

2022



Tomáš Středa, Tomáš Litschmann,  
Hana Středová, Ivana Jovanović

# METODIKA PRO SPECIALIZOVANÁ MIKROKLIMATICKÁ MĚŘENÍ V ZEMĚDĚLSKÉM VÝZKUMU

CERTIFIKOVANÁ METODIKA

Mendelova univerzita v Brně

Tomáš Středa, Tomáš Litschmann,  
Hana Středová, Ivana Jovanović

# **METODIKA PRO SPECIALIZOVANÁ MIKROKLIMATICKÁ MĚŘENÍ V ZEMĚDĚLSKÉM VÝZKUMU**

CERTIFIKOVANÁ METODIKA

2022

## Oponenti

Ing. Jana Hajzlerová, Ph.D., SOUFFLET AGRO a.s.

Ing. Miroslav Florián, Ph.D., Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský

## Autorský kolektiv

doc. Ing. Tomáš Středa, Ph.D.<sup>1,2</sup> (podíl na autorství 30 %),

RNDr. Tomáš Litschmann, Ph.D.<sup>3</sup> (podíl na autorství 30 %),

doc. Ing. Bc. Hana Středová, Ph.D.<sup>2,4</sup> (podíl na autorství 30 %),

Ing. Ivana Jovanović<sup>1</sup> (podíl na autorství 10 %).

<sup>1</sup> Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta, Ústav pěstování, šlechtění rostlin a rostlinolékařství, Zemědělská 1, 613 00 Brno

<sup>2</sup> Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno, Kroftova 43, 616 67 Brno

<sup>3</sup> AMET, Žižkovská 1230, 691 02 Velké Bílovice

<sup>4</sup> Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta, Ústav aplikované a krajinné ekologie, Zemědělská 1, 613 00 Brno

Kontakt: [streda@mendelu.cz](mailto:streda@mendelu.cz)

Metodika vznikla za finanční podpory Ministerstva zemědělství a je výstupem řešení výzkumného projektu Národní agentury pro zemědělský výzkum č. QK1910269 „Adaptační potenciál odolnosti pšenice k suchu, horku a mrazu“.

Metodika byla certifikována Ústředním kontrolním a zkušebním ústavem zemědělským vydáním osvědčení č. UKZUZ 241317/2022 ze dne 19. 12. 2022.

© Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno

ISBN 978-80-7509-860-3 (online ; pdf)

DOI: <https://doi.org/10.11118/978-80-7509-860-3>



Open Access. Publikace „Metodika pro specializovaná mikroklimatická měření v zemědělském výzkumu“ podléhá licenci CC BY-NC-ND 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

## ABSTRAKT

Metodika poskytuje praktický nástroj pro metodicky korektní realizaci mikroklimatického monitoringu v širokém spektru experimentů zemědělského výzkumu. Včetně uvedení příkladů z realizovaných aplikací inovuje a rozšiřuje metodiku „Metodika měření mikroklimatických poměrů zemědělských plodin a kultur“ certifikovanou v roce 2016. Reflektován je tak nejen pokrok v oblasti technického řešení používané přístrojové techniky, zpracování dat, ale i výsledky výzkumu v oboru. Soustředí se především na mikroklimatický polní porostní monitoring zemědělských plodin a kultur a zásady monitoringu meteorologických prvků v nádobových experimentech. Uvedeny a popsány jsou postupy měření meteorologických prvků, jejichž monitoring je vhodné provádět s ohledem na hodnocení vlivu meteorologických podmínek na produkční proces rostlin, nebo aplikovatelných jako vstupní data pro modely prognózující výskyt patogenů a škůdců. Zmíněny jsou i kritické aspekty, které ovlivňují přesnost a reprezentativnost monitoringu. Pro posouzení specifik a diferencí je vždy uveden i relevantní postup měření na stanicích Českého hydrometeorologického ústavu, který má v metodické rovině upozornit na odchylky a možné dezinterpretace při hodnocení vztahu podnebí/počasí – rostlina/porost použitím dat z podmínek mimo porost zemědělských kultur.

**Klíčová slova:**

agrometeorologie, monitoring, porost, experiment

## ABSTRACT

The methodology provides a practical tool for methodologically correct implementation of microclimate monitoring in a wide range of agricultural research experiments. Including examples from implemented applications, it innovates and expands the methodology „Metodika měření mikroklimatických poměrů zemědělských plodin a kultur“ certified in 2016. This reflects not only progress in the field of technical solutions, used instrumentation, data processing, but also the results of research in the field. It mainly focuses on microclimatic field vegetation monitoring of agricultural crops and cultures and the principles of monitoring meteorological elements in pot experiments. The procedures for measuring meteorological elements are listed and described, the monitoring of which is suitable for evaluating the influence of meteorological conditions on the production process of plants, or applicable as input data for models forecasting the occurrence of pathogens and pests. Critical aspects that affect the accuracy and representativeness of monitoring are also mentioned. In order to assess the specifics and differences, the relevant measurement procedure at the stations of the Czech Hydrometeorological Institute is always indicated, which is to point out methodologically deviations and possible misinterpretations in the assessment of the climate/weather – plant/vegetation relationship using data from conditions outside the growth of agricultural crops.

**Keywords:**

agrometeorology, monitoring, vegetation, experiment

## OBSAH

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Cíl</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Novost metody</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Popis uplatnění certifikované metodiky</b>	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>Ekonomické aspekty</b>	<b>11</b>
<b>6</b>	<b>Měření vybraných meteorologických prvků</b>	<b>12</b>
6.1	Atmosférické srážky	12
6.2	Vlhkost vzduchu	17
6.3	Vlhkost půdy	21
6.4	Ovlhčení listů	29
6.5	Teplota vzduchu	33
6.6	Teplota povrchu	42
6.7	Teplota půdy	49
6.8	Směr a rychlost větru	56
6.9	Sluneční záření – intenzita slunečního záření, doba trvání slunečního svitu	64
<b>7</b>	<b>Seznam použité související literatury</b>	<b>71</b>
<b>8</b>	<b>Seznam publikací, které předcházely metodice</b>	<b>72</b>

## 1 ÚVOD

Rostlinná produkce je oborem, který je v zásadní míře závislý na průběhu povětrnostních podmínek. Počasí a podnebí často rozhodují o úspěchu či neúspěchu pěstování konkrétní plodiny. Z hlediska činnosti pěstitele je nutno zabývat se oběma těmito abiotickými faktory na několika úrovních. Na úrovni strategické je nutno zvážit klimatické podmínky území za delší období a jejich případný vývoj v budoucnu a na základě toho zvolit odpovídající druhovou a odrůdovou skladbu pěstovaných plodin. Zejména v případě pěstování trvalých kultur, typicky vinic s předpokládanou dobou životnosti 30 a více let, je nutno počítat s vývojem klimatu v budoucnosti a podle toho volit správnou odrůdovou skladbu při jejich výsadbě. Na taktické úrovni ovlivňují úspěšné pěstování plodin zejména topoklimatické podmínky jednotlivých pozemků, ať již z hlediska orientace terénu ke světovým stranám a jeho oslunění, konfigurace terénu z hlediska výskytu nízkých teplot, zásobení půdní vláhou apod. Na operativní úrovni při každodenním rozhodování o tom, jaké agrotechnické zásahy je zapotřebí provést, musí pěstitel brát v úvahu průběh povětrnostních podmínek v nedávné minulosti a současné přihlédnout k tomu, jaké počasí lze očekávat v nejbližším období.

Abiotický stres je u zdravých rostlin hlavní příčinou snížení produkce. V této souvislosti se v České republice věnovalo několik desítek vědeckých projektů výzkumu vlivu změny klimatu na zemědělské plodiny. Tematicky byly dominantně zaměřeny na hodnocení dopadů stresorů – zejména sucha a teplotních extrémů, na produkční proces a jeho fyziologickou podstatu. Jako hlavní problém rostlinné produkce se v současnosti jeví nedostupnost půdní vody, resp. půdní sucha a vysoké teploty vzduchu. Bylo také například prokázáno, že během posledních dvaceti let se vegetační období prodloužilo o 15–25 dní, což s sebou přináší i rostoucí riziko výskytu vegetačních mrazů.

Mikroklima prostředí je ovlivňováno charakterem vyšších klimatických kategorií (mezoklima, makroklima) a výrazně také charakterem aktivního povrchu (půda, porost, umělé povrchy apod.), na kterém probíhá přeměna slunečního záření na teplo. V případě porostů zemědělských plodin je mikroklimatický ráz prostředí až několik desítek metrů ve vertikálním profilu a až stovky metrů v horizontálním směru. Specifické mikroklima se nevytváří pouze výjimečně (např. za vysokých rychlostí větru). Konkrétně mikroklima přírodních povrchů s nízkým rostlinným krytem, mikroklima porostů polních plodin, je určováno architekturou porostu, radiační bilancí půdy a porostu, bilancí vody, útlumem proudění vzduchu, odlišným složením vzduchu uvnitř porostu, filtračními schopnostmi porostu a produkcí aromatických látek a alergenů. Pro mnohé zemědělské aplikace jsou běžně používána data ze standardních klimatologických stanic (měřeno ve výšce 2 m nad standardním travním porostem atd.). S ohledem na teplotní, vlhkostní, radiační a další specifika porostů je tato metoda nutně zatížena nepřesnostmi.

Z důvodů precizního popisu mikroklimatických poměrů v porostu a jeho vlivu na fyziologické procesy rostliny je nezastupitelný porostní monitoring meteorologických prvků. Výstupy z mikroklimatického monitoringu poskytují cenná data pro růstové, fytopatologické, výnosové a závlahové modely a spektrum dalších aplikací. Monitoring teploty a vlhkosti vzduchu, stejně jako teploty a vlhkosti půdy a sluneční záření by měl být nedílnou součástí všech pěstitelských pokusů, ať už nádobových či polních. Těžko najít typ pěstitelského experimentu, kde by vlhkost půdy či teplota

vzduchu nesehrávaly více či méně významnou roli. S ohledem na aktuální dostupnost senzorů pro automatizovaný monitoring je až překvapivé jejich ojedinělé využívání v polních experimentech.

## 2 CÍL

Hlavním cílem metodiky je poskytnout praktický nástroj pro metodicky korektní monitoring meteorologických prvků v zemědělských experimentech, polních i nádobových, s širokým spektrem zaměření, včetně optimalizace produkčních faktorů rostlin a podpory prognózy výskytu patogenů a škůdců.

S dosažením hlavního cíle souvisí následující cíle dílčí:

- Navrhnout vhodné přístrojové vybavení s adekvátními technickými parametry pro dané účely monitoringu a s ohledem na podmínky experimentu.
- Představit praktické realizace mikroklimatického porostního monitoringu v zemědělském výzkumu.
- Specifikovat kritické aspekty, které ovlivňují přesnost a reprezentativnost monitoringu.
- Představit možné způsoby interpretace výsledků a jejich prezentace.
- Upozornit na možné chyby a dezinterpretace při hodnocení vztahu podnebí/počasí a rostlina/porost na základě neoptimálního použití meteorologických dat.



### 3 NOVOST METODY

Klima je předmětem zájmu především v globálním či regionálním měřítku. Významná jsou však i lokální specifika mikroklimatu porostu, včetně extrémních hodnot, mající podstatný vliv na fyziologické projevy rostlin. Mikroklimatická data mohou být využita například při tvorbě modelů prognóz výskytu patogenů na jednotlivých plodinách. Standardně jsou však meteorologická data získávána z nejbližších klimatologických stanic. Tam jsou zpravidla měřena ve standardní výšce 2 m nad povrchem půdy, pokrytým travním porostem. Podmínky uvnitř porostu jsou však ovlivněny jeho horizontální a vertikální členitostí, jeho hustotou, mírou penetrace difúzní složky globálního záření, evapotranspirací apod. Mohou se tak výrazně lišit od okolního prostředí, přičemž variabilita rozdílů se projevuje i v závislosti na průběhu růstu a vývoje plodiny.

Výrazně odlišné hodnoty budou měřeny uvnitř zapojeného porostu, jiné na jeho okraji nebo na ploše bez porostu. To je třeba respektovat při umísťování meteorologických senzorů v rámci porostního monitoringu. Nutné je zvážit účel monitoringu a využití jeho výstupů. Dle toho volit reprezentativní plochy s dostatečnou rozlohou, stejně jak je dbáno na minimální velikost, tvar a vyrovnanost pokusných dílců v rámci pěstitelských experimentů. Nevhodně situovaná meteorologická čidla možná poskytují sice přesné, ale nepoužitelné údaje.

Z těchto důvodů je pro precizní vyjádření mikroklimatických poměrů v porostu významný korektní porostní monitoring meteorologických prvků. Regresními rovnicemi pak lze v případě potřeby (například precizování fytopatologických predikčních modelů) popsat vztah mezi údaji měřenými na běžných klimatologických stanicích a podmínkami v porostu.

Samostatnou kapitolou monitoringu mikroklimatických poměrů (v tomto případě přesněji kryptoklimatických poměrů) a jejich modelování jsou simulace v řízených podmínkách (např. v klimaboxu). „Vysoce přesné“ nákladné fyziologické experimenty mohou někdy poskytovat v lepším případě v praxi nepoužitelné, či přímo zavádějící výstupy. Problematické je často dodržení, byť jen jednoduchých stanovených podmínek – nejčastěji teploty a vlhkosti vzduchu, intenzity osvětlení, či vlhkosti substrátu. Ze zkušeností autorů vyplývá, že dosažení požadovaných hodnot simulovaných meteorologických prvků (např. teplota přesně 10 °C) vyžaduje dlouhé „ladění“ pomocí konfrontací s kalibrovanými senzory s adekvátní přesností měření. Před založením experimentu v řízené atmosféře je tak vhodné provést přípravnou fázi a testování pro zajištění objektivních podmínek. Je také nutno respektovat, že věrná simulace přírodních podmínek kombinací vysokého počtu meteorologických prvků je prakticky nemožná a iluzorní (přesné nastavení délky dne, příkonu a spektra slunečního záření, proudění vzduchu, kolísání teplot, nemluvě o horizontálních srážkách atd.).

Metodika poskytuje praktický nástroj pro metodicky korektní realizaci mikroklimatického monitoringu v širokém spektru experimentů zemědělského výzkumu. Včetně uvedení příkladů z realizovaných aplikací inovuje a rozšiřuje metodiku „Metodika měření mikroklimatických poměrů zemědělských plodin a kultur“ certifikovanou v roce 2016. Reflektován je tak nejen pokrok v oblasti technického řešení používané přístrojové techniky, zpracování dat, ale i výsledky výzkumu v oboru. Soustředí se především na mikroklimatický polní porostní monitoring zemědělských

plodin a kultur a zásady monitoringu meteorologických prvků v nádobových experimentech. Uvedeny a popsány jsou postupy měření meteorologických prvků, jejichž monitoring je vhodné provádět s ohledem na hodnocení vlivu meteorologických podmínek na produkční proces rostlin, nebo aplikovatelných jako vstupní data pro modely prognózující výskyt patogenů a škůdců. Zmíněny jsou i kritické aspekty, které ovlivňují přesnost a reprezentativnost monitoringu. Pro posouzení specifik a diferencí je vždy uveden i relevantní postup měření na stanicích Českého hydrometeorologického ústavu, který má v metodické rovině upozornit na odchylky a možné dezinterpretace při hodnocení vztahu podnebí/počasí – rostlina/porost použitím dat z podmínek mimo porost zemědělských kultur.

## 4 POPIS UPLATNĚNÍ CERTIFIKOVANÉ METODIKY

Metodika je určena především pracovníkům zemědělského výzkumu a šlechtění pro realizaci a podporu experimentů v polních i nádobových podmínkách, stejně jako podpora pracovníků v zemědělském poradenství, agronomům i drobným farmářům, kteří mají zájem o problematiku monitoringu porostního mikroklimatu. Jsou popsány, a tudíž i uplatnitelné, také zjednodušené postupy pro použití metod v provozních podmínkách zemědělských podniků pro snadnou realizaci. Praktické využití poznatků pak spočívá ve spojení popsaného know-how se znalostmi pokusníka či agronoma o specifických podmínkách a problémech konkrétního zemědělského podniku a jednotlivých pozemků v kombinaci s dopady na produkční procesy.

Metodika bude v tištěné formě dána zdarma k dispozici a šířena na odborných seminářích a prezentacích. Bude k dispozici pracovníkům v zemědělském poradenství pro další distribuci. V elektronické podobě bude zveřejněna na webových stránkách Mendelovy univerzity v Brně, spolu s publikacemi autorů, a na webových stránkách [www.agronavigator.cz](http://www.agronavigator.cz). Získané poznatky budou šířeny i v rámci výuky odborných předmětů na MENDELU.

Všem zájemcům o využití popsaných metod lze doporučit přímou spolupráci s autory metodiky.

## 5 EKONOMICKÉ ASPEKTY

Kvantifikace ekonomického efektu výsledků dosažených realizací biologických experimentů hodnotících vztahy mezi meteorologickými veličinami a biologickými procesy rostlin není možná. Stejně tak je problematické monetární vyjádření efektů agrotechnických opatření podpořených realizací porostního meteorologického monitoringu u polních kultur. Hmatatelným přínosem, vyjádřitelným ekonomicky, je například realizace protimrazových opatření v ovocných sadech v případě výskytu vegetačních mrazů, realizace doplňkové závlahy na základě monitoringu půdní vlhkosti u speciálních kultur či zelenin, nebo využití agrometeorologického monitoringu pro účely predikce výskytu patogenů či škůdců a následné úspory při ochraně zemědělských plodin.

Povinnost monitoringu základních mikroklimatických prvků je legislativně zakotvena ve vztahu k integrované produkci. Plnění podmínek dotačního titulu je tak podmíněno povinností během vegetační sezóny sledovat, zaznamenávat a vyhodnocovat meteorologické prvky a výskyt škodlivých organismů. Integrovaná produkce, respektive integrovaná ochrana rostlin, jsou v poslední době častěji zmiňovány i v souvislosti s polními kulturami. Například publikace České společnosti rostlinolékařské z roku 2013 „Metodická příručka integrované ochrany rostlin – polní plodiny“ uvádí, mimo jiné, význam postupů pro využití preventivních metod ochrany rostlin a monitoringu pro ekonomicky účelná opatření, snižující dopad používání pesticidů na lidské zdraví, necílové organizmy a životní prostředí.

Podobně publikace Oddělení metod integrované ochrany rostlin Ústředního kontrolního a zkušebního ústavu zemědělského „Průvodce kontrolním systémem plnění zásad integrované ochrany v polních plodinách pro rok 2014“ z dubna 2014 zmiňuje význam monitoringu a prognostických modelů, podávajících informace o aktuálním výskytu škodlivých organismů a umožňující předpovědět vývoj infekce chorob/gradace bezobratlých škůdců. Využíváním těchto nástrojů lze upřesnit termín použití přímých opatření a potlačit škůdce v nejcitlivější fázi vývoje. Uplatňování systému integrované ochrany rostlin vede ke zvyšování ekonomické efektivity ochrany, zvyšování účinnosti ochranných opatření a k omezení nezdůvodněných aplikací. Mimo využívání nástrojů, uvedených v metodikách integrované ochrany příslušné plodiny je hodnoceno i to, zda byly uživatelem využívány i objektivní metody monitorování škodlivého organismu *in situ* (vlastní monitorovací činnost). Pěstitel je tak podněcován k provádění vlastního mikroklimatického porostního monitoringu a k využívání expertních systémů prognózy a signalizace škodlivých organismů.

S ohledem na rozmanitost agroekologických podmínek, variabilní infekční tlak škodlivých organismů v čase a prostoru, rozdílnou intenzitu ochrany rostlin v zemědělských podnicích, výrazně odlišnou cenu jednotlivých prostředků na ochranu rostlin a její dynamiku nelze však striktně definovat ekonomický benefit, pocházející z realizace mikroklimatického monitoringu pro optimalizaci produkčních faktorů při pěstování polních plodin. Navíc lze těžko finančně kvantifikovat environmentální přínosy, pocházející z omezení vstupů pesticidů do životního prostředí a případný pozitivní efekt ochrany antagonistů škodlivých organismů při kvalifikovaném využití abiotických faktorů odporu prostředí. Nicméně, i při úspoře v podobě jedné aplikace prostředku na ochranu rostlin lze uvažovat o úspoře několika set Kč na jeden hektar.

## 6 MĚŘENÍ VYBRANÝCH METEOROLOGICKÝCH PRVKŮ

### 6.1 Atmosférické srážky

#### Všeobecné minimální požadavky na měření úhrnu srážek:

- |                                     |                       |
|-------------------------------------|-----------------------|
| a) rozlišovací schopnost snímače:   | 0,2 mm,               |
| b) přesnost měření:                 | $\pm 10 \%$ ,         |
| c) interval mezi kalibrací snímačů: | 2 roky,               |
| d) velikost zachytné plochy:        | 200 cm <sup>2</sup> , |
| e) používané jednotky:              | mm.                   |

Srážkami se rozumí zkondenzované vodní částice ve stavu kapalném nebo tuhém, padající nebo vznášející se v atmosféře nebo zdvižené větrem z povrchu země, nebo usazené na předmětech na zemi či ve volné atmosféře. Padající srážky se vyskytují převážně ve formě deště, mrholení, deště se sněhem a sněžení. Atmosférické srážky se měří v milimetrech vodního sloupce, v případě tuhých srážek po jejich rozpuštění. Jedná se o výšku, do které by srážky v kapalném stavu na povrchu země sahaly. Jeden milimetr spadlých srážek odpovídá množství vody 1 litr na 1 m<sup>2</sup> vodorovné plochy. Výška usazené sněhové pokrývky se měří v centimetrech.

#### Způsob měření

Atmosférické srážky se měří za pomoci srážkoměrů nejrůznějších konstrukcí, a to v současnosti zpravidla automatizovaně. V automatických stanicích se převážně používají člunkové srážkoměry. Jejich princip spočívá v tom, že voda je zachycena nálevkou a stéká do nádoby – člunku. Po naplnění zachytné misky se člunek překlopí, voda se vylije a proces se opakuje. Při každém překlopení dojde k sepnutí jazýčkového kontaktu a meteostanice zaregistruje množství srážek odpovídající objemu zachytné misky při dané zachytné ploše (při zachytné ploše 500 cm<sup>2</sup> a objemu misky 5 ml je velikost srážky 0,1 mm). Pozitivem člunkového srážkoměru je jeho jednoduchá konstrukce a možnost registrovat i intenzitu srážek. Intenzita srážek znamená, kolik milimetrů spadlo za danou časovou jednotku (např. 1 minutu apod.). Údaj o intenzitě srážek je důležitý např. při vyhodnocování extrémních hydrologických situací a případných erozních událostí. Z tohoto údaje je možné usoudit, zda došlo ke smyvu půdy z důvodu mimořádné povětrnostní situace, nebo jestli došlo k zanedbání agrotechnického patření.

V zimním období je měření srážek srážkoměrem poněkud problematické. Při manuálním měření je nutné srážkoměrnou nádobu přenést do teplé místnosti a počkat, až sníh roztaje. Po roztání sněhu se změří množství vody. V případě automatického měření srážek lze v případě blízkosti elektrické přípojky používat vyhřívaný srážkoměr, je však nutno počítat s tím, že zejména v případě jejich nižší intenzity dochází k jejich zvýšenému odparu, a proto je naměřené množství nižší. U automatických srážkoměrů, které nejsou vyhřívané, jsou tuhé srážky registrovány až po jejich rozpuštění, pokud ovšem nejsou do té doby vyfoukány z nálevky srážkoměru. Může se rovněž stát, že v člunku usazená voda zmrzne a než dojde k jejímu roztátí, led ovlivňuje svou vahou hmotnost člunku a zaregistrované množství srážek je vyšší.

Přestože se měření množství srážek jeví jako poměrně jednoduchá záležitost, ve skutečnosti lze i u dvou těsně vedle sebe stojících manuálních srážkoměrů různé



konstrukce naměřit rozdílné úhrny srážek, přičemž tyto rozdíly mohou v závislosti na povětrnostních podmínkách a celkovém množství srážek dosahovat 10–25 %.

Mezi měření srážek pro makroklimatické a mikroklimatické účely není podstatný rozdíl. Vždy je zapotřebí zajistit, aby se v blízkosti srážkoměru nevyskytovaly výraznější překážky, které by jej zastiňovaly, což bývá snáze splnitelné v polních podmínkách než v sadech. V případě mikroklimatických měření v porostu se jako nejvhodnější řešení jeví umístění srážkoměru na společném stojanu s ostatními snímači. Tento způsob konstrukce v dnešní době provádí většina výrobců meteorologických stanic pro zemědělské účely. Srážkoměr ve volné krajině představuje vyvýšené místo a může dojít k tomu, že ho budou využívat různé druhy ptáků jako místo pro sedání. Tomuto lze předejít instalací vyvýšených bidýlek v jeho těsné blízkosti, a zároveň je možné srážkoměr vybavit ochranným kruhem umožňujícím usedání ptactva mimo srážkoměr.

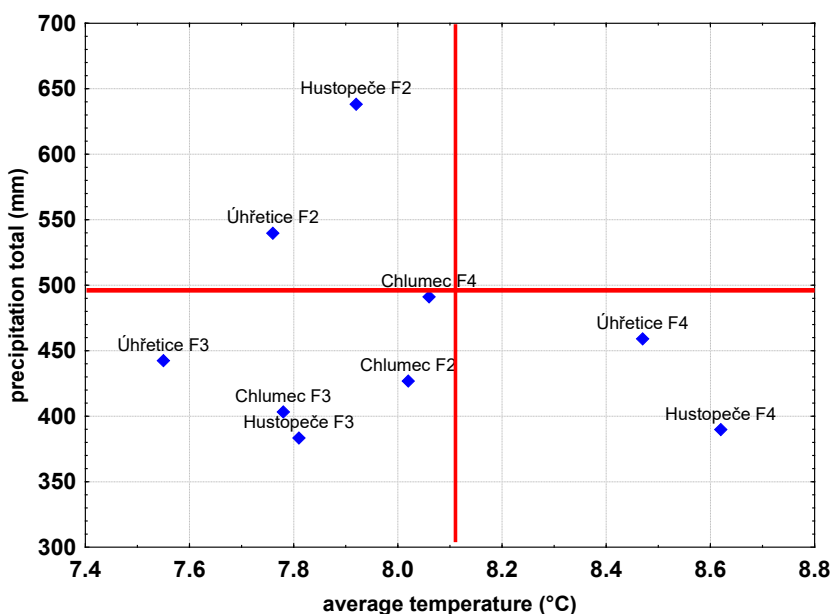


**Obr. 1** Ukázka umístění srážkoměru v zemědělských experimentech

*Zdroj: autoři*

Aby se naměřené hodnoty atmosférických srážek co nejvíce přibližovaly skutečnosti, je důležité provádět pravidelné čištění všech otvorů, kudy srážková voda stéká do měřícího zařízení přístroje. Častější údržba je nutná u stanic, které se nacházejí poblíž míst s často zviřeným prachem, např. u silnic, polních cest atd. U stanic umístěných na místech pokrytých vegetací bývá prašnost nižší, takže čištění srážkoměru se nemusí provádět tak často, avšak znečištění bývá způsobeno také pylem v jarních měsících. Občas je nutno provést čištění i samotného člunku, neboť v něm může být usazený prach a jiné nečistoty, které mohou vytvořit hmotu na dně člunku. Toto znečištění může ovlivnit výsledky měření. Pro praxi se doporučuje porovnávat data naměřená automatickou stanicí s daty z manuálního měření (poblíž automatického) a v případě systematických rozdílů provést korekci údajů.

Ukázku umístění srážkoměru v různých zemědělských experimentech prezentuje Obr. 1.

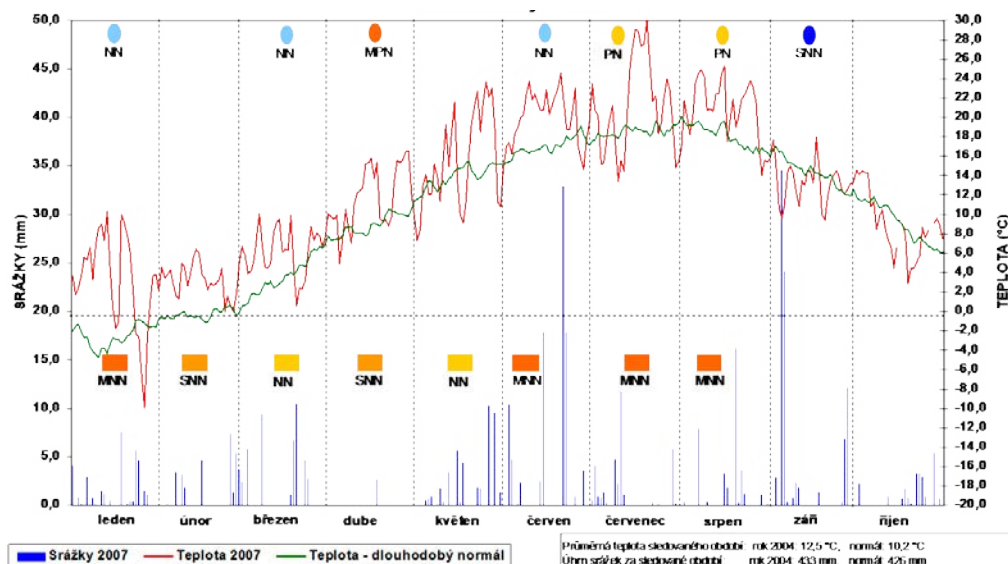


**Obr. 2** Srážkové úhrny a průměrná teplota vzduchu během třech vegetačních období (říjen–červenec) pšenice ozimé

### Příklady realizace a hodnocení dat v biologických experimentech

Pro vyjádření krátkodobých podmínek (např. povětrnostní podmínky jednoho ročníku nebo vegetace) je použitelná interpretace uvedená na Obr. 2, která přehledně zachycuje srážkové úhrny a průměrnou teplotu během tří vegetačních období v pokusu s generacemi  $F_2$ – $F_4$  pšenice ozimé na třech pokusných lokalitách.

Průběh počasí během roku nebo jeho části přehledně prezentuje také například graf na Obr. 3. Denní srážkové úhrny (modré sloupce) poskytují v dostatečném rozlišení přehled o srážkové činnosti a případném srážkovém, potažmo vláhovém, deficitu. Použití dekádních či měsíčních úhrnů tuto schopnost rozlišení postrádá a není pro



	srážky	teplota
MNN mimořádně nadnormální měsíc	mimořádně vlhký měsíc	mimořádně teplý měsíc
SNN silně nadnormální měsíc	velmi vlhký měsíc	velmi teplý měsíc
NN nadnormální měsíc	vlhký měsíc	teplý měsíc
N normální měsíc	normální měsíc	normální měsíc
PN podnormální měsíc	suchý měsíc	studený měsíc
SPN silně podnormální měsíc	velmi suchý měsíc	velmi studený měsíc
MPN mimořádně podnormální měsíc	mimořádně suchý měsíc	mimořádně studený měsíc

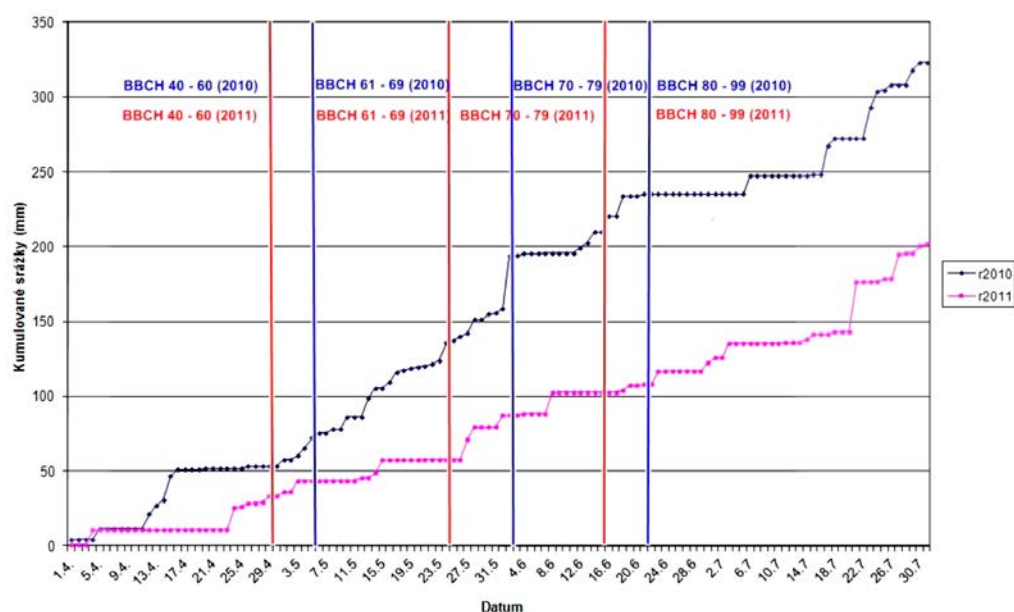
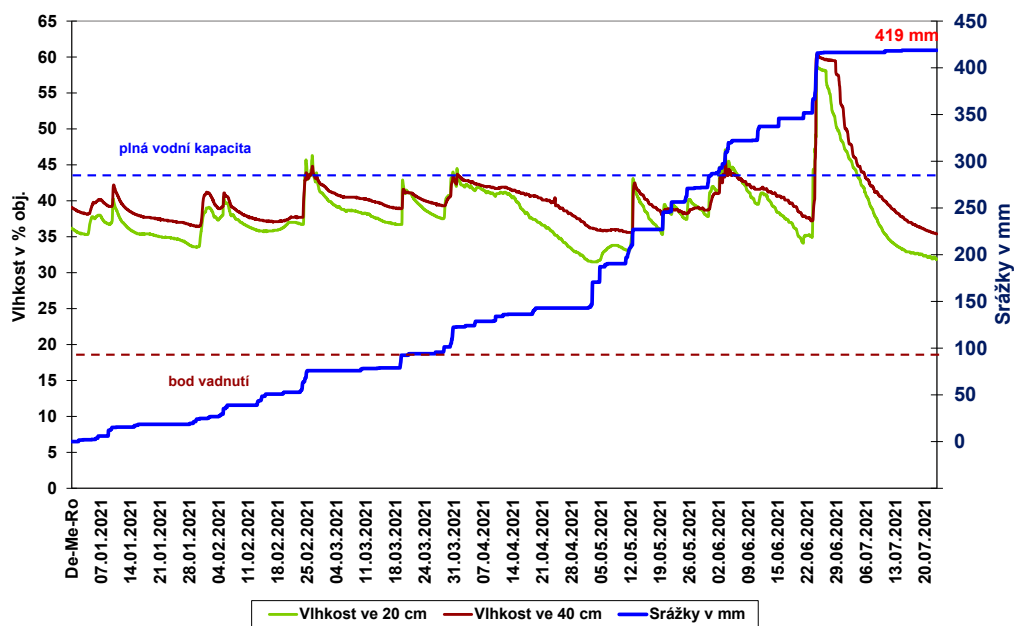
metodika Klimatické normály, ČHMÚ Praha, 1988

**Obr. 3** Příklad vhodné prezentace dat o průběhu počasí v rámci ročníku nebo jeho části při statické konfrontaci s normály a dynamickém vyjádření průběhu

vyjádření srážkové činnosti pro biologické experimenty dostatečně vypovídající. Měsíční, sezónní či roční srážkové úhrny mohou být vyhodnoceny porovnáním s normály či dlouhodobými průměry a oklasifikovány použitím některé z klasifikací (např. doporučení Světové meteorologické organizace pro popis meteorologických, resp. klimatologických podmínek definovaného období – viz Kožnarová a Klabzuba, 2002). To je pro popis srážkových podmínek měsíců/sezóny/ročníku dostatečně popisné.

Vyjádření průběhu srážkové činnosti, srážkových úhrnů a identifikaci výskytu případných bezesrážkových epizod popisuje přehledně i vyjádření pomocí sumy srážkových úhrnů v čase na Obr. 4 (modrá křivka).





**Obr. 4** Nahoře: kumulované srážkové úhrny pro vyjádření dynamiky srážek a snadnou identifikaci bezesrážkových období a objemová vlhkost půdy během jednoho období (leden–červenec); dole: kumulované srážkové úhrny na jedné lokalitě během dvou let a jejich rozdělení do období dle markantních růstových fází řepky olejné v konkrétním roce, umožňující přehledné porovnání ročníků z pohledu srážkové činnosti

## 6.2 Vlhkost vzduchu

### Všeobecné minimální požadavky na měření vlhkosti vzduchu:

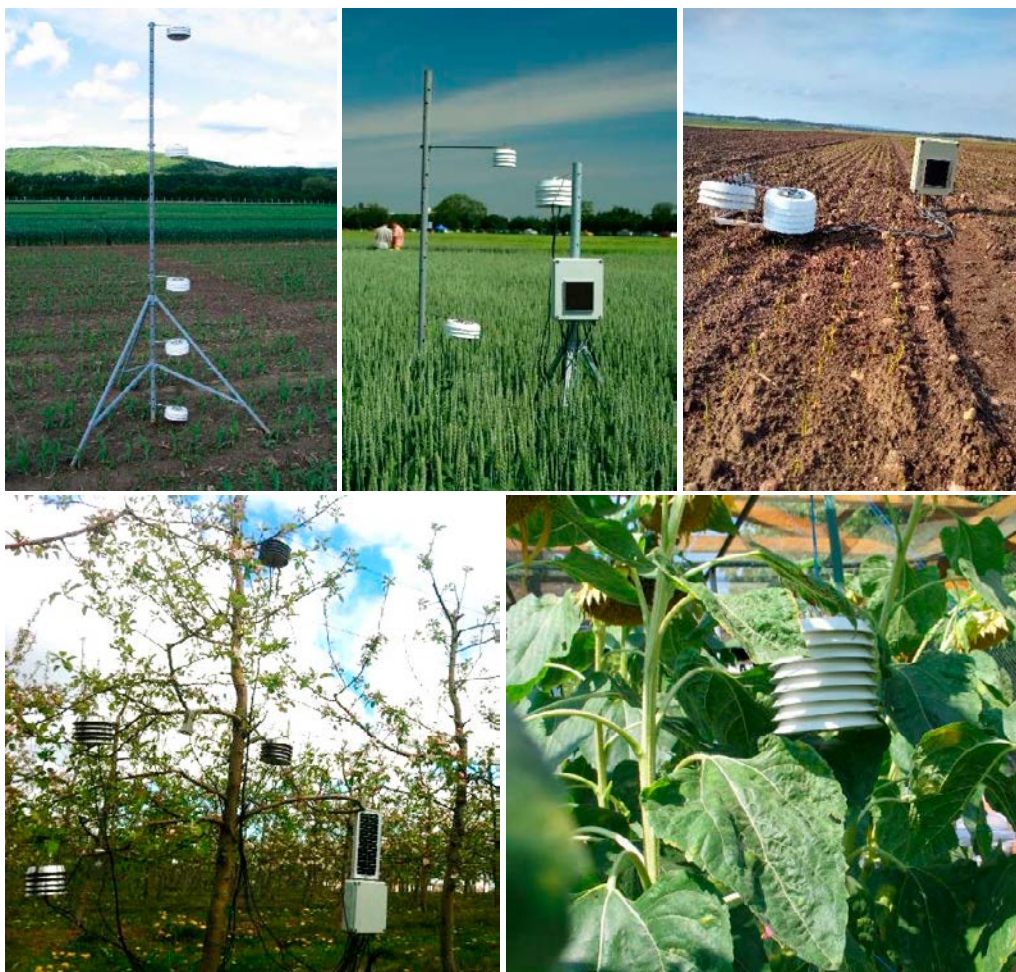
- |                                     |                                 |
|-------------------------------------|---------------------------------|
| a) rozlišovací schopnost snímače:   | 0,5 % relativní vlhkosti,       |
| b) přesnost měření:                 | $\pm 2,5$ % relativní vlhkosti, |
| c) interval měření:                 | 10 minut,                       |
| d) interval mezi kalibrací snímačů: | 2 roky,                         |
| e) používané jednotky:              | relativní vlhkost v %.          |

Vlhkost vzduchu představuje obsah vodních par v atmosféře a lze ji vyjádřit několika charakteristikami. V běžné i zemědělské praxi se nejčastěji používá relativní vlhkost, která udává procento nasycení vzduchu vodními parami. Při 100% vlhkosti je vzduch vodními parami nasycen a není schopen přijmout další. Relativní vlhkost vzduchu je závislá na teplotě vzduchu. Při zvyšování teploty a konstantním množství vodní páry v daném objemu vzduchu jeho relativní vlhkost klesá a naopak. Kromě relativní vlhkosti se lze setkat i s dalšími charakteristikami – např. s absolutní vlhkostí, sytostním doplnkem, tlakem vodní páry či deficitem teploty rosného bodu.

### Způsob měření

V automatických meteorologických stanicích jsou v současnosti nejvíce využívány kapacitní snímače vlhkosti vzduchu. Snímač je tvořen kondenzátorem, jehož dielektrikem je tenká vrstva materiálu vratně sorbujícího vlhkost z prostředí. Jako dielektrikum se používá film polymeru nebo kovového oxidu. V přístroji je jedna z elektrod děrovaná a umožňuje okolnímu vzduchu kontakt s dielektrickým filmem. Množství absorbované vody je poměrně malé, ale díky velké dielektrické konstantě jsou změny kapacity měřitelné. Měřicí senzory jsou charakteristické svou odolností vůči kondenzaci, malou závislostí údaje na teplotě, dobou odezvy v řádu sekund, malými rozměry, nízkou cenou a přesností v řádu % relativní vlhkosti. Pokud je přístroj vystaven podmínkám, v nichž vlhkost vzduchu alespoň občas dosahuje stavu nasycení, dochází u dielektrika postupně k nevratným změnám. Toto vede ke snížení citlivosti snímače, až k jeho znehodnocení. Je nezbytné snímač na měření vlhkosti umístit do vhodného stínítka, stejného jako při měření teploty vzduchu. Zároveň je zapotřebí zajistit, aby teplota snímače byla stejná jako teplota měřeného vzduchu. Pokud se např. teplota snímače liší od teploty vzduchu o jeden stupeň, může se odchylka vlhkosti vzduchu vykazovaná snímačem od skutečné lišit až o několik procentních bodů. Měření na stanicích ČHMÚ se nejčastěji provádí senzorem HUMICAP, které je součástí teplotně-vlhkostního čidla, které je umístěno v radiačním stínítku nebo v meteorologické budce. Data z automatických stanic jsou dostupná v 10minutovém intervalu.

Na Obr. 5 je zobrazen příklad umístění senzorů pro měření vlhkosti vzduchu v kombinaci s měřením teploty vzduchu v různých porostech zemědělských plodin.



**Obr. 5** Čidla pro měření vlhkosti a teploty vzduchu umístěná v radiačních stínítkách; monitoring v různých zemědělských experimentech

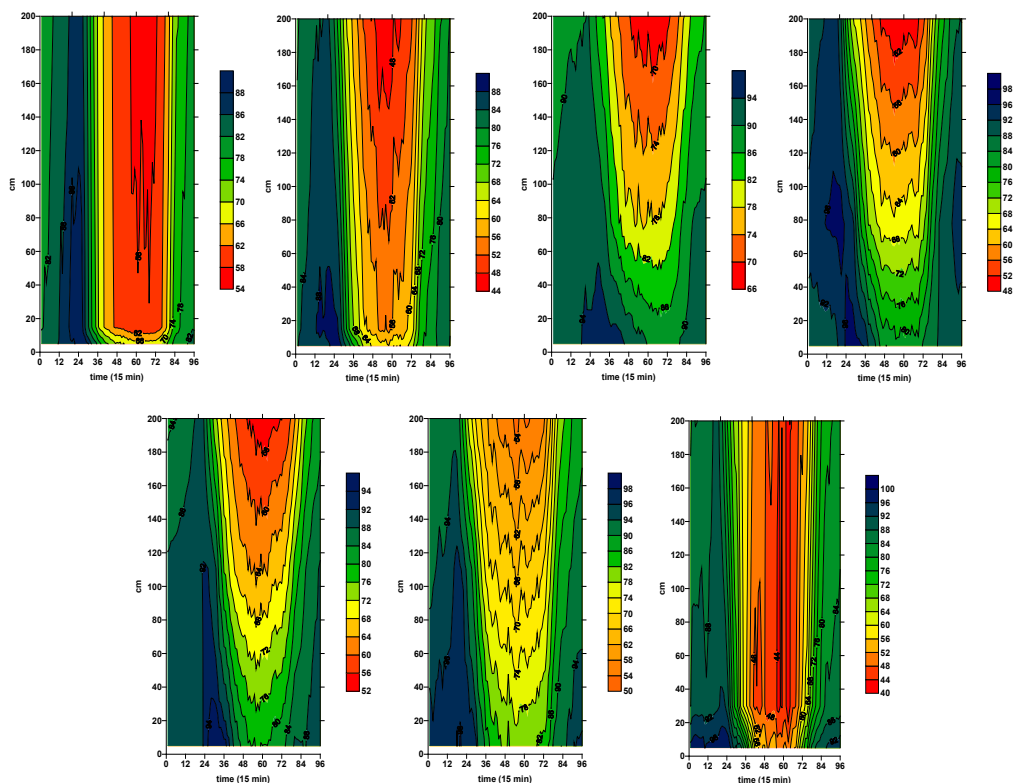
*Zdroj: autoři*

### **Příklady realizace a hodnocení dat v biologických experimentech**

V porostu pšenice ozimé v Žabčicích byla během hlavní vegetační sezóny ve dvouletém sledování monitorována relativní vlhkost vzduchu. Monitoring a záznam dat byly zajištěny pomocí mobilní meteostanice (Obr. 5 nahoře uprostřed) osazené analogovými digitálními senzory vlhkosti vzduchu Honeywell HIH 4000 s přesností měření 2,5 %; rozsahem měření 0–100 %, umístěnými v radiačním stínítku. Čidla byla umístěna ve třech výškových úrovních: 0,05 m (přízemní výška), 2 m nad povrchem půdy (analogie umístění senzoru na standardních klimatologických stanicích) a v efektivní výšce porostu (tj. cca ve výšce 0,7 až 0,8násobku výšky porostu, což je doporučená hladina z pohledu průběhu významných meteorologických, fyziologických a fytopatologických jevů). Dle markantních růstových fází rostlin bylo monitorovací období rozděleno do třech (čtyř) zásadně odlišných období. V průběhu vegetace byla

zjišťována výška porostu a vegetační fáze dle metodiky Meier (1997). Vegetace byla dle charakteru porostu a souvisejícího vlivu na mikroklima rozdělena na tři období: I. – BBCH 23 – 32 (odnožování až počátek sloupkování), II. – BBCH 33 – 69 (sloupkování až konec kvetení) a III. – BBCH 70 – 89 (zelená zralost až počátek plné zralosti). Ve druhém roce monitoringu porost ve fázi BBCH 85 polehl a toto období bylo, vzhledem k výrazné změně charakteru porostu, hodnoceno zvlášť. Vertikální stratifikace teploty vzduchu byla interpolována metodou triangulace s lineární interpolací a vykreslena do 2D map prostřednictvím software SURFER.

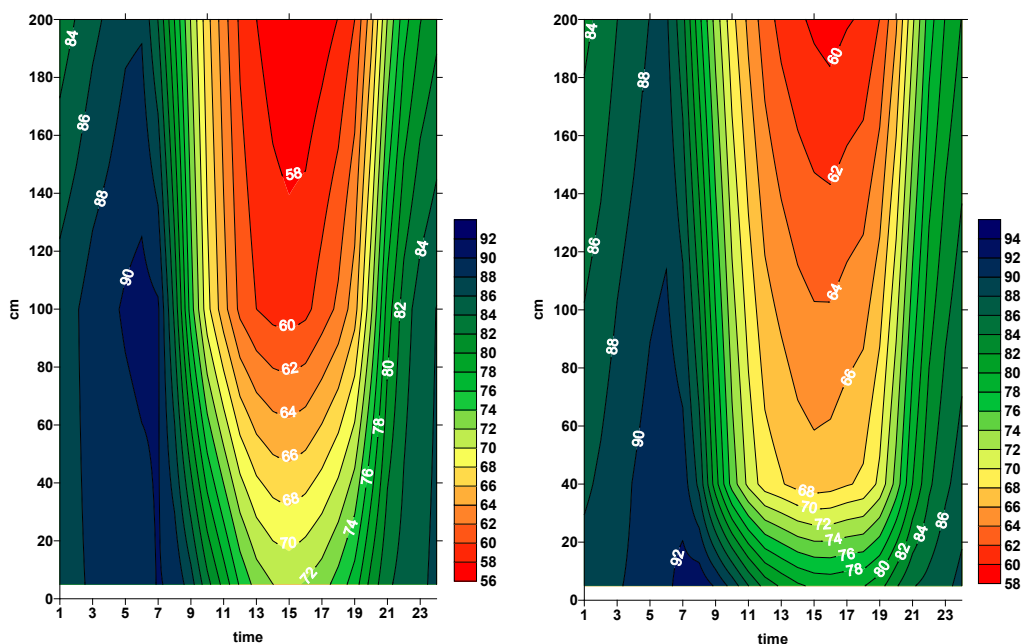
Rozdíly ve vertikální stratifikaci vlhkosti vzduchu se projeví především během světlé části dne, kdy porost udržoval v přízemní vrstvě vzduchu vyšší relativní vlhkost vzduchu. Zejména ve druhém a třetím období byla zaznamenána výrazná vertikální stratifikace vlhkostí vzduchu (Obr. 6). Polehnutí porostu ve druhém roce se naopak



**Obr. 6** Průměrné hodnoty relativní vlhkosti vzduchu (%) ve vertikálním profilu porostu pšenice. Každý nomogram ukazuje virtuální průměrný den období, získaný zprůměrováním hodnot za celé období. Na horizontální ose je uveden čas – 24hodinový den rozdělený po patnáctiminutových intervalech; na vertikální ose je výška měření. Zleva doprava: horní řada – období I. rok 1; období I. rok 2; období II. rok 1; období II. rok 2; dolní řada – období III. rok 1; období III. rok 2; období po polehnutí porostu ve druhém roce.

projevilo výrazným snížením vertikální difference. S rostoucí výškou měření vlhkosti vzduchu v porostu se zvyšovala těsnost vztahu s podmínkami na standardní klimatologické stanici (monitoring nad travním porostem).

Z identického pokusu, realizovaného na pokusné ploše v Žabčicích, pochází i grafy (nomogramy) na Obr. 7. Prostřednictvím porostního mikroklimatického monitoringu s využitím automatické přenosné meteorologické stanice a aplikací následného sofistikovaného interpolačního algoritmu (triangulace s lineární interpolací) je možné získat data, použitelná například pro fytopatologické modely. Z výsledků je zřejmé, že v porostu pšenice jsou dosahovány oproti porostům řepky vyšší vlhkosti vzduchu. Vlhkost vzduchu v efektivní výšce je ovlivněna charakterem a hustotou porostu, když porost aktivní fotosyntézou a evapotranspirací udržuje vyšší vlhkost vzduchu. V upřesňovaných prognostických modelech pro patogeny napadající především spodní patra porostů by proto měly být vzaty v úvahu podstatně zvýšené hodnoty vlhkosti vzduchu, které by měly být měřeny přímo v porostech.



**Obr. 7** Model relativní vlhkosti vzduchu v porostu řepky (vlevo) a pšenice (vpravo) v hypotetický den – uměle vytvořený zprůměrováním dat z celého období měření. Na horizontální ose je uveden čas – 24hodinový den rozdělený po hodinových intervalech; na vertikální ose je výška měření.



## 6.3 Vlhkost půdy

### Všeobecné minimální požadavky na měření vlhkosti půdy:

- |                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| a) rozlišovací schopnost snímače:   | 0,5 % relativní vlhkosti,   |
| b) přesnost měření:                 | $\pm 2$ % objemové vlhkosti,  |
| c) interval měření:                 | 1 hodina,   |
| d) interval mezi kalibrací snímačů: | 2 roky,   |
| e) používané jednotky:              | objemová %, hmotnostní %, $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ , $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . |

V závislosti na zrnitostním složení může půda pojmout a zadržet rozdílné množství vody. Nejméně vody jsou schopny pojmout půdy písčité, nejvíce jílovité. Vlhkost půdy se vyjadřuje buď v objemových procentech, která udávají, kolik procent z daného objemu půdy zaujímá voda, nebo v hmotnostních procentech, která udávají podíl vody v celkové hmotnosti určitého množství půdy. V praxi je výhodnější používat objemovou vlhkost, a to především z důvodu bilancování zásob vláhy v půdě. Jestliže známe měrnou hmotnost půdy je možné obě veličiny navzájem přepočítat.

Kromě extrémních situací se obsah vody v půdě pohybuje mezi hydrolimity bod vadnutí (nejnižší půdní vlhkost, při které jsou rostliny ještě schopné z půdy získávat vláhu) a retenční vodní kapacita (maximální množství vody, které je půda po nadměrném zavlažení schopná zadržet v téměř rovnovážném stavu). K přesycení půdy vodou zde může dojít zejména při opakovaných přívalových srážkách na těžších půdách. Mimo povětrnostních, hydrologických a pedologických faktorů ovlivňuje vlhkost půdy na stanovišti také typ vegetace a jeho vlastnosti (druhové složení, věk, stav kořenového systému atd.).

Údaje o vlhkosti půdy mohou sloužit mimo jiné k hodnocení dostupnosti vláhy pro pěstované plodiny, k řízení a případné automatizaci závlah. Monitorováním vlhkosti půdy za delší časové období, popřípadě do větších hloubek, je možno posoudit vlhkovostní režim dané lokality a rozhodnout o případných opatřeních. Jestliže údaj o množství srážek udává, jaké množství vody spadlo na povrch půdy, tak údaje o půdní vlhkosti pak udávají, jaké množství vody je v půdě skutečně obsaženo. Ačkoliv by se očekávala určitá paralela mezi těmito veličinami, ne vždy tomu tak musí být, neboť velkou roli zde hraje intenzita srážek, intercepce daného porostu, infiltrační schopnost půdy, komunikace půdního profilu s horninovým podložím případně se zvodní podzemní vody apod.

### Způsob měření

Vlhkost půdy lze stanovit laboratorně na základě analýzy odebraného půdního vzorku, nebo měřit automaticky. Ruční gravimetrické stanovení půdní vlhkosti se používá jako základní srovnávací metoda. Je založena na odběru neporušených půdních vzorků do Kopeckého válečku o objemu  $100 \text{ cm}^3$  a jeho následném laboratorním vyhodnocení. Tato metoda je nákladná a poměrně pracná a v zemědělském podniku není pro operativní měření vhodná.

Automatické měření vlhkosti půdy je z důvodu poměrně širokých mezí fyzikálních a chemických vlastností u jednotlivých půd komplikované. Neexistuje žádná metoda měření vlhkosti půdy, která by poskytovala naprosto spolehlivé výsledky v celém spektru půd. Vlhkost půdy se neměří přímo, ale jsou měřeny jiné veličiny, které jsou

na ní závislé. Hodnota vlhkosti půdy se určí ze známého vztahu mezi měřenou veličinou a vlhkostí.

Pro operativní měření se nejčastěji používají snímače založené na kapacitním principu. Dále se používají i snímače využívající vztah mezi změnou obsahu vody v půdě a podmínkami pro šíření elektromagnetických vln. Při výběru vhodného snímače (Obr. 8) je zapotřebí přihlídnout kromě chemických vlastností půdy i k tomu, jak velký objem půdy je zapotřebí monitorovat. Platí zde zásada, že čím větší objem půdy snímač monitoruje, tím jsou údaje reprezentativnější. Je nutno věnovat zvýšenou pozornost a péči instalaci snímače. Je důležité, aby aktivní část snímače byla v těsném kontaktu s okolní zeminou a půda byla kolem snímače dobře utužena a nenacházely se zde vzduchové kapsy. Při instalaci se doporučuje odstranit všechny kameny a drobný skelet z půdy, kterou je snímač zasypán. Instalace snímače a současně i hloubka měření závisí na účelu měření. Největší část kořenů rostliny se nachází ve svrchní vrstvě půdy a zde také dochází k největším změnám půdní vlhkosti. V této části půdy dochází k zasakování podstatné části srážek. Monitorování vlhkosti v hlubších vrstvách půdy dává představu o dynamice vláhy v půdním profilu, o hloubce zasakování srážek a jejich čerpání pěstovanými plodinami. Z hlubších vrstev půdy čerpá rostlina vodu v případě kratších suchých období, kdy je nedostatek vody ve svrchní vrstvě půdy.

Některé snímače vlhkosti je možné umístit do půdy vertikálně nebo horizontálně. Svisle/vertikálně umístěný snímač umožňuje měřit půdní vlhkost v celé mocnosti dané vrstvy. Druhý způsob umístění měřicího zařízení je horizontálně. V tomto případě je vlhkost monitorována pouze v poměrně tenké vrstvě půdy. Pro sledování vlhkosti půdy ve větších hloubkách, je vhodné jednotlivé snímače ve vertikální poloze umístit nad sebe do předem vyvrtaných otvorů o průměru 15 cm. V případě hlubokých půd lze tímto způsobem monitorovat vlhkostní režim až do hloubky 150 cm. Při instalaci snímačů to takové hloubky je nutné zeminu kolem jednotlivých snímačů vratet postupně a utužovat ji vhodným nástrojem.

V zahraničí je provozováno široké spektrum technických řešení monitoringu vlhkostí půdy (např. čidla EasyAG, EnviroSCAN a další). To je dáno zejména pokročilým systémem závlah i polních plodin v některých zemích, což v České republice není obvyklé. Ukázka dalších systémů pro monitoring vláhového režimu půd používaného v zahraničí (Rakousko) je uvedena na Obr. 9. Sofistikované bilancování zásob vody v půdy, stejně jako aplikace v podobě dimenzování závlah, je možné i s využitím lyzimetrů. Významnou ztrátovou složkou vodní bilance je evapotranspirace. Skládá se z fyzikálního výparu (evaporace) a fyziologického výparu – transpirace, tj. výdeje vody vegetací. Velikost evapotranspirace je tak jedním ze základních vstupů při bilancování zásob vláhy v půdě, a to jak pro potřeby přípravy návrhových podkladů pro závlahové stavby, tak případně i při přímém řízení závlahového režimu. Evapotranspirace se zpravidla určuje buď experimentálně – lyzimetricky nebo výpočtem. Lyzimetrická metoda je založena na změně hmotnosti bloku půdy a vegetace na monitorovaném bloku půdy se vyskytující. Lyzimetry jsou stavebně a zejména finančně vysoce náročným zařízením (blok půdy má zpravidla objem několik m<sup>3</sup>, případně desítek m<sup>3</sup>), posazen je na vysoce citlivém vážícím zařízení umístěném uvnitř zděné šachty. Data jsou automaticky logována výpočetní technikou a žádoucí je monitoring lyzimetru kamerovým systémem kvůli identifikaci chyb vlivem návštěvy divoké zvěře apod. Počet zejména středních a větších lyzimetrů je tak omezený – v EU funguje



**Obr. 8** Vodorovné umístění snímačů pro monitoring půdní vlhkosti – čidlo VIRRIB (snímek vlevo nahoře); vodorovné umístění snímačů pro monitoring půdní vlhkosti – čidlo VIIRB – minimalizovaný typ (snímek vpravo nahoře); kombinace svislého a vodorovného umístění snímačů vlhkosti půdy VIRRIB (snímek vlevo uprostřed); manuální odečet údajů snímačů VIRRIB (snímek vpravo uprostřed); na dolním levém snímku: čidlo na měření půdní vlhkosti CS650 – vodorovně zasunuté břity (s bílou vyhodnocovací jednotkou) v pravé části snímku, půdní teploměry v levé části snímku; na dolním pravém snímku: ústředny senzorů VIRRIB a čidel CS650 s rozhraním pro odečet dat prostřednictvím kabelu a notebooku, případně s možností dálkového přenosu dat

Zdroj: autoři





**Obr. 9** Příprava a instalace systému pro monitoring vlhkosti půdy v porostu řepy cukrové (senzor EasyAG) – nahoře. S použitím půdního vrtáku umožňuje systém monitoring v prakticky nepoškozeném půdním profilu. Příprava systému pro řízení polních závlah (vlevo uprostřed); vpravo uprostřed – řízení polní závlahy automatickým systémem monitorujícím vlhkost půdy ve dvou hloubkových úrovních (žlutá a fialová křivka, srážky – modré sloupce a množství závlahové vody – oranžové sloupce) během vegetační sezóny (Rakousko). Horizontální čáry (modrá a oranžová) zachycují půdní hydrolimity půdy na půdním bloku. Vlevo dole – lyzimetrická stanice v Groß Enzersdorf (Rakousko), vpravo dole – zázemí lyzimetru (šachta pod lyzimetry s vážícím zařízením a jímáním průsakové vody).

Zdroj: autoři

celkem asi 180 lyzimetrických stanic, kde však výrazně převládají malé lyzimetry s plochou povrchu menší než  $1 \text{ m}^2$ . V ČR není v současnosti v provozu žádný váhový lyzimetr. Pouze na observatoři Doksany sítě stanic ČHMÚ je v provozu lyzimetr s plochou  $2 \text{ m}^2$ , umožňující výpočet evapotranspirace travnatého povrchu pomocí výpočtu z rovnice hydrologické bilance (nejedná se tak o klasický váhový lyzimetr).

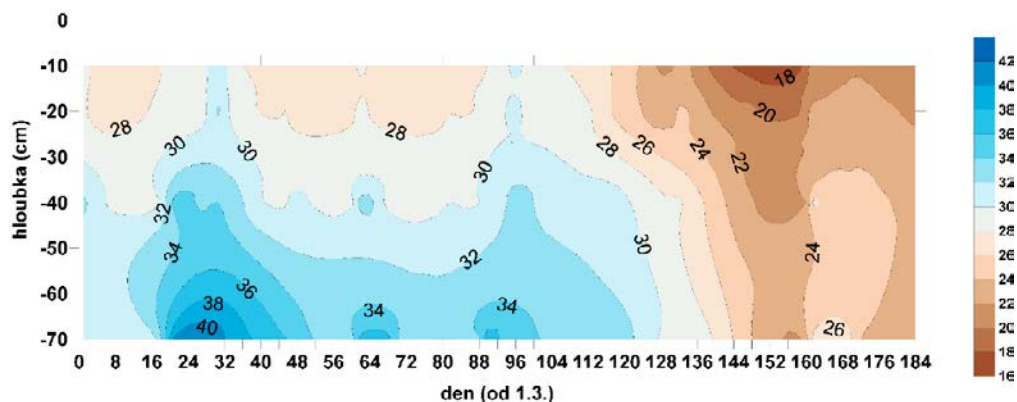
Alternativou k lyzimetrickým měřením jsou při stanovení evapotranspirace výpočetní metody. Nejrozšířenějším postupem, poskytujícím racionální a fyzikálně podložený způsob výpočtu výdeje vody z různých povrchů, je modifikovaný způsob výpočtu potenciální evapotranspirace metodou Penman-Monteith. Potenciální evapotranspirace je maximální možná evapotranspirace v daných klimatických a půdních podmínkách. Hodnota evapotranspirace závisí na půdních charakteristikách, druhu a vegetačním stadiu rostlinného krytu, rozloze krytu a na meteorologických činitelích.

### **Příklady realizace a hodnocení dat v biologických experimentech**

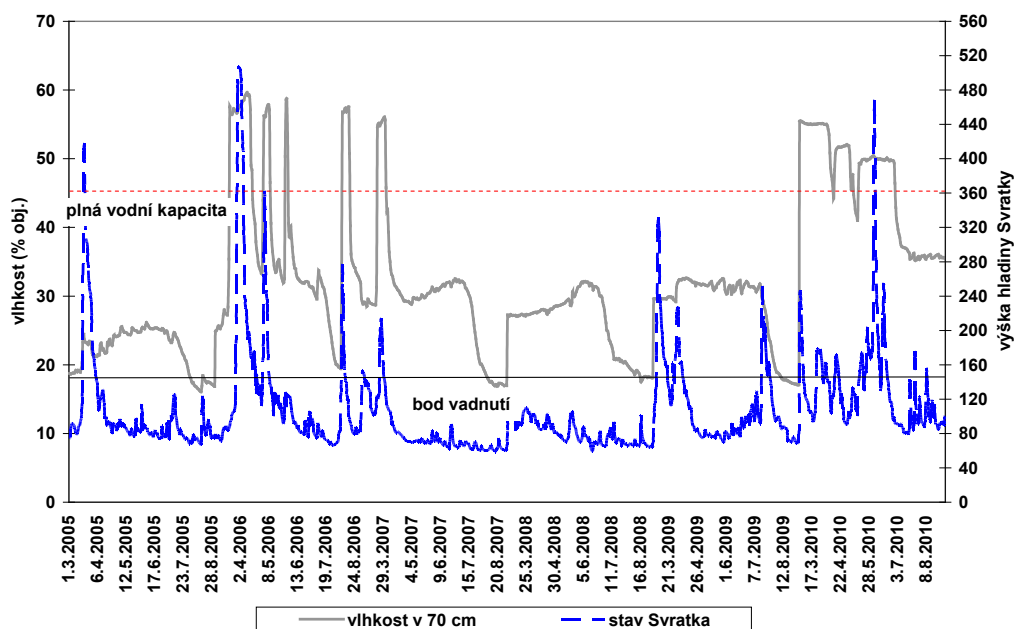
Cílem prezentované analýzy bylo vyhodnocení vlhkostního režimu půdy na pokusné lokalitě, kde je předpokládán výrazný vliv podzemní vody na hydrický režim půd. Půda na pozemku je zrnitostně těžká, fluvizem glejová (FLq), vytvořená na nivních usazeninách. Prakticky celý profil je jílovitohlinitý (49,3–58,3 % jílnatých částic), v hloubce okolo 50 cm se potom vyskytuje zrnitostně těžší úsek, který je jílovitý (69,4 % jílnatých částic). Půdní profil je pod stálým vlivem podzemní vody, což má za následek intenzivní glejový proces, jehož intenzita s hloubkou roste. Redoximorfnní znaky jsou patrné již od hloubky 70 cm. Základní půdní hydrolimity orničního profilu (zaokrouhleno): bod vadnutí: 19 % obj., retenční vodní kapacita: 27 % obj. a plná vodní kapacita 43 % obj.

Objemová vlhkost půdy byla monitorována v hodinovém kroku trvale umístěnými Time Domain Transmissometry (TDT) senzory VIRIRB (AMET Velké Bílovice) v hloubkách 10, 20, 40, 70 cm. Měřicí rozsah čidel se pohybuje od 5 do 50 % objemové vlhkosti, s přesností měření  $\pm 1 \%$ .

Výskyt, kolísání a vztlínání podzemní vody na lokalitě lze zejména v období s přísuškou považovat za příznivé. Během vlhkého počasí však může být komplikována zejména jarní a podzimní příprava půdy, v případě vysokých letních srážkových úhrnů také sklizeň. Riziko pro rostliny, zejména pro kořenový systém, představuje za vysokých vlhkostí půdy hypoxie a z pohledu fytopatologického zvýšené riziko výskytu houbových patogenů vlivem vyšší relativní vzdušné vlhkosti. Vlhkostní režim půdy na pokusné lokalitě v období od 1. 3. do 31. 8. v různých hloubkách pod porostem kukuřice je uveden na Obr. 10. Denní data z šestiletého měření byla aritmetickým průměrem převedena na „průměrný den“ sledovaného období a interpolována metodou lineární triangulace v software SURFER. Zřejmý je prudký nárůst vlhkosti půdy ve spodních vrstvách ornice a v podornici cca od třetí dekády března. Poměrně ustálený stav vlhkosti půdy na úrovni retenční kapacity (tj. dle hloubky od 27 do 34 %) trvá přibližně do počátku července, kdy nastane rychlý pokles zásoby půdní vody z důvodu vysokých evapotranspiračních nároků plodiny a srážkového deficitu. Je třeba zdůraznit, že se jedná o průměrná data za celé období s mírou nepřesnosti (shlazením extrémů), kterou používání průměrných hodnot může způsobovat. Skutečnou situaci (podrobný průběh hodinových údajů), tedy včetně průběhu mimořádných epizod např. během března a dubna (při seti jařin) v hloubce 70 cm, zachycuje Obr. 11.



**Obr. 10** Průběh vlhkosti půdy pod kukuřicí v období 1. 3.–31. 8., dlouhodobý průměr



**Obr. 11** Průběh hodinových vlhkosti půdy pod kukuřicí během šestiletého období. Modrá linie („stav Svratka“) zachycuje výšku hladiny přilehlé řeky, komunikující s půdním prostředím lokality

V souvislosti se zjištěným hydrickým režimem této lokality je například otázkou precizní aplikace živin a riziko jejich vyplavování v obdobích s výskytem podzemní vody v orničním profilu (3 % případů během monitorovaného období) nebo v podorňičí (17 % případů během monitorovaného období). Demonstrován je tak význam mikroklimatického porostního monitoringu, když již při výběru pokusné lokality by

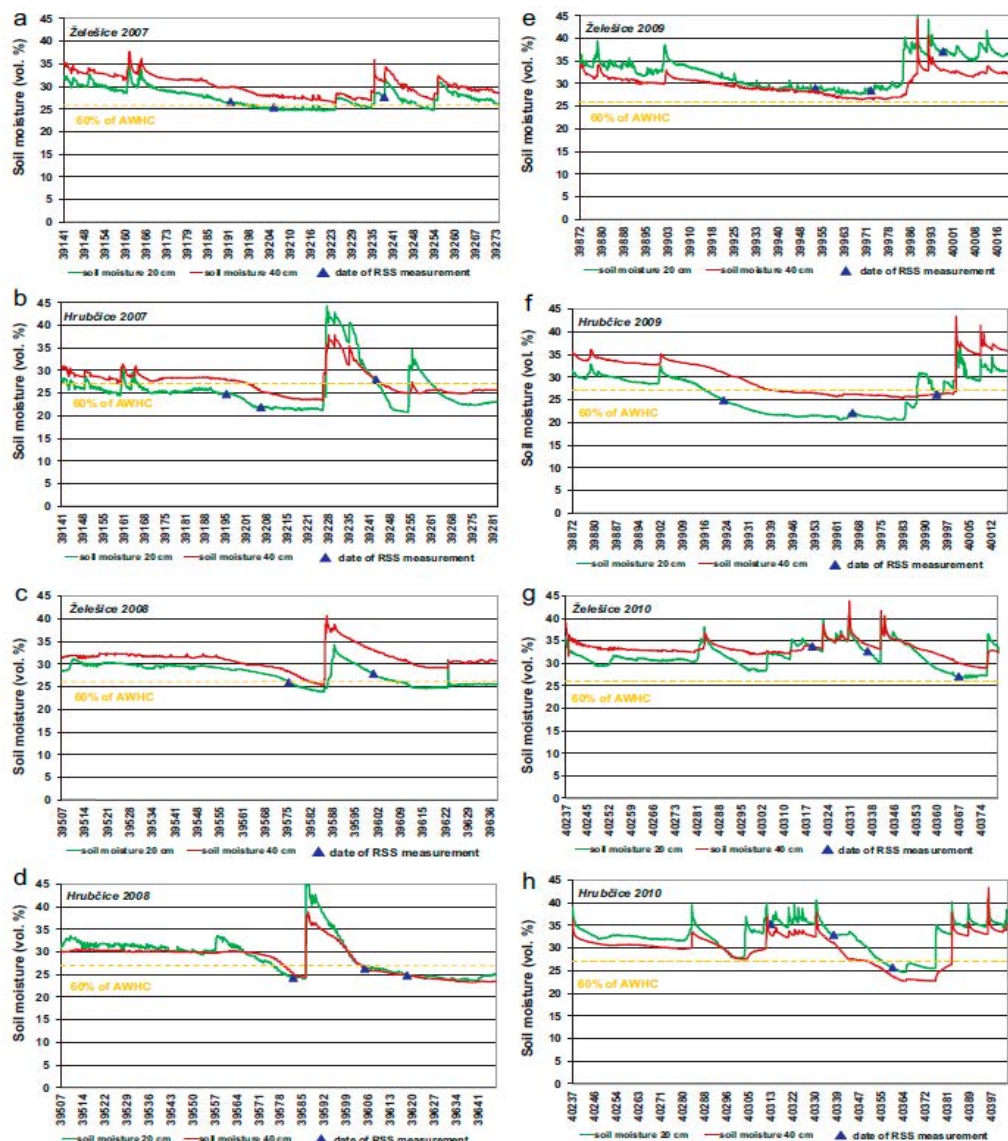
měl předcházet předběžný mikroklimatický monitoring pro identifikaci podobných lokálních specifik.

Jiný příklad porostního monitoringu vlhkostí půdy v různých hloubkách, vegetačních sezónách a lokalitách je uveden na Obr. 12. V průběhu hlavní vegetace pšenice ozimé byly během čtyř let na dvou pokusných lokalitách (Želešice, Hrubčice) senzory VIRRIB monitorovány v hodinovém intervalu vlhkosti půdy v hloubkách 20 a 40 cm pod porostem pšenice. V průběhu vegetace byla současně hodnocena velikost kořenového systému a následně vazba vlhkost půdy  $\times$  velikost kořenového systému  $\times$  výnos semen. Statické uvedení jedné průměrné hodnoty vlhkosti půdy, případně několika hodnot v určitých časových řezech (např. měsíčních), by v tomto případě mohlo být zavádějící. Uvedené grafické vyjádření sezónního průběhu vlhkostí půdy na lokalitě umožňuje objektivní expertní posouzení výskytu případného vláhového deficitu pro rostliny, jeho délky a intenzity. Možné je jednoduché srovnání ročníků. V případě, že jsou pro každou lokalitu známy hodnoty půdních hydrolimitů, je možné porovnání vláhových podmínek i mezi lokalitami.

Další velmi názornou variantou hodnocení vláhových podmínek hodnoceného místa pro možnost porovnání s jinými lokalitami je znázornění dat pomocí křivek pravděpodobnosti překročení (Obr. 13). Křivky pravděpodobnosti překročení jsou vypočítané podle vztahu  $P = m / (n + 1)$ , kde  $m$  je pořadové číslo ze vzestupně uspořádaného souboru,  $n$  je počet členů v řadě. Z těchto křivek lze vyčíst, jak často se jednotlivé hodnoty půdních vlhkostí vyskytují, popřípadě kolik procent dnů je pod anebo nad určitým hydrolimitem. Pro demonstrování metody byla použita tříletá data z dlouhodobého porostního monitoringu, realizovaného na pokusné ploše v oblasti jižní Moravy. V zájmovém území byly nainstalovány tři soupravy na registraci hodnot objemové vlhkosti půdy v hodinovém intervalu. Skládaly se ze snímačů půdní vlhkosti VIRRIB a registrátoru VIRRIBLOGGER (oboje AMET Velké Bílovice). Jedna souprava byla umístěna pod porostem kukuřice, druhá v přilehlém lužním lese a třetí na lesní pasece vzniklé smýcením lužního lesa. Srovnávána jsou tak tři rozdílná stanoviště umístěná nedaleko od sebe na rovinatém území a ovlivňována tudíž stejnými povětrnostními vlivy a hladinou podzemní vody. Cílem monitoringu bylo porovnání půdních vlhkostí na třech lokalitách v říční nivě s rozdílným vegetačním pokryvem.

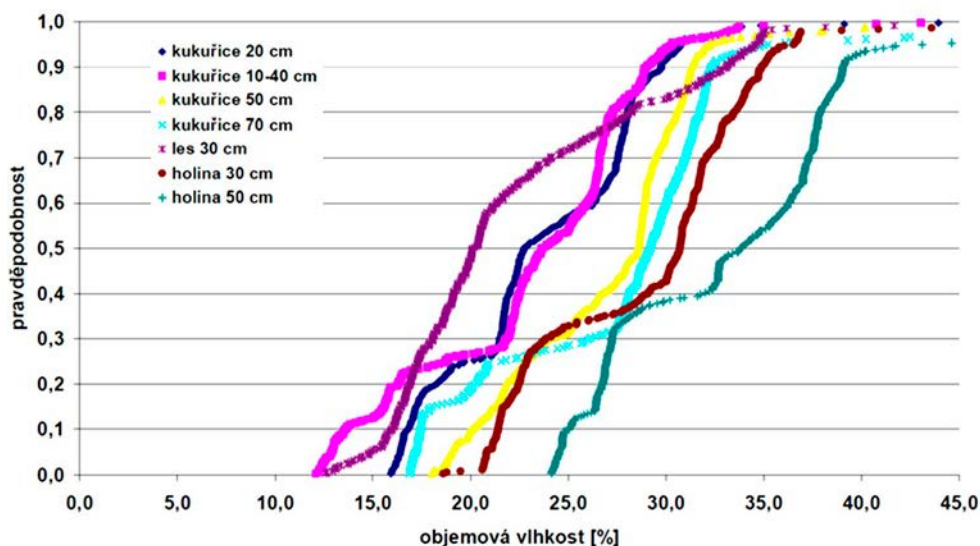
Mimo klimatických, hydrologických a pedologických faktorů ovlivňuje vlhkost půdy na stanovišti také typ vegetace a jeho vlastnosti (druhovité složení, věk, stav kořenového systému atd.). Výdej vody porostem (transpirace) činí u lesního porostu až 60 % srážkového úhrnu, u lučních ekosystémů 50 % a v polních ekosystémech až 40 %. Spotřeba vody dřevinami se mění, mimo jiné, s věkem porostu. U dubu je nejvyšší okolo 60. roku věku. Významným měřítkem pro hodnocení hospodaření rostlinných druhů s vodou je transpirační koeficient, tj. množství vody spotřebované na produkci jednotky sušiny (v  $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ). Pro zemědělské kultury je různými autory udáván v rozpětí 300–900  $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  (kukuřice 370), pro lesní dřeviny 170–350  $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  (dub 344). V porovnání s buřením se odčerpávací (desukční) schopnost lesa projevuje výrazně na hlubších půdách s větším prostorem pro kořenový systém dřevin. Narušením desukce po vytěžení porostu lze na holinách předpokládat lokálně výraznou změnu vlhkostí půdy.

Křivky pro vegetační období dokumentují, že v lese je půdní vlhkost v hloubce 30 cm pod hydrolimitem bod vadnutí přibližně v 60 % všech dnů, v kukuřici ve svrchních vrstvách necelých 30 % a na holině bodu vadnutí není dosaženo vůbec.



**Obr. 12** Vlhkost půdy pod porostem pšenice v hloubkách 20 a 40 cm během vegetačního období (březen až červenec) v letech 2007–2010 (a – Želešice 2007, b – Hrubčice 2007, c – Želešice 2008, d – Hrubčice 2008, e – Želešice 2009, f – Hrubčice 2009, g – Želešice 2010, h – Hrubčice 2010). Časové měřítko na osách X je uvedeno v číselném formátu pro možnost jeho použití ve výpočtech, když pořadové číslo dne se v aplikaci MS Excel načítá od 1. 1. 1900.





**Obr. 13** Křivky pravděpodobnosti překročení průměrných denních vlhkostí půdy ve vegetačním období

## 6.4 Ovlhčení listů

### Všeobecné minimální požadavky na měření ovlhčení listů:

- a) rozlišovací schopnost snímače: ovlhčeno/neovlhčeno

U meteorologického prvku ovlhčení listů se sleduje stav na povrchu listů. Zpravidla je stav vyjadřován jako binární kritérium ovlhčeno × neovlhčeno. Jedná se o bezrozměrnou veličinu. Při aplikaci dat do agrometeorologických modelů je vstupním údajem zpravidla „počet hodin s ovlhčením listů“. U některých meteorologických stanic existuje možnost nastavit citlivost snímače, tj. hranice, od níž nastává stav „ovlhčeno“.

Tato veličina se používá zejména ve fytopatologii. Ovlhčení listu vyjadřuje stav, kdy se na povrchu listů objeví souvislý film volné vody. Vodní prostředí umožňuje klíčení spor a jejich další pronikání do pletiv hostitelské rostliny. Většina houbových patogenů tak potřebuje přímé ovlhčení nebo vysokou vzdušnou vlhkost pro uvolňování spor a jejich vyklíčení. Závislost na ovlhčení listu a vysoké vzdušné vlhkosti klesá v okamžiku, kdy začnou čerpat živiny z hostitele. Ačkoliv většina houbových patogenů potřebuje přímé ovlhčení listu pro úspěšnou infekci, spory padlí klíčí a infikují rostlinu i za vysoké vzdušné vlhkosti. Některým patogenům postačuje pro množení rozmezí 50–70 % relativní vzdušné vlhkosti. Při délce ovlhčení 72 hodin se například vytváří podstatně více nepohlavních plodnic patogena *Mycosphaerella graminicola* ve srovnání s délkou ovlhčení 48 hodin.

Meteorologické proměnné pro predikci rozvoje houbových patogenů bývají často získávány z klimatologických stanic se standardním měřením ve výšce 2 m, která se mohou významně lišit od skutečných hodnot v porostu. Navzdory specifickým mikroklimatu porostu, zejména hustě setých polních plodin typu pšenice, nebyly

podrobně zkoumány charakteristiky vlhkostních veličin v jednotlivých porostních patrech. Takové studium může přinést cenné informace, zejména pokud jde o interakci mezi plodinou a jejím okolím. Tyto hlubší souvislosti tak mohou být aplikovány v systému integrované ochrany rostlin, a mohou přispět k efektivnějšímu potlačení patogenů a živočišných škůdců.

K ovlhčení může docházet deštěm nebo silnou rosou. Délka ovlhčení listů závisí na dalších meteorologických prvcích, jako je vlhkost vzduchu, rychlost větru a teplota vzduchu. Ovlhčení listů bývá v porostu zjišťováno různými senzory nebo modelováno z relevantních dat mikroklimatického monitoringu. Hraniční hodnota vlhkosti vzduchu, která je nezbytná pro ovlhčení listů v porostu je udávána kolem 90 %. Nicméně, část autorit uvádí, že veličina ovlhčení listů je samostatnou veličinou a nelze ji nahradit délkou trvání relativní vlhkostí, která by nabývala hodnot nad 90 % bez vnesení významné chyby.

### **Způsob měření**

V zemědělské praxi se používají snímače, které jsou založené většinou na měření vodivosti mezi dvěma elektrodami umístěnými ve vhodném držáku. V některých případech mezi elektrodami bývá umístěn nasáklivý materiál. Obvykle se jedná o filtrační papír. Při vzestupu vodivosti nad určitou hodnotu je tento stav označen jako „ovlhčení“. Je možné se setkat i se snímači bez filtračního papíru, které jsou tvořeny pouze elektrodami z nekorodujících materiálů, geometricky vhodně uspořádaných. Nejvhodnější je umístit snímače přímo do sledovaného porostu a do příslušné výšky tak, aby na něj mohly dopadat kapky deště. V zemědělské, převážně sadařské praxi, se v České republice pro měření ovlhčení listu používá snímač LW1 na bázi snímače Lufft (Obr. 14).

Jestliže je snímač ovlhčení listů založen na vodivosti filtračního papíru, je nutné provádět výměnu tohoto papíru cca každý měsíc, při déle trvajících deštích i častěji. Pokud se snímač skládá pouze z elektrod, je zapotřebí provádět jejich občasné čištění a izolantu mezi nimi vhodným neabrazivním prostředkem. Usazené nečistoty na elektrodách a v prostoru mezi nimi mohou způsobit zvýšenou vodivost i v suchém stavu. Je zapotřebí rovněž kontrolovat polohu snímače, je-li skutečně orientován tak, aby na aktivní část snímače dopadaly kapky deště.

### **Příklady realizace a hodnocení dat v biologických experimentech**

V klimatických podmínkách České republiky patří k nejzávažnějším chorobám ovocných dřevin strupovitost jabloní. Vzhledem k tomu byla věnována velká pozornost vypracování chemické ochrany i metodám prognózy výskytu patogena *Venturia inaequalis* způsobujícího tuto chorobu. Houba přezimuje v pletivech napadených listů a v průběhu dubna až června v závislosti na průběhu počasí v nich dozrávají asky a askospory způsobující primární infekce. K jejich uvolnění jsou zapotřebí dešťové srážky, během nichž navlhčené plodnice praskají a askospory jsou dále rozšiřovány větrem na povrch hostitelské rostliny. K tomu, aby askospory vyklíčily a vyvolaly infekci strupovitosti je zapotřebí určitá délka ovlhčení listů. Touto problematikou se zabýval již od 30. let 20. století na území USA Mills, který stanovil závislost mezi teplotou vzduchu, délkou trvání ovlhčení listů a vznikem infekce, popřípadě její intenzitou. Tyto závislosti jsou v podstatě používány se zpřesňujícími změnami dodnes



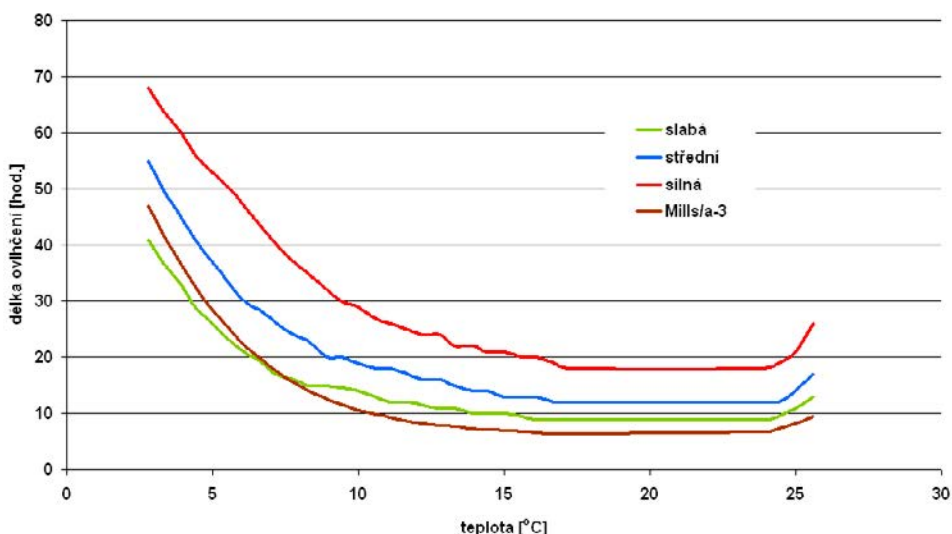
**Obr. 14** Zařízení na měření ovlhčení listu umístěné v různých zemědělských kulturách  
Zdroj: autoři

a jsou základem většiny modelů prognózy výskytu infekce. Mills rozdělil v závislosti na kombinaci těchto prvků infekce na slabé, střední a silné.

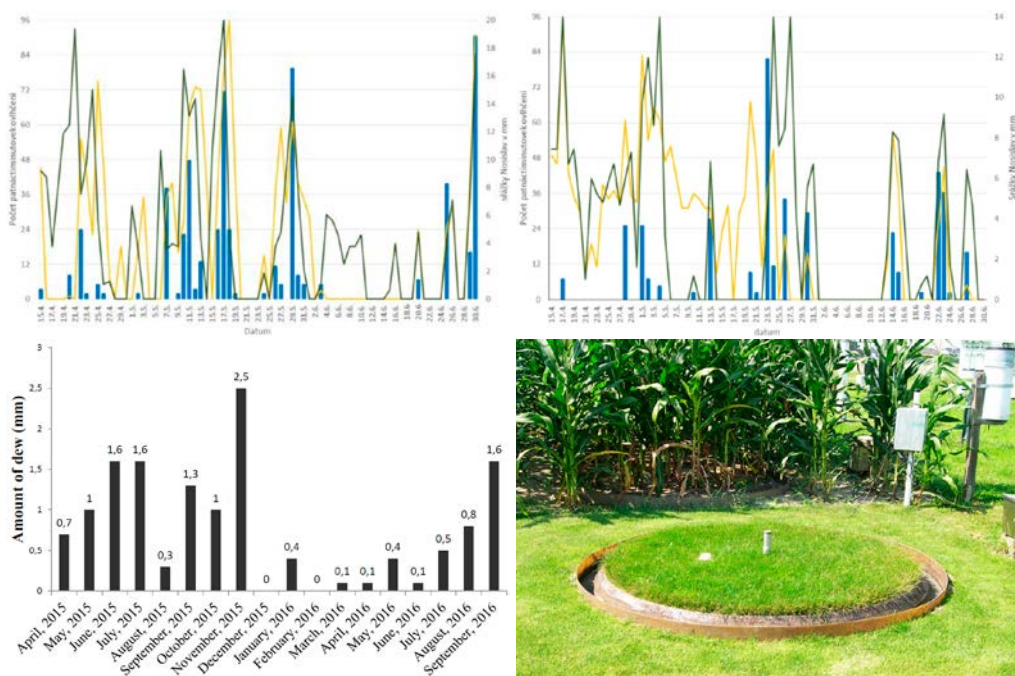
Na Obr. 15 jsou vyneseny jednotlivé křivky závislosti teploty vzduchu a ovlhčení listů stanovené Millsem pro jednotlivé síly infekce a jejich porovnání s křivkou Mills/a-3 inovovanou v devadesátých letech. Nově navržená křivka při nižších teplotách vyžaduje delší dobu ovlhčení pro vznik infekce, naopak při vyšších teplotách infekci vyvolá i kratší doba ovlhčení listů.

Jiný příklad aplikace výstupů z monitoringu ovlhčení listů za použití senzoru LW1 uvádí Obr. 16, kdy bylo během hlavního vegetačního období ve dvou letech prováděno měření délky ovlhčení listů v porostech ozimé řepky a ozimé pšenice v přízemní výšce měření. Data ovlhčení listů byla získávána v patnáctiminutovém intervalu a pro každý den vyjádřena jako počet patnáctiminutovek se statusem „ovlhčeno“ (tzn. max 96 patnáctiminutovek za 24 hod). Cílem experimentu bylo stanovit difference





**Obr. 15** Ukázka původních Millsových křivek a křivky Mills/a-3



**Obr. 16** Nahoře: denní počet patnáctiminutovek se statusem „ovlhčeno“ v porostech pšenice ozimé (zelená křivka) a řepky ozimé (žlutá křivka) během hlavního vegetačního období na lokalitě Žabčice během dvou let měření; modré sloupce udávají denní srážkové úhrny; měsíční úhrny rosy naměřené pomocí váhového lyzimetru (dole vlevo) se standardním travním porostem (dole vpravo)

v mikroklimatických podmínkách testovaných plodin s dopadem na ovlhčení listů a rizika výskytu houbových patogenů v této souvislosti. Detekovány byly nejen logické difference mezi ročníky, dané průběhem počasí během monitorovacího období (zejména výskytem srážek – modré sloupce, evapotranspiračními nároky prostředí – teplota, vlhkost a proudění vzduchu, růstovou fází rostliny atd.), ale i difference mezi plodinami, dané jejich odlišným habitem. Úspěšně tak byl otestován a optimalizován systém pro monitoring ovlhčení listů v polních plodinách pro možnost fytopatologického či agrometeorologického využití.

Alternativou monitoringu ovlhčení listů, respektive kvantifikace množství rosy vysrážené na povrchu rostlin, je využití váhových lyzimetrů, popsanych v kapitole Vlhkost půdy. S ohledem na finanční a stavební náročnost zařízení není monitoring přímo v polních podmínkách prakticky realizovatelný. Nicméně, v simulovaných polních podmínkách (Obr. 16 dole) bylo experimentálně zjištěno, že během 18měsíční epizody činil úhrn rosy, reprezentující horizontální srážky, 14 mm vodního sloupce, tj. 14 litrů na 1 m<sup>2</sup> (graf na Obr. 16 vlevo dole).

## 6.5 Teplota vzduchu

### Všeobecné minimální požadavky na měření teploty vzduchu:

- |                                     |           |
|-------------------------------------|-----------|
| a) rozlišovací schopnost snímače:   | 0,1 °C,   |
| b) přesnost měření:                 | ± 0,2 °C, |
| c) interval měření:                 | 10 minut, |
| d) interval mezi kalibrací snímačů: | 2 roky,   |
| e) používané jednotky:              | °C.       |

Teplota vzduchu podmiňuje a ovlivňuje základní životní funkce rostlin, jako jsou příjem živin, respirace, fotosyntéza, transpirace atd. Za hraniční teplotu pro asimilaci vyšších rostlin je považováno rozmezí od 0 °C do 5 °C, za optimální teplotu 15 °C až 30 °C a za maximální teplotu 35 °C až 42 °C. Záporné teploty anebo teploty v blízkosti bodu mrazu mohou v citlivých fázích vývoje poškodit vegetační orgány některých plodin (jarní mrazíky), zimní mrazy mohou způsobit poškození celých rostlin. V přízemní vrstvě se nachází vegetativní a generativní orgány většiny pěstovaných plodin. Především v jarním období jsou rostliny obzvláště citlivé na poškození nízkými teplotami, když s ohledem na radiační bilanci povrchu je v tomto období v přízemní výšce zpravidla dosahováno nižších teplot vzduchu než ve standardní dvoumetrové výšce měření.

S teplotou vzduchu velmi úzce souvisí vývoj poikilotermních škůdců (organismy bez stálé teploty těla), stejně jako houbových, či jiných patogenů. Pro určení dynamiky jejich vývoje se využívá celá řada modelů, které jsou založeny na sumaci aktivních a efektivních teplot. Tyto modely umožňují signalizovat dosažení jednotlivých vývojových stádií. Se stoupající teplotou prostředí se proces růstu a vývoje poikilotermního jedince zrychluje až po horní kritickou mez, horní práh vývoje, nad kterou teploty působí na růstové procesy negativně. Bylo zjištěno, že určitých fází vývoje (růstu) dosahuje organismus při konstantní sumě teplot. Pro kvantitativní vyjádření celkového tepelného množství využitelného pro vývoj organismu je používán termín suma aktivních (SAT) nebo suma efektivních teplot (SET). Jednotkou veličiny jsou denní stupně (DS) nebo nověji díky rozvoji automatizace měření a zpracování dat hodinové

stupně (HS). Za startovací termín sumace efektivních teplot je běžně používán kalendářní údaj nebo první termín výskytu spodní prahové hodnoty vývoje (SPV). Další možností pro start sumace, výrazně zvyšující přesnost predikce výskytu, je použití biologicky datované sumy efektivních teplot, tzv. BIOFIXu.

Vztahy zjištěné při porovnání porostních teplot vzduchu a teplot vzduchu nad standardním povrchem umožňují využití korekcí klimatologických dat pro upřesnění metod prognózy výskytu některých patogenů nebo škůdců. I přesto je pro tyto účely ideální využívat údaje z přímého porostního monitoringu, což je realizováno především při ochraně vůči škodlivým činitelům v sadech. Výsledky porostního monitoringu mimo to poskytují také nezbytné vstupní údaje pro matematické modelování procesů tvorby výnosů polních plodin, pro fyziologickou indikaci vodního stresu rostlin a následnou optimalizaci závlahového režimu apod.

Stejně tak je mikroklimatický porostní monitoring cenným zdrojem vstupních dat pro růstové či výnosové modely rostlin. Nezbytnou podmínkou pro získání relevantních dat je však jeho korektní realizace.

### **Způsob měření**

Automatické meteorologické stanice jsou vybaveny snímači, převádějícími teplotu vzduchu na vhodnou elektrickou veličinu. Při měření teploty vzduchu je nutné brát v úvahu, že na snímač působí kromě teploty vzduchu i radiační vlivy prostředí. Pro měření skutečné teploty vzduchu je zpravidla zapotřebí odstínit přímé záření, k čemuž především v minulosti sloužily meteorologické budky. V současnosti k tomuto účelu slouží stínítka (kryty, radiační štíty) různé konstrukce. U elektronických zařízení na měření teploty vzduchu se používají na odstínění menší lamelová plastová nebo kovová stínítka většinou bílé barvy. V případě měření teplot v malých výškách nad terénem je nutno odstínit snímač i ze spodní strany, neboť dochází k ovlivnění jeho hodnot dlouhovlnným vyzařováním zemského povrchu, zejména při vyšších teplotách povrchu (např. bez vegetace). Bylo zjištěno, že za slunečného dne může dosáhnout rozdíl teplot naměřených ze spodní strany neodstíněným a odstíněným registrátorem 2 až 4 °C. Stínítka je nutné udržovat čistá a neporušená. Změna albeda (odrazivosti) stínítka může vést k ovlivnění měřené teploty. Standardní výška pro měření teploty vzduchu (typicky na klimatologických stanicích ČHMÚ) je zpravidla 2 metry nad zemským povrchem. V aplikovaných experimentech se tato výška modifikuje dle účelu hodnocení (Obr. 17).

Teplota vzduchu je běžně monitorována také v přízemní výšce, nejčastěji jako meteorologický prvek „minimální přízemní teplota vzduchu“. Při měření přízemní teploty vzduchu je nutno rozlišovat mezi měřením teploty při povrchu půdy teploměrem umístěným v radiačním stínítku a standardním měřením přízemní teploty nestíněným teploměrem (Obr. 17 dole). Na klimatologických stanicích ČHMÚ se přízemní teplota měří pouze jako minimální („noční“) – tedy nestíněným čidlem nad aktivním povrchem ve výšce 5 cm. Měření přízemní minimální teploty provádí ČHMÚ nad travním porostem anebo nad sněhovou pokrývkou.

Při měření meteorologického prvku „minimální přízemní teplota vzduchu“ se používá nestíněný teploměr, protože v noci je přízemní teplota výslednicí teploty vzduchu, působení dlouhovlnného záření z půdy, zpětného záření oblohy a vlastního dlouhovlnného vyzařování teploměru.





**Obr. 17** Různé typy čidel pro měření teploty vzduchu umístěné v radiačních stínítkách; monitoring v různých zemědělských experimentech; dole vlevo – varianta monitoringu přízemní teploty vzduchu – monitoring v radiačním stínítku, dole uprostřed a vpravo – varianta monitoringu minimální přízemní teploty vzduchu – monitoring nestíněným čidlem

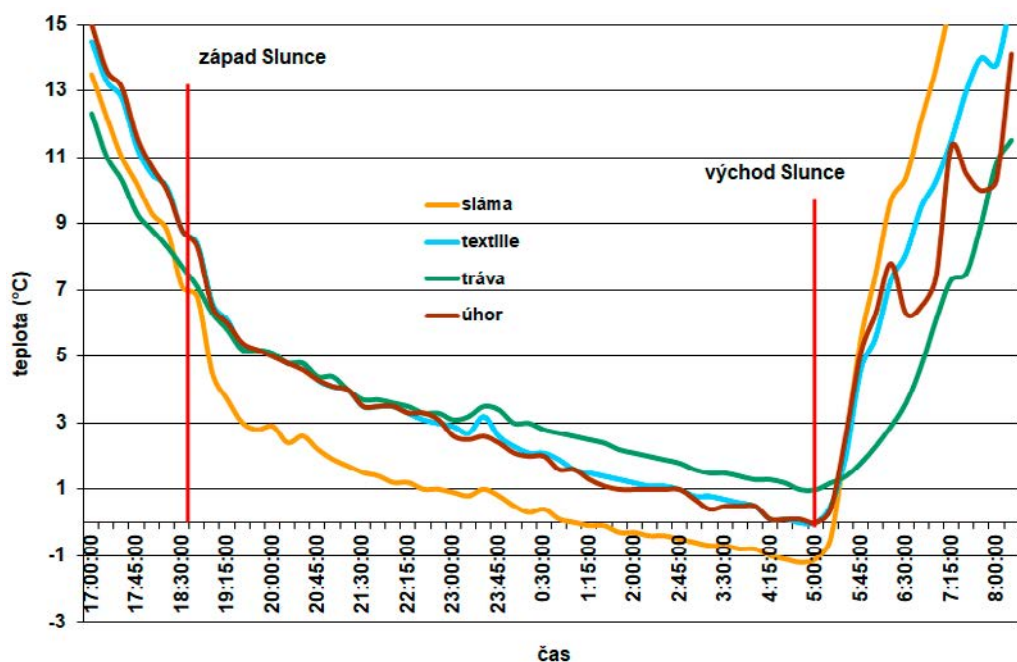
*Zdroj: autoři*

V případě použití nestíněného teploměru, při uvážení všech výše uvedených jevů, již nelze striktně mluvit o tom, že je měřena teplota vzduchu. Ryze korektní a správný termín by měl být „teplota přízemního teploměru“. V praxi se ukázalo, že nestíněný teploměr v období negativní radiační bilance poměrně dobře simuluje teplotu okolních rostlinných pletiv, čehož může být s výhodou použito při signalizaci vhodného okamžiku pro spuštění protimrazové ochrany v jarním období (podrobně v kapitole Teplota povrchu). Na Obr. 18 je příklad rozdílu průběhů teplot naměřených nestíněnými teploměry ve výšce 5 cm nad povrchem ve vzdálenosti několika metrů od sebe, ale umístěnými nad různými povrchy. Je zcela evidentní, že povrch půdy pokrytý slámou výrazně snižuje přítok tepla z půdy k aktivnímu povrchu a tím se i sníží množství vyzařované tepelné energie a předměty, nalézající se nad slámou, mohou mít o 1 až 2 °C nižší teplotu než např. nad holou půdou. Proto je vhodné vyčkat například s mulčováním jahod slámou až na období, kdy nehrozí přízemní mrazíky, jinak dojde k výraznějšímu mrazovému poškození než v případě absence mulče.

Při experimentálním monitoringu přízemní teploty vzduchu pro využití dat naměřených v průběhu celého dne je nutné senzor opatřit radiačním stínítkem.

Jestliže napadne sníh nad snímač teploty, je možné jej variantně, s ohledem na cíl experimentu, buď přemístit nad sněhovou pokrývkou, anebo ponechat pod ní. V prvním případě je měřena teplota nad aktivním povrchem, ve druhém případě teplota uvnitř sněhové pokrývky, což je zajímavé např. při hodnocení tuhosti zimy v souvislosti s přezimováním ozimů.

Měření přízemní minimální teploty nad travním porostem vyžaduje jeho pravidelnou údržbu, aby nedocházelo k přerůstání vegetace nad teploměr, neboť pak by se



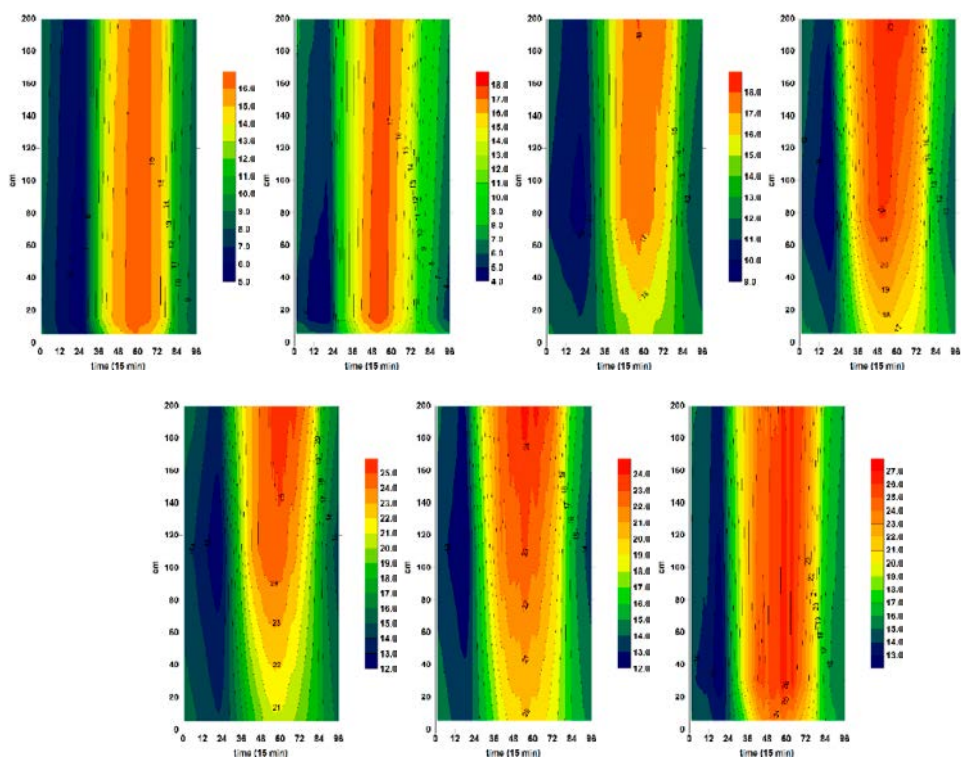
**Obr. 18** Průběh teplot ve dnech 17.–18. 4. nad jednotlivými povrchy

již měřila spíše teplota uvnitř porostu. V případě monitoringu v jiných zemědělských kulturách, kde je žádoucí, aby měl porost v okolí přízemního teploměru identické parametry jako monitorovaný porost, se zkracování rostlin sekáním logicky neprovádí.

### Příklady realizace a hodnocení dat v biologických experimentech

V rámci víceletého porostního mikroklimatického monitoringu byl autory kvantifikován vliv průběhu ročníku a růstové fáze na vertikální stratifikaci teplot vzduchu v porostu pšenice seté, stejně jako řepky olejné nebo kukuřice seté. Bylo zjištěno, že s rostoucí výškou porostu se zvyšují difference mezi teplotou vzduchu v přízemní výšce a teplotami měřenými na standardních klimatologických stanicích, případně přímo nad porostem ve 2 m.

Příklad výstupu porostního monitoringu v pšenici je uveden na Obr. 19. Schéma pokusu je identické s popisem uvedeným v kapitole Vlhkost vzduchu, tzn. že monitoring a záznam dat byly zajištěny pomocí mobilní meteostanice osazené digitálními



**Obr. 19** Průměrné hodnoty teploty vzduchu (°C) ve vertikálním profilu porostu pšenice. Každý nomogram ukazuje virtuální průměrný den období, získaný zprůměrováním hodnot za celé období. Na horizontální ose je uveden čas – 24hodinový den rozdělený po patnáctiminutových intervalech; na vertikální ose je výška měření. Zleva doprava: horní řada – období I. rok 1; období I. rok 2; období II. rok 1; období II. rok 2; dolní řada – období III. rok 1; období III. rok 2; období po polehnutí porostu ve druhém roce

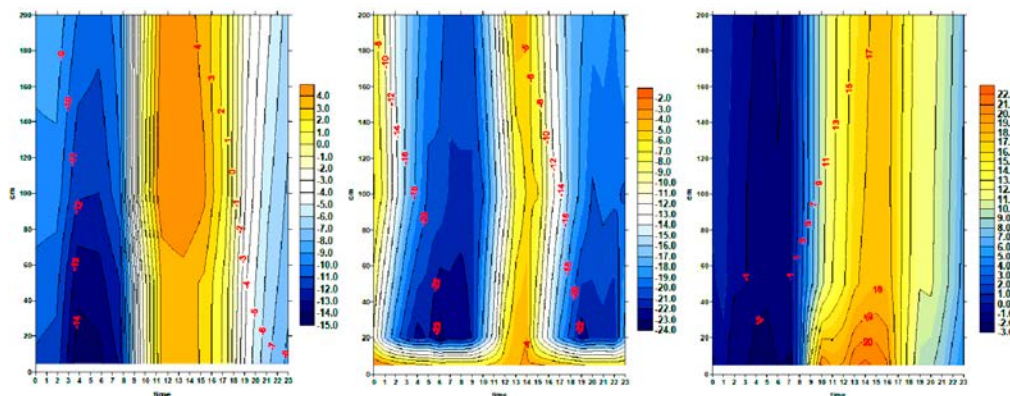


senzory. V případě teploty vzduchu senzory Dallas semiconductor, typ DS18B20 s přesností měření 0,5 °C a rozsahem -3 °C až +85 °C, umístěnými v radičním stínítku. Čidla byla umístěna ve třech výškových úrovních: 0,05 m (přízemní výška), 2 m nad povrchem půdy (analogie umístění senzoru na standardních klimatologických stanicích) a v efektivní výšce porostu (tj. cca ve výšce 0,7 až 0,8násobku výšky porostu).

Je zřejmé, že teploty vzduchu ve 2 m nad porostem a difference mezi jednotlivými vrstvami byly závislé na ročníku a fázi růstu rostlin. Difference ve vertikální stratifikaci teplot vzduchu se v obou letech projevily především během světlé části dne, kdy byly vlivem porostu v přízemní vrstvě vzduchu zaznamenávány nižší teploty ve srovnání s teplotami ve 2 m nad povrchem půdy v porostu. Od druhého období byla zaznamenána výrazná vertikální stratifikace teplot vzduchu, když maximální průměrné rozdíly ve vertikálním profilu činily 3 °C v prvním roce a 6 °C ve druhém roce. Ve třetím období tyto difference činily v obou letech 5 °C. Polehnutí porostu ve druhém roce hodnocení se projevilo výrazným snížením vertikální difference teplot vzduchu na úrovni max. 2 °C. Zajímavé je, že při nejnižších teplotách v tmavé fázi dne byly průměrné teploty vzduchu v efektivní výšce o 1 až 2 °C nižší nejenom ve srovnání s výškou 2 m, ale také s přízemním porostu. To souvisí s posunem aktivního povrchu s intenzivním dlouhodobým vyzařováním směrem k povrchu porostu a omezením tohoto vyzařování v přízemní vrstvě v důsledku jeho zastínění rostlinami.

Schopnost plodin přežít zimní období (tj. přezimovat bez poškození) je definována jako zimovzdornost. Z komplexu faktorů zahrnutých do zimovzdornosti je nejvýznamnějším parametrem mrazuvzdornost. Za kritickou teplotu např. pro pšenici ozimou je v podmínkách České republiky zpravidla považována teplota -15 °C a nižší. Trvá-li tato několik po sobě jdoucích dnů, hrozí reálné poškození i otužených přezimujících porostů (u běžných odrůd pšenice ozimé). Ozimé plodiny prochází v průběhu nástupu zimy a nízkých teplot procesem otužování. Pšenice ozimá dosahuje nejvyšší mrazuvzdornosti zpravidla od počátku do poloviny zimy. Stimulujícím prvkem jsou teploty mezi 0 °C až 5 °C, přičemž mírné mrazy (do -4 °C) otužení zvyšují. Teploty nad 5 °C nebo dlouhodobější působení mrazových teplot míru otužení rostlin snižují. Poněkud opomíjenou veličinou je v těchto souvislostech sněhová pokrývka a její parametry. Tuhost zimy, případně předjaří, jsou tak hodnoceny především na základě teplotních charakteristik (teplota vzduchu ve 2 m nad zemí, přízemní teplotní minimum, teplota půdy). Sněhová pokrývka působí jako přírodní izolátor a podle jejich parametrů může být teplota pod sněhem i o desítky stupňů Celsia vyšší než teplota okolní. Pozitivní termoizolační efekt sněhové pokrývky se projevil například během tuhé zimy 2005–2006, kdy bylo přes velice nízké zimní teploty docíleno v ČR rekordních výnosů semen zejména řepky ozimé díky zimě bohaté na sněhové srážky. Absolutně nejnižší teplota tak není měřítkem možnosti poškození porostu. Z agrometeorologického hlediska je významné, v jaké růstové fázi se nízké teploty vyskytují, zda jsou doprovázeny silným větrem a malou nebo žádnou sněhovou pokrývkou.

I v případě hodnocení meteorologických prvků, ovlivňujících přezimování, mají velký význam porostní měření. Důvodem jsou zejména odlišné podmínky při měření na standardních klimatologických stanicích a reálná situace v polních podmínkách, v porostu. Například, jak bylo uvedeno výše, minimální přízemní teplota vzduchu je na standardní klimatologické stanici ČHMÚ měřena nad travním porostem anebo



**Obr. 20** Vlevo: teplotní zvrstvení vzduchu během chladného dne s holomrazem (březen); uprostřed: teplotní zvrstvení vzduchu během chladného dne se sněhem (prosinec); vpravo: teplotní zvrstvení vzduchu během teplého dne bez sněhu (březen)

nad sněhovou pokrývkou, kdy je čidlo pokládáno na napadený sníh. Přízemní minimum tak nevystihuje podmínky zásadní pro rostlinu – podmínky pod sněhem.

Další příklad výstupů z měření teploty vzduchu z porostního mikroklimatického monitoringu uvádí Obr. 20. Vertikální stratifikace teplot vzduchu byla monitorována v porostu pšenice ozimé v katastru obce Žabčice v rámci sedmiletého mikroklimatického monitoringu. K měření v patnáctiminutovém intervalu byly použity elektronické registrátory HOBO U23 V2 (výrobce Onset Computer, USA) s přesností měření  $\pm 0.21\text{ }^{\circ}\text{C}$  a rozlišením  $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Čidla v radiačních stínítkách byla umístěna do výšky 5 cm nad povrch půdy (přízemní výška), 50 cm, 100 cm a 200 cm nad povrch půdy. Při sněžení a výskytu sněhové pokrývky bylo přízemní čidlo ponecháno ve výšce 5 cm nad zemí a měřilo tak teplotu pod sněhem. Vyhodnoceny byly hodinové teploty (průměr ze čtyř patnáctiminutových intervalů) z chladného období roku – od 1. 11. do 31. 3., které je z pohledu možného vyzimování a vymrznutí ozimých plodin zásadní.

Základní statistické hodnocení vertikální stratifikace teploty vzduchu v porostu pšenice v zimním období je uvedeno v Tab. 1. Průměrná teplota vzduchu v hodnocených výškách se liší pouze nepatrně (max. o  $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Absolutní teplotní maximum ( $25,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), způsobené nahříváním jen částečně krytého povrchu půdy slunečním zářením, bylo zaznamenáno ve výšce 5 cm na konci března. Absolutní teplotní minimum ( $-25,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) bylo zaznamenáno ve výšce 50 cm dne v lednu (v přízemní výšce se v té době vyskytovala sněhová pokrýвка, izolující tak čidlo v 5 cm). Diference teplot byly stanoveny jako rozdíl teploty ve výšce 200 cm nad povrchem (standardní výška měření na klimatologických stanicích sítě ČHMÚ) minus teplota vzduchu ve výšce hodnocené (5 cm, 50 cm a 100 cm). Nejvyšší teplotní rozdíl od teploty ve 200 cm byl zaznamenán ve výšce 5 cm při hodnocení maximální záporné difference. Rozdíl  $15,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  byl způsoben výskytem souvislé sněhové pokrývky na pozemku, izolující povrch půdy. Teplota pod sněhovou pokrývkou tak byla  $-7,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , teplota v 50 cm  $-25,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , teplota ve 100 cm  $-23,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  a ve 200 cm  $-22,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Stejně jak bylo demonstrováno v kapitole Atmosférické srážky, je i pro vyjádření teplotních podmínek ročníku či sezóny vhodnou interpretací graf na Obr. 21 (nahore). Graf obsahuje porovnání průměrných měsíčních teplot s normály či dlouhodobými

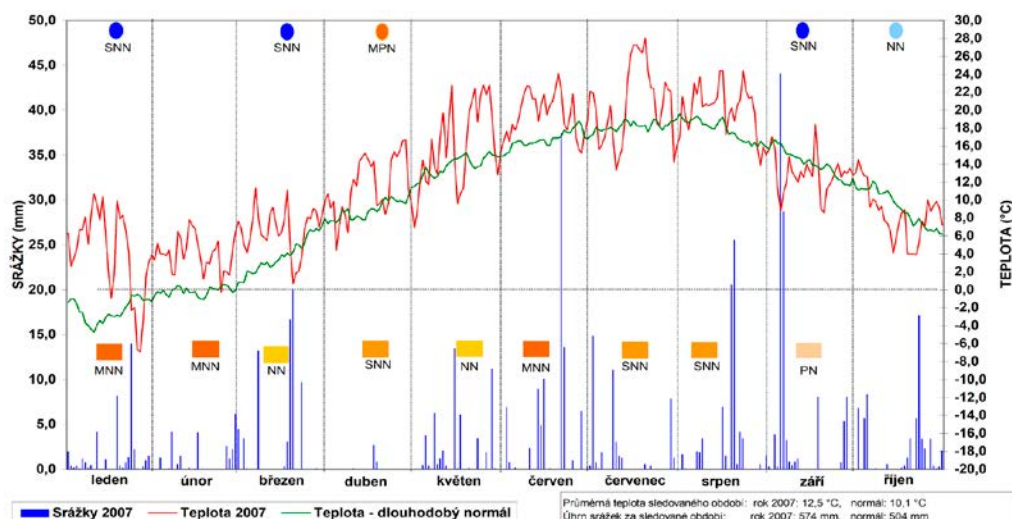


**Tab. 1** Základní vyhodnocení měření teplot vzduchu ve vertikálním profilu v porostu pšenice

	Výška měření nad povrchem			
	5 cm	50 cm	100 cm	200 cm
Průměr (°C)	1,7	1,4	1,4	1,7
Maximum (°C)	25,2	21,9	21,2	20,8
Minimum (°C)	-22,6	-25,9	-24,1	-22,8
Maximální kladná difference (°C)	5,9	5,9	3,3	X
Maximální záporná difference (°C)	15,5	2,3	2,7	X
Tepleji než ve 200 cm (% případů)	33	18	20	X
Chladněji než ve 200 cm (% případů)	60	64	64	X
Shodná teplota jako ve 200 cm (% případů)	7	18	16	X
Průměrná difference při tepleji než ve 200 cm (°C)	1,5	0,4	0,4	X
Průměrná difference při chladněji než ve 200 cm (°C)	0,9	0,5	0,4	X

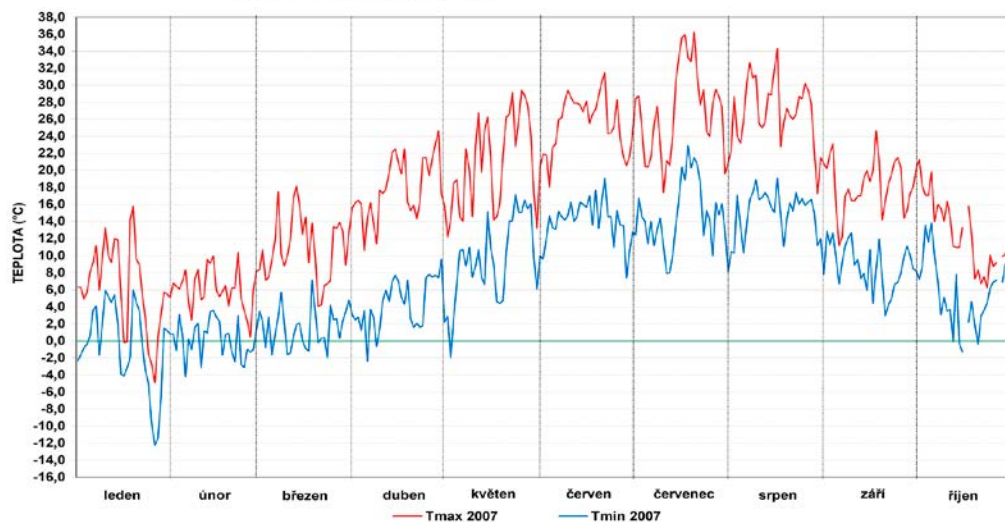
průměry a oklasifikování použitím vhodné klasifikace (např. doporučení Světové meteorologické organizace pro popis meteorologických, resp. klimatologických podmínek definovaného období – viz Kožnarová a Klabzuba, 2002, nebo jiné).

V případě teplot vzduchu je z pohledu biologického, ať již v rostlinné či živočišné produkci, významný také výskyt teplotních minim a maxim. Extrémní hodnoty teploty vzduchu mají často limitující charakter pro biologické procesy a hodnoty typu průměr tak mohou být pro některé aplikace nevhodné. Na Obr. 21 dole je demonstrováno vyjádření denních teplotních extrémů pro část konkrétního roku tak, jak by mělo být evidováno v rámci biologických experimentů. V kombinaci s uvedeným průběhem průměrných denních hodnot teploty vzduchu, jejich normálových hodnot, s uvedenými denními srážkovými úhrny a oklasifikováním jejich měsíčních průměrů (horní graf na Obr. 21) je k dispozici agrometeorologicky reprezentativní specifikace ročníku nebo jeho části.



	srážky	teplota
MNN mimořádně nadnormální měsíc	mimořádně vlhký měsíc	mimořádně teplý měsíc
SNN silně nadnormální měsíc	velmi vlhký měsíc	velmi teplý měsíc
NN nadnormální měsíc	vlhký měsíc	teplý měsíc
N normální měsíc	normální měsíc	normální měsíc
PN podnormální měsíc	suchý měsíc	studený měsíc
SPN silně podnormální měsíc	velmi suchý měsíc	velmi studený měsíc
MPN mimořádně podnormální měsíc	mimořádně suchý měsíc	mimořádně studený měsíc

metodika Klimatické normály, ČHMÚ Praha, 1988



**Obr. 21** Příklad vhodné prezentace dat o průběhu počasí v rámci ročníku nebo jeho části při statické konfrontaci s normály a dynamickém vyjádření průběhu (graf nahoře). Prezentace denních extrémů teplot vzduchu (maximální a minimální denní teplota) a jejich průběh během sledovaného období (graf dole)

## 6.6 Teplota povrchu

### Všeobecné minimální požadavky na měření povrchové teploty:

- |                                     |           |
|-------------------------------------|-----------|
| a) rozlišovací schopnost snímače:   | 0,1 °C,   |
| b) přesnost měření:                 | ± 1,0 °C, |
| c) interval měření:                 | 10 minut, |
| d) interval mezi kalibrací snímačů: | 2 roky,   |
| e) používané jednotky:              | °C.       |

Pro každý aktivní povrch je typické, že na něm dochází k transformaci energie krátkovlnného slunečního záření a dlouhovlnného záření oblohy na energii tepelnou a části transformované tepelné energie na energii dlouhovlnného vyzařování daného povrchu. Zbývající část tepelné energie je v závislosti na denní a roční době předávána vedením do hlubších vrstev povrchu anebo je turbulentní výměnou, turbulentním transportem latentní energie a molekulárním vedením transportována od povrchu do okolní atmosféry. Z toho vyplývá, že teplota daného povrchu se může za určitých situací lišit od teploty okolního vzduchu.

Často se předpokládá, že teplota rostlinných pletiv odpovídá klasicky měřené teplotě vzduchu. Nicméně, na základě energetické bilance, nezastíněné rostlinné části mají v noci odlišnou bilanci dlouhovlnných toků a případně latentního tepla. Během jasných nocí je teplota povrchu předmětů v blízkosti zemského povrchu nižší než teplota okolního vzduchu v důsledku dlouhovlnného vyzařování. V období záporné energetické bilance je teplota vzduchu měřená standardním způsobem (v meteorologické budce nebo v radičním stínítku) téměř vždy vyšší než teplota rostlinného pletiva. V případě minimálních teplot se tento rozdíl pohybuje okolo 0,5 °C. V extrémních případech může být naměřená teplota o více než 1,5 °C vyšší, než je skutečná teplota rostlinných pletiv.

Porosty jsou potom pestrá mozaikou povrchů s možnými rozdíly v teplotách v závislosti na jejich orientaci vůči světovým stranám, zastínění, fyzikálních vlastností jejich pletiv apod. U transpirujících pletiv udává jejich teplota v porovnání s teplotou okolního vzduchu míru zásobení rostliny vodou, popřípadě její schopnost transportovat vodu z půdního prostředí k prùdùchùm. Lze tak poměrně spolehlivě stanovit míru vodního stresu rostlin a případnou potřebu závlahy. Poikilotermní živočichové, nalézající se na různých površích anebo pod nimi, se rovněž vyvíjejí za odlišných tepelných podmínek, než reprezentuje teplota vzduchu. Proto je vhodné zkoumat závislost teploty těchto povrchů na teplotě vzduchu a do jednotlivých agrometeorologických modelů zavést případné korekce.

Teplotu povrchu je možno měřit buď dotykově, nebo bezdotykově. K dotykovému měření slouží dotykové teploměry různých konstrukcí, u nichž se vlastní snímací část přikládá na měřený povrch. Výhodou je okamžité zjištění teploty daného povrchu, avšak nevýhodou je ovlivnění teploty povrchu samotným teploměrem (zastínění, odvod tepla snímačem teploměru atd.) při déletrvajícím měření. Proto se většinou k tomuto účelu používají bezdotykové teploměry, založené na Stefan-Boltzmannově zákonu, který kalkuluje s emisivitou. Emisivita je mírou schopnosti daného předmětu vyzařovat infračervenou energii, která nese informaci o jeho teplotě. Emisivita může nabývat hodnot od 0 (lesklé zrcadlo) do 1,0 (černé těleso). Většina organických,



**Obr. 22** Monitoring teploty povrchů v biologických experimentech použitím techniky různé konstrukce; povrchová teplota heterogenního povrchu pole s různými plodinami – termosnímek pořízený termální kamerou (nahore vlevo); měření povrchové teploty listů kukuřice infračerveným bezdotykovým termometrem (nahore vpravo); dlouhodobé měření povrchové teploty rostlinných pletiv infračerveným bezdotykovým teploměrem (uprostřed vlevo měření teploty květů, uprostřed vpravo měření teploty plodů, dole vlevo měření teploty povrchu kůry ovocného stromu); dlouhodobé měření povrchové teploty přírodních povrchů v přírodně cenném prostředí (dole vpravo)

Zdroj: autoři

nabarvených nebo zoxidovaných povrchů má emisivitu blízkou hodnotě 0,95. Proto mají některé jednodušší teploměry emisivitu pevně nastavenou na tuto hodnotu. Dokonalejší přístroje disponují možností uživatelského nastavení emisivity, aby ji bylo možno lépe přizpůsobit skutečným podmínkám měření.

Měření teploty povrchu může být buď bodové anebo plošné (Obr. 22). Zejména při plošném měření mohou do záběru kamery vstupovat povrchy s různou emisivitou a zobrazené údaje proto nemusí vždy na celé ploše odpovídat skutečnosti. Typickým příkladem může být měření teploty porostu a sousedních polních cest (Obr. 22 vlevo nahoře) kde je zřejmá výrazná heterogennita teploty povrchu půdy a porostu od 31,0 °C až po 55,5 °C na poměrně malé ploše. Z termosnímku je patrné, že vegetační kryt má na teplotu povrchu půdy zásadní vliv.

### **Příklady realizace a hodnocení dat v biologických experimentech**

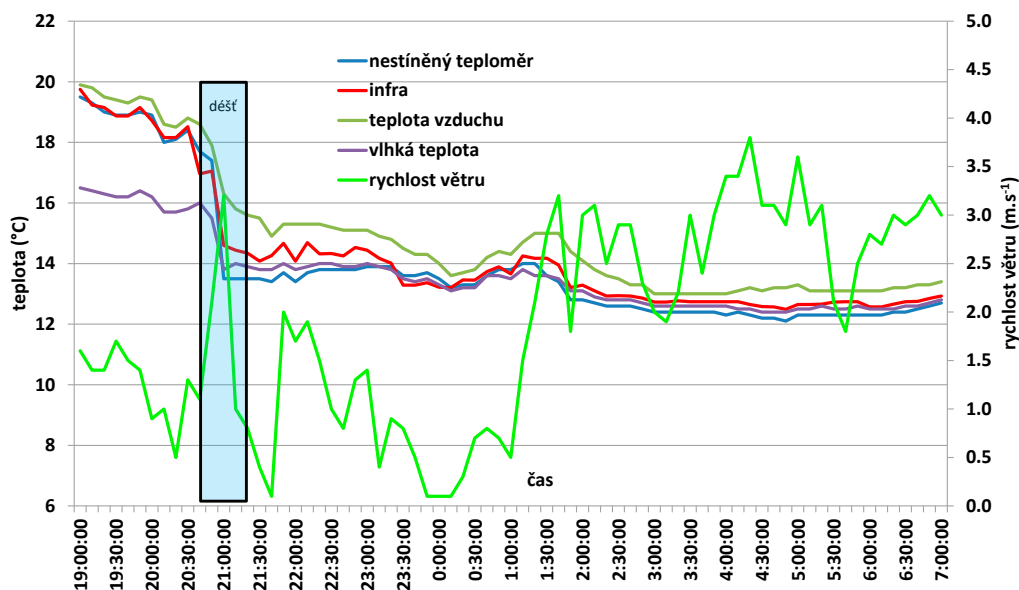
Bioklimatologickými studiemi bylo v klimatických podmínkách České republiky zjištěno, že například termín fenologické fáze počátek kvetení u meruňky nastává v současnosti o 13 dříve, než tomu bylo na počátku hodnoceného období 1940–2008. Průměrný posun nástupu této fenofáze tak činí cca 2 dny za dekádu. Podobný vývoj byl dokumentován i při hodnocení dlouhodobých fenologických dat u dalších druhů rostlin, včetně volně rostoucích. Bioindikované prodlužování vegetačního období může být na jedné straně příležitostí pro rostlinnou produkci v České republice, současně však tento vývoj přispívá k růstu rizika mrazového poškození plodin pozdními jarními mrazíky. Zejména u ovocných druhů je tak řešena protimrazová ochrana v případě předpovědi výskytu vegetačních mrazíků. Načasování jejich použití však závisí na precizním stanovení a predikci rizikových podmínek. Ideální je sledovat teplotu květů z důvodu včasného spuštění protimrazových systémů. Nicméně, existuje mnoho kritických míst, které komplikují využití této metody.

Cílem prezentované studie, využívající dlouhodobý monitoring teploty povrchu rostlinných pletiv ovocných dřevin v klimatických podmínkách Jižní Moravy bylo: i) najít metodu měření teploty vzduchu s nejlepší shodou s teplotou rostlinných pletiv, ii) kvantifikovat difference mezi teplotou květů a teplotou okolního prostředí během různých povětrnostních situací. V desetiminutových intervalech byla v jarních měsících (duben až květen) měřena povrchová teplota rostlinných pletiv (rašící list révy vinné, květ hrušně, květ meruňky, nezralý plod hrušně), teplota a vlhkost vzduchu v radiačním stínítku, mokrá teplota nestíněným teploměrem a teplota měřená nestíněným teploměrem. K měření povrchové teploty rostlinných pletiv byl použit bezdotykový infračervený snímač teploty Omega, OS211-LT, připojený k dataloggeru MeteoUni (AMET, Velké Bílovice). Teplota vzduchu byla měřena snímači DS18B20 (Dallas Semiconductor). Vlhkost vzduchu byla měřena snímačem HIH-4000 (Honeywell).

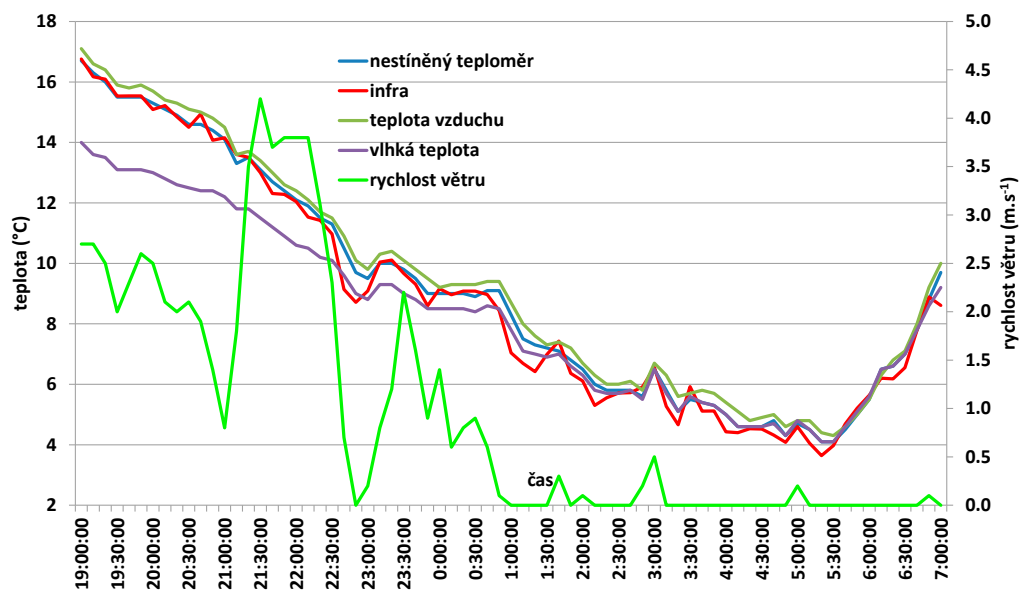
Vyhodnocena byla období od západu do východu Slunce, kdy rostliny a nestíněné teploměry nebyly ovlivněny krátkovlnnou radiací. Měření teploty vzduchu v radiačním stínítku bylo zvoleno jako standardní způsob stanovení teploty vzduchu.

Z každého měření byla stanovena průměrná teplota získaná jednotlivými způsoby a rovněž i teplota nejnižší. Byly stanoveny difference mezi jednotlivými teplotami vzduchu a povrchu rostlin včetně variačního rozpětí.





**Obr. 23** Průběh teplot vzduchu a povrchu květů meruňky ve dnech 12.–13. 4.



**Obr. 24** Průběh teplot vzduchu a povrchu květů meruňky ve dnech 13.–14. 4.

Je zřejmé, že poměrně dobrou shodu lze očekávat mezi teplotou povrchu pletiv a teplotou měřenou nestíněným teploměrem. V případě vlhkého teploměru závisí velikost odchylky na vlhkosti vzduchu, anebo na výskytu srážek (Obr. 23). Před deštěm byl mezi teplotou vlhkého teploměru a teplotou květu rozdíl větší než 2 °C. Nestíněný



teploměr vykazoval poměrně dobrou shodu s teplotou květu před deštěm. Po dešti se jeho hodnoty přiblížily v důsledku ovlhčení údajům vlhkého teploměru. Teplota vzduchu měřená ve stínítku indikovala vyšší hodnoty, než byla skutečná teplota květů.

Meteorologicky výrazně odlišnou situaci během následující noci ukazuje Obr. 24. Radiační charakter nočního počasí a bezvětrí přispěly k prudkému poklesu teplot vzduchu i povrchové teploty květů meruňky. Povrchová teplota květů během tohoto typu počasí klesala nejnižší. Obdobný stav lze očekávat i v případě poklesu teplot k nebo pod 0 °C, tj. na úroveň s rizikem mrazového poškození květů. Průběh potvrzuje vliv charakteru ochlazování na reakci teploměrů různé konstrukce. To má potom výrazný vliv i na úspěšnost agrometeorologických modelů pro predikci výskytu vegetačních mrazíků.

Bylo zjištěno, že nejlepší shodu s teplotou rostlinných pletiv poskytuje nestíněný teploměr, jehož energetická bilance odpovídá přibližně i bilanci hodnocených rostlinných pletiv.

Dlouhodobý kontinuální monitoring teploty rostlinných pletiv byl použit i v experimentu hodnotícího transpiraci kukuřice v závislosti na vláhových a meteorologických podmínkách. Cílem práce bylo identifikovat a kvantifikovat rozdíly v transpiraci

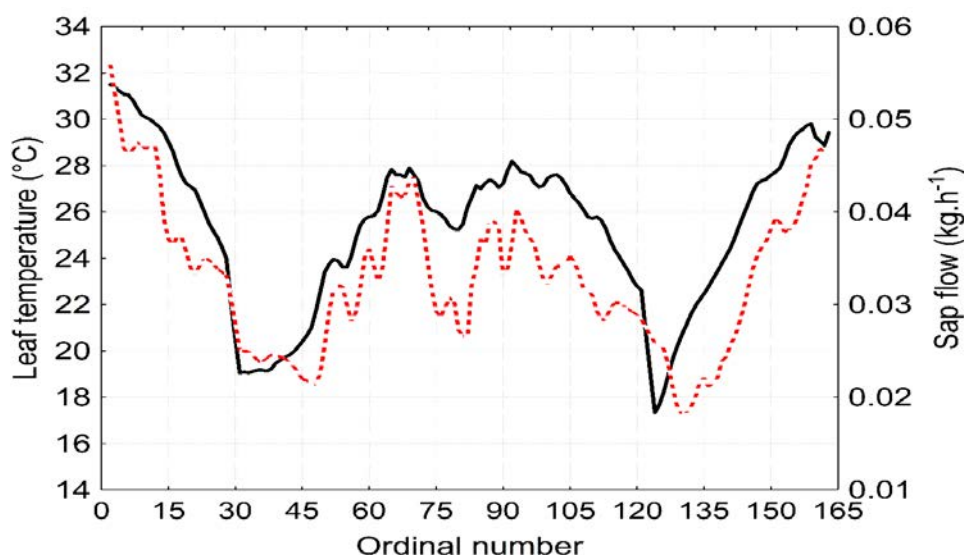


**Obr. 25** Instalace senzorů pro měření transpirace prostřednictvím monitoringu toku xylémové šťávy (SHB metoda) v experimentu se slunečnicí – nahoře; monitoring sap flow v experimentu s kukuřicí (dole vlevo) a v experimentu se slunečnicí (dole vpravo)

*Zdroj: autoři*

rostlin kukuřice seté (*Zea mays* L.) při různých úrovních zásobení vodou pomocí SHB (Stem Heat Balance) metody, umožňující měřit úroveň transpirace na základě toku xylémové šťávy (Obr. 25). Charakterizovat závislost transpiračního toku a měřených faktorů prostředí.

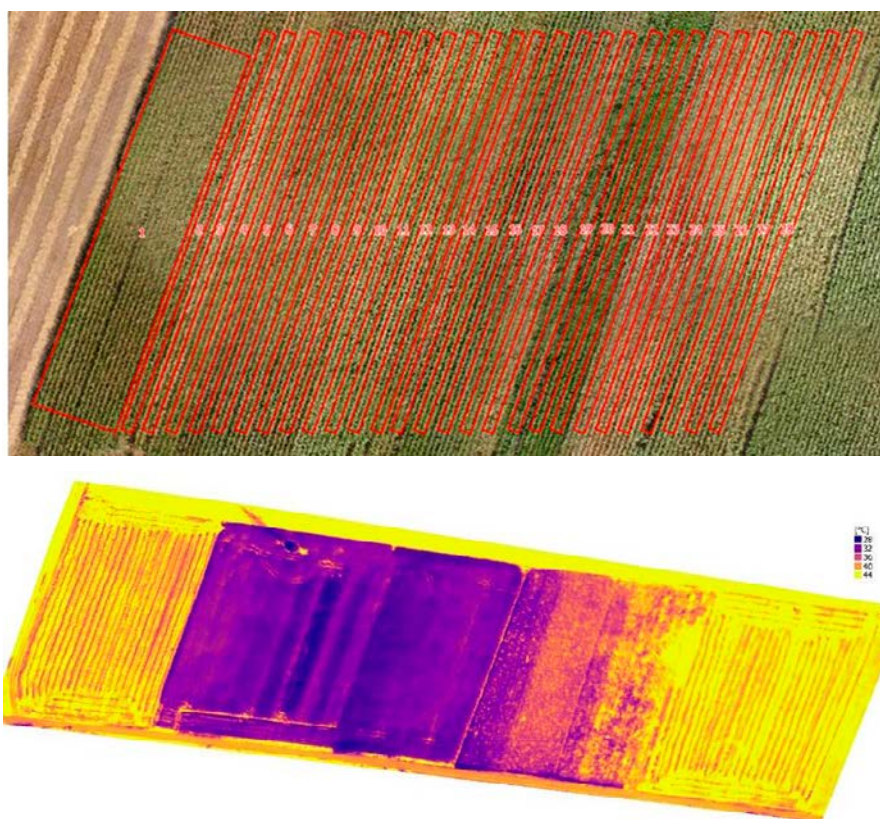
U rostlinných druhů s malým průměrem stonku je při použití SHB metody využíváno vnějšího topného tělesa a změna teplot je snímána vnitřním čidlem (jehlou). Teplo dodávané do stonku je odváděno prouděním vody v xylému, ale zároveň dochází k tepelným ztrátám. Tyto ztráty lze odvodit změřením aktuálního transpiračního toku za deště nebo před svítáním a jsou zahrnuty ve výpočtových rovnicích. Hodnoty transpiračního toku ( $Q$ ) jsou udávány v jednotkách  $[\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}]$ . Měřicí systém je složen z páru termočlánků, které jsou instalovány v určité vzdálenosti od sebe na stonku rostliny. V místě upevnění termočlánků je stonek po celém obvodu izolován válcovým těsněním, které zároveň plní funkci topného tělesa. SHB je nedestruktivní, citlivá metoda. V prezentovaném experimentu byly měřeny vždy dvě rostliny z každé varianty od fáze BBCH 50 – metání lat až do fáze BBCH 89 – plná zralost. Paralelně byly monitorovány meteorologické prvky významné pro transpiraci: relativní vlhkost vzduchu (%) a teplota vzduchu ( $^{\circ}\text{C}$ ), teplota povrchu listů ( $^{\circ}\text{C}$ ), objemová vlhkost půdy (%), teplota půdy ( $^{\circ}\text{C}$ ), globální sluneční záření ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ), rychlost větru ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), půdní vodní potenciál ( $-\text{bar}$ ). Teplota povrchu listů byla měřena bezkontaktním infračerveným termometrem Raytek MX4 Raynger® MX4™ s rozlišením  $0.1^{\circ}\text{C}$  a přesností měření  $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$  v minutovém intervalu.



**Obr. 26** Průběh sap flow (červená křivka;  $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ , 15minutové průměry) v závislosti na změnách povrchové teploty listů (černá křivka;  $^{\circ}\text{C}$ ) v průběhu periody noc – den – noc – den, osa X udává pořadové číslo 15minutovky od počátku experimentu

V experimentu byla v průběhu sledované periody vegetačního období kukuřice zjištěna těsná korelace mezi hodnotami transpiračního toku a vybranými meteorologickými prvky – globálním slunečním zářením, teplotou vzduchu a teplotou povrchu listů především ve variantách bez stresu suchem a s mírným stresem suchem. Transpirace rostlin v kontrolní variantě (optimální závlaha) citlivěji reagovala na průběh počasí. Při zvýšení evapotranspiračních požadavků byla intenzita transpirace vyšší ve srovnání se stresovanými variantami.

Metoda plošné analýzy teploty povrchu rostlin pomocí termálního čidla neseného bezpilotním leteckým prostředkem (UAV – unmanned aerial vehicle) byla použita pro otestování možnosti detekce vláhového deficitu u odrůdového experimentu s kukuřicí během tropických dnů s výskytem vláhového deficitu v oblasti Jižní Moravy. Je známo, že na vodní stres reagují rostliny standardně tak, že uzavírají průduchy v listech, což se projeví růstem povrchové teploty, a tedy i infračerveného záření emitovaného rostlinou. Při stavu otevřených průduchů odpařující se voda ochlazuje list. Zavřením průduchů se rostlina brání vůči ztrátám vody. Změnou vodivosti průduchů se ale zároveň zvýší teplota povrchu listů. Jednou ze strategií obrany rostlin



**Obr. 27** Odrůdový pokus kukuřice – snímek ve viditelném spektru (nahore), termální snímek (dole; střední část snímku s fialovými odstíny)

*Zdroj: autoři*



před nepříznivými podmínkami (suchem) je tak rychlejší zavření průduchů a tím omezení ztrát vody transpirací. Princip tohoto hodnocení (detekce vodního stresu polních plodin termokamerovým systémem) byl v podmínkách České republiky podrobně popsán v certifikované metodice Lukáš *et al.* (2019).

V prezentovaných výsledcích z experimentu s hodnocením povrchové teploty rostlinných pletiv bylo na lokalitě Švábenice provedeno termální snímkování dronem osazeným termálním senzorem thermoMAP (NIR; 760–1 400 nm) v polním pokusu s 28 hybridy kukuřice s různou raností a u některých hybridů s pozdním výsevem (Obr. 27). Polní pokus byl založen s dodržení zásad polní pokusnické praxe, včetně opatření obsevem, víceřádkového výsevu s dostatečnou plochou na pozemku s nízkou půdní heterogenitou. Dílčí výsledky hodnocení ukázaly např. statisticky průkazně ( $p < 0,05$ ;  $r = 0,733$ ) vyšší povrchovou teplotu rostlin při použití vyššího výsevu, signalizující uzavření průduchů rostlin z důvodu větší kompetice a nedostatku půdní vláhy. Podobně byl zjištěn statisticky průkazný vztah ( $p < 0,05$ ;  $r = -0,731$ ) při hodnocení vztahu mezi teplotou povrchu rostlin a raností hybridu (FAO číslo), když pozdnější hybridy nebyly v době hodnocení senescentní a vykazovaly tak nižší teplotu povrchu z důvodu přetrvávající transpirace, provázené ochlazováním povrchu.

## 6.7 Teplota půdy

### Všeobecné minimální požadavky na měření teploty půdy:

- |                                     |               |
|-------------------------------------|---------------|
| a) rozlišovací schopnost snímače:   | 0,1 °C,       |
| b) přesnost měření:                 | $\pm 0,2$ °C, |
| c) interval měření:                 | 10 minut,     |
| d) interval mezi kalibrací snímačů: | 2 roky,       |
| e) používané jednotky:              | °C.           |

Teplota půdy je velmi významným agroklimatickým prvkem, který ovlivňuje dobu setí, klíčení, vzcházení, vodní a vzdušný režim, přezimování rostlin, fenologii plodin, aktivitu edafonu, vývoj škůdců přezimujících a vyvíjejících se v půdě, rychlost zvětvávání a transformaci organických látek včetně produkce CO<sub>2</sub> jejich rozkladem.

Základním zdrojem energie pro ohřívání půdy je sluneční záření. Vliv geotermální energie je obvykle zanedbatelný. Termické procesy jsou v půdě spojeny s procesy hydrickými. Proto je často teplota půdy hodnocena v rámci kombinovaných hydrotermických režimů. Tepelný režim je ovlivňován bilancí záření, evapotranspirací, výměnou tepla mezi půdou a prostředím a závisí na tepelných vlastnostech půdy – na teplotním režimu půd má značný vliv jejich tepelná kapacita, která se mění v závislosti na vzájemném poměru pevné, plynné a kapalné složky. Významnou roli v teplotním režimu půd sehrávají i vlastnosti povrchu půdy včetně barvy půdy, parametry orografické, respektive mikroreliefové (orientace povrchu pozemku vzhledem ke Slunci), popřípadě zastínění vegetací v průběhu roku. V zimním období má pod sněhovou pokrývkou značný vliv na teplotu půdy přítok tepla z podloží, při dostatečné izolační schopnosti sněhu se teplota při povrchu půdy ustálí na hodnotě kolem 0,5 °C. Typickým projevem podnebí v České republice je pokles teplot půdy v zimním období pod bod tuhnutí, tedy promrzání půdy. V období se sněhovou pokrývkou je teplota půdy a hloubka jejího promrzání ovlivněna především tepelně-izolačními

vlastnostmi sněhu. Promrzání půdy je významným faktorem nejen pro přezimující organizmy, ale i pro fyzikálně chemické procesy v půdě. Jestliže teplota půdy klesne pod  $0^{\circ}\text{C}$ , dochází k přerušení příjmu vody a živin rostlinami, a to i v případě, že je půda dostatečně vlhká. Při teplotě půdy cca  $5^{\circ}\text{C}$  se začíná rozvíjet mikrobiální činnost v půdě. Intenzivněji probíhá při teplotách nad  $8\text{--}10^{\circ}\text{C}$ .

### Způsob měření

Nejčastěji měřenou termickou vlastností půdy je tepelná vodivost. Při měření tepelné vodivosti jsou často souběžně získávány informace o tepelné kapacitě nebo tepelné difuzivitě. Měření tepelné vodivosti však nedokáže postihnout efektivní tepelnou



**Obr. 28** Elektrické půdní teploměry a jejich umístění v půdním profilu (nahore); měření teploty půdy v povrchové vrstvě (v hloubce 2–3 cm) – dole vlevo; měření okamžité teploty půdy vpichovací sondou (dole vpravo)

*Zdroj: autoři*

vodivost a měření všech tepelných toků v půdě je ekonomicky i technicky náročné. Nepostihuje navíc pro bioklimatologii, resp. agroklimatologii, klíčovou charakteristiku, teplotu půdy. Měření teploty půdy má proto nezastupitelný význam. Teplota půdy je standardně měřena v hloubkách 5, 10, 20, 50 a 100 cm. Další měřené hloubky mohou být stanoveny dle konkrétních potřeb. Často bývá sledovaná také povrchová teplota. Pro většinu účelů je vhodné kombinovat měření ve více hloubkách současně.

Standardem v klimatologické i agrometeorologické praxi je v současnosti měření půdní teploty prostřednictvím elektrických teploměrů (Obr. 28) v kombinaci se záznamovým zařízením – dataloggerem. Jejich princip a provedení jsou většinou totožné jako u teploměrů pro měření teploty vzduchu, přičemž snímací element teploty je opatřen buď měděným anebo nerezovým pouzdem. V závislosti na účelu měření se v rámci zemědělského výzkumu provádí monitoring teploty půdy do hloubky 50 cm s detailnějším monitoringem ve svrchních vrstvách půdy do 20 cm hloubky (např. na klimatologických stanicích ČHMÚ se teplota půdy měří ve standardních hloubkách 5, 10, 20, 50 a 100 cm pod travnatým povrchem).

Důležité je, aby měření probíhalo na stanovišti, kde jsou přirozené půdní poměry (nikoliv navážky apod.). Nad půdním teploměrem by měl být porost tvořen přímo sledovanou pěstovanou plodinou nebo kulturou. Automatizované měření probíhá zpravidla platinovými odporovými senzory PT100, které je při instalaci výhodné zasouvat z boku do stěny vytvořené a opětovně zahrnuté šachty, aby při ukládání snímačů nedošlo k porušení vrstvy půdy nad a pod snímači a zároveň následným slehnutím půdy nebyla změněna hloubka uložení. Zasunutí čidla je tak provedeno do neporušeného, rostlého profilu půdy. Teplota půdy se měří kontinuálně v desetiminutovém intervalu, denní průměr je průměrnou hodnotou ze všech měřených hodnot. Alternativou uvedeného systému měření teploty půdy jsou nejen senzory modifikovaného provedení umožňující kontinuální monitoring, ale např. i digitální soupravy s teploměry vpichovací konstrukce pro okamžité měření (Obr. 28 dole).

### **Příklady realizace a hodnocení dat v biologických experimentech**

V procesech tvorby výnosu, formování jeho kvality, zdravotního stavu a ochrany zemědělských plodin hraje významnou úlohu mikroklima porostu. Porost tvoří aktivní povrch, na němž probíhá transformace slunečního záření s efektem i na mikroklima půdy pod porostem. Měření teploty půdy v porostu konkrétní plodiny a jejich interpretace např. prostřednictvím sum efektivních teplot jsou významné zejména při predikci výskytu škodlivých činitelů s kompletním či částečným vývojem v půdě, hodnocení rizik mrazového poškození přezimujících plodin, hodnocení a modelování biologických procesů v půdě apod.

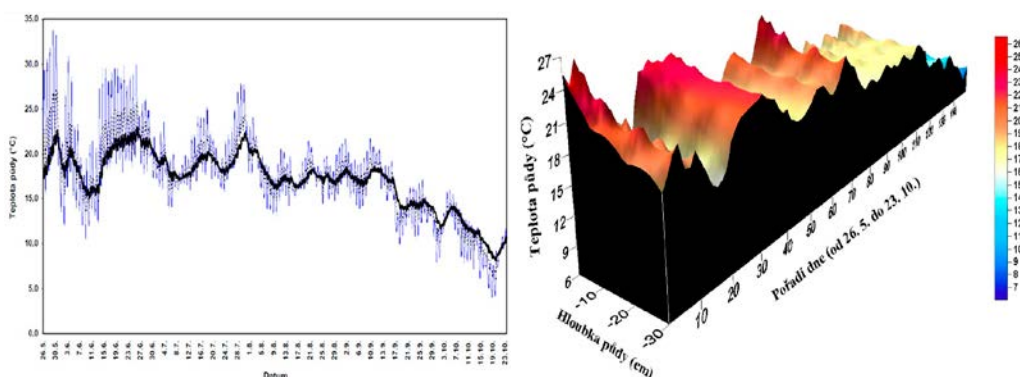
Níže je prezentován příklad klasického sezónního monitoringu a hodnocení podmínek půdního mikroklimatu, v tomto případě teplot půdy, pod porostem kukuřice, v teplé suché oblasti Jižní Moravy. Na pokusné lokalitě se vyskytuje zrnitostně těžká, fluvizem glejová (FLq), vytvořená na nivních usazeninách. Prakticky celý profil je jílovitohlinitý (49,3–58,3 % jílnatých částic). V oblasti se vyskytuje občasný vliv podzemní vody s efektem na hydrotermický režim půd.

Elektrickými odporovými teploměry byly v průběhu vegetace kukuřice sledovány v patnáctiminutovém intervalu teploty půdy v hloubce 2, 5, 10, 20 a 50 cm. Průběh teplot půdy (čtvrthodinové údaje) pod porostem kukuřice ve sledovaném období je pro



hloubky 2, 10 a 30 cm uveden na Obr. 29. Průběh teplot půdy během vegetace kukuřice (od vzejtí rostlin v květnu po sklizeň porostu na zrno v říjnu) vykazuje standardní difference teplot v závislosti na hloubce měření stejně jako odlišnou úroveň amplitud vlivem toku tepla do půdy (vliv hloubky měření), efekt vlastností aktivního povrchu a jeho změny v čase (převládající holý povrch na počátku vegetace, vliv zastínění povrchu po zapojení porostu), stejně jako výkyvy dané změnou meteorologických podmínek.

Příkladem praktické aplikace uvedeného monitoringu je model predikce výskytu dospělců bázlivce kukuřičného (*Diabrotica virgifera virgifera* LeConte). Preventivní ochrana proti bázlivci kukuřičnému spočívá ve vyloučení dlouhodobého pěstování kukuřice po kukuřici na jednom pozemku. V souvislosti nárůstem počtu bioplynových stanic v České republice v posledních dekadách je však faktem zvýšení podílu kukuřice



**Obr. 29** Teploty půdy pod porostem kukuřice během konkrétní vegetační sezóny, čtvrt hodinové údaje (vlevo); prezentace dat teplot půdy z identického experimentu pomocí 3D grafu (vpravo)



**Obr. 30** Příklad monitoringu mikroklimatu porostu a půdního klimatu pro účely precizního specifikování nároků škodlivého činitele s využitím lapačů a izolátoru

Zdroj: autoři

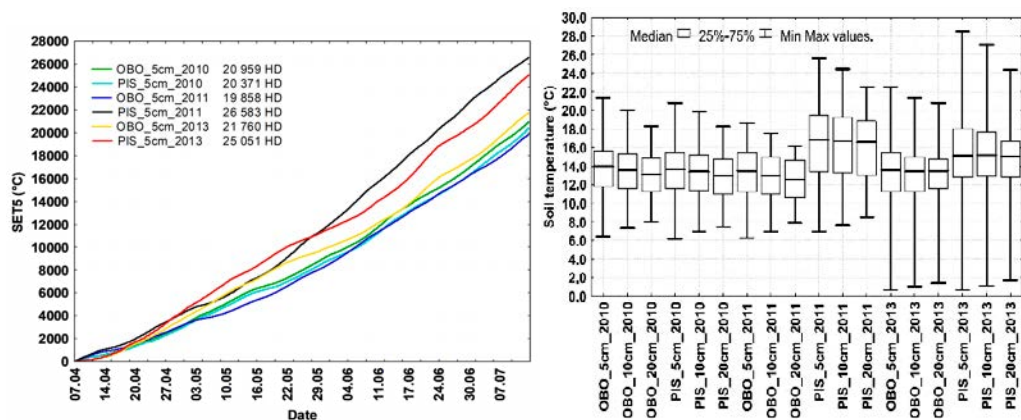
v osevních postupech, včetně víceletých monokultur. Samička do půdy do hloubky přibližně 15 cm (až 35) průměrně 300–500 vajíček. Na jejich mortalitu má z abiotických faktorů zásadní vliv zejména teplota půdy a délka jejího působení a také vlhkost půdy.

Ke kvantifikaci termických nároků a predikci výskytu bázlivce kukuřičného (DVV) bylo v monokultuře kukuřice během pětiletého monitoringu sledováno datum prvního výskytu dospělců DVV ve vazbě na sumy hodinových efektivních teplot půdy. Pro signalizaci letové aktivity dospělců DVV (prvního výskytu na lokalitě v daném roce) byly pod izolátor (moskytiéra) přímo v monitorovaném porostu umístěny fero-monové lapače Csalomon® (Obr. 30). K měření teploty půdy byly použity elektrické teploměry s automatickým záznamem.

Definování termických konstant je podstatné při vymezování areálu rozšíření škůdců (na základě teplotního minima nezbytného pro dokončení vývoje) a pro konstrukci epidemiologických modelů prognózy jejich výskytu. Sumy efektivních teplot (SET) půdy v hloubkách 2, 5, 10 a 20 cm byly pro DVV počítány pro spodní práh vývoje 5; 7,5; 10 a 12,5 °C. Nejmenší disperze hodnot (variační koeficient 5,7 %) byla u dat z 10 cm hloubky pro SET 5 °C (Tab. 2). Pro účely predikce výskytu dospělců DVV se tak tento parametr jeví jako nejperspektivnější.

**Tab. 2** Hodnocení SET půdy od překročení prahové teploty do prvního záchytu dospělce DVV, výstupy z pětiletého porostního mikroklimatického a fytopatologického monitoringu

Prahová teplota	Hloubka (cm)	SET do prvního záchytu dospělce DVV na lokalitě (hodinové stupně)			
		Minimum	Maximum	Diference	Variační koeficient (%)
5,0 °C	2 cm	25994	31010	5016	7,1
	5 cm	26735	31890	5155	6,5
	10 cm	26016	30021	4005	5,7
	20 cm	24191	28630	4439	6,3
7,5 °C	2 cm	19602	24580	4978	8,6
	5 cm	20360	24679	4319	7,4
	10 cm	19772	23724	3952	6,6
	20 cm	18092	22450	4358	8,2
10,0 °C	2 cm	13915	19062	5147	11,3
	5 cm	14660	18884	4224	9,4
	10 cm	14077	18230	4153	9,1
	20 cm	12329	17008	4679	12,2
12,5 °C	2 cm	9111	14347	5236	15,6
	5 cm	9949	14075	4126	12,5
	10 cm	9422	13457	4035	12,8
	20 cm	7807	12331	4524	17,8



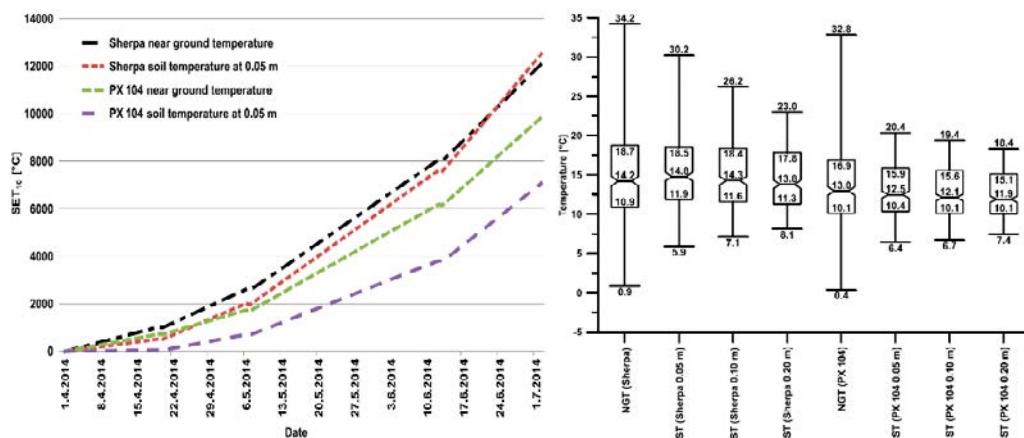
**Obr. 31** Dynamika teplot půdy pod porostem pšenice ozimé v průběhu hlavní vegetace, vyjádřená jako suma hodinových efektivních teplot nad 5 °C (vlevo); statistické hodnocení teplot půdy během monitorovaného období (vpravo); OBO\_5cm\_2010 = lokalita Obora v hloubce 0,05 m v roce 2010, PIS\_5cm\_2010 = lokalita Písky v hloubce 0,05 m v roce 2010 etc.; HD = hodinové stupně

Obdobně byl polní monitoring teplot půdy realizován a hodnocen pod porostem pšenice seté ozimé (Obr. 31) anebo řepky olejné (Obr. 32 a Obr. 33), kdy bylo součástí i porovnání vlivu výrazně diferentních půdních podmínek sousedících půdních bloků na teplotní režim půd.

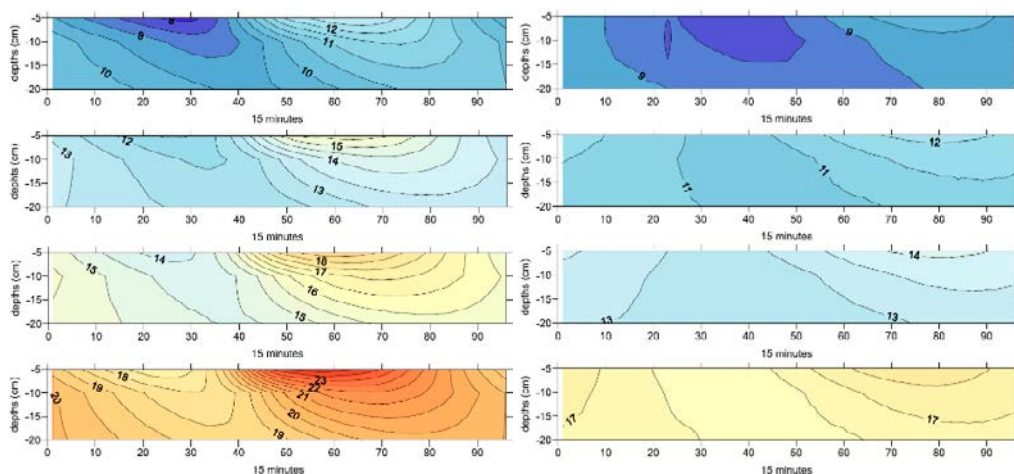
Teplota půdy pod porostem pšenice seté ozimé v kukuřičné zemědělské oblasti byla monitorována automatickými digitálními čidly Dallas semiconductor, DS18B20. Senzory byly umístěny v době setí pšenice do hloubky 0,05, 0,10 a 0,20 m. Data byla měřena v patnáctiminutovém intervalu; výsledky byly hodnoceny z hodinových průměrných údajů.

Experimentální plochy byly osety odrůdou pšenice Sultan v meziřádkové vzdálenosti 125 mm, při výsevu 3,5 milionu klíčivých zrn (Obora) a 4,5 milionu klíčivých zrn (Písky) na hektar. V terminální fázi vegetace byl zjištěn počet klasů 610 (Obora) a 380 (Písky) na 1 m<sup>2</sup>.

Výstupy tříletého monitoringu teploty půdy v porostu pšenice, ve třech hloubkách na dvou pokusných pozemcích (Obora – těžká půda s vysokým obsahem jílnatých částic v celém půdním profilu a Písky – lehká písčité půda na šterkové terase) jsou na Obr. 31. Data jsou v grafu vyjádřena jako sumy efektivních teplot (SET) od jarního odnožování po sklizeň pšenice. Meteorologické a klimatické podmínky, vzhledem k minimální výškové diferenci a vzdálenosti pokusných pozemků (cca 2 km) lze považovat za identické. V průměrných hodnotách teploty půdy během vegetace pšenice je evidentní rozdíl mezi lokalitami, způsobený odlišnými půdními podmínkami a odlišnou strukturou porostu. Ve srážkově bohatém roce jsou zřejmě menší rozdíly mezi teplotami půdy v různých hloubkách a také mezi lokalitami. Uvedený jev, který souvisí s energetickou bilancí a tokem tepla do půdy, je způsoben abnormálními srážkovými úhrny, podprůměrnými hodnotami délky slunečního svitu a vysokou produkcí nadzemní biomasy. Dokumentována je tak vazba mezi teplotním a hydrickým režimem půd.



**Obr. 32** Dynamika teplot půdy a přízemní teploty vzduchu pod porostem dvou odrůd řepky olejné v průběhu hlavní vegetace (Sherpa – odrůda se standardním habitem, PX 104 odrůda polozakrslá), vyjádřená jako suma hodinových efektivních teplot nad  $10^{\circ}\text{C}$  (vlevo); statistické hodnocení teplot půdy a přízemní teploty vzduchu během monitorovaného období (vpravo); NGT = přízemní teplota vzduchu, ST = teplota půdy



**Obr. 33** Průměrné hodnoty teploty půdy ( $^{\circ}\text{C}$ ) do hloubky 20 cm pod porostem řepky během vegetace od prodlužování stonku do sklizně. Každý nomogram ukazuje virtuální průměrný den období, získaný zprůměrováním hodnot za celé období. Na horizontální ose je uveden čas – 24hodinový den rozdělený po patnáctiminutových intervalech; na vertikální ose je hloubka měření. Shora dolů: horní řada – I. období vegetace (BBCH 30 – 59), druhá řada – II. období vegetace (BBCH 60 – 69), třetí řada – III. období vegetace (BBCH 70 – 79), dolní řada – IV. období vegetace (BBCH 80 – 89)



Průběh teplot půdy v průběhu vegetace, vyjádřený na Obr. 31 jako kumulativní součet teplot nad 5 °C, je významný také při prognóze a signalizaci výskytu poikilothermních organismů, nejčastěji škůdců, u kukuřice např. v souvislosti s predikcí výskytu dospělců bázlivce kukuřičného, jehož vývoj je vázán na půdní podmínky. Pro většinu půdních patogenů je významná teplota ve svrchní části půdního profilu. Průměrný denní nárůst sumy efektivních teplot nad 5 °C (SET5) v hloubce 0.05 m (ze tříletého pozorování) činí na lokalitě Obora 215 hodinových stupňů, na lokalitě Písky 247 hodinových stupňů (tj. 15% rozdíl). Maximální difference sezónních hodnot SET5 na lokalitách Obora a Písky je 6725 hodinových stupňů. Uvedené difference dokumentují výrazné difference v teplotním režimu půd a význam mikroklimatického porostního monitoringu pro široké spektrum aplikací.

V identických klimatických a půdních podmínkách jako u pšenice byl realizován také experiment, jehož cílem bylo popsat teplotní režim půd pod porostem řepky olejné v závislosti na půdních podmínkách, podmínkách ročníku a odrůdových vlivech (Obr. 32 a Obr. 33). Experimentální plochy byly oseté odrůdou řepky standardního habitu a odrůdou polozakrslého vzrůstu v meziřádkové vzdálenosti 125 mm, při cílové hustotě porostu 38–43 rostlin na m<sup>2</sup>. Senzory Dallas semiconductor DS18B20 byly umístěny v době setí řepky do hloubky 0,05, 0,10 a 0,20 m a dále v radiačním stínítku do výšky 0,05 m nad zemí (monitoring přízemní teploty vzduchu). Hodnoceny jsou výsledky z období od počátku prodlužování stonku (BBCH 30) po zralost (BBCH 89). Analýzou byly, mimo difference popsané výše v experimentu s pšenicí, identifikovány a kvantifikovány významné odrůdové vlivy, působící na teplotu půdy pod zemědělskými plodinami.

## 6.8 Směr a rychlost větru

### Všeobecné minimální požadavky na měření rychlosti větru:

- |                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| a) rozlišovací schopnost snímače:   | 0,1 m.s <sup>-1</sup> ,                  |
| b) přesnost měření:                 | ± 3 %,                                   |
| c) interval měření:                 | 10 minut,                                |
| d) interval mezi kalibrací snímačů: | 2 roky,                                  |
| e) používané jednotky:              | m.s <sup>-1</sup> , km.h <sup>-1</sup> . |

### Všeobecné minimální požadavky na měření směru větru:

- |                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| a) rozlišovací schopnost snímače:   | 45 °,  |
| b) přesnost měření:                 | ± 22,5 °,  |
| c) interval měření:                 | 10 minut,  |
| d) interval mezi kalibrací snímačů: | 2 roky,  |
| e) používané jednotky:              | úhlové stupně, označení světových stran pomocí 8 nebo 16dílné větrné růžice. |

Vítr je vektor popisující pohyb vybrané částice vzduchu v určitém místě atmosféry a v daném časovém okamžiku. Jeho horizontální složka vzniká působením horizontální složky tlakového gradientu a působením Coriolisovy síly. V blízkosti zemského povrchu dochází k modifikaci směru a rychlosti větru vlivem morfologie terénu či překážkami s různou drsností (Obr. 34). Se vzrůstající výškou nad zemským povrchem se





**Obr. 34** Analýza změn přízemního proudění vzduchu vlivem drsnosti povrchu a překážek v terénu pomocí kouřové vlečky

*Zdroj: autoři*

rychlost větru zvyšuje, nejnižší je těsně nad povrchem, se vzrůstající výškou se zvyšuje exponenciálně. Proto je důležitá i znalost výšky, v níž se směr a rychlost větru měří.

Vítr je důležitým faktorem při utváření mezoklimatu i mikroklimatu. Výměna vzduchu v horizontálním i vertikálním směru způsobuje zejména změnu v teplotě a vlhkosti vzduchu, a tak ovlivňuje intenzitu výparu, transpirace i fotosyntézy. Na vegetaci působí pozitivně prostřednictvím podpory přenosu pylu a semen. Negativním vlivem je zejména zvyšování evapotranspirace, přenos chorob a škůdců a šíření požárů. Omezení rychlosti a intenzity proudění vzduchu v blízkosti trvalých vegetačních bariér (typicky větrolamy v blízkosti ovocných výsadeb či vinic) může za určitých podmínek přinášet kumulaci studeného vzduchu a následné mrazové poškození citlivých zemědělských kultur. Při vysokých rychlostech způsobuje mechanické poškození porostů (polehnutí, lomy větví, vývraty) a větrnou erozi, která se mimo ztrátu ornice může projevit obnažením a poškozováním stonků a kořenů rostlin nebo depozicí erodovaného materiálu v porostu.

Okamžitá znalost rychlosti větru nad porostem je důležitá i z hlediska provádění chemických ošetření, která se při vyšších rychlostech nesmí provádět. Příloha 2 vyhlášky č. 207/2012 Sb., o profesionálních zařízeních pro aplikaci přípravků, stanovuje optimální (maximální) rychlost pro aplikaci přípravku bez protiúletových komponentů na  $3 \text{ m.s}^{-1}$ . Ačkoliv není v daném normativu doslovně specifikováno, v jaké výšce, popřípadě na jakém stanovišti se má tato rychlost měřit, z logiky věci vyplývá, že by se mělo měřit v místě aplikace přípravku (na daném půdním bloku), nejlépe ve výšce aplikace postřiku. V tomto případě jsou pro orientační měření rychlosti větru používány jednoduché, přenosné vrtulkové anemometry, které jsou pro dané účely dostatečně přesné.

## **Způsob měření**

Měření směru a rychlosti větru pro experimentální účely je možno provádět několika způsoby v závislosti na převažující rychlosti proudění a podmínkách měření (Obr. 35). Mezi nejběžnější přístroje patří miskové či vrtulkové anemometry doplněné případně větrnou směrovkou. Jejich konstrukce je poměrně jednoduchá a vyznačují se i dostatečnou provozní spolehlivostí. Vhodné jsou pro běžná měření v terénu ve všech výškách nad povrchem.

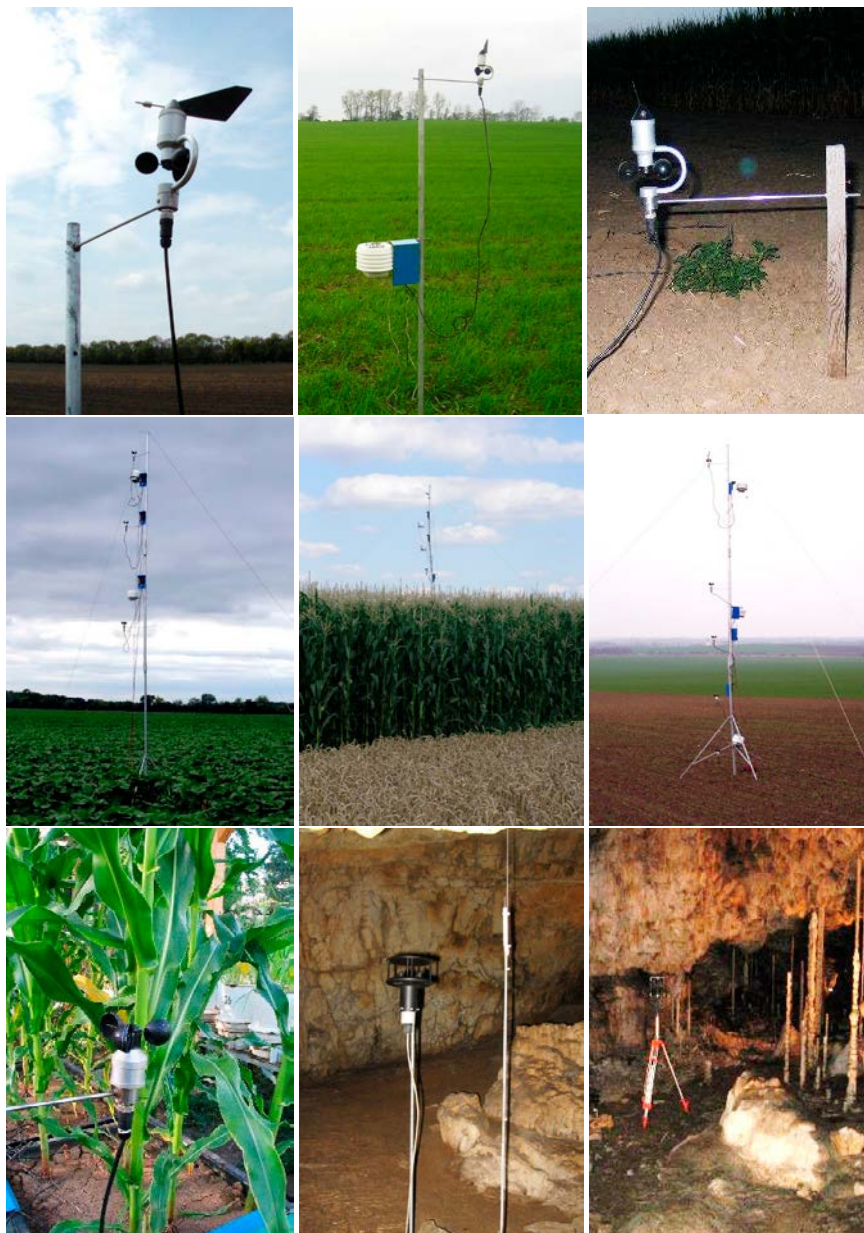
Sonické anemometry pro přesná měření např. v přízemních výškách či uvnitř zapojeného porostu jsou založeny na principu měření rychlosti šíření vln ve vzduchu, a tudíž neobsahují pohyblivé součástky, které jsou v klasických anemometrech nejvíce problematickým článkem. S jejich pomocí se dá změřit i vertikální složka proudění vzduchu (3D charakterizace proudění vzduchu). Kromě absence mechanických součástí je jejich výhodou i možnost měření nízkých rychlostí, jelikož miskové anemometry začínají spolehlivě měřit až od rychlostí 0,5–0,7 m.s<sup>-1</sup>. Oproti miskovým jsou však nesrovnatelně dražší. Pro operativní měření lze s úspěchem použít i termoanemometry, a to zejména při potřebě měření nízkých rychlostí proudění. Měří pouze rychlost větru.

Na meteorologických stanicích, která často slouží jako zdroj informací o větrných podmínkách území, jsou umístěna samostatná čidla na měření směru a rychlosti větru anebo kombinované ultrasonické větroměrné čidlo. Nejčastěji se používá optoelektronický větroměrný systém Vaisala řady WA15 a WA 25, který je složen ze snímače rychlosti větru a směrovky větru. Dále se používají ultrasonická čidla Vaisala řady WS a WMT (WMT700). U optoelektronických čidel je na hřídeli s miskami umístěn uvnitř přístroje přerušovací kotouč, který při otáčení hřídele přerušuje infračervený paprsek. Dle frekvence přerušování paprsku se stanovuje rychlost otáčení hřídele, a tudíž rychlost proudění větru. Tato čidla mají nízký práh citlivosti a vynikající linearitu měření v celém pracovním rozsahu (do 75 m.s<sup>-1</sup>, tj. 270 km.h<sup>-1</sup>). Měření ultrasonickými čidly je založeno na určení času, za který přejde ultrazvuk z jednoho snímače k druhému v závislosti na rychlosti větru. Směr větru je stanoven výpočtem dráhy přenosu signálu mezi třemi snímači, které mezi sebou svírají úhel 60°. Měřicí přístroj je na klimatologických stanicích ČHMÚ standardně umístěn na stožáru ve výšce 10 m nad terénem, na některých stanicích se měří i ve vyšších výškách (např. stožáry některých elektráren).

Výšku měření rychlosti a směru větru je nutno přizpůsobit požadovanému účelu. Standardní výška 10 m nemusí vždy vyhovovat, neboť pro pěstitelskou praxi je rozhodující znalost proudění v blízkosti vegetačního pokryvu. Pouze u vyšších kultur (ovocné sady, vinice) je zapotřebí dbát na to, aby se snímač větru nacházel nejméně 1 m nad vrcholky korun stromů a keřů. Při instalaci automatické stanice se zařízením pro měření rychlosti větru je důležité tuto stanici umístit tak, aby nedocházelo k ovlivnění proudění vzduchu. V blízkém okolí by se neměly objevovat nereprezentativní vysoké překážky, které by mohly zkreslit měření.

## **Příklady realizace a hodnocení dat v biologických experimentech**

Cílem víceletého monitoringu charakteristik proudění vzduchu v blízkosti liniových prvků dřevinného a keřového charakteru s primárně protierozní funkcí – větrolamů, bylo s využitím dat z terénních měření pole větru vyvinout a verifikovat model



**Obr. 35** Miskové anemometry se směrovkou v rozličných zemědělských polních experimentech (horní řada); monitoring parametrů proudění vzduchu ve vertikálních profilech v různých plodinách a při různé drsnosti povrchu (prostřední řada); měření rychlosti větru v kontejnerovém experimentu pro hodnocení vlivu meteorologických prvků, vlhkosti půdy a genotypu na transpiraci kukuřice (dole vlevo); 2D (uprostřed dole) a 3D (vpravo dole) sonický anemometr v prostředí s nízkými rychlostmi proudění vzduchu (v tomto případě demonstrováno na experimentu v jeskynním prostředí)

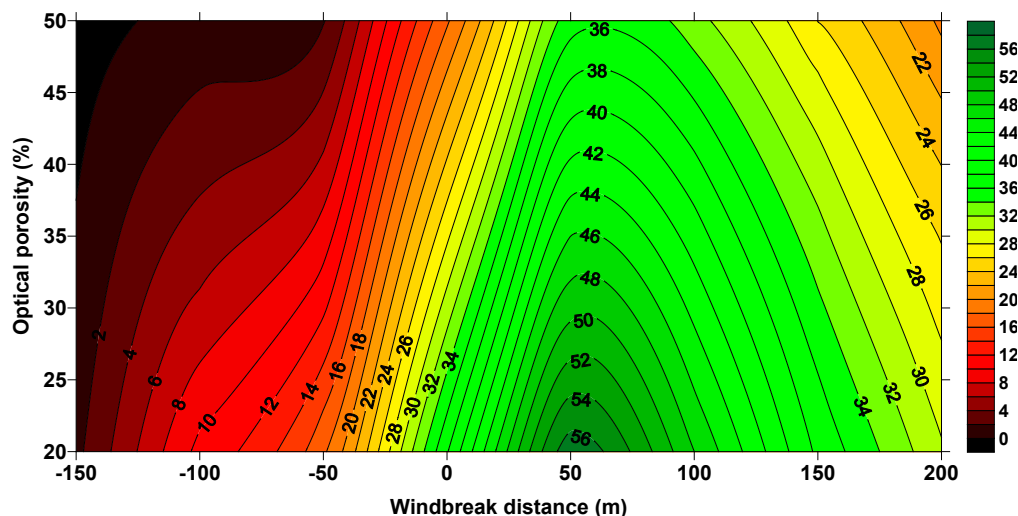
proudění vzduchu v blízkosti větrolamu. Model vygenerovaný na základě sady měření u větrolamů různé konstrukce, během variabilních meteorologických podmínek a rozdílné drsnosti povrchu vyjadřuje vliv větrolamu a jeho porozity (propustnosti) na redukci rychlosti větru na návětrné a závětrné straně větrolamu.

Tvar křivky rychlosti větru závisí kromě výšky nad povrchem, výšky větrolamu a jeho aerodynamické porozity zejména na rychlosti a směru větru, intenzitě turbulencí a atmosférické stabilitě a také na vnějších vlastnostech větrolamu, jako je jeho uspořádání (spon), šířka a délka. Aerodynamické vlastnosti opadavých dřevin se logicky výrazně mění v průběhu roku v závislosti na aktuální fenologické fázi. Vhodným nástrojem pro posouzení vlivu větrolamu na proudění vzduchu v čase je analýza optické porozity (OP) větrolamu. Monitoringem dynamiky OP v kombinaci s měřením aerodynamických parametrů větrolamu lze matematicky definovat vztahy mezi těmito dvěma veličinami. Metoda je založená na počítačové analýze digitálních fotografií. OP větrolamu je definovaná jako poměr mezi mezerami ve větrolamu k jeho celkové ploše. Výrazně tak zpřesňuje standardně používanou klasifikaci větrolamů, založenou na rozdělení na prodouvavé, poloprodouvavé a neprodouvavé. Umožňuje simulaci parametrů větrolamů různé konstrukce, druhového složení a fenologických fází druhů, zastoupených ve větrolamu.

V rámci víceletého monitoringu byla u typických větrolamů prováděna profilová měření rychlosti větru ve výšce 2 m nad povrchem půdy. K měření byly použity anemometry typu W1 (TM Praha) monitorující rychlost větru a W2 (TM Praha) monitorující také směr větru. Čidla W1 používají pro měření rychlosti větru rotační lopatkový kříž. Snímání otáček kříže je prováděno optoelektronicky a k dalšímu zpracování předáno v digitální formě. Čidla W2 jsou navíc vybavena otočnou lopatkovou směrovkou pro měření směru větru. Data byla ukládána do dataloggeru HOBO. Anemometry byly pravidelně kalibrovány společně s dataloggery v meteorologické kalibrační laboratoři ČHMÚ.

Použito bylo šest souprav, měřících zpravidla ve vzdálenostech 150 a 50 metrů od větrolamu na návětrné straně a 50, 100, 150 a 200 m od větrolamu na straně závětrné. Pro měření byly voleny termíny, kdy vítr vanul kolmo k linii větrolamu a jeho průměrná rychlost převyšovala  $2 \text{ m.s}^{-1}$ . Pro stanovení OP byly analyzovány desítky snímků pořízených v různých fenologických fázích vybraných větrolamů. Snímky návětrné nebo závětrné strany větrolamu byly pořizovány vždy ze stejného bodu ve vzdálenosti cca 30 m od větrolamu. Výsledné snímky byly převedeny do černobílého spektra, rozčleněny na 9–11 svislých sloupců a 7–9 vodorovných řad. Pro každý čtverec byla pomocí software pro analýzu obrazu ImageTool stanovena OP. Výsledná hodnota OP pro každý snímek pak byla stanovena jako aritmetický průměr všech čtverců.

Na Obr. 36 je redukce rychlosti větru větrolamem s různou OP vyjádřena pomocí 2D mapy aplikace Surfer, která poskytuje uživatelsky přívětivý výstup s možností jednoduchého zjištění redukce rychlosti větru na základě OP a vzdálenosti od větrolamu. Finálním výstup je pak algoritmus (model, rovnice), poskytující informaci o efektu větrolamu na pole větru v dostatečné přesnosti. Výsledný postup je vhodný k poměrně rychlému posouzení účinnosti větrolamů na větrné charakteristiky v přílehlém okolí. Je možné jej aplikovat v procesu návrhu nových protierozních opatření v rámci pozemkových úprav nebo pro revitalizaci stávajících větrolamů v zemědělské krajině.



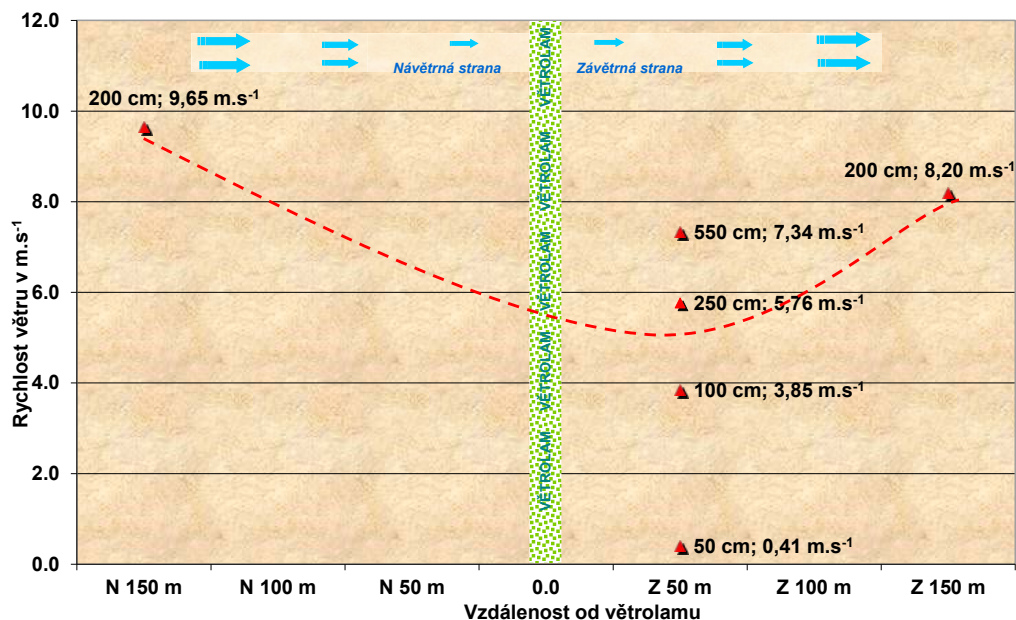
**Obr. 36** Úroveň redukce rychlosti větru (v %) v různých vzdálenostech od větrolamu (osa X – hodnoty nalevo od nuly udávají situaci na návětrné straně větrolamu, hodnoty napravo od nuly situaci na závětrné straně větrolamu) v závislosti na OP (osa Y); výstup software Surfer (interpolace pomocí local polynomial metodou, polynomial order 2)

Kromě měření vlivu větrolamu na horizontální pole větru (rychlost větru na návětrné a závětrné straně větrolamu ve výšce 2 m nad povrchem půdy) byl hodnocen i vertikální profil větru, tedy vliv frikce a drsnosti povrchu na rychlost větru v různé výšce. Měření vlivu větrolamu na vertikální profil větru probíhalo přenosnými anemometry typu W1 a W2 ve výšce od 50 cm nad volným povrchem či porostem (do maximální výšky porostu 40–50 cm). Další čidla byla umístěna 50 a 200 cm nad první čidlo a jedno čidlo do výšky 550 cm nad povrch země (Obr. 35). Kompletní sestava měřila ve vzdálenosti 50 m nejprve před a poté za větrolamem. Ve vzdálenosti 150 m před a 200 m za větrolamem měřila vždy ve dvoumetrové výšce po celou dobu měření srovnávací čidla.

Pro demonstrování vlivu povrchu a vzdálenosti od něj na vertikální profil proudění vzduchu jsou uvedeny výsledky měření z 29. 6. v katastru obce Suchá Loz. V té době byl větrolam se šířkou 4 m a výškou cca 22 m tvořený převážně vyspělými jedinci topolu kanadského a jedinci dubu a lípy malolisté plně olistěný. Stejně tak keřová vrstva tvořená jedinci brslenu evropského, svídy krvavé, růže šípkové a hlohu jednosemenného byla plně olistěná. V rámci uvedeného měření byla zachycena epizoda s prudkým nárůstem rychlosti proudění vzduchu (až  $9,65 \text{ m.s}^{-1}$ ) a následnou intenzivní srážkou.

Vertikální profil rychlosti větru vykazuje výraznou výškovou stratifikaci proudění vzduchu ovlivňované drsností povrchu a parciálně větrolamem (Obr. 37 a Tab. 3). Nejnížší rychlost byla zjištěna ve výšce 50 cm, když její úroveň činila pouze 3 % rychlosti zjištěné kontrolním čidlem 150 m před větrolamem. Spolupůsobením větrolamu a drsnosti povrchu tak došlo k redukci rychlosti větru v přízemních výškách pod erozně nebezpečnou úroveň.



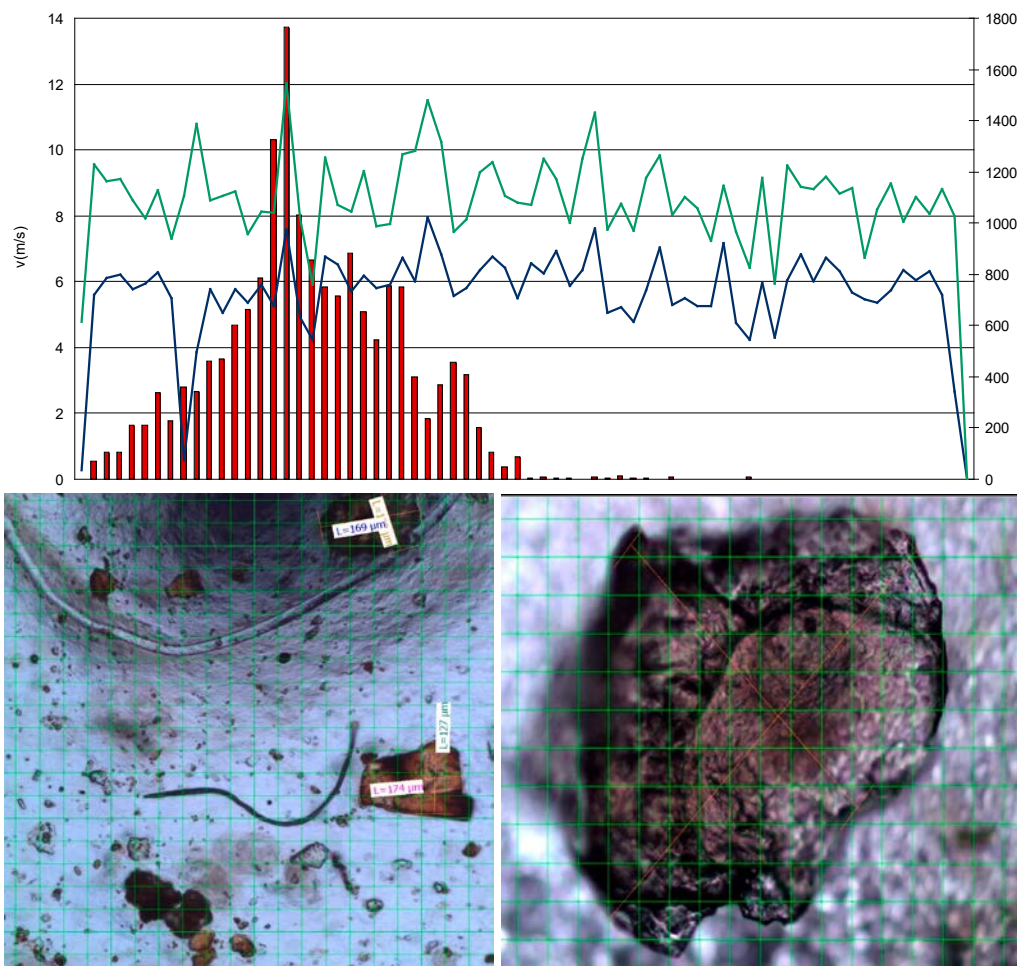


**Obr. 37** Měření rychlosti větru na závětrné straně větrolamu – vertikální profil. Na ose X jsou uvedeny vzdálenosti od větrolamu. Pozici měření vertikálního profilu větru (50 m od větrolamu na závětrné straně), stejně jako pozici kontrolních čidel uvádí červené trojúhelníky

**Tab. 3** Vliv větrolamu na rychlost větru ( $\text{m.s}^{-1}$ ) na závětrné straně větrolamu (vertikální profil)

	N 150 m	Z 50 cm	Z 100 cm	Z 250 cm	Z 550 cm	Z 150 m
Průměrná rychlost	3,93	0,11	1,48	2,31	2,68	2,70
%	100	3	38	59	68	69
Maximální náraz	9,65	0,41	3,85	5,76	7,34	8,20
%	100	4	40	60	76	85

Monitoring rychlosti větru v souvislosti s větrnou erozí byl v polních podmínkách prováděn i v rámci řešení výzkumného projektu „Kritéria rozvoje větrné eroze na těžkých půdách a možnosti jejího omezení biotechnickými opatřeními“. Pro kvantifikaci eroze v závislosti na meteorologických a půdních podmínkách bylo zkonstruováno jednoduché zařízení – lapač (dále jen deflametr) s aktivním nasáváním vzduchu a časovým záznamem ke stanovení relativního množství a zrnitostního složení půdních částic erodovaných a unášených větrem. Jedinečnost popisovaného zařízení spočívá v přesném určení termínu transportu, možnosti relativně kvantifikovat množství a pomocí následné digitální analýzy obrazu zachycených částic stanovit velikost deflátů. V kombinaci s meteorologickým měřením (rychlost větru, vlhkost půdy, teplota



**Obr. 38** Počet zachycených půdních částic (sloupcový graf se stupnicí podle osy Y vpravo) v závislosti na průměrné rychlosti větru (modrá křivka dle stupnice osy Y vlevo) a maximálním nárazu větru (zelená křivka dle stupnice osy Y vlevo) během erozní epizody; dole – detail půdních částic zachycených při erozní epizodě (rozměr jednoho čtverce čtvercové sítě je  $40 \times 40 \mu\text{m}$ )

Zdroj: autoři

půdy, stav povrchu půdy atd.) je potom dále možné striktně specifikovat podmínky v době epizody. Zařízení bylo použito na lokalitách s různými půdními podmínkami. Jako příklad je uveden výstup z měření na lokalitě s lehkou půdou na Brněnsku. Paralelně s lapáním erodovaných částic byla na místě monitorována i rychlost větru. Nárazy větru se během erozní epizody pohybovaly až okolo  $12 \text{ m.s}^{-1}$ . Největší zaznamenaná částice měla velikost  $559 \mu\text{m}$  (Obr. 38).

## 6.9 Sluneční záření – intenzita slunečního záření, doba trvání slunečního svitu

### Všeobecné požadavky na měření intenzity slunečního záření:

- |                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| a) rozlišovací schopnost snímače:   | 1 W.m <sup>-2</sup> ,  |
| b) přesnost měření:                 | ± 5 %,   |
| c) interval měření:                 | 10 minut,  |
| d) interval mezi kalibrací snímačů: | 2 roky,  |
| e) používané jednotky:              | J.cm <sup>-2</sup> , W.m <sup>-2</sup> , μmol.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> . |

Sluneční záření, měřené v meteorologii jako globální (celkové) sluneční záření, je hlavním zdrojem tepla pro atmosféru a zemský povrch. Dále je zdrojem světla, který potřebují organismy pro svůj život. Nejvyšší úhrny globálního slunečního záření jsou v ČR zaznamenávány v červnu a červenci s tím, že se objevují i průběhem netypické ročníky, kdy je maxim dosahováno v jiných měsících. Pro fyziologické procesy, hlavně fotosyntézu, je nejdůležitější část globálního slunečního záření pohlcovaného porostem. V rámci globálního slunečního záření tak lze vymezit elektromagnetické spektrum, které iniciuje v buňkách rostlin fotosyntézu. Toto spektrum se nazývá fotosynteticky aktivní záření (fotosynteticky aktivní radiace; FAR; vlnové délka přibližně 400–700 nm). Fotochemicky jsou totiž účinná pouze ta kvanta záření, která jsou absorbována. Měření absorbovaného slunečního záření v porostech jsou základem pro výpočty tzv. utilizačních koeficientů, které kvantifikují efektivnost, s jakou daný ekosystém transformuje sluneční energii do biomasy. Samostatné měření tohoto spektra slunečního záření není běžné, a proto jsou jeho hodnoty FAR často vypočítávány z intenzit globálního slunečního záření na základě empirických rovnic. Za jasného dne činí střední hodnoty konverzního faktoru u podílu FAR v globálním slunečním záření přibližně 0,525; v den zatažený jsou střední hodnoty konverzního faktoru 0,445.

Na distribuci energie v agroekosystému a tím na hodnoty meteorologických prvků mají značný vliv porost a jeho charakter. Porostní povrchy jsou velmi komplikované, členité, několika vrstevnaté, typické vícenásobným odrazem záření, ale také schopností propouštět část globálního slunečního záření. Problémem při monitoringu, analýze a zobecňování podmínek v porostu je nehomogenita radiálních polí, lepší penetrace difúzní složky globálního záření porostem, změna spektrálního složení uvnitř porostu apod. V porostu vznikají například „sluneční skvrny“, které pronikají náhodnými skulinami v mezerách porostu a jsou zdrojem přímého záření uvnitř porostu, čímž dochází k ovlivnění mikroklimatu porostu. Část slunečního záření je v listech absorbována (absorpce), část propuštěna (transmise), přičemž tenké listy propouštějí až 40 % záření, středně silné listy 10–20 % záření a část je od povrchu listu odražena (reflexe). Bilance krátkovlnné radiace porostu tak vychází z úhrnu globálního slunečního záření mínus odražená a procházející radiace.

V zemědělské praxi měření světelných poměrů porostu nachází využití zejména při dimenzování hustoty a optimalizace organizace porostu (typicky u sponových plodin). Hodnota listové pokryvnosti (leaf area index, LAI) má podstatný vliv na schopnost porostu absorbovat záření. Měřením FAR mimo porost a při zemi v porostu kukuřice umožňuje například jednoduché odvození LAI bez použití pracných manuálních nebo nákladných instrumentálních metod.

## Způsob měření

Monitoring intenzity slunečního záření, navzdory jeho ekologickému významu, není masivně rozšířen. Systematicky je prováděn na vybraných stanicích ČHMÚ, v omezené míře potom v rámci výzkumných aktivit dalších institucí. K automatickému měření slunečního záření se používají pyranometry. Signál z pyranometru je zpravidla snímán každou jednu vteřinu, průměrován za jednu minutu a převeden na minutové průměrné intenzity ve  $W \cdot m^{-2}$ . Provozní měření základních složek radiální bilance zemského povrchu se provádějí na vybraných stanicích, označovaných jako národní radiální síť. Složení sítě a rozsah měření se mění podle potřeb ČHMÚ a dlouhodobých externích požadavků.

Většina stanic měří pouze globální záření, tedy součet záření přicházejícího od Slunce a rozptýleného záření oblohy, které dopadá na jednotku horizontální plochy. Pyranometr (Obr. 39) musí být stále ve stabilní horizontální poloze indikované libelou. Dopadající záření nesmí být ovlivňováno stínem ani odrazem od okolních objektů. Většina profesionálních pyranometrů je vybavena vnějším vyhřívacím a ventilačním systémem, který omezuje orosení, ojínění a vznik námrazy a zajišťuje rychlé osušení skleněného krytu po dešti a sněžení.

Vybrané stanice disponují i přístroji, u nichž je složka přímého slunečního záření odstíněna a měří tzv. difuzní (rozptýlené) záření oblohy. K tomuto měření se obvykle používá pyranometr CM-11 v soupravě se stínícím prstencem CM-121, který je po celý rok v cca 3–5denních intervalech posouván v závislosti na změně sluneční deklinace tak, aby stín zcela zakrýval skleněnou kupoli pyranometru.

Odvozenou veličinou při měření intenzity slunečního záření může být doba trvání slunečního svitu. Ta je obecně měřitelná pomocí přístrojů, které zaznamenávají účinky přímého slunečního záření na registrační médium nebo sčítají čas, po který je intenzita slunečního záření nad prahovou hodnotu měřidla. Doba trvání slunečního svitu vyjadřuje dobu, po kterou přímé sluneční záření proniká přímo k zemskému povrchu. Jedná se o období, kdy není sluneční kotouč zastíněn oblačností anebo jiným objektem, při čemž by intenzita slunečního svitu poklesla pod prahovou úroveň měřicího přístroje. Přístroj používaný na klimatologických stanicích ČHMÚ zaznamenává záření s intenzitou nad  $120 W \cdot m^{-2}$  a výstupem je hodnota logického stavu („svítí“/„nesvítí“), která je měřicí jednotkou sčítána po vteřinách v desetiminutovém kroku a dále sčítána po celý den. Denní údaje jsou zaznamenány v hodinách s přesností na 0,1 hodiny.

Při monitoringu intenzity slunečního záření, potažmo doby trvání slunečního svitu v zemědělských experimentech, či v zemědělské praxi, je limitující pravidelné čištění povrchu senzoru od nečistot. Logicky je také důležité, aby byl pyranometr umístěn tak, aby nedošlo k chybě při měření. To znamená jeho umístění na místo, kde nemůže dojít k zastínění pyranometru cizím objektem (budovou, stromy atd.).

## Příklady realizace a hodnocení dat v biologických experimentech

Pro dostatečně přesné měření globálního slunečního záření anebo FAR v porostu se pro jednoduchou obsluhu, nízkou cenu, nízké nároky na napájení, dostatečnou kapacitu paměti, přehlednou grafickou prezentaci a široké spektrum výstupních datových formátů v obslužném software EMS Universal Software osvědčily například senzory Minikin RTHi pro měření globálního slunečního záření a QTHi pro měření FAR (Obr. 40). Grafický výstup z monitoringu globálního slunečního záření uvádí graf na Obr. 41.





**Obr. 39** Zařízení na měření intenzity slunečního záření různé konstrukce a účelu sledování v zemědělských experimentech

*Zdroj: autoři*

Příklad praktické realizace a aplikace měření intenzity slunečního záření je níže demonstrován na experimentu měření radiačního režimu v porostu kukuřice (Obr. 42), které probíhalo v průběhu vegetačního období na experimentální ploše v Žabčicích





**Obr. 40** Meteorologická stanice v biologickém experimentu, včetně senzoru pro měření intenzity slunečního záření (vlevo), detail senzoru pro měření intenzity slunečního záření (vpravo)

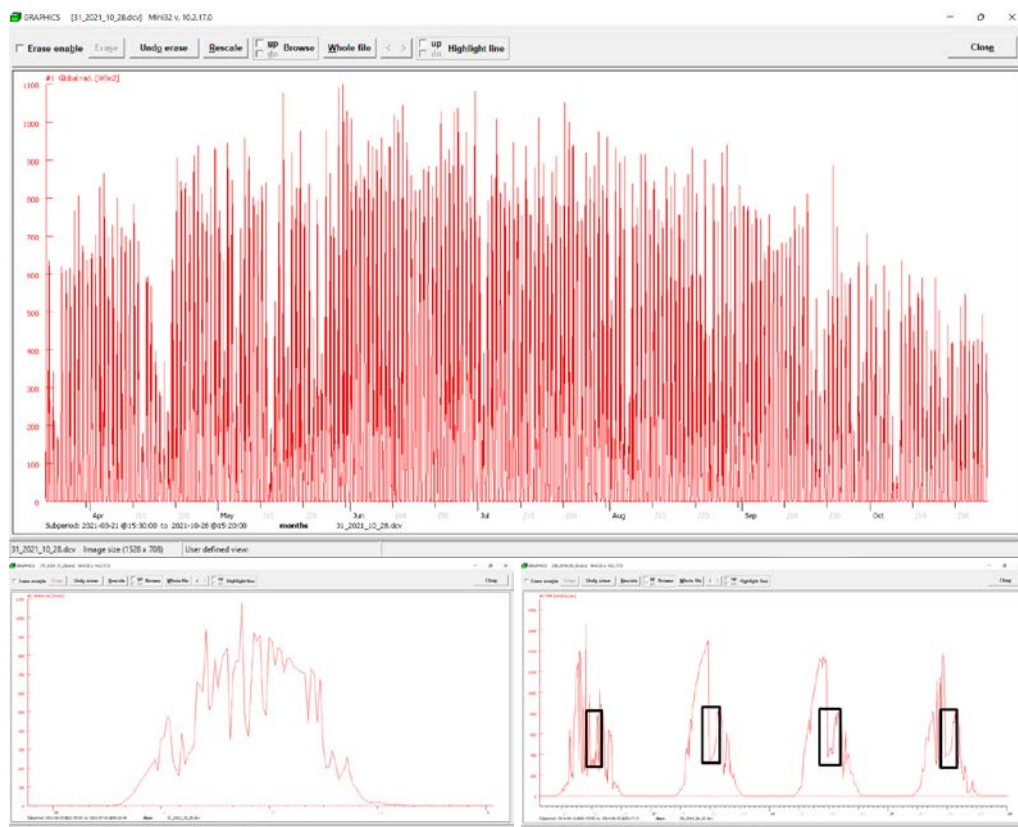
*Zdroj: autoři*

u Brna (Jižní Morava). K měření intenzity dopadajícího globálního slunečního záření, odraženého slunečního záření v efektivní výšce porostu a slunečního záření transmittovaného porostem byla použita čidla LI-COR měřící v patnáctiminutovém intervalu. Čidlo umístěné ve výšce 20 cm nad zemí monitorovalo intenzitu globálního slunečního záření prošlou porostem. V efektivní výšce porostu, tj. v 0,7násobku výšky porostu bylo umístěno čidlo měřící intenzitu dopadajícího globálního slunečního záření (čidlo bylo s růstem rostlin posouváno výše) a ve stejné výšce čidlo měřící sluneční záření odražené. Ve výšce 2 m měřilo stabilně čidlo intenzitu dopadajícího globálního slunečního záření. Kontrolní čidlo Kipp & Zonen typ CM 5 (Kipp & Zonen Delft BV, Holandsko) bylo umístěno na meteorologickém stožáru ve výšce 12 m.

Pro vyhodnocení byly použity denní hodnoty sumy globálního slunečního záření. Čidla zaznamenávají intenzitu slunečního záření ve  $W \cdot m^{-2}$ . Pro hodnocení byly naměřené hodnoty přepočteny na  $J \cdot cm^{-2}$ .

Denní suma globálního slunečního svitu neovlivněná porostem dosáhla maximálně  $3130 J \cdot cm^{-2}$  (7. července) a minimálně  $241 J \cdot cm^{-2}$  (27. září). Odraz dosáhl maxima  $580 J \cdot cm^{-2}$  7. července a minima  $18 J \cdot cm^{-2}$  (6. září). Vliv zapojení a výšky porostu je patrný z průběhu hodnot globálního slunečního záření měřeného v efektivní a přízemní výšce porostu kukuřice ve srovnání s hodnotami globálního slunečního záření měřeného ve výšce 12 m. Např. 5. srpna (porost plně zapojen) dosahovala denní suma globálního slunečního záření ve 12 m maximální hodnoty dosažené v měsíci srpnu a to  $2690 J \cdot cm^{-2}$ , suma v efektivní výšce porostu činila  $1438 J \cdot cm^{-2}$  a suma v přízemní výšce byla  $293 J \cdot cm^{-2}$ . Graf na Obr. 42 zachycuje hodnoty globálního slunečního záření měřené v různých výškách v porostu kukuřice a srovnávací měření ve výšce 12 m.

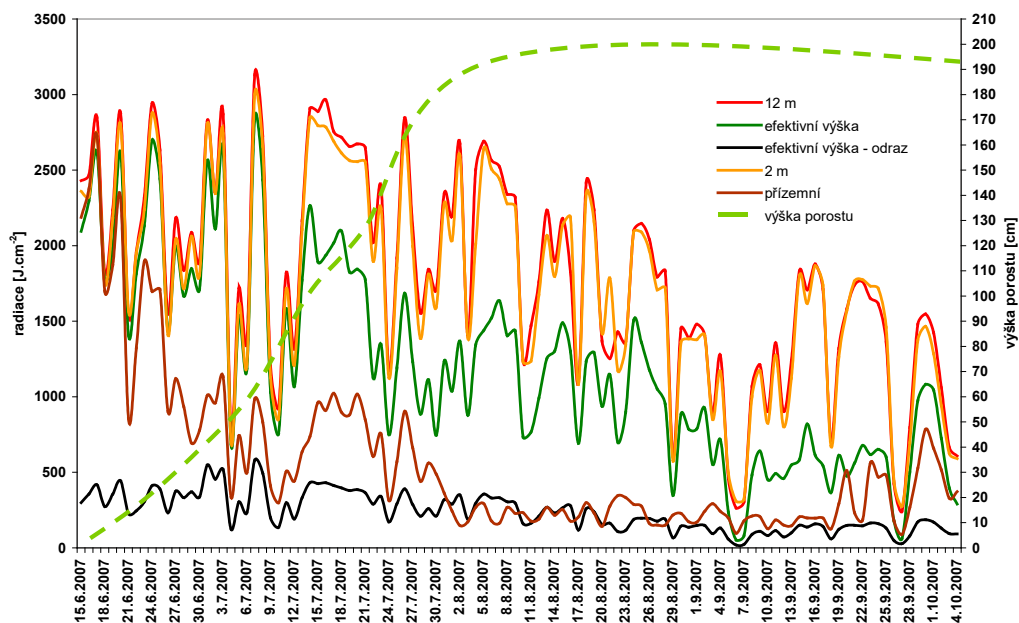
Intenzivní nárůst biomasy kukuřice byl ukončen přibližně na počátku měsíce srpna. Od srpna je tak již porost plně vyvinut a zapojen a má největší vliv na množství



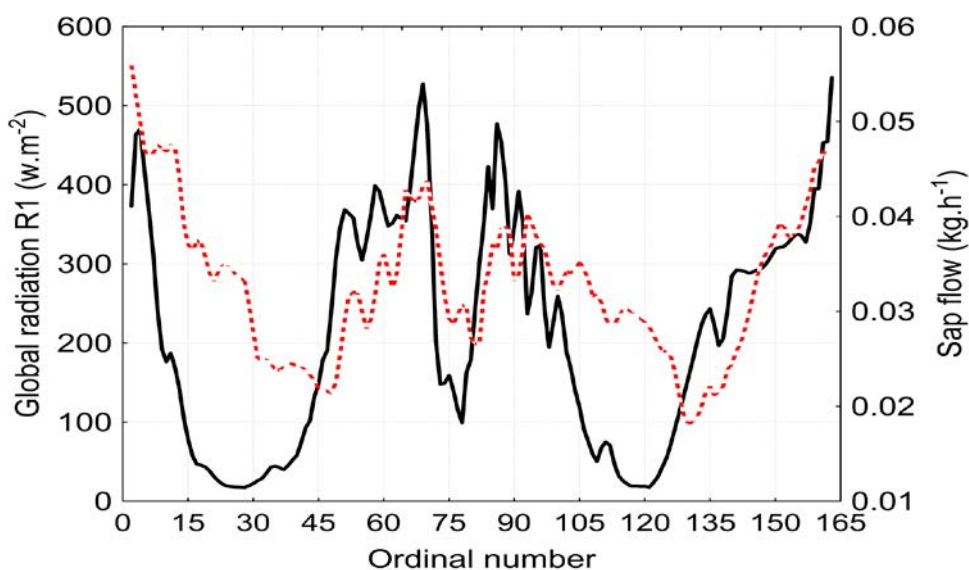
**Obr. 41** Průběh intenzity globálního slunečního záření během standardního vegetačního období (desetiminutové údaje v období od 21. 3. do 28. 10) – nahoře; detail průběhu intenzity slunečního záření během letního radičního dne (30. 6) – dole vlevo; systematická chyba v experimentu měření FAR (měřeno v  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) – efekt zastínění budovou v poledních hodinách – dole vpravo

procházejícího slunečního záření. Měření na meteorologickém stožáru ve výšce 12 m reprezentuje 100 % dopadajícího globálního slunečního záření neovlivněného porostem. Procentuální vyjádření radiace procházející porostem je následující: globální sluneční záření měřené ve 2 m odpovídá 97,4 %, v efektivní výšce 54 %, v přízemní výšce 16 %. Absolutně nejvyšší úroveň transmise porostu činila 100 % (16. 6.). Absolutně nejnižší úroveň transmise porostu činila 6 % (2. 8.), což na základě výpočtu reprezentuje LAI přibližně  $4\text{ m}^2\cdot\text{m}^{-2}$ .

V jiném experimentu s kukuřicí, detailně popsáném v kapitole Teplota povrchu, byl monitoring slunečního záření použit ke kvantifikaci vztahu mezi hodnotami transpiračního toku a vybranými meteorologickými prvky ve variantách bez stresu suchem a s mírným stresem suchem. Sluneční záření je nejvýznamnějším meteorologickým prvkem, ovlivňujícím transpiraci z listů a posléze i evapotranspiraci porostů. Transpirace se zvyšuje téměř proporcionálně se zvyšující se intenzitou slunečního záření. Důvod pro takto těsný vztah vychází z fyzikální podstaty výparu. Transpirace, jako výpar vody



**Obr. 42** Denní sumy globálního slunečního záření v závislosti na meteorologických podmínkách a vývoji porostu kukuřice v průběhu jednoho vegetačního období



**Obr. 43** Průběh sap flow (červená křivka;  $\text{kg.h}^{-1}$ , 15minutové průměry) v závislosti na změnách intenzity slunečního záření (černá křivka;  $\text{W.m}^{-2}$ ) v průběhu periody noc – den – noc – den, osa X udává pořadové číslo 15minutovky od počátku experimentu

z listů, je poháněna slunečním zářením, které vodě dodává energii pro změnu skupenství z kapalného na plynné. Tato energie, která je spotřebována na výpar (latentní teplo/výparné teplo) způsobuje žádoucí ochlazování listů.

Intenzita globálního slunečního záření byla měřena pomocí senzoru Minikin RTHi (EMS Brno, Brno, ČR) v desetiminutovém intervalu s přesností  $\pm 5\%$ . Čidlo bylo umístěno pod zastřešení experimentu polykarbonátovou střechou do vodorovné pozice. V porovnání s kontrolním čidlem zastřešení pokusného prostoru snižovalo intenzitu dopadajícího slunečního záření asi o 30 % (průměrné hodnoty radiace za světlou část dne).

Vztah transpirace (měřeno jako sap flow) a hodnot globálního slunečního záření (Obr. 43) byl hodnocen v hodinovém a denním kroku pro tři období růstu a vývoje rostliny a také pro celou sledovanou sezonu. Hodnocena byla pouze světlá část dne, protože v noci je transpirační tok nulový nebo dosahuje pouze minimálních hodnot, proto se při hodnocení průtoku většinou tmavá část dne zanedbává. Sap flow reagovalo na změnu intenzity slunečního záření s přibližně hodinovým zpožděním a křivka sap flow (průměrné hodnoty za hodinu).

Transpirační tok začal reagovat na příkon slunečního záření až od průměrné denní hodnoty přesahující cca  $150 \text{ W.m}^{-2}$ . Následně se intenzita transpirace zvyšovala společně s intenzitou slunečního záření a při průměrných hodnotách okolo  $350 \text{ W.m}^{-2}$  došlo k dalšímu navýšení transpirace především ve variantách za dostatku přístupné vody v půdě. U suchem stresovaných rostlin byla zjištěna spíše volnější závislost transpirace na intenzitě slunečního záření.

## 7 SEZNAM POUŽITÉ SOUVISEJÍCÍ LITERATURY

- KOŽNAROVÁ, V., KLABZUBA, J. 2002. Doporučení WMO pro popis meteorologických, resp. klimatologických podmínek definovaného období. *Rostlinná výroba*, 48: 190–192.
- LUKÁŠ, J., HABERLE, J., CHRPOVÁ, J., KROULÍK, M., BRANT, V., SOVA, J., KOVÁŘ, J., ŠVESTKA, A. 2019. *Metodika detekce vodního stresu polních plodin termokamerovým systémem*. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.
- MEIER, U. 1997. *Growth stages of plants - Entwicklungsstadien von Pflanzen - Estadios de las plantas - Développement des Plantes*. BBCH-Monograph. Blackwell Wissenschaftsverlag.



## 8 SEZNAM PUBLIKACÍ, KTERÉ PŘEDCHÁZELY METODICE

- CZELLER, K., ZSEMBELI, J., SINKA, L., KOVACS, G., STŘEDA, T., STŘEDOVÁ, H., CEPUDER, P., NOLZ, R. 2017. Determination of the amount of dew using weighing lysimeter data. In: *17. Gumpensteiner Lysimetertagung*. Raumberg-gumpenstein: HBLFA Raumberg-Gumpenstein, pp. 181–183.
- FUKALOVÁ, P., STŘEDOVÁ, H., VANÍČKOVÁ, M., STŘEDA, T. 2017. Promrzání půdy a výška sněhové pokrývky na stanici Pohořelice. In: *Mrazy a jejich dopady*. Praha: Český hydrometeorologický ústav, pp. 1–10.
- KLIMEŠOVÁ, J., HOLKOVÁ, L., STŘEDA, T. 2020. Drought stress response in maize: molecular, morphological and physiological analysis of tolerant and sensitive genotypes. *Maydica*, 65(1).
- KLIMEŠOVÁ, J., STŘEDA, T. 2016. Agrometeorological and biological aspects of maize transpiration. In: *Mendel and Bioclimatology – Conference proceedings*. Brno: Mendel University in Brno, pp. 150–156.
- KLIMEŠOVÁ, J., STŘEDOVÁ, H., STŘEDA, T. 2013. Maize transpiration in response to meteorological conditions. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 43(3): 225–236.
- KLIMEŠOVÁ, J., STŘEDOVÁ, H., KLIMEK KOPYRA, A., STŘEDA, T. 2021. Transpiration and water use efficiency of maize in different soil moisture conditions. *Acta horticulturae et regiotecturae*, 24(2): 105–109.
- KRČMÁŘOVÁ, J., POKORNÝ, R., STŘEDA, T., BROTON, J. 2014. The course of soil temperature under oilseed rape canopy. In: *MendelNet 2014: Proceedings of International Ph.D. Students Conference*. Brno, Czech Republic: Mendel University in Brno, pp. 64–67.
- KRČMÁŘOVÁ, J., POKORNÝ, R., STŘEDA, T. 2015. Fytopatologické aspekty vlhkosti vzduchu v porostu polních plodin. *Úroda*, 63(12): 199–202.
- KRČMÁŘOVÁ, J., POKORNÝ, R., STŘEDA, T. 2014. Specifika teplot půdy pod porostem pšenice ozimé. In: *Sborník odborných příspěvků a sdělení "MendelAgro 2014"*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, pp. 58–60.
- KRČMÁŘOVÁ, J., POKORNÝ, R., STŘEDA, T. 2016. The course, stratification and possibility of simulating relative air humidity in winter wheat stand. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 46(2): 137–154.
- KRČMÁŘOVÁ, J., STŘEDA, T., POKORNÝ, R. 2014. Specifics of Soil Temperature under Winter Oilseed Rape Canopy. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 44(3): 205–218.
- KRČMÁŘOVÁ, J., STŘEDA, T., POKORNÝ, R. 2015. The vertical stratification of air temperature in winter wheat stand in the years with different course of weather. In: *Towards Climatic Services*. Nitra: Slovak University of Agriculture in Nitra.
- KRČMÁŘOVÁ, J., STŘEDOVÁ, H., POKORNÝ, R., STŘEDA, T. 2013. Specifics of soil temperature under winter wheat canopy. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 43(3): 209–223.
- KUČERA, J., PODHRÁZSKÁ, J., STŘEDA, T., SZTURC, J. 2020. Influence of windbreak on the surrounding environment. In: *MendelNet 2020: Proceedings of International PhD Students Conference*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 249–254.
- LITSCHMANN, T., STŘEDA, T. 2017. Riziko mrazového poškození plodin v blízkosti vegetačních bariér. In: *Mrazy a jejich dopady*. Praha: Český hydrometeorologický ústav, , 1–15.
- MUŽÍKOVÁ, B., STŘEDA, T., STŘEDOVÁ, H. 2013. State of bare soil surface as a spring drought indicator. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 43(3): 197–207.
- POKLADNÍKOVÁ, H., ROŽNOVSKÝ, J. 2007. Method of completing missing data of soil temperature. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 37(3): 263–274.

- POKLADNÍKOVÁ, H., ROŽNOVSKÝ, J. 2006. The soil temperature at Pohořelice station during the years 1961–2000. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 36(3): 329–341.
- POKLADNÍKOVÁ, H., ROŽNOVSKÝ, J., STŘEDA, T. 2008. Evaluation of soil temperatures at agroclimatological station Pohořelice. *Soil and Water Research*, 3(4): 223–230.
- POKORNÝ, R., KRČMÁŘOVÁ, J., STŘEDA, T., PLACHKÁ, E. 2015. The influence of locality and variety on the vertical stratification of air temperature in the winter oilseed rape stand. In: *Towards Climatic Services*. Nitra: Slovak University of Agriculture in Nitra.
- ROŽNOVSKÝ, J., LITSCHMANN, T., HORA, P., FUKALOVÁ, P., POKLADNÍKOVÁ, H. 2010. Dynamika teplota písčité půdy. *Úroda*, 58(12): 121–125.
- ROŽNOVSKÝ, J., LITSCHMANN, T., STŘEDOVÁ, H., STŘEDA, T., SALAŠ, P., HORKÁ, M. 2017. Microclimate evaluation of the Hradec Králové City using HUMIDEX. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 47(3): 231–246.
- STŘEDA, T., KLIMEŠOVÁ, J., STŘEDOVÁ, H. 2014. Úskalí měření a hodnocení vybraných faktorů tvorby výnosu polních plodin. In: *Příspěvky k problematice zemědělského pokusnictví*. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., pp. 100–134.
- STŘEDA, T., LITSCHMANN, T., STŘEDOVÁ, H. 2015. Relationship between tree bark surface temperature and selected meteorological elements. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 45(4): 299–311.
- STŘEDA, T., STŘEDOVÁ, H., MUŽÍKOVÁ, B., POKORNÝ, R. 2014. Využití termálního monitoringu v meteorologii a agrometeorologii. In: *Člověk ve svém pozemském a kosmickém prostředí*. Úpice: Hvězdárna v Úpici, pp. 62–66.
- STŘEDA, T., STŘEDOVÁ, H., ROŽNOVSKÝ, J. 2011. Orchards microclimatic specifics. In: *Bioclimate: Source and Limit of Social Development*. 1. vyd. Nitra: SPU v Nitre, pp. 132–133.
- STŘEDA, T., STŘEDOVÁ, H., ROŽNOVSKÝ, J. 2011. Podmínky pro přezimování polních plodin v kontextu vývoje klimatu. *Úroda*, 59(10): 582–589.
- STŘEDA, T., STŘEDOVÁ, H., ROŽNOVSKÝ, J. 2011. Predikce aktivity bázlivce kukuřičného v závislosti na teplotách půdy. *Úroda*, 59(12): 269–272.
- STŘEDA, T., VAHALA, O., STŘEDOVÁ, H. 2013. Prediction of adult western corn rootworm (*Diabrotica virgifera virgifera* LeConte) emergence. *Plant Protection Science*, 49(2): 89–97.
- STŘEDOVÁ, H., FUKALOVÁ, P., LEHNERT, M., ROŽNOVSKÝ, J., STŘEDA, T. 2014. *Teplota půdy*. Práce a studie. 1. vyd. Praha: Český hydrometeorologický ústav.
- STŘEDOVÁ, H., CHUCHMA, F., ROŽNOVSKÝ, J., STŘEDA, T. 2021. Local Climate Zones, Land Surface Temperature and Air Temperature Interactions: Case Study of Hradec Králové, the Czech Republic. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(10): 704.
- STŘEDOVÁ, H., KLIMEŠOVÁ, J., STŘEDA, T., FUKALOVÁ, P. 2020. Could the directly measured data of transpiration be replaced by model outputs? *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 50(1): 33–47.
- STŘEDOVÁ, H., KNOTEK, J., STŘEDA, T. 2015. Microclimate monitoring for evaluation of management effect on Mohelno Serpentine Steppe. In: *Public recreation and landscape protection – with man hand in hand!* Brno: Mendelova univerzita v Brně, pp. 157–160.
- STŘEDOVÁ, H., KNOTEK, J., STŘEDA, T., VYSOUDIL, M. 2016. Microclimatic specifics of Mohelno Serpentine Steppe – primary result. In: *Public recreation and landscape protection – with nature hand in hand...: Conference proceeding*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, pp. 114–119.
- STŘEDOVÁ, H., STEHNOVÁ, E., STŘEDA, T., VYSOUDIL, M. 2019. Microclimate conditions on Mohelno Serpentine Steppe National Nature Reserve after management plan realization.

In: *Public recreation and landscape protection – with sense hand in hand...: Conference proceeding*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, pp. 240–245.

STŘEDOVÁ, H., STŘEDA, T. 2015. Analýza erozních deflátů s využitím pokročilých metod.

In: *Člověk ve svém pozemském a kosmickém prostředí*. Úpice: Hvězdárna v Úpici, pp. 66–71.

STŘEDOVÁ, H., STŘEDA, T., LITSCHMANN, T. 2016. *Metodika měření mikroklimatických poměrů zemědělských plodin*. Mendelova univerzita v Brně. ISBN: 978-80-7509-461-2

STŘEDOVÁ, H., STŘEDA, T., MUŽÍKOVÁ, B. 2011. Trend teplotních a srážkových podmínek v zemědělsky intenzivních oblastech. *Úroda*, 59(10): 590–596.

STŘEDOVÁ, H., STŘEDA, T., ROŽNOVSKÝ, J., CHUCHMA, F. 2011. Výskyt vybraných škodlivých činitelů ovocných dřevin v ČR v závislosti na teplotních podmínkách. *Úroda*, 59(12): 273–276.

## POZNÁMKY

Název: Metodika pro specializovaná mikroklimatická měření  
v zemědělském výzkumu

Autoři: Tomáš Středa, Tomáš Litschmann, Hana Středová, Ivana Jovanović

Vydavatel: Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno

Vydání: první, 2022

Počet stran: 76 s.

ISBN 978-80-7509-860-3 (online ; pdf)

DOI: <https://doi.org/10.11118/978-80-7509-860-3>

Tato publikace neprošla jazykovou úpravou.

Za věcnou a jazykovou správnost díla odpovídají autoři.

Metodika je poskytována bezplatně.