

**MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ
AGRONOMICKÁ FAKULTA**

DISERTAČNÍ PRÁCE

BRNO 2016

EVA POHANKOVÁ



Modelování růstu a vývoje ječmene jarního
Disertační práce

Vedoucí práce:
prof. Mgr. Ing. Miroslav Trnka, Ph.D.

Vypracovala:
Eva Pohanková

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci: „Modelování růstu a vývoje ječmene jarního“ vypracovala samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou *Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací*.

Jsem si vědoma, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně dne:

.....
podpis

Za odborné vedení, diskusi, podporu a velkou trpělivost děkuji školiteli prof. Mgr. Ing. Miroslavu Trnkovi, Ph.D., školiteli specialistovi Ing. Petru Hlavinkovi, Ph.D a vedoucímu Ústavu agrosystémů a bioklimatologie prof. Ing. Zdeňku Žaludovi, Ph.D. Dále děkuji oponentům za připomínky a komentáře. Děkuji také Mendelově univerzitě v Brně a Ústavu výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i. za poskytnutí zázemí a vybavení nutného k tomu, aby tato práce mohla vzniknout, pracovníkům Ústředního kontrolního a zkušebního ústavu zemědělského za ochotu a poskytnuté podklady a modelářům, Kurtu-Christianovi Kersebaumovi, Reimundu Rötterovi a Anně Dalle Martě, za rady ohledně práce s jednotlivými modely. V neposlední řadě také děkuji svým kolegům z Ústavu agrosystémů a bioklimatologie a všem pracovníkům zkušební stanice Zemservis, s. r. o. za spolupráci a pomoc.

Doktorská práce byla vypracována s podporou projektu Národní agentury pro zemědělský výzkum číslo QJ1310123 s názvem “ Růstové modely jako nástroj pro zvýšení produkčního potenciálu a potravinové bezpečnosti ČR v podmínkách změny klimatu” a za finanční podpory MŠMT v rámci programu NPU I s číslem projektu LO1415.

SUMMARY

Modelling of the growth and the development of spring barley

PhD thesis focuses on modelling of the growth and development of spring barley in the soil and climatic conditions of the Czech Republic. Spring barley was modelled with the help of selected group of crop growth models, which include WOFOST, CERES-Barley (DSSAT), HERMES, DAISY and AQUACROP. Crop growth models differ from each other with their complexity and representation on ecophysiological processes. They were chosen on the basis of good results of main intermodelling, comparative European studies. In this thesis were used experimental data for modelling, which were gained from field experiments from three different locations in the Czech Republic – Lednice (South Moravia), Věrovany (Olomouc region) and Domanínec (Highlands). Part of these data was provided by CISTA and some of them were measured in field experiments with spring barley in Domanínec in the years 2011-2014. Individual models were calibrated and validated using the observed starting date of phenological phases, grain yield, development of index of leaf area and dynamics of soil water. Results show differences of models in the simulation of these various values. They confirm increasing suitable trend, which make use of multi-models together. So can be reduced the degree of uncertainty.

Key words: crop growth model, field experiment, phenological phase, grain yield, leaf area index, soil moisture

OBSAH

1 ÚVOD.....	9
2 LITERÁRNÍ PŘEHLED	11
2.1 Slovníček vybraných pojmů.....	11
2.2 Ječmen jarní	11
2.3 Růstové modely.....	13
2.3.1 WOFOST.....	16
2.3.2 DSSAT (CERES-Barley)	17
2.3.3 HERMES	19
2.3.4 DAISY	20
2.3.5 AQUACROP	21
2.3.5.1 Vodní stopa	22
2.4 Současné mezinárodní projekty využívající růstové modely.....	24
2.4.1 Projekt AgMIP.....	24
2.4.2 Projekt MACSUR.....	25
2.4.3 Projekt Global Yield Gap Atlas.....	26
2.5 Vstupní data pro růstové modely	27
2.5.1 Požadavky na vstupní data pro růstové modely	28
2.5.2 Klasifikace vstupních datových souborů.....	29
3 CÍL PRÁCE	36
4 MATERIÁL A METODIKA.....	37
4.1 Mechanismus výpočtů jednotlivých modelů.....	37
4.1.1 Princip určení rychlosti fenologického vývoje dané odrůdy	39
4.1.2 Metoda stanovení velikosti výnosu	40
4.1.3 Metoda výpočtu vodní bilance v půdě.....	41
4.1.4 Metoda výpočtu evapotranspirace	42
4.2 Polní pokusy.....	44

4.3 Experimentální lokality	46
4.3.1 Lednice	46
4.3.2 Věřovany	47
4.3.3 Domanínek	47
4.4 Experimentální data	48
4.4.1 Principy měření na polních pokusech MENDELU	49
4.4.1.1 <i>Index listové plochy</i>	49
4.4.1.2 <i>Půdní vlhkost</i>	51
4.4.2 Metodika polních pokusů MENDELU.....	55
4.4.2.1 <i>Odrůdový pokus</i>	56
4.4.2.2 <i>Pokusy s experimentálními zákryty pro redukci srážek</i>	58
4.4.3 Metodika polních pokusů ÚKZÚZ.....	61
4.5 Statistické ukazatele použité v této práci	62
5. VÝSLEDKY A DISKUZE	64
5.1 Kalibrace	64
5.1.2 Kalibrace s využitím pozorované fenologie	64
5.1.3 Kalibrace s využitím výnosových dat.....	67
5.1.4 Kalibrace pro odhad LAI.....	70
5.1.5 Kalibrace pro odhad půdní vlhkosti	77
5.1.6 Porovnání simulací kalibrace podle statistických ukazatelů	85
5.2 Validace.....	86
5.2.1 Validace s využitím pozorované fenologie	87
5.2.2 Validace s využitím výnosových dat.....	89
5.2.3 Validace pro odhad LAI	90
5.2.4 Validace pro odhad půdní vlhkosti.....	93
5.2.5 Porovnání simulací validace podle statistických ukazatelů.....	98
5.3 Porovnání modelů	100

6 ZÁVĚR	105
7 LITERATURA	108
8 PŘÍLOHY	126
8.1 Seznam zkratk	126
8.2 Seznam obrázků	128
8.3 Seznam tabulek	133

1 ÚVOD

Pro Českou republiku je pro rostlinnou výrobu typická značná variabilita stanovištních podmínek. Zásadní rozdíly lze spatřit v odlišných půdních (např. reliéf, půdní typy, půdní druhy), klimatických (např. rozložení globální radiace během sezóny, úhrn srážek, teplota vzduchu) a socio-ekonomických (např. velikost farem či jednotlivých honů) aspektech ovlivňujících zemědělskou produkci (Hájková, et al., 2012; Křen a Míša, 2012; Sánka a Materna, 2004). Jednou z aktuálních výzev současného výzkumu v oblasti produkce polních plodin (a v zásadě všech zemědělských komodit) je otázka, zda a za jakých okolností budou současné hospodářsky využívané druhy rostlin schopné se adaptovat na zvyšující se variabilitu a postupující změnu klimatu (Brázdil et al., 1995; Klečka a Korbíny, 1973; Pretel et al., 2010; Rožnovský, 2011; Žalud et al., 2009).

Hlavní příčinou změny klimatických podmínek (zvyšování koncentrace skleníkových plynů, růst teploty, změna úhrnů srážek a globální radiace) jsou podle závěrů vědců z IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) antropogenní vlivy (IPCC, 2013). Vazba zemědělství na klimatické podmínky řadí tento sektor mezi oblasti, které mohou být klimatickou změnou nejvíce ovlivněny (Kopecká et al., 2013; Šír et al., 2002; Žalud et al., 2009). Přesně odhadnout dopady budoucích měnících se klimatických podmínek je komplikované. Zda bude výnos více ovlivněn fertilizačním efektem způsobeným zvýšenou koncentrací CO₂ nebo dopady způsobenými změnou meteorologických prvků (Trnka et al., 2006; Žalud et al., 2002), se v dnešní době odhaduje na základě následujících dvou metod:

1. pomocí experimentů vycházejících z polních pokusů, které se uskutečňují v podmínkách řízené atmosféry,
2. pomocí růstových modelů.

Prováděné experimenty jsou finančně nákladné, časově omezené a aplikovatelnost jejich výsledků na větší území lišící se půdně-klimatickými podmínkami je nemožná. Pro kvantifikaci dopadů očekávaných změn klimatu jsou tedy růstové modely stále častěji využívaným nástrojem. Nevýhodou modelů je, že zjednodušují simulovaný systém. I přes snahu co nejvíce přiblížit simulované výsledky reálnému pozorování/měření (Kersebaum et al., 2015), simulace růstových modelů nikdy nemohou být 100% odrazem reality (Brázdil a Kirschner, 2007; Žalud et al., 2009).

Rostlinná výroba je závislá na podmínkách prostředí. Má klíčovou úlohu v řešení potravinové bezpečnosti. Aby se minimalizovala rizika a optimalizovalo hospodaření je výzkum v oblasti agrosystémů tímto směrem zintenzivňován (Hlavinka et al., 2015).

Růstové modely, jako nástroje pro hodnocení dopadů měnícího se klimatického prostředí (Holzworth et al., 2015), mohou pomoci při hledání adaptačních opatření a tvorbě možných strategických postupů pro různé scénáře budoucího vývoje.

2 LITERÁRNÍ PŘEHLED

2.1 Slovníček vybraných pojmů

Ansámbl modelů

- označení pro soubor modelů. V této disertační práci je to souhrnné označení pro skupinu následujících modelů: WOFOST, CERES-Barley (DSSAT), HERMES, DAISY a AQUACROP. Pomyslná simulace ansámbly modelů je pak označena jako Φ MODELŮ.

Parametrizace modelu

- prvotní nastavení modelu jeho vývojáři. Hodnoty daného parametru jsou nastaveny tak, aby jeho výpočet co nejpřesněji vystihoval při daných podmínkách skutečný stav v přírodě (Arnold et al., 2012).

Kalibrace modelu

- v přiměřeném rozsahu přednastaveném vývojáři přizpůsobit parametry tak, aby simulace modelu co nejlépe vystihovaly podmínky zájmového prostředí (Van Keulen, 1976; Penninga de Vries a Van Laar, 1982). Kalibrované hodnoty parametrů jsou platné pouze pro verzi modelu, která byla pro kalibraci použita. Každá nová verze modelu představuje možnost nových procesů a algoritmů, proto může být pro některé z parametrů vyžadována opětovná kalibrace (Kersebaum et al., 2015).

Validace modelu

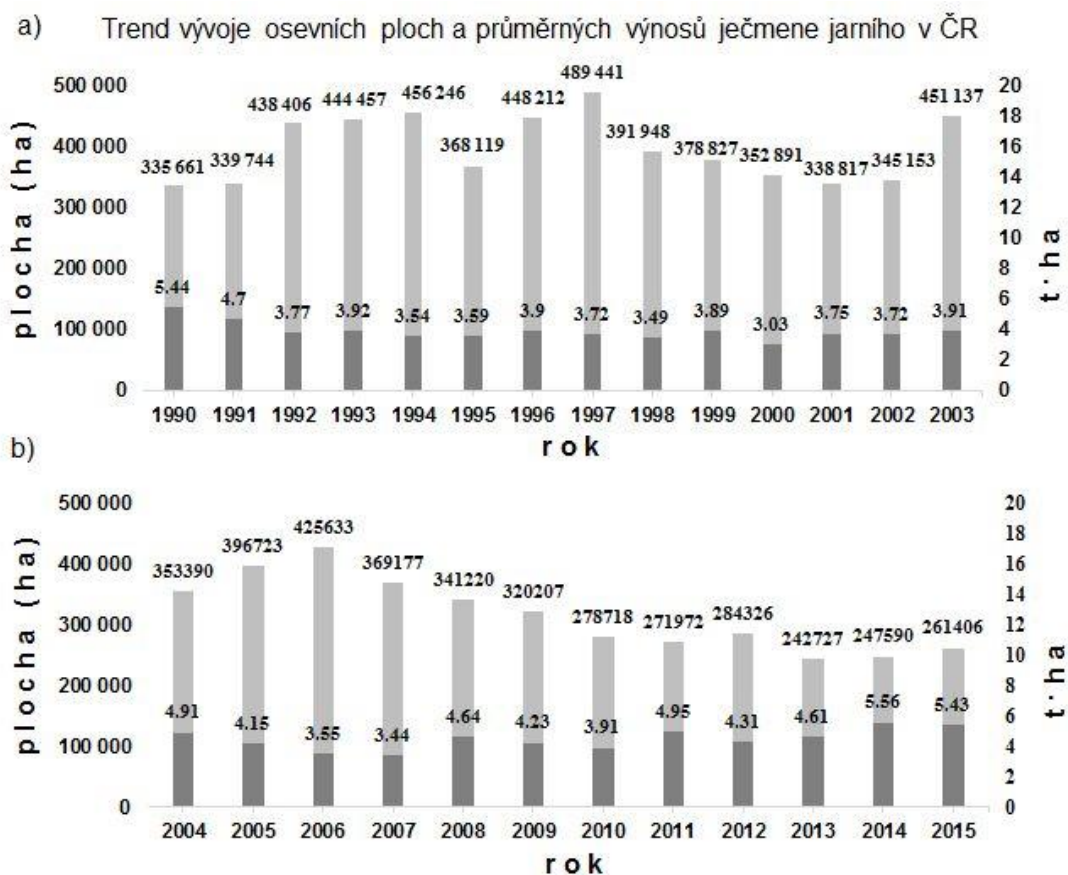
- ověření kalibrace modelu na nezávislém souboru dat (De Wit, 1982). Proces, který zkoumá, do jaké míry odpovídají výstupy modelu reálně zjištěným datům a jaká je tedy schopnost modelu reprezentovat daný systém.

2.2 Ječmen jarní

Ječmen je významnou světovou komoditou (Ullrich, 2011). V celosvětovém měřítku se ho ročně vyprodukuje okolo 140 miliónů tun (FAOSTAT, 2016). V České republice patří především v jarní formě díky příhodným klimatickým podmínkám k nejčastěji pěstovaným plodinám (ČSÚ, 2016).

V posledních letech osevní plochy ječmene jarního v důsledku vývoje trhu a poklesu chovu hospodářských zvířat výrazně klesly (obr. 1). V době, kdy se v České republice ječmen jarní pěstoval na výměře 400 tisíc ha, se na výrobu sladu zpracovalo kolem 30 % produkce, zbylých 70 % zrna se použilo ke krmným účelům. Dnes je tomu

naopak (Kůst a Potměšilová, 2013). Vzhledem k pěstitelské tradici a tradici pití a vaření piva však zůstává ječmen jarní i nadále v České republice druhou nejvíce pěstovanou obilovinou (ČSÚ, 2016).



Obr. 1: Grafické znázornění vývoje osevních ploch a průměrných ročních výnosů a) v letech 1990 – 2003 a b) v letech 2004-2015 pro ječmen jarní v České republice (ČSÚ, 2016).

Růstem a vývojem se u ječmene jarního nazývají změny probíhající během životního cyklu. Zahrnují období od nabobtnání a vyklíčení obilky až do vytvoření nové obilky (Klem et al., 2011). Za růstové změny se považují kvantitativní přírůstky organické hmoty, růst a diferenciace rostlinných buněk a pletiv, vznik nových rostlinných orgánů a jejich prostorové uspořádání (Zimolka, et al., 2006). Souběžně probíhají kvalitativní změny, které vedou k přechodu rostlin z vegetativního do generativního období, vrcholícího vytvořením reprodukčních orgánů (zrna) (Klem et al., 2011). Zatímco k zajištění růstu je třeba, aby vegetační faktory (živiny, voda, vzduch) měly rostliny k dispozici alespoň v minimálním množství, k průběhu vývojových změn (diferenciaci generativních orgánů) potřebují splnění limitovaných požadavků na vnější faktory (vývojové požadavky), hlavně teplotní a světelné, v určité

výši, působící v konkrétním časovém rozsahu (délka světelného dne) (Černý et al., 2007; Zimolka, et al., 2006).

Za oblasti vhodné pro pěstování ječmene se dříve považovaly nížiny s dostatkem vody a dobrou strukturou půdy (např. Haná, střední a dolní Polabí, Plzeňsko apod.). V současné době se daří dosahovat dobrých výnosů i v polohách s nadmořskou výškou kolem 500 m n. m. K tomu přispělo oteplování a lehké půdy vysočin, ve kterých ječmen dobře vzchází a odnožuje (Černý et al., 2007).

2.3 Růstové modely

Růstové modely jsou počítačové softwary, které se snaží co nejlépe zachytit růst, vývoj a výnos plodin. Pracují na základě algoritmů a jejich vzájemné provázanosti. Pomocí komplexních matematických výpočtů simulují procesy odehrávající se v systému půda-rostlina-atmosféra. Rovnice v modelech převádějí do číselné podoby nejen fyziologické procesy týkající se rostliny, ale i hydrologické, pedologické a chemické procesy v daných půdně klimatických podmínkách. Jedná se o zjednodušený pohled na realitu.

V dnešní době je dostupná celá řada růstových modelů (např. APES, CROPSYST, DAISY, FASSET, HERMES, MONICA, STICS, WOFOST, ...), které z hlediska biologických a technologických aspektů udržitelnosti slouží jako nástroj pro plánování řízených ekosystémů (Challinor et al., 2009; Porter a Semenov, 2005). Snaží se přiblížit důsledky změny prostředí (vč. změny teploty, srážek a nárůstu koncentrace oxidu uhličitého v atmosféře) na výměnu látek mezi rostlinou a prostředím. 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 (Haberle et al, 2008; Hlavinka et al, 2015).

Historie vývoje růstových modelů spadá do šedesátých let dvacátého století. Jejich vývoj je provázán s vývojem výpočetní techniky a snahou vědců propojit mezioborové znalosti a dát jim určitý systém a řád. První růstové modely vznikly v Nizozemsku a jsou spojeny se jménem profesore de Wita (viz kapitola 2.3.1 WOFOST). Druhá významná skupina, zabývající se touto problematikou měla hlavní vývojové centrum na univerzitách v USA (viz kapitola 2.3.2 DSSAT). Od té doby

prodělal výzkum značný pokrok a růstové modely jsou na základě nových poznatků a nových technologických možností stále rozšiřovány a zdokonalovány.

Jedno z možných dělení růstových modelů je do následujících tří skupin (Hlavinka et al, 2015):

1. Prosté regresní modely,

První skupina zahrnuje modely, které vznikly v první fázi vývoje při hledání základních vazeb mezi pozorovanou proměnnou a podmínkami prostředí. Typické jsou pro ně relativně nízké nároky na množství vstupních dat. Na jejich základě jsou schopné odhadnout pouze optimální a limitující hodnoty daného parametru. Výsledky simulace nemůžeme zobecnit a rozšířit mimo podmínky, pro které byly modely kalibrovány.

2. Minimalistické modely,

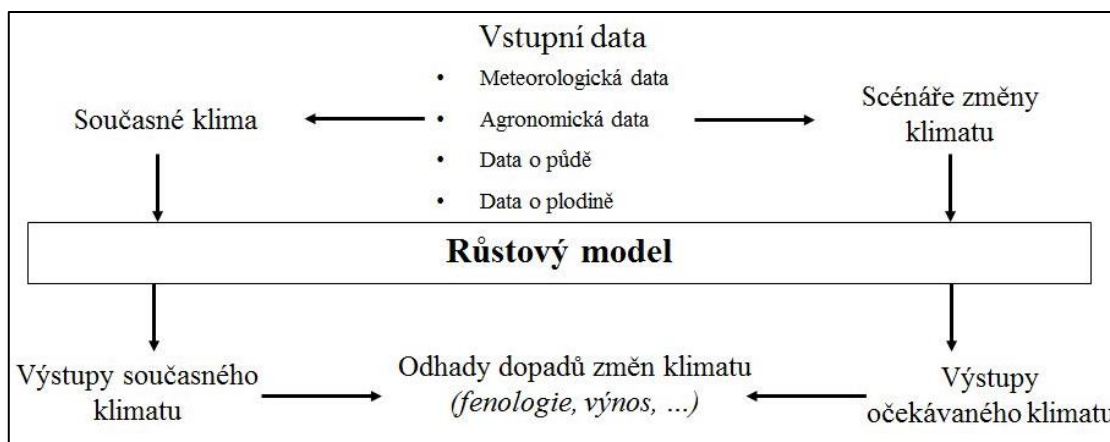
Modely pomyslné druhé skupiny byly vyvinuty na základě empirického přístupu. Jsou náročnější na vstupní data. Při výpočtech kombinují více faktorů a představují komplexnější systém. Rozsah vnějších podmínek a odhad optimálních úrovní popisují podrobněji než modely z první skupiny. V omezené míře jsou mezi prostředími přenositelné.

3. Dynamické modely.

Do třetí skupiny modelů řadíme modely, které jsou v rámci možností nejkompexnější. Snaží se zahrnout všechny hlavní složky systému půda-rostlina-atmosféra (Kersebaum, 2015). Mají největší nároky na vstupní data, pomocí nichž pak simulují realitu na funkčním základu ve správné časové posloupnosti. Po kalibraci a validaci se dají využívat pro různé lokality. Nastavování a znalost ovládání softwaru je komplikovanější než u přechozích skupin modelů. To může kalibraci a validaci uživateli komplikovat.

Před tím, než se mohou růstové modely začít aplikovat pro potřeby odhadu dopadů změn klimatu, musí být adaptovány na místní podmínky, tzn., že musí proběhnout kalibrace a validace - vše nejlépe na základě reálných pozorovaných a naměřených dat. Po kalibraci a validaci růstových modelů na podmínky současného klimatu v daném prostředí bývají v dalším kroku modely používány pro posouzení

dopadů změny klimatu podle různých scénářů předpokládaných klimatických podmínek (např. Graß et al., 2015; Kollas et al., 2015; Takáč, 2001; Trnka et al., 2014; Trnka et al., 2011; Šiška et al., 2013) (schéma na obr. 2).



Obr. 2: Zjednodušené schéma použití růstového modelu pro odhadnutí možných dopadů klimatických změn na růst a vývoj plodin (Žalud a Dubrovský, 2002).

V posledních letech se pro dosažení co nejpřesnějších výsledků rozrůstá trend využívání sady neboli ansámblu růstových modelů (Palosuo et al., 2011; Rötter et al., 2012). Tímto přístupem lze získat lepší představu o nejistotě odhadu díky míře shody mezi růstovými modely.

Porovnáním různých modelů a jejich přístupů k modelování se mohou odhalit nejistoty vztahující se k růstu a vývoji plodin a k výnosovým předpovědím, včetně nejistot spojených se strukturou modelu (Chatfield, 1995; Palosuo et al., 2011). Srovnání může pomoci k identifikaci částí modelů, které produkují systematické chyby a vyžadují zlepšení (Palosuo et al., 2011, Porter et al., 1993).

Růstové modely jsou také stále častěji využívány nejen pro modelování růstu a vývoje jednotlivých plodin, ale také pro modelování víceletých osevních postupů. Simulace půdních procesů se tak více blíží realitě (Kollas et al., 2015) a možnosti komplexněji odhadovat dopady změny klimatu jsou větší (Hlavinka et al., 2015).

V následujících podkapitolách 2.3.1 - 2.3.5 je popsána historie vzniku jednotlivých modelů. Principy výpočtů jsou uvedeny v podkapitole metodiky 4.1.

2.3.1 WOFOST

Růstový model WOFOST (WORLD FOOD STUDIES) je dynamický simulační model vyvinutý pro kvantitativní analýzu produkce polních plodin (Diepen, 1989). Počátky jeho vývoje můžeme datovat do šedesátých let dvacátého století, kdy se s rozvojem výpočetní techniky otevřely vědcům nové příležitosti k syntéze detailních znalostí z různých vědních oborů. Jeden z prvních vědců, který v tomto případě našel potenciál v podobě možnosti převedení přírodních jevů do matematického jazyka, byl profesor Zemědělské Univerzity ve Wageningenu v Nizozemku (Wageningen Agricultural University), Allard J. W. De Wit. Ve spolupráci s kolegy z Institutu biologického a chemického výzkumu polních plodin a bylin (the Institute for Biological and Chemical Research on Field Crops and Herbage, IBS) vyvinul simulační model ELCROS (ELEMENTARY CROp growth Simulator, de Wit et al., 1978) a BACROS (Basic CROp Simulator, de Wit, 1985). ELCROS a BACROS měly objasnit všechna „tajemství“, která se odehrávají před sklizní a měly poskytnout konzistentní kvantitativní základ pro teorii „o fungování rostliny“. Hlavní myšlenkou vytvoření modelů bylo integrovat znalosti o procesech růstu rostlin a následné ověření hypotézy pomocí matematických reprodukcí polních experimentů (de Wit et al., 1978). Po zveřejnění zprávy Římského klubu „Meze růstu“ („Limits to Growth“) z roku 1972, která upozorňovala veřejnost, že je třeba zastavit hospodářský růst a že svět stojí před vyčerpáním přírodních zdrojů (Meadows et al., 1972), se vědci zaměřili na zkoumání možností zvýšení bezpečnosti potravin. Objevila se snaha sjednotit znalosti z agrotechnických a sociálně-ekonomických disciplín. Výzkum a rozvoj simulace plodin se stal součástí metodiky aplikovaného výzkumu Centra pro světovou potravinovou studii (Center for World Food Studies, CWFS), ve které spolupracovali odborníci z různých institucí a z různých oborů. Byly vyvíjeny modely, mezi kterými se poprvé objevil i model WOFOST (Spitters et al., 1989). Modely simulovaly potenciální rostlinnou produkci na základě vstupních podmínek popisujících prostředí (půdu, klima), genetické vlastnosti rostlin a výrobní management (zavlažování, aplikace hnojiv).

Od té doby byl růstový model WOFOST používán v různých projektech či studiích i pro účely, ke kterým nebyl primárně určen. Proto musel projít řadou inovací, úprav a rozšíření. Simulace růstového modelu WOFOST nabízí širokou škálu možností, jak řešit výzkum a praktické otázky v oblasti zemědělství, vodního

hospodářství a ochrany životního prostředí. V sedmdesátých letech dvacátého století, kdy se ve větší míře začalo mluvit o možnostech monitorování zemědělství pomocí dálkového průzkumu Země a o vytvoření nástroje pro odhad produkce plodin pro Evropu na regionálních úrovních (Steven a Clark, 1990), bylo hlavní myšlenkou vyvinout systém, který by byl nezávislý, nestranný a dokázal by odhadnout produkci hlavních plodin pěstovaných v Evropě. Tento systém by pomohl kvantifikovat meziroční výnosovou variabilitu plodin v rámci regionů a zemí a poskytovat objektivní, vědecky podložené a reprodukovatelné výsledky. Vznikl Crop Growth Monitoring System (CGMS), v rámci kterého byl růstový model WOFOST, propojený s geografickým informačním systémem GIS, používán jako nástroj sloužící k monitorování plodin na orné půdě v Evropě a pro prognózu výnosů v aktuálním vegetačním období (van Diepen, 1992; van Diepen, 1995).

V současné době je model WOFOST dále udržován a rozvíjen výzkumným ústavem Alterra (Wageningen, UR). Ten stále přispívá ke kvalifikovanému a nezávislému výzkumu v realizaci kvalitního a udržitelného životního prostředí podporujícího biodiverzitu. Kombinuje praktický, inovativní a interdisciplinární vědecký výzkum v mnoha oblastech souvisejících se světem kolem nás a udržitelným využíváním životního prostředí. Pomocí WOFOSTu se snaží najít možná řešení na problémy, ke kterým se stále častěji obrací pozornost nejen vědeckého světa, ale i široké veřejnosti. Poskytováním odpovědí na otázky zásobování potravinami, dopadů změny klimatu a udržitelnosti ekonomiky, pak může hodnotit kvalitu života na Zemi (Moses, Jayas a Alagusundaram, 2015).

Další z řady projektů, projekt Soil-Water-Atmosphere-Plant modelling system (růstový model SWAP), využívá model WOFOST k simulaci nejen vývoje a růstu plodin, ale i k proudění vody, rozpuštěných látek a tepla v půdě (Van Dam et al., 2008; Van Dam, 2000). Růstový model WOFOST byl využit v mnoha vědeckých studiích (např. Confalonieri et al., 2009; Eitzinger et al., 2003; Todorovic et al., 2009; Wu et al., 2002).

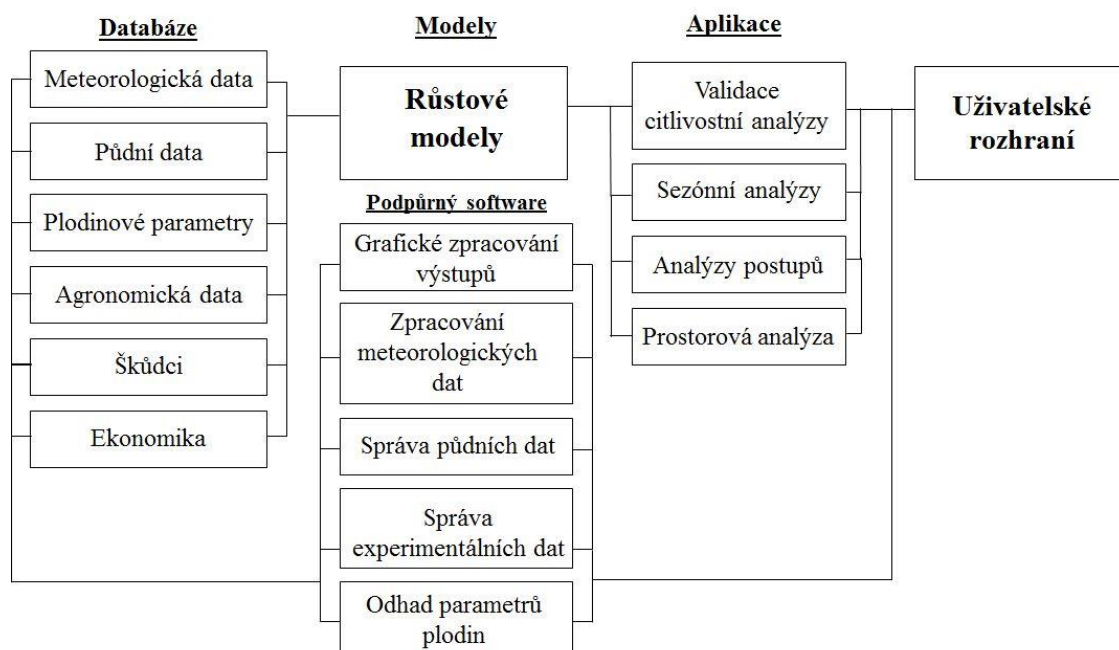
2.3.2 DSSAT (CERES-Barley)

DSSAT (The Decision Support System for Agrotechnology Transfer, www.dssat.net) je software, který obsahuje simulační modely pro více než 42 plodin. Je vyvíjen přes 20 let. Na jeho vývoji se podílejí výzkumníci, pedagogové i konzultanti

z řad odborníků specializovaných na různá odvětví (farmáři, zemědělci, ekonomové, politici) dnes už ve více než 100 zemích celého světa.

Kolébku softwaru DSSAT jsou hlavně Univerzity v USA (Florida, Georgia, Hawaii, Washington). První verze softwaru DSSAT vznikla jako dílčí výsledek projektu IBSNAT (International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer) (Jones et al. 2003; Tsuji et al., 2002), jehož účelem bylo vytvořit a distribuovat přenosný, uživatelsky přívětivý, rozhodovací počítačový program, který by pomohl umožnit uživatelům na základě biologických požadavků plodin a fyzikálních vlastností půdy dosažení stanovených cílů. Hlavním podnětem k účasti na projektu bylo umožnění účastníkům dosáhnout větší efektivity zemědělského výzkumu prostřednictvím lepší integrace poznatků o půdě, klimatu, plodinách, managementu a výrobních technologiích. Tímto způsobem mohly být virtuálně přeneseny z jednoho místa na jiné, kde se půdy a klima navzájem liší (Uehara a Tsuji, 1998). Klíčem k úspěchu projektu byla podpora, vedení a důvěra k zúčastněným vědcům. Projekt IBSNAT ukázal, že mezinárodní spolupráce je přínosná a potvrdil, že je třeba se zabývat nejen místními, ale i globálními otázkami bezpečnosti potravin, kvality životního prostředí a udržitelného rozvoje (Uehara, 1993). Od té doby byl DSSAT se svými simulačními modely použit pro velkou řadu aplikací, ať už se jedná o úroveň simulace v rozsahu jednotlivých polí/statků/farem či k posuzování vlivu variability klimatu a změny klimatu na globální úrovni (Jones et al., 2003). DSSAT shromažďuje databáze s půdními soubory, meteorologickými daty, agrotechnickými postupy a pozorovanými a měřeními experimentálními daty. Pomáhá analyzovat hospodářská rizika a dopady na životní prostředí spojené se zavlažováním, hnojením, hospodařením s živinami, klimatickou změnou, poutáním půdního uhlíku a přesným managementem hospodaření. DSSAT byl vyvinut pro prostorovou aplikaci modelu plodin. Je to soubor samostatných programů/modulů, které jsou propojeny a fungují dohromady s možností propojení s geografickým informačním systémem GIS.

Struktura softwaru DSSAT bývá napodobována i v rámci jiných růstových modelů. Je znázorněna pomocí schématu na obr. 3, kde je ukázána provázanost jednotlivých částí modelu vč. vstupních databází, podpůrného softwaru, samotných růstových modelů a navazujících aplikací. Software DSSAT v rámci mnoha studií využívají vědci po celém světě (např. Basak et al., 2010; Liu et al., 2011; Porter et al., 2010; Sau et al., 2004; Throp et al., 2008; Timsina et al., 2008).



Obr. 3: Schématické znázornění jednotlivých částí softwaru DSSAT využívaného pro podporu rozhodovacích procesů v rostlinné produkci (Jones et al., 2003).

2.3.3 HERMES

Růstový model HERMES pochází z Německa. Jeho tvůrcem je vědec Leibnizova Centra pro výzkum zemědělské krajiny (The Leibniz Centre for Agricultural Landscape Research, ZALF), Dr. Kurt-Christian Kersebaum. Prvním impulzem k vývoji modelu HERMES byla myšlenka vytvoření praktického počítačového programu k využití zemědělci a poradci v zemědělství a vodním hospodářství, který by byl schopný simulovat dynamiku a pohyb dusíku v půdě přes zimu a začátkem jarního období. Cílem bylo vytvořit jednoduchý nástroj, který umožní výpočet obsahu minerálního dusíku obsaženého v půdě brzy z jara (Kersebaum et al., 2007). Toto množství se obvykle stanovuje pomocí laboratorních rozborů půdních vzorků, na jejichž základě se pak rozhoduje o dávkách hnojiva přidávaného k pěstovaným plodinám. Prvotní koncept, který měl v první řadě ulehčit práci zemědělcům, byl postupně rozšiřován o výpočet vodní bilance a dynamiku růstu nejvíce pěstované plodiny – pšenice ozimé (Kersebaum, 1989) a upravován tak, aby byl schopen simulovat dynamiku dusíku v půdě a rostlině v průběhu celého roku. Simulovaný deficit mezi nabídkou dusíku, který byl obsažen v půdě a poptávkou po dusíku, který ke svému růstu potřebovala rostlina, byl použit k výpočtu doporučených dávek hnojiv v průběhu celého vegetačního období. Následující rozšíření modelu

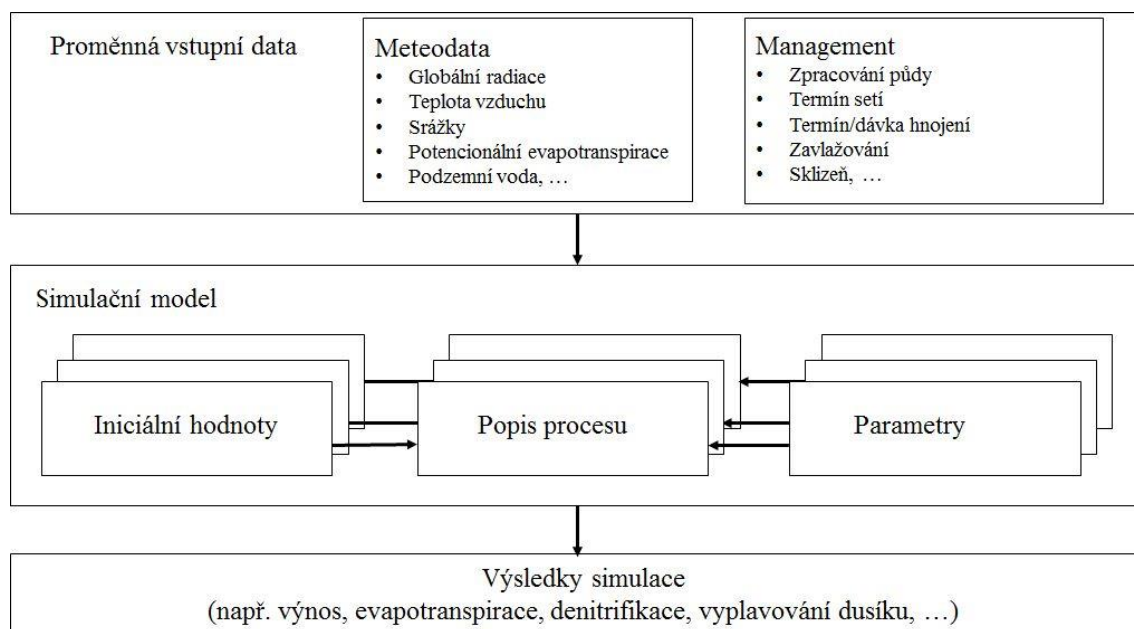
HERMES se týkalo začlenění dalších polních plodin a rozšíření i o modul počítající denitrifikaci (Kersebaum, 1995). Modul růstového modelu byl upraven pomocí generického přístupu, který provázal různé plodiny pomocí předdefinovaných externích plodinových parametrů (Kersebaum, 2007). Dnes je na takové úrovni, že se dá použít i k simulaci víceletých osevních postupů, počítá evapotranspiraci a integruje různé přístupy pro posouzení vlivu zvýšené koncentrace CO₂ v atmosféře (Kersebaum et al., 2009) na růst, vývoj a produkci polních plodin. Tento model má grafické uživatelské rozhraní a datovou strukturu kompatibilní s geografickým informačním systémem GIS. Byl použit v mnoha studiích, např. k hodnocení využívání a hospodaření s půdou v dusičnanem znečištěných povodích pitné vody v severním Německu (Kersebaum, 2000), k odhadu znečištění Labe dusíkem (Kersebaum et al., 2003) či k posouzení vlivů redukčních agroenvironmentálních opatření v Braniborsku (Kersebaum et al., 2006). Růstový model HERMES je svým tvůrcem dále rozšiřován a upravován. V současné době komplexně simuluje celkový vývoj plodiny v daných podmínkách na základě specifických vstupních dat.

2.3.4 DAISY

Růstový model DAISY je dánský agroekologický simulační model (Hansen, 2012; Hansen et al., 1990). Prvním impulsem k jeho vývoji byla snaha o vytvoření nástroje, který by byl dostupný a nápomocný k posouzení hrozby, kterou představuje pro kvalitu povrchových a podzemních vod vyplavování dusíku z polí, což je nevyhnutelný důsledek intenzivního zemědělství (EHP, 1995). Protože stanovování množství vyplaveného dusíku z polí pomocí laboratorních rozborů je časově náročné a drahé, začaly se k tomuto účelu vytvářet zemědělsko-ekosystémové modely schopné simulovat dynamiku dusíku a velikost jeho vyplavování ze zemědělských půd. V Dánsku to vedlo k vývoji růstového modelu DAISY (Hansen et al., 1991; Hansen et al., 1990). DAISY patří do řady dynamických modelů. Cílem jeho postupného vývoje je dosáhnout co nejlepší simulace vodní bilance, dynamiky dusíku, vývoje organické hmoty v půdě a růstu, vývoje a výnosu plodin v rámci alternativních strategií řízení. Software tohoto modelu je otevřený systém, který tak umožňuje snadnou implementaci nových procesů. Byl navržen tak, aby usnadnil interakci s jinými modely (Abrahamsen, 2000). Růstový model DAISY lze považovat za dobře testovaný

model. Byl ověřen v řadě významných srovnávacích studií (např. Diekkrüger et al., 1995; Hansen et al., 1991; Jensen et al., 1997; Smith et al., 1997; Svendsen et al., 1995; Vereecken et al., 1991 a de Willigen, 1991). Jeho simulace v porovnání s ostatními modely patří k jedněm z nejlepších (Palosuo et al., 2011; Rötter et al., 2012).

Základním předpokladem DAISY je, že modelovaný systém může být reprezentován trojrozměrným prostorem modelu. Každý pomyslný sloupec představuje vertikální linii, která zahrnuje oblasti od bioklimatologie v horní části až po oblast podzemních vod na dně. Samotný model má hierarchickou strukturu a forma vstupních dat je do jisté míry flexibilní (obr. 4). Za účelem používání modelu musí být model inicializován a parametrizován na dané podmínky.



Obr. 4: Schematický přehled systému růstového modelu DAISY (Abrahamsen, 2000).

2.3.5 AQUACROP

Růstový model AQUACROP (Crop Water Productivity Model, www.fao.org/nr/water/aquacrop.html) je FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) vyvíjen tak, aby byl schopný odhadovat dosažitelné výnosy hlavních polních plodin v suchých oblastech a všech dalších oblastech, kde se voda stává limitujícím faktorem. Je určen pro vědce, studenty, vládní agentury, neziskové organizace a pro sdružení zemědělců jako školicí a vzdělávací nástroj, který ukazuje,

jak důležitou roli hraje voda v souvislosti s produktivitou plodin. Aplikace modelu AQUACROP zahrnují nástroje, pomocí kterých má uživatel možnost k:

- porovnání dosažitelných výnosů podle skutečných výnosů na poli/farmě nebo regionu,
- posuzování dosažitelných výnosů plodin v daných zeměpisných oblastech, kde je voda limitujícím faktorem,
- posuzování „rainfed“ rostlinné výroby v dlouhodobém horizontu,
- plánování možnosti/dávky zavlažování pro dosažení maximální produkce v rámci různých klimatických scénářů (sezónní strategie a operativní rozhodování),
- posouzení možného výskytu vodního deficitu a vhodnosti doplňkového zavlažování,
- hodnocení účinku pravidelných zavlažovacích dávek na dosažitelné výnosy,
- simulaci posloupnosti plodin (osevního postupu),
- provádění analýzy scénářů budoucího klimatu,
- optimalizaci množství dostupné vody, podle ekonomických kritérií a kritérií udržitelnosti,
- hodnocení dopadu nízkých dávek hnojení živinami a zavlažování vodou v interakci na výnosy,
- posouzení skutečné biologické/ekonomické produktivity vody na poli,
- podpoře v rozhodování v rámci politických opatření řešících přidělování vody,
- posuzování druhů/odrůd plodin podle výnosu a podle jejich nároků na vodu.

Na rozdíl od jiných růstových modelů má výrazně menší počet vstupních parametrů, čímž by měl být přesnější, robustnější a pro uživatele jednodušší.

Růstové modely, které jsou schopny simulovat vodní bilanci v půdě, výnos a evapotranspiraci, jsou v mnohých studiích využívány jako základ pro stanovení velikosti vodní stopy (Liu, 2009, Mekonnen, 2011, Siebert, 2010, Zhuo, 2014). Model AQUACROP se stává k tomuto účelu modelem nejužívanějším (La Zhuo, 2016).

2.3.5.1 Vodní stopa

V době, kdy začíná přibývat oblastí, kde se voda stává limitujícím faktorem, začíná být otázka udržitelného využívání vodních zdrojů jednou z nejvíce řešených.

Odborníci se shodují na tom, že vodní deficity nemusí vznikat jen nedostatkem „fyzické“ vody, ale jsou důsledkem špatného hospodaření s vodou (Aldaya a Llamas, 2008). V rámci toho vznikly vedle klasických ukazatelů, jako jsou „spotřeba vody“ či „čerpání povrchové / podzemní vody“ i další ukazatele, které poskytují komplexnější informace a pomáhají stanovovat dopady a příčiny často špatného hospodaření s vodními zdroji.

Jedním takovým ukazatelem je „vodní stopa“ (*water footprint*), v jejímž základu stojí koncept tzv. „virtuální vody“ (*virtual water*).

Virtuální voda je objem vody, který je potřebný k produkci výrobku nebo služby. Jedná se tedy o veškerou vodu použitou v různých fázích výrobního cyklu (Allan, 1999; Allan, 1997; Hoekstra, 2003). Název „virtuální“ ukazuje na skutečnost, že většina z celkového objemu použité vody není v samotném výrobku obsažena. Naopak skutečný obsah vody ve výrobku je většinou v porovnání s virtuální vodou zcela zanedbatelný (Hák, 2013).

Vodní stopa je definována jako celkový objem vody, který se používá k výrobě zboží a na služby spotřebované jednotlivcem nebo společností (Chapagain a Hoekstra, 2008). Vodní stopa je tedy celkový objem sladké vody potřebný k produkci zboží a služeb, které jsou spotřebovány danou společenskou jednotkou. Podle velikosti můžeme rozlišit vodní stopu jednotlivce, domácnosti, města či státu (J. A. Allana, 1993). Ne všechno spotřebované zboží bylo vyrobeno v dané oblasti. Vodní stopa se tedy skládá ze dvou částí: ze spotřeby domácích a zahraničních vodních zdrojů.

Některé světové oblasti mají dostatečné zásoby sladké vody, jiné mají tyto zdroje omezené. Z toho vychází koncept virtuální vody. Pro optimalizaci využívání sladkovodních zdrojů v celosvětovém měřítku by se státy s omezenými vodními zdroji měly zaměřit na vývoz produktů nenáročných na vodu a dovážet výrobky na vodu náročnější - měly by tedy dovážet virtuální vodu. Naopak státy bohaté na vodní zdroje by využívaly své výhody a vyvážely by produkty náročné na vodu. Fungující trh s virtuální vodou by tak mohl být jednou z možností, jak lépe rozdělit sladkovodní zdroje (Hák, 2013).

Podle hlavního autora konceptu virtuální vody J. A. Allana (1993) může být srážková voda, která spadne na území, rozdělena na vodu zelenou a modrou.

- Zelená voda (*green water*) je část srážek, která se dostává zpět do atmosféry evapotranspirací (zahrnuje evaporaci i transpiraci). Zelená voda je jediným zdrojem vody v zemědělství, které je plně závislé na vodních srážkách.
- Modrá voda (*blue water*) představuje povrchovou a podzemí vodu, která se spotřebuje v průběhu výrobního cyklu produktu nebo služby. V případě rostlinné produkce je to tedy voda použitá na zavlažování ze zavlažovacích nádrží nebo rybníků.

Vodní stopa zemědělského nebo průmyslového výrobku či služby obsahuje celkem tři složky: zelenou, modrou a šedou vodu. Zatímco v minulosti byla pozornost zaměřena především na otázku nedostatku modré vody pro závlahové zemědělství, v současné době se studie zabývají více vodou zelenou, která podmiňuje všechny rozhodující funkce ekosystémů (Aldaya a Llamas, 2008).

- Zanedbatelná není ani tzv. šedá voda (*grey water*), tj. voda, která je znečištěná v průběhu výrobního procesu. Je definována jako objem vody potřebný k rozředění vypouštěného znečištění do přírodních vod tak, aby výsledná koncentrace znečištění vody zůstala pod zákonnými limity daného státu (Falkenmark, 2003; Chapagain et al., 2006).

Virtuální voda a vodní stopa spojují širokou škálu otázek, poskytujících vhodný rámec k nalezení možných řešení. Tyto indikátory tak mohou přispět k lepšímu hospodaření s vodními zdroji (Hák, 2013).

2.4 Současné mezinárodní projekty využívající růstové modely

Analýzy dopadů proměnlivosti klimatu v zemědělském sektoru vyžadují mezioborové znalosti, pomocí kterých se určí potenciální strategie pro přizpůsobení se předpokládaným změnám v daném odvětví (Hillel a Rosenzweig, 2010). Růstové modely jsou součástí rozsáhlých mezinárodních projektů a informace z nich získané mohou pomoci nastínit odpovědi, jak využít možné přínosy a minimalizovat potenciálně negativní dopady změny klimatu na zemědělskou produkci.

2.4.2 Projekt AgMIP

AgMIP (the Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project; www.agmip.org), je mezinárodní projekt snažící se propojit komunity, zabývající se oblastí pěstování plodin a kromě modelování klimatu také produkčními

a ekonomickými aspekty hrajícími v této oblasti důležitou roli. Účelem projektu AgMIP je zdokonalování a propojování modelů a získání lepší představy o možném budoucím vývoji v oblasti zemědělství. Řeší zde klíčové otázky jako je hospodaření s půdou, vodními zdroji či problematiku škůdců a chorob nebo hospodářských zvířat a to vše na globální úrovni. Existují dva hlavní směry, kterými se AgMIP snaží dosáhnout svých cílů. Prvním je zpracovávání historických dat, která byla reálně zaznamenána, druhý je modelování pravděpodobného budoucího vývoje pomocí různých klimatických scénářů. Hlavním cílem projektu je zlepšení světové potravinové bezpečnosti a posílení adaptační schopnosti rozvojových i vyspělých zemí na očekávané dopady měnícího se klimatu (Rosenzweig, 2013). Projekt AgMIP úzce spolupracuje s dalšími mezinárodními výzkumnými sítěmi, jako je např. FACCE-JPI (viz kapitola 2.4.2 projekt MACSUR).

2.4.3 Projekt MACSUR

Iniciativa FACCE-JPI (Joint Programming Initiative for Agriculture, Climate Change, and Food Security, www.facejpi.com) vznikla v roce 2010. Dnes sdružuje 21 zemí, které se zavázaly k budování integrovaného systému společného plánování možností řešení udržitelného zemědělství, zajišťování potravin a možnému postupu při řešení dopadů změn klimatu. FACCE-JPI umožňuje a řídí výzkum na podporu udržitelné zemědělské výroby a hospodářského růstu. Cílem je přispět k evropskému biohospodářství při zachování a obnově ekosystémových služeb a to v rámci současné a budoucí změny klimatu. Ve svém programu, který se zabývá řešením dopadů změny klimatu na evropské zemědělství, definuje pět hlavních výzkumných témat:

- udržitelnost bezpečnosti potravin podle změny klimatu založené na modelování, referenčním srovnávání a politické perspektivě,
- ekologicky udržitelný růst a intenzifikace zemědělských systémů v rámci současného a budoucího podnebí a dostupnosti zdrojů,
- posuzování a snižování kompromisů mezi výrobou potravin, biologickou rozmanitostí a ekosystémovými službami,
- přizpůsobení se změně klimatu v rámci celého potravinového řetězce, včetně tržních dopadů,
- snižování emisí skleníkových plynů vyvolaných např. nepřímými změnami ve využívání půdy, snížení metanu v zemědělství a lesnictví atd.

V rámci iniciativy FACCE-JPI vznikl projekt MACSUR (Modelling European Agriculture with Climate Change for Food Security; www.macsur.eu), ve kterém v dnešní době spolupracuje 70 institucí z 18 zemí. Jedná se o odborníky z oblastí živočišné, rostlinné a obchodní vědy. Růstové modely, jako jeden z nástrojů pro modelování v oblasti zemědělské produkce, zde mají velmi významné zastoupení. V projektu MACSUR jsou zastoupeny tři hlavní oblasti: zemědělská produkce, chov hospodářských zvířat a socio-ekonomické aspekty. Hlavním úkolem je hledání odpovědí na to, jaký vliv bude mít proměnlivost a změna klimatu na regionální systémy zemědělské produkce a vůbec celkově na produkci potravin v Evropě v blízké a vzdálené budoucnosti. Projekt se zaměřuje na technickou a informační integraci vhodných stávajících modelů a jejich aplikaci v regionálních případových studiích, které odrážejí evropské rozmanitosti v půdě, klimatu, sociálním hospodářství a zemědělských systémech. Očekávaný výsledek projektu je ujasnit postup pro integraci modelů při posuzování dopadů změny klimatu na zemědělskou produkci a posouzení toho, jak mohou být pomocí modelování sníženy nejistoty dopadů změny klimatu na evropské zemědělství.

2.4.4 Projekt Global Yield Gap Atlas

Zajištění potravin bude vzhledem k postupnému nárůstu populace a omezenému množství půdy vhodné pro rostlinnou výrobu závislé na dosažení nejvyšších možných výnosů na stávající zemědělské půdě. K uspokojení očekávané poptávky není v dnešní době aktuální míra zvyšování výnosu hlavních potravinových plodin dostatečně rychlá. Global Yield Gap Atlas (GYGA, www.yieldgap.org) je dalším z řady mezinárodních projektů, v rámci kterého jsou ve větší míře využívány růstové modely. Vyžaduje spojení agronomických znalostí a znalostí výrobních systémů, půdy a podnebí, jimiž se řídí růst a vývoj plodin. Využívá se zde přístupu „zdola nahoru“, který je založen na propojení skutečných dat se simulacemi růstových modelů. Podrobné mapy a související databáze mají být přístupné prostřednictvím internetových stránek projektu. Dalším dílčím cílem projektu GYGA je globální pokrytí mezer s výnosy všech významných potravinových plodin a zemí, které je produkují. První fáze projektu z let 2012 a 2013 byla zaměřena na kukuřici, rýži, pšenici, čirok a proso. V současnosti byl seznam plodin rozšířen o sóju, cukrovou třtinu a ječmen. Projekt GYGA si klade za cíl

zvýšit produkci potravin pro uspokojení zvyšující se poptávky. Zemědělská půda je zde hodnocena pomocí tzv. „potenciálního výnosu“ (yield potential) a „vodou limitovaného výnosu“ (water-limited yield potential) a jejich rozdílu vzhledem k průměrným reálným výnosům „yield gap“. GYGA hledá možnosti, jak snížit tento rozdíl a jak efektivně využívat vodní zdroje, které mohou být v zemědělském sektoru hlavním limitujícím faktorem. Hodnota „yield gap“ pomáhá odhadnout národní i celosvětovou produkci potravin, produkční možnosti stávající zemědělské půdy a zásobu vody nebo podle různých scénářů odhadnout, zda bude potřeba pro pokrytí očekávané poptávky další zemědělská půda a voda k jejímu zavlažování. Prioritou výzkumu je informovat zemědělskou politiku o možnostech zajištění celosvětové potravinové bezpečnosti pomocí interpretací trendů ve výnosech hlavních potravinových plodin na regionálních i národních úrovních, označení regionů s největším „yield gap“ a navrnutí řešení, jak by se „yield gap“ dalo efektivně snížit.

2.5 Vstupní data pro růstové modely

Interakce v systému půda-rostlina-atmosféra hrají ústřední roli ve funkcích agroekosystémů a venkovské krajiny, ať už je to bráno z hlediska produkce potravin, energie, ukládání oxidu uhličitého nebo zachování půdních vlastností, biodiverzity a vodních zdrojů (MŽP, 2015). Emise vznikající zemědělskou činností jsou z hlediska hrozby pro globální klimatický systém uvažovány jako jeden z klíčových faktorů, který by se mohl pomocí zavedení správných adaptačních opatření pro účely zmírnění dopadů změny klimatu snížit (MŽP, 2004). Právě proto se v tomto stále rozvíjejícím se odvětví čím dál častěji objevuje snaha lépe pochopit komplexnost systémů a využívat procesy založené na modelech pro analýzu scénářů jako jeden z podkladů využívaných pro rozhodování v hospodaření (Haberle et al., 2008).

Vzhledem k rozmanitým přírodním podmínkám se s rostoucí velikostí modelované plochy zvyšuje míra nejistoty u využití dat naměřených v malém prostoru experimentálních lokalit. Míra nejistoty se také zvyšuje tím, že pro oblasti, které se pro modelování stávají zájmovými, nejsou potřebné údaje běžně dostupné (Kersebaum et al., 2015). Základem vývoje a každé kalibrace/validace růstového modelu jsou soubory se vstupními daty naměřenými v daném čase, na daném místě a pro danou plodinu. Tyto údaje jsou pro zlepšování, hodnocení a využívání modelů rozhodující. Avšak je jich nedostatek. Poptávka ze strany uživatelů se zvyšuje, ale

rozpočty na vhodný experimentální výzkum a pozorování mají v celosvětovém měřítku klesající tendenci (Rötter et al., 2011). Polní experimenty nejsou obvykle prvotně vedeny pro modelářské účely. Úroveň, kvalita a detailnost záznamů proměnných se od sebe často liší. Nejsou v nich tedy zaznamenávány všechny hodnoty pro modelování potřebné (Groot a Verberne, 1991; Nix, 1985). Proto je z různých důvodů jejich vhodnost pro modelování často nedostatečná. Pro účely vývoje, testování a používání růstových modelů navrhla studie White et al. (2013) standardní přístup pro popis, identifikaci a měření vstupních dat týkajících se podmínek oblasti životního prostředí, půdy, plodin a managementu hospodaření. Obecně platí, že základní vstupní soubory s naměřenými a pozorovanými daty použité ke kalibraci a validaci modelu se skládají z údajů popisujících

- počáteční půdní podmínky,
- management hospodaření,
- sezónní meteorologické podmínky.

Kromě toho mohou být modelu poskytnuty údaje o rychlosti fenologického vývoje plodiny, velikosti výnosu zrna/nadzemní biomasy, obsahu živin, půdních vlastnostech, dynamice půdní vody, koncentraci CO₂ (např. Palosuo et al, 2011; Rötter et al 2012; White et al, 2013), atd.

Mezinárodní projekty AgMIP (viz kapitola 2.4.1) a MACSUR (viz kapitola 2.4.2) se snaží pro účely testování modelů vybudovat databázi vhodnou pro tvorbu vstupních souborů (Porter et al., 2014). Cílem je nalézt z dostupných datových souborů vhodná experimentální data pro specifické aplikace v oblasti modelování.

2.5.2 Požadavky na vstupní data pro růstové modely

Složitost modelu spočívá převážně ve vysokých nárocích na vstupní parametry veličin majících vliv na růst, vývoj a výnos plodiny. V první řadě jde o analýzu půdy, o popis meteorologických faktorů a agrotechnická opatření. V neposlední řadě model pracuje s informacemi o růstu a vývoji plodiny. Při optimálních meteorologických a výživných podmínkách jsou hlavními pochody ovlivňujícími výnos plodiny fotosyntéza, dýchání a narůstající listová plocha (Verdoodt et al., 2004).

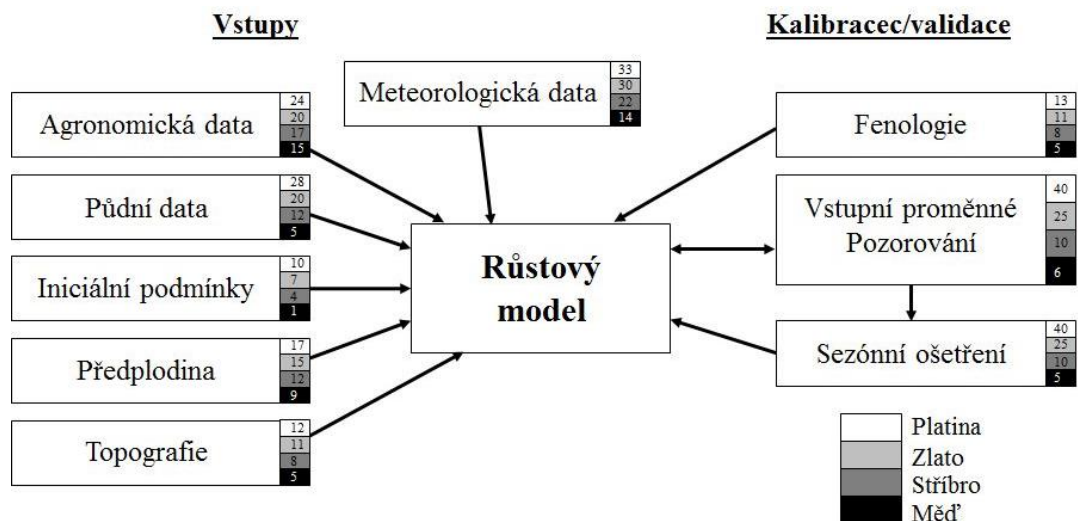
Aplikace modelu v novém geografickém/klimatickém prostředí nebo jeho užití pro novou plodinu vyžaduje novou parametrizaci, případně modifikaci modelu (De Wit, 1982). Takové rozšíření použitelnosti modelu vyžaduje vhodná kalibrační a

validační data v podobě konzistentních souborů (Nix, 1985). U posuzování a sběru dat vhodných pro tyto účely platí, že jsou cennější data z terénního výzkumu, než data naměřená v laboratoři či z jednotlivých prostorových bodů, která mohou v reálu představovat jen pár čtverečních centimetrů. Pokud jsou podklady pro popis prostorové struktury neznámé, může to zkomplikovat kalibraci modelu. Znalost proměnlivosti prostředí naopak poskytuje uživateli šanci vyhodnotit citlivost a reakci modelu na variabilní vstupy (De Wit a Van Keulen, 1987). K pochopení procesů v systému půda-rostlina-atmosféra je třeba nejen prostorové, ale i časové zaznamenání měření/pozorování, které má také na konkrétní jevy podstatný vliv (Wagenet, 1998). Není vhodné nastavovat parametry plodin pouze na základě jedné proměnné, např. údajem o velikosti výnosu, pokud k tomu také nebude reálně simulovaná např. dynamika půdní vody. To by mohlo vést k chybným nastavením parametrů v jiné části modelu a tím pádem k chybným simulacím v novém prostředí. Ve studii Kersebaum et al. (2007) autoři prokázali, že různé modely aplikované pro stejnou sadu dat byly schopny uspokojivě simulovat konkrétní cílovou proměnnou, ale vykazovaly značné rozdíly v kvantifikaci různých základních procesů. Z tohoto důvodu by kalibrace modelů měla probíhat na základě víceletých dat a podrobnějších měření všech potřebných proměnných reprezentujících mnoho procesů a stavů vykazujících vysokou prostorovou a časovou variabilitu.

2.5.3 Klasifikace vstupních datových souborů

Dostupná měřená/pozorovaná data vhodná pro tvorbu vstupních souborů se od sebe často liší množstvím či přesností. Vstupní datové soubory byly vyhodnoceny podle kvality (od nízké po vysokou) na čtyři úrovně. Autoři studie Kersebaum et al., 2015 přirovnali úroveň kvality vstupních datových souborů k drahým kovům (od nejlevnějšího po nejdražší), k mědi, stříbru, zlatu a platině (klasifikace dle studie Rosenzweig et al., 2013). Všechny kategorie vstupních souborů jsou pro modelování užitečné, tedy i úroveň vstupního souboru „měď“ splňuje všechny základní požadavky. Použitelnost kategorií se liší ve vhodnosti použití pro konkrétní daný účel. Pro představu, vstupní datové soubory kategorie „měď“ a „stříbro“ jsou v tomto případě vhodné pro nastavování klíčových parametrů odrůdy simulované plodiny za předpokladu, že model je již pro dané prostředí kalibrován a validován pomocí vstupních souborů kategorie „zlato“ nebo „platina“.

Z hlediska modelování plodin je třeba zdůraznit, že konkrétní výzkumné otázky obvykle vyžadují další měření, do kterého spadá několik tematických skupin vstupních proměnných datových souborů (obr. 5).



Obr. 5: Schéma vstupních proměnných bloků s minimálními součty váhových bodů potřebných pro jednotlivé kvalitativní třídy (více – Kersebaum et al., 2015).

Za hlavní tematické skupiny by se daly považovat následující, které obsahují:

➤ meteorologická data,

Meteorologická data jsou obvykle řídicím prvkem. Poskytují modelu popis průběhu počasí ve vegetačním i mimo vegetační období. Hodnoty meteorologických veličin zásadním způsobem ovlivňují růst a vývoj zemědělských plodin, ať už se jedná o přímé ovlivnění například fotosyntézy či transpirace nebo o nepřímé ovlivnění, jako je stanovení doby setí či termínu hnojení. Z meteorologických dat simulace růstových modelů nejčastěji vyžadují denní úhrny srážek, průměrné teploty vzduchu, relativní vlhkosti vzduchu, sumy globální radiace, rychlosti větru a délku slunečního svitu. Dalšími často vyžadovanými hodnotami je maximální a minimální denní naměřená teplota vzduchu. Denní hodnoty teplotního maxima a minima mohou být pro model často podstatnější informací než denní průměrná teplota. Citlivost jednotlivých modelů na jednotlivé meteorologické prvky se liší v závislosti na simulovaných procesech. Zdrojem meteorologických dat pro kalibraci modelu může být síť meteorologických stanic, interpolace dat nebo účelově vybudovaná agrometeorologická stanice, jejíž lokalizaci si můžeme sami stanovit dle místa výskytu polního experimentu. Čím blíže k experimentu je umístěna stanice měřící meteorologická data, tím více se snižuje možná odchylka

specifických proměnných a zvyšuje se využitelnost těchto dat pro modelování. Chceme-li dosáhnout kvality dat třídy „zlato“ nebo „platina“, jednotlivá meteorologická měření by měla probíhat v optimálních vzdálenostech, které vyžaduje každá měřená proměnná (např. teplota a povětrnostní podmínky se mění s nadmořskou výškou, srážky často vykazují značnou prostorovou variabilitu, měření globální radiace v okolí stanice cca 20 km je přesnější než satelitní hodnoty, atd.).

➤ agronomická data,

Údaje spadající do této kategorie jsou obvykle pro simulaci modelu základní. Agronomická data zahrnují údaje o termínech setí, což je nezbytné pro iniciaci růstu plodiny. Dále obsahují údaje o množství a hustotě výsevků, termínu sklizně, kterým mnoho modelů ukončuje vegetační období, údaje týkající se zpracování půdy, údaje o termínech a dávkách hnojení či o zavlažování, jakožto informacích určujících růst plodiny. Ke kalibraci modelu se často využívají několikaleté historické záznamy z polních pokusů. Protože polní pokusy nebývají primárně určeny ke kalibračním růstových modelů, často se stává, že některé potřebné údaje je nutné odhadnout.

➤ údaje o půdě,

Pedologická data informují model o fyzikálních a chemických vlastnostech půdního prostředí v jednotlivých horizontech. Protože prostorová variabilita půd je často vysoká i v rámci jednoho pole a může vést k variabilitě výnosů zemědělských plodin (De Wit a Van Keulen, 1987; Kersebaum et al., 2005; Kersebaum et al., 2002; Nielsen a Bouma, 1985), jsou pro účely kalibrace vytvářeny vstupní soubory s údaji o půdě pomocí standardně odebíraných vzorků z půdních sond. Na základě těchto odběrů se stanovují fyzikální a chemické vlastnosti půdy (jako je textura, objemová hmotnost, retenční a hydraulické křivky, polní vodní kapacita, bod vadnutí, půdní pH, obsah živin, atd.) přímo z míst polních experimentů. Půda ovlivňuje růst plodin hned několika způsoby. V první řadě slouží k zásobování plodiny vodou a dusíkem. Dostupnost vody je pro modely zcela zásadní vstupní informace. Tento faktor podstatně ovlivňuje simulace. Nedostatek vody má významný dopad na modelové výstupy v oblasti velikosti výnosů (Aggarwal, 1995; Van Keulen a Seligman, 1987). Půdní struktura a objemová hmotnost je důležitá z hlediska sorpčních vlastností půdy. Další pro model důležitou informací je pórovitost, která ovlivňuje zadržování vody a množství vody, která je pro plodinu dostupná. Modely (např. DAISY), které simulují dynamiku půdní vody na základě výpočtu Richardsovy rovnice (Richards, 1931), potřebují k znát k výpočtu retenční a hydraulické křivky. Mnoho modelů však vyžaduje

pro výpočet vodní bilance pouze obsah vody v půdě, polní vodní kapacitu a bod vadnutí. Znalost množství půdního organického uhlíku a dusíku jsou vhodné pro posouzení vstupů a k určení možné mineralizace. V zemích s omezenými možnostmi hnojení dusíkem nebo v ekologickém zemědělství (Doltra et al., 2011) je informace o celkovém půdním organickém uhlíku důležitá z hlediska rozkladu organické hmoty jako hlavního zdroje dusíku.

➤ údaje o iniciálních podmínkách,

Tento soubor poskytuje modelu informace o tom, jaké byly počáteční půdní podmínky (půdní vlhkost a množství minerálního půdního dusíku) před zasetím simulované plodiny. Např. počáteční stav dusíku v půdě umožňuje modelu stanovit, kolik dusíku bude mineralizováno z organické hmoty. Součástí iniciálních podmínek je i hodnota půdní vlhkosti, která v době setí patří k důležitým vstupním údajům. Její počáteční stav ovlivní průběh celé simulace. Modely simulují hodnoty proměnných v určitém časovém kroku. Při simulaci mohou vycházet z předešlého časového kroku. Pro nové simulace vyžadují inicializaci v podobě počátečního stavu proměnných, půdní vody a minerálního dusíku, z důvodu vysoké časoprostorové variability těchto prvků a velkého vlivu jejich dostupnosti na raný vývoj plodiny. Pokud se vyskytne nedostatek půdní vody, může to významně zpozdit fenologickou fázi klíčení (Ashraf a Abu-Shakra, 1970). Nedostatek vody a dusíku také ovlivňuje vývoj kořenového systému. Vliv počátečních podmínek se liší v závislosti na termínu výsevu plodiny (Kersebaum et al., 2002). Vysoký obsah minerálního dusíku v půdě s nízkou polní vodní kapacitou před vysetím ozimů může mít menší vliv na růst plodin, protože může být během podzimního a zimního období vyplavován.

Informace o iniciálních podmínkách mohou být do určité míry nahrazeny informacemi o předplodině a o jejím managementu pěstování. Pokud je model schopen spolehlivě simulovat dynamiku půdní vody a dusíku, na základě předcházející vegetační sezóny, nedostupnost iniciálních podmínek pro simulované období nemusí být velkou překážkou.

➤ údaje o předplodině,

Pro tento vstupní soubor, který v některých případech nahrazuje nedostupné informace o iniciálním stavu půdy před setím. Je třeba znát údaje o druhu pěstované předplodiny, termínu jejího setí a sklizně, termínech a dávkách hnojení či zavlažování, velikosti výnosu a naložení s jejími posklizňovými zbytky. Na základě těchto informací

pak model může simulovat počáteční podmínky v půdním prostředí před zasetím zájmové plodiny.

- údaje o topografii.

Topografická data poskytují modelu informace o umístění polního pokusu. Modely často vyžadují znalost zeměpisné délky a šířky. Souřadnice mohou sloužit jako podklad pro výpočet délky dne a nadmořské výšky. Meteorologická data bývají často poskytnuta ze stanice, umístěné mimo pokus v jiné nadmořské výšce a naměřené hodnoty nemusejí přesně odpovídat sklonu a expozici pozemku pro případ výskytu stínu nebo povrchového odtoku (Reuter a Kersebaum, 2009).

Kromě těchto šesti tematických skupin vstupních proměnných datových souborů je zapotřebí další sada informací, které jsou využívány při kalibraci a slouží k porovnání výstupů modelu s reálnými hodnotami. K takovým datům patří:

- termíny nástupu fenologických fází,

Tato fyziologická data modelu poskytují popis vývoje a růstu dané plodiny. Základní popisy jednotlivých plodin, ať už se jedná o pšenici ozimou, ječmen jarní, silážní kukuřici atd., jsou již parametrizovány a jako součást „nabídky menu“ samotných růstových modelů poskytnuty uživateli. Jsou zde pomocí algoritmů a koeficientů nadefinovány například délky jednotlivých fenologických fází dané plodiny. Na základě délky jednotlivých fenofází je určována velikost a rozložení nadzemní biomasy v průběhu vegetace, hmotnost jednotlivých orgánů (list, stonek ...), velikost a vývoj listové plochy (LAI, $m^2 \cdot m^{-2}$), velikost kořenové biomasy, výnos zrna, množství dusíku v nadzemních orgánech apod. (Olesen et al., 2012; Van Keulen a Stol, 1991; Van Keulen a Wolf, 1986). Pro účely kalibrace může modelář pozměnit již přednastavené charakteristiky dané plodiny pro místní odrůdy. Jednou z možností, jak správně postupovat, je kontaktovat pracoviště, kde byl model vyvinut a poradit se, jak jednotlivé přednastavené koeficienty adaptovat na místní podmínky. Jak přednastavené parametry budou při simulaci reagovat, je závislé na meteorologických datech, které modelu například řeknou, za jak dlouho by podle sumy teplot, délky dne a množství spadených srážek mohla zasetá plodina vzejít. Vzhledem k tomu, že některé fenologické fáze jsou považovány za základní důležité informace při kalibraci odrůdy dané plodiny v novém prostředí (např., Asseng et al., 2013), je tato oblast hodnocena jako samostatná kategorie obsahující termíny nástupů jednotlivých fenologických fází. Fenologie také hraje ústřední roli v rozdělování asimilátů a schopnosti modelu reprodukovat ontogenezi rostliny. Citlivost na stres vodou a živinami se může

v určitých vývojových fázích měnit. Obzvláště důležitá u obilnin je znalost termínu kvetení, kterou se iniciuje doba plnění zrna. V této fázi je plodina na stres suchem nebo teplem velmi citlivá (Eitzinger et al., 2013; Savin a Nicolas, 1999; Semenov a Shewry, 2011). To může znatelně ovlivnit velikost výnosu. O ukončení růstu rostliny zase model informuje termín zralosti.

➤ proměnné údaje týkající se pěstování plodin,

K takovýmto údajům řadíme informace o velikosti výnosu zrna, nadzemní biomase, hmotnosti jednotlivých orgánů (listu, stonku,...), kořenové biomase a rozložení kořenů, které indikuje hloubka možného zakořenění v půdě, ze které rostlina může čerpat živiny a vodu. Proměnný údaj je také obsah dusíku v nadzemní biomase a v orgánech plodiny, velikost listové plochy, atd. Celková biomasa plodiny a její rozdělení do různých orgánů v průběhu času má pro růstové modely význam z hlediska rozložení asimilátů mezi jednotlivé orgány (Boote et al., 2015; Kersebaum, 2011).

➤ proměnné údaje týkající se půdy,

Centrální část růstových modelů simuluje vodní bilanci, včetně časové dynamiky obsahu půdní vody. Simulace dynamiky půdní vody, dusíku a pěstování plodin jsou provázané. Jen stěží by mohl být jeden proces simulován nezávisle na ostatních. Vhodné je proto doplnit vstupní soubory např. o výsledky gravimetrie, což je jedna z metod pro stanovení množství vody v půdě (Litschmann, 2010), množství půdního minerálního dusíku, sacího potenciálu či umístit do experimentů senzor pro měření půdní vody, na jehož základě se pak dá odvodit množství vyplavovaného dusíku či perlokace. Měření půdní vlhkosti je nepřesnější právě pomocí senzorů na měření obsahu vody v půdě, které navíc můžeme nainstalovat do půdy celoročně a měřit obsah vody v půdě nepřetržitě (např. senzor TDR – Time domain reflektometry viz kapitola 4.4.1.2) (Topp et al, 2003).

➤ další pozorované/měřené hodnoty.

Do této skupiny spadají údaje o evapotranspiraci, jako klíčovém procesu pro modelování, či výměně plynů (CO_2 , CH_4 , N_2O) pro analýzu emisí a jejich dopadů na životní prostředí.

Modely nejsou schopny simulovat předem nepředvídatelné negativní situace, jakými pro porost může být zaplevelení, napadení porostu chorobou či škůdci nebo fyzické poničení porostu vzniklé např. mrazem, kroupami nebo zvířaty. Velké odchylky mezi pozorovanými a simulovanými hodnotami by se v případech zaznamenání výše uvedených nepředvídatelných situací daly vysvětlit takto.

Kvalita a možná nejistota u vstupních dat má velký vliv na přesnost výstupu modelu. U dat získaných z polních experimentů je vysoká míra pravděpodobnosti výskytu chyby, ať už se jedná o chybu technickou nebo chybu způsobenou lidským faktorem (Van Keulen a Seligman, 1987). Proto je považováno za pozitivní zvýšit počet opakování při měření a zachování všech naměřených údajů z každého opakování.

V historii vývoje růstových modelů bylo učiněno několik pokusů pro popis a kategorizaci vstupních údajů potřebných pro modelování. Minimální požadavky na vstupní údaje byly definovány už Nixem v roce 1984. Dále byly sepsány metodiky pro odběry vzorků a publikován přístup pro popis managementu, podmínek životního prostředí, půdy, plodin a vhodných měření pro testování modelů (White et al., 2013). Ve spojitosti s růstovými modely se nejčastěji mluví o simulacích výnosu. U sběru vstupních dat by se však mělo brát v úvahu, že by měla být použitelná jako základ pro pokrytí i jiných aspektů, pro různé účely modelování a k různým analýzám simulovaného systému. Klasifikace a popis vstupních dat vhodných pro modelářské účely mají ve svém programu i mezinárodní projekty, jako jsou IBSNAT (viz kapitola 2.3.2) nebo AgMIP (viz kapitola 2.4.1). Jednotlivé modelářské skupiny dosud používají převážně své specifické soubory s daty, na základě kterých modely testují a dále vyvíjí (Holzworth et al., 2015). Jiné skupiny mají přístup k velké databázi, pomocí které mohou modely otestovat v širokém rozmezí podmínek a různých systémů zpracování půdy (Coucheney et al., 2015). Spolupráci na základě společného využití rozsáhlých databází znesnadňují různé formáty databází a rozdílné požadavky jednotlivých modelů na vstupní data. Proto je cílem mezinárodních projektů AgMIP (viz kapitola 2.4.1) a MACSUR (viz kapitola 2.4.2) přijmout společný formát pro ukládání dat a poskytnout nástroje pro jejich převod dle specifických požadavků různých modelů (Porter et al., 2014). Databáze by měly být dostupné pro všechny uživatele a měly by se dále rozšiřovat.

V poslední době se stává trendem využívání ansámblu modelů k vyhodnocení a porovnání robustnosti a chování různých modelových přístupů právě v rámci širokého rozmezí podmínek. Tento přístup umožňuje výměnu znalostí a algoritmů pro zlepšení jednotlivých modelů a snížení nejistoty vyjádřené variabilitou užitých modelů (Asseng et al., 2013).

3 CÍL PRÁCE

Hlavním cílem této disertační práce bylo zodpovědět následující otázky:

- *Do jaké míry se dají růstové modely použít pro simulaci růstu a vývoje ječmene jarního v půdně-klimatických podmínkách České republiky?*
- *Odpovídají výsledky kalibrace následné validaci?*
- *Lze ze souboru dostupných modelových nástrojů vybrat „ideální“ model schopný reprodukovat fenologické fáze, výnos zrna, LAI, půdní vlhkost či stres suchem?*
- *Je lepší vybrat a používat jeden „ideální“ růstový model, který v daných podmínkách simuluje realitu nejspolehlivěji, nebo v rámci jednoho prostředí používat více modelů, tedy začlenit i ty, které vykazují menší shodu s realitou?*
- *Je využití ansámblu modelů výrazně spolehlivější než v případě výběru jednoho modelu, např. v poměru vynaloženého času/vs. zvýšení spolehlivosti výsledků?*

4 MATERIÁL A METODIKA

4.1 Mechanismus výpočtů jednotlivých modelů

Tradiční polní experimenty jsou prováděny na určitých místech, v určitém čase a prostoru, se specifickými výsledky pro danou sezónu a místo. Růstové modely jsou vyvíjeny tak, aby po dosažení vstupních informací o určitých místech a určitém čase pomocí rozličných půdních profilů, klimatických scénářů, odrůd daných plodin a agronomických či agrotechnických postupů byly schopny dát uživateli možnost zeptat se na otázku „co kdyby?“ a získat odpověď pomocí virtuální simulace během několika minut (Jones, 2003).

Modely se snaží co nejlépe simulovat interakce v časovém vývoji, v průběhu kterého se u rostlin mění velikost LAI, hloubka zakořenění, hustota kořenů, produkce sušiny, poptávka rostlin po dusíku, jeho obsah v nich atd.

Jako vstup byly růstovým modelům, použitým v této disertační práci, poskytnuty denní hodnoty meteorologických dat, informace o půdním profilu, odrůdě dané plodiny a managementu (tab. 1). Simulace byly dle druhu a možností modelu zahajovány buď simulací s předplodinou, s iniciálními podmínkami, nebo pomocí tzv. „zahřívacího období“, kdy model před simulovanou sezónou simuluje „období ladem“. Výstupy simulací byly v denním kroku.

Růstové modely jsou schopny pracovat i s omezeným rozsahem vstupních dat. Všechny údaje, určené pro simulaci, musí být k dispozici ve speciálně definovaném formátu. Ke vkládání vstupních dat slouží uživatelská rozhraní či jednoduché textové editory.

Růstové modely použité v této práci se navzájem liší složitostí a komplexností při výpočtech jednotlivých procesů. Rozdíly mezi jednotlivými modely v přístupech k výpočtům základních fyziologických procesů jsou popsány v kapitolách 4.1.1 – 4.1.4 a shrnuty v tab. 2.

Tab. 1: Vstupní data potřebná pro spuštění simulací růstových modelů.

Kategorie dat	Proměnná data	Typ dat
Meteorologická data	Minimální teplota	Denní minimum (°C)
	Maximální teplota	Denní maximum (°C)
	Průměrná teplota	Denní průměr (°C)
	Relativní vlhkost vzduchu	Denní průměr (% , kPa)
	Globální radiace	Denní sumy ($W \cdot m^{-2}$, $MJ \cdot m^{-2}$)
	Rychlost větru	Denní průměr ($m \cdot s^{-1}$)
	Srážky	Denní úhrny (mm)
Agronomická data	Termín setí	Datum
	Termín sklizně	Datum
	Termín a dávka hnojení N	Datum, množství ($kg \cdot ha^{-1}$)
	Termín zpracování půdy	Datum, hloubka zpracování
	Údaje o předplodině	Datum setí, sklizně, Velikost výnosu ($t \cdot ha^{-1}$) Nakládání s posklizňovými zbytky
Údaje o půdě	C_{org}	Pro definované vrstvy (%)
	Poměr C:N	Pro definované vrstvy ()
	Objemová hmotnost	Pro definované vrstvy ($cm^3 \cdot cm^{-3}$)
	pH	Pro definované vrstvy ()
	Polní vodní kapacita půdy	Pro definované vrstvy ($cm^3 \cdot cm^{-3}$)
	Bod vadnutí	Pro definované vrstvy ($cm^3 \cdot cm^{-3}$)
	Pórovitost	Pro definované vrstvy ($cm^3 \cdot cm^{-3}$)
	Maximální hloubka zakořenění	(cm)
Údaje o plodině	Druh	
	Odrůda	
Iniciální podmínky	Obsah vody v půdě	Podle hloubky ($cm^3 \cdot cm^{-3}$)
	Obsah N_{min} v půdě	Podle hloubky ($kg \cdot ha^{-1}$)

4.1.1 Princip určení rychlosti fenologického vývoje dané odrůdy

Přesná predikce nástupu fenologických fází plodiny je klíčový předpoklad pro přesnost simulace v dalších oblastech. U simulace fenologického vývoje plodiny se určuje pořadí a míra výskytu vegetativních a reprodukčních orgánů. Pořadí, v jakém se vyvíjí jednotlivé části plodiny, je charakterizováno nezávisle na vnějších podmínkách (vstupních proměnných) – je v modelu přednastaveno. Naopak míra výskytu vegetativních a reprodukčních orgánů se může výrazně lišit. Fenologický vývoj rostliny od vzcházení až po zralost je simulován na základě rostlinných genetických vlastností a podmínek okolního prostředí (teplotě, záření, délce dne, obsahu atmosférického CO₂ a dostupnosti vody) (Van Keulen a Van Diepen, 1990). Primární faktor, který ovlivňuje nástup fenologických fází, je teplota. Další faktory, jako je délka dne (fotoperioda), jarovizace, stres maximální nebo minimální teplotou, stres vodou nebo suchem (Hodges, 1991) určují rychlost vývoje. Fenologický vývoj je v modelech definován v podobě „tepelných časových konstant“, které modelu říkají, při jakých sumách efektivních teplot nastává daná fenologická fáze (Ritchie, 1991). Suma efektivních teplot je součet průměrných denních teplot nad zvolenou hranicí označovanou většinou jako biologické minimum (teplota, při jejímž překročení začne plodina vzcházet) (Žalud, 2015). Počet dnů nutných k dosažení určité sumy efektivních teplot může být na různých místech odlišný. Simulace některých modelů dále ovlivňuje fotoperioda. Koeficient, který ji stanovuje, je vyjádřen pomocí faktoru redukujícího délku doby jednotlivých fenologických fází. Je založen na poměru optimální a kritické délky dne (Boogaard et al., 2013). V závislosti na fenologii se stanovuje i dynamika LAI.

Simulace všech modelů, použitých v této práci, určují délky fenologických fází na základě sum efektivních teplot (Boogaard et al., 2013; Sivertsen et al., 1999; Rötter et al., 2013; Vanuytrecht et al., 2014). Simulace WOFOSTu, DSSATu, HERMESu a DAISY určují délky fenologických fází také pomocí fotoperiody. Simulace DSSATu, HERMESu a DAISY mohou navíc brát v potaz i vliv jarovizace (tab. 2).

Simulace HERMESu jako jediná u modelů použitých v této disertační práci simuluje 5 fenologických fází (vzcházení, odnožování, metání, kvetení a zralost). Ostatní simulují jen 3 fenofáze (vzcházení, kvetení a zralost).

Kromě sum efektivních teplot používá simulace DAISY pro určení časového rozmezí od setí do vzcházení teplotu půdy a hloubku setí. Termín sklizně je stanoven

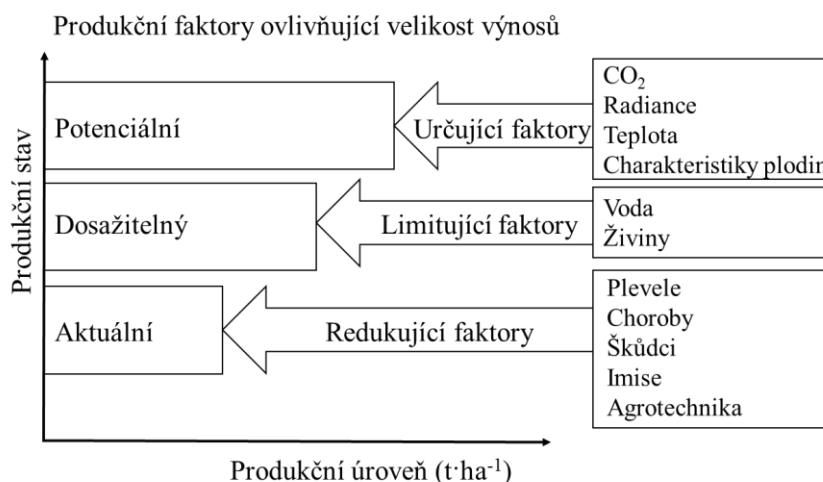
buď pevným datem vloženým do systému, nebo je simulován na základě teplotních sum.

Ve výstupních souborech jsou termíny nástupů jednotlivých fenologických fází popsány pomocí bezrozměrných čísel (např. ve výstupu simulace WOFOSTu je číslem 0 popsána fenofáze vzcházení, číslem 1 kvetení a číslem 2 zralost).

Využití většinou deskriptivních metod v konstrukci modelu znamená, že celá řada požadovaných parametrů je stanovována pomocí citlivostní analýzy (Sivertsen et al., 1999). Citlivostní analýza je metoda, kdy se postupným zvyšováním či snižováním jednoho nebo několika vstupních údajů stanovuje citlivost modelu na něj (Žalud, 2001).

4.1.2 Metoda stanovení velikosti výnosu

Růstové modely jsou vyvíjeny hlavně k predikci výnosů. Pomocí nich se může simulovat výnos potenciální a dosažitelný (obr. 6).



Obr. 6: Přehled produkčních faktorů ovlivňujících velikost výnosů (Kostelanský et al 1997; Lobell et al., 2009; Van Ittersum and Rabbinge, 1997).

Velikost potenciálního výnosu je závislá na chodu meteorologických prvků a genetických vlastnostech plodiny. Potenciální produkce představuje „absolutní produkční strop“ pro dané plodiny při pěstování v dané oblasti za určitých povětrnostních podmínek při konstantním atmosferickém CO₂. Uvažuje se, že dostupnost všech ostatních faktorů je v optimálním množství.

Na velikost dosažitelného výnosu má kromě meteorologických prvků a genetických vlastností plodiny vliv také dostupnost vody a živin

(Haberle et al., 2008). V případě, že v průběhu vegetačního období dojde ke stresu suchem či živinami, je dosažitelný výnos nižší než potenciální.

U aktuální produkce může být výnos snížen také abiotickými a biotickými faktory, jakými jsou např. vliv techniky, zaplevelení, škůdců či chorob.

Simulace modelů, použitých v této disertační práci, rozlišují následující úrovně produkce: potenciální produkci, vodou limitovanou produkci a živinami limitovanou produkci. Liší se však principem výpočtu velikosti výnosu. Některé modely výnos simulují na základě celkové nadzemní biomasy, některé pomocí sklizňového indexu a některé poměrným dělením asimilátů během reprodukčních fází (tab. 2).

4.1.3 Metoda výpočtu vodní bilance v půdě

Obsah vlhkosti v půdě vyplývá z denního výpočtu vodní bilance. K tomuto výpočtu simulace modelů potřebují vstupní soubor s údaji o půdě. Charakteristika půdy slouží ke dvěma účelům. V první řadě je to oblast mezi povrchem a podzemní vodou, která je pro výpočetní záměry rozdělena do několika numerických vrstev. V řadě druhé definuje modelům fyzikální vlastnosti půdy.

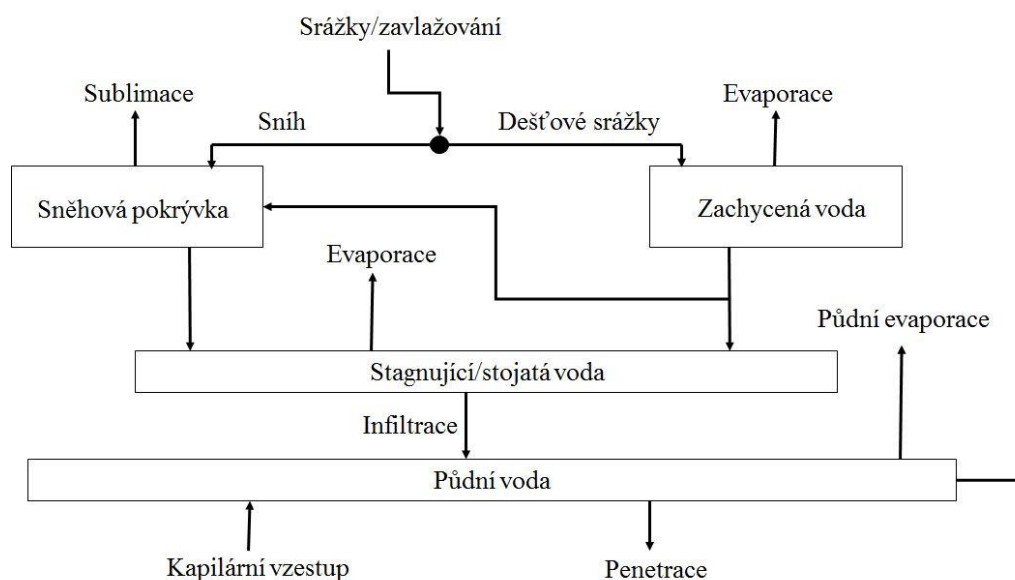
Dynamika půdní vody představuje jednu z nejdůležitějších částí modelů. Voda, která zasahuje do výpočtů vodní bilance v simulacích modelu, je znázorněna na obr. 7. Podle půdního profilu je modelem rozdělována kořenová zóna na vrstvy s různou zásobou vody. Podle toho je potom také simulován příchozí a odchozí tok vody. Každá číselná vrstva má přiřazený horizont, který jednoznačně definuje fyzikální vlastnosti této vrstvy.

Simulace WOFOSTu, DSSATu, HEMRESu a AQUACROPU provádí výpočet vodní bilance pomocí tzv. kapacitní metody. Kapacitní metoda pracuje na základě odhadu odběru vody aktuální evapotranspirací (ET_a), který je dán chodem meteorologických prvků, dostupností půdní vlhkosti a vlastnostmi předpokládaného vegetačního krytu či povrchu (Boogaard et al., 1998; Brodský a Kodešová, 2006).

Simulace WOFOSTu má z modelů použitých v této disertační práci nejjednodušší přístup k výpočtu půdní vodní bilance. Půdní profil je rozdělen pouze na dvě vrstvy půdy 1. kořenovou zónu mezi povrchem půdy a definovanou hloubkou zakořenění, 2. spodní část mezi definovanou hloubkou zakořenění a maximální hloubkou zakořeňování. Pomyslná 3. vrstva, podloží pod maximální hloubkou zakořenění, není nadefinována (Eitzinger, 2004). Simulace modelu WOFOST tedy

nebere v potaz možný vliv podzemní vody a jejího případného kapilárního vzestupu. Bere půdu jako homogenní vrstvu (Eitzinger et al., 2003; Supit et al., 1994).

Nejkomplexnější přístup má naopak simulace růstového modelu DAISY, která počítá vodní bilanci povrchu i půdy. Simulace modelu DAISY jako jediná z modelů použitých v této disertační práci pohyb vody v půdě stanovuje pomocí numerického řešení Richardsovy rovnice (více Abrahamsen a Hansen, 2000; Kloss, 2012; Van Dam a Feddes, 2000), která může simulovat vodní bilanci v každé požadované hloubce (Richards, 1931). Simulace pohybu vody v půdě je založena na teorii potenciálu. Schopnost půdy k dodávání vody je simulována potenciální infiltrační rychlostí, která je opět určena podmínkami v půdě jako takové. Transpirace se stanovuje na základě příjmu vody kořeny, záleží tedy na hloubce zakořenění a hustotě kořenů.



Obr. 7: Schematické znázornění zemědělsko-hydraulické složky růstového modelu DAISY (Abrahamsen, 2000).

4.1.4 Metoda výpočtu evapotranspirace

K výpočtu referenční evapotranspirace (ET_0), která je společně se srážkami hlavní složkou vláhové bilance krajiny (Kohut, 2008), slouží simulacím vstupní soubor s meteorologickými daty. Mezi nejpresnější výpočtové metody k určení ET_0 patří Penmanova a Penman-Monteithova metoda (např. Matejka a Hurtalová, 2005, Penka, 1985).

Simulace WOFOSTu používá pro výpočet ET_0 Penmanovu metodu, která je založená na simultánním řešení soustavy rovnic opisujících ustálený tok tepla a vodní

páry nad vypařujícím povrchem (metoda turbulentní difúze) spolu s rovnicí energetické bilance na úrovni vypařujícího povrchu (více Novák, 1995).

Simulace DSSATu používá pro výpočet ET_0 metodu Penman-Monteithovu a metodu Priestley-Taylor. V této disertační práci byla v rámci simulací použita metoda Priestley-Taylor. Priestley-Taylorova metoda je zjednodušenou verzí Penmanovy metody. Funguje na základě zjištění, že pro většinu případů může být denní úhrn výparu počítán pouze pomocí radiačního členu, který má podstatně větší hodnotu než aerodynamický člen Penmanovy rovnice tvořící asi 25 % denního úhrnu potenciálního výparu (více Novák, 1995).

Pro simulace modelů HERMES, DAISY a AQUACROP byla v rámci předkládané disertační práce použita pro výpočet ET_0 Penman-Monteithova metoda, která bere v úvahu maximální a minimální teplotu vzduchu ($^{\circ}C$), globální záření ($MJ \cdot m^{-2} \cdot den$), rychlost větru ($m \cdot s^{-1}$) a vlhkost vzduchu (% , kPa) (Allen et al., 1998). V případě simulací HERMESu i DAISY může být při nedostatečném množství vstupních dat počítána evapotranspirace na základě dalších vzorců. Alternativním vzorcem HERMESu je Haudeho algoritmus, který výpočet evapotranspirace zakládá na standardní metodě Německé meteorologické služby (Kersebaum et al., 2008). Simulace DAISY, pokud chybí údaje o rychlosti větru a vlhkosti vzduchu, provede výpočet evapotranspirace výstupem empirického vztahu Makkinka (An, 2010).

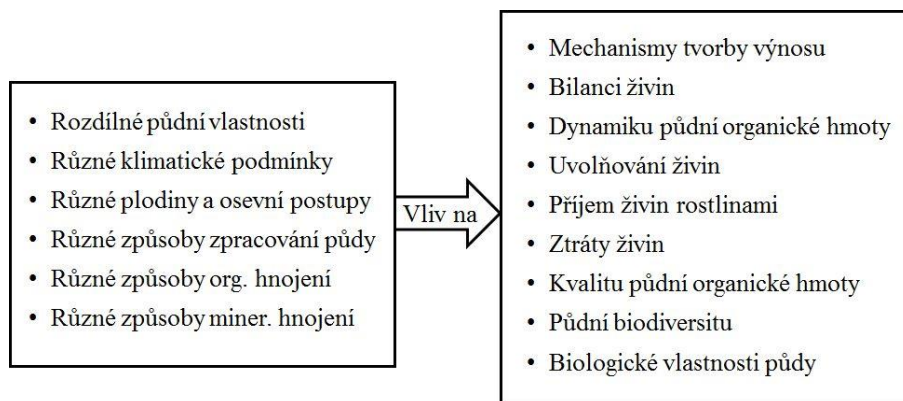
Tab. 2: Tabulka s vyznačenými přístupy jednotlivých růstových modelů k modelování.

<i>Model</i>	<i>Verze</i>	<i>a)</i>	<i>b)</i>	<i>c)</i>	<i>d)</i>
<i>WOFOST</i>	<i>7.1.3</i>	<i>T, DD</i>	<i>PRT, B</i>	<i>K</i>	<i>P</i>
<i>DSSAT</i>	<i>4.6</i>	<i>T, DD, J</i>	<i>HI (Gn), B</i>	<i>K</i>	<i>PT</i>
<i>HERMES</i>	<i>2.01.1</i>	<i>T, DD, J</i>	<i>PRT</i>	<i>K</i>	<i>PM</i>
<i>DAISY</i>	<i>4.01</i>	<i>T, DD, J</i>	<i>PRT</i>	<i>R</i>	<i>PM</i>
<i>AQUACROP</i>	<i>4.0</i>	<i>T</i>	<i>HI</i>	<i>K</i>	<i>PM</i>

a) Fenologie plodiny je funkcí: T = teploty, DD = délky dne (fotoperiody), J = jarovizace. b) Tvorba výnosu v závislosti na: B = celková (nadzemní) biomasa, Gn = počet zrn, HI = sklizňový index, PRT = dělení během reprodukčních fází. c) Výpočet vodní bilance: K = kapacitní metoda, R = metoda výpočtu Richardsovou rovnicí. d) Metoda výpočtu evapotranspirace: P = Penman, PM = Penman–Monteith, PT = Priestley–Taylor.

4.2 Polní pokusy

Polní pokusy jsou v české zemědělské sféře stále považovány za nenahraditelný zdroj informací o účincích jednotlivých agrotechnických opatření na půdní prostředí. Polní pokusy se mohou dělit podle sledovaných parametrů a využití např. na plodinové (odrůdové), výživářské a agrotechnické. Umožňují hodnotit jejich vliv na pomalu se měnící půdní vlastnosti. Poskytují podklady pro hodnocení vztahů mezi výnosy plodin a průběhem počasí. Dlouhodobé pokusy umožňují získávat poznatky nejen v oblasti zemědělství, ale objasňovat i nově se vyskytující problémy v dalších oblastech, především v životním prostředí (Barklund, 2007, Lipavský et al., 2010). Jako „*paměť ekosystému*“ poskytují informace o krátkodobých, střednědobých a dlouhodobých účincích hospodaření na půdě a také reakci na změněné podmínky prostředí. Lze z nich odvodit prognózy a strategie adaptace na změněné podmínky (Lipavský et al., 2015, obr. 8).



Obr. 8: Schéma srovnávacího vyhodnocení výsledků dlouhodobých polních pokusů (Čermák a Lipavský, 2012).

Česká republika by se z hlediska geologického, pedologického a klimatického dala považovat za „*gordický uzel Evropy*“. V mnoha státech světa jsou používány různé metody prognózování (hnojení, ochrany, závlahy, výnosů ...), tj. modelování (Čermák a Lipavský, 2012; Lipavský et al., 2010). V naší zemi díky rozmanitosti půdních podmínek a klimatu není používání těchto modelů, náročných na vstupní data a s tím spojenou potřebnou kalibrací, tak rozšířené. Dlouhodobé polní pokusy se tak v českém zemědělství staly jedním z mála relevantních a věrohodných zdrojů informací, jak v které oblasti reagují pěstované plodiny na jednotlivá agrotechnická opatření. V dlouhodobé časové řadě poskytují mnoho dalších cenných informací o stavu půdy

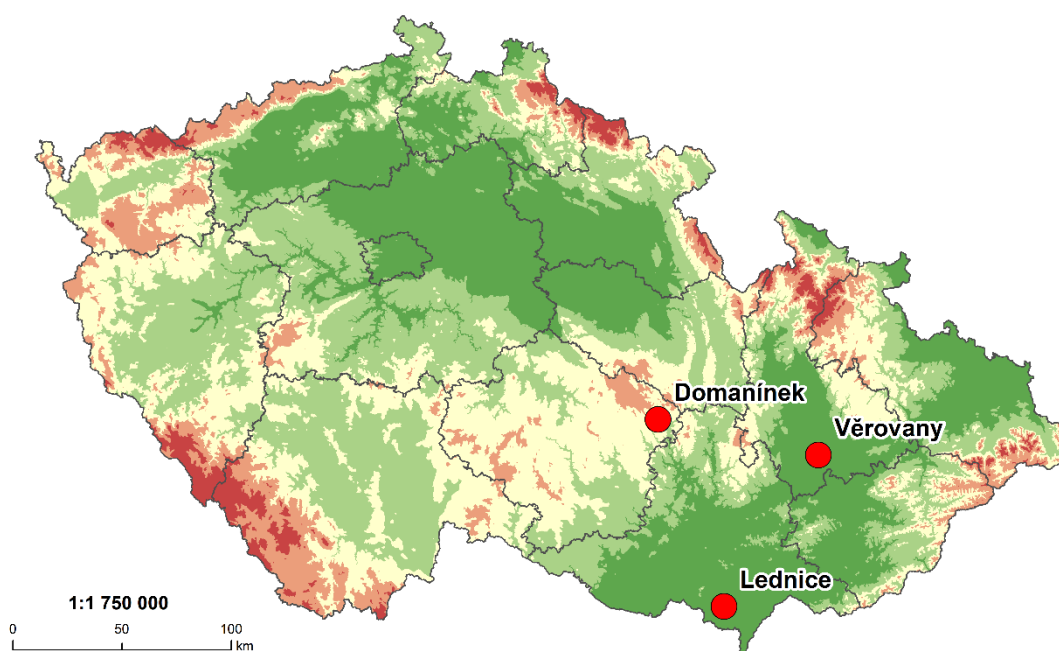
a kvalitě produkce. A i přesto, že má české zemědělské pokusnictví dlouholetou tradici (první pokusy založila Vlastenecká hospodářská společnost již v roce 1770) (UZEI, 2014), běží dnes jen omezený počet těchto pokusů. Na začátku 90. let dvacátého století jich bylo 29. Dnes se jejich počet stále redukuje. V současné době provozují v České republice dlouhodobé polní pokusy pouze 4 instituce, a to: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v. v. i. (VÚRV), Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský (ÚKZÚZ), Mendelova univerzita v Brně (MENDELU) a Zemědělský výzkumný ústav Kroměříž, s.r.o. (VÚZ v Kroměříži) (Čermák a Lipavský, 2012). Pokusy probíhají na stanovištích, která pokrývají různé výrobní oblasti s různými půdními a klimatickými podmínkami. Jsou finančně nákladné (Křen a Míša, 2012), proto se jejich počet stále snižuje. Výsledky polních pokusů jsou již dnes využívány jako doplňující zdroj pro ověření růstových modelů, jakožto nástroje pro zvýšení produkčního potenciálu krajiny při pěstování polních plodin (např. Potopová et al., 2014). Jednou z možných cest, která by v budoucnosti mohla doplňovat úlohu polních pokusů v České republice, by mohlo být právě používání růstových modelů.

Pro účely sběru dat vhodných pro kalibraci ansámblu růstových modelů použitých v této disertační práci byly ve spolupráci Ústavu agrosystémů a bioklimatologie na Mendelově Univerzitě v Brně s Ústavem výzkumu globální změny, AV ČR, v. v. i. v letech 2011-2014 založeny na experimentální stanici v Domanínku polní pokusy s ječmenem jarním (2011, 2012 odrůda „*Tolar*“; 2013, 2014 odrůda „*Bojos*“). Vzhledem k rozmanitým přírodním podmínkám panujícím v České republice byla dále pro účely kalibrace a validace modelů díky spolupráci s Ústředním kontrolním a zkušebním ústavem zemědělským (ÚKZÚZem) získána databáze z let 1998 - 2006 z polních pokusů s ječmenem jarním (odrůdou „*Tolar*“) z experimentálních lokalit v Lednici, Věrovanech a Domanínku.

Odrůda „*Tolar*“ byla tradiční česká odrůda registrovaná v roce 1997, vyšlechtěná ve společnosti Plant Select, spol. s.r.o. Hrubčice, (Blažek, 2010; Boháčenko, 2010). V roce 2013 se v celé České republice přestala používat. Pro účely pokračování polních pokusů v Domanínku byla po konzultacích s odborníky zvolena novější odrůda ječmene jarního, odrůda „*Bojos*“, která byla z možných vhodných a dostupných odrůd původní odrůdě „*Tolar*“ svými vlastnostmi nejpodobnější. Odrůda „*Bojos*“ je výběrová sladovnická odrůda vhodná pro výrobu českého piva. Registrace odrůdy „*Bojos*“ proběhla v roce 2005 (Blažek, 2010; Šilha et al., 2011).

4.3 Experimentální lokality

Ansámbl růstových modelů byl aplikován na tři půdně-klimaticky odlišné lokality České republiky, a to Lednice, Věrovany a Domaníněk. Lednice, Věrovany a Domaníněk mají rozdílné bodové hodnocení výnosnosti zemědělské půdy jako charakteristiky jednotlivých bonitovaných půdně ekologických jednotek (BPEJ) (Tomiška et al., 2003).



Obr. 9: Mapa České republiky s vyznačenými zájmovými lokalitami.

4.3.1 Lednice

Zkušební stanice Lednice spadá pod ÚKZÚZ. Byla založena v roce 1994. Leží na 48°48' severní šířky a 16°47' východní délky v Jihomoravském kraji. Pokusná lokalita se nachází v kukuřičné výrobní oblasti. Průměrná nadmořská výška stanice je 171 m. Oblast se vyznačuje rovinným terénem se svažitostí pozemků kolem 2°.

Dlouhodobá průměrná teplota v Lednici je 9,6 °C. Dlouhodobý průměrný úhrn srážek činí 461 mm (normálové období 1971 - 2000).

Zkušební stanice Lednice spadá do oblasti s nízkým průměrným ročním srážkovým úhrnem. Z pohledu zemědělské výroby může být potencionální produktivita

území omezena nedostatkem srážek, což by v kombinaci s vyšší průměrnou teplotou mohlo způsobit oproti klimatologickému optimu sušší podmínky.

Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy (VÚMOP) v bodovém hodnocení produkční schopnosti půd z roku 2001 (Tomiška et al., 2003) charakterizoval půdní podmínky na zkušební stanici Lednice jako černozem modální, jejíž půdotvorný substrát je spraš. Zrnitostní složení odpovídá středně těžké hlinité půdě. Půdní profil je zde velmi hluboký, má příznivou vododržnost a je bez štěrku.

4.3.2 Věrovany

V Olomouckém kraji na 49°27' severní šířky a 17°17' východní délky se od roku 1993 nachází zkušební stanice Věrovany. Pokusná lokalita také spadá pod ÚKZÚZ. Svými půdními a klimatickými vlastnostmi s průměrnou nadmořskou výškou 210 m a rovinným terénem náleží do řepařské výrobní oblasti.

Dlouhodobá průměrná teplota Věrovan je 8,7 °C. Dlouhodobý průměrný úhrn srážek činí 502 mm (normálové období 1971 - 2000).

VÚMOP v bodovém hodnocení produkční schopnosti půd z roku 2001 (Tomiška et al., 2003) charakterizoval půdní podmínky zkušební stanice Věrovany jako černozem luvickou se sprašovým půdotvorným základem. Zrnitostním složením spadá půda ve Věrovanech ke středně těžkým hlinitým půdám. Půdní profil je zde velmi hluboký, s příznivou vododržností a bez štěrku.

4.3.3 Domanínek

Zkušební stanice Domanínek se nachází v Kraji Vysočina na 49°31' severní šířky a 16°14' východní délky. Pokusy zkušební stanice provozuje firma ZEMSERVIS zkušební stanice Domanínek, s.r.o. Pokusná lokalita s průměrnou nadmořskou výškou 560 m spadá do bramborářské výrobní oblasti. Díky nadmořské výšce a zeměpisné poloze zájmové lokality není potenciální produktivita území z hlediska zemědělské výroby omezena nedostatkem srážek.

Dlouhodobá průměrná teplota činí 6,8 °C. Průměrný roční úhrn srážek je 575 mm (normálové období 1971 - 2000).

Pokusná lokalita Domanínek se vyznačuje vysokou svažitostí a skeletovitostí půd. VÚMOP v bodovém hodnocení produkční schopnosti půd z roku 2001 (Tomiška et al., 2003) charakterizoval půdní podmínky tohoto území jako kambizem

luvicovou mesobazickou slabě oglejenou. Půdotvorným substrátem je biotická pararula migmatitická. Zrnitostní složení odpovídá středně těžké půdě.

Tab. 3: Souhrn základních půdních a klimatických údajů lokalit Lednice, Věrovan a Domanínku. Klimatické údaje jsou hodnoceny za období od r. 1971 do r. 2000. Bodová hodnota je stanovena v rámci 100 bodové stupnice (Tomiška e al., 2003).

<i>Zkušební stanice</i>	<i>Lednice</i>	<i>Věrovany</i>	<i>Domanínek</i>
<i>Zeměpisná šířka (s. š.)</i>	<i>48°48'</i>	<i>49°27'</i>	<i>49°31'</i>
<i>Zeměpisná délka (v. d.)</i>	<i>16°47'</i>	<i>17°17'</i>	<i>16°14'</i>
<i>Nadmořská výška (m n. m.)</i>	<i>171</i>	<i>210</i>	<i>560</i>
<i>Výrobní oblast</i>	<i>kukuřičná</i>	<i>řepařská</i>	<i>bramborářská</i>
<i>Půdní typ</i>	<i>CE</i>	<i>CE</i>	<i>KA</i>
<i>Půdní druh</i>	<i>H</i>	<i>H</i>	<i>HP</i>
<i>Bodová hodnota produkční schopnosti</i>	<i>97</i>	<i>100</i>	<i>81</i>
<i>Průměrná roční teplota (°C)</i>	<i>9,6</i>	<i>8,7</i>	<i>6,8</i>
<i>Průměrná teplota za vegetační období (°C)</i>	<i>16,4</i>	<i>16,0</i>	<i>14,5</i>
<i>Průměrné roční srážky (mm)</i>	<i>461</i>	<i>502</i>	<i>575</i>
<i>Průměrné srážky ve vegetačním období (mm)</i>	<i>291</i>	<i>316</i>	<i>309</i>

CE – černozem, KA – kambizem, H – hlinitá půda, HP – hlinitopísčité půda

4.4 Experimentální data

Na základě naměřených a pozorovaných dat z odrůdových pokusů (popis níže viz kapitola 4.4.2.1) a pokusů s experimentálními zákryty pro redukci srážek (popis níže viz kapitola 4.4.2.2) v Domanínku v letech 2011 - 2014 a získané databázi se záznamy o vedení a výsledcích polních pokusů z pokusných lokalit Lednice, Věrovan a Domanínku z let 1998 - 2006 proběhla kalibrace a následná validace ansámblu růstových modelů (tab. 4).

Tab. 4: Tabulka s vyznačenými roky a lokalitami, které byly použity pro kalibraci a validaci růstových modelů.

Rok \ Lokalita	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								
Domaníněk	kalibrace		kalibrace	kalibrace	kalibrace	kalibrace	validace	validace	validace					kalibrace	kalibrace	validace	validace

kalibrace
 validace

4.4.1 Principy měření na polních pokusech MENDELU

Na rozdíl od standartních odrůdových polních pokusů ÚKZÚZu byly polní pokusy MENDELU v Domanínku v letech 2011-2014 přímo navrženy pro účely kalibrace růstových modelů. Měřilo a sledovalo se zde více faktorů a celkové pozorování a hodnocení bylo v určitých směrech ve srovnání s klasickými odrůdovými pokusy mnohem podrobnější.

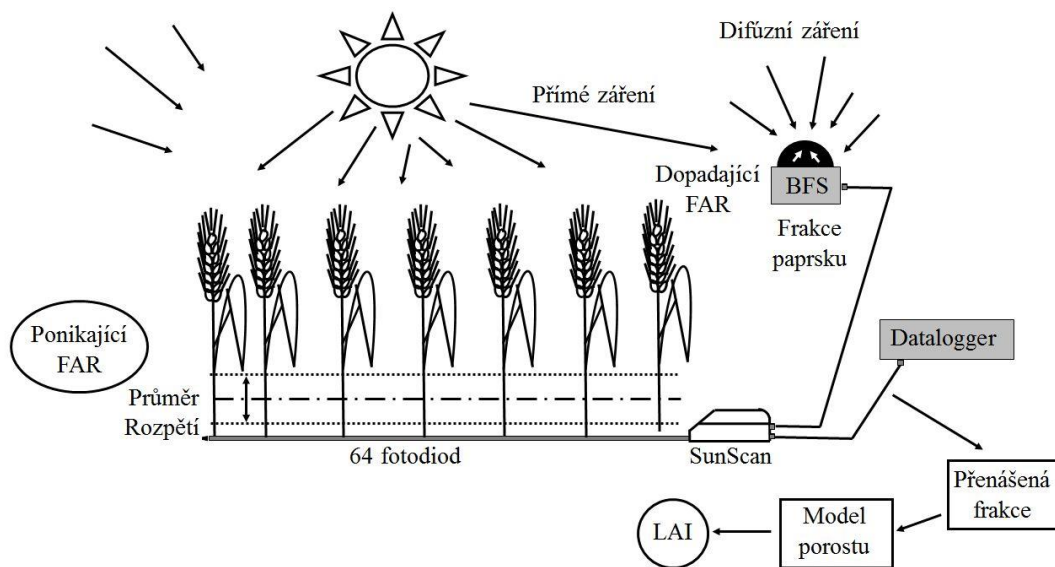
4.4.1.1 Index listové plochy

Index listové plochy (Leaf Area Index, LAI) je bezrozměrná veličina charakterizující velikost listové plochy v m² na m² půdy. LAI je definován jako množství listového materiálu v ekosystému - jako celková jednostranná plocha fotosyntetizujících pletiv na jednotku plochy zemského povrchu (Gobron, 2016; Chen, 1996). Pomocí této veličiny se dá určit mnoho biologických a fyzikálních procesů spojených s porostem jako je například fotosyntéza, transpirace, evapotranspirace nebo intercepce srážek (Bonan, 1993; Dickinson et al., 1993; Running a Coughlan, 1988; Sellers et al., 1986).

Existují dva typy metod používaných pro stanovení hodnoty LAI, a to přímé destruktivní a nepřímé nedestruktivní (Gower et al, 1999; Kussner a Mosandl, 2000). Přímé destruktivní metody jsou přesnější. Jejich nevýhodou je časová náročnost a pracnost. Fungují na principu sběru listů. Posbírá se statisticky významný vzorek listů, spočítá se jejich plocha a následně se pro výpočet LAI odvodí plocha všech listů na dané rostlině či stromu (Wilhelm et al. 2000). Nepřímé metody jsou rychlejší. Spočívají v odvození listové plochy na základě další proměnné. Nepřímou metodou stanovení velikosti LAI je například analýza pomocí hemisférických fotografií porostu,

snímky z dálkového průzkumu Země či ambulantním měření LAI pomocí k tomuto určených speciálních přístrojů.

V polních pokusech MENDELU v Domanínku byla použita nedestruktivní nepřímá metoda měření vývoj listové plochy (LAI) pomocí přístroje SunScan Canopy Analysis System (výrobce Delta-T Devices, Velká Británie, obr. 10 a 11). SunScan je přenosný přístroj, jehož čidlo ambulantně měří fotosynteticky aktivní záření (FAR) v porostu, které lze také využít na měření slunečního záření zachyceného porostem a k odhadu indexu listové plochy (Potter et al., 1996). SunScan měří současně dopadající FAR o vlnové délce 400–700 nm nad porostem a pronikající FAR pod porostem. Dopadající FAR měří pomocí fotodiód na Beam Fraction Sensoru (BFS, frakce paprsku). Jedna z fotodiód je vždy ve stínu. Tato metoda umožňuje oddělení složek přímého a difúzního záření FAR, údaje nezbytného pro výpočet LAI. SunScan neměří přímo LAI, nýbrž měří plant area index (PAI), který představuje nadzemní plochu všech částí rostliny – stonku, listů i klasu.



Obr. 10: Schematické znázornění principu měření LAI pomocí přístroje SunScan (upraveno dle Pottera et al., 1996).



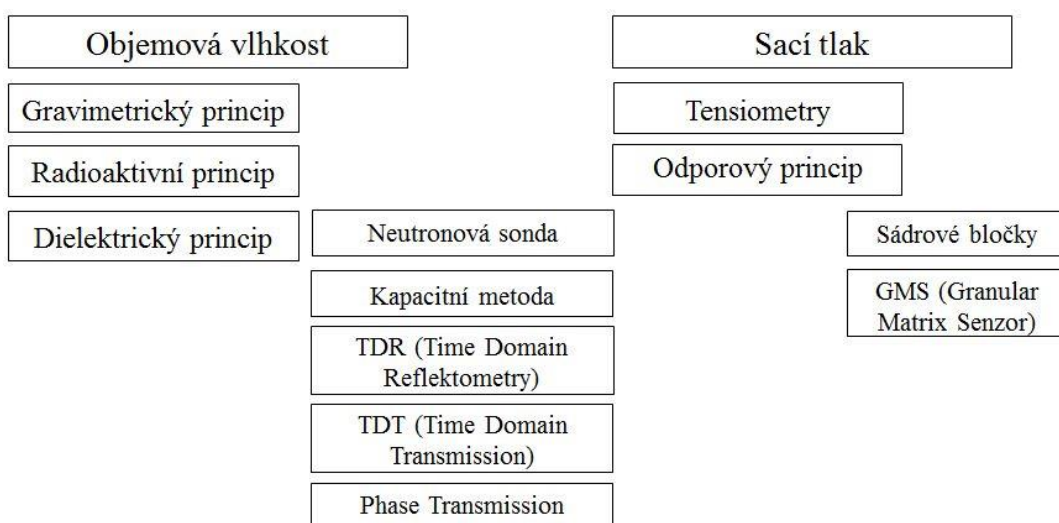
Obr. 11: Měření LAI pomocí přístroje SunScan v polním pokusu s ječmenem jarním MENDELU v Domanínku v roce 2014.

4.4.1.2 Půdní vlhkost

Voda, společně s látkami v ní rozpuštěnými nebo dispergovanými, tvoří půdní roztok. Voda se v půdě vyskytuje od prakticky zanedbatelného množství (suché půdy) až po úplné zaplnění všech půdních pórů (dosažení maximální vodní kapacity). Aktuální množství vody v půdě však závisí na klimatických podmínkách, výšce hladiny podzemní vody i přítomné vegetaci, infiltračních a retenčních poměrech, které se odvíjejí od granulometrického složení půdy.

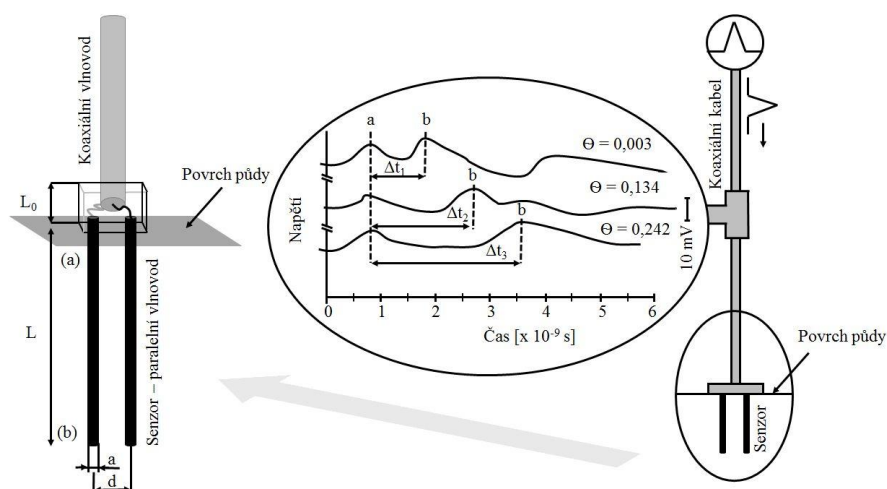
Mezi základní měřené veličiny na polních pokusech MENDELU v Domanínku patřil obsah vody v půdě, neboli půdní vlhkost. Půdní vlhkost lze stanovit přímými nebo nepřímými metodami. Při použití metod přímých se nejčastěji používají gravimetrické metody. Nepřímé metody využívají senzory zabudované do půdních horizontů, pomocí nichž je sledována vlhkosť rovnováha. Senzory mohou být odporové (závislost vodivosti na vlhkosti), kapacitní (měření permitivity například rezonančním kapacitním vlhkoměrem), neutronové (měření zpomalování srážek neutronů s atomy moderátoru) nebo gamaskopické (měření absorpce nebo rozptylu gama-záření, využívá se pro přesná laboratorní měření) (Litschmann, 2010).

Principy měření půdní vlhkosti



Obr. 12: Schéma znázorňující principy měření půdní vlhkosti (Litschmann, 2010).

V případě odrůdových polních pokusů (viz kapitola 4.4.2.1) a pokusů s experimentálními zákryty pro redukcí srážek (viz kapitola 4.4.2.2) MENDELU v Domanínku byla zvolena nepřímá metoda měření půdní vlhkosti v hloubce 0 – 30 cm pomocí senzorů TDR (Time domain reflectometry, CS 616, výrobce Campbell Scientific Inc., Shepshed, Velká Británie, obr. 13 a 14).



Obr. 13: Schematické znázornění měření obsahu vody v půdě a elektrické vodivosti pomocí senzoru TDR (více Skierucha, 2011).

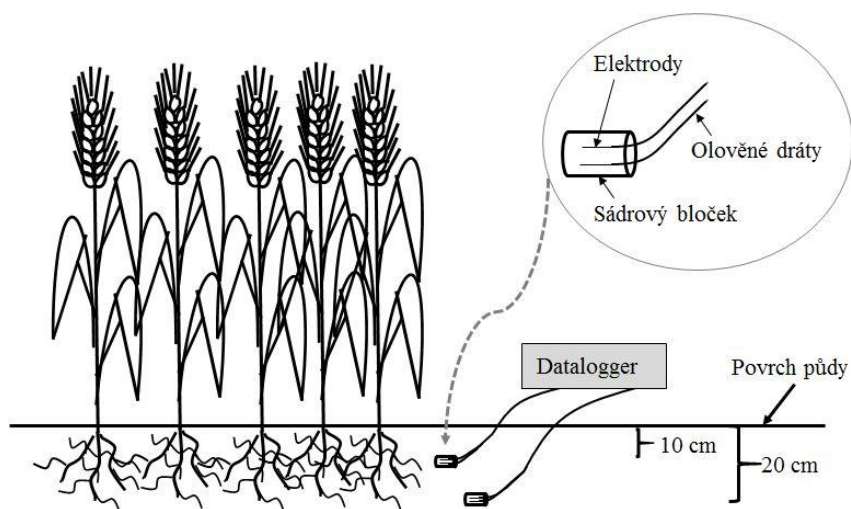


Obr. 14: TDR senzor umístěný v polním pokusu MENDELU v Domanínku v roce 2012.

TDR senzor měří čas, po který vysokofrekvenční elektrický impuls proběhne tam a zpět po jehlách sondy zapíchnuté do půdy v místě měření. Půda vytvoří mezi jehlami dielektrikum, jehož dielektrické vlastnosti (relativní permitivita, elektrická vodivost) jsou závislé na půdní vlhkosti. Objemová vlhkost půdy se získá porovnáním vyslaných a odražených impulsů (Smith et al., 2005). Metoda TDR patří v současnosti mezi nejpřesnější a nejmodernější metody měření půdní vlhkosti. Poskytuje okamžité výsledky.

V případě pokusů s experimentálními zákryty pro redukcí srážek bylo měření objemové vlhkosti čidly TDR doplněno o měření vlhkostního potenciálu půdy odporovou metodou pomocí sádrových bločků (Gypsum blocks, výrobce Campbell Scientific, Inc., obr. 15 a 16). Sádrové bločky byly umístěny do hloubky 10 cm a 20 cm, kde stanovovaly vlhkostní potenciál půdní vody projevující se jako sací tlak, jehož velikost určuje dostupnost vody pro rostlinu (Cassel et al., 1986), neboli určuje, jak velkou práci/energii musí rostlina vynaložit k získání vody z půdy. Grafickým zobrazením vztahu mezi vlhkostí a sacím tlakem půdy je retenční čára vlhkosti.

Vlhká půda je polovodivý nehomogenní materiál, jehož vodivost vzrůstá se zvyšováním vlhkosti. Princip měření pomocí sádrových bločků je založen na měření odporu mezi elektrodami v porézním prostředí (Litschmann, 2010). Sádrové bločky jsou tvořeny kovovými elektrodami buď tyčového tvaru anebo ve tvaru mřížky, zalité do sádry. Kolem elektrod se vytváří nasycený roztok síranu vápenatého, který vytváří elektrolyt. Odpor mezi elektrodami se měří malými střídavými proudy, aby nedošlo k polarizaci elektrod.



Obr. 15: Schematické znázornění umístění sádrových bločků v pokusu s experimentálními zákryty pro redukci srážek s ječmenem jarním.



Obr. 16: Sádrový bloček.

4.4.2 Metodika polních pokusů MENDELU

Růstové modely byly v první řadě kalibrovány na základě pozorovaných a naměřených dat z polních pokusů s ječmenem jarním na pokusných stanovištích v Domanínku z let 2011 - 2014. V těchto čtyřech letech zde probíhaly odrůdové pokusy s odlišnými termíny setí a dávkami hnojení. V letech 2013 a 2014 k odrůdovým pokusům přibyl pokus s experimentálními zákryty pro redukci srážek (obr. 17 a 18).



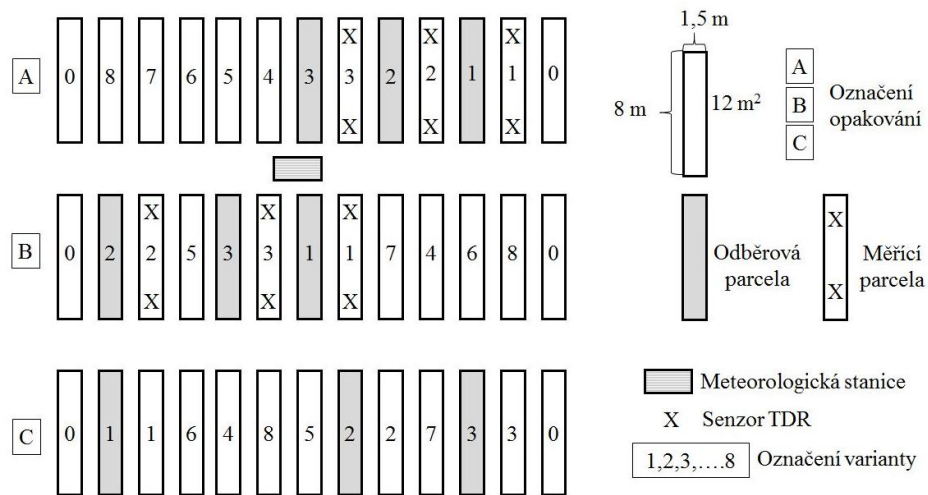
Obr. 17: Letecký snímek znázorňující pokusnou lokalitu v Domanínku (zdroj mapy Google Earth, online 26.07.2016).



Obr. 18: Upravený letecký snímek znázorňující místa pokusů v letech 2011 – 2014 v Domanínku (zdroj mapy Google Earth, online 26.07.2016).

4.4.2.1 Odrůdový pokus

Design odrůdového pokusu (obr. 19 a 20) s odlišnými termíny setí a dávkami hnojení byl ve všech čtyřech letech totožný. Pokus s osmi variantami (označenými 1 - 8) ve třech opakováních (A, B, C) byl založen a veden na standardizovaných pokusných parcelách, každé o velikosti 12 m² (1,5 x 8 m).



Obr. 19: Schéma odrůdového polního pokusu MENDELU s ječmenem jarním v Domanínku, v letech 2011- 2014.



Obr. 20: Odrůdový polní pokus s ječmenem jarním MENDELU v Domanínku v roce 2012.

Jednotlivé varianty se od sebe navzájem lišily:

- odrůdou (varianty 1 - 4 odrůda „Tolar“ (2011 a 2012), odrůda „Bojos“ (2013 a 2014) x varianty 5 – 8 odrůda „Blaník“ (2011 a 2012), odrůda „Sebastian“ (2013 a 2014)),
- termínem setí (varianty 1, 3, 5, 6 s normálním agrotechnickým termínem setí x varianty 2, 4, 7, 8 s o 14 dní zpožděným agrotechnickým termínem setí),
- dávkou hnojení (varianty 1, 3, 5, 7 s běžnou úrovní hnojení x varianty 2, 4, 6, 8 s o 1/3 zvýšenou dávkou hnojení).

Pro účely kalibrace sloužily pouze varianty 1 – 4, odrůdy „Tolar“ (2011 a 2012) a „Bojos“ (2013 a 2014). Informace o termínech setí, termínech a dávkách hnojení jsou uvedeny v tab. 5.

Tab. 5: Termíny setí a dávky hnojení u odrůdových polních pokusů MENDELU s ječmenem jarním v Domanínku.

„Tolar“	2011, Předplodina: brambory			2012, Předplodina: oves + vikev		
Varianta	Termín setí	Termín hnojení	Dávka hnojení (kg N/ha)	Termín setí	Termín hnojení	Dávka hnojení (kg N/ha)
1	12.04.	11.04.	60	18.04.	17.04.	70
2	27.04.	26.04.	60	03.05.	02.05.	81
		03.06.	20		10.06.	20
3	27.04.	26.04.	60	03.05.	02.05.	81
4	12.04.	11.04.	60	18.04.	17.04.	70
		03.06.	20		10.06.	20
„Bojos“	2013, Předplodina: oves setý			2014, Předplodina: triticales ozimé		
Varianta	Termín setí	Termín hnojení	Dávka hnojení (kg N/ha)	Termín setí	Termín hnojení	Dávka hnojení (kg N/ha)
1	18.04.	17.04.	30	13.03.	12.03.	30
2	30.04.	29.04.	30	27.03.	26.03.	30
		17.05.	60		17.04.	30
3	30.04.	29.04.	30	27.03.	26.03.	30
4	18.04.	17.04.	30	13.03.	12.03.	30
		17.05.	60		17.04.	30

U variant 1, 2, 3 byly parcely zdvojené. Jedna sloužila pro odběry, druhá pro nedestruktivní měření a sklizeň. Do každé sklizňové parcely (v opakování A a B u variant 1, 2 a 3) byly v hloubce 0 - 30 cm nainstalovány dva senzory TDR na měření vodní bilance v půdě. Dále byl ve sklizňových parcelách v týdenním až dvoutýdenním kroku nedestruktivní metodou pomocí přístroje SunScan měřen vývoj listové plochy (LAI). Z odběrových parcel byly v průběhu vegetační sezóny odebírány vzorky nadzemní biomasy a půdy. První půdní odběr proběhl ještě před setím, a to z hloubek 0 - 10 cm, 30 - 50 cm a 50 + cm. Sloužil ke stanovení obsahu celkového a minerálního půdního dusíku (NO_3 a NH_4) v jednotlivých vrstvách půdy. Díky tomu nám byly známy iniciální podmínky na pokusných parcelách. V polních pokusech se podrobně sledoval nástup a průběh fenologických fází (vzcházení, odnožování, sloupkování, metání, kvetení, žluté zralosti, zralosti a sklizně), zdravotní stav porostu (napadení škůdci či chorobami), hlavní výnosotvorné parametry (hustota porostu před sklizní, počet vzešlých rostlin na m^2 , počet produktivních odnoží na m^2 , sušina, hmotnost tisíce zrn (HTZ), počet zrn v klase a jejich vlhkost) a výnos zrna.

Přímo v polním pokusu byla každý rok nainstalována meteorologická stanice, která měřila teplotu vzduchu. Ostatní potřebná meteorologická data byla získána z jiných meteorologických stanic umístěných v Domanínku.

4.4.2.2 Pokusy s experimentálními zákryty pro redukci srážek

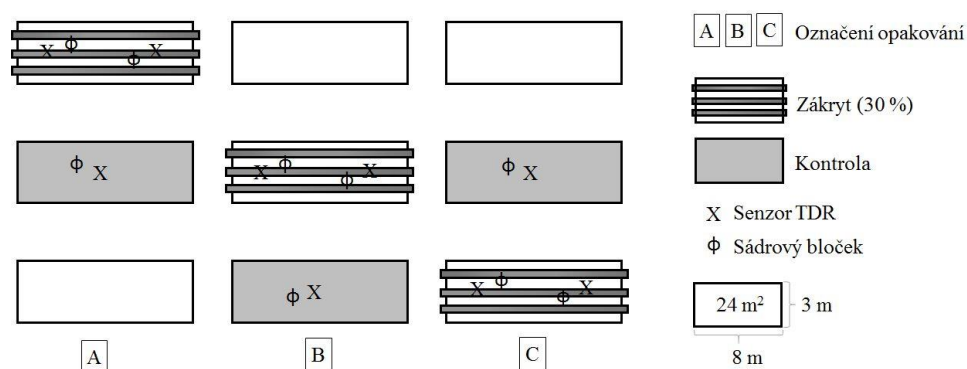
Mezi nejvýznamnější faktory negativně ovlivňující růst rostlin patří sucho. Podle klimatických scénářů můžeme tento trend v našich podmínkách očekávat v budoucích letech stále častěji (např. Dubrovský et al., 2014, Trnka et al., 2011). Růstové modely by mohly být jedním z možných nástrojů pro odhad dopadů sucha např. na výnos zrna obilovin (např. Eitzinger et al., 2013; Rosenzweig et al., 2013; Thaler et al., 2012).

V letech 2013 a 2014 přibyly k odrůdovým pokusům na pokusné lokalitě v Domanínku polní pokusy s ječmenem jarním a experimentálními zákryty pro redukci srážek. Informace o termínech setí a termínech a dávkách hnojení jsou uvedeny v tab. 6.

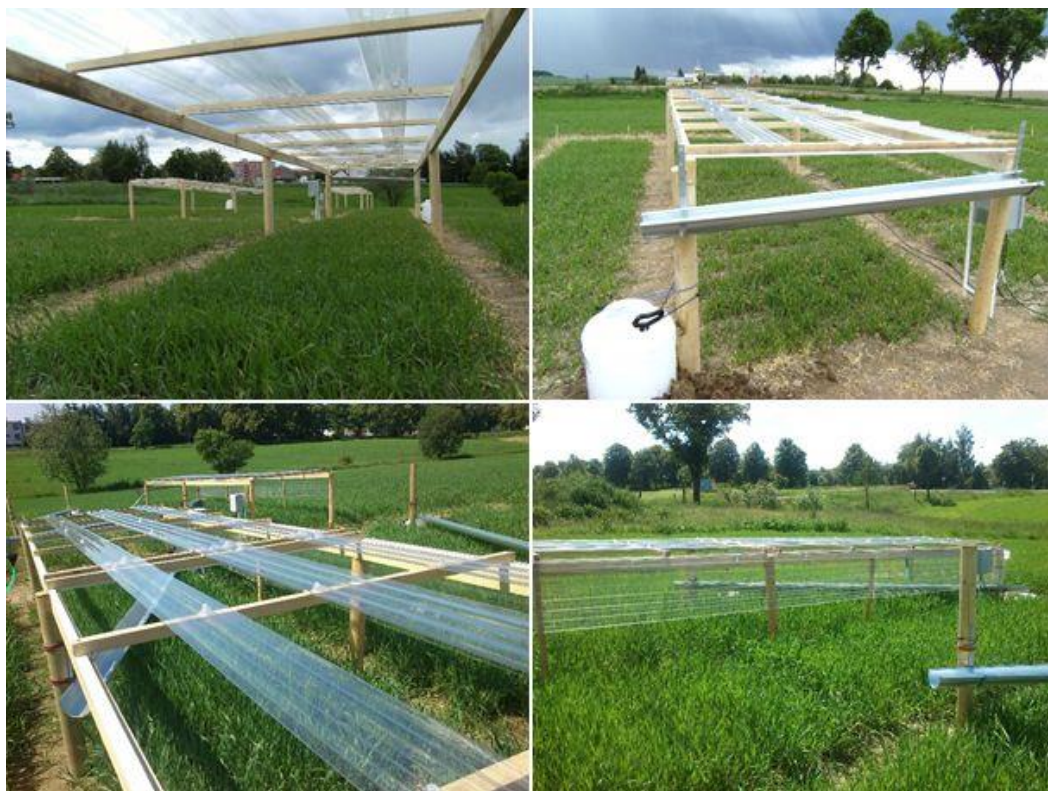
Tab. 6: Termíny setí a dávky hnojení u polních pokusů MENDELU s ječmenem jarním odrůdou „Bojos“ a zákryty v Domanínku v letech 2013, 2014.

Odrůda „Bojos“					
2013			2014		
Předplodina: oves pluchatý (zelené hnojení)			Předplodina: pšenice ozimá		
Instalace zákrytů 23. 05. – 05. 08.			Instalace zákrytů 28. 05. – 04. 08.		
Zakrytá plocha 30 %			Zakrytá plocha 70 %		
Termín setí	Termín hnojení	Dávka hnojení (kg N/ha)	Termín setí	Termín hnojení	Dávka hnojení (kg N/ha)
29.04.	17. 04.	20	06.03.	01. 03.	30
	16. 05.	60		17. 04.	30

Porost ječmene jarního byl díky sníženému přísunu srážek vystaven stresu suchem. V roce 2013 se zakrývalo 30 % pokusné parcely, v roce 2014 zákryty zakrývaly 70 % pokusné parcely. Hypotézou pokusů bylo, že redukce srážek povede v částečně zakrytých parcelách ke snížení půdní vlhkosti a následně ke snížení výnosu zrna ječmene jarního. Pokusy s experimentálními zákryty pro redukci srážek jsou znázorněny na obr. 21 a 22 a 23.



Obr. 21: Schéma polního pokusu MENDELU s ječmenem jarním a experimentálními zákryty pro redukci srážek redukující x % pokusné parcely.



Obr. 22: Polní pokus MENDELU s ječmenem jarním a experimentálními zákryty pro redukci srážek zakrývající 30 % pokusné parcely v Domanínku v roce 2013.



Obr. 23: Polní pokus MENDELU s ječmenem jarním odrůdou „Bojos“ a experimentálními zákryty pro redukci srážek zakrývající 70 % pokusné parcely v Domanínku v roce 2014.

V obou letech se pokusy s experimentálními zákryty pro redukci srážek skládaly z malých pokusných parcel, každé o velikosti 24,8 m² (3,1 x 8 m). Zákryt redukoval po celou dobu jeho umístění dané procento vertikální srážkové vody, kterou odváděl mimo parcelu. Redukce srážek probíhala ve 3 samostatných opakováních. Vznikly tak 2 pokusné varianty, parcely s ambientními srážkami (tzv. kontroly) vs. parcely s daným procentem redukce vertikální srážkové vody (tzv. zákryty). Zákryt nad parcelou byl zkonstruován z čiré polykarbonátové krytiny “Suntuf CS” (PALRAM Ltd. – IL, UK) o tloušťce 0,8 mm, která nepropouští UV záření a FAR propouští z 90 %. Kontrola byla bez zákrytu, dopadalo zde tedy 100 % srážkové vody. Pomocí přístroje SunScan se v porostu pod zákryty i v kontrolách ve čtrnácti denním kroku měřil vývoj LAI. Mezi zákryty a kontrolami byl v průběhu vegetační sezóny pomocí čidel TDR, která měřila objemovou vlhkost půdy v hloubce 0 - 30 cm, sledován rozdíl v obsahu vody v půdě. Jako doplňkové měření k půdní vlhkosti byl pomocí sádrových bločků v hloubkách 10 cm a 20 cm stanovován vlhkostní potenciál půdní vody.

Výsledky z polních pokusů s experimentálními zákryty pro redukci srážek byly využity pro validaci růstových modelů.

4.4.3 Metodika polních pokusů ÚKZÚZ

Polní pokusy ÚKZÚZu s ječmenem jarním odrůdou „*Tolar*“ probíhaly na pokusných stanovištích Lednice, Věrovany a Domanínec ve vegetačních sezónách 1998-2006 formou maloparcelkových polních pokusů se sklizňovou plochou 10 m²/parcela ve třech opakováních. Záznamy z roku 1999 se nedochovaly. U stanic Lednice a Věrovany bylo pro rok 2000 zaznamenáno pro možnosti kalibrace růstových modelů málo potřebných údajů. Z ostatních let vyznačených v tab. 4 (viz kapitola 4.4) se dochovaly záznamy o předplodině, termínech a hloubkách zpracování půdy, termínech a dávkách hnojení dusíkem, termínech setí a sklizně, nástupech fenologických fází kvetení a zralosti, zdravotním stavu porostu (napadení škůdci či chorobami) a výnosech zrna. Potřebné půdní údaje k vytvoření půdních souborů vstupujících do jednotlivých růstových modelů byly získány z bodového hodnocení produkční schopnosti půd z roku 2001 (Tomiška et al, 2003). Potřebná meteorologická data pak z databáze ČHMÚ.

4.5 Statistické ukazatele použité v této práci

K vyhodnocení a porovnání vztahu mezi reálnými a simulovanými veličinami bylo využito následujících statistických ukazatelů:

- 1) ukazatele střední průměrné chyby MBE (Mean Bias Error), který měří systematickou chybu a říká nám, zda a o kolik model svými simulacemi podhodnocuje nebo nadhodnocuje reálná data

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

- 2) ukazatele střední kvadratické chyby RMSE (Root Mean Square Error), který popisuje průměrnou absolutní odchylku mezi reálnými a simulovanými hodnotami

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

- 3) ukazatele indexu shody IA (Index of Agreement), který pomocí hodnoty pohybující se v rozmezí 0 - 1 znázorňuje efektivnost modelování, neboli znázorňuje to, nakolik se reálná data shodují s daty simulovanými. Čím více se výsledné číslo blíží číslu 1, tím více simulace odpovídá realitě

$$\text{IA} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\hat{S}| + |\hat{O}|)^2}$$

S_i ... simulovaná hodnota dané veličiny

O_i ... pozorovaná / reálná hodnota dané veličiny

n ... počet dvojic pozorovaných a odhadovaných veličin

\bar{S} ... průměrná simulovaná hodnota dané veličiny

\bar{O} ... průměrná pozorovaná hodnota dané veličiny

$\hat{S} = |S_i - (S_i - \bar{S})|$ a $\hat{O} = |O_i - (O_i - \bar{O})|$

K porovnání simulovaných a naměřených hodnot u LAI a půdní vlhkosti byly dále aplikovány následující dva statistické testy:

- Šapirův – Wilkův test normality,
- Wilcoxonův neparametrický test.

Pro výpočet Shapirova – Wilkova testu normality a Wilcoxonova neparametrického testu byl použit software STATISTICA verze 12.

K účelům vyhodnocení úspěšnosti simulací jednotlivých modelů (viz kapitola 5.3) byly normalizovány hodnoty indikátorů chyb MBE, RMSE a IA. Normalizace proběhla pomocí tzv. standardizace rozpětím. Standardizace rozpětím (min-max normalizace) se používá pro analýzu souboru dat a jejich převod na stejné měřítko. Normalizované hodnoty indikátorů chyb byly vypočítány na základě vzorce uvedeného níže:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)}$$

y_{ij} ... výsledná normalizovaná hodnota

x_{ij} ... nenormalizovaná hodnota

x_j ... průměr z nenormalizovaných hodnot

max(x_j) ... maximální hodnota z nenormalizovaných hodnot

min(x_j) ... minimální hodnota z nenormalizovaných hodnot

Aby mohly být v grafech v kapitole 5.3 modely seřazeny podle úspěšnosti sestupně (tzn. od nejvíce úspěšného po nejméně úspěšný), byla výsledná hodnota upravena pomocí operace $\frac{1}{y_{ij}}$. V rámci výpočtu byla jako výchozí bod brána hodnota, která by v případě 100% úspěšnosti simulace modelu byla pro MBE a RMSE hodnota 0 a pro IA hodnota 1.

Statistické postupy, použité v této disertační práci, jsou uvedeny a popsány ve studiích Brun et al. (2006), Davies a McKay (1989), Meloun a Militký (2002) a Willmott (1981).

5. VÝSLEDKY A DISKUZE

5.1 Kalibrace

První fází práce s růstovými modely byla jejich kalibrace pro ječmen jarní v půdně klimatických podmínkách České republiky. Dle pravidel a požadavků jednotlivých růstových modelů byly vytvořeny meteorologické, půdní, agrotechnické a plodinové vstupní soubory. V rámci kalibrace byly upraveny hodnoty klíčových parametrů tak, aby následná simulace odpovídala co nejvíce realitě dané plodiny a zájmového prostředí. Růstové modely byly kalibrovány na základě pozorovaných a měřených údajů, ke kterým patří:

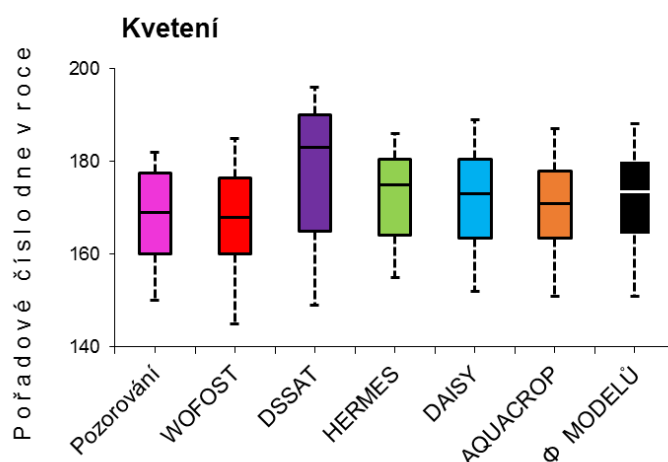
- 1) termíny fenologických fází kvetení a zralost (den),
- 2) velikost výnosu zrna (sušina, $t \cdot ha^{-1}$),
- 3) dynamika vývoje LAI ($m^2 \cdot m^{-2}$),
- 4) dynamika půdní vody (obj_%).

5.1.2 Kalibrace s využitím pozorované fenologie

Kalibrace s využitím pozorované fenologie proběhla na základě výsledků pozorování nástupů fenologických fází u pokusů s ječmenem jarním, odrůdami „*Tolar*“ (ÚKZÚZ, MENDELU) a „*Bojos*“ (MENDELU) (tab. 4 viz kapitola 4.4). Do růstových modelů byla zadána základní charakteristika zájmové plodiny, která následně prošla rekálibrací pro podmínky České republiky. Rekálibrace spočívala zejména v modifikaci délky fenologických fází pomocí sum teplot potřebných k dosažení jednotlivých fenologických fází. Jako kalibrační parametry pro fenologický vývoj ječmene jarního byly zvoleny známé termíny fenologických fází, a to kvetení a zralost.

Nastavení odrůd „*Tolar*“ a „*Bojos*“ v rámci modelu HERMES bylo vytvořeno rekálibrací odrůdy „*Orbit*“, která byla kalibrována pro podmínky v České republice autorem modelu a aplikována v publikaci Rötter et al. (2012). U všech ostatních modelů proběhlo nastavení odrůd „*Tolar*“ a „*Bojos*“ pomocí citlivostní analýzy, tzn. upravením původních parametrů ve vstupním souboru s plodinou ječmene jarního, který je dostupný v originálních aplikacích jednotlivých modelů.

Jako první byla kalibrována fenologická fáze kvetení. Výsledky této kalibrace jsou znázorněny pomocí grafu na obr. 24.



Obr. 24: Grafické znázornění výsledků kalibrace pozorovaných a modely simulovaných termínů fenologické fáze kvetení.

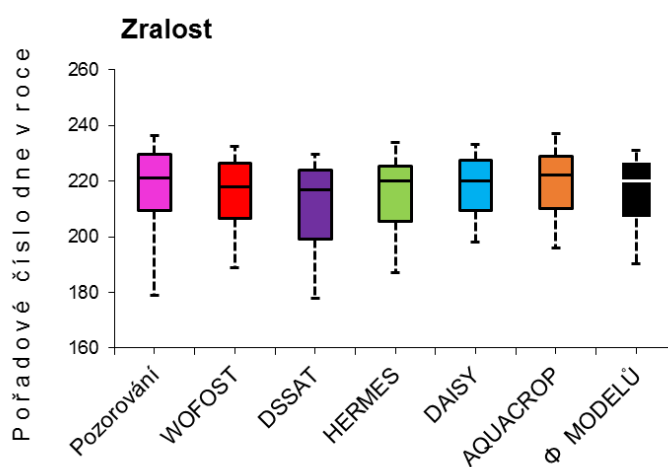
Z grafu na obr. 24 je patrné, že simulace DSSATu má oproti ostatním nejvýraznější rozpětí hodnot a termín kvetení oproti pozorování v rámci ansámbly modelů nejvíce opozdila. Variabilita simulací ostatních modelů vykazala s pozorováním uspokojivou shodu. Nejpřesnější simulace proběhly pomocí WOFOSTu, AQUACROPu a Φ MODELŮ.

Výsledky kalibrace ječmene jarního pro fenologickou fázi kvetení (dle Zadokse 61) v podmínkách České republiky vykazaly mírné odchylky s pozorováním od -1 až $+9$ dní. Nejpřesnější hodnoty pro fenofázi kvetení byly simulovány prostřednictvím modelu WOFOST. V průměru předběhly pozorované termíny pouze o jediný den. Největší odchylka s pozorováním u fenologické fáze kvetení byla simulována DSSATem. Simulace se v průměru opozdily o 9 dní. Bral-li by se v potaz Φ MODELŮ, fenologická fáze kvetení by se opozdila pouze o 3 dny.

Ve srovnání s výsledky studie Rötter et al. (2012), která porovnávala simulace 9 růstových modelů pro ječmen jarní v různých klimatických pásmech severní a střední Evropy, dopadla v disertační práci kalibrace fenologické fáze kvetení ječmene jarního lépe. Studie Rötter et al. (2012) vykazuje shodu s pozorováním u kvetení až ve výši ± 11 dní. Růstový model WOFOST byl ve studii Rötter et al. (2012) v rámci simulace fenologie stejně jako v této disertační práci hodnocen jako jeden z nejlepších.

Ve studii Eitzinger et al. (2003), která aplikovala simulace WOFOSTu a DSSATu pro ječmen jarní a pšenici ozimou na území Rakouska a Moravy na základě naměřených dat z let 2000 a 2001, nebyl u fenologické fáze kvetení ječmene jarního zaznamenán mezi simulacemi a pozorováním žádný rozdíl. Simulace WOFOSTu i DSSATu byly na den přesné. U pšenice ozimé to bylo pro fenofázi kvetení u modelu WOFOST v rozmezí jednoho dne a u DSSATu v rozmezí 0 až + 3 dny.

Dalším krokem kalibrace modelů byla kalibrace pomocí pozorovaných termínů nástupů fenologické fáze zralosti. Výsledky kalibrace zralosti jsou znázorněny pomocí grafu na obr. 25.



Obr. 25: Grafické znázornění výsledků kalibrace pozorovaných a modely simulovaných termínů fenologické fáze zralosti.

Z grafu na obr. 25 lze vyčíst dobrou shodu simulací fenologické fáze zralosti s pozorováním. Variabilita mezi pozorováním a výstupy modelů je nízká. Nejpřesnějšího výsledku by v tomto případě dosáhl Φ MODELŮ.

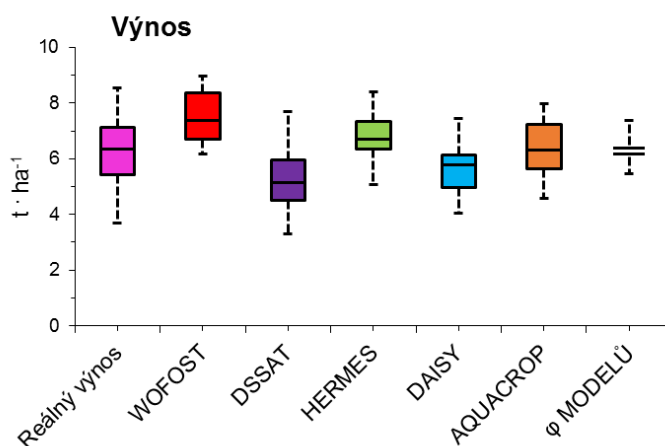
Výsledky simulací u kalibrace ječmene jarního pro fenologickou fázi fyziologické zralosti (dle Zadokse 90) v podmínkách České republiky vykazují shodu s pozorováním ve výši - 6 až + 5 dní. Nejpřesnější hodnota pro fenofázi zralosti, v průměru na den přesně, byla simulována modelem HERMES. Nejméně přesná simulace fenologické fáze zralosti, v průměru o 6 dní dříve, byla výstupem DSSATu. Simulace Φ MODELŮ by fenologickou fázi zralosti odhadla, stejně jako simulace HERMESu, na den přesně.

Ve srovnání se studií Rötter et al. (2012), dopadly v této disertační práci i výsledky kalibrace fenologické fáze zralosti ječmene jarního lépe. Studie Rötter et al. (2012) vykazuje shodu s pozorováním s rozdílem až + 12 dní.

Ve studii Eitzinger et al. (2003) se rozdíl mezi simulací modelu WOFOST a pozorováním pohyboval v rozmezí ± 2 dny, simulace DSSATu v rozmezí - 4 až + 3 dny. U pšenice ozimé simulace WOFOSTu předběhla zralost o den, simulace DSSATu ji stanovila v rozmezí - 4 až - 1 den.

5.1.3 Kalibrace s využitím výnosových dat

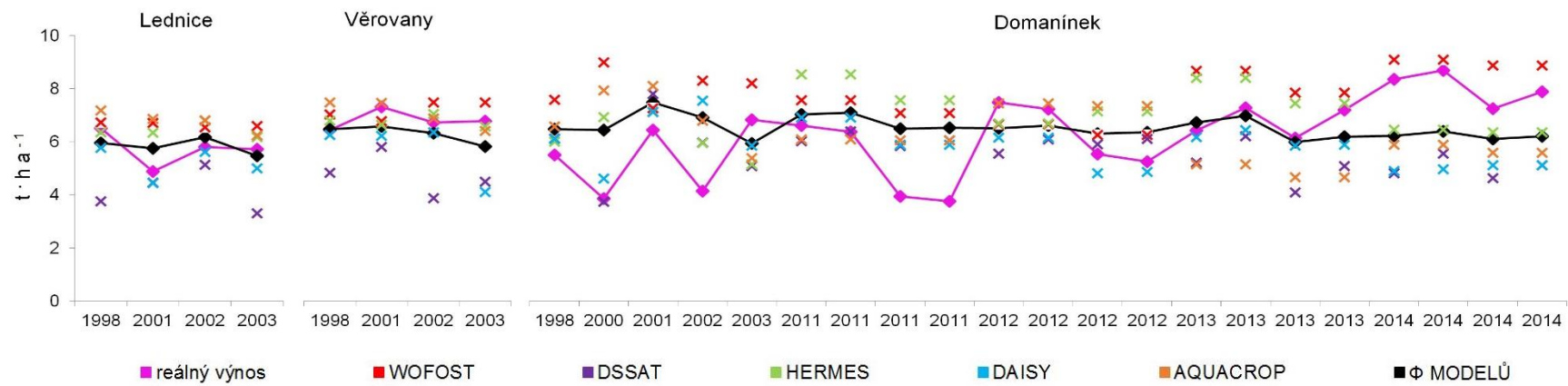
Při kalibraci modelů byly porovnány reálné výnosy zrna s výnosy zrna simulovanými modely. Simulace růstových modelů poskytují hodnoty výnosů zrna v podobě sušiny. Reálně zaznamenané výnosy zrna byly také přepočítány na sušinu. Výsledky kalibrace s využitím výnosových dat jsou znázorněny pomocí grafu na obr. 26.



Obr. 26: Grafické znázornění výsledků kalibrace reálných a modely simulovaných výnosů zrna.

V grafu na obr. 26 je u jednotlivých simulací výnosů zrna patrná vzájemná variabilita. Největší rozsah hodnot byl vykázan u reálného výnosu, nejmenší pak u Φ MODELŮ. Výnos zrna nadhodnotila simulace WOFOSTu, simulace DSSATu reálný výnos naopak mírně podhodnotila. S pozorováním by byl v tomto případě v nejlepší shodě Φ MODELŮ, který ale vykazuje oproti reálným výsledkům menší rozsah.

Reálné a simulované výnosy zrna jsou dále graficky znázorněny na obr. 27.



Obr. 27: Kalibrace růstových modelů - srovnání reálných a simulovaných výnosů zrna ječmene jarního pomocí spojnicového grafu.

Z grafu na obr. 27 vyplývá, že ačkoli žádný z modelů nedokáže dokonale odhadnout výnos na všech lokalitách a ve všech letech, výsledek v podobě výstupu Φ MODELŮ vychází velmi dobře. Při kalibraci výnos zrna nejvíce podhodnotila simulace DSSATu, která proti realitě v průměru snížila výnos zrna o $1,00 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Simulace růstového modelu WOFOST naopak výnos zrna v průměru o $1,28 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ nadhodnotila. Nejblíže realitě byla simulace AQUACROPU, která reálný výnos nadhodnotila v průměru jen o $0,15 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Φ MODELŮ by výnos zrna nadhodnotil o $0,11 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Výsledek Φ MODELŮ se tedy v tomto případě blíží reálnému výnosu nejvíce.

Ve studii Rötter et al. (2012) byly v simulaci výnosu zrna podle statistické analýzy nejlépe hodnoceny simulace modelů HERMES, WOFOST a DAISY. Pro tyto simulace byly hodnoty RMSE nejnižší a hodnoty IA naopak nejvyšší. Podle zmíněných statistických ukazatelů RMSE a IA se i v této disertační práci umístily modely HERMES, WOFOST a DAISY mezi nejlepšími. První byla simulace růstového modelu DAISY s hodnotou RMSE 1,60 a IA 0,79. Na druhém místě se umístila simulace modelu HERMES s hodnotami RMSE 1,66 a IA 0,75. Na třetí místě se umístily simulace modelů AQUACROP a WOFOST s hodnotami RMSE 1,75 a 1,81 a stejným IA 0,73. Rötter et al. (2012) dále uvedli, že simulace modelu WOFOST výnosy zrna systematicky nadhodnocovaly a naopak simulace modelu DAISY výnosy zrna systematicky podhodnocovaly. Stejně tak tomu bylo i v této disertační práci. Růstový model WOFOST výnosy zrna systematicky nadhodnocoval a to v průměru o $1,28 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Model DAISY výnosy zrna v průměru o $0,52 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ podhodnotil.

Růstový model HERMES byl kalibrován pro podmínky České republiky a aplikován v rámci simulace osevního postupu ve studii Hlavinka et al. (2014). Pomocí HERMESu byly simulovány výnosy zrna na velmi dobré úrovni s IA v rozmezí 0,82 – 0,96. V této disertační práci bylo průměrné IA modelu HERMES u kalibrace nižší - 0,75, u validace naopak dosáhlo hodnoty vyšší, a to 0,91.

Růstový model DAISY byl kalibrován a validován pro ječmen jarní v podmínkách Slovenské republiky ve studii Takáč a Šiška (2011). Rozdíly mezi reálnými výnosy a simulacemi DAISY se pohybovaly v rozmezí od $0,10 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ do $2,20 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Tyto výsledky jsou srovnatelné s výsledky simulací DAISY pro výnos zrna ječmene jarního v této disertační práci (obr. 27).

Ve studii Eitzinger et al. (2003) byly hodnoceny výsledky simulací výnosů zrna modelu WOFOST a DSSATu z let 2000 a 2001. Výstupy simulací DSSATu byly autory označeny na rozdíl od výstupů simulací WOFOSTu za dobré. V této disertační práci by se simulace výnosů zrna u ječmene jarního pomocí WOFOSTu a DSSATu daly považovat za podobné. Hlavní rozdíl je v tom, že ve studii Eitzinger et al. (2003) růstový model WOFOST výnosy spíše podhodnotil, simulace DSSATu je naopak nadhodnotily. V této disertační práci tomu bylo naopak.

Růstový model AQUACROP jako jediný z vybraných modelů nebyl zahrnut ve dvou hlavních mezimodelových evropských studiích Palosua et al. (2011) a Rötter et al. (2012). AQUACROP je používán pro simulace hlavně v suchých oblastech s nedostatkem srážek a potřebou umělého zavlažování. Studií, které využívají jeho simulací, je mnoho. Jsou však převážně z úplně odlišného půdně klimatického prostředí a simulace v nich popisované většinou probíhají s použitím závlah.

Model AQUACROP byl kalibrován pro ječmen jarní např. ve studii Saab et al. (2014). Studie zpracovávala výsledky z let 2006 – 2008 v podmínkách jižní Itálie. IA pro výnos zrna se po kalibraci AQUACROPu pohyboval v rozmezí 0,76 – 0,80, což je výsledek srovnatelný s výsledkem v této disertační práci, kdy bylo průměrné IA výnosu zrna u kalibrace 0,73 a u validace 0,86. Simulace AQUACROPu ve studii Saab et al. (2014) ve dvou případech výnos zrna nadhodnotily, v jednom byl podhodnocen. Srovnání výnosové bilance v této disertační práci vychází stejně – i zde byly výnosy zrna zhruba ve dvou třetinách případů nadhodnoceny.

V další studii, která se zabývala kalibrací a validací modelu AQUACROP pro ječmen jarní na různých místech v Etiopii, Itálii, Sýrii a USA (Abrha et al. (2012) vyšlo RMSE pro výnos zrna velmi přijatelně, a to 0,34 t·ha⁻¹, což je o 1,41t·ha⁻¹ méně, než vychází v této disertační práci.

V obdobné studii s ječmenem jarním (Araya et al., 2010) vyšla simulace výnosu zrna modelu AQUACRP pro IA ve velmi širokém rozmezí, a to 0,50 – 0,95. Výsledky IA (0,73 a 0,86) v této disertační práci zhruba odpovídá průměrné výsledné hodnotě studie Araya et al. (2010). RMSE bylo ve studii Araya et al. (2010) 0,07 – 0,27 t·ha⁻¹. RMSE v této disertační práci vyšlo vyšší, 1,75 t·ha⁻¹.

Pro ječmen jarní byl na základě naměřených a pozorovaných dat z let 2005-2007 kalibrován růstový model AQUACROP i v iránské studii Tavakoliho et al. (2015). Při porovnání dat zde vychází RMSE pro výnos zrna 0,09 t·ha⁻¹ a IA 1,00. Výbornou

přesnost simulace modelu v této lokalitě potvrdila i studie Andarziana et al. (2011), kdy se výnos zrna pohyboval v rozmezí 4,40 – 6,30 t·ha⁻¹ s RMSE 0,27 t·ha⁻¹ a s IA 0,97.

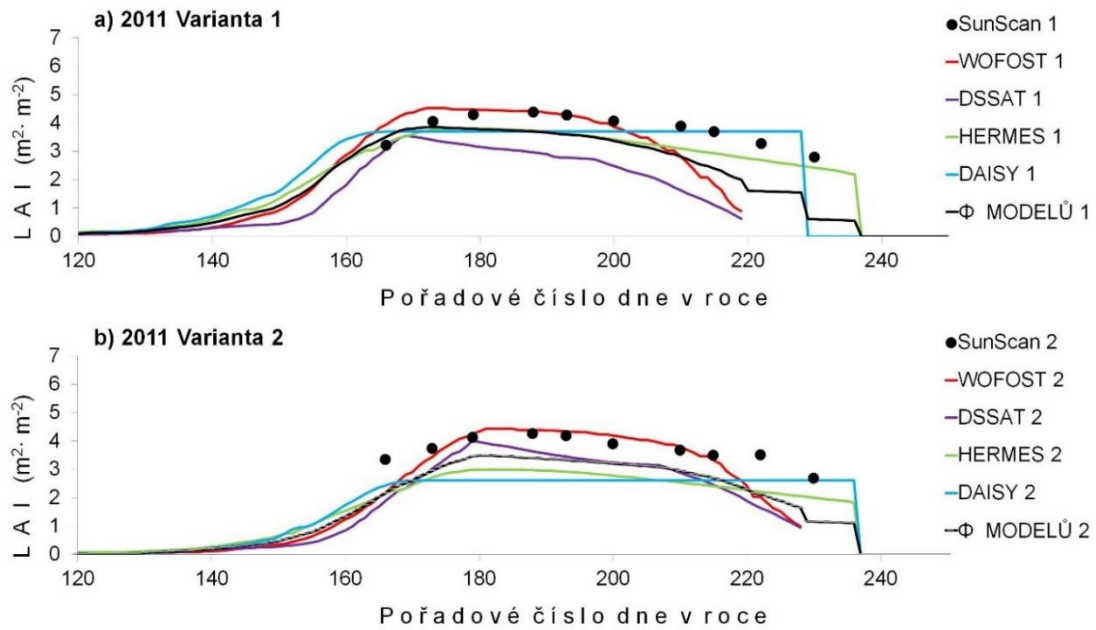
Ve studii Wanga et al. (2013) zabývající se schopností modelu AQUACROP simulovat výnos zrna pšenice ozimé za normálních podmínek a podmínek s omezeným přístupem vody v letech 2006 – 2011 dosáhly simulace výnosu zrna také dobré shody s pozorováním. Simulovaný výnos zrna se pohyboval v rozmezí 4,67 – 8,32 t·ha⁻¹, reálný výnos zrna pak v podobném rozmezí, a to 4,40 – 8,99 t·ha⁻¹.

5.1.4 Kalibrace pro odhad LAI

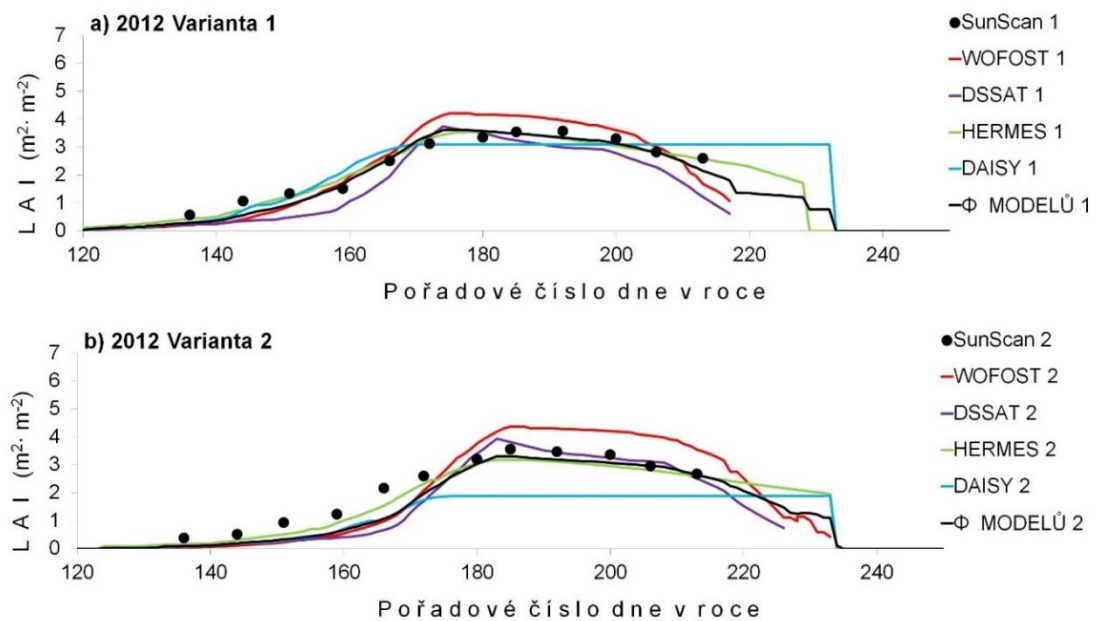
LAI je jedním z hlavních faktorů ovlivňující tvorbu výnosu zrna (Ritchie, 1972). Je závislé na rychlosti růstu listů. Vývoj LAI je řízen teplotou prostředí plodiny, srážkovým úhrnem a intenzitou denního chodu radiace. Tento parametr v modelu upravujeme s kalibrací fenologie pro dané prostředí a určitou odrůdu. Se zvyšující se hodnotou LAI dochází ke zvyšování výnosu většiny plodin, avšak jen do určité hranice, která je optimální pro danou odrůdu, strukturu porostu, ekologické podmínky a ročník (Potopová et al., 2014).

Většina modelů simuluje dynamiku listové plochy právě v závislosti na fenologické fázi vývoje plodiny (např. teplota a světlo expanzi listů v různých fázích rozdílně ovlivňují) (Spitters, 1990).

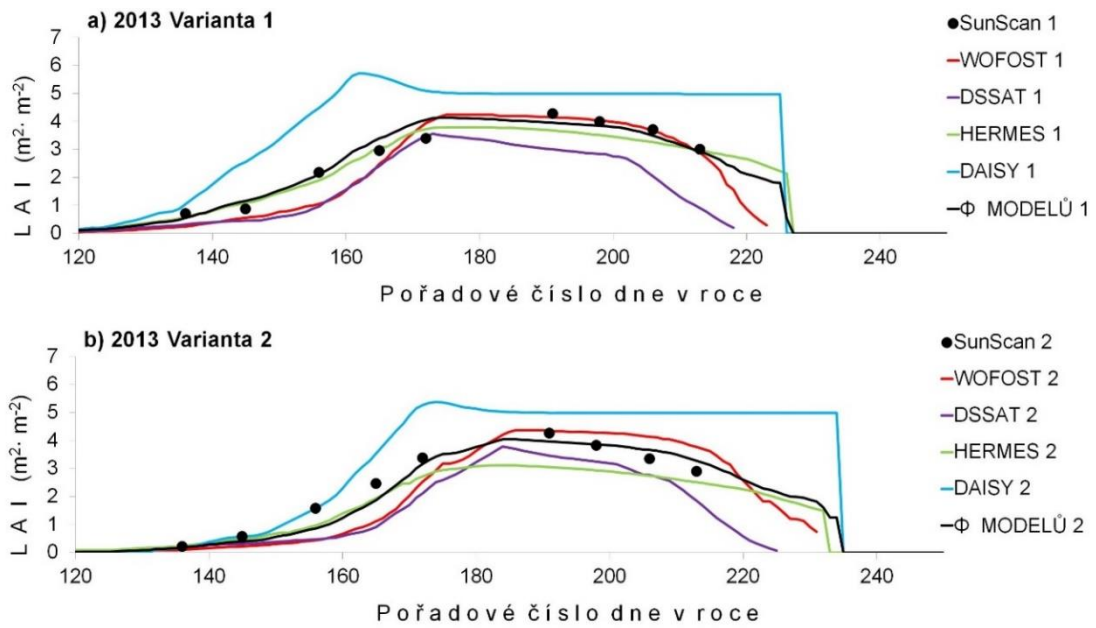
WOFOST, DSSAT, HERMES a DAISY byly kalibrovány pomocí dat naměřených SunScanem z let 2011 – 2014 z odrůdových polních pokusů s ječmenem jarním v Domanínku. Výsledky kalibrace jsou znázorněny pomocí grafů na obr. 28 – 31. Statistické porovnání pomocí krabicového grafu na obr. 32.



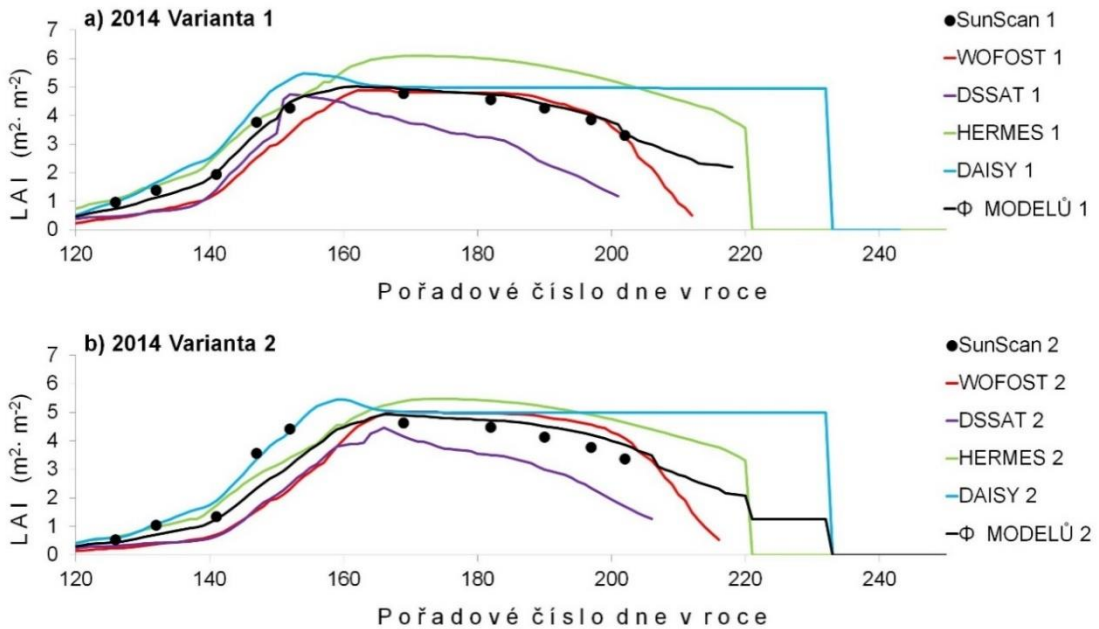
Obr. 28: Grafické znázornění naměřených a simulovaných hodnot indexu listové plochy (LAI) u ječmene jarního pro stanici Domanínek v roce 2011 variantu 1 a) a variantu 2 b).



Obr. 29: Grafické znázornění naměřených a simulovaných hodnot indexu listové plochy (LAI) u ječmene jarního pro stanici Domanínek v roce 2012 variantu 1 a) a variantu 2 b).



Obr. 30: Grafické znázornění naměřených a simulovaných hodnot indexu listové plochy (LAI) u ječmene jarního pro stanici Domanínek v roce 2013 variantu 1 a) a variantu 2 b).



Obr. 31: Grafické znázornění naměřených a simulovaných hodnot indexu listové plochy (LAI) u ječmene jarního pro stanici Domanínek v roce 2014 variantu 1 a) a variantu 2 b).

Jak je patrné z grafů na obr. 28, během celé vegetační sezóny 2011 byly u většiny modelů simulované hodnoty LAI nižší než hodnoty naměřené. Měřeným hodnotám se nejvíce přiblížila simulace růstového modelu WOFOST, jehož maximální simulovaná hodnota dosáhla $4,53 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ u varianty 1 a $4,44 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ u varianty 2. SunScanem bylo tento rok naměřeno maximum $4,37 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ pro variantu 1 a $4,13 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ pro variantu 2.

Přístroj SunScan měří nejen listovou plochu, ale plochu celé nadzemní části rostliny, tedy i stonek a klas (obr. 10 viz kapitola 4.4.1.1). Stejně tak bere hodnotu LAI i model DAISY. Všechny ostatní modely, které simulují LAI, simulují LAI pouze jako plochu listu. Tím by se částečně dalo vysvětlit jejich mírné podhodnocování oproti měření. V roce 2011 navíc porost ječmene jarního po bouřce polehl (hlavně varianta 2, u které byla aplikována zvýšená dávka hnojení N). Naměřené hodnoty z vegetační sezóny 2011 tak mohou být touto skutečností ovlivněny.

Vegetační sezóna 2012 je z hlediska porovnání naměřených a simulovaných hodnot vyrovnanější než v předešlém roce. Simulace WOFOSTu opět naměřená data nadhodnotily, hlavně v období, kdy LAI dosáhlo maximálních hodnot (varianta 1 WOFOST $4,21 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ x měření $3,57 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$, varianta 2 WOFOST $4,37 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ x měření $3,56 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$). Jak je patrné z grafů na obr. 29, v roce 2012 nejlépe kopírují naměřené hodnoty křivky simulované modelem HERMES a poté Φ MODELŮ. Nejméně přesné byly simulace modelu DAISY, které měření systematicky podhodnotily.

V roce 2013 na rozdíl od let 2011 a 2012 simulace DAISY naopak naměřené hodnoty nadhodnotily. Dosáhly maximálních hodnot $5,73 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ a $5,38 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$. V porovnání s naměřenými maximálními hodnotami, které byly pro první variantu $4,28 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ a druhou variantu $4,36 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$, je to rozdíl téměř o $1,5 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$. Měření nejbliže by pro tento rok opět byl Φ MODELŮ (obr. 30).

Rok 2014 je ve srovnání se všemi předchozími sezónami v porovnání simulací všech modelů nejvíce nevyrovnaným. Nejvýrazněji měření podhodnotila simulace DSSATu, která vývoj LAI od začátku i opozdila a i zralost simulovala dříve, než byla ve skutečnosti. Všechny ostatní modely začínají v polovině zájmového období měřené hodnoty nadhodnocovat. Tento trend trvá až do konce sezóny.

Z grafů na obr. 28 – 31 je patrné, že všechny růstové modely dobře simulují časovou rozdílnost vývoje LAI u varianty 1 a 2, které se lišily termínem setí (varianta 1 = běžný agronomický termín setí, varianta 2 = termín setí oproti

agronomicky správnému (tj. 1. možnému) cca o 14 dní opožděný) (tab. 5 viz kapitola 4.4.2.1). Stejně tak dobře simulovanými křivkami vystihují reálný vývoj LAI.

Nejvíce se od reality odklonily simulace DSSATu a DAISY. Simulace modelu DAISY první dva roky měření podhodnotila a další dva roky naopak nadhodnotila. V letech, kdy model dynamiku LAI nadhodnotil, docházelo v jeho simulaci oproti měření i k dřívějšímu nárůstu listové plochy. Tímto jevem by se dalo částečně vysvětlit podhodnocení výnosu zrna modelem v těchto letech (obr. 27). DAISY oproti realitě mnohem dříve poskytuje více biomasy na tvorbu stonků a listů. To může vést k většímu čerpání vody (obr. 33 c) a d), způsobit časnější nástup vodního stresu, snížit růst a s tím spojený výnos zrna. V ostatních pozorovaných proměnných však DAISY patří svými výstupy mezi nejlepší modely (Paluso et al., 2011; Rötter et al., 2012).

Výstupy DSSATu jsou v pořadí druhé, které se svými simulacemi vývoji LAI přiblížily nejméně. Měření podhodnocovaly a ukončovaly oproti realitě dříve. Tato skutečnost souvisí i s tím, že simulace DSSATu předbíhaly fenologickou fázi zralosti a podhodnotily výnos zrna (obr. 25 a 27).

Ve studii Palosuo et al. (2011) byly porovnány křivky LAI simulované růstovými modely. DAISY zde dosáhla maximální hodnoty LAI $5 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$. Ve studii Palosuo et al. (2011) je simulace DAISY v porovnání se simulacemi ostatních modelů, používaných i v rámci této disertační práce, největší dosažená simulovaná hodnota. Nejmenší hodnoty ve studii Palosuo et al. (2011) naopak dosáhla simulace DSSATu, a to hodnoty kolem $1,5 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$. Rozdíl mezi těmito dvěma modely je v období kolem termínu s nejvyšším LAI až $3,5 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$. Naměřené hodnoty však ve studii Palosuo et al. (2011) chybí. Nemůžeme tedy stanovit, který z porovnávaných modelů se v tomto případě blíží skutečnosti nejvíce. Křivka LAI pro DSSAT ve studii Palosuo et al. (2011), stejně jako v této disertační práci, také klesá ještě před dosažením zralosti porostu. Simulace DSSATu podhodnotila LAI oproti měření i ve studii Inese (2001).

Většina modelů simuluje dynamiku LAI v závislosti na fenologii. Je tedy ovlivněna hlavně teplotou prostředí v různých fázích vývoje plodiny (Spitters, 1990). Výpočty LAI jsou v DSSATu v tomto směru jednodušší. Jsou založené na vzniku specifické listové plochy a dělení biomasy podle daných faktorů anebo funkcí s exogenně definovaným indexem maximální listové plochy LAI (Ewert, 2004; Paluso et al., 2011).

Křivka vývoje a velikosti LAI je sice jedním z výstupů růstových modelů, ale je to parametr, který je často simulován nedokonale. Modely se zde ve výsledcích i po jejich kalibraci rozcházejí (Palosuo et al., 2011). Růstové modely bývají úspěšně používány pro odhad výnosu v lokálním měřítku díky tomu, že výnosy z předchozích let jsou vývojářům známe. Naměřené hodnoty LAI, které by prokazatelně mapovaly delší časové období pro jednotlivé plodiny, však chybí. V posledních letech je snaha tuto skutečnost změnit. Díky snímkům porostu z dálkového průzkumu Země se parametr LAI postupně pomocí optimalizace algoritmu upravuje, aby lépe odpovídal skutečnosti (Ma, 2011). Růstový model AQUACROP místo indexu listové plochy simuluje procentuální pokryvnost porostu, která je z leteckých snímků, oproti hodnotám LAI, určována snadněji.

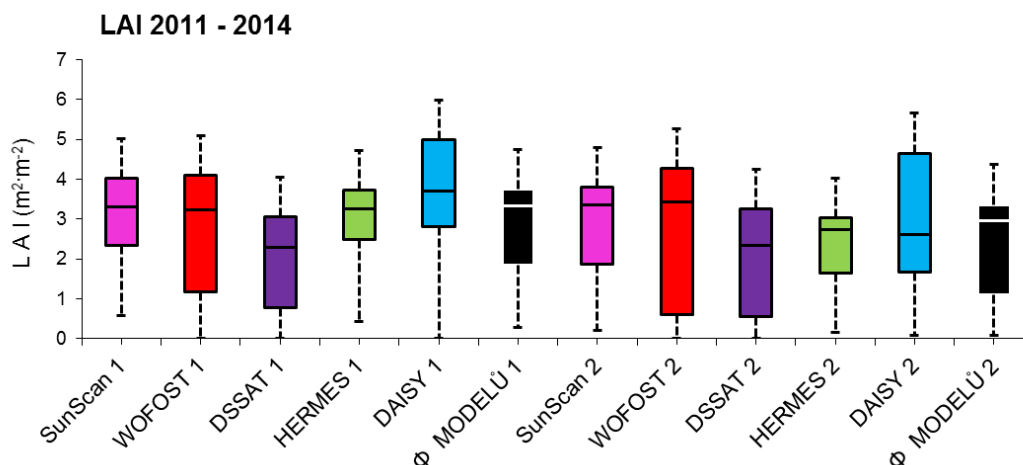
Pro statistické porovnání naměřených a simulovaných hodnot LAI byl kromě ukazatelů MBE, RMSE a IA zvolen Shapirov – Wilkovův test normality. Podle Shapirova – Wilkova testu normality nelze považovat všechny hodnoty rozdílu měřeného a simulovaného LAI za výběr z normálního rozdělení. Proto byl pro další statistické zhodnocení rozdílů mezi naměřenými a simulovanými hodnotami LAI tedy použit neparametrický Wilxonův párový test. Výsledky statistického porovnání naměřeným a simulovaných hodnot LAI z let 2011 – 2014 jsou uvedeny v tab. 7.

Tab. 7: Statistické zhodnocení kalibrace indexu listové plochy (LAI).

2011 – 2014, LAI – kalibrace Wilxonův párový test, hladina významnosti $\alpha=0,05$						
<i>SunScan x</i>	<i>Varianta 1</i>			<i>Varianta 2</i>		
<i>WOFOST</i>	$p = 0,00075$			$p = 0,00012$		
<i>DSSAT</i>	$p = 0,02424$			$p = 0,00306$		
<i>HERMES</i>	$p = 0,09615$			$p = 0,01509$		
<i>DAISY</i>	$p = 0,00540$			$p = 0,00187$		
<i>Φ MODELŮ</i>	$p = 0,01159$			$p = 0,01842$		
<i>SunScan x</i>	<i>MBE 1</i>	<i>RMSE 1</i>	<i>IA 1</i>	<i>MBE 2</i>	<i>RMSE 2</i>	<i>IA 2</i>
<i>WOFOST</i>	-0,29	0,91	0,86	-0,19	0,93	0,81
<i>DSSAT</i>	-1,07	1,40	0,67	-0,81	1,04	0,76
<i>HERMES</i>	0,05	0,64	0,95	-0,38	0,79	0,90
<i>DAISY</i>	0,38	1,03	0,85	-0,22	1,07	0,80
<i>Φ MODELŮ</i>	-0,23	0,59	0,93	-0,40	0,66	0,90

Výsledky Wilcoxonova párového testu ukazují, že ve většině případů byl mezi naměřenými a simulovanými hodnotami zjištěn statisticky významný rozdíl (tab. 7). Výsledné hodnoty MBE, RMSE a IA byly použity k porovnání úspěšnosti jednotlivých modelů v kapitole 5.3.

Porovnání simulací modelů z naměřených a simulovaných hodnot LAI z let 2011 – 2014 je dále znázorněno krabicovým grafem na obr. 32.



Obr. 32: Grafické znázornění měřených a modely simulovaných hodnot indexu listové plochy (LAI) u kalibrace pomocí krabicových diagramů pro ječmen jarní a stanici Domanínek v letech 2011 - 2014.

Z grafu na obr. 32 je patrné, že simulace WOFOSTu, DSSATu a DAISY měly v průměru větší rozsah hodnot, než tomu bylo u měření. Simulace DAISY měření v průměru také nadhodnotily. Nejbližše naměřeným hodnotám byly simulace HERMESu a Φ MODELŮ.

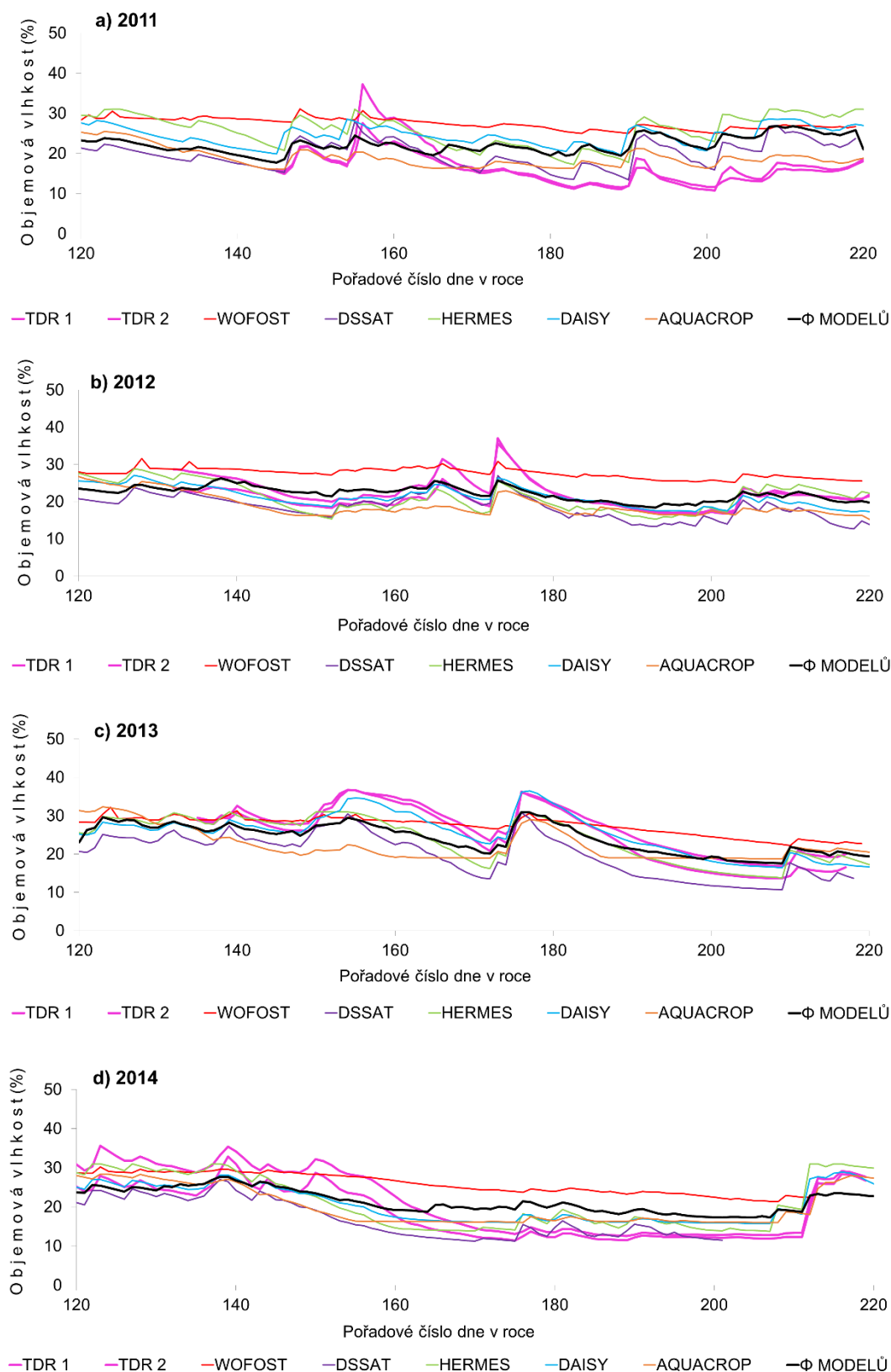
5.1.5 Kalibrace pro odhad půdní vlhkosti

Půdní voda je hlavním a určujícím zdrojem vody pro rostliny. Je trvalou a pro agroekosystémy velmi důležitou složkou. Množství vody je v půdě značně proměnlivé a závislé na meteorologických a pedologických faktorech (Honsová, 2008). Pro většinu fyzikálních a fyziologických procesů v systému půda-rostlina-atmosféra je půdní voda nepostradatelnou složkou (Eitzinger et al., 2003). Proměnlivá dostupnost vody v půdě pro rostlinu je jednou z hlavních příčin variability výnosů zrna. Proto je v práci s růstovými modely důležité co nejvíce snížit nejistotu simulovaných výstupů dynamiky půdní vody (Addiscot et al., 1995; Aggarwal, 1995).

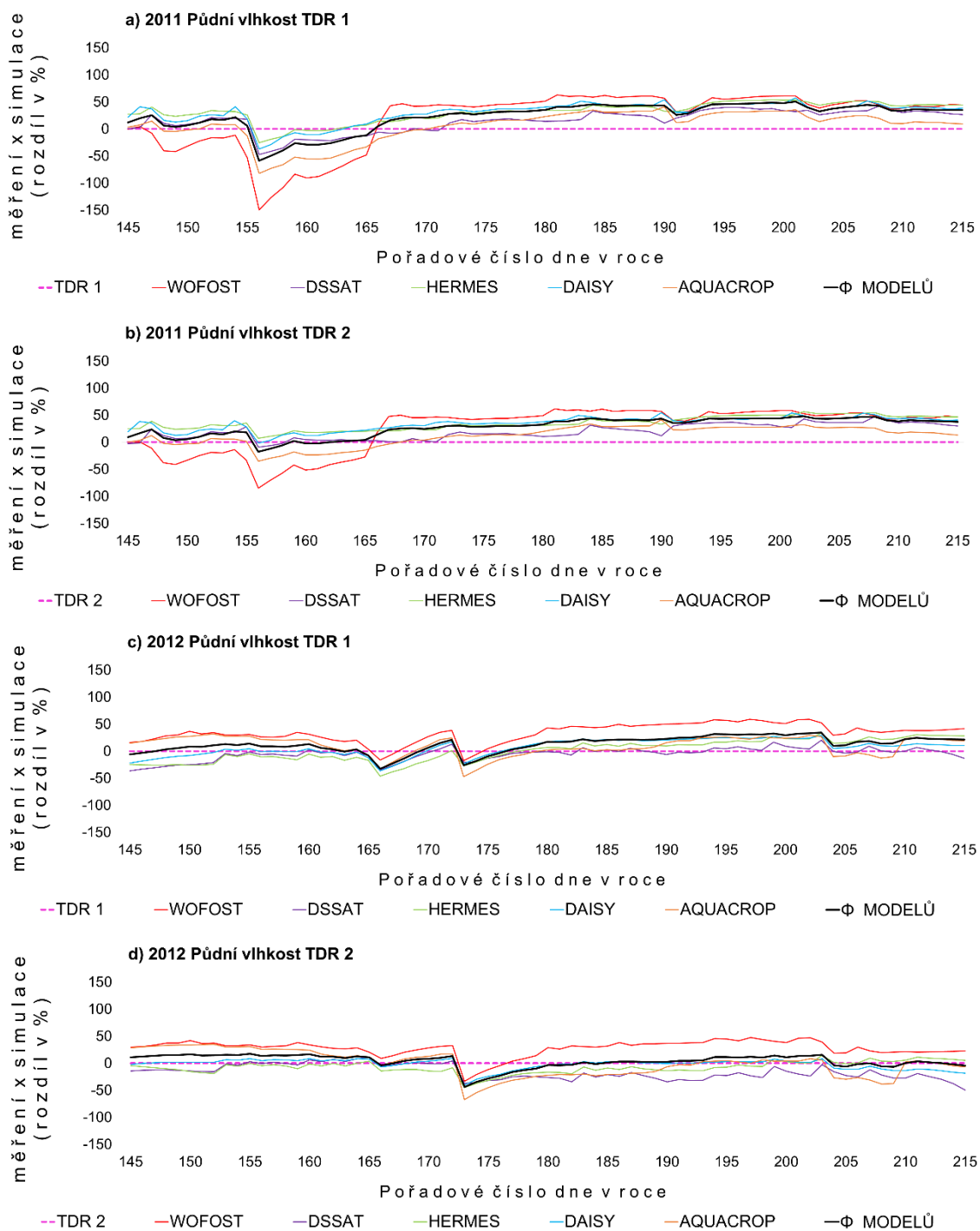
Dynamika vody v půdě byla v průběhu vegetačních sezón 2011 – 2014 v Domanínku měřena pomocí čidel TDR (0 – 30 cm), která jsou v dnešní době brána jako jedny z nejpřesnějších senzorů pro měření obsahu vody v půdě. Výsledky měření byly vyjádřeny v podobě průměrné objemové vlhkosti (podílu objemu vody z celkového objemu půdy (obj_%)). Měřené denní hodnoty byly počítány jako 24 hodinový průměr z hodnot ukládaných v desetiminutovém kroku. Hodnota průměrné desetiminutové vlhkosti půdy byla počítána z průměrných hodnot měřených každou minutu. Naměřené denní průměrné hodnoty půdní vlhkosti z hloubky 0 – 30 cm byly porovnány se simulacemi jednotlivých růstových modelů.

Na dynamiku vody v půdě má u kalibrace modelů největší vliv správné nastavení vstupního souboru s údaji o půdě. V průběhu let 2011 – 2014 bylo v Domanínku děláno pro zmapování půdních vlastností i pro účely kalibrace růstových modelů hned několik půdních sond, na jejichž základě byl vytvořen vstupní soubor s údaji o půdě, který charakterizuje půdní podmínky daného území.

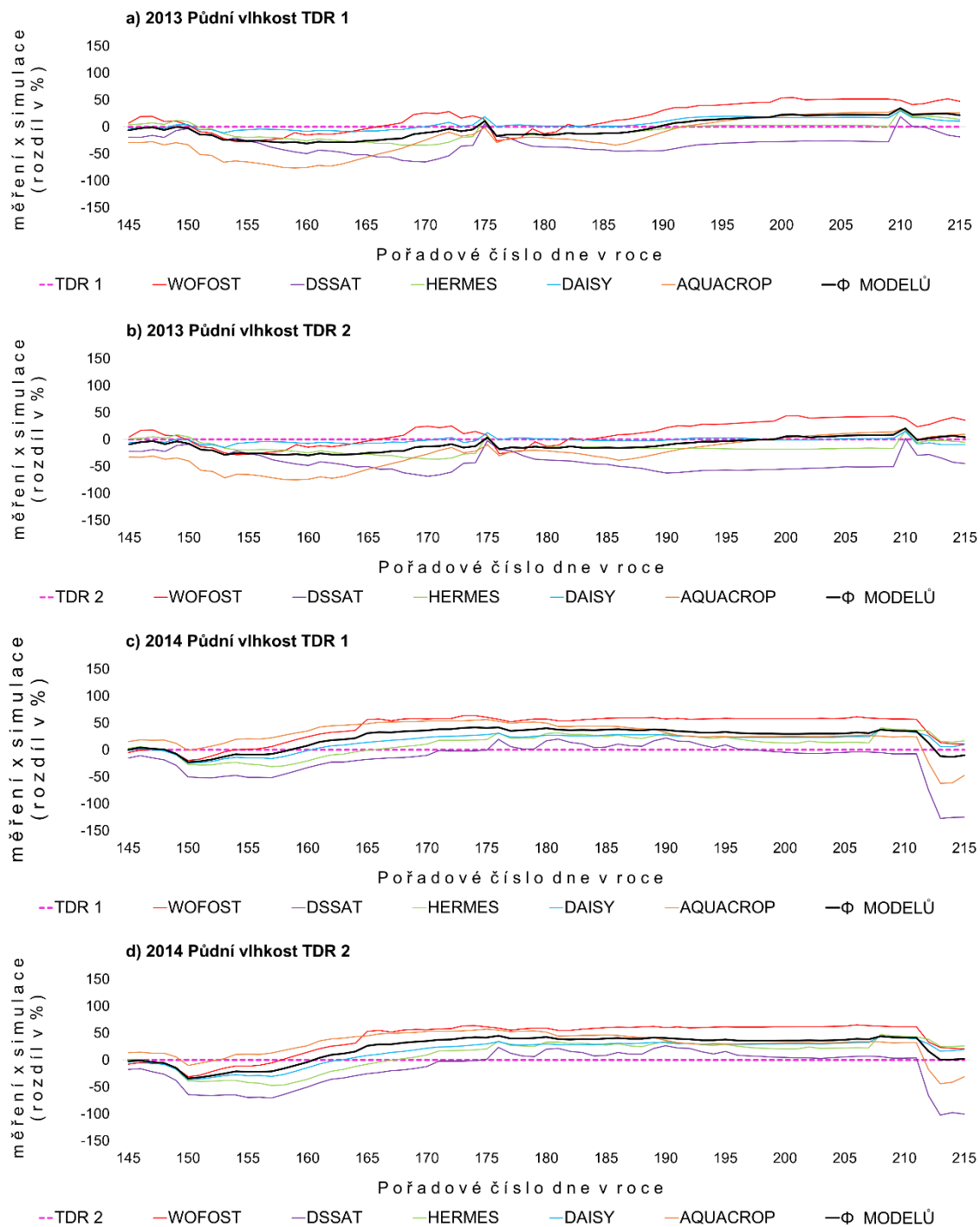
Výsledky kalibrace dynamiky půdní vody jsou znázorněny pomocí grafů na obr. 33. - 35.



Obr. 33: Kalibrace růstových modelů - srovnání měřené a simulované půdní vlhkosti z polních pokusů MENDELU v Domanínku s ječmenem jarním v roce 2011 a), 2012 b), 2013 c) a 2014 d).



Obr. 34: Kalibrace růstových modelů - srovnání pomocí % rozdílu měřené a simulované půdní vlhkosti z polních pokusů MENDELU v Domanínku s ječmenem jarním v roce 2011 a), b) a v roce 2013 c), d).



Obr. 35: Kalibrace růstových modelů - srovnání pomocí % rozdílu měřené a simulované půdní vlhkosti z polních pokusů MENDELU v Domanínku s ječmenem jarním v roce 2012 a), b) a v roce 2014 c), d).

Z grafů na obr. 33 je patrné, že křivky simulací všech růstových modelů relativně uspokojivě zaznamenaly dynamiku půdní vody změřenou senzory TDR v průběhu vegetačních sezón 2011 – 2014. Zároveň všechny modely správně zaznamenaly výskyty srážek. Obecně platí, že předpovídané hodnoty všech modelů měly podobný průběh a žádný výrazně nepředčil ostatní (obr. 33). Simulace růstového modelu WOFOST půdní vlhkost ve všech letech nadhodnotily. To by mohlo být vysvětleno přístupem k výpočtu vodní bilance, který je ze všech modelů použitých v této disertační práci nejjednodušší (viz kapitola 4.1.3).

Jediným rokem, kdy všechny růstové modely obsah vody v půdě nadhodnotily, je rok 2011 (obr. 33 a). Tento rok je měření nejblíže simulace růstového modelu AQUACROP. Z grafů na obr. 28 (viz kapitola 5.1.4) je pro rok 2011 také patrné modelové podhodnocení LAI. Větší obsah vody v půdě by se tedy dal částečně vysvětlit tím, že tento rok téměř všechny modely simulovaly menší objem nadzemní biomasy, což by mohlo vysvětlovat menší čerpání půdní vody rostlinou. Nedá se však říct, že by tento rok modely v důsledku simulace vyšší půdní vláhy či menšímu LAI simulovaly menší či větší výnos zrna (obr. 27 viz kapitola 5.1.3).

Nejvyrovnanějším rokem z hlediska porovnání simulovaných a měřených hodnot půdní vody (obr. 33 b) a LAI (obr. 29 viz kapitola 5.1.4) byl rok 2012.

Simulace u kalibrace půdní vlhkosti z let 2011 - 2014 byly porovnány s měřením statistickými ukazateli uvedenými v tab. 8. Stejně, jako v případě statistického porovnání měřených a simulovaných hodnot LAI (viz kapitola 5.1.4), byl i zde v první fázi použit Shapirov – Wilkův testu normality a následně Wilcoxonův párový test. Podle statistického vyhodnocení Shapirova – Wilkova testu normality ani v případě rozdílu měřených a simulovaných hodnot půdní vlhkosti nelze považovat hodnoty za výběr z normálního rozdělení. Podle Wilcoxonova párového testu nevyšla na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ shoda ani v jediném případě. Stejně tak tomu bylo u modelu WOFOST a DSSATu ve studii Eitzinger et al. (2003), kde byly pomocí párového t-testu hodnoty měřené čidly TDR porovnány se simulacemi modelů v šesti řadách.

Dalšími statistickými ukazateli použitými k porovnání měřených a simulovaných řad denních hodnot vodní bilance byly MBE, RMSE a IA, jejichž hodnoty dávají oproti párovému Wilcoxonovu párovému testu detailnější obraz o jednotlivých simulacích a které byly také využity v kapitole 5.3 k porovnání úspěšnosti jednotlivých modelů.

Tab. 8: Statistické zhodnocení kalibrace půdní vlhkosti z let 2011 – 2014. Porovnání hodnot naměřených čidly TDR 1 a TDR 2 a hodnot simulovaných jednotlivými růstovými modely.

PŮDNÍ VLHKOST 2011 -2014								
Statistický ukazatel	TDR1	TDR2	WO	DS	HE	DA	AQ	Φ
Průměr (obj_%)	20,22	20,53	26,98	18,24	22,33	22,60	21,67	22,35
Medián (obj_%)	18,36	20,07	28,70	17,85	21,70	22,47	19,65	21,95
Variační koeficient (obj_%)	32,28	29,49	18,14	26,92	24,72	20,27	22,05	13,00
Směrodatná odchylka (obj_%)	6,86	6,47	4,84	4,79	5,52	4,59	4,76	2,91
Min (obj_%)	10,79	10,66	12,40	10,68	13,73	15,76	16,03	17,28
Max (obj_%)	37,21	37,01	32,50	30,77	31,00	36,45	33,24	30,96
Stupně volnosti	346	346	346	346	346	346	346	346
MBE 1 (%)	x	x	6,71	-1,98	2,12	2,37	1,46	2,12
MBE 2 (%)	x	x	6,39	-2,29	1,81	2,06	1,16	1,81
RMSE 1 (%)	x	x	11,57	5,31	5,73	4,99	6,57	5,39
RMSE 2 (%)	x	x	10,72	5,62	5,94	5,03	6,51	5,16
IA 1	x	x	0,76	0,95	0,94	0,95	0,92	0,95
IA 2	x	x	0,79	0,94	0,93	0,95	0,92	0,95
Hladina významnosti $\alpha=0,05$								
Wilcoxonův párový test TDR 1, $p=$			0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Wilcoxonův párový test TDR 2, $p=$			0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Výsledky porovnání měřených a simulovaných hodnot zprůměrovaných z let 2011 – 2014 znázorněných grafem na obr. 36 a v tab. 8 ukazují, že nejpřesněji měřené hodnoty půdní vlhkosti dávají simulace v porovnání téměř stejně u modelů DAISY, Φ MODELŮ a DSSATu, následuje simulace modelu HERMES a AQUACROPU a na posledním místě simulace WOFOSTu. Ukazatele IA a RMSE (%) vychází v rozmezí 0,76 – 0,95 a 5,03 – 11,57. Statistické výsledky kalibrace půdní vlhkosti z let 2011 – 2014 by se daly porovnat s výsledky studií uvedených níže.

Hodnot RMSE pro půdní vlhkost v rozmezí 9,80 – 16,60 % dosáhla práce Xevi et al., (1996) s DSSATem a simulací růstu kukuřice.

V další studii s DSSATem (Garrisona et al., 1999) simulace dosáhla hodnot RMSE pro půdní vlhkost o poznání nižších, a to v rozmezí 3,00 – 5,40 %. Variabilitu simulací autoři studie Garrisona et al. (1999) vysvětlili tím, že jednotlivé simulace probíhaly v rozdílných hloubkách a v jiných půdních typech.

Studie Abrha et al. (2012) porovnávala simulace půdní vláhy modelem AQUACROP v rámci mnoha zájmových oblastí (Etiopii, Itálii, Sýrii a USA). Průměrné RMSE pro půdní vlhkost vyšlo vyšší než v této disertační práci, kde se v rámci validace a kalibrace pohybovalo v rozmezí 5,51 % - 6,57 %, a to 13,05 %.

Ve studii Andarziana et al. (2011) při kalibraci AQUACROPu pro pšenici ozimou v Íránu byla kalibrace modelu pro půdní vlhkost s RMSE menším než 10% a IA v rozmezí 0,84 – 0,86 autory považována za velmi povedenou.

Obsah vody v půdě odhadla obstojně simulace modelu AQUACROP i ve studii Wang (2013), kde se IA pro půdní vlhkost pohyboval v rozmezí 0,68 – 0,98, podle varianty, která byla simulována (závlahy a bez závlah). V této disertační práci bylo IA pro půdní vlhkost u kalibrace i validace AQUACROPu 0,92.

Ve studii Rötter et al. (2012) byly porovnány křivky půdní vlhkosti simulované růstovými modely pro hloubku 0 – 90 cm s naměřenými hodnotami. Simulace WOFOSTu zde půdní vlhkost systematicky podhodnocovaly. Křivky simulací DSSATu, HERMESu i DAISY naopak výstižně naměřené hodnoty kopírovaly.

Ve studii Palosuo et al. (2011) byly také porovnány křivky půdní vlhkosti simulované růstovými modely pro hloubku 0 – 90 cm s naměřenými hodnotami. Z výsledků vyplývá, že nejvíce se naměřeným hodnotám blížily simulace WOFOSTu a HERMESu, naopak simulace DSSATu a DAISY půdní vlhkost nadhodnotily.

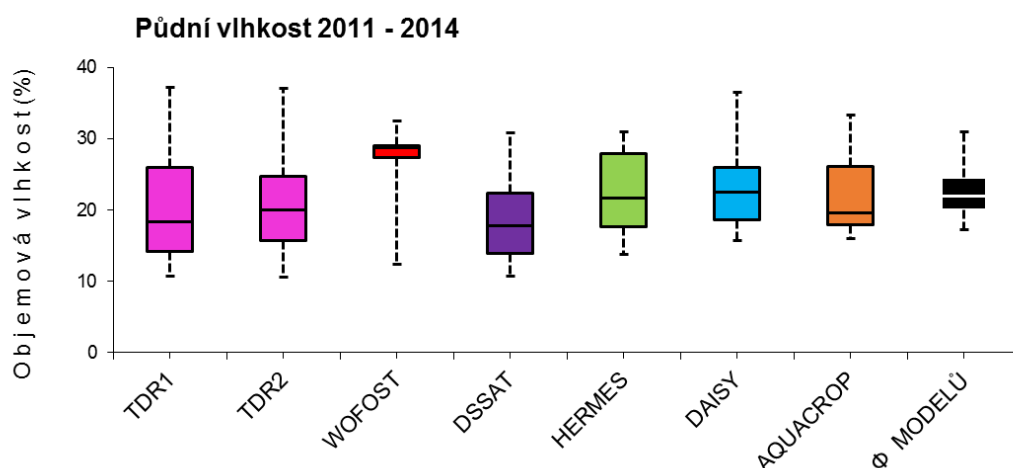
Ve studii Kröbel et al. (2010) simulace půdní vlhkosti modelem DAISY měření naopak podhodnotila.

Ve studii Eitzinger et al. (2003) byly porovnávány simulace dynamiky půdní vody modelu WOFOST a DSSATu s daty naměřenými čidly TDR z let 2000 a 2001 z území Rakouska a Moravy. Studie uvádí, že simulace DSSATu zde byla v porovnání se simulací WOFOSTu naměřeným datům, hlavně v povrchovém půdním horizontu (0 -30 cm), mnohem blíže. Stejně tak tomu bylo i v této disertační práci (obr. 33). RMSE obsahu půdní vody ve studii Eitzinger et al. (2003) u ječmene jarního se pohybovalo v rozmezí 0,71 % – 4,60 %. Pro pšenici ozimou to bylo 2,32 % – 6,77 %. V této disertační práci se RMSE pro půdní vlhkost u modelu WOFOST a DSSATu pohybovalo v rozmezí větším, a to 5,31 % pro DSSAT a 11,57 % pro WOFOST.

Do studie Eitzinger et al. (2003) bylo zařazeno pro účely porovnání modelových simulací půdní vody více typů půd, ze kterých měli autoři studie k dispozici naměřené hodnoty.

Z výsledků kalibrace růstových modelů pro půdní vlhkost se nedá jednoznačně určit, který z modelů je pro simulaci nejlepší. V této disertační práci pro oblast půdní vlhkosti vychází jako nejméně úspěšná simulace simulace modelu WOFOST (obr. 33). Výsledky simulací WOFOSTu neodrážely přesvědčivě realitu ani ve studii Van den Berg et al. (2002). Autoři studie Van den Berg et al. (2002) vysvětlili malou přesnost simulace půdní vlhkosti modelem WOFOST tím, že model bere půdu, pokud jde o obsah vody, jako homogenní vrstvu.

Porovnání měřené a simulované půdní vlhkosti v letech 2011 – 2014 je znázorněno pomocí grafu na obr. 36.



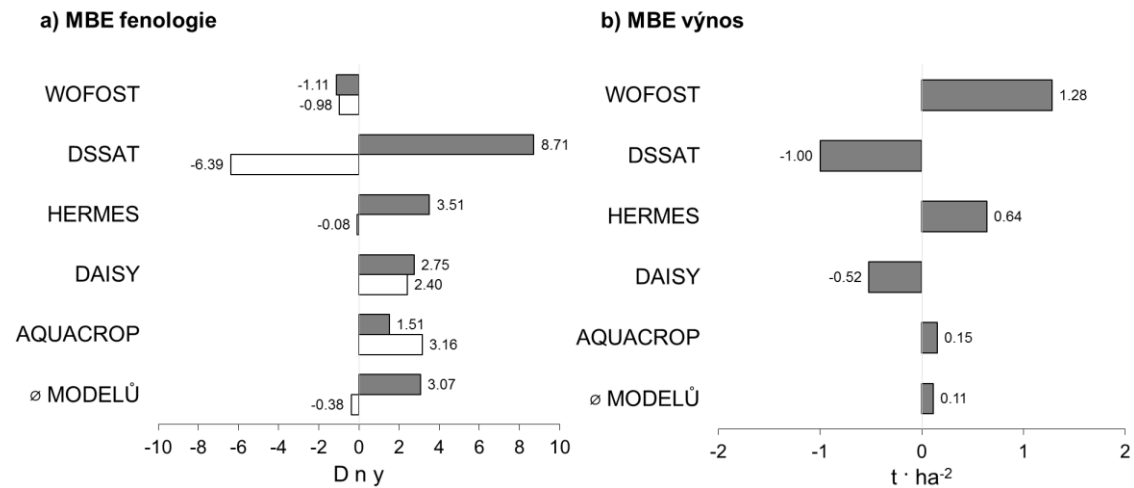
Obr. 36: Kalibrace - grafické znázornění měřené a simulované půdní vlhkosti z polních pokusů MENDELU v Domanínku s ječmenem jarním v letech 2011 – 2014.

Variabilita rozpětí půdní vlhkosti znázorněná grafem na obr. 36 vykazuje mezi měřením a simulacemi všech modelů – kromě WOFOSTu – dobrou shodu. Simulace WOFOSTu v průměru půdní vlhkost nadhodnotily. Mezi simulace, které nejlépe vystihly měření, patří simulace DAISY a Φ MODELŮ, která má oproti měření menší rozpětí.

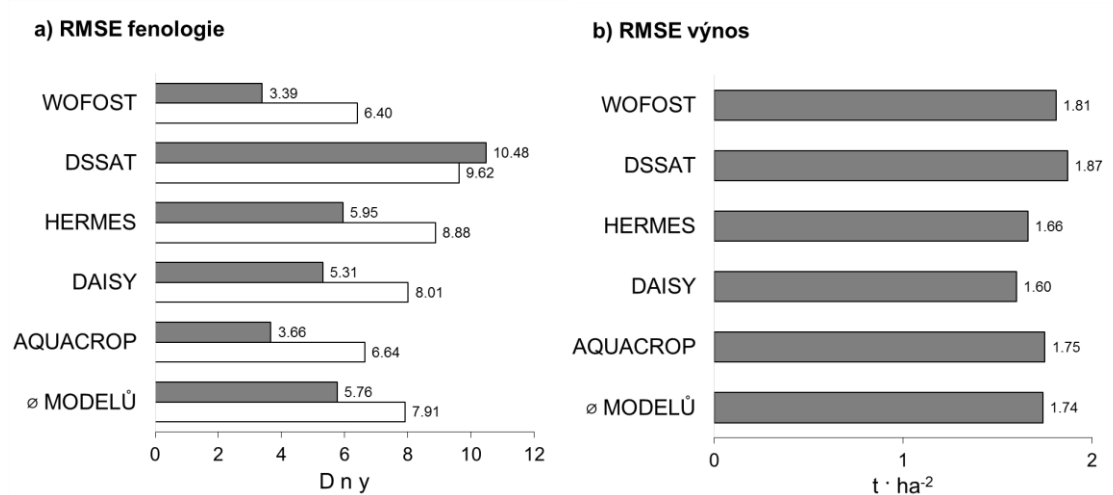
5.1.6 Porovnání simulací kalibrace podle statistických ukazatelů

Vyhodnocení vztahu mezi reálnými a simulovanými veličinami u kalibrace bylo provedeno pomocí statistických ukazatelů MBE, RMSE a IA. Výsledky porovnání fenologie a výnosu zrna jsou znázorněny pomocí grafů na obr. 37 - 39.

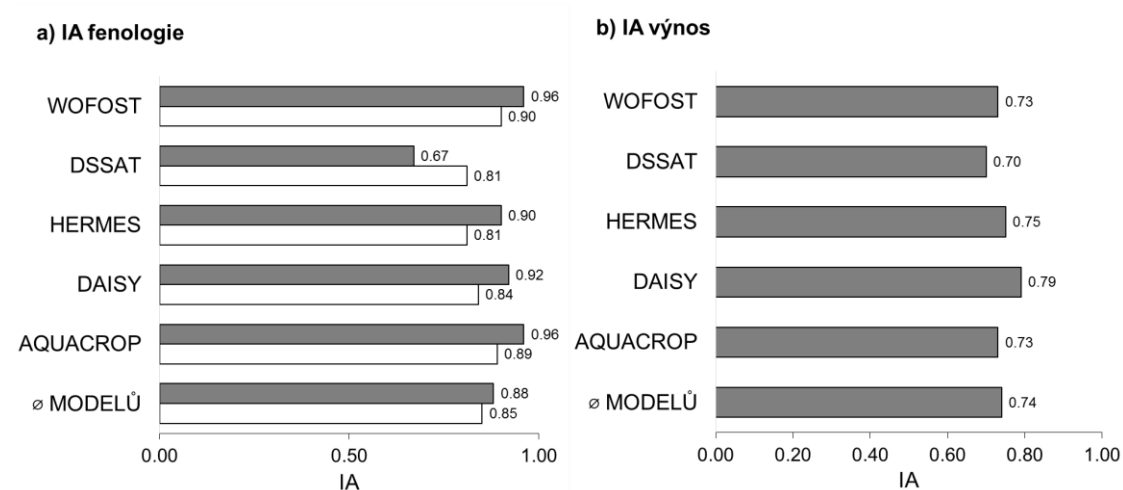
Výsledné hodnoty statistických ukazatelů MBE, RMSE a IA pro fenologii a výnos zrna byly použity v rámci hodnocení úspěšnosti jednotlivých modelů v kapitole 5.3.



Obr. 37: Grafické znázornění vyhodnocení kalibrace podle statistického ukazatele MBE pro fenologii a) a výnos zrna b).



Obr. 38: Grafické znázornění vyhodnocení kalibrace podle statistického ukazatele RMSE pro fenologii a) a výnos zrna b).



Obr. 39: Grafické znázornění vyhodnocení kalibrace podle statistického ukazatele IA pro fenologii a) a výnos zrna b).

5.2 Validace

Validace proběhla pomocí nezávislého souboru dat a ověřila přechodí krok - kalibraci modelů. Validací se ověřilo to, do jaké míry odpovídají výstupy modelů reálně zjištěným datům a jaká je jejich schopnost reprezentovat daný systém.

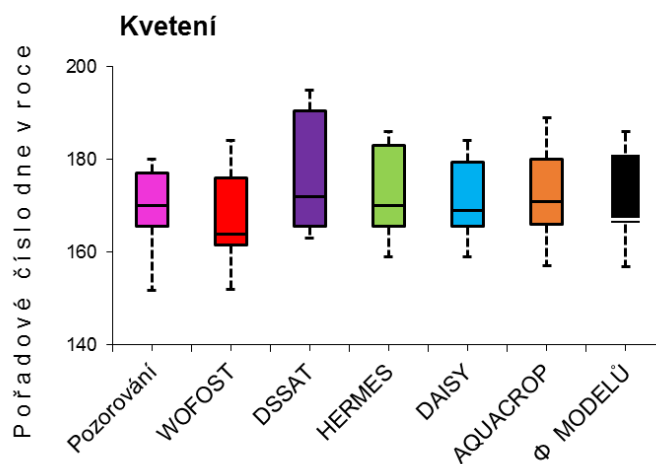
Validace parametrů fenologických fází kvetení a zralosti, výnosu zrna, LAI a půdní vlhkosti proběhla i na základě výsledků polních pokusů s experimentálními zákryty pro redukci srážek z Domanínku z let 2013 a 2014 (viz kapitola 4.4.2.2). Výsledky pokusů se zákryty z těchto let bohužel nepotvrdily prvotní hypotézu, že za sníženého přísunu srážek (30% v roce 2013 a 70% v roce 2014), vystavíme porost ječmene jarního stresu suchem a tím snížíme výnos zrna. Pozorované fenologické fáze byly stejné v obou variantách pokusu, v zákrytu i v kontrole. Stejně tak nebyl zaznamenán žádný statisticky významný rozdíl ve výnosech zrna pro dané varianty (zákryt, kontrolu) ani v jednom opakování. Rozdíl nebyl zaznamenán ani v naměřeném LAI (obr. 44 a 45 viz kapitola 5.2.3). Jediný podstatný rozdíl mezi zákrytem a kontrolou byl v dynamice a obsahu vody v půdě (obr. 47 a 48 viz kapitola 5.2.4). Růstové modely se v simulacích zákrytů a kontrol chovaly obdobně, jako tomu bylo v realitě. Svými výstupy potvrdily, že 30% a ani 70% snížení přísunu srážek v letech 2013 a 2014 u ječmene jarního neovlivnilo výnos zrna (viz kapitola 5.2.2) a ani dynamiku LAI (obr. 43 a 44 viz kapitola 5.2.3). Rozdíly v dynamice půdní vlhkosti v zákrytu a kontrole simulace modelů potvrdily (obr. 46 a 47 viz kapitola 5.2.3).

V následujícím roce 2015 byl na základě neuspokojivých výsledků z pokusů se zákryty s ječmenem jarním z let 2013 a 2014 založen a veden pokus s pšenicí ozimou a experimentálními zákryty, které už odváděly 100 % srážek. Zde byly výsledky mezi výnosem zrna v zákrytu a výnosem zrna v kontrolní variantě velmi výrazné a prvotní hypotézu tohoto pokusu potvrdily. Pokusy s experimentálními zákryty, které odvádějí 100 % srážek a vystavují tak plodiny stresu suchem probíhají i v roce 2016. Mezi zájmové a suchem stresované plodiny patří od roku 2016 kromě pšenice ozimé a ječmene jarního i řepka ozimá a silážní kukuřice.

5.2.1 Validace s využitím pozorované fenologie

Validace fenologie proběhla na základě výsledků pozorování nástupů fenologických fází u pokusů s ječmene jarním, odrůdami „Tolar“ (ÚKZÚZ, MENDELU) a „Bojos“ (MENDELU), viz tab. 4.

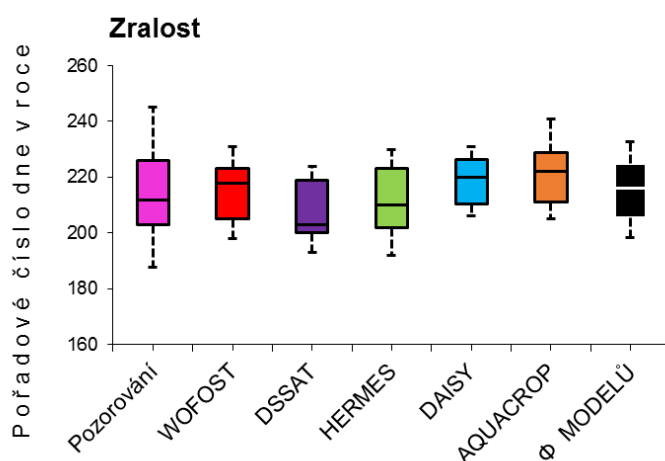
Výsledky validace fenofáze kvetení a zralosti jsou znázorněny pomocí grafů na obr. 40 a 41.



Obr. 40: Grafické znázornění výsledků validace pozorovaných a modely simulovaných termínů fenologické fáze kvetení.

Výsledky validace fenologické fáze kvetení znázorněné grafem na obr. 40 odpovídají výsledkům kalibrace (obr. 24 viz kapitola 5.1.2). Největší mezikvartilové rozpětí opět vykazala simulace DSSATu, která navíc termín kvetení oproti pozorování v rámci ansámblu modelů nejvíce opozdila. Variabilita simulací ostatních modelů vykazala s pozorováním opět uspokojivou shodu.

Výsledky validace vykazují obdobnou míru shody s pozorováním, jako tomu bylo u kalibrace. Pro fenologické fáze kvetení (dle Zadokse 61) se u kalibrace simulace odklonily od pozorování ve výši -1 až $+9$ dní. U validace byly rozdíly oproti pozorování podobné, a to -2 až $+7$ dní. Nejpřesnější hodnotu pro fenofázi kvetení poskytla simulace modelu DAISY, která v průměru opozdila pozorované termíny pouze o jediný den. Nejméně přesná pro fenofázi kvetení byla simulace DSSATu, která se v průměru o 7 dní opozdila. Bral-li by se v potaz Φ MODELŮ, fenologická fáze kvetení by se opozdila pouze o 2 dny.



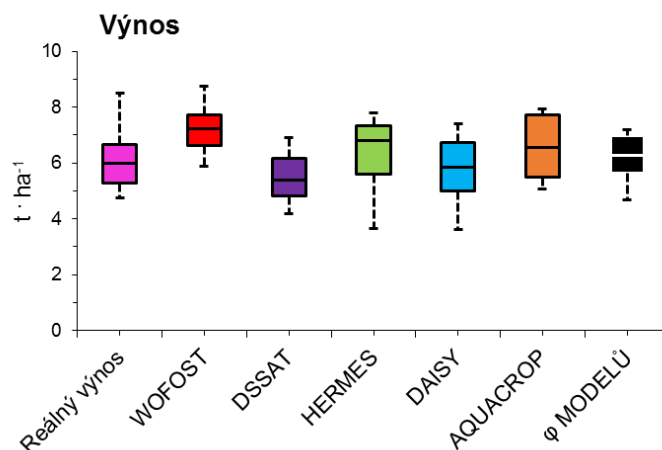
Obr. 41: Grafické znázornění výsledků validace pozorovaných a modely simulovaných termínů fenologické fáze zralosti.

Z grafu na obr. 41 lze vyčíst dobrou shodu simulací fenologické fáze zralosti s pozorováním. Variabilita mezi pozorováním a výstupy modelů je nízká. Stejně tak tomu bylo u kalibrace (obr. 25 kapitola 5.1.2). Nejpřesnějšího výsledku by v tomto případě opět dosáhl Φ MODELŮ s mírně menším rozsahem než tomu bylo u pozorování.

Pro fenologickou fázi zralost (dle Zadokse 90) vykazují výsledky validace také shodu s kalibrací. U kalibrace se simulace odklonily od pozorování ve výši -6 až $+5$ dní. U validace byly rozdíly oproti pozorování podobné, a to -7 až $+5,5$ dní. Nejpřesnější simulace pro fenofázi zralost byla simulace modelu WOFOST, která fenofázi simulovala v průměru na den přesně. Nejméně přesná byla simulace DSSATu, která se v průměru zralost o 7 dní předběhla. Bral-li by se v potaz Φ MODELŮ, fenologická fáze zralost by nastala téměř na den přesně.

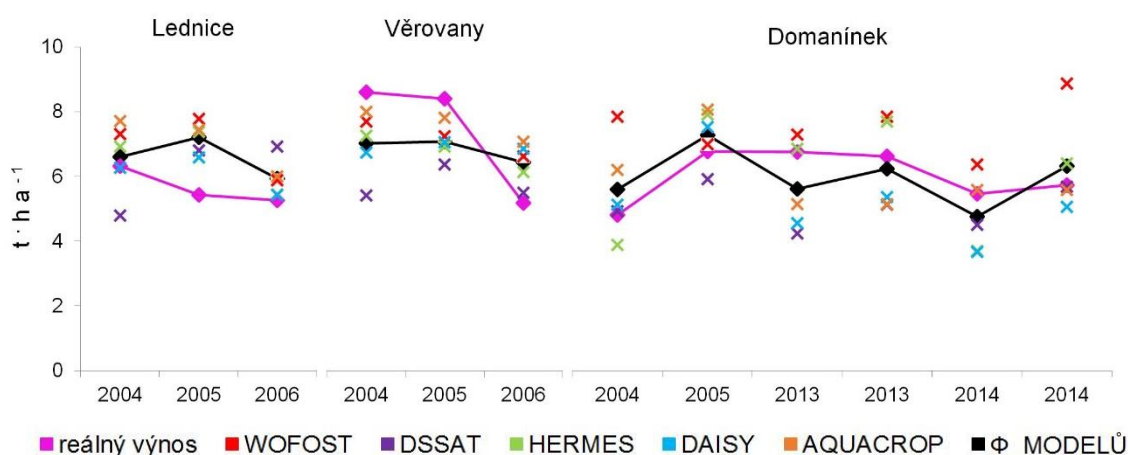
5.2.2 Validace s využitím výnosových dat

Výsledky validace s využitím výnosových dat jsou znázorněny pomocí grafu na obr. 42 a 43.



Obr. 42: Grafické znázornění výsledků validace reálných a modely simulovaných výnosů zrna.

V grafu na obr. 42 je u jednotlivých simulací výnosů zrna patrná menší vzájemná variabilita, než tomu bylo u kalibrace (obr. 26 kapitola 5.1.3). Výnos zrna mírně nadhodnotila simulace WOFOSTu. Simulace DSSATu reálný výnos naopak mírně podhodnotila. S pozorováním byl opět v nejlepší shodě Φ MODELŮ. Tento závěr potvrzuje i graf na obr. 43.



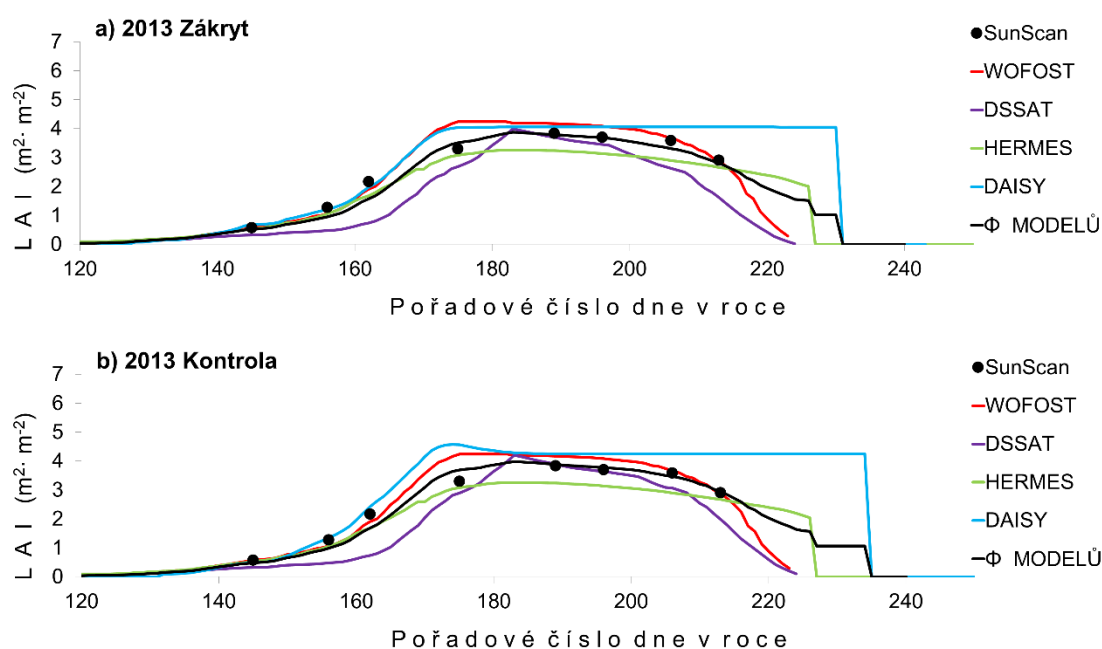
Obr. 43: Validace růstových modelů - srovnání reálných a simulovaných výnosů zrna ječmene jarního pomocí spojnicového grafu.

Výsledky validace výnosu zrna dopadly také obdobně jako u kalibrace.

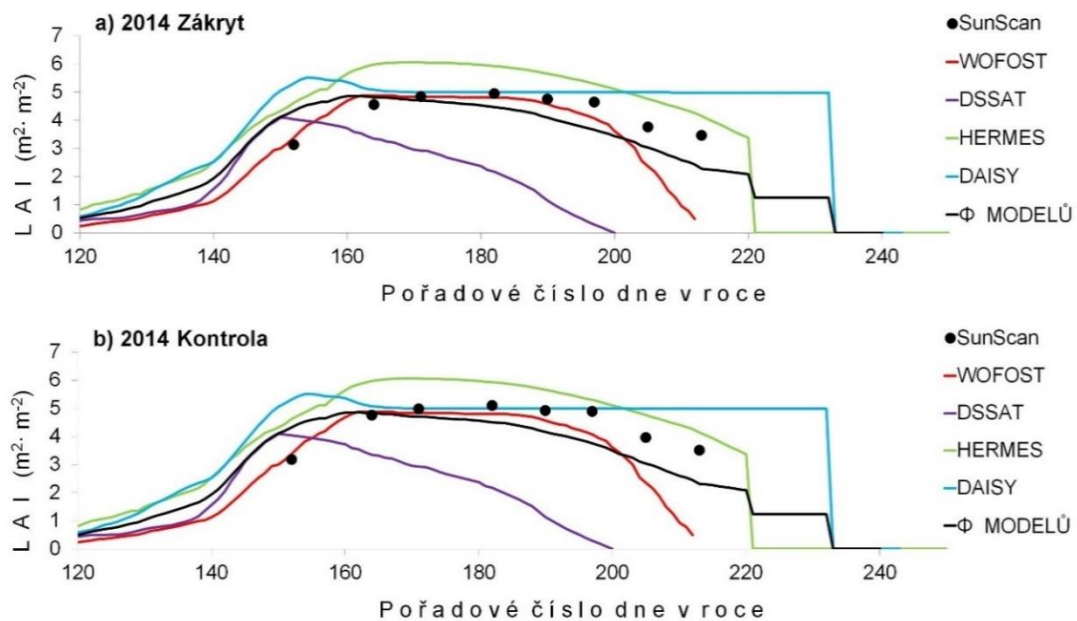
Nejvíce výnos zrna podhodnotila simulace DSSATu, která simulovala proti realitě o $0,69 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ méně, naopak simulace růstového modelu WOFOST výnos nadhodnotila, a to v průměru o $0,85 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Nejblíže realitě byla v tomto případě simulace modelu HERMES, která skutečný výnos nadhodnotila v průměru jen o $0,09 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Výsledek Φ MODELŮ se tedy v tomto případě blíží reálnému výnosu nejvíce, výnos zrna nadhodnotil o $0,04 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$.

5.2.3 Validace pro odhad LAI

Růstové modely WOFOST, DSSAT, HERMES a DAISY byly validovány pomocí dat naměřených SunScanem z let 2013 – 2014 z polních pokusů s ječmenem jarním a experimentálními zákryty pro redukci srážek v Domanínku. Porovnání naměřených a simulovaných hodnot je znázorněno pomocí grafů na obr. 44 a 45.



Obr. 44: Grafické znázornění naměřených a simulovaných hodnot indexu listové plochy (LAI) u ječmene jarního pro stanici Domanínka v roce 2013 u varianty se zákrytem a) a kontrolní varianty b).



Obr. 45: Grafické znázornění naměřených a simulovaných hodnot indexu listové plochy (LAI) u ječmene jarního pro stanici Domanínec v roce 2014 u varianty se zákrytem a) a kontrolní varianty b).

Jak je patrné z obr. 44 a 45, SunScanem měřené hodnoty LAI v zákrytu a kontrole se od sebe neliší. Stejně tak tomu je i při porovnání simulací LAI jednotlivými modely. V roce 2013 simulace poloviny modelů (WFOST a DAISY) měření mírně nadhodnotily, zbylé dvě (DSSAT a HERMES) měření mírně podhodnotily. Oproti kalibraci (obr. 30 viz kapitola 5.1.4) je zde rozdíl v tom, že simulace DSSATu nepodhodnotila LAI tak výrazně, jako tomu bylo u odrůdových pokusů. Dokonce se zde v období měřeného maxima blíží realitě. To může být způsobeno i tím, že maximální měřené hodnoty byly díky – ve srovnání s předešlými roky - suššímu období menší. Měření dosáhlo maximální hodnoty pouze $3,80 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$.

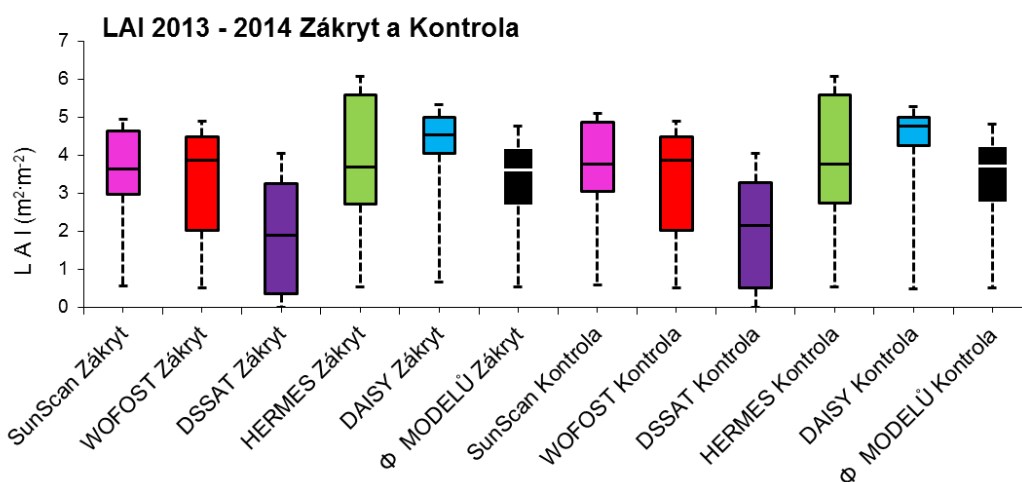
Modely simulované křivky LAI z roku 2014 u validace jsou dle grafů na obr. 45 stejně nevyrovnané, jako byl rok 2014 u kalibrace (obr. 31 viz kapitola 5.1.4). Měřené a simulované rozdíly mezi zákrytem a kontrolou nejsou opět vůbec patrné. Simulace DSSATu zde znovu podhodnocuje a zkracuje vývoj listové plochy. Simulace DAISY vývoj LAI naopak nadhodnocuje a prodlužuje. Dle statistického zhodnocení (tab. 9) u validace v porovnání měřených a simulovaných hodnot nejlépe vychází simulace modelu WFOST a Φ MODELŮ.

Tab. 9: Statistické zhodnocení validace indexu listové plochy (LAI).

<i>LAI – validace,</i>						
<i>Wilcoxonův párový test, hladina významnosti $\alpha=0,05$</i>						
<i>rok</i>	<i>2013 – 2014</i>					
<i>SunScan x</i>	<i>Zákryt</i>			<i>Kontrola</i>		
<i>WOFOST</i>	<i>p = 0,641660</i>			<i>p = 0,011286</i>		
<i>DSSAT</i>	<i>p = 0,001346</i>			<i>p = 0,214603</i>		
<i>HERMES</i>	<i>p = 0,120840</i>			<i>p = 0,000777</i>		
<i>DAISY</i>	<i>p = 0,001609</i>			<i>p = 0,062672</i>		
<i>Φ MODELŮ</i>	<i>p = 0,043734</i>			<i>p = 0,000531</i>		
<i>SunScan x</i>	<i>MBE</i>	<i>RMSE</i>	<i>IA</i>	<i>MBE</i>	<i>RMSE</i>	<i>IA</i>
	<i>Zákryt</i>	<i>Zákryt</i>	<i>Zákryt</i>	<i>Kontrola</i>	<i>Kontrola</i>	<i>Kontrola</i>
<i>WOFOST</i>	<i>-0,22</i>	<i>0,89</i>	<i>0,90</i>	<i>-0,34</i>	<i>0,92</i>	<i>0,89</i>
<i>DSSAT</i>	<i>-1,62</i>	<i>2,20</i>	<i>0,53</i>	<i>-1,61</i>	<i>2,21</i>	<i>0,53</i>
<i>HERMES</i>	<i>0,33</i>	<i>0,83</i>	<i>0,92</i>	<i>0,22</i>	<i>0,79</i>	<i>0,92</i>
<i>DAISY</i>	<i>0,56</i>	<i>0,84</i>	<i>0,91</i>	<i>0,54</i>	<i>0,84</i>	<i>0,91</i>
<i>Φ MODELŮ</i>	<i>-0,20</i>	<i>0,48</i>	<i>0,96</i>	<i>-0,24</i>	<i>0,50</i>	<i>0,96</i>

Výsledky Wilcoxonova párového testu ukazují, že ve více než polovině případů byl mezi naměřenými a simulovanými hodnotami zjištěn statisticky významný rozdíl. Validace tedy vyšla podobně jako kalibrace (tab. 7 viz kapitola 5.1.4), kdy byl statisticky významný rozdíl také zjištěn u více než poloviny případů.

Porovnání naměřených a simulovaných hodnot LAI z let 2013 a 2014 je znázorněno pomocí grafu na obr. 46.



Obr. 46: Grafické znázornění měřených a modely simulovaných hodnot indexu listové plochy (LAI) u validace pomocí krabicových diagramů pro ječmen jarní a stanici Domanínec v letech 2013 a 2014.

Z grafu na obr. 46 je patrné, že simulace WOFOSTu, DSSATu a HERMESu měly v průměru větší rozsah hodnot, než tomu bylo u měření. Tentokrát měření v průměru nadhodnotila simulace HERMESu. Simulace DAISY měla oproti výsledkům kalibrace (obr. 32 viz kapitola 5.1.4) mnohem menší rozpětí. Nejbližší měření i v rámci mezikvartilového rozpětí byl Φ MODELŮ.

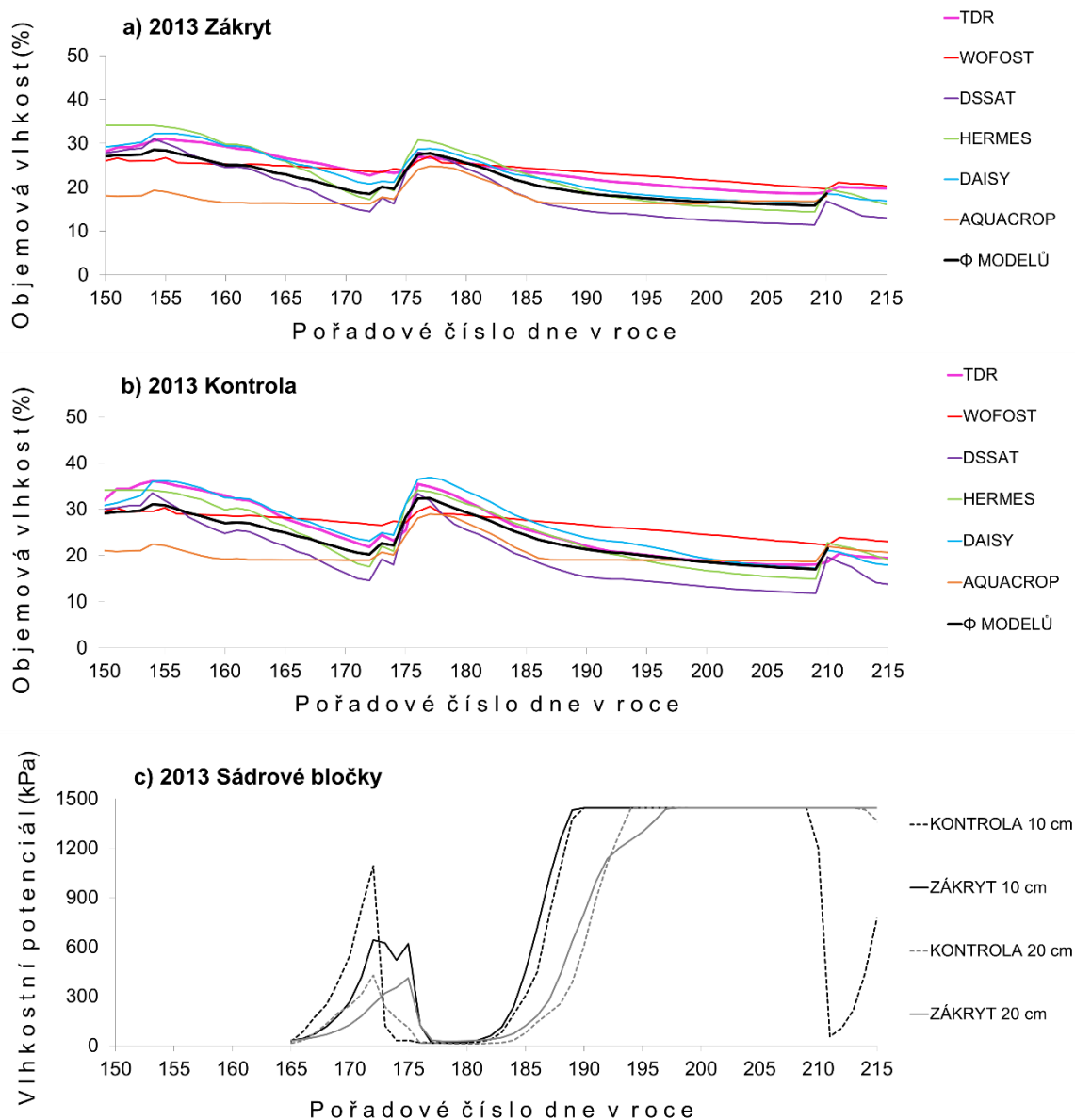
5.2.4 Validace pro odhad půdní vlhkosti

Ansámbl modelů byl validován pro odhad půdní vlhkosti pomocí dat naměřených čidly TDR z let 2013 – 2014 z polních pokusů s ječmenem jarním a experimentálními zákryty pro redukci srážek v Domanínku (viz kapitola 4.4.2.2).

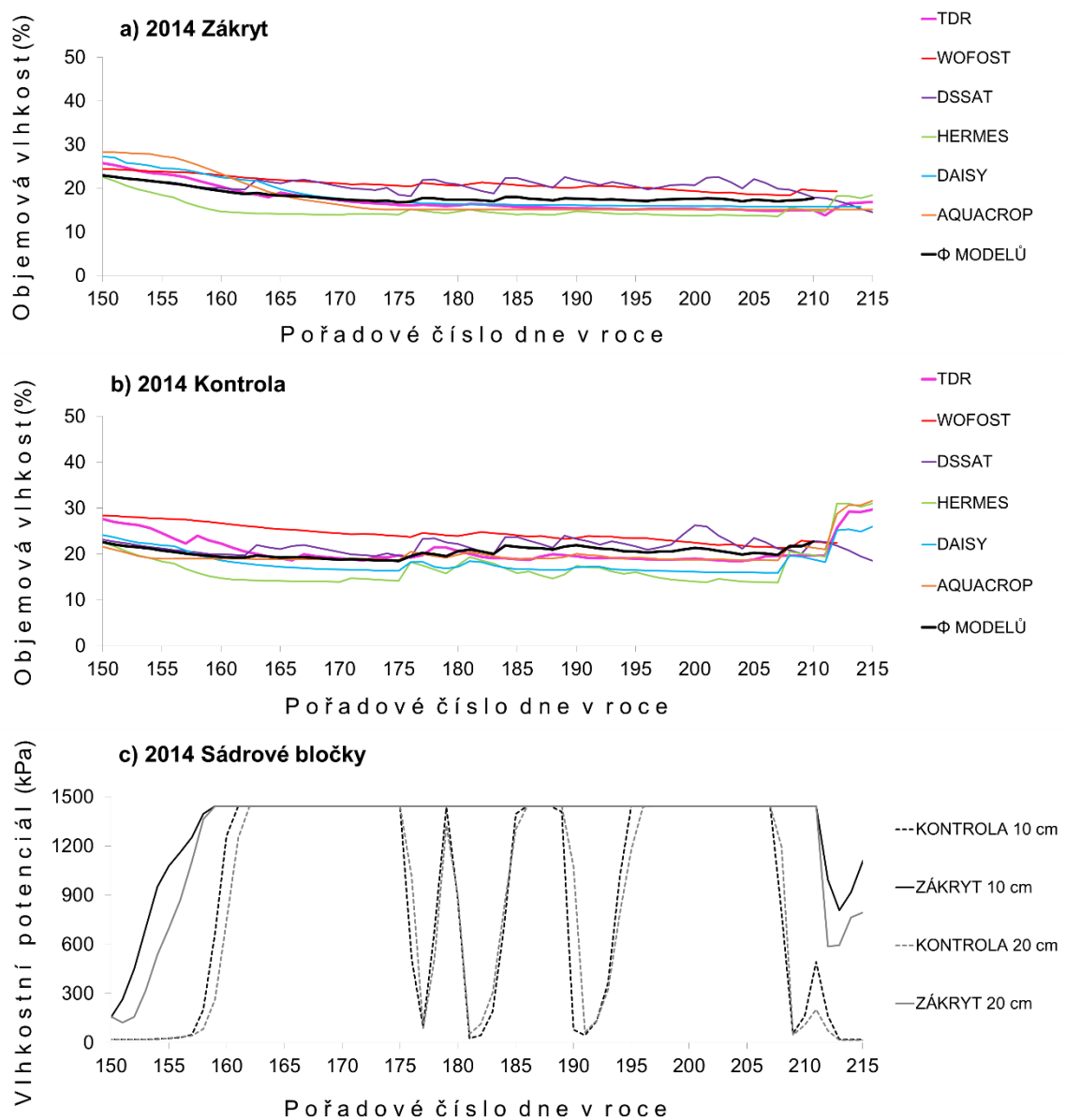
Měření půdní vlhkosti bylo v pokusech se zákryty doplněno o měření sacího potenciálu pomocí sádrových bločků (viz kapitola 4.4.1.2). Výsledky měření sádrovými bločky jsou znázorněny graficky pod naměřenými hodnotami objemové hmotnosti půdy (obr. 47 c) a 48 c) a ukazují, jak se v průběhu části sezóny, kdy probíhalo měření, měnil obsah vody dostupné pro rostliny v povrchových 10 a 20 cm. V grafech na obr. 47 a 48 je vidět časový rozdíl postupného sycení půdy vodou, který vznikl po srážkovém úhrnu a který se pro varianty zákrytu a kontroly a pro jednotlivé hloubky lišil. V zákrytu dochází k vysušení povrchové vrstvy půdy dříve, než je tomu v kontrole, v 10 cm pak k vysušení dochází dříve než ve 20 cm. Část sezóny 2013, po kterou probíhalo měření, byla chudá na srážky. Grafy a), b) i c) na obr. 47 zaznamenaly výskyt výraznějších

srážek pouze 2x. V roce 2014 (graf na obr. 48 a), b) a c) tomu po dobu měření bylo 4x. Z grafů na obr. 47 a 48 je také patrné, že 70% zakrytí porostu v roce 2014 mělo na vysušení povrchové vrstvy půdy (0 – 30 cm) mnohem větší vliv než zakrytí 30% z roku 2013.

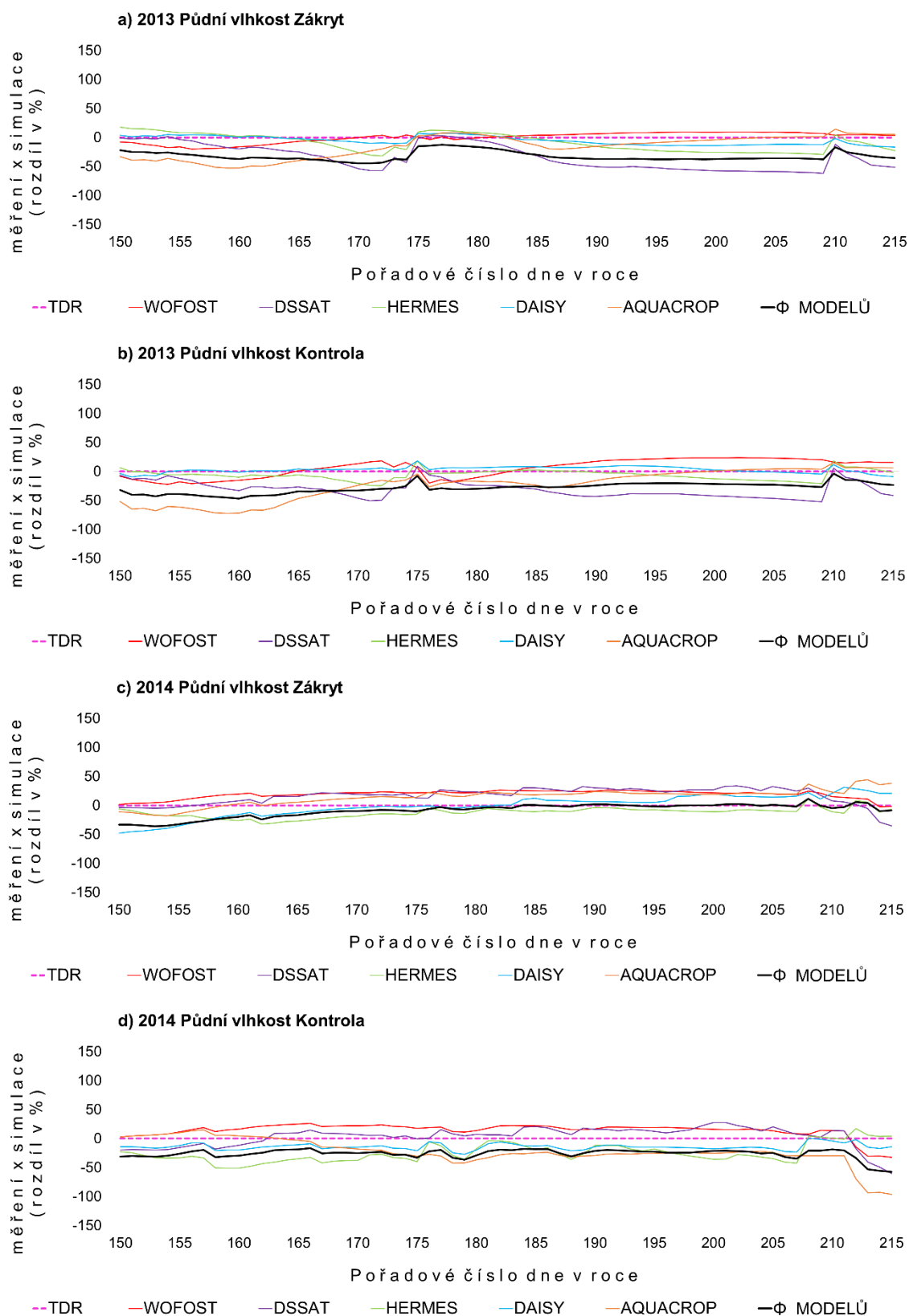
Výsledky validace dynamiky půdní vody jsou znázorněny pomocí grafů na obr. 47 a 48.



Obr.47: Validace růstových modelů - srovnání měřené a simulované půdní vlhkosti z polního pokusu MENDELU v Domanínku s ječmenem jarním a experimentálními zákryty pro redukci srážek v roce 2013 pro zákryt a) a kontrolu b). Obrázek c) znázorňuje křivku vlhkostního potenciálu naměřeného sádrovými bločky.



Obr. 48: Validace růstových modelů - srovnání měřené a simulované půdní vlhkosti z polního pokusu MENDELU v Domanínku s ječmenem jarním a experimentálními zákryty pro redukci srážek v roce 2014 pro zákryt a) a kontrolu b). Obrázek c) znázorňuje křivku vlhkostního potenciálu naměřeného sádrovými bločky.



Obr. 49: Validace růstových modelů - srovnání pomocí % rozdílu měřené a simulované půdní vlhkosti z polních pokusů MENDELU v Domanínku s ječmenem jarním v roce 2013 a), b) a v roce 2014 c), d).

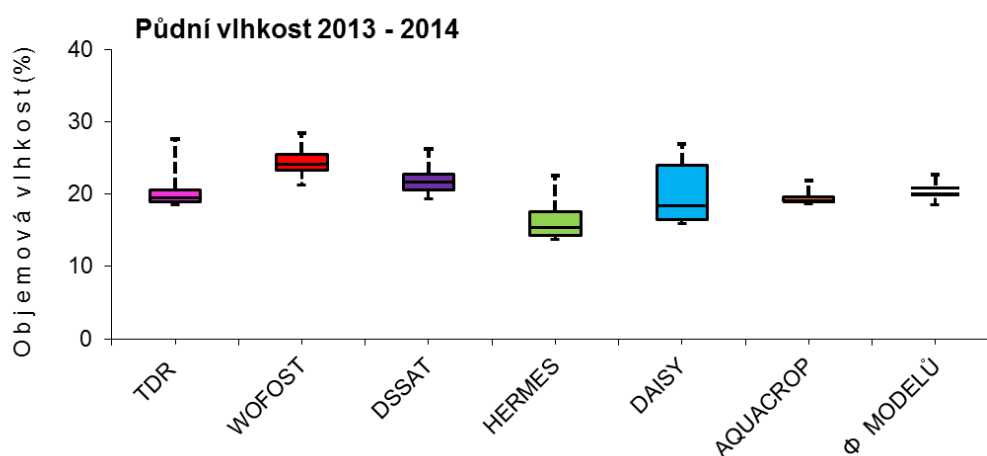
Simulace validace půdní vlhkosti byly statisticky porovnány s měřením pomocí statistických ukazatelů uvedených v tabulce 10. Mezi hlavní statistické ukazatele této analýzy patří stejně jako u kalibrace (viz kapitola 5.1.4) Wilcoxonův test, MBE, RMSE a IA. Výsledky Wilcoxonova párového testu ukazují na hladině významnosti $\alpha = 0,05$, že pouze u dvou ze šesti simulovaných řad nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl. Výsledky jsou lepší než u kalibrace, kdy nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl u žádné ze simulovaných řad. Hlavní rozdíl mezi validací a kalibrací je v tom, že u validace patří mezi modely, jejichž simulace dle statistického zhodnocení nejlépe vystihují měření, kromě simulace DSSATu i Φ MODELŮ. Výsledné hodnoty MBE, RMSE a IA byly použity pro zhodnocení úspěšnosti jednotlivých modelů v kapitole 5.3.

Tab. 10: Statistické zhodnocení validace půdní vlhkosti z let 2013 – 2014. Porovnání hodnot naměřených čidly TDR a hodnot simulovaných jednotlivými růstovými modely.

PŮDNÍ VLHKOST 2013 - 2014							
Statistický ukazatel	TDR 1	WO	DS	HE	DA	AQ	Φ
Průměr (obj_%)	20,98	24,08	20,54	19,69	21,74	18,87	20,98
Medián (obj_%)	28,98	24,04	20,90	17,01	19,42	18,88	20,14
Variační koeficient (obj_%)	27,46	11,81	22,93	32,85	26,98	16,71	18,23
Směrodatná odchylka (obj_%)	5,31	2,84	4,71	6,47	5,87	3,15	3,82
Min (obj_%)	13,79	18,32	11,44	13,57	15,72	15,11	15,76
Max (obj_%)	36,09	30,60	33,51	34,10	36,90	28,95	32,41
Stupně volnosti	243	243	243	243	243	243	243
MBE 1 (%)	x	2,46	-1,29	-2,15	-0,09	-2,96	-0,85
RMSE 1 (%)	x	3,91	4,94	3,29	3,24	5,51	2,52
IA 1	x	0,94	0,93	0,95	0,96	0,92	0,97
Hladina významnosti $\alpha=0,05$							
Wilcoxonův párový test, $p=$		0,000	0,000	0,000	0,000	0,908	0,000

Výsledky porovnání měřených a simulovaných hodnot zprůměrovaných z let 2013 – 2014 jsou znázorněny grafem na obr. 50 a v tab. 10. Ukazují, že nejpřesnější

simulace měřených hodnot půdní vlhkosti proběhla pomocí modelu HERMES, následoval Φ MODELŮ, DAISY, WOFOST, DSSAT a AQUACROP.

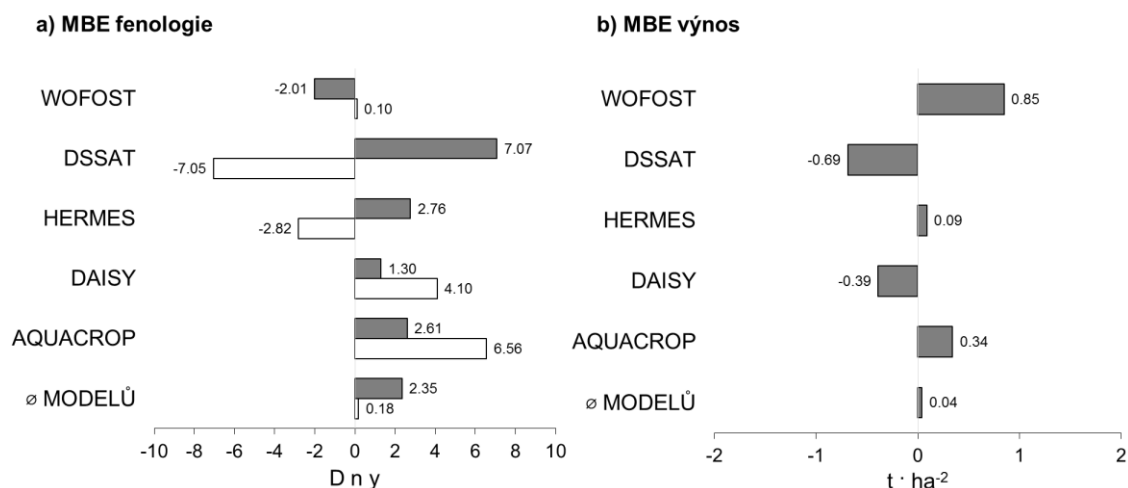


Obr. 50: Validace - grafické znázornění měřené a simulované půdní vlhkosti z polních pokusů MENDELU v Domanínku s ječmenem jarním v letech 2013 a 2014.

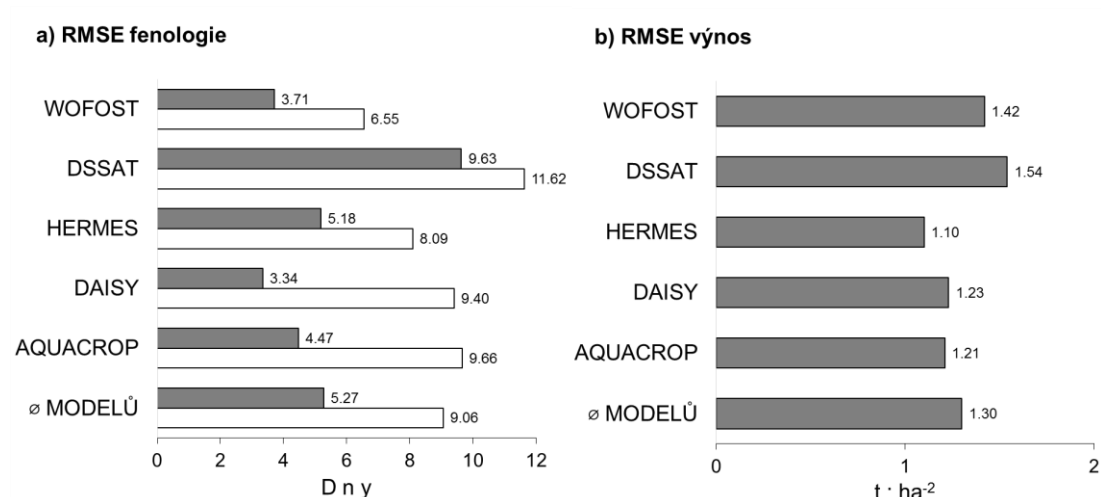
Výsledky validace půdní vlhkosti má u měření stejně jako u všech modelů malé rozpětí hodnot. Jediná simulace, která se svým rozpětím od ostatních liší, je simulace DAISY. Simulace WOFOSTu a DSSATu půdní vlhkost mírně nadhodnotily. Simulace HERMESu naopak měření mírně podhodnotila. Simulace Φ MODELŮ by podle grafu na obr. 50 vystihla měření nejlépe.

5.2.5 Porovnání simulací validace podle statistických ukazatelů

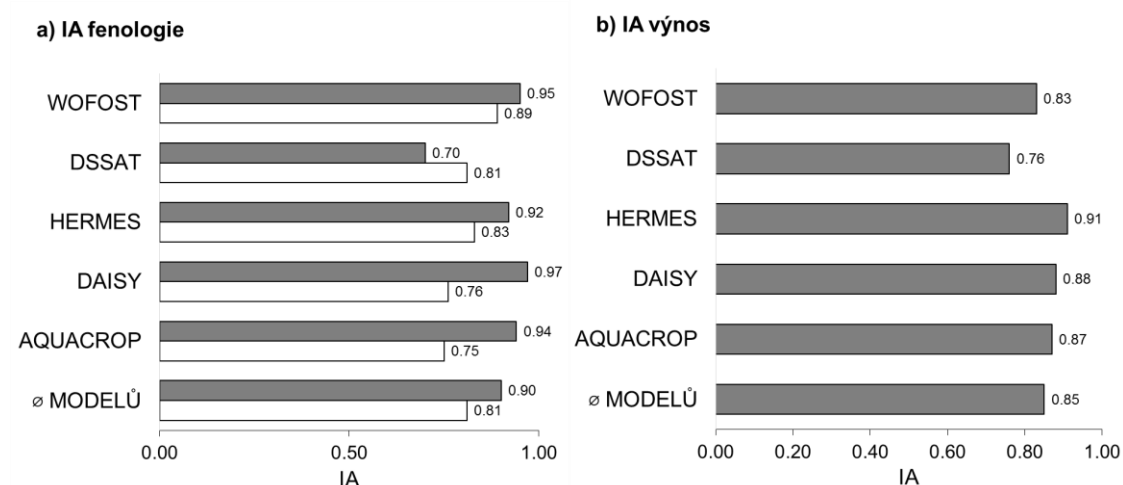
Vyhodnocení vztahu mezi reálnými a simulovanými veličinami u validace fenologie a výnosu zrna bylo provedeno pomocí statistických ukazatelů MBE, RMSE a IA. Výsledky porovnání jsou znázorněny pomocí grafů na obr. 51 - 53. Výsledné hodnoty MBE, RMSE a IA pro fenologii a výnos zrna byly použity pro znázornění úspěšnosti jednotlivých modelů v kapitole 5.3.



Obr. 51: Grafické znázornění vyhodnocení kalibrace podle statistického ukazatele MBE pro fenologii a) a výnos zrna b).



Obr. 52: Grafické znázornění vyhodnocení kalibrace podle statistického ukazatele RMSE pro fenologii a) a výnos zrna b).



Obr. 53: Grafické znázornění vyhodnocení kalibrace podle statistického ukazatele IA pro fenologii a) a výnos zrna b).

5.3 Porovnání modelů

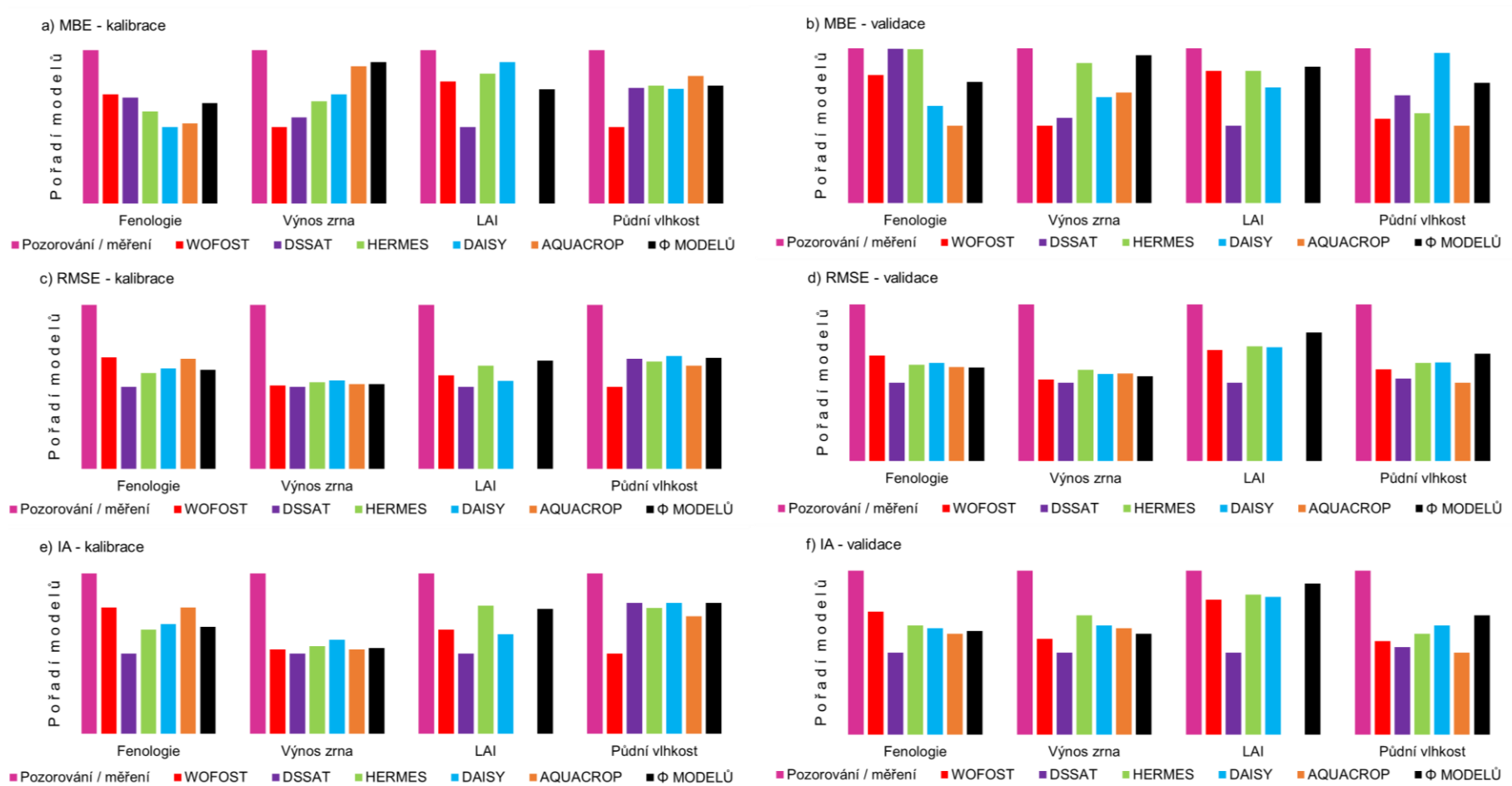
Modely byly porovnány na základě výsledků statistických ukazatelů MBE, RMSE a IA. Výsledky statistických ukazatelů pro kalibraci i validaci u všech sledovaných parametrů (fenologie, výnos zrna, LAI a půdní vlhkost) jsou souhrnně uvedeny v tab. 11. Porovnání úspěšnosti modelů proběhlo pomocí dvou metod:

1. pomocí tzv. standardizace rozpětím, neboli „min-max normalizace“ (viz kapitola 4.5), která umožnila vzájemné porovnání proměnných (fenologie, výnosu zrna, LAI a půdní vlhkosti) s jinými jednotkami (den, $t \cdot ha^{-1}$, $m^2 \cdot m^{-2}$, obj_%). Díky této metodě byly v grafech na obr. 54 a 55 a), b) modely seřazeny podle úspěšnosti sestupně (tzn. od nejvíce úspěšného po nejméně úspěšný). Simulace všech modelů jsou srovnány s pozorováním/měřením, které je vyjádřeno jako nejúspěšnější (jako reference). Tento postup umožnil znázornit i to, jaké jsou mezi simulacemi jednotlivých modelů někdy jen malé rozdíly. Veličiny uvedené v grafech na obr. 54 a 55 a), b) jsou bezrozměrné.
2. pomocí bodového hodnocení. V tomto případě byl každý model v každé pozorované kategorii hodnocen body podle úspěšnosti v rozpětí 6 (nejúspěšnější model) až 1 (nejméně úspěšný model). Tato metoda umožnila zhodnotit, který model má v dané kategorii v porovnání s ostatními nejreálnější simulace. Bodovým hodnocením, na rozdíl od metody standardizace rozpětím, se ale nedají srovnat rozdíly mezi simulacemi jednotlivých modelů v přesném poměru. Výsledky jsou zjednodušené.

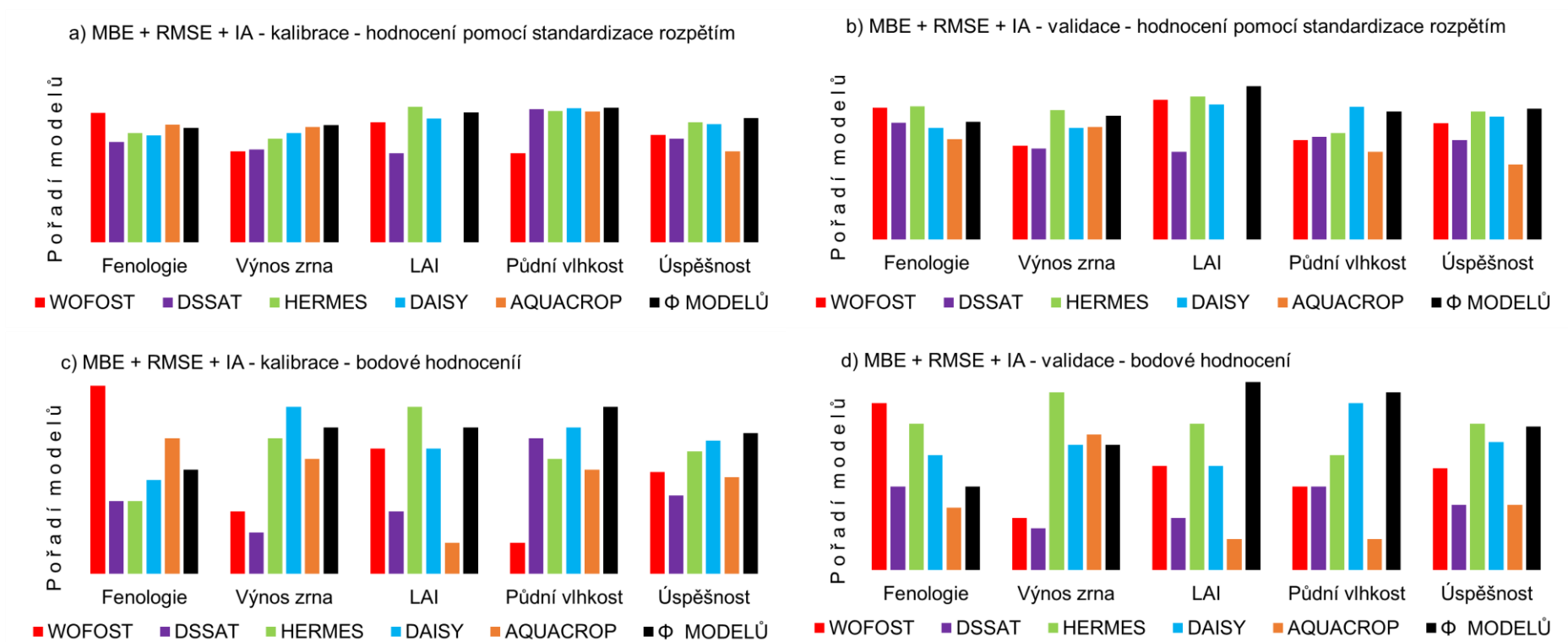
Vzhledem k tomu, že AQUACROP nesimuluje LAI (místo toho používá procentuální pokryvnost), bylo pro hodnocení tohoto modelu v kategorii úspěšnosti simulace LAI zvoleno v bodovém hodnocení číslo 1. Pomocí standardizace rozpětím nebyl AQUACROP v této kategorii posuzován vůbec. Celkové hodnocení úspěšnosti modelu AQUACROP je v grafech na obr. 55 c), d) touto skutečností zkresleno v neprospěch modelu.

Tab. 11: Porovnání vztahu mezi reálnými a simulovanými veličinami pomocí statistických ukazatelů MBE, RMSE a IA.

Kalibrace	Fenologie (den)			Výnos zrna ($t \cdot ha^{-1}$)			LAI ($m^2 \cdot m^{-2}$)			Půdní vlhkost (obj_%)		
	MBE	RMSE	IA	MBE	RMSE	IA	MBE	RMSE	IA	MBE	RMSE	IA
WOFOST	-1,05	4,90	0,93	1,28	1,81	0,73	-0,24	0,92	0,84	6,55	11,15	0,78
DSSAT	1,16	10,05	0,74	-1,00	1,87	0,70	-0,94	1,22	0,72	-2,14	5,47	0,95
HERMES	1,72	7,42	0,86	0,64	1,66	0,75	-0,17	0,72	0,93	1,97	5,84	0,94
DAISY	2,58	6,66	0,88	-0,52	1,60	0,79	0,08	1,05	0,83	2,22	5,01	0,95
AQUACROP	2,34	5,15	0,93	0,15	1,75	0,73				1,31	6,54	0,92
Φ MODELŮ	1,35	6,84	0,87	0,11	1,74	0,74	-0,32	0,63	0,92	1,97	5,28	0,95
Validace	Fenologie (den)			Výnos zrna ($t \cdot ha^{-1}$)			LAI ($m^2 \cdot m^{-2}$)			Půdní vlhkost (obj_%)		
	MBE	RMSE	IA	MBE	RMSE	IA	MBE	RMSE	IA	MBE	RMSE	IA
WOFOST	-0,96	5,13	0,92	0,85	1,42	0,83	-0,28	0,91	0,90	2,46	3,91	0,94
DSSAT	0,01	10,63	0,76	-0,69	1,54	0,76	-1,62	2,21	0,53	-1,29	4,94	0,93
HERMES	-0,03	6,64	0,88	0,09	1,10	0,91	0,28	0,81	0,92	-2,15	3,29	0,95
DAISY	2,70	6,37	0,87	-0,39	1,23	0,88	0,55	0,84	0,91	-0,09	3,24	0,96
AQUACROP	4,59	7,07	0,85	0,34	1,21	0,87				-2,96	5,51	0,92
Φ MODELŮ	1,27	7,17	0,86	0,04	1,30	0,85	-0,22	0,49	0,96	-0,85	2,52	0,97



Obr. 54: Grafické znázornění pořadí modelů pomocí standardizace rozpětím pro kalibraci (graf a) ukazatel MBE, graf c) ukazatel RMSE, graf e) ukazatel IA) a validaci (graf b) ukazatel MBE, graf d) ukazatel RMSE, graf f) ukazatel IA). Modely jsou seřazeny podle úspěšnosti sestupně (tzn. od nejvíce úspěšného po nejméně úspěšný). Jako referenze je použito pozorování. Veličiny uvedené v grafech jsou bezrozměrné.



Obr. 55: Grafické znázornění pořadí modelů pomocí standardizace rozpětím (graf a) pro kalibraci, graf b) pro validaci) a pomocí bodového hodnocení (graf c) pro kalibraci, graf d) pro validaci). Modely jsou seřazeny podle úspěšnosti sestupně (tzn. od nejvíce úspěšného po nejméně úspěšný). Veličiny uvedené v grafech jsou bezrozměrné.

Z grafů na obr. 54 a 55 je zřejmé, že simulace žádného z modelů, použitých v této disertační práci, nemohou být ve všech simulovaných parametrech hodnoceny jako nejlepší. Z výsledků validace vyplývá, že nejlepší simulace pro fenologii byla simulace WOFOSTu (IA 0,92), pro výnos zrna a LAI simulace HERMESu (IA 0,91 a 0,92) a pro půdní vlhkost simulace DAISY (IA 0,96). Při hodnocení celkové úspěšnosti simulací jednotlivých modelů (obr. 55) patří HERMES, DAISY a WOFOST v tomto pořadí ke třem nejlepším. To, že simulace žádného z modelů není 100% ve všech směrech, podporuje stále častější trend používání více modelů současně (ansámblu modelů). Z pohledu na grafy na obr. 54 a 55 je patrné, že potenciální simulace Φ MODELŮ patří v každé hodnocené kategorii mezi lepší (IA v pořadí pro fenologii, výnos zrna, LAI a půdní vlhkost bylo u validace 0,86, 0,85, 0,96 a 0,97). V kategorii hodnotící úspěšnost modelů (obr. 55) je dokonce nejlepší.

Výsledky potvrzují, že pomocí „multimodelového srovnání“ lze snížit u predikcí termínů nástupů fenologických fází, velikosti výnosu zrna, dynamiky LAI i půdní vody stupeň nejistoty.

6 ZÁVĚR

Cílem této disertační práce bylo odpovědět na následující otázky:

- *Do jaké míry se dají růstové modely použít pro simulaci růstu a vývoje ječmene jarního v půdně-klimatických podmínkách České republiky?*

Při kalibraci a validaci vybraných růstových modelů došlo ve srovnání s literaturou k získání přesných výsledků v oblasti fenologie (IA v rozmezí 0,76 – 0,92, pro ansámbl modelů 0,86), výtrosů zrna (IA v rozmezí 0,76 – 0,91, pro ansámbl modelů 0,85), LAI (IA v rozmezí 0,53 – 0,92, pro ansámbl modelů 0,96) i dynamiky půdní vlhkosti (IA v rozmezí 0,92 – 0,96, pro ansámbl modelů 0,97). Výsledky této disertační práce mohou patřit k dalším podkladům v rámci využívání modelů pro simulaci růstu a vývoje ječmene jarního (a dalších plodin) v půdně-klimatických podmínkách České republiky.

- *Odpovídají výsledky kalibrace následné validaci?*

Z grafu v kapitole 5.3 vyplývá, že výsledky validace jednotlivých modelů odpovídají kalibraci. Ověřování spolehlivosti simulací jednotlivých modelů na nezávislých datech přineslo v několika případech i přesnější výsledky. Ačkoli se pořadí úspěšnosti vybraných modelů mezi kalibrací a validací v jednotlivých kategoriích občas mírně liší, potenciální simulace ansámblu modelů vykazuje v obou případech stejnou úroveň úspěšnosti. Je tedy spolehlivější, než simulace každého jednotlivého modelu zvlášť.

- *Lze ze souboru dostupných modelových nástrojů vybrat „ideální“ model schopný reprodukovat fenologické fáze, výtros zrna, LAI, půdní vlhkost či stres suchem?*

Jak již bylo zmíněno v úvodu, simulace růstovými modely nikdy nemohou být 100% odrazem reality. Z hlediska přesnosti predikce nástupu fenologických fází, velikosti výtrosů zrna, dynamiky LAI a půdní vlhkosti napříč všemi zájmovými lokalitami nebyl žádný z vybraných modelů jasně lepší než ostatní. Ačkoli jsou simulace jednotlivých modelů v relativně dobrém souladu s pozorovanými/měřenými

hodnotami, některé jsou ve vzájemném srovnání i výrazněji přesnější, nedá se ani jeden z nich označit za ideální ve všech simulovaných parametrech.

- *Je lepší vybrat a používat jeden „ideální“ růstový model, který v daných podmínkách simuluje realitu nejspolehlivěji, nebo v rámci jednoho prostředí používat více modelů, tedy začlenit i ty, které vykazují menší shodu s realitou?*

Každý jednotlivý model byl primárně vyvinut v konkrétních agroekologických podmínkách, ve kterých se jeho simulace dají považovat za nejspolehlivější. Půdně - klimatické podmínky České republiky jsou v porovnání s půdně - klimatickými podmínkami jiných zemí často mnohem rozmanitější. Vzhledem k tomu, že ani jeden růstový model nebyl vyvinut v podmínkách České republiky, je v rámci tohoto zájmového území lepší používat více modelů současně, tedy i ty, které vykazují menší shodu s realitou. Začleněním „méně úspěšných“ modelů do simulací se sice v rámci potenciální simulace ansámbly modelů může zvýšit míra variability simulovaných hodnot, ale na druhou stranu to přinese lepší představu o nejistotě simulačních výstupů, která není pro různé podmínky prostředí stejná.

- *Je využití ansámbly modelů výrazně spolehlivější než v případě výběru jednoho modelu, např. v poměru vynaloženého času/vs. zvýšení spolehlivosti výsledků?*

Využívání ansámbly modelů je z časového hlediska náročnější než práce s jedním vybraným modelem, jehož simulace nejlépe odpovídají daným reálným podmínkám. Avšak výsledky mezimodelového srovnání v půdně-klimatických podmínkách České republiky pro růst a vývoj ječmene jarního potvrzují závěr dvou hlavních mezimodelových studií porovnávajících simulace modelů pro ječmen jarní a pšenici ozimou v rozdílných klimatických podmínkách severní a střední Evropy, Palosuo et al. (2011) a Rötter et al. (2012) a to, že spolehlivost výsledků se hlavně u simulací výnosů zrna zvyšuje právě využitím ansámbly modelů jako případného ukazatele nejreálnějších prognóz. Díky míře shody mezi růstovými modely lze tímto přístupem získat lepší představu o nejistotě odhadu.

Na základě výsledků modelů použitých v této práci by pro hodnocení dopadů sucha, predikcí výnosů zrna či jiných dalších studií týkajících se dopadů klimatických změn na území České republiky, měly být u jednotlivých modelů provedeny úpravy pro lepší adaptaci na místní odrůdy a půdně klimatické podmínky (např. algoritmus simulující LAI u DSSATu a DAISY či algoritmus simulující půdní vlhkost u modelu WOFOST).

Polní pokusy v Domanínku pro účely validace růstových modelů probíhají dále (obr. 56), a to nejen s ječmenem jarním, ale i dalšími plodinami, ke kterým patří pšenice ozimá, řepka ozimá a silážní kukuřice. Na základě dat získaných z těchto pokusů bude v budoucích letech možné v rámci práce s růstovými modely pokročit a modelovat např. osevň postupy nebo stres suchem.



Obr. 56: Polní pokusy v Domanínku v roce 2016.

7 LITERATURA

- ABHRA, B., DELBECQUE, N., RAES, D., et al., 2012: *Sowing strategies for barley (Hordeum vulgare L.) based on modelled yield response to water with AquaCrop*. Exp. Agric., 48, 252–271.
- ABRAHAMSEN, P., 2000: *Daisy Program Reference*. Royal Veterinary and Agricultural University, Department of Agricultural Sciences, Laboratory for Agrohydrology and Bioclimatology.
- ABRAHAMSEN, P., HANSEN, S., 2000: *Daisy: an open soil-crop-atmosphere system model*. Environmental modelling & software, 15, 3, 313-330.
- ADDISCOT, T., SMITH, J., BRADBURY, N., 1995: *Critical evaluation of models and their parameters*. J. Envir. Qual., 34, 803-807.
- AGGARWAL, P. K., 1995: *Uncertainties in crop, soil and weather inputs used in growth models: implications for simulated outputs and their applications*. Agric. Syst., 48, 361–384.
- AGMIP 2016: Databáze online [cit. 10-04-2016]. Dostupné na: www.agmip.org.
- ALDAYA, M. M., LLAMAS, M. R., 2008: *Water footprint analysis for the Guadiana river basin*. Value of Water Research Report Series No. 35, UNESCO-IHE, Netherlands.
- ALLAN, J., A., 1993: *Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible*. Priorities for water resources allocation management, ODA, London, 13-26.
- ALLAN, J. A., 1997: *Virtual water: a long term solution for water short Middle Eastern economies?* London: School of Oriental and African Studies, University of London.
- ALLAN, T., 1999: *Productive efficiency and allocative efficiency: why better water management may not solve the problem*. Agricultural water management, 40, 71-75.
- ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., et al., 1998: *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*. FAO, Rome, 300, D05109.
- AN, Y., 2010: *Evaluation of Evapotranspiration Estimation Methods and Their Impacts on Crop Yield Simulations (Doctoral dissertation, Carleton University Ottawa)*.
- ANDARZIAN, B., BANNANYAN, M., STEDUTO, P., et al., 2011: *Validation and*

- testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. Agric. Water Manage*, 100, 1–8.
- AUQUACROP, 2016: Databáze online [cit. 10-02-2016]. Dostupné na: www.fao.org/nr/water/aquacrop.html.
- ARAYA, A., HABTU, S., HADGU, K. M., et al., 2010: *Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (Hordeum vulgare)*. *Agric. Water Manage*, 97, 1838–1846.
- ARNOLD, H. M., MOROZ, I. M., PALMER, T. N., 2012: *Stochastic parametrizations and model uncertainty in the Lorenz '96 system*. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci.*, 15, 371.
- ASHRAF, M. C., ABU-SHAKRA, S., 1970: *Wheat seed germination under low temperature and moisture stress*. *Agron. J.*, 70, 135-139.
- ASSENG, S., EWERT, F., ROSENZWEIG, C., et al., 2013: *Uncertainty in simulating wheat yields under climate change*. *Nature Climate Change*, 3, 9, 827-832.
- BARKLUND, E., POGAKU, N., PRODANOVIC, M., et al., 2007: *Energy management system with stability constraints for stand-alone autonomous microgrid*. *IEEE International Conference on System of Systems Engineering*, IEEE, 1-6.
- BARKLUND, E., POGAKU, N., PRODANOVIC, M., et al., 2007: *Energy management system with stability constraints for stand-alone autonomous microgrid*. *IEEE International Conference on System of Systems Engineering*, 1-6.
- BASAK, J. K., ALI, M. A., ISLAM, M. N., et al., 2010: *Assessment of the effect of climate change on boro rice production in Bangladesh using DSSAT model*. *J. Civ. Eng*, 38, 95-108.
- BLAŽEK, V., 2010: *Odrůdy Nickerson nakupované pro České pivo: Bojos, Malz, Blaník, Radegast, Tolar*. *Agrární obzor: Magazín pro české zemědělství a venkov*, 12, 4, 1214-1291.
- BOHDAČENKO, I., 2010: *Vliv stresu sucha a tepla na kvalitu ječmene a sladu*. *XL. Symposium o nových směrech výroby a hodnocení potravin*, 263–266.
- BONAN, G. B., 1993: *Physiological derivation of the observed between net primary production and mean annual temperature*. *Tellus*, 13, 45, 397-408.
- BOOGAARD, H. L., VAN DIEPEN, C. A., ROTTER, R. P., et al., 1998: *User's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST control center*

- 1.5. Technical Document 52. Winand Staring Centre, Wageningen, the Netherlands, 144.
- BOOGAARD, H. L., WOLF, J., SUPIT, I., et al., 2013: *A regional implementation of WOFOST for calculating yield gaps of autumn-sown wheat across the European Union*. Field Crops Research, 143, 130-142.
- BOOTE, K. J., PORTER, C., JONES, J. W., et al., 2015: *Sentinel site data for crop model improvement – definition and characterization*. J. L. Hatfield, D. Fleisher (Eds.), Improving Modeling Tools to Assess Climate Change Effects on Crop Response, Advances in Agricultural Systems Modeling, ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI, USA.
- BRÁZDIL R., KIRCHNER, K., 2007: *Vybrané přírodní extrémy a jejich dopady na Moravě a ve Slezsku*, Brno-Praha-Ostrava, 431.
- BRÁZDIL, R., ROŽNOVSKÝ, J., 1995: *Dopady možné změny klimatu na zemědělství v České republice*. Národní klimatický program ČR.
- BRUN, F., WALLACH, D., MAKOWSKI, D., JONES, J. W., 2006: *Working with dynamic crop models: evaluation, analysis, parameterization, and applications*. Elsevier.
- CASSEL, D. K., KLUTE, A., 1986: *Water potential: Tensiometry*. Klute A. (ed.) Methods of Soil Analysis, Part I, Physical and Mineralogical Methods. Madison, Wisconsin, USA: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, 563–596.
- CONFALONIERI, R., ACUTIS, M., BELLOCCHI, G., et al., 2009: *Multi-metric evaluation of the models WARM, CropSyst, and WOFOST for rice*. Ecological Modelling, 220, 1395-1410.
- COUCHENEY, E., BUIS, S., LAUNAY, M., et al., 2015: *Accuracy, robustness and behavior of the STICS soil – crop model for plant, water and nitrogen outputs: evaluation over a wide range of agro-environmental conditions in France*. Environ. Model. Softw., 64, 177–190.
- ČERMÁK P., LIPA VSKÝ, J., 2012: *Dlouhodobé polní pokusy*. Seminář k výročí AZPP v ČR, Databáze online [cit. 10-07-2016]. Dostupné na: www.eagri.cz/public/web/file/216018/_07_Cermak__VURV.pdf.
- ČERNÝ, L., 2007: *Jarní sladovnický ječmen. Pěstitelský rádce*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze. 39. ISBN: 978-80-87111-04-8.

- ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD, 2016: *Zemědělství – časové řady*. Databáze online [cit. 11-02-2016]. Dostupné na: www.czso.cz/csu/czso/definitivni-udaje-o-sklizni-zemedelskych-plodin-2015.
- DAVIES, J. A., MCKAY, D. C. 1988: *Evaluation of selected models for estimating solar radiation on horizontal surfaces*. *Solar Energy*, 43, 153–168.
- DE WILLIGEN, P., 1991: *Nitrogen turnover in the soil-crop system; comparison of fourteen simulation models*. *Nitrogen Turnover in the Soil-Crop System*. Springer Netherlands, 141-149.
- DE WIT, C. T., 1978: *Simulation of assimilation and transpiration of crops*. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, The Netherlands.
- DE WIT, C. T., 1982: *Simulation of living systems*. W. T. Penning de Vries, H. H. van Laar (Eds.), *Simulation of Plant Growth and Crop Production*, Simulation Monographs, Wageningen, The Netherlands, 3–8.
- DE Wit, C. T., 1985: *Modelling agricultural production*. *Acta Horticulturæ* 184, 59-70.
- DE WIT, C. T., VAN KEULEN, H., 1987: *Modelling production of field crops and its requirements*. *Geoderma*, 40, 253–265.
- DIKINSON, R. E., HENDERSON-SELLERS, A., KENNEDY, P. J., 1993: *Biosphere Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model*. NCAR Tech. Note., 387, 22.
- DOLTRA, J., LAEGDSMAND, M., OLESEN, J. E., et al., 2011: *Cereal yield and quality as affected by N availability in organic and conventional crop rotations in Denmark: a combined modeling and experimental approach*. *Eur. J. Agron.*, 34, 83–95.
- DSSAT, 2016: Databáze online [cit. 02-10-2015]. Dostupné na: www.dssat.net.
- DUBROVSKÝ, M., HAYES, M., DUCE, P., et al., 2014: *Multi-GCM projections of future drought and climate variability indicators for the Mediterranean region*. *Regional Environmental Change*, 14, 1907-1919.
- DUCHEMIN, B. J. C., 2008: *Structure, property and processing relationships of all-cellulose composites*.
- EITZINGER, J., ŠŤASTNÁ, M., ŽALUD, Z., et al., 2003: *A simulation study of the effect of soil water balance and water stress on winter wheat production under different climate change scenarios*. *Agricultural Water Management*, 61, 195-217.

- EITZINGER, J., THALER, S., SCHMID, E., et al., 2013: *Sensitivities of crop models to extreme weather conditions during flowering period demonstrated for maize and winter wheat in Austria*. The Journal of Agricultural Science, 151, 6, 813-835.
- EITZINGER, J., TRNKA, M., HOSCH, J., et al., 2004: *Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions*. Ecological Modelling, 171, 223-246.
- EITZINGER, J., TRNKA, M., SEMERÁDOVÁ, D., et al., 2013: *Regional climate change impacts on agricultural crop production in Central and Eastern Europe – hotspots, regional differences and common trends*. Journal of Agricultural Science, 151, 787–812.
- EVROPSKÝ HOSPODÁŘSKÝ PROSTOR (EHP), 1995: *Europe's Environment. The Dobris Assessment*. The European Agency, Copenhagen.
- EWERT, F., 2004: *Modelling Plant Responses to Elevated CO₂: How Important is Leaf Area Index?* Ann. Bot., 93, 619-627.
- FACCE-JPI, 2016: Databáze online [cit. 02-10-2015]. Dostupné na: www.faccejpi.com.
- FALKENMAR, M., 2003: *Water cycle and people: water for feeding humanity*. Land Use and Water Resources Research, 3, 1.
- FAOSTAT, 2016: FAO, *Statistics division*. Databáze online [cit. 11-02-2016]. Dostupné na: www.faostat3.fao.org/browse/Q/QC/E.
- GARRISON, M. V., BATCHELO R. W. D., KANWAR, R. S., 1999: *Evaluation of the CERES - Maize water and nitrogen balances under tile-drained conditions*. Agric. Syst., 62, 189–200.
- GOBRON, N. FAO: *Leaf Area Index (LAI)*. Databáze online [cit. 18-05-2016]. Dostupné na www.fao.org/docrep/fao/011/i0197e/i0197e15.pdf.
- GOWER, S. T., KUCHARIK, C. J., NORMAN, J. M., 1999: *Direct and indirect estimation of leaf area index*. FAPAR and net primary production of terrestrial ecosystems Remote Sensing of Environment, 70, 29–51.
- GRAß, R., THIES, B., KERSEBAUM, K. C., et al., 2015: *Simulating dry matter yield of two cropping systems with the simulation model HERMES to evaluate impact of future climate change*. European Journal of Agronomy, 70, 1-10.
- GROOT, J. J. R., VERBERNE, E. L. J., 1991: *Response of wheat to nitrogen fertilization, a data set to validate simulation models for nitrogen dynamics in crop and soil*. Nitrogen Turnover in the Soil-Crop System, 349-383.

- HABERLE, J., TRČKOVÁ, M., RŮŽEK, P., 2008: *Příčiny nepříznivého působení vlivu sucha a dalších abiotických faktorů na příjem a využití obilovinami a ožnosti jeho omezení*. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v. v. i., IBSN: 978-80-87011-45-4.
- HANSEN, S., ABRAHAMSEN, P., PETERSEN, C. T., et al., 2012: *Daisy: Model use, calibration, and validation*. Transactions of the ASABE, 55, 4, 1317-1333.
- HANSEN, S., JENSEN H. E., NIELSEN, N. E., et al., 1990: *DAISY-Soil Plant Atmospheric System Model*. NPOforskning fra Miljøstyrelsen, Miljøstyrelsen, Copenhagen, A10, 272.
- HÁJKOVÁ, L., VOŽENÍLEK, V., TOLASZ, R., et al., 2012: *Atlas fenologických poměrů Česka*. Praha, Olomouc, Český hydrometeorologický ústav Praha, Univerzita Palackého Olomouc, 311.
- HÁK, T., VRBA, J., LANDOVÁ, L., 2013: *Je vodní stopa užitečný ukazatel? = Is water footprint a worthwhile indicator?*. Vodní hospodářství, 63, 12, 399-402.
- HILLEL, D., ROSENZWEIG, C., 2010: *The Role of Soils in Climate Change 1*. Handbook of climate change and agroecosystems: impacts, adaptation, and mitigation, 1, 9.
- HLAVINKA, P., TRNKA, M., BALEK, J., et al., 2015: *Aplikace růstových modelů pro lokální hodnocení dopadů změny klimatu na vybrané plodiny*. Metodika pro praxi. Centrum výzkumu globální změny AV ČR v. v. i.
- HLAVINKA, P., TRNKA, M., KERSEBAUM, K. C., et al., 2014: *Modelling of yields and soil nitrogen dynamics for crop rotations by HERMES under different climate and soil conditions in the Czech Republic*. The Journal of Agricultural Science, 152, 2, 188-204.
- HODGES, T., 1991: *Predicting crop phenology*. CRC press. IBSN 0-8493-6745-X.
- HOEKSTRA, A. Y., 2003: *Virtual water: An introduction*. In: *Virtual water trade: Proceedings of the international expert meeting on virtual water trade*. Value of water research report series 11, 13-23.
- HOLZWORTH, D. P., SNOW, V., JANSSEN, S., et al., 2015: *Agricultural production systems modelling and software: current status and future prospects*. Environ. Model. Softw., 72, 276-286.
- HONSOVÁ, D., 2008: *Vlhkost půdy a metody jejího měření*. Příroda. Databáze online [cit. 18-05-2016]. Dostupné na: www.priroda.cz/clanky.php?detail=1101.
- CHALLINOR, A. J., EWERT, F., ARNOLD, S., et al., 2009: *Crops and climate*

- change: progress, trends, and challenges in simulating impacts and informing adaptation.* Journal of experimental botany, 60, 2775-2789.
- CHAPAGAIN, A. K., HOEKSTRA, A. Y., 2008: *The global component of freshwater demand and supply: an assessment of virtual water flows between nations as a result of trade in agricultural and industrial products.* Water international, 33, 19-32.
- CHAPAGAIN, A. K., HOEKSTRA, A. Y., SAVENIJE, H. H. G., et al., 2006: *The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries.* Ecological economics, 60, 186-203.
- CHATFIELD, C., 1995: *Model uncertainty, data mining and statistical inference.* Journal of the Royal Statistical Society, Series A. 158, 419–66.
- INES, A. V. M., MAKIN, P., IW DAS GUPTA, A., 2001: *Crop growth and soil water balance modeling to explore water management options.* 22, IWMI.
- IPCC, 2013: *Summary for Policymakers.* STOCKER, T. F., QIN, D., PLATTNER, G. K., TIGNOR, M., ALLEN, S. K., BOSCHUNG, J., NAUELS, A., XIA, Y., BEX, V. and MIDGLEY, P. M. (eds.), Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- JENSEN, L. S., MUELLER, T., NIELSEN, N. E., et al., 1997: *Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the soil-plant-atmosphere model DAISY.* Geoderma, 81, 5-28.
- JONES, J. W., HOOGENBOOM, G., PORTER, C. H., et al., 2003: *The DSSAT cropping system model.* Eur. J. Agron., 18, 235–265.
- KERSEBAUM, K. C., 1989: *Die Simulation der Stickstoff-Dynamik von Ackerböden* (Doctoral dissertation).
- KERSEBAUM, K. C., 1995: *Application of a simple management model to simulate water and nitrogen dynamics.* Ecological modelling, 81, 145-156.
- KERSEBAUM, K. C., 2007: *Modelling nitrogen dynamics in soil – crop systems with HERMES.* Nutrient Cycling in Agroecosystems, 77, 1, 39-52.
- KERSEBAUM, K. C., 2011: *Special features of the HERMES model and additional procedures for parameterization, calibration, validation, and applications.* L. R.

- Ahuja, L. Ma (Eds.), *Advances in Agricultural Systems Modeling Series 2* Amer. Soc. Agron., Madison, WI, USA, 65–94.
- KERSEBAUM, K. C., BOOTE, K. J., JORGENSON, J. S., et al., 2015: *Analysis and classification of data sets for calibration and validation of agro-ecosystem models*. *Environmental Modelling & Software*, 72, 402-417.
- KERSEBAUM, K. C., LORENZ, K., REUTER, H. I., 2005: *Operational use of agro-meteorological data and GIS to derive site specific nitrogen fertilizer recommendations based on the simulation of soil and crop growth processes*. *Physics and Chemistry of the Earth*, 30, 1-3, 59-67.
- KERSEBAUM, K. C., MATZDORF, B., KIESEL, J., et al., 2006: *Model-based evaluation of agri-environmental measures in the Federal State of Brandenburg (Germany) concerning N pollution of groundwater and surface water*. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 169, 352-359.
- KERSEBAUM, K. C., NAIN, A. S., NENDEL, C., et al., 2008: *Simulated effect of climate change on wheat production and nitrogen management at different sites in Germany*. *Journal of Agrometeorology* 10, Special Issue 2, 266-273.
- KERSEBAUM, K. C., NENDEL, C., MIRSCHEL, W., 2009: *Testing different CO₂ response algorithms against a face crop rotation experiment and application for climate change impact assessment at different sites in Germany*. *Időjárás : Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, 113, 1-2, 79-88.
- KERSEBAUM, K. C., STEIDL, J., BAUER, O., et al., 2003: *Modelling scenarios to assess the effects of different agricultural management and land use options to reduce diffuse nitrogen pollution into the river Elbe*. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 28, 537-545.
- KERSEBAUM, K. C., REUTER, H. I., LORENZ, K., 2002: *Modelling crop growth and nitrogen dynamics for advisory purposes regarding spatial variability*. L. Ahuja, L. Ma, T. Howell (Eds.), *Agricultural System Models in Field Research and Technology Transfer*, Lewis Publishers, Boca Raton, 229–252.
- KLEČKA, M., KORBÍNI, J., 1973: *Bonitace zemědělského půdního fondu ČSR, Závěrečná zpráva VÚEZVŽ a VÚEEP*, Praha-Bratislava, 51.
- KLEM, K., HŘIVNA, L., RYANT, P., et al., 2011: *Využití diagnostických metod pro rozhodovací procesy v pěstební technologii jarního ječmene*. Agrotest fyto, s.r.o. a Mendelova univerzita v Brně, ISBN 978-80-904594-0-3.

- KLOSS, S., PUSHPALATHA, R., KAMOYO, K. J., 2012: *Evaluation of crop models for simulating and optimizing deficit irrigation systems in arid and semi-arid countries under climate variability*. Water resources management, 26, 997-1014.
- KODEŠOVÁ, R., BRODSKÝ, L., 2006: *Comparison of CGMS-WOFOST and HYDRUS-1D simulation results for one cell of CGMS-GRID50*. Soil and Water Research, 2, 39-48.
- KOHUT, M., ROŽNOVSKÝ, J., CHUCHMA, F., 2008: *Vláhová bilance zemědělské krajiny*. Bioklimatologické aspekty hodnocení procesů v krajině, 9-11 Sep, Mikulov. ČBkS.
- KOLLAS, C., KERSEBAUM, K. C., NENDEL, C., et al., 2015: *Crop rotation modelling - a European model intercomparison*. European Journal of Agronomy, 70, 98-111.
- KOPECKÁ, V., MACHAR, I., BUČEK, A., et al., 2013: *Vliv klimatických změn na možnosti pěstování cukrové řepy v České republice*. Listy Cukrovarnické a Reparské, 129.
- KOSTELANSKÝ, F., 1997: *Obecná produkce rostlinná*. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita.
- KROBEL, R., SUN, Q., INGWERSEN, J., et al., 2010: *Modelling water dynamics with DNDC and DAISY in a soil of the North China Plain: a comparative study*. Environmental Modelling & Software, 25, 583-601.
- KŘEN, J., MÍŠA, P., 2012: *Metodika pro tvorbu odrůdové skladby obilovin*. Agrofesto fyto, s.r.o. a Ústav agrosystémů a bioklimatologie, Agronomická fakulta, Mendelova univerzita v Brně, IBSN 978-80-904594-6-5.
- KUBNER, R., MOSANDL, R., 2000: *Comparison of direct and indirect estimation of leaf area index in mature Norway spruce stands of eastern Germany*. Canadian Journal of Forest Research, 30, 440-447.
- KŮST, F., POTMĚŠILOVÁ, J., 2013: *Situační a výhledová zpráva obiloviny*. Praha: Ministerstvo zemědělství. 106, ISBN 9788074341342.
- LIPA VSKÝ, J., ČERMÁK, P., KŘEN, J., et al., 2010: *Dlouhodobé polní pokusy v ČR a ve světě*. Sborník z 16. mezinárodní konference Racionální použití hnojiv, 21-25.
- LIPA VSKÝ, J., MADARAS, M., KUBÁT, J., 2015: *Long-term field experiments in the Czech Republic*. 60th Anniversary of Long-term Field Experiments in the Czech Republic, 57-60.

- LITSCHMANN, T., 2010: *Měření půdní vlhkosti*. Amet, Velké Bílovice, Odborná přednáška. Databáze online [cit. 04-05-2016]. Dostupné na: www.is.muni.cz/el/1431/jaro2010/Z0075/um/Prednaska_Dr_Litschmann_PudniVlhkost.pdf.
- LIU, H. L., YANG, J. Y., DRURY, C. A., 2011: *Using the DSSAT-CERES-Maize model to simulate crop yield and nitrogen cycling in fields under long-term continuous maize production*. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 89, 313-328.
- LIU, J., 2009: *A GIS-based tool for modelling large-scale crop-water relations*. *Environmental Modelling & Software*, 24, 3, 411-422.
- LOBELL, D. B., CASSMAN, K. G., FIELD, C. B., 2009: *Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes*. *Annual review of environment and resources*, 34, 179.
- MA, G., HUANG, J., WU, W., et al., 2013: *Assimilation of MODIS-LAI into the WOFOST model for forecasting regional winter wheat yield*. *Mathematical and Computer Modelling*, 58, 634-643.
- MACSUR, 2016: Databáze online [cit. 10-04-2016]. Dostupné na: www.macsur.eu.
- MATEJKA, F., HURTALOVÁ, T., ROZNOVSKÝ, J., et al., 2005: *Effect of soil moisture on evapotranspiration of a maize stand during one growing season*. *Contrib. Geophys. Geod*, 35, 219-228.
- MELOUN, M., MILITKÝ, J., 2002: *Kompendium statistického zpracování dat: metody a řešené úlohy včetně CD*, Academia.
- MEKONNEN, M. M., HOEKSTRA, A. Y., 2011: *The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products*. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 1577-1600.
- MOSES, J. A., JAYAS, D. S., ALAGUSUNDARAM, K., 2015: *Climate change and its implications on stored food grains*. *Agricultural Research*, 4, 21-30.
- MŽP, 2015: *Adaptační strategie*. Databáze online [cit. 03-04-2016]. Dostupné na: www.mzp.cz/cz/zmena_klimatu_adaptacni_strategie.
- MŽP, 2016: *Národní program na zmírnění dopadů změny klimatu v ČR*. Databáze online [cit. 20-06-2016]. Dostupné na: [www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/-cz/narodni_program_zmirneni_dopadu/\\$FILE/OZK-Narodni_program-20040303.pdf](http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/-cz/narodni_program_zmirneni_dopadu/$FILE/OZK-Narodni_program-20040303.pdf).
- NIELSEN, D. R., BOUMA, J., 1985: *Soil spatial variability*. In *Proceedings of a*

- Workshop of the ISSS and the SSSA, Las Vegas (USA), 30 Nov-1 Dec 1984. Pudoc.
- NIX, H., 1984: Minimum datasets for agrotechnology transfer. ICRISAT, Proc. Int. Symposium on Minimum Data Sets for Agrotechnology Transfer, ICRISAT Center, Patancheru, A. P., India, 181–188.
- NIX, H., 1985: *Agriculture*. R. W. Kates, J. H. Ausubel, M. Berberian (Eds.), Climate Impact Assessment. Studies of the Interaction of Climate and Society (Scope 27), John Wiley & Sons, Chichester, 105–130.
- NOVÁK, V., 1995: *Vyparovanie vody v prírode a metody jeho určovania*. vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, Bratislava, 158 - 191.
- OLESEN, J. E., TRNKA, M., KERSEBAUM, K. C., et al., 2012: *Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change*. European Journal of Agronomy, 43, 2, 96-112.
- PALOSUO, T., KERSEBAUM, K. C., ANGULO, C., et al., 2011: *Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: a comparison of eight crop growth models European*. Journal of Agronomy, 35, 3, 103-114.
- PENKA, M., 1985: *Transpirace a spotřeba vody rostlinami*. 1. vyd. Praha, Academia, 250.
- PENNIN DE VRIES, F. W. T., LAAR, H. V., 1982: *Simulation of plant growth and crop production*. Simulation of plant growth and crop production.
- PORTER, J. R., SEMENOV, M. A., 2005: *Crop responses to climatic variation*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences, 360, 2021-2035.
- PORTER, J. R., 1993: *AFRCWHEAT2: a model of the growth and development of wheat incorporating responses to water and nitrogen*. European Journal of Agronomy, 2, 69-82.
- PORTER, C. H., JONES, J. W., ADIKU, S., et al., 2010: *Modeling organic carbon and carbon-mediated soil processes in DSSAT v4*. 5. Operational Research, 10, 247-278.
- PORTER, C. H., VILLALOBOS, C., HOLZWORTH, D., et al., 2014: *Harmonization and translation of crop modeling data to ensure interoperability*. Environ. Model. Softw., 62, 495–508.
- POTOPOVÁ, V., TÜRKÖTT, L., 2014: *Agronomic evidence as input data for*

- CROPGRO vegetables model*. Úroda, 62, 12, s. 405-408. ISSN: 0139-6013.
- POTTER, E., 1996: *SunScan Canopy Analysis System User Manual SS1- UM-1.05*. Version 1.05. Cambridge, Delta-T Devices Ltd, 86.
- PRETEL, J., METELKA, L., KALVOVÁ, J., et al., 2010: *Zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních opatření (V)*. Praha: ČHMÚ.
- REUTER, H. I., KERSEBAUM, K. C., 2009: *Applications in precision agriculture. Developments in Soil Science*, 33, 623-636.
- RICHARDS, L. A., 1931: *Capillary conduction of liquids through porous mediums*. Phys. J. Gen. Appl. Phys., 1, 318-333.
- RITCHIE, J. T., 1972: *Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover*. Water Resour. Res., 8, 1024-1213.
- RITCHIE, J. T., 1991: Specifications of the ideal model for predicting crop yields. Muchow, R. C. and J.A. Bellamy (eds.). *Climatic risk in crop production: models and management for the semiarid tropics and subtropics*. CAB-International, Wallingford. 97-122.
- ROSENZWEIG, C., JONES, J. W., HATFIELD, J. L., et al., 2013: *The agricultural model intercomparison and improvement project (AgMIP): protocols and pilot studies*. Agric. For. Met., 170, 166-182.
- RÖTTER, R. P., PALOSUO, T., KERSEBAUM, K. C., et al., 2012: Simulation of spring barley yield in different climatic zones of Northern and Central Europe: a comparison of nine crop models. *Field Crops Research*, 133, 23-36.
- ROŽNOVSKÝ, J., 2011: *Možné dopady měnícího se klimatu na zemědělství v ČR*. Zpravodaj ekozemědělci přírodě, 19-20.
- RUNNING, S. W., COUGHLAN, J. C., 1988: *A general model of forest ecosystem processes for regional applications*. I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological modelling*, 42, 125-154.
- SAAB, M. T. A., TODOROVIC, M., ALBRIZIO, R., 2015: *Comparing AquaCrop and CropSyst models in simulating barley growth and yield under different water and nitrogen regimes. Does calibration year influence the performance of crop growth models?* *Agricultural Water Management*, 147, 21-33.
- SÁŇKA, M., MATERNA, J., 2004: *Indikátory kvality zemědělských a lesních půd ČR*. Ministerstvo životního prostředí.

- SAU, F., BOOTE, K. J., BOSTICK, W. M., et al., 2004: *Testing and improving evapotranspiration and soil water balance of the DSSAT crop models*. *Agronomy Journal*, 96, 1243-1257.
- SAVIN, R., NICOLAS, M. E., 1999: *Effects of timing of heat stress and drought on growth and quality of barley grains*. *Aust. J. Agric. Res.*, 50, 357–364.
- SELLERS, P. J., MINTZ, Y. C. S. Y., SUD, Y. E. A., et al., 1986: *A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models*. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 43, 505-531.
- SEMENOV, M. A., SHEWRY, P. R., 2011: *Modelling predicts that heat stress, not drought, will increase vulnerability of wheat in Europe*. *Sci. Rep.*, 1.
- SIEBERT, S., DOLL, P., 2010: *Quantifying blue and green virtual water contents in global crop production as well as potential production losses without irrigation*. *Journal of Hydrology*, 384, 198-217.
- SIVERTSEN, T. H., NEJEDLIK, P., OGER, R., et al., 1999: *The phenology of crops and the development of pests and diseases*. COST 711, The operational applications of meteorology to agriculture, including horticulture, ISBN 82-479-0125-0.
- SKIERUCHA, W., 2011: *Time domain reflectometry: temperature-dependent measurements of soil dielectric permittivity*. INTECH Open Access Publisher.
- SMITH, J. B., HUQ, S., MATA, L. J., et al., 1997: *Vulnerability and Adaptation to Climate Change*. Kluwer Acad. Publisher. 365.
- SMITH, P., FURSE C., GUNTHER, J., 2005: *Analysis of spread spectrum time domain reflectometry for wire fault location*. *IEEE Sensors Journal*, 5.1469–1478.
- SPITTER, C. J. T., KRAALIGEN, D. W. G, VAN KEULEN, H., 1989: *A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87*. R.Rabbinge, S. A. Ward, H. H. Van Laar, *Simulation and system management in crop protection*, Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen. 147-181.
- SPITTERS, C. J. T., SCHAPENDONK, A. H. C. M., 1990: *Evaluation of breeding strategies for drought tolerance in potato by means of crop growth simulation*. *Genetic Aspects of Plant Mineral Nutrition*, Springer Netherlands, 151-161.
- STEDUTO, P., HSIAO, T. C., RAES, D., et al., 2009: *AquaCrop - The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles*. *Agronomy Journal*, 101, 426-437.

- STEVEN, M. D., CLARK, J. A., 1990: *Applications of remote sensing in agriculture*. Butterworths.
- SUPIT, I., HOOIJER, A. A., VAN DIEPEN, C. A., 1994: System description of the WOFOST 6.0 crop simulation model implemented in CGMS. European Commission, Brussels (Belgium). Joint Research Centre eng Hooijer, A. A. (ed.).
- SVENDSEN, H., HANSEN, S., JENSEN, H. E., 1995: *Simulation of crop production, water and nitrogen balances in two German agro-ecosystems using the DAISY model*. Ecological modelling, 81, 197-212.
- ŠÍR, M., TESAŘ, M., LICHNER, L., SYROVÁTKA, O., 2002: *Klimatická změna a transpirace rostlin*. Patera A., Váška J., Jakubíková A. (editoři): Workshop, 151-156.
- ŠIŠKA, B., ŠABÍK, M., TAKÁČ, J., et al., 2013: *Possible impacts of future climate on variability of yields of winter wheat in Slovakia*. Environmental changes and adaptation strategies: international scientific conference, 9th-11th September 2013, Skalica, Slovakia. Nitra: Slovenská poľnohospodárska univerzita, ISBN 978-80-552-1066-7.
- TAKÁČ, J., 2001: *Dôsledky zmeny klímy na bilanciu vody v poľnohospodárskej krajine*. NKP 10/01 – Monitorovanie klimatickej zmeny. MŽP SR a SHMÚ, Bratislava, 16-26.
- TAKÁČ, J., ŠIŠKA, B., 2011: *Calibration and Validation of DAISY model in Conditions of the Slovak Republic*. Vedecké práce Výskumného ústavu pôdozvedectva a ochrany pôdy, 216, 161–172.
- TAVAKOLI, A. R., MOGHADAM, M. M., SEPASKHAH, A. R., 2015: *Evaluation of the AquaCrop model for barley production under deficit irrigation and rainfed condition in Iran*. Agricultural Water Management, 161, 136-146.
- THALER, S., EITZINGER, J., TRNKA, M., et al., 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.
- THORP, K. R., DEJONGE, K. C., KALEITA, A. L., et al., 2008: *Methodology for the use of DSSAT models for precision agriculture decision support*. Computers and Electronics in Agriculture, 64, 276-285.
- TIMSINA, J., GODWIN, D., HUMPHREYS, E., et al., 2008: *Evaluation of options for increasing yield and water productivity of wheat in Punjab, India using the*

- DSSAT-CSM-CERES-Wheat model*. Agricultural Water Management, 95, 1099-1110.
- TODOROVIC, M., ALBRIZIO, R., ZIVOTIC, L., et al., 2009: *Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes*. Agronomy Journal, 101, 509-521.
- TOMIŠKA, Z., SLÁDKOVÁ, J., VAŇKOVÁ, L., 2003: *Bodové hodnocení produkční schopnosti půd (Vybraná stanoviště ČR) – Souhrnná zpráva*. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrana půdy Praha, 88, 96, 145.
- TOOP, G. C., DAVIS, J. L., ANNAN, A. P., 2003: *The early development of TDR for soil measurements*. Vadose Zone J., 2, 492–499.
- TRNKA, M., RÖTTER, R., RUIZ-RAMONEZ, M., 2014: *Adverse weather conditions for European wheat production will become more frequent with climate change*. Nature climate change, 4, 637-643.
- TRNKA, M., DUBROVSKÝ, M., HLAVINKA, P., et al., 2006: *Spring barley production in the climate change hot spot – Czech Republic as a case study*. 6th European Conference on Applied Climatology, 9, 3-8.
- TRNKA, M., DUBROVSKÝ, M., SEMERÁDOVÁ D., et al., 2004: *Projections of uncertainties in climate change scenarios into expected winter wheat yields*. Theoretical and Applied Climatology, 77, 229–249.
- TRNKA, M., OLESEN, J. E., KERSEBAUM, K. C., et al., 2011: *Agroclimatic conditions in Europe under climate change*. Global Change Biology, 17, 2298-2318.
- TSUJI, G. Y., DU TOIT, A., JINTRAWET, A., et al., 2002: *Benefits of models in research and decision support: the IBSNAT experience*. L.R. Ahuja, L. Ma, T.A. Howell (Eds.), Agricultural System Models in Field Research and Technology Transfer, Lewis Publishers, New York, 71–89.
- UEHARA, G., TSUJI, G. Y., 1998: *Overview of IBSNAT*. Understanding Options for Agricultural Production, Springer Netherlands, 1-7.
- UEHARA, S., NIKJOO, H., GOODHEAD, D. T., 1993: *Cross-sections for water vapour for the Monte Carlo electron track structure code from 10 eV to the MeV region*. Physics in Medicine and Biology, 38, 1841.
- ULLRICH, S., 2011: *Barley: Production, Improvement, and Uses*. Wiley-Blackwell, ISBN: 978-0-8138-0123-0.

- UZEI, 2014: *Vývoj zemědělského poradenského a znalostního systému ministerstva zemědělství v České republice*. Zemědělský poradenský a znalostní systém MZe na léta 2014–2020, Databáze online [cit. 18-05-2016]. Dostupné na: www.uzei.cz/data/usr_001_cz_soubory/historieporadenstvi140926.pdf.
- VAN DAM, J. C., FEDDES, R. A., 2000: *Numerical simulation of infiltration, evaporation and shallow groundwater levels with the Richards equation*. Journal of Hydrology, 233, 72-85.
- VAN DAM, J. C., 2000: *Field-scale water flow and solute transport. SWAP model concepts, parameter estimation, and case studies*. PhD-thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 167.
- VAN DAM, J. C., GROENENDIJK, P., HENDRIKS, R. F. A., et al., 2008: *Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP*. Vadose Zone J., 7, 2.
- VAN DEN BERG, M., P. M. DRIESSEN, M., RABBINGE, R., 2002: *Water uptake in crop growth models for land use systems analysis*. II Ecol. Model., 148, 233–250.
- VAN DIEPEN, C. A., 1992: *An agrometeorological model to monitor the crop state on a regional scale in the European Community: Concept implementation and first operational outputs*. Proceedings of the Conf. On Application of Remote Sensing to Agricultural Statistics, Belgirate, Italy, 269-277.
- VAN DIEPEN, C. A., VAN DER WAL, T., 1995: *Crop growth monitoring and yield forecasting at regional and national scale*. Dallemand and Vossen (Eds), 1995. Publication EUR 16008 EN of the Office for Official Publications of the E. C. Luxembourg, 143-158.
- VAN DIEPEN, C. A., WOLF, J., KEULEN, H. V., et al., 1989: *WOFOST: a simulation model of crop production*. Soil use and management, 5, 1, 16-24.
- VAN ITTERSUM, M. K., RABBINGE, R., 1997: *Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations*. Field Crops Research, 52, 197-208.
- VAN KEULEN, H., 1976: *Evaluation of models*. G. W. Arnold, C. T. de Wit (Eds.), Critical Evaluation of System Analysis in Ecosystem Management, Simulation Monographs, Wageningen, The Netherlands, 22–29.
- VAN KEULEN, H., VAN DIEPEN, C. A., 1990: *Crop growth models and agro-ecological characterization*. Scaife, A. (ed.): Proceedings of the first congress of

- the European Society of Agronomy, 2, 1-16.
- VAN KEULEN, H., SELIGMAN, 1987: *Simulation of Water Use, Nitrogen Nutrition and Growth of a Spring Wheat Crop*. Simulation Monographs, Wageningen, Netherlands.
- VAN KEULEN, H., STOL, W., 1991: *Quantitative aspects of nitrogen nutrition in crops*. Fert. Res., 27, 151–160.
- VAN KEULEN, H., WOLF, J., 1986: *Modelling of Agricultural Production: Weather, Soils and Crops*. Simulation Monographs, Wageningen, The Netherlands.
- VANUYTRECHT, E., RAES, D., STEDUTO, P., et al., 2014: *AquaCrop: FAO'S crop water productivity and yield response model*. Environmental Modelling & Software, 62, 351-360.
- VERDOODT, A., VAN RANST, E., YE, L., 2004: *Daily simulation of potential dry matter production of annual field crops in tropical environments*. Agronomy Journal, 96, 1739-1753.
- VERECKEN, H., VANCLOOSTER, M., SWERTS, M., et al., 1991: *Simulating water and nitrogen behaviour in soils cropped with winter wheat*. Nitrogen Turnover in the Soil-Crop System, Springer Netherlands, 233-243.
- WAGENET, R. J., 1998: *Scale issues in agroecological research chains*. Nutr. Cycl. Agroecosyst., 50, 23–34.
- WANG, X., WANG, Q., FAN, J., et al., 2013: *Evaluation of the AquaCrop model for simulating the impact of water deficits and different irrigation regimes on the biomass and yield of winter wheat grown on China's Loess Plateau*. Agric. Water Manage. 129, 95–104.
- WHITE, J. W., HUNT, L. A., BOOTE, K.J., et al., 2013: *Integrated description of agricultural field experiments and production: the ICASA version 2.0 data standards*. Comput. Electron. Agric., 96, 1–12.
- WILHELM, W. W., RUWE, K., SCHLEMMER, M. R., 2000: *Comparison of three leaf area index meters in a corn canopy*. Crop Science, 40, 1179-1183.
- WILMOT, C. J., 1981: *Some comments on the evaluation of model performance*. Bull. Am. Meteorol. Soc., 64, 1309–1313.
- WU, D., OUYANG, Z., ZHAO, X., et al., 2002: *The applicability research of WOFOST model in North China Plain*. Acta Phytocological Sinica, 27, 594-602.
- XEVI, E., GILLEY, J., FEYEN, J., 1996: *Comparative study of two crop yield*

- simulation models*. Agric. Water Manage, 30, 155– 173.
- YIELDGA, 2016: Databáze online [cit. 10-04-2016]. Dostupné na: www.yieldgap.org.
- ZHUO, L., MEKONNEN, M. M., HOEKSTRA, A. Y., 2016: *The effect of inter-annual variability of consumption, production, trade and climate on crop-related green and blue water footprints and inter-regional virtual water trade: A study for China (1978–2008)*. Water research, 94, 73-85.
- ZHUO, L., MEKONNEN, M. M., HOEKSTRA, A. Y., et al., 2016: *Inter-and intra-annual variation of water footprint of crops and blue water scarcity in the Yellow River basin (1961–2009)*. Advances in Water Resources, 87, 29, 41.
- ZIMOLKA, J., CERKAL, R., DVOŘÁK, J., et al., 2007: *Ječmen, formy a užitkové směry v České republice*. Profi přes s.r.o, IBSN 80-86726-18-5.
- ŽALUD, Z., 2015: Bioklimatologie. Mendelova univerzita v Brně, IBSN 918-80-7509-189-5.
- ŽALUD, Z., 2001: Možnosti využití růstových modelů. Habilitační práce, Agronomická fakulta, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 1-148.
- ŽALUD, Z., BALEK, J., BARTOŠOVÁ, L., et al., 2009: *Změna klimatu a české zemědělství-dopady a adaptace*. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně.
- ŽALUD, Z., DUBROVSKÝ, M., 2002: *Modeling climate change impacts on maize growth and development*. Theoretical Applied Climatology, 72, 85–102.

8 PŘÍLOHY

8.1 Seznam zkratk

AgMIP	Mezinárodní projekt, zabývající se oblastí pěstování plodin (The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project)
AQUACROP	Růstový model (Crop Water Productivity Model)
BPEJ	Bonitovaná půdně ekologická jednotka
CERES-Barley	Růstový model simulující ječmen jarní, patří pod software DSSAT
CGMS	Monitorovací systém, který je v současnosti v rámci Evropy používaný pro prognózy výnosů (Crop growth monitoring systém)
CO ₂	Oxid uhličitý
CH ₄	Methan
CWFS	Centrum pro světovou potravinovou studii (Center for World Food Studies)
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČSÚ	Český statistický úřad
DAISY	Růstový model
DSSAT	Software, který obsahuje simulační modely, mezi které patří CERES-Barley (Decision Support System for Agrotechnology Transfer)
EHP	Evropský hospodářský prostor
ET ₀	Referenční evapotranspirace
ET _a	Aktuální evapotranspirace
FACCE-JPI	Iniciativa zabývající se udržitelným zemědělstvím (The Joint Programming Initiative on Agriculture, Food Security and Climate Change)
FAO	Organizace pro výživu a zemědělství (Food and Agriculture Organization of the United Nations)
FAOSTAT	Statistická databáze FAO (Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database)
FAR	Fotosynteticky aktivní záření
GIS	Geografický informační systém
GYGA	Mezinárodní projekt zabývající se potravinovou bezpečností

(Global yield gap atlas)

HERMES	Růstový model
HTZ	Hmotnost tisíce zrn
IA	Index shody (Index of agreement)
IBSNAT	Projekt zabývající se vývoje softwarů pro podporu rozhodování v zemědělství (the International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer)
IPPC	Mezinárodní panel zabývající se změnou klimatu (Intergovernmental Panel on Climate Change)
LAI	Leaf area index, index listové plochy
MACSUR	Projekt zabývající se potravinovou bezpečností (Modeling European ruminant production systems)
MBE	Střední průměrná chyba (Mean bias error)
MENDELU	Mendelova univerzita v Brně
MŽP	Ministerstvo životního prostředí
N_{\min}	Minerální dusík
N_2O	Oxid dusný
NH_4	Dusík amonný
NO_3	Dusík nitrátový
PAI	Nadzemní plochu všech částí rostliny (Plant area index)
RMSE	Střední kvadratická chyba (Root mean square error)
SunScan	Senzor slunečního záření pod listovou plochu
SWAP	Růstový model (Soil-Water-Atmosphere-Plant)
TDR	Senzor měřící objemovou vlhkost půdy (Time-domain reflectometer)
ÚKZÚZ	Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský
VÚMOP	Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy
VÚRV	Výzkumný ústav rostlinné výroby, v. v. i.
VÚZ	Zemědělský výzkumný ústav Kroměříž, s.r.o.
WOFOST	Růstový model (WORLD FOOD STUDIES)
Φ MODELŮ	Porovnání výkonosti ansámblu modelů (Multi model mean)

8.2 Seznam obrázků

- Obrázek 1: *Grafické znázornění vývoje osevních ploch a průměrných ročních výnosů a) v letech 1990 – 2003 a b) v letech 2004-2015 pro ječmen jarní v České republice (ČSÚ, 2015).*
- Obrázek 2: *Zjednodušené schéma použití růstového modelu pro odhadnutí možných dopadů klimatických změn na růst a vývoj plodin (Žalud a Dubrovský, 2002).*
- Obrázek 3: *Schématické znázornění jednotlivých částí modelu DSSAT využívaného pro podporu rozhodovacích procesů v rostlinné produkci (Jones et al., 2003).*
- Obrázek 4: *Schematický přehled systému růstového modelu DAISY (Abrahamsen, 2000).*
- Obrázek 5: *Schéma vstupních proměnných bloků s minimálními součty váhových bodů potřebných pro jednotlivé kvalitativní třídy (více – Kersebaum et al., 2015).*
- Obrázek 6: *Přehled produkčních faktorů ovlivňujících velikost výnosů (Van Ittersum and Rabbinge, 1997; Lobell et al. 2009; Kostelanský et al 1997).*
- Obrázek 7: *Schematické znázornění zemědělsko-hydraulické složky růstového modelu DAISY (Abrahamsen, 2000).*
- Obrázek 8: *Schéma srovnávacího vyhodnocení výsledků dlouhodobých polních pokusů (Čermák a Lipavský, 2012).*
- Obrázek 9: *Mapa České republiky s vyznačenými zájmovými lokalitami.*
- Obrázek 10: *Schematické znázornění principu měření LAI pomocí přístroje SunScan (upraveno dle Pottera et al., 1996).*
- Obrázek 11: *Měření LAI pomocí přístroje SunScan v polním pokusu s ječmenem jarním MENDELU v Domanínku v roce 2014.*
- Obrázek 12: *Schéma znázorňující principy měření půdní vlhkosti (Litschmann, 2010).*
- Obrázek 13: *Schematické znázornění měření obsahu vody v půdě a elektrické vodivosti pomocí senzoru TDR (Skierucha, 2011).*
- Obrázek 14: *TDR senzor umístěný v polním pokusu MENDELU v Domanínku v roce 2012.*

- Obrázek 15: *Schematické znázornění umístění sádrových bločků v pokusu s experimentálními zákryty pro redukci srážek s ječmenem jarním.*
- Obrázek 16: *Sádrový bloček.*
- Obrázek 17: *Letecký snímek znázurňující pokusnou lokalitu v Domanínku (zdroj mapy Google Earth, online 26.07.2016).*
- Obrázek 18: *Upravený letecký snímek znázurňující místa pokusů v letech 2011 – 2014 v Domanínku (zdroj mapy Google Earth, online 26.07.2016).*
- Obrázek 19: *Schéma odrůdového polního pokusu MENDELU s ječmenem jarním v Domanínku, v letech 2011- 2014.*
- Obrázek 20: *Odrůdový polní pokus s ječmenem jarním MENDELU v Domanínku v roce 2012.*
- Obrázek 21: *Schéma polního pokusu MENDELU s ječmenem jarním a experimentálními zákryty pro redukci srážek redukující x % pokusné parcely.*
- Obrázek 22: *Polní pokus MENDELU s ječmenem jarním a experimentálními zákryty pro redukci srážek zakrývající 30 % pokusné parcely v Domanínku v roce 2013.*
- Obrázek 23: *Polní pokus MENDELU s ječmenem jarním odrůdou „Bojos“ a experimentálními zákryty pro redukci srážek zakrývající 70 % pokusné parcely v Domanínku v roce 2014.*
- Obrázek 24: *Grafické znázornění výsledků kalibrace pozorovaných a modely simulovaných termínů fenologické fáze kvetení.*
- Obrázek 25: *Grafické znázornění výsledků kalibrace pozorovaných a modely simulovaných termínů fenologické fáze zralosti.*
- Obrázek 26: *Grafické znázornění výsledků kalibrace reálných a modely simulovaných výnosů zrna.*
- Obrázek 27: *Kalibrace růstových modelů - srovnání reálných a simulovaných výnosů zrna ječmene jarního pomocí spojnicového grafu.*
- Obrázek 28: *Grafické znázornění naměřených a simulovaných hodnot indexu listové plochy (LAI) u ječmene jarního pro stanici Domanínek v roce 2011 variantu 1 a) a variantu 2 b).*
- Obrázek 29: *Grafické znázornění naměřených a simulovaných hodnot indexu listové plochy (LAI) u ječmene jarního pro stanici Domanínek v roce 2012*

variantu 1 a) a variantu 2 b).

- Obrázek 30: *Grafické znázornění naměřených a simulovaných hodnot indexu listové plochy (LAI) u ječmene jarního pro stanici Domanínek v roce 2013 variantu 1 a) a variantu 2 b).*
- Obrázek 31: *Grafické znázornění naměřených a simulovaných hodnot indexu listové plochy (LAI) u ječmene jarního pro stanici Domanínek v roce 2014 variantu 1 a) a variantu 2 b).*
- Obrázek 32: *Grafické znázornění měřených a modely simulovaných hodnot indexu listové plochy (LAI) u kalibrace pomocí krabicových diagramů pro ječmen jarní a stanici Domanínek v letech 2011 - 2014.*
- Obrázek 33: *Kalibrace růstových modelů - srovnání měřené a simulované půdní vlhkosti z polních pokusů MENDELU v Domanínku s ječmenem jarním v roce 2011 a), 2012 b), 2013 c) a 2014 d).*
- Obrázek 34: *Kalibrace růstových modelů - srovnání pomocí % rozdílu měřené a simulované půdní vlhkosti z polních pokusů MENDELU v Domanínku s ječmenem jarním v roce 2011 a), b) a v roce 2013 c), d).*
- Obrázek 35: *Kalibrace růstových modelů - srovnání pomocí % rozdílu měřené a simulované půdní vlhkosti z polních pokusů MENDELU v Domanínku s ječmenem jarním v roce 2012 a), b) a v roce 2014 c), d).*
- Obrázek 36: *Kalibrace - grafické znázornění měřené a simulované půdní vlhkosti z polních pokusů MENDELU v Domanínku s ječmenem jarním v letech 2011 – 2014.*
- Obrázek 37: *Grafické znázornění vyhodnocení kalibrace podle statistického ukazatele MBE pro fenologii a) a výnos zrna b).*
- Obrázek 38: *Grafické znázornění vyhodnocení kalibrace podle statistického ukazatele RMSE pro fenologii a) a výnos zrna b).*
- Obrázek 39: *Grafické znázornění vyhodnocení kalibrace podle statistického ukazatele IA pro fenologii a) a výnos zrna b).*
- Obrázek 40: *Grafické znázornění výsledků validace pozorovaných a modely simulovaných termínů fenologické fáze kvetení.*
- Obrázek 41: *Grafické znázornění výsledků validace pozorovaných a modely simulovaných termínů fenologické fáze zralosti.*
- Obrázek 42: *Grafické znázornění výsledků validace reálných a modely*

simulovaných výnosů zrna.

- Obrázek 43: *Validace růstových modelů - srovnání reálných a simulovaných výnosů zrna ječmene jarního pomocí spojnicového grafu.*
- Obrázek 44: *Grafické znázornění naměřených a simulovaných hodnot indexu listové plochy (LAI) u ječmene jarního pro stanici Domanínek v roce 2013 u varianty se zákrytem a) a kontrolní varianty b).*
- Obrázek 45: *Grafické znázornění naměřených a simulovaných hodnot indexu listové plochy (LAI) u ječmene jarního pro stanici Domanínek v roce 2014 u varianty se zákrytem a) a kontrolní varianty b).*
- Obrázek 46: *Grafické znázornění měřených a modely simulovaných hodnot indexu listové plochy (LAI) u validace pomocí krabicových diagramů pro ječmen jarní a stanici Domanínek v letech 2013 a 2014.*
- Obrázek 47: *Validace růstových modelů - srovnání měřené a simulované půdní vlhkosti z polního pokusu MENDELU v Domanínku s ječmenem jarním a experimentálními zákryty pro redukci srážek v roce 2013 pro zákryt a) a kontrolu b). Obrázek c) znázorňuje křivku vlhkostního potenciálu naměřeného sádrovými bločky.*
- Obrázek 48: *Validace růstových modelů - srovnání měřené a simulované půdní vlhkosti z polního pokusu MENDELU v Domanínku s ječmenem jarním a experimentálními zákryty pro redukci srážek v roce 2014 pro zákryt a) a kontrolu b). Obrázek c) znázorňuje křivku vlhkostního potenciálu naměřeného sádrovými bločky.*
- Obrázek 49: *Validace růstových modelů - srovnání pomocí % rozdílu měřené a simulované půdní vlhkosti z polních pokusů MENDELU v Domanínku s ječmenem jarním v roce 2013 a), b) a v roce 2014 c), d).*
- Obrázek 50: *Validace - grafické znázornění měřené a simulované půdní vlhkosti z polních pokusů MENDELU v Domanínku s ječmenem jarním v letech 2013 a 2014.*
- Obrázek 51: *Grafické znázornění vyhodnocení kalibrace podle statistického ukazatele MBE pro fenologii a) a výnos zrna b).*
- Obrázek 52: *Grafické znázornění vyhodnocení kalibrace podle statistického ukazatele RMSE pro fenologii a) a výnos zrna b).*
- Obrázek 53: *Grafické znázornění vyhodnocení kalibrace podle statistického*

ukazatele IA pro fenologii a) a výnos zrna b).

- Obrázek 54: *Grafické znázornění pořadí modelů pomocí standartizace rozpětím pro kalibraci (graf a) ukazatel MBE, graf c) ukazatel RMSE, graf e) ukazatel IA) a validaci (graf b) ukazatel MBE, graf d) ukazatel RMSE, graf f) ukazatel IA).*
- Obrázek 55: *Grafické znázornění pořadí modelů pomocí standartizace rozpětím (graf a) pro kalibraci, graf b) pro validaci) a pomocí bodového hodnocení (graf c) pro kalibraci, graf d) pro validaci).*
- Obrázek 56: *Polní pokusy v Domanínku v roce 2016.*

8.3 Seznam tabulek

- Tabulka 1: *Vstupní data potřebná pro spuštění simulací růstových modelů.*
- Tabulka 2: *Schematické znázornění zemědělsko-hydraulické složky růstového modelu DAISY (Abrahamsen, 2000).*
- Tabulka 3: *Souhrn základních půdních a klimatických údajů lokalit Lednice, Věřovan a Domanínku. Klimatické údaje jsou hodnoceny za období od r. 1971 do r. 2000. Bodová hodnota je stanovena v rámci 100 bodové stupnice.*
- Tabulka 4: *Tabulka s vyznačenými roky a lokalitami, které byly použity pro kalibraci a validaci růstových modelů.*
- Tabulka 5: *Termíny setí a dávky hnojení u odrůdových polních pokusů MENDELU s ječmenem jarním v Domanínku.*
- Tabulka 6: *Termíny setí a dávky hnojení u polních pokusů MENDELU s ječmenem jarním odrůdou „Bojos“ a zákryty v Domanínku v letech 2013, 2014.*
- Tabulka 7: *Statistické zhodnocení kalibrace indexu listové plochy (LAI).*
- Tabulka 8: *Statistické zhodnocení kalibrace půdní vlhkosti z let 2011 – 2014. Porovnání hodnot naměřených čidly TDR 1 a TDR 2 a hodnot simulovaných jednotlivými růstovými modely.*
- Tabulka 9: *Statistické zhodnocení validace indexu listové plochy (LAI).*
- Tabulka 10: *Statistické zhodnocení validace půdní vlhkosti z let 2013 – 2014. Porovnání hodnot naměřených čidly TDR a hodnot simulovaných jednotlivými růstovými modely.*
- Tabulka 11: *Porovnání vztahu mezi reálnými a simulovanými veličinami pomocí statistických ukazatelů MBE, RMSE a IA.*

ANOTACE

Modelování růstu a vývoje ječmene jarního

Disertační práce je zaměřena na modelování růstu a vývoje ječmene jarního v půdně klimatických podmínkách České republiky. Ječmen jarní byl modelován pomocí vybraného ansámblu růstových modelů, ke kterým patří WOFOST, CERES-Barley (DSSAT), HERMES, DAISY a AQUACROP. Růstové modely se od sebe navzájem liší svou komplexností a reprezentací ekofyziologických procesů. Byly vybrány na základě dobrých výsledků z velkých mezimodelových srovnávacích evropských studií. V této práci byla pro modelování využita experimentální data z polních pokusů ze třech odlišných lokalit v České republice – Lednice (Jihomoravský kraj), Věrovan (Olomoucký kraj) a Domanínku (Kraj Vysočina). Část dat byla poskytnuta ÚKZÚZem a část jich byla v letech 2011-2014 naměřena v polních pokusech s ječmenem jarním v Domanínku. Jednotlivé modely byly kalibrovány a následně validovány pomocí pozorovaných termínů nástupů fenologických fází, výnosů zrna, vývoji indexu listové plochy a dynamice půdní vody. Výsledky vykazují rozdílnost modelů v simulaci těchto proměnných a potvrzují stále častější trend, kterým je využívat více modelů současně, čímž se sníží stupeň nejistoty.

Klíčová slova: růstový model, polní pokus, fenologická fáze, výnos zrna, index listové plochy, půdní vlhkost