro udržení půdní vlhkosti ve vrstvě 0-40 cm na úrovni alespoň 50 % retenční kapacity (dostupné vody) mezi termínem vzcházení a zralostí. Pokud půdní vlhkost klesla pod 50 % retenční kapacity, byla aplikována dávka 20 mm.

Tabulka 6.1 Průměrný nárůst výnosů (t/ha) v důsledku aplikovaných závlah (v množství dle Obr. 6.8).

			1982-2000	2061-2080				
				CGMR	CSMK3	GFCM21	IPCM4	MPEH5
ječmen jarní	Nejkvalitnější půdy	Lednice	0,6	0,1	0,1	1,6	0,3	0,4
		Věrovany	0,1	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0
		Domanínek	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Půdy horší kvality	Lednice	1,7	1,4	1,4	1,9	1,6	1,5
		Věrovany	1,2	0,8	0,8	1,1	0,9	0,8
		Domanínek	1,6	1,1	1,1	1,7	1,3	1,4
pšenice ozimá	Nejkvalitnější půdy	Lednice	1,0	0,4	0,5	3,4	1,0	1,2
		Věrovany	0,1	0,0	0,0	0,5	0,1	0,1
		Domanínek	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Půdy horší kvality	Lednice	2,7	2,8	2,6	3,6	2,8	2,9
		Věrovany	2,1	1,6	1,6	2,4	1,7	1,7
		Domanínek	2,3	2,1	2,0	3,3	2,3	2,6
kukuřice na siláž	Nejkvalitnější půdy	Lednice	0,5	0,7	0,6	3,4	0,8	1,4
		Věrovany	0,2	0,2	0,2	0,9	0,2	0,4
		Domanínek	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
	Půdy horší kvality	Lednice	3,3	4,6	4,2	6,0	4,2	5,4
		Věrovany	1,9	3,3	3,3	4,9	3,1	4,0
		Domanínek	0,5	1,6	1,7	3,2	1,9	2,1

7. Závěr

Z dosavadních zkušeností a dosažených výsledků vyplývá, že růstové modely jsou velmi cennými nástroji pro hodnocení produkčních vlastností území a jako doplněk polním pokusům, kdy je možné s jejich pomocí odhadovat vliv různých faktorů. Z hlediska hodnocení dopadů změny klimatu se

v případě růstových modelů jedná o nástroje, které jsou takřka nenahraditelné, protože umožňují odpovídat na otázky, co se pravděpodobně stane, když nastanou určité podmínky a to vše při uvážení široké škály faktorů (změna teplot, srážek, koncentrace CO_2 v ovzduší a dalších), přičemž tyto interakce už jsou za hranicí toho, co by bylo možné řešit díky zkušenostem agronomů či využitím regresních vztahů jednotlivých proměnných vzhledem k výnosům. Na druhou stranu je třeba mít stále na zřeteli fakt, že růstové modely jsou i přes vysokou komplexnost stále velký zjednodušením reality a některé procesy dokážou popsat jen s omezenou přesností. Nejistotu, která pramení z volby modelu lze částečně identifikovat v případě použití ansámblu (sady čí více růstových modelů), přičemž střední hodnota výstupu často bývá blíže korektnímu výsledku než nejlepší z modelů. Přesnost modelovaných procesů velmi často závisí i na kvalitě a rozsahu (délka období, počet proměnných) dostupných tzv. kalibrační případně validačních dat. Z tohoto pohledu jsou polní pokusy z hlediska používání růstových modelů zdrojem velmi cenných, dalo by se říci, nenahraditelných dat, které umožňují kalibrovat modely pro aktuální půdně-klimatické podmínky, nové pěstitelské postupy a odrůdy. Kromě zjednodušeného pohledu na realitu je velkým limitem použití růstových modelů jejich komplikované ovládání.

Z prezentovaných výsledků je patrná asymetrie dopadů změny klimatu na rostlinnou produkci v ČR, kdy v případě již teplých a suchých regionů můžeme do budoucna počítat s nárůstem nepříznivých situací, zatímco v chladnějších a vlhčích regionech lze očekávat spíše posun k lepším podmínkám. Současně je třeba se na očekávané podmínky připravovat formou adaptačních opatření. Ta mohou mít různých charakter od změny způsobu hospodaření, přes změnu pěstovaných odrůd a plodin, až například po využití závlah pro zmírnění nepříznivého vláhového deficitu. Stran reálného využití závlah opět rozhodne řada faktorů včetně ceny za vodu, elektrickou energii, pořízení případně údržbu nezbytné infrastruktury, samozřejmě ceny produkce a v neposlední řadě i samotná dostupnost vodních zdrojů, která může být zejména v suchých letech problematická. Jako významná adaptační opatření lze považovat i šlechtitelské aktivity ve směru vyšší tolerance k suchu a vysokým teplotám. Důležitá bude rovněž diverzifikace produkce (současné pěstování různých odrůd a plodin) tak, aby stresový faktor v citlivých fázích růstu zasáhl jen část pěstovaných plodin.

Je zřejmé, že v rámci zemědělského sektoru je třeba na různých úrovních (pozemek, farma, region, stát) provádět kvalifikovaná rozhodnutí operativního (krátkodobějšího) charakteru v rámci jednotlivých sezón, tak strategická opatření z hlediska dlouhodobějších horizontů. V obou případech je třeba mít k dispozici nejmodernější prostředky a nástroje. Nezastupitelné úlohu bezesporu hraje podpora smysluplného vývoje a výzkumu, které umožní neustále doplňovat poznatky o vazbách v systému rostlina-půda-atmosféra a to i ve vztahu k zemědělci. Autoři překládané metodiky věří, že růstové modely jsou v těchto snahách důležitým nástrojem a bude tomu tak i do budoucna.

III. SROVNÁNÍ NOVOSTI POSTUPŮ

Pro správné provádění lokálně cíleného hospodaření je vyžadováno značné množství relevantních informací o půdních podmínkách a aktuálním stavu porostů polních plodin. Sběr těchto informací představuje náročný proces, který do významné míry ovlivňuje efektivnost daného systému hospodaření. Předkládaná metodika poskytuje komplexní pohled na možnosti mapování prostorové variability pozemků, Kromě popisu postupů tradičního sběru agronomicky relevantních informací formou vzorkování půdy a sběru rostlinného materiálu se podstatná část textu věnuje nepřímým (senzorovým) metodám. Ty představují efektivní způsob identifikace rozdílů v prostorových vlastnostech půdy či porostů osevní postupy.

IV. POPIS UPLATNĚNÍ CERTIFIKOVANÉ METODIKY

Metodika zahrnuje komplexní pohled na uváděnou problematiku a obsahuje nejnovější údaje, které mohou sloužit nejen zemědělskému výzkumu, zemědělské praxi při pěstování plodin, ale také může posloužit jako vhodný materiál pro výuku na středních školách nebo univerzitách se zemědělským zaměřením nebo jako podklad pro zemědělské poradce. Rovněž je předpoklad pro její využití jako základního informačního materiálu pro zástupce veřejné správy.

V. EKONOMICKÉ ASPEKTY

Ekonomické zhodnocení metodiky vychází z projektu JPI-MACSUR Modelling European Agriculture with Climate Change for Food security (http://macsur.eu/), který byl iniciován za účelem dosažení potravinové bezpečnosti Evropy a ve kterém Českou republiku zastupuje autorský kolektiv, který metodiku předkládá. Není možné říci kolik tisíc Kč lze aplikací metodiky ušetřit, lze však konstatovat, že aplikací růstových modelů může získat podnik informace neocenitelného strategického významu pro další směřování jejich produkce v kontextu jednotného zemědělského trhu. Tyto informace se dle řídícího výboru projektu MACSUR pro jednotlivé země mohou pohybovat ve stovkách miliónů i miliardách. Náklady na nutný software a hardware se pohybují v řádech desítek tis. Kč.

VI. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Angulo, C., Rötter, R., Lock, R., Enders, A., Fronzek, S., Ewert, F., 2013. Implication of crop model calibration strategies for assessing regional impacts of climate change in Europe. Agric. For. Meteorol. 170, 32–46. doi:10.1016/j.agrformet.2012.11.017

Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rötter, R.P., Lobell, D.B., Cammarano, D., Kimball, B. a., Ottman, M.J., Wall, G.W., White, J.W., Reynolds, M.P., Alderman, P.D., Prasad, P.V. V., Aggarwal, P.K., Anothai, J., Basso, B., Biernath, C., Challinor, a. J., De Sanctis, G., Doltra, J., Fereres, E., Garcia-Vila, M., Gayler, S., Hoogenboom, G., Hunt, L. a., Izaurralde, R.C., Jabloun, M., Jones, C.D., Kersebaum, K.C., Koehler, a-K., Müller, C., Naresh Kumar, S., Nendel, C., O'Leary, G., Olesen, J.E., Palosuo, T., Priesack, E., Eyshi Rezaei, E., Ruane, a. C., Semenov, M. a., Shcherbak, I., Stöckle, C., Stratonovitch, P., Streck, T., Supit, I., Tao, F., Thorburn, P.J., Waha, K., Wang, E., Wallach, D., Wolf, J., Zhao, Z., Zhu, Y., 2014. Rising temperatures reduce global wheat production. Nat. Clim. Chang. 5, 143–147. doi:10.1038/nclimate2470

Davies, J.A., McKay, D.C., 1989. Evaluation of selected models for estimating solar radiation on horizontal surfaces. Solar Energy 43, 153–168.

Dubrovsky, M., Nemesova, I., Kalvova, J., 2005. Uncertainties in climate change scenarios for the Czech Republic. Clim. Res. 29, 139–156.

Eitzinger, J., Trnka, M., Semerádová, D., Thaler, S., Svobodová, E., Hlavinka, P., Šiška, B., Takáč, J., Malatinská, L., Nováková, M., Dubrovský, M., Žalud, Z., 2013. Regional climate change impacts on agricultural crop production in Central and Eastern Europe – hotspots, regional differences and common trends. J. Agric. Sci. 151, 787–812. doi:10.1017/S0021859612000767

Gourdji, S.M., Sibley, A.M., Lobell, D.B., 2013. Global crop exposure to critical high temperatures in the reproductive period: historical trends and future projections. Environ. Res. Lett. 8, 024041. doi:10.1088/1748-9326/8/2/024041

Hlavinka, P., Kersebaum, K.C., Dubrovský, M., Fischer, M., Pohanková, E., Balek, J., Žalud, Z., Trnka, M., 2015. Water balance , drought stress and yields for field crop rotations under present and future conditions in the Czech Republic. Clim. Res. 65, 175–192. doi:10.3354/cr01339

Hlavinka, P., Trnka, M., Kersebaum, K.C., Čermák, P., Pohanková, E., Orság, M., Pokorný, E., Fischer, M., Brtnický, M., Žalud, Z., 2014. Modelling of yields and soil nitrogen dynamics for crop rotations by HERMES under different climate and soil conditions in the Czech Republic. J. Agric. Sci. 152, 188–204. doi:10.1017/S0021859612001001

Jones, J.., Hoogenboom, G., Porter, C.., Boote, K.., Batchelor, W.., Hunt, L.., Wilkens, P.., Singh, U., Gijsman, A.., Ritchie, J.., 2003. The DSSAT cropping system model. Eur. J. Agron. 18, 235–265. doi:10.1016/S1161-0301(02)00107-7

Kollas, C., Kersebaum, K.C., Nendel, C., Manevski, K., Müller, C., Palosuo, T., Armas-Herrera, C.M., Beaudoin, N., Bindi, M., Charfeddine, M., Conradt, T., Constantin, J., Eitzinger, J., Ewert, F., Ferrise, R., Gaiser, T., Cortazar-Atauri, I.G. De, Giglio, L., Hlavinka, P., Hoffmann, H., Hoffmann, M.P., Launay, M., Manderscheid, R., Mary, B., Mirschel, W., Moriondo, M., Olesen, J.E., Öztürk, I., Pacholski, A., Ripoche-Wachter, D., Roggero, P.P., Roncossek, S., Rötter, R.P., Ruget, F., Sharif, B., Trnka, M., Ventrella, D., Waha, K., Wegehenkel, M., Weigel, H.-J., Wu, L., 2015. Crop rotation modelling—A European model intercomparison. Eur. J. Agron. 70, 98–111. doi:10.1016/j.eja.2015.06.007

Palosuo, T., Kersebaum, K.C., Angulo, C., Hlavinka, P., Moriondo, M., Olesen, J.E., Patil, R.H., Ruget, F., Rumbaur, C., Takáč, J., Trnka, M., Bindi, M., Çaldağ, B., Ewert, F., Ferrise, R., Mirschel, W., Şaylan, L., Šiška, B., Rötter, R., 2011. Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: A comparison of eight crop growth models. Eur. J. Agron. 35, 103–114. doi:10.1016/j.eja.2011.05.001

Porter, J.R., Xie, L., Challinor, A.J., Cochrane, K., Howden, M.S., Iqbal, M.M., Lobell, D.B., Travasso, M.I., 2014. Food security and food production systems, in: Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R., White, L.L. (Eds.), Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Working Group II Contribution to the Fifth

Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 485–533.

Rabbinge, R., 1993. The ecological background of food production. In Crop production and sustainable agriculture. Ciba Foundations Symposium 177, pp. 2-29. John Wiley and Sons: Chichester.

Rosenzweig, C., Elliott, J., Deryng, D., Ruane, A.C., Müller, C., Arneth, A., Boote, K.J., Folberth, C., Glotter, M., Khabarov, N., Neumann, K., Piontek, F., Pugh, T. a M., Schmid, E., Stehfest, E., Yang, H., Jones, J.W., 2014. Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 111, 3268–73. doi:10.1073/pnas.1222463110

Rötter, R.P., Palosuo, T., Kersebaum, K.C., Angulo, C., Bindi, M., Ewert, F., Ferrise, R., Hlavinka, P., Moriondo, M., Nendel, C., Olesen, J.E., Patil, R.H., Ruget, F., Takáč, J., Trnka, M., 2012. Simulation of spring barley yield in different climatic zones of Northern and Central Europe: A comparison of nine crop models. F. Crop. Res. 133, 23–36. doi:10.1016/j.fcr.2012.03.016

Semenov, M.A., Porter, J.R., 1995. Climatic variability and the modeling of crop yields. Agric. and For. Meteorol. 73, 265-283.

Semenov, M., Stratonovitch, P., 2015. Adapting wheat ideotypes for climate change: accounting for uncertainties in CMIP5 climate projections. Clim. Res. 65, 123–139. doi:10.3354/cr01297

Trnka, M., Dubrovský, M., Semerádová, D., Žalud, Z., 2004a. Projections of uncertainties in climate change scenarios into expected winter wheat yields. Theor. Appl. Climatol. 77, 229–249. doi:10.1007/s00704-004-0035-x

Trnka, M., Dubrovský, M., Žalud, Z., 2004b. Climate change impacts and adaptation strategies in spring barley production in the czech republic. Clim. Change 64, 227–255.

Trnka, M., Rötter, R.P., Ruiz-Ramos, M., Kersebaum, K.C., Olesen, J.E., Žalud, Z., Semenov, M.A., 2014. Adverse weather conditions for European wheat production will become more frequent with climate change. Nat. Clim. Chang. 4, 637–643. doi:10.1038/NCLIMATE2242

VII. SEZNAM PUBLIKACÍ, KTERÉ PŘEDCHÁZELY METODICE

Publikace JImp

Anguloa, C., Gaiser,t., Rötter, R.P., Børgesenc, Ch, D., Hlavinka, P., Trnka, M., Ewert, F. 'Fingerprints' of four crop models as affected by soil input data aggregation Europ. J. Agronomy 61 (2014) 35–48

Eitzinger, J., Trnka, M., Semerádová, D., Thaler, S., Svobodová, E., Hlavinka, P., Šiška, B., Takáč, J., Malatinská, L., Nováková, M., Dubrovský, M., Žalud, Z., 2013. Regional climate change impacts on agricultural crop production in Central and Eastern Europe – hotspots, regional differences and common trends. J. Agric. Sci. 151, 787–812. doi:10.1017/S0021859612000767

Hlavinka, P., Kersebaum, K.C., Dubrovský, M., Fischer, M., Pohanková, E., Balek, J., Žalud, Z., Trnka, M., 2015. Water balance , drought stress and yields for field crop rotations under present and future conditions in the Czech Republic. Clim. Res. 65, 175–192. doi:10.3354/cr01339

Hlavinka, P., Trnka, M., Kersebaum, K.C., Čermák, P., Pohanková, E., Orság, M., Pokorný, E., Fischer, M., Brtnický, M., Žalud, Z., 2014. Modelling of yields and soil nitrogen dynamics for crop rotations by HERMES under different climate and soil conditions in the Czech Republic. J. Agric. Sci. 152, 188–204. doi:10.1017/S0021859612001001

Kolář, P., Trnka, M., Brázdil, R., Hlavinka, P., influence of climatic factors on the low yields of spring barley and winter wheat in Southern Moravia (Czech Republic) during the 1961-2007 period Theoretical and Applied Climatology. 2014, Volume 117, Issue 3-4, pp 707-721

Rőtter, R., Palosuo, T., Kersebaum, K. C., Angulo, C., Bindi, M., Ewert, F., Ferrise, R., Hlavinka, P., Moriondo, M., Nendel, C., Olsen, J. E., Patil, R. H., Ruger, F., Takáč, J., Trnka, M. 2012. Simulation of spring barley yield in diff erent climatic zones of Northern and Central Europe: A comparison of nine crop models. Field Crops Research, 133: 23–36.

Thaler, S., Eitzinger, J., Trnka, M., Dubrovsky, M. 2012. Impacts of climate change and alternative adaptation options on winter wheat yield and water productivity in a dry climate in Central Europe. Journal of Agricultural Science, 150: 537–555.

Trnka, M., Rötter, R.P., Ruiz-Ramos, M., Kersebaum, K, CH., Olesen, J.E., Žalud, Z., Semenov, M.A. Adverse weather conditions for European wheat production will become more frequent with climate change Nature Climate Change 4, 637–643, 2014, doi:10.1038/nclimate2242

Publikace Jneimp

Pohanková, E., Hlavinka, P., Takáč, J., Žalud, Z., Trnka, M., Calibration and Validation of the Crop Growth Model DAISY for Spring Barley in the Czech Republic. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis. 2015. sv. 2015, č. 4, s. 1177--1186. ISSN 1211-8516.

Článek ve sborníku (D)

Pohanková, E., Trnka, M., Hlavinka, P.,Takáč, J., Kersebaum, KCH., Žalud, Z., Comparison of DAISY and HERMES crop growth models for winter wheat and spring barley in Czech-Moravian Highlands In Sborník příspěvků z mezinárodní vědecké konference Bioklima Skalica 09/2013 (in print), příspěvek bude publikován na WOK

Pohanková, E., Hlavinka, P., Trnka, M., Calibration and validation of the crop growth model WOFOST for spring barely in conditions of the Czech republic. In TOWARDS CLIMATIC SERVICES, Nitra 2015. 1. vyd. Nitra: Slovak University of Agriculture in Nitra, 2015, s. 51. ISBN 978-80-552-1389-7.

Pohanková, E., Trnka, M., Hlavinka, P., Takáč, J., Kersebaum, K. Ch., Žalud, Z., 2013: Calibration of the selected crop growth models for winter wheat and spring barley. In Global Change and Resilience. 1. vyd. Brno: Akademie Věd, 2013

Pohanková E., Trnka M., Hlavinka P., Takáč J., Žalud Z., 2013: Calibrations of the crop growth models for winter wheat. Mendelnet 2013, Proceedings of International Ph.D. Students Conference, Brno, Czech Republic: Mendel University in Brno, Faculty of Agronomy, p. 130-135, ISBN 978-80-7375-908-7

Pohanková, E., Orság, M., Hlavinka, P., The influence of reduced precipitation supply on spring barley yields and the ability of crop growth models to simulate drought stress. In URBAN, O., ŠPRTOVÁ, M., KLEM, K., Global Change: A Complex Challenge Conference Proceedings. 1. vyd. Brno: Global Change Research Centre AS CR, v.v.i., 2015, s. 113--117. ISBN 978-80-87902-10-3.

Trnka, M., Hlavinka, P., Semerádová, D.,Balek, J.,Možný, M.,Štěpánek, P., Zahradníček, P., Hayes, M., Eitzinger, J.,Žalud, Z Drought monitor for the Czech Republic - www.intersucho.cz Rožnovský, J., Litschmann, T., (eds): Mendel a bioklimatologie. Brno, 3. – 5. 9. 2014, ISBN 978-80-210-6983-1

Autoři:

Ing. Petr Hlavinka, Ph.D. (50 %)

Prof. Mgr. Ing. Miroslav Trnka. Ph.D. (20 %)

Bc. Jan Balek (5 %)

RNDr. Martin Dubrovský, Ph.D. (5 %)

Ing. Eva Pohanková (10 %)

Prof. Ing. Zdeněk Žalud, Ph.D. (10 %)

Název: **Aplikace růstových modelů pro lokální hodnocení dopadů změny klimatu na vybrané plodiny**

Metodika je poskytována bezplatně

Kontakt na autora: zalud.z@czechglobe.cz

Centrum výzkumu globální změny AV ČR v.v.i., 2015

Bělidla 986/4a
603 00 Brno