

## **Vliv nedostatku vody a závlahy na rychlost vývoje odrůd ozimé pšenice ve vztahu k změnám teploty porostu**

The impact of water shortage and irrigation on development rate of winter wheat cultivars in relation to canopy temperature changes

*Jan Haberle<sup>1</sup>, Lukáš Tůma<sup>2</sup>, Ivana Raimanová<sup>1</sup>, Barbora Henzlová<sup>1</sup>, Gabriela Kurešová<sup>1</sup>*

*Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.<sup>1</sup>; Česká zemědělská univerzita, Praha<sup>2</sup>*

### **Abstrakt**

Rychlost vývoje plodin závisí především teplotě a reakci na délku dne, ale je ovlivněna i zásobením rostlin vodou a živinami. V tříletém polním pokusu dosáhly odrůdy ozimé pšenice v podmínkách nedostatku vody zralosti v průměru o 8,5–11,5 dnů dříve ve srovnání se zavlažovaným porostem a o 4,5–4,7 dne dříve v porovnání s kontrolou. Sucho oproti závlaze a kontrole (zdanlivě) snížilo sumu efektivních teplot vzduchu (nad 0 °C) měřených ve 2 m od setí do zralosti o 154–223 °C a o 76–84 °C. Pozorované teploty porostu a teploty vypočtené pomocí empirického modelu naznačují, že rozdíly v teplotě stresovaných a zavlažovaných rostlin pšenice vysvětlují v průměru okolo 20–50% rozdílu v uvedené sumě efektivních teplot do zralosti. Model WOFOST simuloval pozorované zkrácení nebo prodloužení doby zralosti při zvýšení nebo snížení průměrných denních teplot vzduchu po kvetení o 1–3 °C.

**Klíčová slova:** fenologie, vodní stres, suma efektivních teplot, WOFOST

### **Abstract**

Crop development depends on temperatures and day length but it is also affected by availability of water and nutrients. In field experiment winter wheat cultivars reached maturity on average by 8,5 to 11,5 days and by 4,5 to 4,7 days earlier in comparison with irrigated and rain-fed, control, crops, respectively. Water shortage apparently reduced sum of effective temperatures (measured at 2 m) from sowing to maturity by 154–223 °C and by 76–84 °C in stress treatment in comparison with irrigated and control ones. Observed temperatures of canopy and temperatures calculated with empirical regression model suggest 20–50% of above differences in development were explained by increased temperatures in stressed canopy. Model WOFOST simulated observed shortening or prolongation of maturity time by increasing or reducing input average daily temperatures by 1–3 °C.

**Keywords:** phenology, water stress, sum of effective temperatures, WOFOST

## Úvod

Rychlost vývoje je jedním z hlavních druhových a odrůdových znaků, který mj. rajonizuje vhodnost daného genotypu pro určité stanovištní podmínky. Současně je průběh vývoje významný ukazatel pro aplikaci hnojiv, pesticidů a fyziologicky aktivních látek a pro hodnocení vlivu různých faktorů v závislosti na fázi vývoje. Z hlediska obchodu a organizace sklizně je důležitý odhad termínu dosažení (fyziologické a technologické) zralosti. Modelování a predikce vývoje plodin je založeno na sumě efektivních teplot a případné reakci na délku dne a potřebě vernalizace (Porter a Semenov 2005, Porter a Gawith 1999). Reakce na teplotu, délku dne a vernalizaci (jarovizaci) je u obilnin založena geneticky, lokusy Eps (earliness *per se*), Vrn a Prn (např. Laurie et al. 2004, Zheng et al. 2013).

Uplatnění konceptu sumy efektivních teplot má i slabá místa. Používá se průměrná teplota vzduchu ve 2 m, ale vzrostný vrchol nebo jiné orgány (u kterých dochází k načítání teplot) se např. u rostlin ozimé pšenice po řadu měsíců nacházejí pod nebo těsně nad povrchem půdy, kde jsou teploty často velmi odlišné od teploty vzduchu (Bonhomme 2000). Samotný způsob (frekvence) měření a výpočet průměrné teploty má z hlediska biologie rostlin význam pro interpretaci efektivní teploty, podobně jako uplatnění předpokladu lineárního nebo nelineárního průběhu vztahu mezi teplotou a vývojem (Streck et al. 2003).

I teplota rostlin v zapojeném porostu se liší od teploty vzduchu (např. Haberle et al. 2017a, Lukáš et al. 2019, Neukam et al. 2016). U ozimých obilnin se většinou používá hranice 0 °C, ale kritická hranice efektivní teploty se v průběhu růstu a vývoje více či méně mění (např. Slafer, Rawson 1995).

Rychlost vývoj je ovlivněna i fyziologickými procesy, které souvisejí s dostupností vody a živin, především s působením abiotických a biotických stresů. Vysoká úroveň zdrojů, dusíku a vody, prodlužuje dobu růstu do zralosti. V našich pokusech vyšší dávka dusíku prodlužovala vývoj ozimé pšenice většinou o 2–4 dny, více ve spojení s vyššími srážkami. Vliv vysokých teplot na dřívější dosažení zralosti u obilnin je dobře známý, ale není jednoduché ho oddělit od často souběžného působení nedostatku vody.

Z fyzikálních zákonitostí vyplývá, že každý povrch, ze kterého se odpařuje voda, se ochlazuje. Energie potřebná na fázovou přeměnu vody je vyjádřena skupenským teplem vypařování ( $\lambda$ ) a jeho hodnota závisí na teplotě vody,  $\lambda = 2,45 \text{ MJ.kg}^{-1}$  při 20 °C (Novák, 1995). Na každý gram vypařené vody při 20 °C si tak povrch vyžaduje 585 cal (2450 J) energie. Transpirace ochlazuje povrch rostlin, proto transpirující rostliny, které mají dost vody, mají nižší teplotu, než má okolní vzduch. Naproti tomu stresované rostliny se brání

suchu a ztrátě vody zavíráním průduchů, ale tím rostlina ztrácí schopnost se účinně ochlazovat.

Spolehlivá simulace vývoje rostlin je základní prvek úspěšné simulace plodin (např. Ceglar et al. 2019). V případě, že model nedokáže správně simulovat vývoj a dosažení fází kritických pro tvorbu výnosu nelze očekávat spolehlivý odhad ani dalších procesů, zvláště v podmínkách silného kolísání dostupnosti zdrojů. Plodinové modely teploty porostu, jako modifikující faktor vývoje, vesměs nezohledňují. Lze proto očekávat, že predikce vývoje se bude odchylovat od skutečnosti zvláště při nedostatku vody a také při vysoké/optimální dostupnosti vody (závlaze), která porostu umožňuje se účinně ochlazovat transpirací a mít dlouhodobě nižší teplotu než je teplota vzduchu.

Cílem příspěvku bylo určit změny v rychlosti vývoje ozimé pšenice vlivem sucha a závlahy v období po kvetení, vztáhnout tyto změny k teplotě porostu a simulovat vliv zvýšení teploty vzduchu na vývoj pšenice modelem WOFOST.

## **Materiál a metody**

V polním pokusu s šesti liniemi (2016–2017) a pěti odrůdami ozimé pšenice a pšenicí špaldou (2018) byl sledován vliv stresu sucha a závlahy na rychlost vývoje rostlin. Nedostatek vody byl indukován od metání až kvetení (BBCH 59–65) do zralosti (BBCH 89-90) zakrýváním porostu v případě silnějších srážek mobilním krytem (varianta S), optimální dodávka vody byla zajištěna od kvetení kapkovou závlahou (varianta V), kontrolní varianta (K) závisela na zásobě vody v půdě a srážkách. Všechny varianty a odrůdy byly hnojeny stejnou dávkou dusíku. V pokusech byly inspekce porostu v intervalu 2–7 dní zaznamenávány fáze vývoje, dosažení dané etapy vývoje bylo zaznamenáno při dosažení u 70 % rostlin nebo stébel. Popis pokusů s indukcí sucha je uveden v publikacích Raimanová et al. (2016), Haberle et al. (2017a,b, 2018).

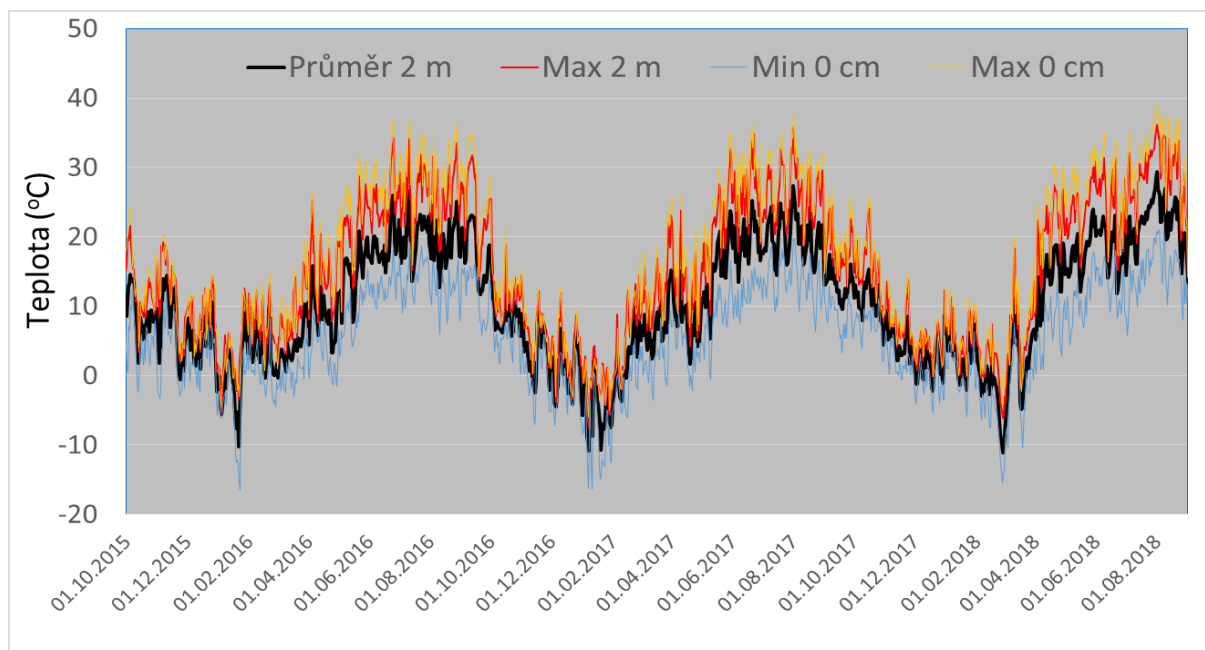
Údaje o teplotě porostu pšenice byly získány třemi postupy.

1. V letech 2016-2018 byla teplota porostu měřena ruční termokamerou (Flir), v několika termínech po kvetení (Haberle et al. 2017a,b, 2018).
2. Pro získání hodnot teploty v průběhu růstu byla v roce 2017 a 2018 v intervalu 60 a 15 minut zaznamenávána teplota vzduchu těsně nad porostem (posunováním čidel podle výšky rostlin).

3. Teploty porostu byly dále vypočteny pomocí empirického regresního modelu, odvozeného z kontinuálního tříletého monitoringu teplot porostu ozimé pšenice s odlišnou dostupností vody na dvou lokalitách v Německu (Neukam et al. 2016). Autoři určili faktory, které mají největší vliv a stanovily koeficienty vícenásobné lineární regrese pro modelování nejvyšší a nejnižší denní teploty porostu pšenice. Pro výpočet teploty pomocí regresního modelu jsme použili údaje z uvedených pokusů v Ruzyni. Jako vstupní povětrnostní charakteristiky vstupují do výpočtu průměrná, minimální a maximální teplota vzduchu (ve 2 m), intenzita slunečního záření, rychlost větru, sytostní doplněk vzduchu, listová plocha, výška porostu a vypočtená potenciální a aktuální evapotranspirace porostu.

Simulace vývoje pšenice byla provedena modelem WOFOST (de Witt et al. 2019, Ceglar et al. 2019). Vstupními hodnotami byly povětrnostní údaje a parametry půdy pokusné lokality, datum setí a vzcházení. Jako vstupní hodnoty sumy efektivních teplot od vzcházení do kvetení a od kvetení do sklizně pšenice byly použity průměrné pozorované hodnoty za předchozí ročníky v Ruzyni u kontrolní varianty. Dopad potenciálních změn teploty porostu oproti teplotě vzduchu ve 2 m byl modelován snížením (zavlažovaný porost) nebo zvýšením (stres) pozorovaných denních teplot po kvetení o 1 °C, 2 °C a 3 °C.

Údaje o teplotě, záření, rychlosti větru a vlhkosti vzduchu pocházejí z automatické stanice VÚRV (<https://www.vurv.cz/meteo/default.asp>) vzdálené 50–100 m od pokusné plochy.

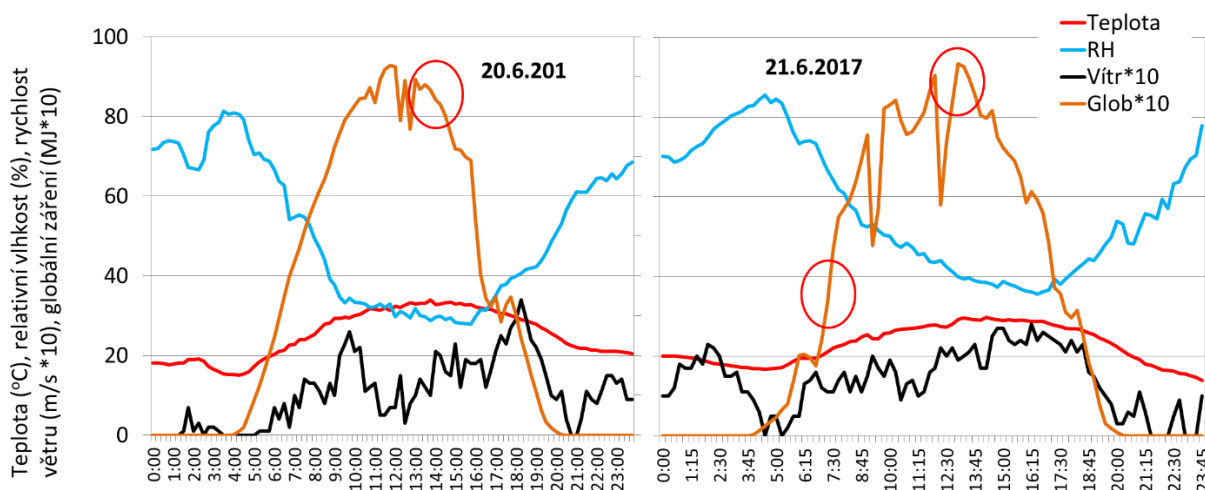


Obr. 1 Průměrné a maximální teploty vzduchu ve 2 m a minimální a maximální teploty na povrchu půdy. Stanice VÚRV, v.v.i., Praha – Ruzyně.

## Výsledky a Diskuze

### Povětrnostní podmínky

Na obr. 1 jsou znázorněny teploty vzduchu ve 2 m a na povrchu půdy v Ruzyni v letech 2015–2018. Z grafu jsou patrné extrémní v porovnání s průměrnou teplotou vzduchu ve 2 m. Na obrázku č. 2 je typický denní chod teploty, relativní vlhkosti a slunečního záření v teplém letním dni, kdy byla prováděna měření teploty porostu ruční kamerou.



Obr. 2 Příklad denního průběhu teploty, relativní vlhkosti vzduchu (RH), záření (Glob) a rychlosti větru v termínech měření teploty porostu ruční kamerou. Doba měření označena kroužkem.

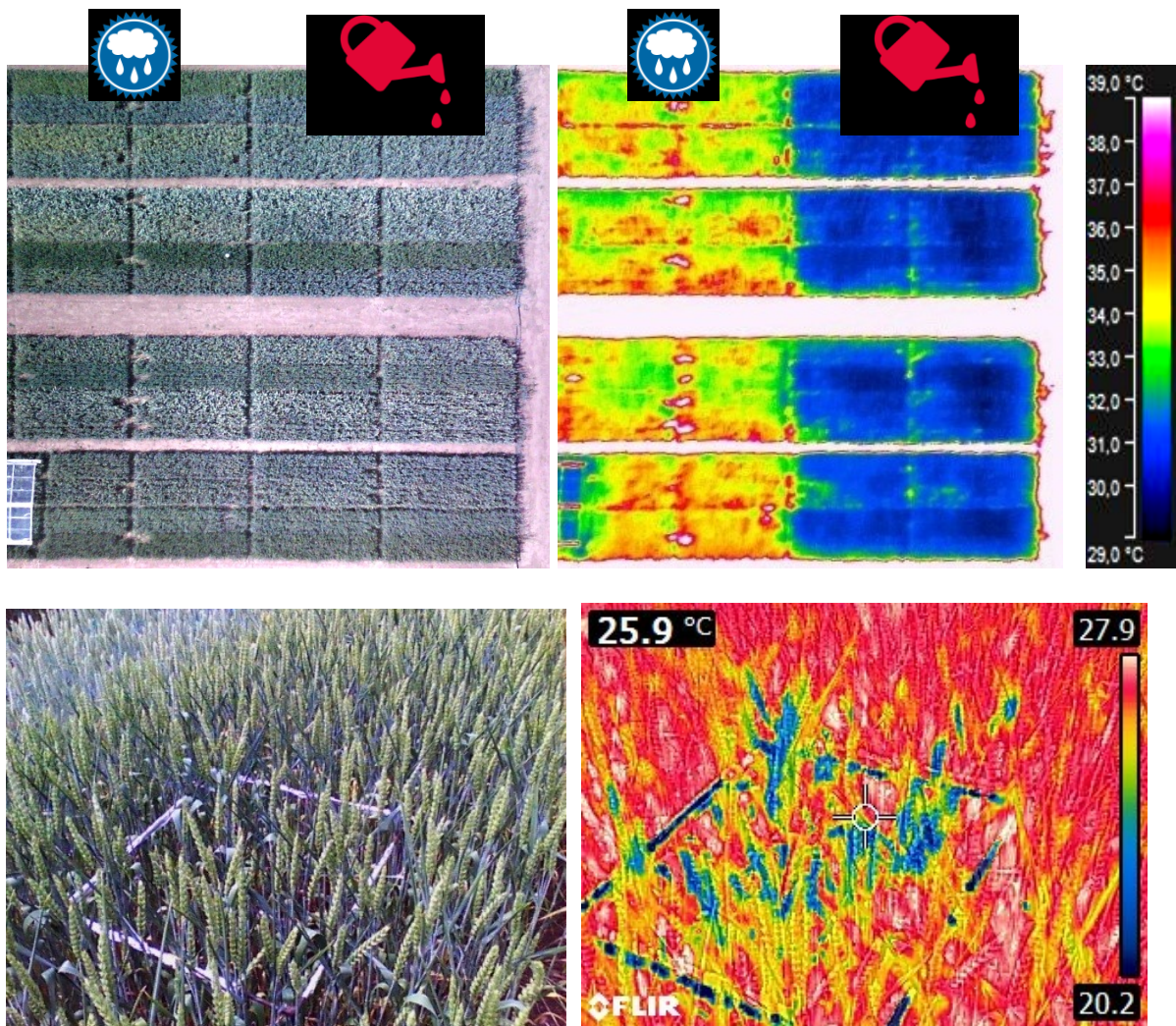
### Vliv odlišné dostupnosti vody

Stres zkrátil dobu do zralosti pšenice v letech pokusu v průměru o 8,5–11,5 dní ve srovnání se zavlažovanou variantou a ve srovnání s (rain-fed) kontrolou o 4,5–4,7. Všechny ročníky (2016 - 2018) byly výrazně teplé, s nevyrovnanou dodávkou vody srážkami, proto i rostliny na kontrole projevovaly známky stresu (stáčení a vadnutí listů, předčasné zasychání spodních pater listů). V tomto pokusu sucho oproti závlaze a kontrole snížilo (urychlením dosažení zralosti) sumu efektivních teplot vzduchu (nad 0 °C) měřených ve 2 m od setí do zralosti v letech pokusu o 154–223 °C a o 76–84 °C. To odpovídá průměrnému rozdílu denních teplot mezi variantami od kvetení do zralosti o 0,3–6,3 °C.

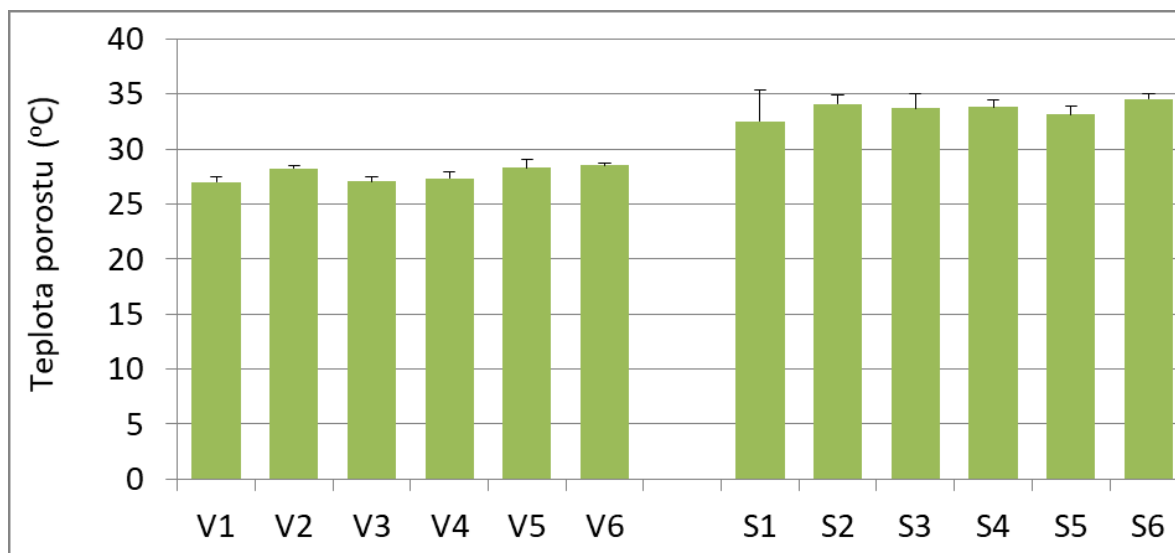
### Teplota porostu

Měření pomocí ruční termokamery prokázala vliv stresu a závlahy na teplotu porostu (obr. 3–4). Výrazné rozdíly v teplotě porostu se projevily mezi zavlažovaným porostem a variantou

S a K a dosáhly až 8 °C (Haberle et al. 2017a,b, 2018). Měření probíhalo ve dnech příhodných pro projev rozdílů v teplotě rostlin v důsledku odlišného ochlazování transpirací (vysoká teplota a jasná/skoro jasná obloha, nízká vlhkost vzduchu, obr. 2), ale rozdíly se v případě silného stresu projeví již na počátku dne. Měření probíhalo v období, kdy i stresované rostliny měly zachovány nejméně 2–3 horní listy. V dalším období nalévání zrna, kdy dochází postupně u stresovaných rostlin k vadnutí a zasychání horních listů a nakonec i praporcového listu, je zahřívání stresovaného téměř netranspirujícího porostu ještě intenzivnější.



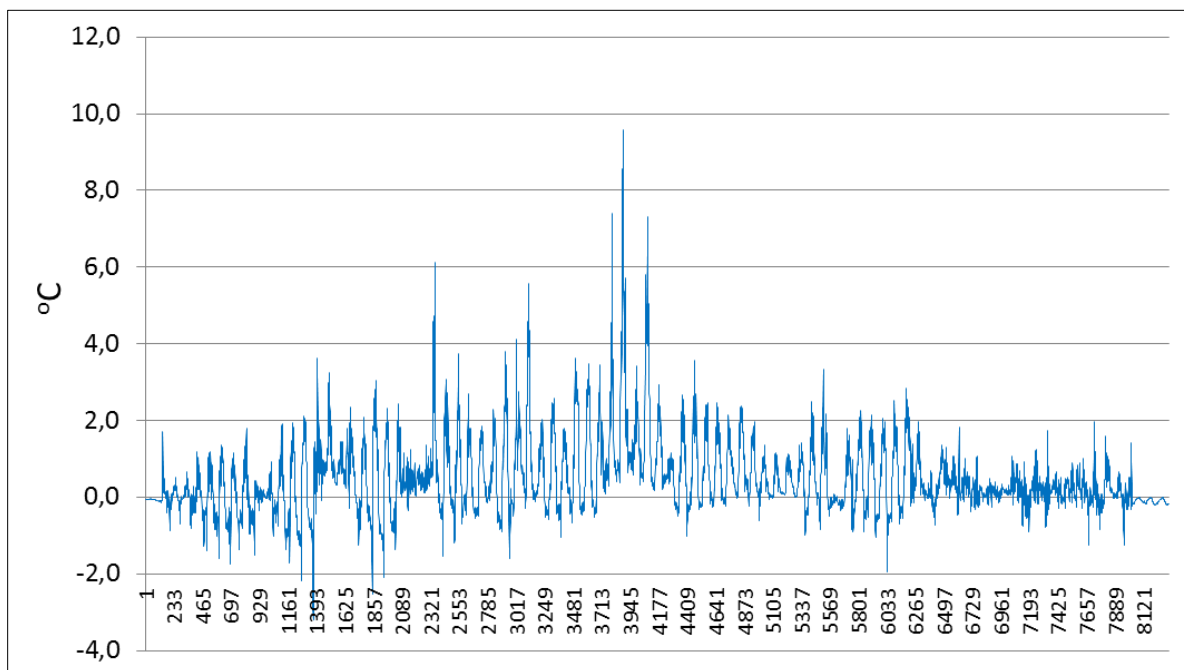
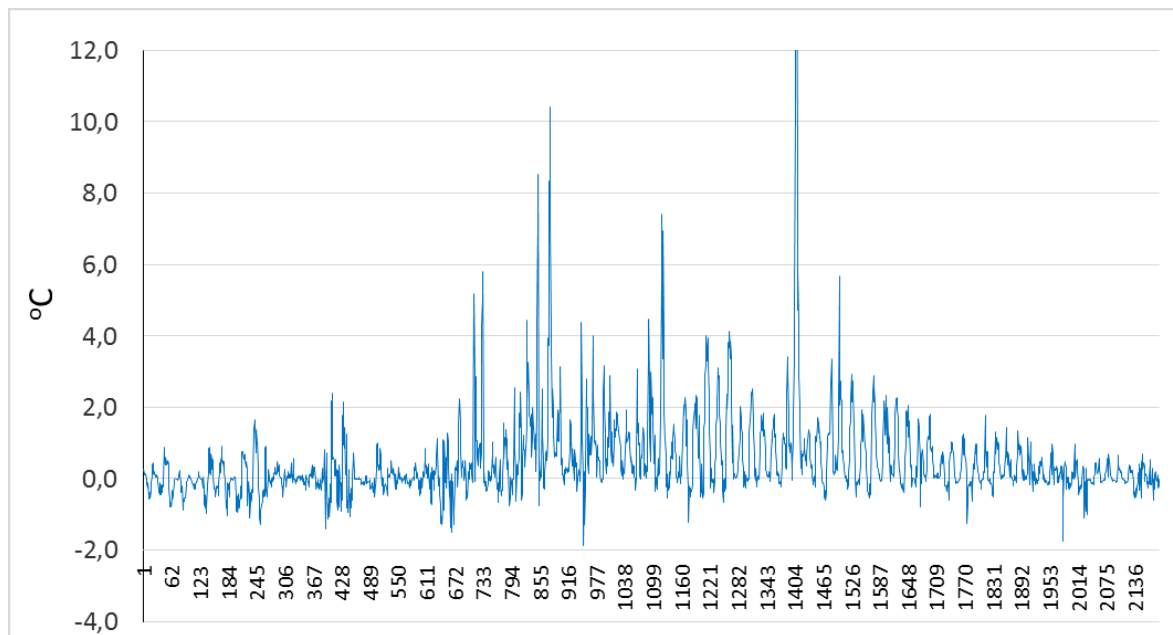
Obr. 3 RGB (vlevo) a teplotní snímek pokusu s odrůdami ozimé pšenice z dronu (rain-fed kontrola vlevo – vyšší teploty, zavlažovaný porost vpravo – nižší teploty) a snímek porostu (rámeček s rostlinami zvlhčenými vodou) ruční termokamerou (dole).



Obr. 4 Příklad rozdílu teploty porostu linií pšenice (1-6) při závlaze (V) a nedostatku vody (S). Měření 23.6.2016 ve 13-13:15 hod.

Teplota měřená kontinuálně těsně nad porostem pšenice ukazovala rozdíly mezi zavlažovanou a stresovanou pšenicí okolo 2–4 °C, jen ojediněle nad 4 °C (obr. 5). Suma rozdílů průměrných teplot za období metání–zralost v letech 2017 a 2018 činila 56,8 °C a 42,6 °C. Poměrně malý rozdíl teplot byl zřejmě způsoben měřením vzduchu nad porostem, kde už dochází k většímu promíchávání vzduchu. Teploty měřené na a těsně pod povrchem půdy (zde neprezentováno) potvrzují, že vliv dostupnosti vody se projevuje na teplotě celé vrstvy porostu. Měření ukazují rozdíly v teplotě porostů a variant již před zahájením zavlažování a stresu (přelom květen/červen), zřejmě v důsledku drobných rozdílů v hustotě porostu a umístění čidel na pozemku.

Neukam et al. (2016) upozorňují na možný dopad odlišné maximální teploty porostu a vzduchu na hodnocení extrémních situací (indexy stresu), například překročení určité kritické hranice (threshold level) teploty pro vývoj zrna a modelování vývoje v plodinových modelech (Webber et al. 2015). Význam má i ochlazovací efekt, tj. nižší teploty porostu než vzduchu. Maximální možný rozdíl mezi teplotou vzduchu a porostem pšenice plně transpirujícím (maximální ochlazující vliv) nebo stresovaným, s nulovou transpirací, je závislý na aktuálním sytostním doplňku vzduchu a v reálném rozmezí podmínek dosahuje nejvyšších hodnot okolo 8–12 °C. V závislosti na stanovené horní hraniční křivce rozdílu mezi teplotou porostu a vzduchu a netranspirujícího porostu (upper baseline) mohou být rozdíly u dalších plodin výrazně vyšší (např. Idso et al. 1981, Idso 1982).



Obr. 5 Rozdíly v hodinových (2017) a 15-minutových (2018, dole) teplotách vzduchu nad stresovaným porostem a zavlažovaným porostem pšenice od 1.5 do 31.7.

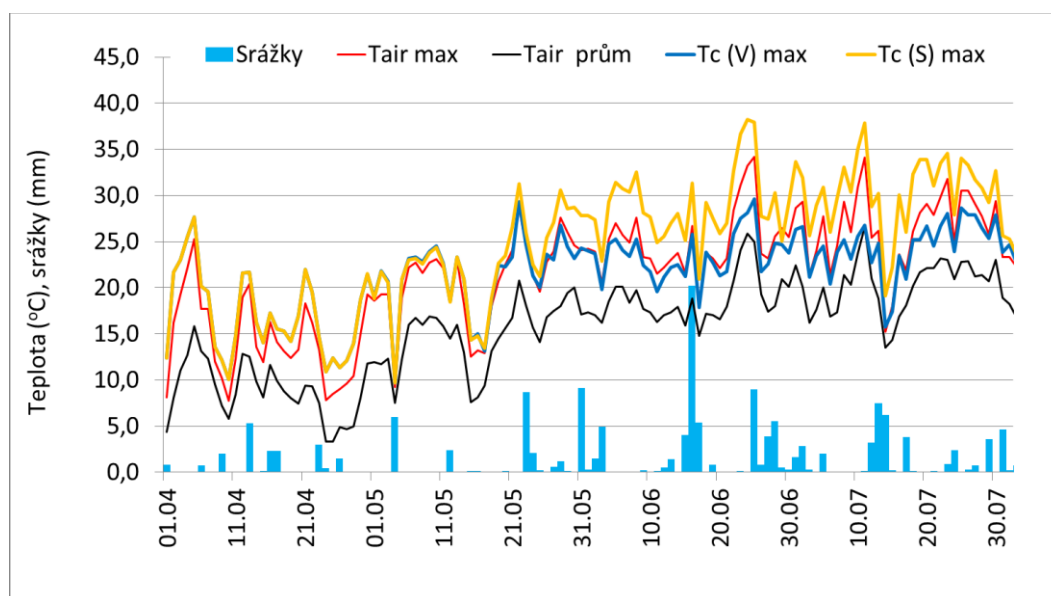
### Výpočet teploty porostu

Rozdíl vypočtených maximálních teplot zavlažovaného a stresovaného porostu pomocí regresního modelu (Neukam et al. 2016) se od počátku diferencované dodávky vody (metání-začátek kvetení) pohyboval do 11,4 °C (obr. 6). Suma rozdílů maximálních teplot mezi stresovaným a zavlažovaným porostem se pohybovala (podle metody odvození některých vstupních údajů) od 290 do 400 °C. Tyto sumy jsou odvozeny z maximálních teplot, nelze je



tedy přímo vztáhnout k sumě průměrných efektivních teplot. Je také potřeba upozornit, že uvedený výpočet je zatížen značnou nejistotou.

Uvedené experimentální a modelované údaje potvrzují, že stresovaný porost pšenice měl po velkou část období (po kvetení) vyšší teplotu než zavlažovaný porost pšenice. Pozorované teploty porostu a teploty vypočtené pomocí empirického modelu naznačují, že rozdíly v teplotě stresovaných a zavlažovaných rostlin pšenice vysvětlují v průměru okolo 20–50% rozdílu v uvedené sumě efektivních teplot do zralosti.



Obr. 6. Průměrná a nejvyšší denní teplota vzduchu ve 2 m (Tair prům, Tair max) a vypočtená maximální teplota zavlažovaného, Tc (V) max, a stresovaného Tc (S) max porostu pšenice (Ruzyně 2016).

#### Simulace vývoje pšenice

Rychlost vývoje a dosažení zralosti bylo simulováno modelem WOFOST při snížení a zvýšení pozorovaných průměrných teplot vzduchu (2 m) od kvetení v letech 2016-2018 o 1,0 °C, 2,0 °C a 3,0 °C.

Zvýšení vstupních teplot zkrátilo dosažení zralosti v průměru o 1,1 dne při zvýšení teploty o 1 °C, snížení teplot prodloužilo dobu do zralosti v průměru o 2,1 dne na zvýšení o 1 °C. Celkový rozdíl v termínu zralosti dosáhl při největším rozdílu vstupních teplot 10,1 až 12,1 dne. Tyto změny rámcově odpovídají pozorovanému zkrácení nebo prodloužení dosažení doby zralosti u stresovaných a zavlažovaných odrůd pšenic s kratší dobou růstu. Jde o modelové výpočty kde i průměrný rozdíl teplot stresovaného a zavlažovaného porostu nad 2–

3 °C za celé období po kvetení není podle popsaných měření v našich podmínkách příliš pravděpodobný. U odrůd pšenice s nejdelsí dobou vývoje byl rozdíl mezi termínem dosažení zralosti při suchu a závlaze největší (6 až 15 dní) a vyžadoval by pro dosažení shody ještě větší, nerealistický, rozdíl hodnot vstupních hodnot teploty vzduchu. To potvrzuje, že samotné zvýšení teploty porostu nedokáže plně vysvětlit pozorované rozdíly mezi variantami dostupnosti vody, ale umožňuje zpřesnit simulaci vývoje v podmínkách nevyrovnané dostupnosti vody,

Z výsledků lze také odhadnout, že dopad zvýšení teploty a snížení dostupnosti vody, které predikují klimatické modely, na změny rychlosti vývoje pšenice tak bude v důsledku zvýšení teplot porostu ještě výraznější, než naznačují prognózy a modely vývoje založené na teplotě vzduchu.

## **Závěr**

Nedostatek vody zvyšoval teplotu porostu pšenice, zatímco optimální zásoba vody (závlaha) snižovala teplotu porostu v porovnání s teplotou vzduchu ve 2 m. Na rychlejším vývoji po kvetení se podílí jak vyšší suma teplot porostu, tak fyziologické procesy spojené se stresem sucha. Zohlednění teploty porostu umožňuje zpřesnit modelování vývoje ozimé pšenice v podmínkách nedostatku vody.

## **Literatura**

- Bonhomme R. 2000: Bases and limits to using 'degree.days' units. *European Journal of Agronomy* 13, 1–10.
- Ceglar A., van der Wijngaart R., de Wit A., Lecerf R., Boogaard H., Seguini L., van den Berg M., Toreti A., Zampieri M., Fumagalli D. and B. Baruth 2019: Improving WOFOST model to simulate winter wheat phenology in Europe: Evaluation and effects on yield. *Agricultural Systems* 168, 168-180.
- Haberle J. 2017a: Teplota rostlin u pšenice s odlišnou dostupností vody. In: Lukáš J. (Ed.): Aplikace radiometrických dat v rostlinné produkci. Sborník příspěvků z konference, Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., 2017. s. 50-51. ISBN 978-80-7427-262-2
- Haberle J., Svoboda P., Neumannová A., Kurešová G., Raimanová I. 2017a: The comparison of impact of water shortage on wheat cultivars in container and field experiments. *Cereal Research Communication* 45 (Suppl.), 81-82.
- Haberle J., Svoboda P., Neumannová A., Kurešová G., Raimanová I. 2018: The impact of water shortage on wheat cultivars traits and canopy temperature in field experiment. In. ESA 2018 XV congress, Ženeva, Švýcarsko. 2 p.
- Idso S.B., Jackson R.D., Pinter P.J., Hatfield J.L. 1981: Normalizing the stress degree-day parameter for environmental variability. *Agriculture Meteorology* 24, 45–55.
- Idso S.B. 1982. Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agriculture Meteorology* 27, 59–70.

- Laurie D.A, Griffiths S., Dunford R.P., Christodoulou V., Taylor S.A., Cockram J., Beales J., Turner A. 2004: Comparative genetic approaches to the identification of flowering time genes in temperate cereals. *Field Crops Research* 90, 87-99.
- Lukáš J. Haberle J., Chrpová J., Madaras M., Kroulik M., Brandt V., Sova J. 2019: Metodika detekce vodního stresu polních plodin termokamerovým systémem. *Certifikovaná metodika. VÚRV, v.v.i. (v tisku).*
- Neukam D., Ahrends H., Luig A., Manderscheid R., Kage H. 2016: Integrating Wheat Canopy Temperatures in Crop System Models. *Agronomy* 6 (1), 7.  
doi:10.3390/agronomy6010007
- Novák V. 1995: Vyparovanie vody v prírode a metódy jeho určovania. 1. vyd. Bratislava, Veda, 1995, 253 s. ISBN 80-224-0409-8
- Porter J.R., Gawith M. 1999: Temperatures and the growth and development of wheat: A review. *European Journal of Agronomy* 10, 23–36.
- Porter J.R., Semenov M.A. 2005: Crop responses to climatic variation. *Philos. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 360, 2021–2035.
- Raimanová I., Svoboda P., Kurešová G., Haberle J. 2016: The effect of different post-anthesis water supply on the carbon isotope discrimination of winter wheat grain. *Plant, Soil & Environment* 62(7), 329-334.
- Slafer G. A., Rawson H. M. 1995: Base and optimum temperatures vary with genotype and stage of development in wheat. *Plant, Cell, Environment* 18 (6), 671-679.
- Strech N. A., Weiss A., Xue Q. & Baenziger P. S. 2003: Improving predictions of developmental stages in winter wheat: A modified Wang and Engel model. *Agricultural and Forest Meteorology* 115, 139–150.
- Webber H., Martre P., Asseng S., Kimball B., White J., Ottman M., Wall G.W., de Sanctis G., Doltra J., Grant R., et al. 2015: Canopy temperature for simulation of heat stress in irrigated wheat in a semi-arid environment: A multi-model comparison. *Field Crops Research* 202, 21-35.
- Wit de A., Boogaard H., Fumagalli D., Janssen S., Knapen R., Kraalingen van D., Supit I., Wijngaart van der R., Diepen C. van 2019: 25 years of the WOFOST cropping systems model. *Agricultural Systems* 168(C), 154-167.
- Zhang B., Biddulph B., Li D., Kuchel H., Chapman S. 2013: Quantification of the effects of VRN1 and Ppd-D1 to predict spring wheat (*Triticum aestivum*) heading time across diverse environments. *Journal of Experimental Botany* 64 (12), 3747-61.

## Poděkování

Príspevek byl zpracován s podporou projektů Ministerstva zemědělství ČR QK1720285 a RO0418.

## Kontakt

Ing. Jan Haberle, CSc.

Výzkumný ústav rostlinné výroby, Drnovská 507, 161 06 Praha 6

+420 233000254, haberle@vurv.cz