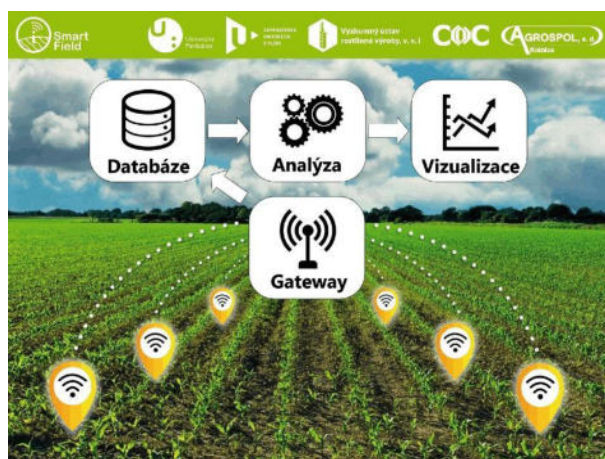


Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.



SmartField – systém sběru teplotních a vlhkostních dat pro podmínky precizního zemědělství na principu Internetu věcí (IoT)

Certifikovaná metodika



Ing. Ladislav Menšík, Ph.D.¹
prof. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.²
doc. Ing. Tomáš Syrový, Ph.D.³
Ing. Lubomír Kubáč, Ph.D.⁴
Ing. Ladislav Menšík⁵
a kolektiv

Řešitelská pracoviště
Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.¹⁾
Západočeská univerzita v Plzni²⁾
Univerzita Pardubice³⁾
Centrum organické chemie, s.r.o.⁴⁾
AGROSPOL, a.d. Knínice⁵⁾

Jevíčko, Plzeň, Pardubice, Knínice
Prosinec 2022

SmartField – systém sběru teplotních a vlhkostních dat pro podmínky precizního zemědělství na principu Internetu věcí (IoT)

Podstatou certifikované metodiky je systém pro sběr teplotních a vlhkostních dat (komplexní multisenzorová platforma pro detekci teploty a vlhkosti vzduchu a současně i teploty a vlhkosti půdy v různých úrovních) pro podmínky precizního zemědělství (Zemědělství 4.0) na principu Internetu věcí (IoT). Koncepce systému: senzorový systém je tvořen autonomními multisenzorovými jednotkami pro měření teploty, vlhkosti vzduchu a půdy rozmístěnými v zájmové oblasti (modelový zemědělský podnik AGROSPOL, a.d. Knínice). Naměřená data z multisenzorových měřících jednotek (SFMUv2 /SmartField Measuring Unit, Version 2/) jsou následně bezdrátově přenášena do vlastní brány (gateway) pomocí sítě LoRaWAN (nebo může být přenos dat řešen s využitím sítě LoRa operátora České Radiokomunikace a.s. /ČRA/) a pak jsou data ukládána do vzdálené databáze (LoRaTech server nebo Server ČRA). Uložená data jsou za pomoci vyvinutého software (SmartField Dashboard) zpracována, analyzována a vizualizována za pomoci platformy Google Workspace s využitím nástrojů Google Sheets a Google Data Studio. Získaná data jsou uživateli interpretována formou časových grafů a výstupů: (1) jako týdenní průměrné hodnoty, (2) jako denní průměrné hodnoty, (3) okamžité hodnoty s periodou jedné hodiny. Rovněž je dostupná vizualizace polohy, interaktivní filtr umožňující volbu sledovaného období a tabulkový výstup pro snadný export naměřených hodnot ve vybraném období.

Klíčová slova: multisenzorová platforma; teplota vzduchu a půdy; vlhkost vzduchu a půdy; precizní zemědělství; internet věcí (IoT)

SmartField - temperature and humidity data collection system for precision farming conditions based on the Internet of Things (IoT)

The core of the certified methodology is to introduce a temperature and humidity data acquisition system, a comprehensive multi-sensor platform, for detecting air and soil temperature and humidity at different depths. The sensors will find application in precision agriculture (Agriculture 4.0) based on the Internet of Things (IoT). The sensor system consists of autonomous multisensory units for measuring temperature, air and soil humidity, deployed in the area of interest (model agricultural company AGROSPOL Knínice). The data from the multisensory measuring units (SFM Uv2 - SmartField Measuring Unit, Version 2) are then wirelessly transmitted to the gateway using the LoRaWAN network, or the data transmission can be done using the LoRa network of the operator České Radiokomunikace, and then the data are stored in a remote database (LoRaTech or ČRA servers). The stored data are processed, analysed and visualised using the developed SmartField Dashboard software using the Google Workspace platform with the use of Google Sheets and Google Data Studio tools. The obtained data are interpreted by the user in the form of time graphs: (1) as weekly average values, (2) as daily average values, (3) instantaneous values with a period of one hour. Also available is a visualization of the location, an interactive filter allowing the selection of the monitored period and a tabular output for easy export of the measured values in the selected period.

Keywords: multi-sensor platform; air and soil temperature; air and soil moisture; precision agriculture; Internet of Things (IoT)

Metodika vznikla za finanční podpory MZE ČR a je výstupem řešení projektu QK1810010 „SmartField“.

Autorský kolektiv:

Ing. Ladislav Menšík, Ph.D., prof. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D., doc. Ing. Tomáš Syrový, Ph.D., Ing. Lubomír Kubáč, Ph.D., Ing. Robert Vik, Ph.D., Ing. Silvan Pretl, Ph.D., Ing. Jiří Čengery, Ph.D., Ing. et Ing. Petr Kašpar, Ph.D., Ing. Radek Soukup, Ph.D., Ing. Kryštof Vaněk, Ing. Lucie Syrová, Ph.D., Ing. Jiří Černý, Ph.D., Ing. Eva Kunzová, CSc., Ing. Lukáš Hlisenkovský, Ph.D., Ing. Pavel Nerušil, Ph.D., Ing. Miloslav Hýbl, Ph.D., Bc. Pavel Kopecký, RNDr. Ivana Doležalová, Ph.D., Ing. Alena Štreblová, Ing. Ladislav Pfeř, Ing. Ladislav Menšík st.

Oponenti:

Ing. Václav Kadlec, Ph.D., Ministerstvo zemědělství České republiky, Praha
doc. RNDr. Lubica Pospíšilová, CSc., Mendelova univerzita v Brně

Publikace neprošla jazykovou úpravou.

Metodika byla schválena orgánem státní správy (Ministerstvo zemědělství České republiky, Odbor průřezových činností a zemědělských informací, Oddělení půdy a geoprostorových informací) pod č.j. MZE-3318/2023-13134.

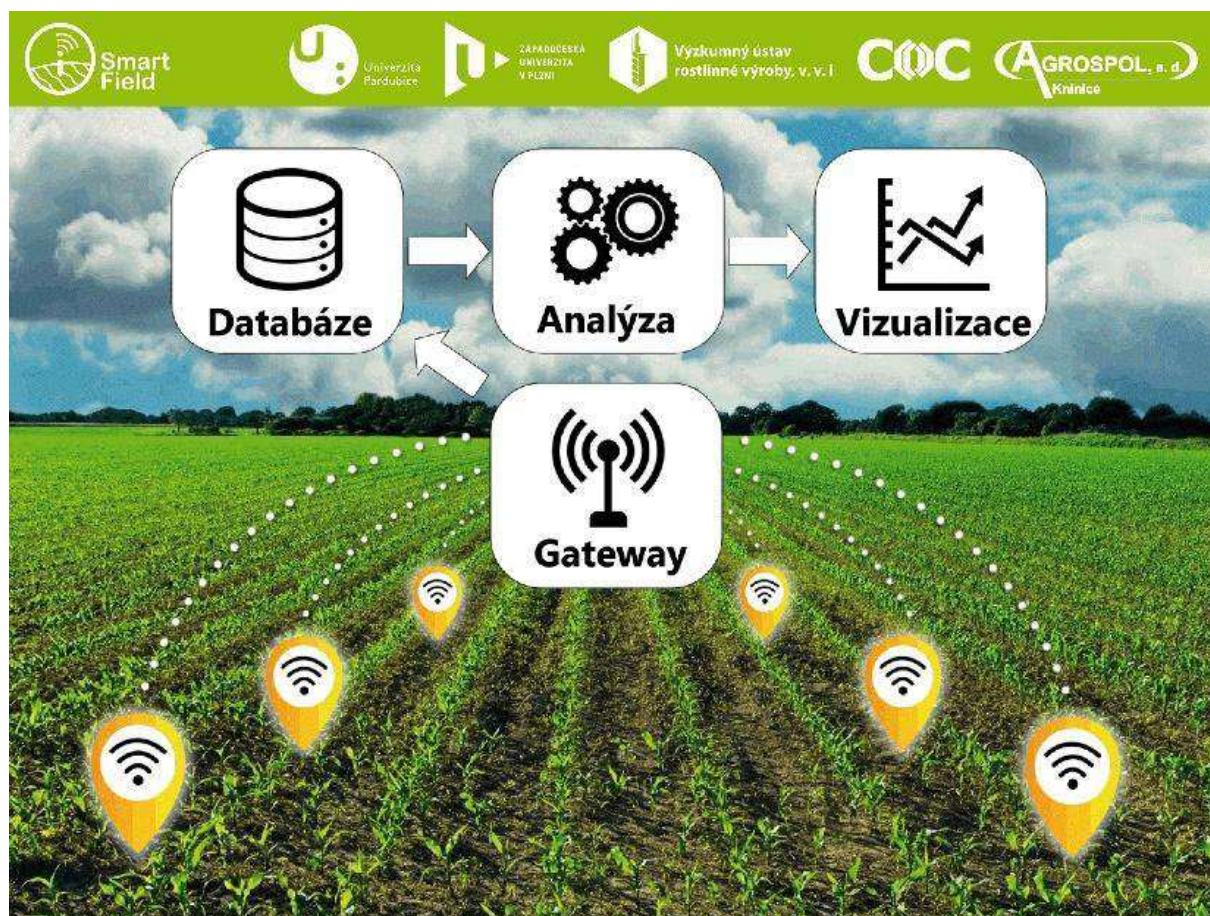
Citace: Menšík L. ml., Hamáček A., Syrový T., Kubáč L., Vik R., Pretl S., Čengery J., Kašpar P., Soukup R., Vaněk, K., Syrová L., Černý J., Kunzová E., Hlisenkovský L., Nerušil P., Hýbl M., Kopecký P., Doležalová I., Štreblová A., Pfeř L., Menšík L. st. 2022. SmartField – systém sběru teplotních a vlhkostních dat pro podmínky precizního zemědělství na principu Internetu věcí (IoT). Certifikovaná metodika. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., 55 s. ISBN 978-80-7427-391-9

© Ladislav Menšík ml., Aleš Hamáček, Tomáš Syrový, Lubomír Kubáč, Ladislav Menšík st., 2022

© Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha–Ruzyně, Západočeská univerzita v Plzni, Univerzita Pardubice, Centrum organické chemie, s.r.o., AGROSPOL, a.d. Knínice, 2022

ISBN 978-80-7427-391-9

Grafický abstrakt

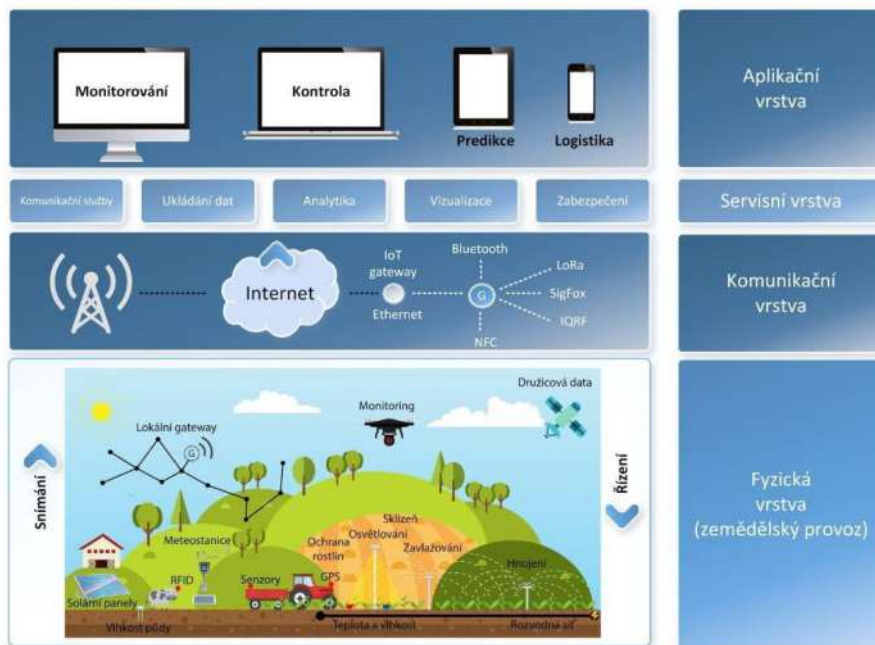


Obsah

1. Úvod	5
2. Cíl metodiky	6
3. Současný stav řešené problematiky	6
4. Experimentální část (SmartField – Systém sběru teplotních a vlhkostních dat)	9
4.1.Senzorové elementy pro měření teploty a vlhkosti půdy.....	9
4.2.Senzorové elementy pro měření teploty a vlhkosti vzduchu	11
4.3.Modulární elektronická měřicí jednotka SFMU (Smartfield Measuring Unit).....	12
4.4.Sběr dat, Internet věcí (IoT), síť LoRaWAN	14
4.5.Softwarové řešení pro monitoring, zpracování a vizualizaci dat	16
4.6.SmartField – Systém sběru teplotních a vlhkostních dat v reálných provozních podmínkách (in situ)	19
5. Závěr	38
6. Přínos metodiky	39
7. Srovnání novosti postupů a uplatnění metodik	39
8. Seznam publikací, které předcházely metodice	39
Literatura	42
Seznam obrázků, tabulek a zkratk	46
Přílohy	48

1. Úvod

Digitalizace a moderní technologie prostupují všemi částmi našeho života. Razantní rozvoj senzorové techniky a zpracování dat v souvislosti s rozvojem internetu jsou v dnešní době hnací silou globálního vývoje inteligentních výrobků. Tento trend se v posledních letech začíná rychle prosazovat i v zemědělském sektoru České republiky (Kušová *et al.* 2017). K pokroku v digitalizaci a její implementaci dochází jak v živočišné (Loučka *et al.* 2019, Menšík *et al.* 2019a, Jambor *et al.* 2020, Menšík *et al.* 2020a), tak v rostlinné produkci (Fikejs *et al.* 2017; Kroulík *et al.* 2018; Lukas *et al.* 2019). Správa a zpracování dat slouží k řízení a automatizaci výrobních procesů, které jsou podkladem pro rozhodování zemědělců. Využívání dat vede ke zvyšování efektivity a produktivity v zemědělství, k podpoře lepších životních podmínek hospodářských zvířat i větší šetrnosti k životnímu prostředí.



Vysvětlení: Obrázek ilustruje obecné schéma uplatnění principů IoT v oblasti precizního zemědělství. Jsou zde patrné čtyři hlavní vrstvy: fyzická, komunikační, servisní a aplikační. Fyzickou vrstvu lze ještě rozdělit na část snímání a na část řízení. Do snímání části fyzické vrstvy lze zařadit: RFID lokalizaci, monitoring vlhkosti půdy, relativní vlhkosti a teploty mikroklimatu rostlin, přesný monitoring klimatu pomocí lokálních meteorologických stanic, monitoring půdních živin, analýzu volně přístupných družicových dat a také monitoring půdy prostřednictvím bezpilotních platform (UAV) osazených specifickými pasivními (VIS, NIR, SWIR, MWIR, LWIR) a aktivními senzory (LIDAR). Řídící vrstva na základě sběru dat ze snímací části je schopna efektivně ovlivňovat mechanismy agrosektoru v souladu s principy precizního zemědělství: hnojení, osvětlování, zavlažování, ochrana rostlin, aj. Komunikační vrstva slouží z jednoho směru pro sběr dat ze senzorových jednotek a odeslání řídicích pokynů ze směru druhého. Pro sběr dat z jednotlivých prvků na dané lokalitě slouží tzv. lokální gateway. Z tohoto bodu lze data odeslat buďto rovnou do sítě internet prostřednictvím modemu nebo 3G mobilní sítě. Na servisní vrstvě probíhá přenos zabezpečených komunikačních paketů, dochází k ukládání těchto dat, jejich analýze a také využití dat pro naplnění predikčních algoritmů využívajících strojové učení. V neposlední řadě tato vrstva zajišťuje také vizualizaci analyzovaných dat. Poslední vrstva schématu, aplikační vrstva, má na starost uživatelské zobrazení dat, zpětné řízení a predikci stavů.

Obr. 1.1: Obecné schéma uplatnění principů IoT v oblasti precizního zemědělství (převzato s úpravami z Talavera *et al.* 2017).

Internet věcí, neboli zkráceně IoT, je jedním z nejdynamičtěji se rozvíjejících odvětví v oblasti informačních a komunikačních technologií. IoT přináší do různých oblastí včetně zemědělství možnost sběru dat nebo řízení procesů v reálném čase díky připojení fyzických zařízení (věcí) ke komunikační síti (internetu). IoT technologie mohou např. pomoci vyhodnotit stav půdy, rostlin nebo pohyb a aktivitu zvířat, ale i atmosférické podmínky apod. Mohou se také použít k vyhodnocení a kontrole proměnných, jako je teplota, vlhkost vzduchu a půdy apod. (Talavera *et al.* 2017, Raj *et al.* 2021) viz obr. 1.1.

IoT může být v nadcházejících letech klíčovým nástrojem konkurenceschopnosti v celé vertikále zemědělského sektoru od zemědělců přes dodavatele, distributory, spotřebitele až po zástupce státní správy. IoT nabízí pozitivní externality v podobě začlenění do environmentálních aplikací - např. vytváření rozsáhlých mapových souborů v reálném čase o kvalitě ovzduší a vody, hladině hluku, teplotě

a vlhkosti půdy apod. Dále jej lze využít ke shromažďování a ukládání záznamů o životním prostředí, kontrole shody environmentálních proměnných s lokálními limity a regulacemi, ke spouštění výstrah nebo zasílání doporučení občanům a úředním (Chamara *et al.* 2022).

Výhodou dnešních technologií je možnost nasazení levných senzorů ve velkém měřítku. Řada senzorů je již dostupná na trhu, ale jejich vývoj nadále intenzivně pokračuje (CleverFarm 2022; Farm21 2022; Smartcultiva 2022; WatchNET IoT 2022). Vedle senzorů realizovaných konvenčními technologiemi výroby elektronických zařízení představuje jeden z perspektivních směrů vývoje také příprava senzorů pomocí tisku (Srový *et al.* 2020; Rayhana *et al.* 2021; Sophocleous *et al.* 2020; Yin *et al.* 2021) či dalších aditivních technologií (3D tisku, mikrodizpenzingu, Aerosol Jet Printing, aj.). Senzorové elementy lze pomocí tiskových technologií realizovat na nosných podkladech nejrůznějšího tvarového provedení (2D i 3D) i materiálového složení zahrnujících např. pevné keramické substráty, ohebné plastové fólie nebo kompozitní prvky s tvarem usnadňujícím instalaci do půdy. Použít lze rovněž vhodně upravené klasické/přírodní materiály jako např. dřevěné kolíky, papírové substráty (Kim *et al.* 2013a,b, 2019; Srový *et al.* 2021), silnostěnné papírové profily či modifikované biopolymerní materiály. Další významnou výhodou tiskových technologií mohou být vyšší produkční rychlosti a nižší výrobní náklady. Tyto aspekty zvyšují potenciál pro širší uplatnění těchto senzorů, zvýšení hustoty pokrytí a tím i prostorového zpřesnění dat půdní vlhkosti, teplotních profilů a dalších parametrů.

Široké nasazení senzorů a dalších elektronických prostředků pro sběr dat ovšem rovněž vyžaduje promyšlený a zodpovědný přístup k celému životnímu cyklu těchto systémů. Zejména v aplikacích pro zemědělské účely je nezbytné minimalizovat možné environmentální dopady spojené např. s instalací senzorů přímo do půdy. Jejich konstrukce a materiálová skladba by v první řadě měla minimalizovat možné riziko kontaminace prostředí jakýmkoliv nežádoucími látkami. Zároveň by také návrh, výroba, používání a následné nakládání po skončení životnosti měly respektovat zásady oběhového hospodářství. Konstrukce senzorových jednotek by tak měla umožňovat opakovanou využitelnost komponent a v případě poškození jejich snadné nahrazení. U vyřazených částí je pak žádoucí jejich další využití v recyklačním procesu, případně alespoň ekologicky šetrná likvidace.

2. Cíl metodiky

Cílem metodiky je představení systému sběru teplotních a vlhkostních dat (komplexní multisenzorová platforma pro detekci teploty a vlhkosti vzduchu a současně i teploty a vlhkosti půdy v různých úrovních) pro podmínky precizního zemědělství (Zemědělství 4.0) na principu Internetu věcí (IoT).

3. Současný stav řešené problematiky

Mění se podmínky prostředí (globální změna klimatu „GZK“) v současnosti vnáší značnou neurčitost do variability prostředí v systému půda – rostlina – atmosféra (Brázdil *et al.* 2007; Brázdil *et al.* 2015; Silva, Lambers 2021; Chaudhry, Sidhu 2022; Elbasiouny *et al.* 2022). GZK již v současné době zvýšila celosvětovou průměrnou roční teplotu o více než 1 °C než byla v před-industriálním období (Sánchez-Lugo *et al.* 2018; Lindsey, Dahlman 2020) a to má velmi závažné dopady na současné zemědělství, kdy počasí je více proměnlivé, častěji se vyskytují přírodní extrémy (zvyšuje se teplota vzduchu, evaporace, prodlužuje se vegetační období, zvyšuje se závažnost dopadů sucha – v půdě je nedostatek vláhy /snižuje se půdní vlhkost apod./ (Porter *et al.* 2014; Berg, Sheffield 2018). Čistá ekosystémová výměna uhlíku (Net Ecosystem Exchange, NEE), při deficitu vody v půdě může způsobit, že se půda stane čistým zdrojem CO₂ (Green *et al.* 2019), zejména v posledních několika letech s opakovanými výskyty sucha v letních měsících (Sowerby *et al.* 2008, ČHMÚ 2020; Oušková *et al.* 2022).

Za posledních cca 20–30 let již můžeme konstatovat, že výnosy produkce zemědělských plodin se ve světě snižují (Lobell *et al.* 2011) z důvodu globálního oteplování a výsledky modelových studií naznačují, že změna klimatu bude u potravinářských plodin dále snižovat výnosový potenciál (Cline 2007; Jarvis *et al.* 2011; Knox *et al.* 2011; Rosenzweig *et al.* 2014; Steenwerth *et al.* 2014; Lone *et al.* 2017, Blanco *et al.* 2017). Tomuto trendu se nevyhnou ani evropští zemědělci, a to díky snižující se

produkci zemědělských plodin a zvyšujícím se cenám. Evropa však nebude postižena takovou měrou, jako jiné části světa (Frank *et al.* 2014). Význam vlivu změny klimatických podmínek v Evropě nebude dopadat na země EU rovnoměrně, ale předpokládá se, že nejvíce zasaženou plodinou bude kukuřice (Blanco *et al.* 2017). Postupy, jak snížit negativní dopady měnících se podmínek počasí na zemědělskou produkci jsou známy, nicméně uplatnění těchto postupů zabraňuje několik faktorů, jako je vysoká míra pronajatých pozemků, na kterých zemědělci hospodaří, nebo např. výše zmíněný nedostatek statkových hnojiv v některých oblastech. Zvyšující se atmosférická koncentrace CO₂ bude snižovat i kvalitu potravin a krmiv (Myers *et al.* 2014).

Vyšší poptávka po čerstvých potravinách vede k nárůstu intenzivních skleníkových ploch a spotřeby energie a konečných nákladů. V některých zemích jako je Nizozemsko, představuje energetická náročnost skleníkového pěstování až 8,1 % z celkového využití energie. Ovládání pěstitelských podmínek skleníkového prostředí závisí především na regulaci teploty. Regulace teploty je rozhodující pro ovlivnění růstu, kvality a morfologie rostlin a je také významnou strategií v environmentální modifikaci plodin (rozvoj patogenních chorob *Botrytis*, *Septoria apiicola* aj.). Pro řízení prostředí skleníku existuje řada modelovacích metod, které poskytují jasné fyzikální vysvětlení skleníkových podmínek. "Optimální" podmínky skleníkového prostředí byly heuristicky určeny a definovány pěstiteli a výzkumnými pracovníky na základě mnohaletých experimentů. V současné době tyto optimální podmínky byly úspěšně dosaženy implementací plánů specifických pro jednotlivé plodiny, a to za pomoci technických zařízení (odtahové ventilátory, ventilační otvory, stínítka, ohřívače, kotle, vodní čerpadla apod.) s jednoduchým ovládáním ON-OFF pro dosažení požadovaných hodnot. S vylepšením počítačových technologií však bylo možné sledovat a kontrolovat několik parametrů k implementaci sofistikovanějších řídicích strategií založených na moderních teoriích řízení. Pro získání co nejpřesnějších dat o aktuálních pěstitelských podmínkách ve skleníku je třeba získat sofistikované a cenově dostupné zařízení, které bude poskytovat požadované informace v potřebné přesnosti, spolehlivosti a cenové dostupnosti (Behzad *et al.* 2018).

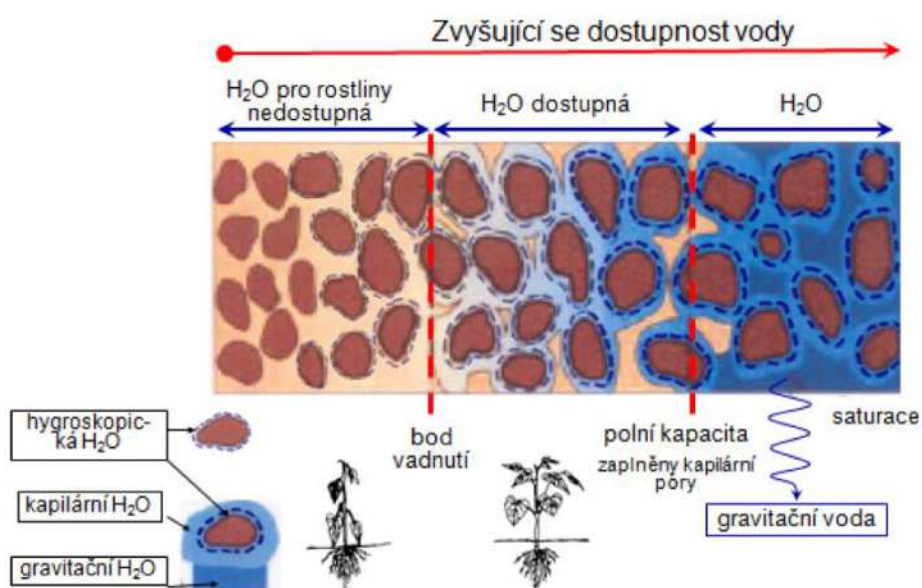
Půda je složitý systém minerální a organické hmoty, která je seskupená do částic neboli agregátů různé velikosti a struktury. Tyto agregáty mezi sebou vytvářejí póry, kde může proudit, nebo být zadržena voda, vzduch a další (Brady, Weil 2008). Voda je hlavní složkou všech organismů a je také prostředím, ve kterém probíhají všechny životní pochody (Šantrůčková 2014).

Za půdní vodu považujeme veškerou vodu v půdě obsaženou, a to s tím, že tato nevytváří souvislou hladinu, která je typická až pro vodu podzemní (Warrick 2002). Z toho plyne, že za půdní vodu považujeme vodu v jakémkoliv skupenství: i jako součást půdních plynů, i v podobě ledových krystalků – jediné, co je odlišující, je skutečnost, že tyto její podoby nevytváří hladinu jako takovou (Rejšek, Vácha 2018). Voda v půdě zaplňuje póry různého tvaru, velikosti a schopnost půdy zadržovat vodu, tzv. retenční schopnost půdy, závisí na půdním druhu, struktuře i obsahu organické hmoty (Brady, Weil 2008; Budhu 2011; Šantrůčková 2014; Rejšek, Vácha 2018)¹. Množství vody v půdě je jeden z nejdůležitějších faktorů, který určuje koloběh živin, růst rostlin i biologickou aktivitu půdy (Bista *et al.* 2018; Siebert *et al.* 2019; Kakumanu *et al.* 2019). Voda je poutána v pórech kapilárními silami a adsorpcí (Budhu 2011) /pokrývá částičky půdy nebo je poutána elektrostatickými silami na půdní koloidy a ionty s různým elektrickým nábojem/. Síla vazby vody se zvyšuje se snižující se velikostí pórů a půdních částic viz obr. 3.1. *Podrobný popis, dělení vody v půdě včetně půdních hydrolimitů, vodního potenciálu a dostupnosti vody apod. je uvedeno v Příloze 1.*

Voda rozpouští většinu živin a má velkou tepelnou kapacitu (Speight 2020). Půdní vlhkost hraje klíčovou roli nejen v hydrologických procesech ale i v ekosystémových funkcích /respirace půdy, koloběh uhlíku a živin apod./ (Botter *et al.* 2007; Manzon *et al.* 2012). Produktivita plodin je silně ovlivněna dostupností vody v půdě (Kang *et al.* 2009). Půdní vlhkost je důležitá pro evapotranspirační procesy (McCull *et al.* 2017). Půdní vlhkost je ovlivněna jak fyzickými, tak chemickými vlastnostmi půdy (Gunda *et al.* 2017). Teplota přímo ovlivňuje ztrátu vody z půdy prostřednictvím evapotranspirace, zatímco srážky slouží jako zdroj vody (Várallyay *et al.* 2010; Bhatt, Hossain 2019). Půdní vlhkost je

¹ Půda sama o sobě vykazuje mimořádně vysokou vododržnost – a to v první řadě půda humusem bohatá. Organické koloidy dovedou na svůj aktivní povrch navázat velké množství vody, než je jejich vlastní hmotnost. Chceme-li účinně bránit nadměrné ztrátě vody z krajiny, musíme věnovat v budoucnu pozornost dodávání organické hmoty do půdy, tak i aplikaci mechanizačních prostředků v zemědělství i lesnictví ve vhodných obdobích roku, stejně tak jako dodržování správných osevních postupů se zastoupením víceletých pícnin v zemědělství, tak i obnovu lesních porostů v lesním hospodářství.

významně ovlivněna hospodařením (managementem) na zemědělské půdě, resp. v krajině (Fu *et al.* 2003). Zejména rozdílné způsoby obhospodařování a využití půdy (např. zavlažování půdy v intenzivních zemědělských oblastech) mohou výrazně ovlivnit dynamiku půdní vlhkosti i dostupnost vody pro rostliny (Pender, Kerr 1998). Nedostatek půdní vlhkosti dále negativně ovlivňuje mikrobiální procesy v půdě a tím přímo ovlivňují mineralizaci statkových a využití minerálních hnojiv rostlinami. Pro snížení nenadálých výkyvů extrémních případů sucha tak bude třeba pěstovat plodiny, charakteristické pro některé výrobní oblasti, i v jiných oblastech, např. ve vyšších nadmořských výškách (Hlisnikovský *et al.* 2015). Nároky zemědělských plodin na obsah a dostupnost vody v půdě zdůrazňují důležitost monitorování vlhkosti půdy pro zajištění kvantity a kvality produkce, resp. potravin a krmiv (Holzman *et al.* 2014) v důsledku měnících se podmínek prostředí. Monitorování (online měření) a vyhodnocování variability vlhkosti a teploty půdy bude poskytovat cenné údaje z pohledu intenzity a délky suchých period (intenzity sucha), extrémních půdních teplot, ale na druhou stranu i přívalových dešťů, lokálních záplav apod. (Heim 2002; Koste *et al.* 2004; Massari *et al.* 2014; Murtaza *et al.* 2015; Whan *et al.* 2015; Fournier *et al.* 2016; McColl *et al.* 2017; Du *et al.* 2018; Wu *et al.* 2022 aj.).

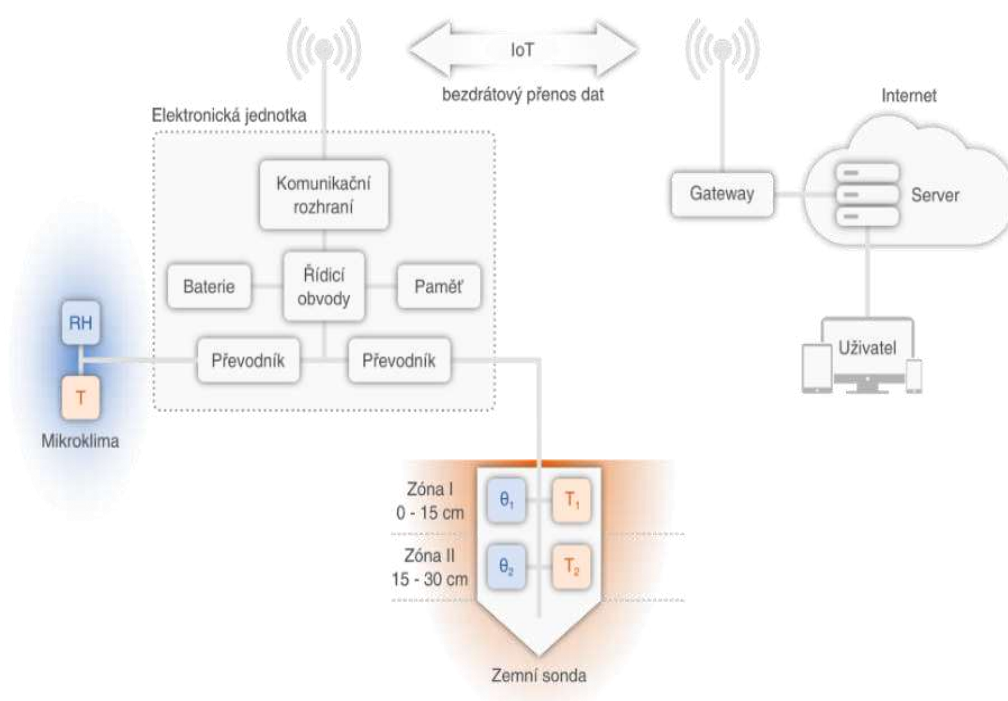


Obr. 3.1: Zaplnění půdních pórů vodou v závislosti na vlhkosti půdy (Šantrůčková 2014).

Uvedené skutečnosti na úrovni zahraničí, resp. České republiky naznačují, že sledování (monitorování) parametrů klimatu, resp. mikroklimatu porostů a půdy (teplota, vlhkost) bude v budoucím zemědělském hospodaření (zemědělské výrobě) klíčovými faktory pro udržitelnou produkci zemědělských plodin a kvalitu potravin včetně krmiv.

4. Experimentální část (SmartField – Systém sběru teplotních a vlhkostních dat)

Koncepce systému: senzorový systém je tvořen autonomními multisenzorovými jednotkami pro měření teploty, vlhkosti vzduchu a půdy rozmístěnými v zájmové oblasti (modelový zemědělský podnik AGROSPOL, a.d. Knínice). Naměřená data z multisenzorových měřících jednotek (SFMUv2 /SmartField Measuring Unit, Version 2/) jsou následně bezdrátově přenášena do vlastní brány (gateway) pomocí sítě LoRaWAN (nebo může být přenos dat řešen s využitím sítě LoRa operátora České Radiokomunikace a.s. /ČRA/) a pak jsou data ukládána do vzdálené databáze (LoRaTech server nebo Server ČRA) viz obr. 4.1. Uložená data jsou za pomoci vyvinutého software (SmartField Dashboard) zpracována, analyzována a vizualizována za pomoci platformy Google Workspace s využitím nástrojů Google Sheets a Google Data Studio. Získaná data jsou uživateli interpretována formou časových grafů: (1) jako týdenní průměrné hodnoty, (2) jako denní průměrné hodnoty, (3) okamžité hodnoty s periodou jedné hodiny. Rovněž je dostupná vizualizace polohy, interaktivní filtr umožňující volbu sledovaného období a tabulkový výstup pro snadný export naměřených hodnot ve vybraném období.

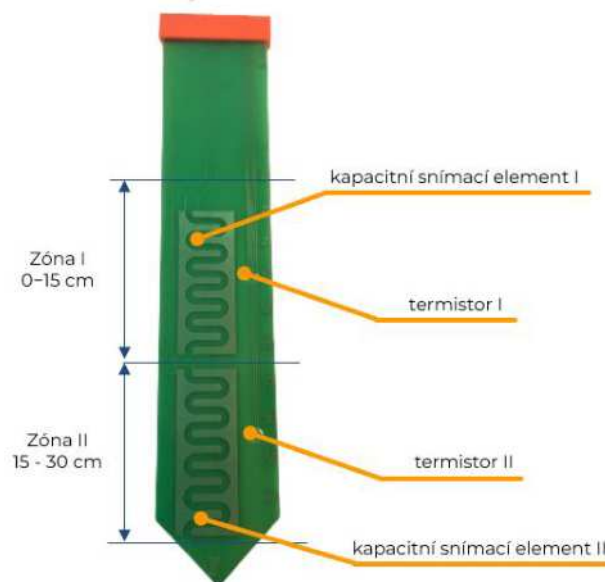
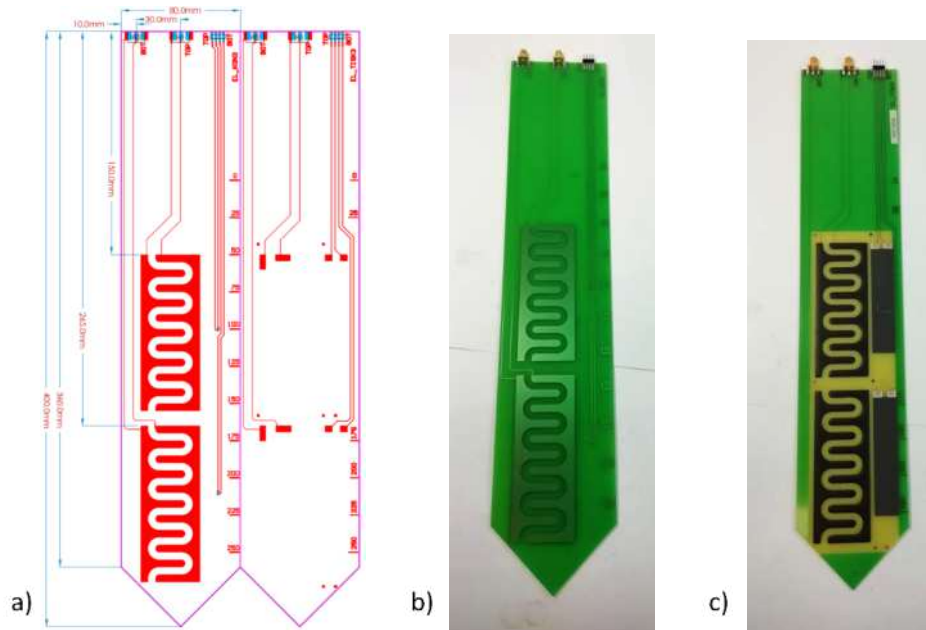


Obr. 4.1: Koncepce senzorového IoT systému SMARTFIELD.

4.1. Senzorové elementy pro měření teploty a vlhkosti půdy

Vývoj senzorových elementů pro měření vlhkosti a teploty půdy probíhal v letech 2018–2020 (Menšík *et al.* 2018, 2019b, 2020b). Pro měření půdní objemové vlhkosti (POV) byl zvolen kapacitní princip (Charlesworth 2000; Johnson 2007). Velkou výhodou tohoto řešení je možnost realizace senzorových elementů v plně planární podobě s plošnými měřicími elektrodami uspořádanými v jedné vrstvě. Toto uspořádání je vhodné k prototypové realizaci konvenční technologií výroby desek plošných spojů (DPS) leptáním motivů v měděné fólii na skloepoxidovém nosném substrátu. Zároveň nabízí velmi dobré předpoklady pro uplatnění při výrobě technologiemi tzv. tištěné elektroniky. Plně aditivními depozičními procesy lze efektivně vytvářet potřebné elektrodové struktury, tzn. paralelní elektrody pro kapacitní měření vlhkosti zeminy a interdigitální elektrody překryté termosenzitivní odporovou vrstvou pro měření teploty, a to dokonce nejen na planárních nosičích, ale i na povrchu 3D objektů. Realizace senzorových elementů je pak možná přímo na mechanicky dostatečně robustních tělesech tvaru tyče či kolíku, kruhového i pravoúhlého průřezu, které jsou svým tvarem vhodné pro

přímou instalaci do půdy. V ideálním případě je žádoucí provedení se samostatnou elektronickou jednotkou, obsahující nezbytné napájecí, vyhodnocovací a komunikační obvody v hermeticky uzavřeném pouzdře odolném vůči vnějším povětrnostním vlivům a s odnímatelnou měřicí tyčovou sondou, obsahující natištěné senzorné elementy pro měření vlhkosti a teploty v zemině. V případě degradace nebo poškození relativně levné sondy ji pak lze vyměnit a zachovat původní elektronický vyhodnocovací modul.



Obr. 4.2: (a) topologie dvouzónové kapacitní sondy umožňující současné měření půdní vlhkosti a teploty ve dvou hloubkách a ukázka jejich reálného provedení (b) v konvenční a (c) plně tištěné variantě (uhlíkový materiál kapacitního senzoru vlhkosti nanášený mikrodyspenzínem, termistor tištěný sítotiskem).

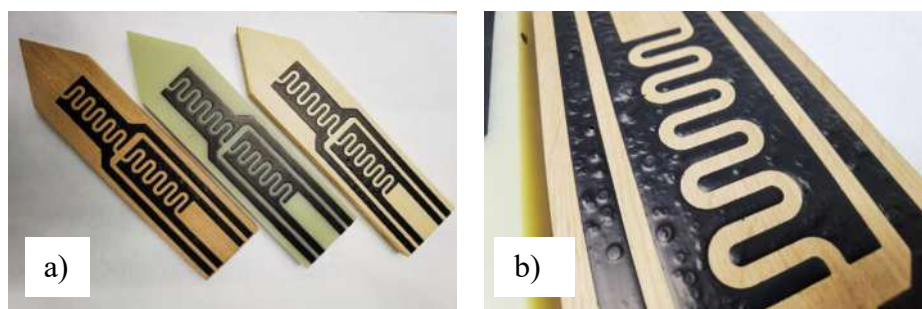
Ve výhodném provedení může být celá sonda realizovaná v podobě nosného tělesa tvořeného z přírodního materiálu, který je bezpečný pro dlouhodobou instalaci v zemědělské půdě a zároveň obnovitelný, udržitelný a recyklovatelný (např. dřevo).

Na základě experimentálního ověření v letech 2018–2019 byl zvolen pro měření půdní objemové vlhkosti /POV/ kapacitní senzorový element s meandrovitou izolační mezerou mezi měřicími elektrodami tvořícími interdigitální uspořádání (Menšík *et al.* 2019b), na jehož základě pak byly realizovány (vytvořeny) senzorové elementy /půdní sondy/ pro měření půdní vlhkosti (konvenční i tištěné senzorové elementy) viz *obr. 4.2a*. Teplotní senzor u konvenčního senzorového elementu (*obr. 4.2b*) byl realizován pomocí SMD termistoru typu NTC v pouzdru typu 0603, velikosti $R25 = 10 \text{ k}\Omega$ a průběhem teplotní charakteristiky typu 8502, teplotní senzor (termistor) u tištěného senzorového elementu (*obr. 4.2c*) byl realizován formou tiskových past /sítotisk, dispenzing atd./ (Syrový *et al.* 2019a,b).

Půdní sondy (senzorové elementy) byly vyrobeny jak konvenčním způsobem (konvenční senzorový element /sonda/) používaným pro přípravu vodivých drah na deskách plošných spojů (Vik *et al.* 2019a), tak i pomocí aditivních depozičních technik s využitím materiálů v podobě tiskových past (tištěný senzorový element /sonda/) formou sítotisku, dispenzingu apod. (Syrový *et al.* 2019a,b).

Dále byly navrženy a jsou v současné době ověřovány vývojové varianty tištěných půdních sond pro měření půdní objemové vlhkosti /POV/ v environmentálně šetrném provedení, tzn. s využitím dřevěného nosného tělesa, tištěných senzorových elementů a bez potřeby jakékoliv další montáže elektronických komponent (viz *obr. 4.3*). Topologie sond byla navržena pro připojení měřicí jednotky pomocí pružných kontaktních elementů dosedajících na tištěné plošky na povrchu sondy. Jako výchozí materiál nosného tělesa bylo zvoleno dřevo ve dvou variantách: 1) smrkové dřevo – levné a široce dostupné, ale s horší rozměrovou stabilitou ve vlhkém prostředí, 2) dubové dřevo – vyšší cena, lepší rozměrová stabilita. Kompletní systém environmentálně šetrných půdních sond realizovaných aditivními tiskovými technikami je spolu s konceptem odnímatelné měřicí jednotky s bezdrátovým přenosem dat chráněn užitným vzorem č. UV034562 *Systém pro měření teploty a vlhkosti vzduchu a půdy s bezdrátovým přenosem dat* (Syrový *et al.* 2020a) a současně patentem č. CZ309063B6 *Systém pro měření teploty a vlhkosti vzduchu a půdy s bezdrátovým přenosem dat a způsob jeho výroby* (Syrový *et al.* 2021).

Vytvořené půdní sondy (senzorové elementy) byly následně kompletně testovány v laboratorních podmínkách v období 2019–2020 (Menšík *et al.* 2019a, 2020b, Syrový *et al.* 2020b) před nasazením do poloprovozních podmínek v roce 2021 a 2022 viz *kap. 4.6* (testování v podmínkách *in situ*).

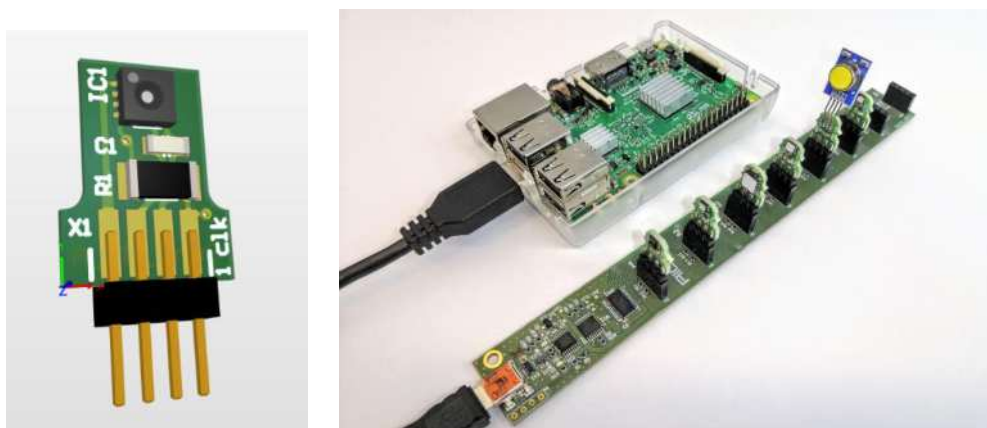


Obr. 4.3: (a) vysušené senzory na různých tiskových substrátech (smrkové dřevo, sklolaminát, dubové dřevo), (b) bubliny vzniklé v uhlíkové vrstvě vlivem odparu zbytkové vlhkosti dřeva.

4.2. Senzorové elementy pro měření teploty a vlhkosti vzduchu

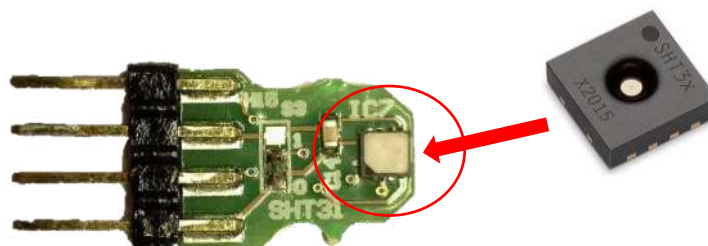
Výsledné řešení komplexní multisenzorové platformy předpokládá také měření vybraných parametrů mikroklimatu (teplota a vlhkost vzduchu) v různých úrovních v rámci rostlinného porostu v místě instalace automatického senzorového systému. Pro plně automatizovaná měření se v současné době v celé řadě aplikací včetně meteorologie a klimatologie s výhodou využívá senzorových elementů, které jsou široce dostupné v řadě provedení včetně komplexních senzorů s plnohodnotným zpracováním měřicího signálu a digitálním datovým výstupem. Často již bývají tyto senzory vybaveny i vlastním měřením teploty. Mezi základní kritéria jejich výběru patří kromě přesnosti a rozsahu měření zejména dlouhodobá stabilita, požadavky na napájení apod. Byla proto provedena rešerše (rozsáhlé testování v laboratorních i provozních podmínkách *in situ*) viz podrobně Menšík *et al.* 2019b, *kap. 2.3.2*) komerčně dostupných kombinovaných senzorů pro měření relativní vlhkosti a teploty vzduchu

vhodných pro implementaci do uživatelských elektronických zařízení. Jednalo se jak o digitální senzory určené pro montáž na desku plošného spoje, tak i o hotová řešení celých měřicích sond včetně nezbytné elektroniky a zapouzdření s výstupem ve formě konektoru viz obr. 4.4 a 4.5.



Obr. 4.4: Elektronický modul s kombinovaným teplotně-vlhkostním digitálním senzorem (vlevo) a funkční vzorek 22190-FV026-2019 “Senzor pro měření teploty a vlhkosti mikroklimatu vybavený vyhodnocovacími prvky a USB rozhraním” skládající se z elektronické řídicí jednotky a multiplexovací jednotky pro připojení kombinovaných teplotně-vlhkostních digitálních senzorů s rozhraním I2C.

Na základě podrobného vyhodnocení výsledků ze všech experimentů (laboratorní /klimatické komory/, provozní /profesionální meteorologické stanice ČHMÚ Plzeň–Mikulka) s kombinovanými vlhkostně-teplotními senzory se pro další aplikaci (vývoj) v oblasti měření mikroklimatu pomocí autonomních bezdrátových sensorových jednotek byl vybrán digitálních senzor Sensirion typu SHT31 (Vik *et al.* 2019b).



Obr. 4.5: Modul senzoru mikroklimatu s teplotně-vlhkostním senzorem Sensirion SHT-31.

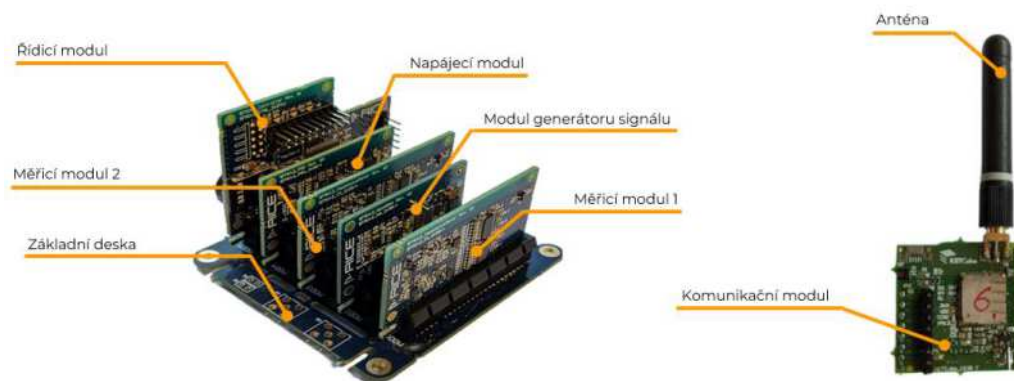
4.3. Modulární elektronická měřicí jednotka SFMU (SmartField Measuring Unit)

Vývoj elektronické měřicí jednotky SFMU (SmartField Measuring Unit) probíhal v letech 2018–2021. V první fázi vznikla elektronická měřicí jednotka SFMUv1 bez bezdrátového přenosu dat (Vik *et al.* 2019a). V průběhu testování a praktických měření se však ukázalo, že některá použitá technická řešení nejsou optimální a je třeba návrh desky revidovat, případně porovnat několik variant možné realizace, resp. použitých elektronických součástek. Pro usnadnění dalšího vývoje měřicí jednotky byla vytvořena modulární koncepce, umožňující evaluaci různých implementací dílčích podsystémů (modulů) bez nutnosti opakované výroby celé jednotky (Vaněk 2021), s označením SFMUv2. Konstrukce modulární měřicí jednotky SFMUv2 je chráněna užitným vzorem č. 34 749 „Měřicí jednotka“ (Pretl *et al.* 2021).

Celá sestava (SFMUv2) se skládá z vlastní měřicí jednotky, ke které se připojují externí sensorové elementy. Měřicí jednotka je tvořena jednotlivými funkčními moduly ve volitelné konfiguraci, které jsou propojeny systémem sběrnic. Sestavu modulů tvoří: řídicí modul, modul signálového generátoru, komunikační modul, napájecí modul a jeden nebo více měřicích modulů (dle požadovaného počtu měřicích kanálů). Měřicí jednotka umožňuje osazení funkčních modulů rozdílných parametrů. Je tak

možné použít například měřicí moduly s rozdílným měřicím rozsahem nebo i s rozdílným principem měření.

Ústředním prvkem měřicí jednotky je řídicí modul, který zajišťuje řízení všech ostatních funkčních modulů, základní zpracování dat a měření odezvy teplotních sensorových elementů půdních sond viz *obr. 4.6*. Tento centrální bod měřicí jednotky zajišťuje překlad mezi jednotlivými komunikačními rozhraními a řídí přenos informací mezi jednotlivými moduly prostřednictvím hlavní datové sběrnice. Řídicí modul obsahuje řídicí mikrokontrolér (MCU) a elektronickou paměť pro lokální ukládání naměřených dat. Řídicí modul pomocí datové sběrnice detekuje všechny další připojené funkční moduly a jejich konkrétní variantu na základě unikátního identifikátoru a následně volí algoritmus jejich řízení a zpracování dat. Variantně řídicí modul umožňuje i kabelové propojení s externím zařízením, umožňujícím jak napájení měřicí jednotky, tak i přenos naměřených dat a řídicích signálů. Externím zařízením může být například PC nebo v terénu notebook, příp. tablet nebo mobilní telefon.



Obr. 4.6: Elektronická sensorová jednotka SFMUv2 (SFMU: SmartField Measuring Unit).

Modul signálového generátoru vytváří signál nezbytný pro zvolenou metodu měření, stejně tak jako od něj odvozené i nezávislé synchronizační signály nutné pro propojení řídicího modulu s měřicím modulem.

Měřicí modul na základě aktivačního požadavku z řídicího modulu přivede měřicí signál na sensorový element pro měření půdní vlhkosti. Získanou odezvu půdní sondy předává v digitální formě datovou sběrnici do řídicího modulu.

Komunikační modul zajišťuje přenos naměřených dat prostřednictvím bezdrátové komunikační sítě na vzdálený server za účelem centrální správy a analýzy dat.

Napájecí modul pak zajišťuje energetické požadavky analogových i digitálních obvodů jednotlivých modulů.

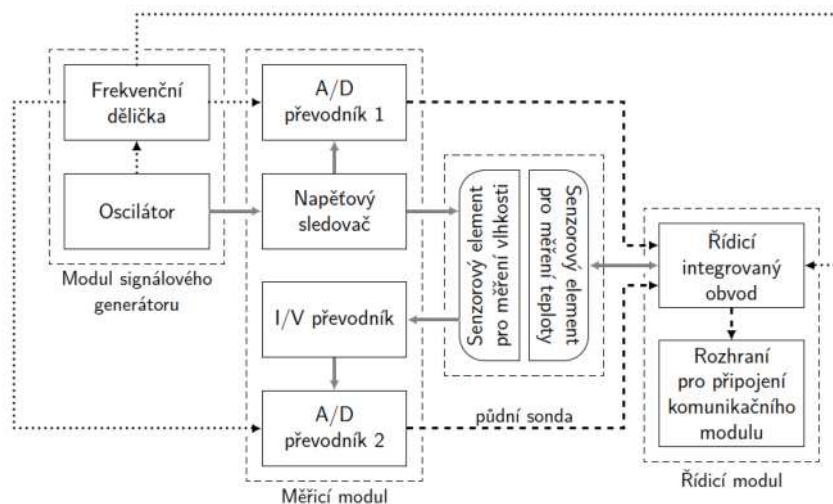
Senzor mikroklimatu zajišťuje měření teploty a vlhkosti ovzduší v bezprostředním okolí měřicí jednotky. Jedná se o digitální kombinovaný teplotně-vlhkostní senzor osazený na nosné desce s vlastním konektorem, který přímo komunikuje s řídicím modulem prostřednictvím datové sběrnice.

Modulární koncepce jednotky byla implementována v sestavě:

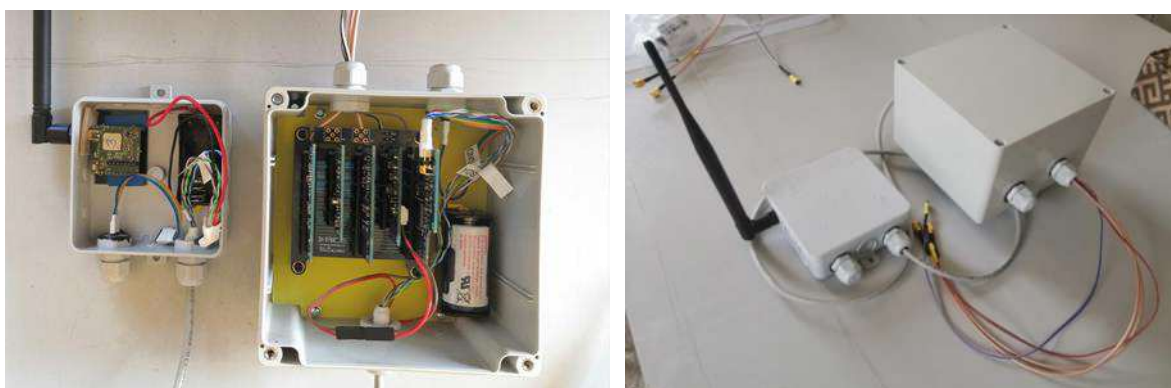
- pasivní základní deska se systémem sběrnic,
- řídicí modul s mikrokontrolérem Arm® Cortex®-M33,
- napájecí modul s dvěma výstupy (3,3 V, 5 V),
- dva měřicí moduly založené na ADC1175,
- modul signálového generátoru s CS2200-CP,
- komunikační modul (KETCube/B-L072Z-LRWAN1).

Jednotlivé moduly jsou, s výjimkou komunikačního, navrženy jako karty pro PCIe konektory osazené na základní desce. Přední hrana modulů je opatřena drážkou pro instalaci retenčního prvku umožňující zpevnění sestavy připevněním modulů k základní desce.

Principiální schéma zahrnující příslušnost jednotlivých modulů je znázorněno na *obr. 4.7* a kompletní jednotka do provozních podmínek viz *obr. 4.8*.



Obr. 4.7: Blokové schéma modulárního systému.



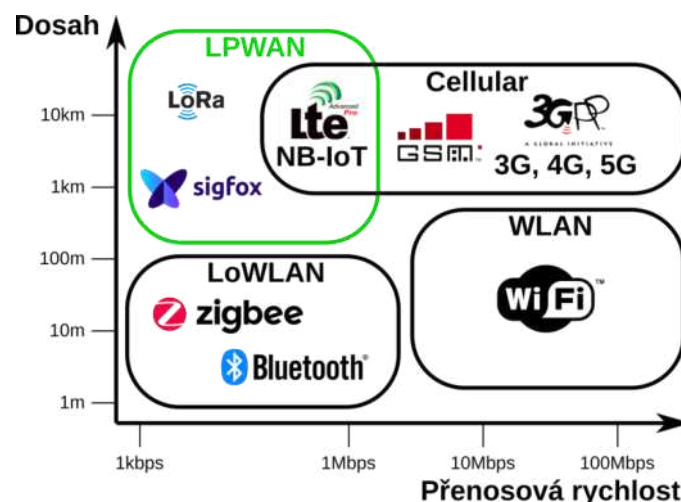
Obr. 4.8: Modulární multisenzorová měřicí jednotka (SFMUv2) s externím komunikačním modulem v instalačním boxu pro testování v reálných podmínkách (in situ).

4.4. Sběr dat, Internet věcí (IoT), síť LoRaWAN

Pro sběr měřených dat v Internetu věcí (IoT) lze s výhodou použít existující konvenční komunikační sítě jako jsou Ethernet, Wi-Fi či GSM. Při sběru dat z čidel rozmístěných na malé ploše desítek nebo stovek metrů čtverečních se používají bezdrátové sítě typu WLAN (Wireless Local Area Network) nebo LoWLAN (Low Power WLAN), jako je například Zigbee nebo Bluetooth. Pro sběr dat z čidel rozmístěných v rozsáhlém území (stovky metrů čtverečních a více) se ale více hodí jiné typy bezdrátových sítí, označovaných jako LPWAN (Low-Power Wide-Area Network). Ty umožňují sběr dat na rozsáhlém území s velmi nízkou spotřebou energie, takže zařízení mohou být v provozu i několik let bez výměny baterie (Mekki *et al.* 2019). Přehled nejznámějších IoT sítí a jejich kategorizace dle způsobu použití je na obrázku 4.9.

Nejprogresivnějšími sítěmi typu LPWAN s celoplošným pokrytím území České republiky jsou síť LoRaWAN, Sigfox a NB-IoT. Všechny tři jsou optimalizovány pro připojení bateriových zařízení, síť LoRaWAN a NB-IoT díky širší paletě nastavení dovolují i častější přenos většího množství dat na úkor životnosti baterie.

Při výběru vhodné LPWAN sítě pro určitou aplikaci je třeba vzít v úvahu nejdůležitější aspekty LPWAN sítí (Mekki *et al.* 2019), zejména pak: a) množství dat, které je potřeba zaslat směrem do zařízení a ze zařízení, b) omezení počtu zpráv (za den), c) zabezpečení přenosu, d) ceny koncových zařízení, e) cenu za budování infrastruktury nebo za využití existující infrastruktury, f) dosah signálu od pozemní stanice.



Pozn.: LoWLAN sítě, jako Zigbee nebo Bluetooth LE, se hodí pro bateriové senzory a sběr dat na malé ploše, WLAN sítě (WiFi) se hodí pro připojení zařízení, která potřebují přenášet velké množství dat a zároveň mají možnost připojení k trvalému zdroji napájení. Celulární sítě (jako GSM nebo LTE - 3G, 4G) se zpravidla používají tam, kde je potřeba přenášet větší množství dat na rozsáhlejších územích. Zařízení připojená k celulární síti mají zpravidla značnou spotřebu energie (nabíjecí baterie nebo trvalé napájení ze sítě). LPWAN sítě, jako SigFox nebo LoRaWAN, se pak používají pro sběr malého množství dat z velkých území se zachováním velmi nízké spotřeby energie (trvalý bateriový provoz). Hodí se tak k připojení bateriově napájených jednotek. V České republice dnes existuje také celoplošná LPWAN celulární síť NB-IoT.

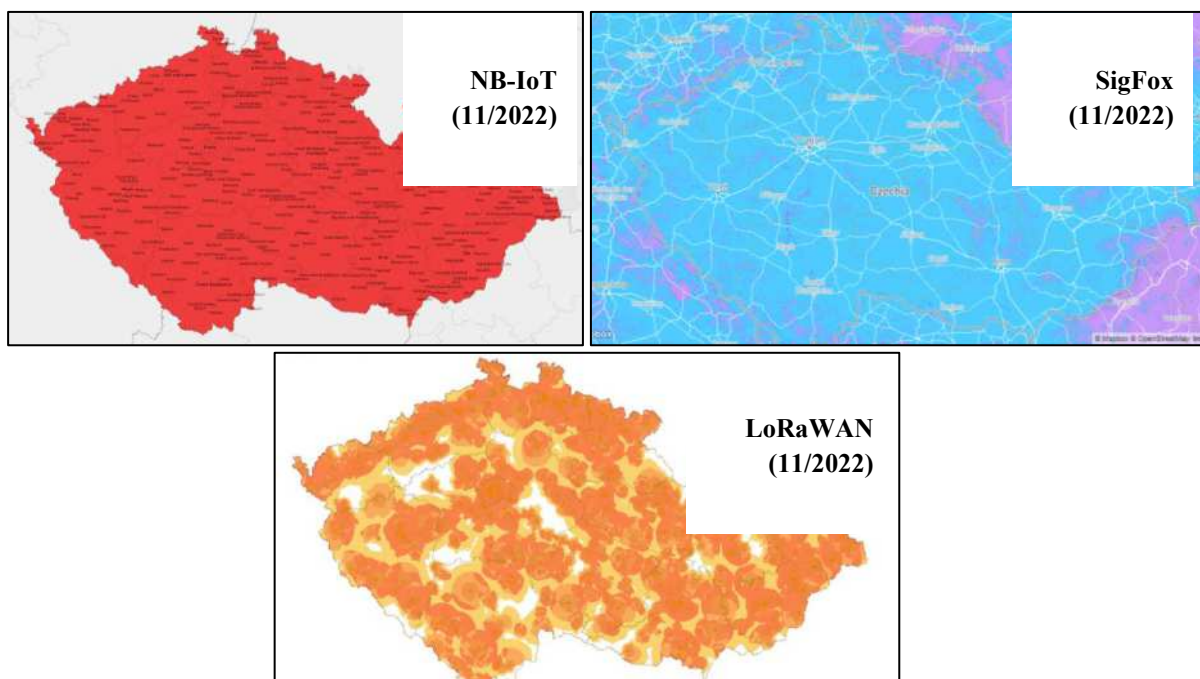
Obr. 4.9: Přehled nejznámějších sítí využívaných v oblasti IoT pro sběr dat.

LoRaWAN je otevřený standard zaštitěný sdružením LoRa-Alliance. V České republice poskytuje celoplošné pokrytí společnost České Radiokomunikace (CRA 2022), zároveň funguje také několik lokálních poskytovatelů (LoRaTech 2022; Starnet 2022) a komunitní síť The Things Network (The Things Network 2022). Zařízení mohou fungovat v několika třídách, jejichž volba ovlivňuje způsob a četnost komunikace a tím samozřejmě i spotřebu energie. Počet zpráv může přesahovat 1000 zpráv za den. Velikost zprávy je omezena na 243 bajtů a přenos je zabezpečen šifrováním. Dosah signálu od pozemní stanice (gateway) pro připojení zařízení jsou jednotky až desítky kilometrů v závislosti na charakteru oblasti. Otevřenost standardu umožňuje ale také budování vlastní infrastruktury. Ceny základnových stanic se pohybují v řádech několika desítek tisíc korun v závislosti na provedení (LoRaTech 2022; Kerlink 2022), serverovou část pak lze sestavit z open-source komponent dostupných zdarma (ChirpStack 2022). Ceny koncových zařízení začínají pod hranicí 1000 Kč. Platby za připojené zařízení se liší dle operátora - někteří operátoři účtují počet přijatých/odeslaných zpráv, jiní pouze počet připojených zařízení. Cena za připojení jednoho zařízení se zpravidla pohybuje v řádu stokorun za rok. V případě vlastní infrastruktury nebo v případě využití komunitní sítě se platba za připojené zařízení neuplatňuje.

Síť **Sigfox** je v České Republice provozována lokálním operátorem, společností SimpleCell. Velikost zprávy v síti Sigfox je ve směru ze zařízení omezena na 12 bajtů při maximálním počtu 140 zpráv/den (přenos až 6 hodnot teploty nebo půdní vlhkosti v jedné zprávě), ve směru do zařízení pak 8 bajtů a 4 zprávy/den. Přenos dat v ČR není zabezpečený. Oproti síti LoRaWAN je dosah od pozemní stanice mírně větší a ceny koncových zařízení jsou nižší. Platby za zařízení připojená do sítě jsou formou předplatného - za zařízení a rok.

Standard **NB-IoT** je spravován asociací 3GPP a funguje v licencovaných frekvenčních pásmech pro mobilní telefony GSM a LTE. V České republice poskytuje službu NB-IoT společnost Vodafone. Počet zpráv z/do zařízení je omezen pouze přenosovou rychlostí - může se pohybovat v tisících zpráv za den. Velikost zprávy je omezena na 1600 bajtů. Přenos je zabezpečen stejným způsobem jako ostatní LTE komunikace. Dosah od pozemní stanice jsou řádově jednotky kilometrů v závislosti na charakteru oblasti. Ceny koncových zařízení jsou z uvedených technologií nejvyšší - přesahují většinou 1000 Kč. Platby za zařízení připojená do sítě jsou formou platby za SIM kartu.

Na obr. 4.10 jsou znázorněny mapy pokrytí České Republiky uvedenými IoT sítěmi k listopadu 2022 (Vodafone 2022, Sigfox 2022, IoT Portal CRA 2022).



Obr. 4.10: Pokrytí ČR sítěmi nejdůležitějšími sítěmi IoT k listopadu 2022.

	LoRa Class A	sigfox	lte NB-IoT	
Dosah	●●●●●	●●●●●	●●	●●●
Velikost zprávy	●	▲	●●●●●	▲
Zabezpečení	●●●●		●●●●●	
Cena zařízení	●●	●	●●●●●	●●
Výdrž na baterie	●●●●●	●●●●●	●●	●●●
Četnost vysílání	●●●●	●	●●●●●	●

Obr. 4.11: Pokrytí ČR sítěmi nejdůležitějšími sítěmi IoT k listopadu 2022 a relativní srovnání hlavních vlastností uvažovaných LPWAN sítí a požadavky IoT sensorového systému SmartField.

Na obrázku 4.11 je znázorněno porovnání vlastností LPWAN sítí a požadavky na sběr dat v IoT sensorovém systému SmartField. Vzhledem k současným požadavkům a možnosti realizace vlastní infrastruktury byla pro potřeby systému SmartField vybrána síť LoRaWAN.

4.5. Softwarové řešení pro monitoring, zpracování a vizualizaci dat

Software pro zpracování a vizualizaci dat se skládá ze tří částí řešených zcela na platformě Google Workspace za využitím nástrojů Google Sheets a Google Data Studio.

Funkční základ je tvořen tabulkou SFMU_Database obsahující unikátní identifikátory sledovaných měřících jednotek, jejich geografickou polohu, informaci o poskytovateli IoT spojení, počáteční datum měření (starší hodnoty jsou ignorovány) a datum posledního měření (ukládáno pro inkrementální aktualizace).

Prostřednictvím periodicky spouštěného skriptu obsaženého v této tabulce jsou dotazována aplikační rozhraní serverů poskytovatelů IoT komunikace (LoraTech a České Radiokomunikace). Jednotlivé zprávy obsahující naměřená data jsou ze serverů stahována až do okamžiku, kdy čas příjetí zprávy na server odpovídá uloženému času posledního měření, kdy je dotazování na server ukončeno (*obr. 4.12*).

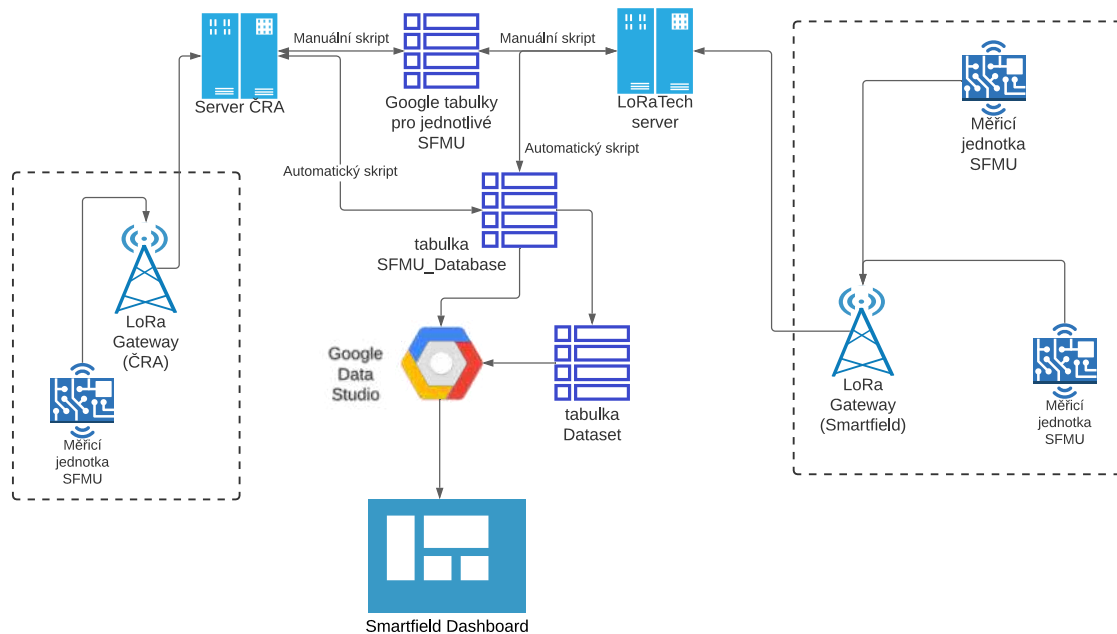
Surová data obsažená ve zprávách jsou skriptem dále zpracována pro snadnou lidskou interpretaci, případně přepočtena v případě hodnot, která nejsou přímou reprezentací sledovaných veličin. Surová i přepočtená data jsou ukládána do pomocné tabulky Dataset.

Tabulka Dataset je dále napojena jako datový zdroj zobrazovacího rozhraní v nástroji Google Data Studio, kde je na základě unikátních identifikátorů zpětně přiřazena informace o poloze, jméno měřící jednotky a další uživatelské informace.

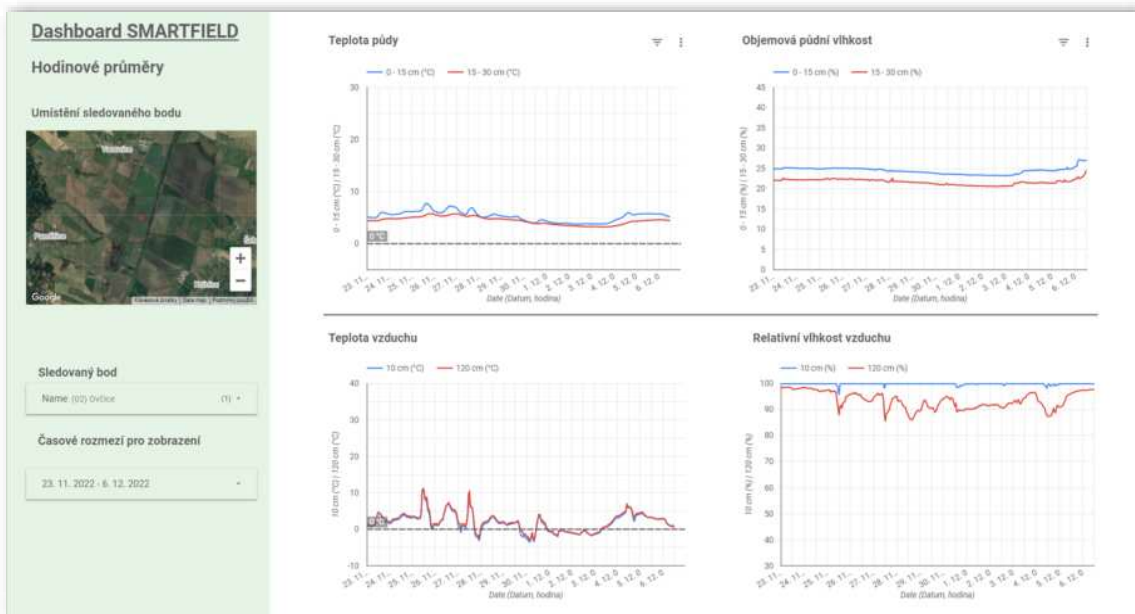
Získaná data jsou následně interpretována graficky v časových grafech (*viz obr. 4.13*):

- jako okamžité hodnoty s periodou jedné hodiny,
- jako hodinové průměry,
- jako denní průměrné hodnoty,
- jako týdenní průměrné hodnoty.

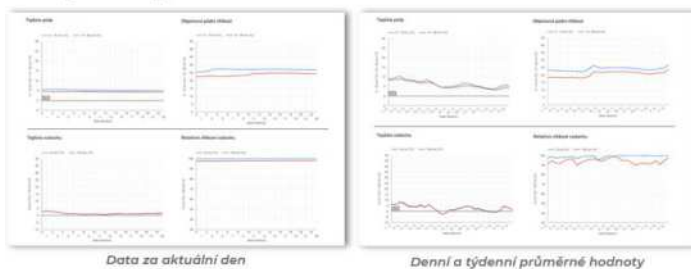
Rovněž je dostupná vizualizace polohy, interaktivní filtr umožňující volbu sledovaného období a tabulkový výstup pro snadný export naměřených hodnot ve vybraném období (hodinové průměry, vstupní data apod.). Další možností je i Reporting dat – automatické generování mapových přehledů měřených míst *viz obr. 4.13*.



Obr. 4.12: Diagram toku dat a struktury softwaru pro zpracování a vizualizaci dat z měřících jednotek SFMUv2.



Reporting dat



čas	0-15 cm (°C)	15-30 cm (°C)	0-15 cm (N)	15-30 cm (N)	10 cm (°C)	120 cm (°C)	10 cm (N)	120 cm (N)
23. 11. 2022 00:00	5.2	4.8	22.5	21.8	10.5	10.2	95.0	92.0
23. 11. 2022 01:00	5.1	4.7	22.4	21.7	10.4	10.1	94.5	91.5
23. 11. 2022 02:00	5.0	4.6	22.3	21.6	10.3	10.0	94.0	91.0
23. 11. 2022 03:00	4.9	4.5	22.2	21.5	10.2	9.9	93.5	90.5
23. 11. 2022 04:00	4.8	4.4	22.1	21.4	10.1	9.8	93.0	90.0
23. 11. 2022 05:00	4.7	4.3	22.0	21.3	10.0	9.7	92.5	89.5
23. 11. 2022 06:00	4.6	4.2	21.9	21.2	9.9	9.6	92.0	89.0
23. 11. 2022 07:00	4.5	4.1	21.8	21.1	9.8	9.5	91.5	88.5
23. 11. 2022 08:00	4.4	4.0	21.7	21.0	9.7	9.4	91.0	88.0
23. 11. 2022 09:00	4.3	3.9	21.6	20.9	9.6	9.3	90.5	87.5
23. 11. 2022 10:00	4.2	3.8	21.5	20.8	9.5	9.2	90.0	87.0
23. 11. 2022 11:00	4.1	3.7	21.4	20.7	9.4	9.1	89.5	86.5
23. 11. 2022 12:00	4.0	3.6	21.3	20.6	9.3	9.0	89.0	86.0
23. 11. 2022 13:00	3.9	3.5	21.2	20.5	9.2	8.9	88.5	85.5
23. 11. 2022 14:00	3.8	3.4	21.1	20.4	9.1	8.8	88.0	85.0
23. 11. 2022 15:00	3.7	3.3	21.0	20.3	9.0	8.7	87.5	84.5
23. 11. 2022 16:00	3.6	3.2	20.9	20.2	8.9	8.6	87.0	84.0
23. 11. 2022 17:00	3.5	3.1	20.8	20.1	8.8	8.5	86.5	83.5
23. 11. 2022 18:00	3.4	3.0	20.7	20.0	8.7	8.4	86.0	83.0
23. 11. 2022 19:00	3.3	2.9	20.6	19.9	8.6	8.3	85.5	82.5
23. 11. 2022 20:00	3.2	2.8	20.5	19.8	8.5	8.2	85.0	82.0
23. 11. 2022 21:00	3.1	2.7	20.4	19.7	8.4	8.1	84.5	81.5
23. 11. 2022 22:00	3.0	2.6	20.3	19.6	8.3	8.0	84.0	81.0
24. 11. 2022 00:00	2.9	2.5	20.2	19.5	8.2	7.9	83.5	80.5
24. 11. 2022 01:00	2.8	2.4	20.1	19.4	8.1	7.8	83.0	80.0
24. 11. 2022 02:00	2.7	2.3	20.0	19.3	8.0	7.7	82.5	79.5
24. 11. 2022 03:00	2.6	2.2	19.9	19.2	7.9	7.6	82.0	79.0
24. 11. 2022 04:00	2.5	2.1	19.8	19.1	7.8	7.5	81.5	78.5
24. 11. 2022 05:00	2.4	2.0	19.7	19.0	7.7	7.4	81.0	78.0
24. 11. 2022 06:00	2.3	1.9	19.6	18.9	7.6	7.3	80.5	77.5
24. 11. 2022 07:00	2.2	1.8	19.5	18.8	7.5	7.2	80.0	77.0
24. 11. 2022 08:00	2.1	1.7	19.4	18.7	7.4	7.1	79.5	76.5
24. 11. 2022 09:00	2.0	1.6	19.3	18.6	7.3	7.0	79.0	76.0
24. 11. 2022 10:00	1.9	1.5	19.2	18.5	7.2	6.9	78.5	75.5
24. 11. 2022 11:00	1.8	1.4	19.1	18.4	7.1	6.8	78.0	75.0
24. 11. 2022 12:00	1.7	1.3	19.0	18.3	7.0	6.7	77.5	74.5
24. 11. 2022 13:00	1.6	1.2	18.9	18.2	6.9	6.6	77.0	74.0
24. 11. 2022 14:00	1.5	1.1	18.8	18.1	6.8	6.5	76.5	73.5
24. 11. 2022 15:00	1.4	1.0	18.7	18.0	6.7	6.4	76.0	73.0
24. 11. 2022 16:00	1.3	0.9	18.6	17.9	6.6	6.3	75.5	72.5
24. 11. 2022 17:00	1.2	0.8	18.5	17.8	6.5	6.2	75.0	72.0
24. 11. 2022 18:00	1.1	0.7	18.4	17.7	6.4	6.1	74.5	71.5
24. 11. 2022 19:00	1.0	0.6	18.3	17.6	6.3	6.0	74.0	71.0
24. 11. 2022 20:00	0.9	0.5	18.2	17.5	6.2	5.9	73.5	70.5
24. 11. 2022 21:00	0.8	0.4	18.1	17.4	6.1	5.8	73.0	70.0
24. 11. 2022 22:00	0.7	0.3	18.0	17.3	6.0	5.7	72.5	69.5
25. 11. 2022 00:00	0.6	0.2	17.9	17.2	5.9	5.6	72.0	69.0
25. 11. 2022 01:00	0.5	0.1	17.8	17.1	5.8	5.5	71.5	68.5
25. 11. 2022 02:00	0.4	0.0	17.7	17.0	5.7	5.4	71.0	68.0
25. 11. 2022 03:00	0.3	-0.1	17.6	16.9	5.6	5.3	70.5	67.5
25. 11. 2022 04:00	0.2	-0.2	17.5	16.8	5.5	5.2	70.0	67.0
25. 11. 2022 05:00	0.1	-0.3	17.4	16.7	5.4	5.1	69.5	66.5
25. 11. 2022 06:00	0.0	-0.4	17.3	16.6	5.3	5.0	69.0	66.0
25. 11. 2022 07:00	-0.1	-0.5	17.2	16.5	5.2	4.9	68.5	65.5
25. 11. 2022 08:00	-0.2	-0.6	17.1	16.4	5.1	4.8	68.0	65.0
25. 11. 2022 09:00	-0.3	-0.7	17.0	16.3	5.0	4.7	67.5	64.5
25. 11. 2022 10:00	-0.4	-0.8	16.9	16.2	4.9	4.6	67.0	64.0
25. 11. 2022 11:00	-0.5	-0.9	16.8	16.1	4.8	4.5	66.5	63.5
25. 11. 2022 12:00	-0.6	-1.0	16.7	16.0	4.7	4.4	66.0	63.0
25. 11. 2022 13:00	-0.7	-1.1	16.6	15.9	4.6	4.3	65.5	62.5
25. 11. 2022 14:00	-0.8	-1.2	16.5	15.8	4.5	4.2	65.0	62.0
25. 11. 2022 15:00	-0.9	-1.3	16.4	15.7	4.4	4.1	64.5	61.5
25. 11. 2022 16:00	-1.0	-1.4	16.3	15.6	4.3	4.0	64.0	61.0
25. 11. 2022 17:00	-1.1	-1.5	16.2	15.5	4.2	3.9	63.5	60.5
25. 11. 2022 18:00	-1.2	-1.6	16.1	15.4	4.1	3.8	63.0	60.0
25. 11. 2022 19:00	-1.3	-1.7	16.0	15.3	4.0	3.7	62.5	59.5
25. 11. 2022 20:00	-1.4	-1.8	15.9	15.2	3.9	3.6	62.0	59.0
25. 11. 2022 21:00	-1.5	-1.9	15.8	15.1	3.8	3.5	61.5	58.5
25. 11. 2022 22:00	-1.6	-2.0	15.7	15.0	3.7	3.4	61.0	58.0
26. 11. 2022 00:00	-1.7	-2.1	15.6	14.9	3.6	3.3	60.5	57.5
26. 11. 2022 01:00	-1.8	-2.2	15.5	14.8	3.5	3.2	60.0	57.0
26. 11. 2022 02:00	-1.9	-2.3	15.4	14.7	3.4	3.1	59.5	56.5
26. 11. 2022 03:00	-2.0	-2.4	15.3	14.6	3.3	3.0	59.0	56.0
26. 11. 2022 04:00	-2.1	-2.5	15.2	14.5	3.2	2.9	58.5	55.5
26. 11. 2022 05:00	-2.2	-2.6	15.1	14.4	3.1	2.8	58.0	55.0
26. 11. 2022 06:00	-2.3	-2.7	15.0	14.3	3.0	2.7	57.5	54.5
26. 11. 2022 07:00	-2.4	-2.8	14.9	14.2	2.9	2.6	57.0	54.0
26. 11. 2022 08:00	-2.5	-2.9	14.8	14.1	2.8	2.5	56.5	53.5
26. 11. 2022 09:00	-2.6	-3.0	14.7	14.0	2.7	2.4	56.0	53.0
26. 11. 2022 10:00	-2.7	-3.1	14.6	13.9	2.6	2.3	55.5	52.5
26. 11. 2022 11:00	-2.8	-3.2	14.5	13.8	2.5	2.2	55.0	52.0
26. 11. 2022 12:00	-2.9	-3.3	14.4	13.7	2.4	2.1	54.5	51.5
26. 11. 2022 13:00	-3.0	-3.4	14.3	13.6	2.3	2.0	54.0	51.0
26. 11. 2022 14:00	-3.1	-3.5	14.2	13.5	2.2	1.9	53.5	50.5
26. 11. 2022 15:00	-3.2	-3.6	14.1	13.4	2.1	1.8	53.0	50.0
26. 11. 2022 16:00	-3.3	-3.7	14.0	13.3	2.0	1.7	52.5	49.5
26. 11. 2022 17:00	-3.4	-3.8	13.9	13.2	1.9	1.6	52.0	49.0
26. 11. 2022 18:00	-3.5	-3.9	13.8	13.1	1.8	1.5	51.5	48.5
26. 11. 2022 19:00	-3.6	-4.0	13.7	13.0	1.7	1.4	51.0	48.0
26. 11. 2022 20:00	-3.7	-4.1	13.6	12.9	1.6	1.3	50.5	47.5
26. 11. 2022 21:00	-3.8	-4.2	13.5	12.8	1.5	1.2	50.0	47.0
26. 11. 2022 22:00	-3.9	-4.3	13.4	12.7	1.4	1.1	49.5	46.5
27. 11. 2022 00:00	-4.0	-4.4	13.3	12.6	1.3	1.0	49.0	46.0
27. 11. 2022 01:00	-4.1	-4.5	13.2	12.5	1.2	0.9	48.5	45.5
27. 11. 2022 02:00	-4.2	-4.6	13.1	12.4	1.1	0.8	48.0	45.0
27. 11. 2022 03:00	-4.3	-4.7	13.0	12.3	1.0	0.7	47.5	44.5
27. 11. 2022 04:00	-4.4	-4.8	12.9	12.2	0.9	0.6	47.0	44.0
27. 11. 2022 05:00	-4.5	-4.9	12.8	12.1	0.8	0.5	46.5	43.5
27. 11. 2022 06:00	-4.6	-5.0	12.7	12.0	0.7	0.4	46.0	43.0
27. 11. 2022 07:00	-4.7	-5.1	12.6	11.9	0.6	0.3	45.5	42.5
27. 11. 2022 08:00	-4.8	-5.2	12.5	11.8	0.5	0.2	45.0	42.0
27. 11. 2022 09:00	-4.9	-5.3	12.4	11.7	0.4	0.1	44.5	41.5
27. 11. 2022 10:00	-5.0	-5.4	12.3	11.6	0.3	0.0	44.0	41.0
27. 11. 2022 11:00	-5.1	-5.5	12.2	11.5	0.2	-0.1	43.5	40.5
27. 11. 2022 12:00	-5.2	-5.6	12.1	11.4	0.1	-0.2	43.0	40.0
27. 11. 2022 13:00	-5.3	-5.7	12.0	11.3	0.0	-0.3	42.5	39.5
27. 11. 2022 14:00	-5.4	-5.8	11.9	11.2	-0.1	-0.4	42.0	39.0
27. 11. 2022 15:00	-5.5	-5.9	11.8	11.1	-0.2	-0.5	41.5	38.5
27. 11. 2022 16:00	-5.6	-6.0	11.7	11.0	-0.3	-0.6	41.0	38.0
27. 11. 2022 17:00	-5.7	-6.1	11.6	10.9	-0.4	-0.7	40.5	37.5
27. 11. 2022 18:00	-5.8	-6.2	11.5	10.8	-0.5	-0.8	40.0	37.0
27. 11. 2022 19:00	-5.9	-6.3	11.4	10.7	-0.6	-0.9	39.5	36.5
27. 11. 2022 20:00	-6.0	-6.4	11.3	10.6	-0.7	-1.0	39.0	36.0
27. 11. 2022 21:00	-6.1	-6.5	11.2	10.5	-0.8	-1.1	38.5	35.5
27. 11. 2022 22:00	-6.2	-6.6	11.1	10.4	-0.9	-1.2	38.0	35.0
28. 11. 2022 00:00	-6.3	-6.7	11.0	10.3	-1.0	-1.3	37.5	34.5
28. 11. 2022 01:00	-6.4	-6.8	10.9	10.2	-1.1	-1.4	37.0	34.0
28. 11. 2022 02:00	-6.5	-6.9	10.8	10.1	-1.2	-1.5	36.5	33.5
28. 11. 2022 03:00	-6.6	-7.0	10.7	10.0	-1.3	-1.6	36.0	33.0
28. 11. 2022 04:00	-6.7	-7.1	10.6	9.9	-1.4	-1.7	35.5	32.5
28. 11. 2022 05:00	-6.8	-7.2	10.5	9.8	-1.5	-1.8	35.0	32.0
28. 11. 2022 06:00	-6.9	-7.3	10.4	9.7	-1.6	-1.9	34.5	

4.6. SmartField – Systém sběru teplotních a vlhkostních dat v reálných provozních podmínkách (*in situ*)

Komplexní systém pro sběr teplotních a vlhkostních dat (SmartField – Systém sběru teplotních a vlhkostních dat) v reálných provozních podmínkách byl vystavěn (zprovozněn) v roce 2021 v oblasti Boskovické brázdy (Malé Hané) v modelovém zemědělském podniku AGROSPOL, a.d. Knínice.

Zájmové území

Zájmové území se nachází v Jihomoravském kraji, v okrese Blansko. Leží cca 60 km severně od Brna v Boskovické brázdě v nadmořské výšce od 340 do 350 m. Území leží spadá do Brněnského bioregionu 1.24, který má protáhlý tvar od jihu k severu a plochu 807 km² viz *obr. 4.14*.

Zájmové území patří v regionálním členění georeliéfu České republiky do provincie Česká vysočina, subprovincie Česko-moravská, oblasti Brněnské vrchoviny, celku Boskovické brázdy, podcelku Malá Haná, okrsku Jevíčská sníženina (Bína, Demek 2012). Okrsek Malá Haná zahrnuje Chrudichromský hřbet a tvoří úzký pruh vyššího terénu mezi Jevíčskou sníženinou a Lysickou sníženinou má plochu 8,98 km². Je tvořený permo-karbonskými usazeninami Boskovické brázdy a nejvyšší bod se nazývá Habří 451,2 m (Demek *et al.* 2006).

Geologickým podložím zájmového území jsou kvarterní hlíny, spraše, písky a štěrky. Další část je tvořena permokarbonskými horninami jako jsou pískovce, slepence a jílovce a okrajová nejmenší část je zastoupena tercierními písky a jíly (www.geoportal.gov.cz). Zájmové území leží v geografickém útvaru Boskovické brázdy, která patří do pánví permokarbonských. Pánve vznikaly v důsledku hercynského vrásnění jako příkopová propadlina v moldanubickém krystaliniku. Výběžek Boskovické brázdy tvoří Červené pískovce a jílovce (lupky), lokálně i vápnité slepence permu (Culek *et al.* 1995). Pánev je mělká na severu s permskými pískovci a břidlicí s vložkou třetihorních lupků a vápenců. Nejvyšší karbon v permském podloží se vyskytuje pouze v jižní části. Zachované sedimenty jsou větší mocnosti.

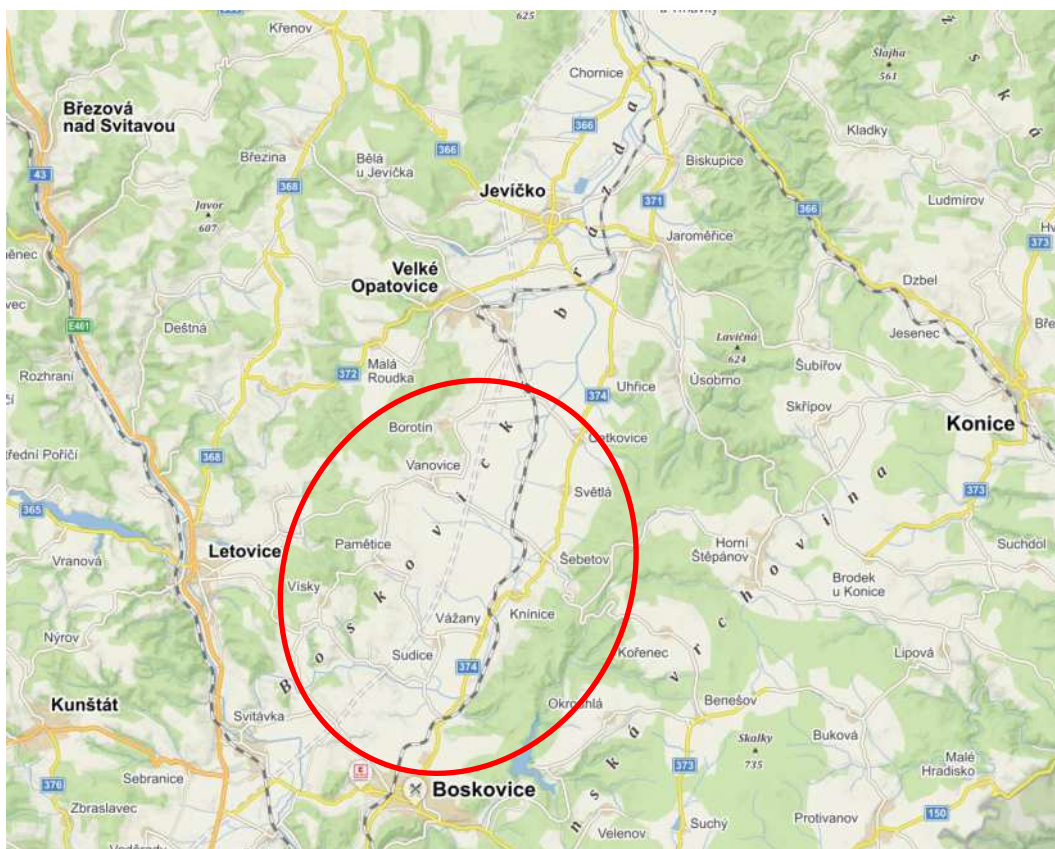
Dle fyzicko-geografické diferenciacie zájmové území spadá do sníženin s normálně dlouhým, mírným a mírně suchým létem s černozeměmi, hnědozeměmi a eutrofními hnědými půdami (kambizeměmi) ve 3–4. vegetačním stupni s velmi nízkou lesnatostí.

Zájmové území leží v rozlehlých sníženinách s plochým dnem a souvislými sprašovými pokryvy na jílovitých sedimentech, kde vznikly půdní druhy hlinité až jílovitohlinité. V zájmové oblasti proto rozeznáváme několik půdních typů: černozem luvická, černice glejová, hnědozem modální, luvizem glejová, šedozem modální, fluvizem glejová, kambizem modální, kambizem luvická, pararendzina kambická, pelozem karbonátová, gley modální, pseudoglej modální aj. (Němeček *et al.* 2011) viz *obr. 4.15*.

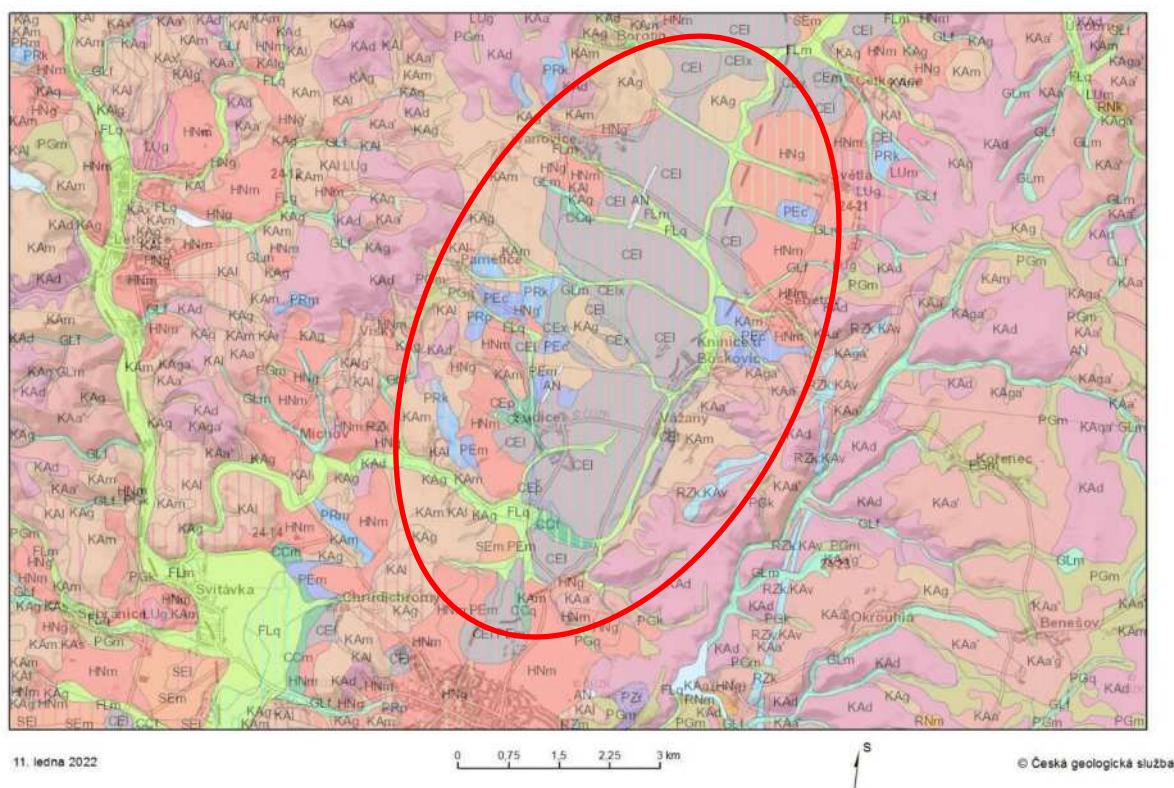
Klimatický region dle Culka (1995) je mírně teplý, vlhký, nížinný. Podnebí v zájmové oblasti Malé Hané dle klasifikace Quitta (1971) můžeme v období 1961–2000 zařadit do kategorie mírně teplá /MT8–9/ (Štěpánová 2010) viz *obr. 4.16*. Dlouhodobé průměrné roční teploty vzduchu a roční srážky za období 1990–2020 uvádí *tab. 4.1*.

Modelový podnik AGROSPOL, a.d. Knínice

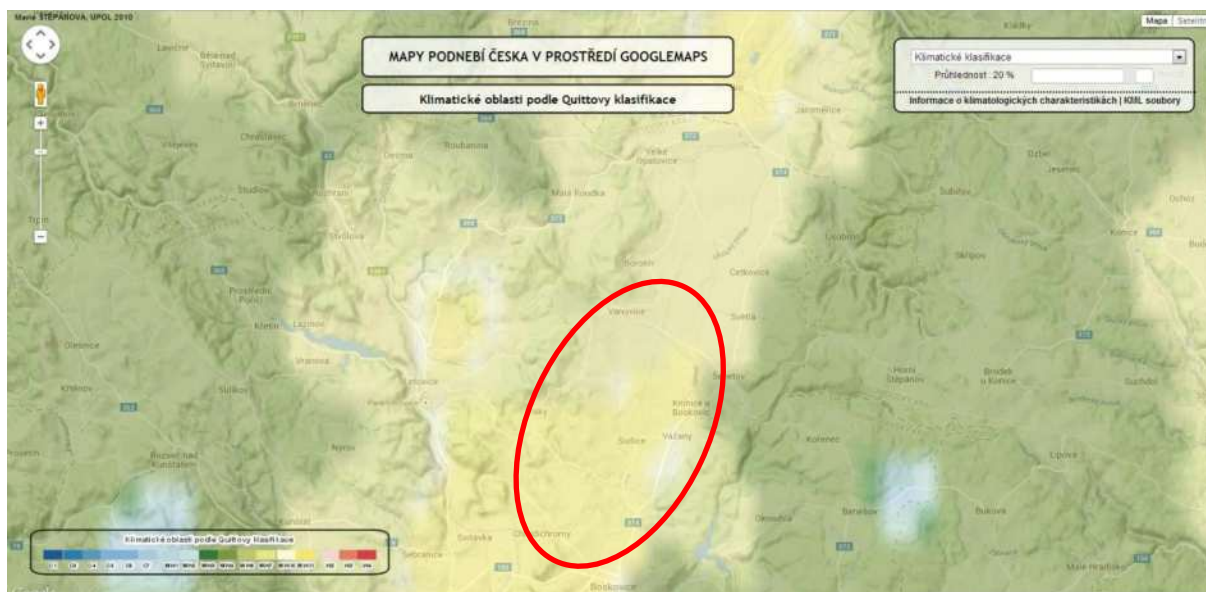
AGROSPOL, a.d. Knínice hospodaří celkem na 2 528 ha zemědělské půdy (orná 2283 ha) v chladné řepařské oblasti na sever od Boskovic v Boskovické brázdě a až po katastr Borotín a v bramborářské výrobní oblasti Horního Štěpánova a Brodka u Konice. Mezi hlavní pěstované plodiny patří obilniny – ozimá pšenice (600 ha), ječmen (150 ha), oves (30 ha), kukuřice (160 ha siláž, 110 ha zrno), okopaniny – cukrovka (140 ha), brambory (5 ha), krmná řepa (5 ha), olejniny – řepka (250 ha), slunečnice (60 ha), pícniny – vojtěška (180 ha), jetelotravní směsi a žito (GPS, 50 ha) a léčivé rostliny – ostropestřec mariánský (100 ha). Dále provozuje sady a školky – višně (45 ha), jablka (14 ha), červený rybíz (17 ha) a švestky (10 ha). Živočišná výroba se zaměřuje na dojný skot - 540 plemenic českého strakatého skotu, jalovičky se používají především do vlastního obratu stáda a býčci se vykrmují do jateční hmotnosti. Prasata – základní stádo 260 prasnic, předvýkrm (450 kusů, na rostech), výkrm (1500 kusů, hluboká podestýlka).



Obr. 4.14: Mapa zájmového území (upraveno podle <https://mapy.cz/>).



Obr. 4.15: Pedologická mapa zájmového území (upraveno podle <http://mapy.geology.cz/pudy/>).



Obr. 4.16: Mapa podnebí zájmové oblasti – Klimatické oblasti dle Quitta za období 1961–2000 (Štěpánová 2010).

Tab. 4.1: Dlouhodobé průměrné měsíční a roční teploty (°C) a srážky (mm) ze stanice Jevičko (1991–2020) dle ČHMÚ Ostrava–Poruba.

Rok	Měsíc												Rok	Veg. období
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Srážky (mm)	28,7	23,3	35,5	33,8	62,6	68,7	83,3	66,0	54,9	38,9	32,5	30,5	558,5	369,2
Teplota (°C)	-1,9	-0,5	3,1	8,6	13,3	16,8	18,4	17,9	13,1	8,3	3,9	-0,6	8,4	14,7

Pozn.: Vegetační období 1.4.–30.9.; normál (1991–2020). Zdroj: ČHMÚ Ostrava.

Instalace základnové stanice sítě LoRaWAN a měřicí sítě

Pro realizaci bezdrátové senzorové sítě nutné pro pilotní testovací provoz multisenzorových jednotek byly v roce 2020 pořízeny dvě brány (gateway) sítě LoRaWAN od společnosti RVTech s.r.o. Instalace první brány proběhla 21. 6. 2021 v areálu střediska Knínice partnera projektu společnosti AGROSPOL, a.d. Knínice. Brána je umístěna na budově posklizňové linky (sila) (obr. 4.17).



Obr. 4.17: Budova posklizňové linky (sila) a vlastní silo, na kterém je umístěna základnová stanice sítě LoRaWAN.

Jedná se o venkovní gateway pro budování IoT sítí na technologii LoRaWAN – 868 MHz. Je vybavena webovým rozhraním s možností vzdálené konfigurace síťových parametrů, LoRaWAN parametrů a monitoringu. Elektronické prvky zařízení jsou umístěny v kovovém krytu se stupněm krytí IP 66.

Gateway je doplněna všesměrovou anténou Taoglas Outdoor 868 MHz se ziskem 5dBi, umístěnou na kovovém výložníku. Internetové připojení je zajištěno pomocí mobilní sítě 4G modemem Huawei E3372h, umístěným ve společném krytu s bránou. Modem je opatřen vlastní externí anténou, umístěnou na druhém výložníku. Napájení brány je zajištěno pomocí PoE zdroje 48 V připojeného do elektroinstalačních rozvodů posklizňové linky. Jak se v průběhu roku ukázalo, toto řešení není úplně vyhovující, protože vlivem stáří a provozního opotřebení rozvodů dochází na lince k výpadkům elektrické energie, které způsobily i výpadky v měřených datech.

Komplet je připevněn k bezpečnostnímu zábradlí ochozu sila ve výšce cca 22,5 m na povrchem (obr. 4.18). Na obr. 4.19 je pak vyznačeno předpokládané území, které brána s instalovanou anténou pokrývá.

Druhá brána (záložní) je umístěna ve středisku Vanovice na budově posklizňové linky /čistička osiv/ viz obr. 4.19.



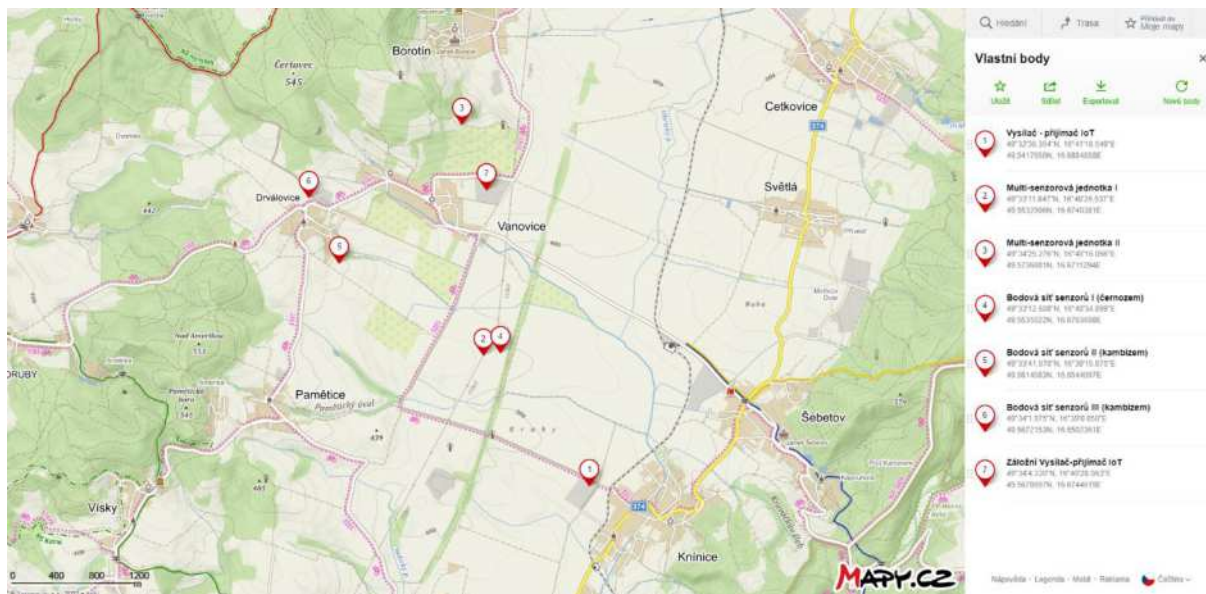
Obr. 4.18: Instalace brány sítě LoRaWAN a příslušných antén na budově sila ve středisku Knínice (vlevo brána sítě LoRaWAN, uprostřed výložník s LTE anténou, vpravo výložník s anténou sítě LoRaWAN).



Obr. 4.19: Předpokládané pokrytí sítě LoRaWAN modelového území ze základnové stanice ve středisku Knínice (plná čára) a pokrytí z druhé základnové stanice (záložní) ve středisku Vanovice (čárkovaně).

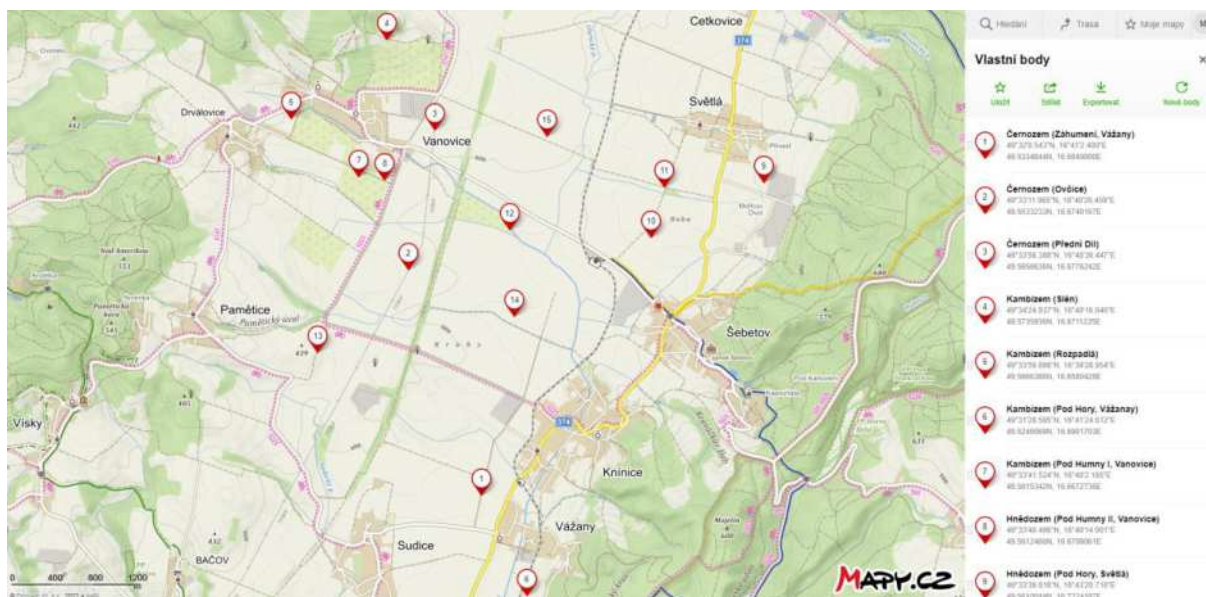
Po ověření, že síť LoRaWAN je plně funkční (vysílá a přijímá signál), byly nainstalovány dvě multisenzorové jednotky v provozních podmínkách – viz obr. 4.20 (body 2, 4). První multisenzorová jednotka byl instalována na půdním typu černozem luvická (CEI, dále jen černozem) s kulturou kukuřice seté a druhá na půdním typu kambizem glejová (KAg, dále jen kambizem) s trvalou kulturou višňový sad (viz obr. 4.22). V podzimních měsících (září/říjen 2021, po sklizni, přípravě půdy a setí) byly dále na modelovém území podniku AGROSPOL, a.d. Knínice instalovány ve třech lokalitách bodové sítě (8, 5 a 2 měřících senzorů půdní vlhkosti v hloubkách 0–15 a 15–30 cm v pravidelné síti 50x50 m, resp. 25x25m) pro měření půdní vlhkosti (půdní typy: černozem luvická /CEI/, kambizem modální /KAm/), viz obr. 4.20 (body 4–6) a dále obr. 4.23. V roce 2022 bylo na modelovém území podniku AGROSPOL,

a.d. Knínice cca 16–18 měřících bodů viz obr. 4.20 a cca 12 bylo v režimu přenosu dat přes síť LoRaWAN viz obr. 4.24.



Pozn.: 1 - brána (gateway) sítě IoT, 2,3 - multisenzorová platforma, 4,5,6 - bodová síť měření půdní vlhkosti, 7 - záložní brána (gateway) sítě IoT

Obr. 4.20: Mapa rozmístění měřících bodů a zařízení na modelovém území podniku AGROSPOL, a.d. Knínice v roce 2021 (upraveno podle <https://mapy.cz/s/hovalaraju>).



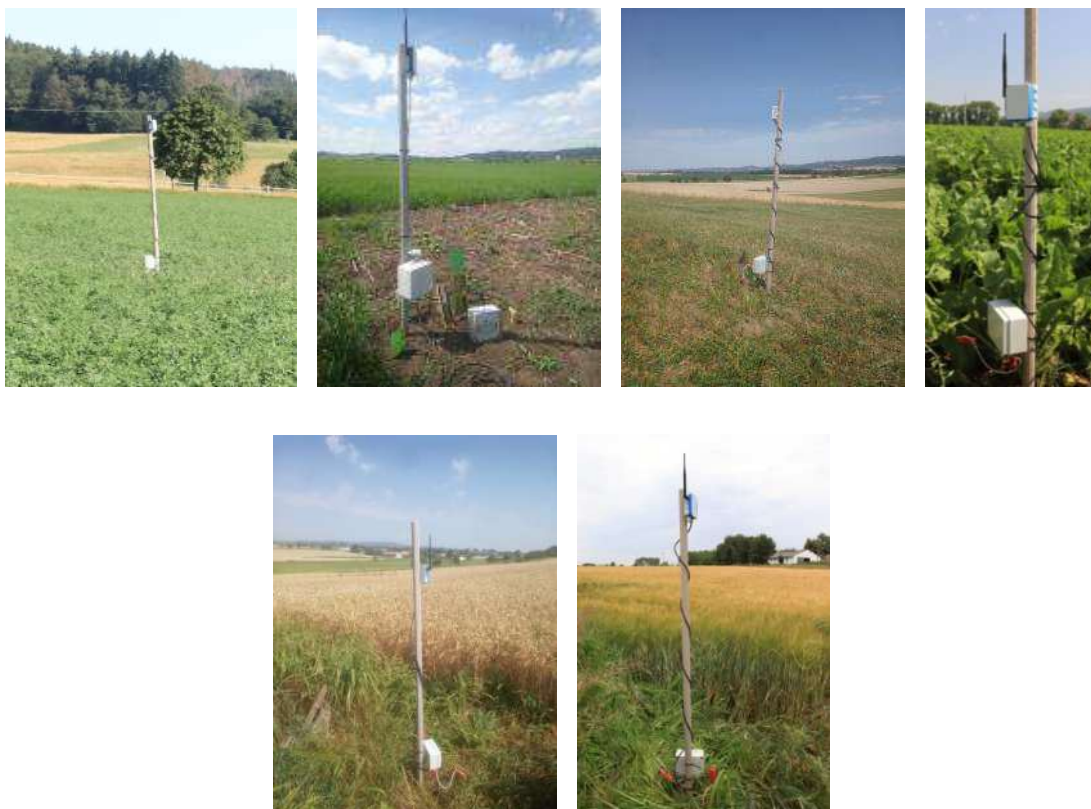
Obr. 4.21: Mapa rozmístění měřících bodů a zařízení na modelovém území podniku AGROSPOL, a.d. Knínice v roce 2022 (upraveno podle <https://mapy.cz/s/hovalaraju>).



Obr. 4.22: Instalace multisenzorových jednotek (červen 2021) na modelovém území podniku AGROSPOL, a.d. Knínice na půdním typu černozem a kambizem. Foto L. Menšík.



Obr. 4.23: Instalace bodové sítě jednotek v pravidelné síti 50x50 m, resp. 25x25m pro měření půdní vlhkosti v hloubkách 0–15 a 15–30 cm (září/říjen 2021) na modelovém území podniku AGROSPOL, a.d. Knínice na půdním typu černozem a kambizem. Foto L. Menšík.



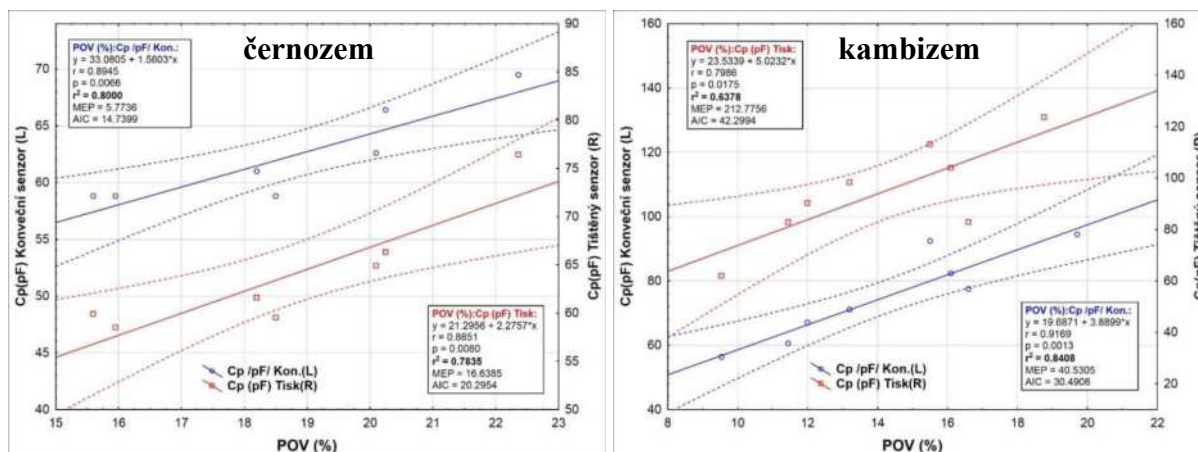
Obr. 4.24: Instalace multisenzorových jednotek (červen 2022) na modelovém území podniku AGROSPOL, a.d. Knínice. Foto L. Menšík.

Kalibrace konvenčních a tištěných senzorů v multisenzorové platformě s bezdrátovým přenosem dat (LoRaWAN) v provozních podmínkách (in situ)

Měřicí zařízení (multisenzorové platformy) byly instalovány v průběhu měsíce června 2021 obr. 4.20 a 4.22. Po nainstalování senzorů s cca měsíčním odstupem začalo nepravidelné sledování (odběry vzorků půdy – cca 9 odběrů v období od 07-10/2021) pro stanovení půdní objemové vlhkosti (POV) v laboratorních podmínkách (neporušené a porušené půdní vzorky) za účelem provedení (ověření, kalibrace) správnosti měření nových multisenzorových platform v provozních podmínkách v hloubce 0–15 cm na půdním typu černozem a kambizem.

V každém jednotlivém odběru se odebíraly 4 fyzikální válečky (pro stanovení POV) a dále i 4 váženky (pro stanovení půdní vlhkosti gravimetrické – PVG) na každé lokalitě. POV, resp. PVG, byla stanovena v laboratoři standardními postupy (Pospíšilová *et al.* 2016). Získaná data byla statisticky vyhodnocena (pro vývoj kalibračních rovnic byly použity průměrné hodnoty). Statistická analýza (lineární regrese) byla provedena pomocí programu QC Expert 3.3 Pro (TriloByte Statistical Software Ltd., Pardubice, Česká republika) a NCSS 2019 Statistical Software (NCSS, LLC., Kaysville, UT, USA). Grafické výstupy byly provedeny pomocí softwaru Statistica 14.0 (TIBCO Software Inc., Palo Alto, CA, USA).

Lineární regresní model byl vystavěn za pomoci regresního tripletu (Meloun, Militký 2011) a sestával z následujících kroků: (1) návrh modelu, (2) předběžná analýza dat (multikolinearita, heteroskedasticita, autokorelace a vlivné body), (3) odhad parametrů pomocí klasická metoda nejmenších čtverců (MMČ) a následné testování významnosti parametrů pomocí Studentova t-testu, střední kvadratické chyby predikce (MEP) a Akaikeho informačního kritéria (AIC), (4) regresní diagnostika – identifikace vlivných bodů a ověření předpokladů metody MMČ, (5) konstrukce zpřesněného modelu (Meloun, Militký 2011). Statistická významnost byla testována na hladině významnosti $p = 0,05$.



Pozn.: POV - půdní objemová vlhkost; Cp/pF/ - kapacita sensorového elementu; kon. - konvenční sensor, tisk - tištěný sensor

Obr. 4.25: Kalibrační křivka půdní objemové vlhkosti (POV) pro konvenční a tištěný sensor v multisenzorové platformě s bezdrátovým přenosem dat na modelové lokalitě (poli) v hloubce 0–15 cm v provozních podmínkách v období červen–prosinec 2021 pro půdní typy černozem (vlevo) a kambizem (vpravo) v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d. Knínice).

Vypracované regresní přímky závislosti POV na Cp/pF/ pro sensorové elementy (konvenční, tištěný) pro hloubku sledování 0–15 cm jsou uvedeny na obr. 4.25. Dosažené regresní koeficienty (R^2) byly stanoveny od 0,78–0,80 u půdního typu černozem a 0,63–0,84 (tištěný, resp. konvenční) u půdního typu kambizem.

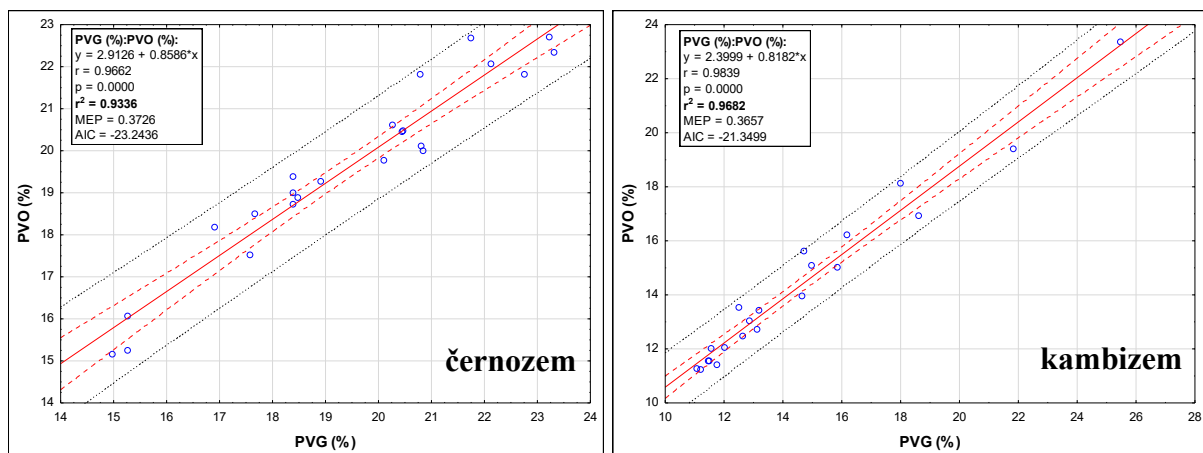
Kalibrace konvenčních sensorů v bodové síti (ambulantní měření elektronickou měřicí jednotkou SFMU bez bezdrátového přenosu dat) v provozních podmínkách (in situ)

Měřicí zařízení (konvenční senzory) byly instalovány v podzimních měsících (září/říjen 2021, po sklizni kukuřice a obilovin, následné přípravě půdy a setí) na modelovém území v podniku AGROSPOL, a.d. Knínice. Byly vybrány tři lokality, kde byla vytyčena bodová síť (8, 5 a 2 měřících sensorů půdní vlhkosti v hloubkách 0–15 a 15–30 cm) o rozměrech 50x50 m, resp. 25x25 m (půdní typy: černozem luvická /CEL/, kambizem modální /KAm/) viz obr. 4.20 (body 4–6) a dále viz obr. 4.23. Po nainstalování sensorů s cca měsíčním odstupem začalo sledování (odběry vzorků půdy: cca 3–4 odběry v období od 10-11/2021) pro stanovení půdní objemové vlhkosti (POV) v laboratorních podmínkách za účelem provedení (ověření, kalibrace) správnosti měření konvenčních sensorů v provozních podmínkách ve dvou hloubkách 0–15 a 15–30 cm. Na každé lokalitě, v každém jednotlivém odběru a na každém měřícím bodě se odebíralo 5 váženek (3 v horizontu 0–15 cm a 2 v horizontu 15–30 cm) viz obr. 4.26. POV (resp. PVG) byla stanovena v laboratoři standardními postupy (Pospíšilová *et al.* 2016). Na základě porovnání získaných dat mezi POV a PVG (vypracovány lineární regresní modely závislosti PVG na POV / $R^2 = 0,93–0,96$ / a v každém odběru porovnán průměr mezi POV a PVG pomocí t-testu – vždy bylo prokázáno, že průměry se shodují) – bylo přistoupeno ke kalibraci konvenčních sensorů v bodové síti pro odběry vzorků půdy pomocí váženek a stanovení PVG (která odpovídá POV) viz obr. 4.27.



Obr. 4.26: Odběr půdních vzorků pro stanovení POV resp. PVG pomocí váženek a ambulantní měření pomocí elektronické měřicí jednotky SFMUv1 bez bezdrátového přenosu dat v provozních podmínkách v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d. Knínice). Foto L. Menšík.

Pro měření kapacity sensorových elementů Cp/pF/ byla použita již vyvinutá elektronická měřicí jednotka SFMUv1 (Vik *et al.* 2019a), k ní se připojovaly jednotlivé kapacitní senzory viz obr. 4.25.



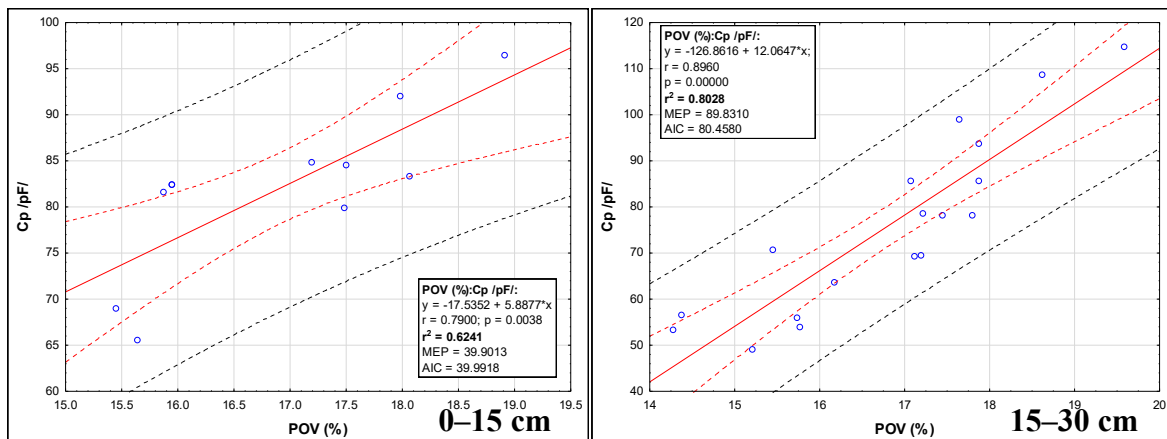
Pozn.: POV - půdní objemová vlhkost (stanovená pomocí fyzikálního válečku); PVG - půdní vlhkost gravimetrická (stanovená pomocí váženky)

Obr. 4.27: Závislost půdní vlhkosti gravimetrické (PVG) na půdní objemové vlhkosti (PVO) pro půdní typ černozem (vlevo) a kambizem (vpravo) v provozních podmínkách v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d. Knínice).

Získaná data POV a Cp/pF/ v bodových sítích byla statisticky vyhodnocena (pro vývoj kalibračních rovnic byly použity průměrné hodnoty). Statistické analýzy (lineární regrese) byla provedena pomocí programu QC Expert 3.3 Pro (TriloByte Statistical Software Ltd., Pardubice, Česká republika) a NCSS 2019 Statistical Software (NCSS, LLC., Kaysville, UT, USA). Grafické výstupy byly provedeny pomocí softwaru Statistica 14.0 (TIBCO Software Inc., Palo Alto, CA, USA). Lineární regresní model byl vystavěn za pomoci regresního tripletu (Meloun, Militký 2011) a sestával z následujících kroků: (1) návrh modelu, (2) předběžná analýza dat (multikolinearita, heteroskedasticita, autokorelace a vlivné body), (3) odhad parametrů pomocí klasická metoda nejmenších čtverců (MMČ) a následné testování významnosti parametrů pomocí Studentova t-testu, střední kvadratické chyby predikce (MEP) a Akaikeho informačního kritéria (AIC), (4) regresní diagnostika – identifikace vlivných bodů a ověření předpokladů metody MMČ, (5) konstrukce zpřesněného modelu (Meloun, Militký 2011). Statistická významnost byla testována na hladině významnosti $p = 0,05$.

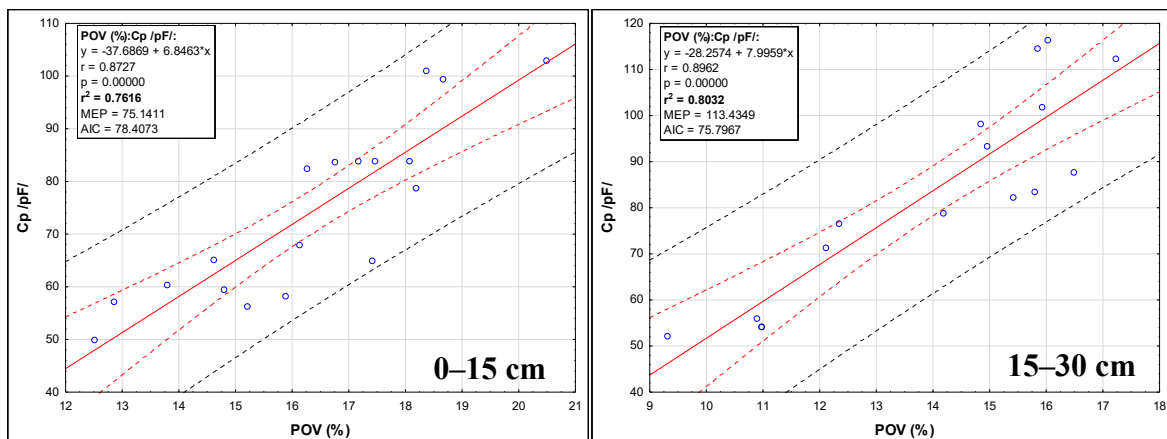
Získaná data z bodových měření (pravidelná síť 50x50 m, resp. 25x25 m) ve dvou hloubkách 0–15 a 15–30 cm (naměřené hodnoty Cp/pF/ a POV) byly dále prostorově interpolovány (model půdní objemové vlhkosti) pomocí Contour Plot /konturový graf X,Y,Z/ (metodou XYZ Random Gaussian) v programu OriginPro (version 2018b, OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA). Prostorovým rozlišením modelových rastrů je 1 metr.

Vypracované regresní závislosti (přímky) POV na Cp/pF/ pro konvenční sensorové elementy pro hloubku sledování 0–15 a 15–30 cm na půdním typu černozem jsou uvedeny na *obr. 4.28* a pro půdní typ kambizem na *obr. 4.29*. Lineární regresní modely dosahují velmi dobrých parametrů a potvrzují vysokou míru shody stanovení POV laboratorní metodou se stanovením měřením pomocí nově vyvinutých senzorů a elektronické vyhodnocovací jednotky SFMUv1 v provozních podmínkách. Koeficienty determinace R^2 se pohybují od 0,76 od 0,80 pro hloubku 0–15 cm a 0,62–0,80 pro hloubku 15–30 cm. Dosažené regresní koeficienty jsou vysoké až velmi vysoké a je velký předpoklad, že při dalším měření v roce 2022 (bodová síť cca 12–14-ti multisenzorových jednotek v rámci zemědělského podniku) bude dosaženo vyšších koeficientů determinace R^2 (cca 0,85–0,90).



Pozn.: POV - půdní objemová vlhkost; Cp/pF/ - kapacita sensorového elementu

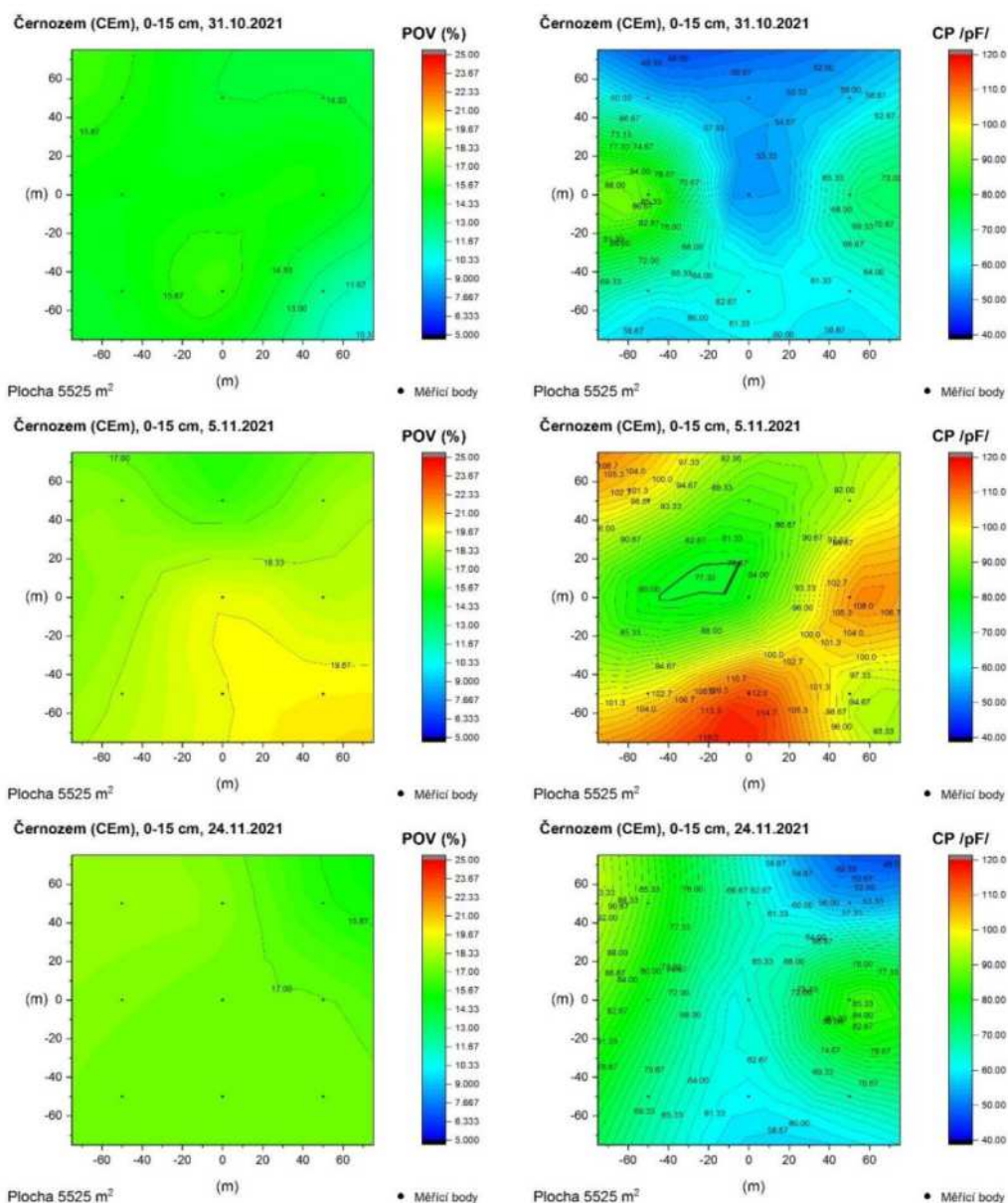
Obr. 4.28: Kalibrační křivka půdní objemové vlhkosti sensorového elementu v hloubce 0–15 cm (vlevo) a 15–30 cm (vpravo) v provozních podmínkách v období říjen–listopad 2021 (půdní typ černozem) v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d. Knínice).



Pozn.: POV - půdní objemová vlhkost; Cp/pF/ - kapacita sensorového elementu

Obr. 4.29: Kalibrační křivka půdní objemové vlhkosti sensorového elementu v hloubce 0–15 cm (vlevo) a 15–30 cm (vpravo) v provozních podmínkách v období říjen–listopad 2021 (půdní typ kambizem) v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d. Knínice).

Dále je uvedeno ukázka (*obr. 4.30*) možného grafického zpracování bodových měření POV (váženka) a měření Cp/pF/ pomocí konvenčních sensorových elementů a elektronické vyhodnocovací jednotky SFMUv1 v různých hloubkách na modelových lokalitách (půdní typ černozem a kambizem).



Pozn.: POV - půdní objemová vlhkost; Cp/pF/ - kapacita sensorového elementu

Obr. 4.30: Vývoj vlhkosti půdy (prostorové zobrazení dat) na modelové lokalitě (poli) v hloubce 0–15 cm v provozních podmínkách v období říjen–listopad 2021 (půdní typ černozem) v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d. Knínice).

Dlouhodobý provozní test multisenzorových měřících jednotek in situ na modelových plochách

V červnu a červenci 2021 byly instalovány prototypy multisenzorových jednotek na připravených modelových plochách. První multisenzorová jednotka byla instalována na půdním typu černozem luvická (CEI, dále jen černozem) s kulturou kukuřice seté a druhá na půdním typu kambizem glejová (KAg, dále jen kambizem) s trvalou kulturou višňový sad, viz obr. 4.20 a 4.22.

Ke každé jednotce v lokalitě Knínice (Malá Haná, Boskovická Brázda) bylo připojeno několik externích sensorových elementů. Konkrétně se jednalo o:

- měřené kombinovaný teplotně-kapacitní sensorový element pro měření objemové vlhkosti půdy vyrobený konvenčním způsobem používaným pro přípravu vodivých drah na deskách plošných spojů,
- uhlíkový kombinovaný teplotně kapacitní sensorový element pro měření objemové vlhkosti půdy vyrobený pomocí aditivních depozičních technik (sítotisk, dispenzng atd.),

- kombinovaný teplotně-vlhkostní senzor Sensirion SHT-31 pro měření mikroklimatu umístěný v pouzdru měřicí jednotky,
- kombinovaný teplotně-vlhkostní senzor Sensirion SHT-31 pro měření mikroklimatu umístěný v pouzdře komunikačního modulu.

Teplota a objemová vlhkost půdy byla sledována v hloubce 0–15 cm, mikroklima bylo sledováno ve výškách 10 cm a 150 cm nad povrchem. Jednotky každou hodinu provedly na všech senzorových elementech sérii 10 měření, na server pak byl následně odeslán jejich aritmetický průměr. Data byla měřena do konce měsíce ledna 2022.

Pro ověření funkce multisenzorových měřicích jednotek a zároveň jejich kalibraci v reálných podmínkách byla na obou lokalitách patřících pod středisko Knínice na počátku 08/2021 instalována trojice profesionálních senzorů (obr. 4.31) pro měření objemové vlhkosti půdy typu CS 655 (Campbell Scientific, Inc., Logan, USA). Tyto senzory byly používány jako referenční a vůči jejich měření byla data z měřicích jednotek porovnávána. Senzory pracují na principu reflektometrie v časové oblasti (time domain reflectometry – TDR). Tyto senzory měřily data se shodnou periodou jako bezdrátové měřicí jednotky (tj. měření každou hodinu), data se v nich však ukládala pouze lokálně.

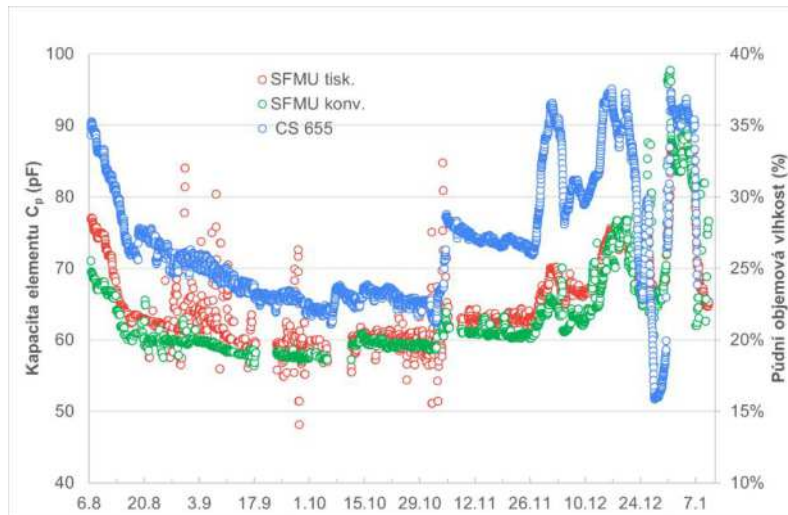


Obr. 4.31: Instalace 3 ks referenčních senzorů Campbell CS-655 pro měření půdní objemové vlhkosti na půdním typu černozem a kambizem.

Následující obrázky představují jak časový vývoj získaných dat pro oba půdní typy v „surové“ podobě - tj. bez dalšího zpracování (obr. 4.32 a obr. 4.33), tak i vzájemnou korelaci datových souborů po statistickém zpracování standardními postupy mezi senzorovými elementy (SFMU konv. a tisk.) a půdní objemovou vlhkostí (POV) naměřenou pomocí referenčních senzorů TDR - CS 655 (Campbell Scientific, Inc., Logan, USA).

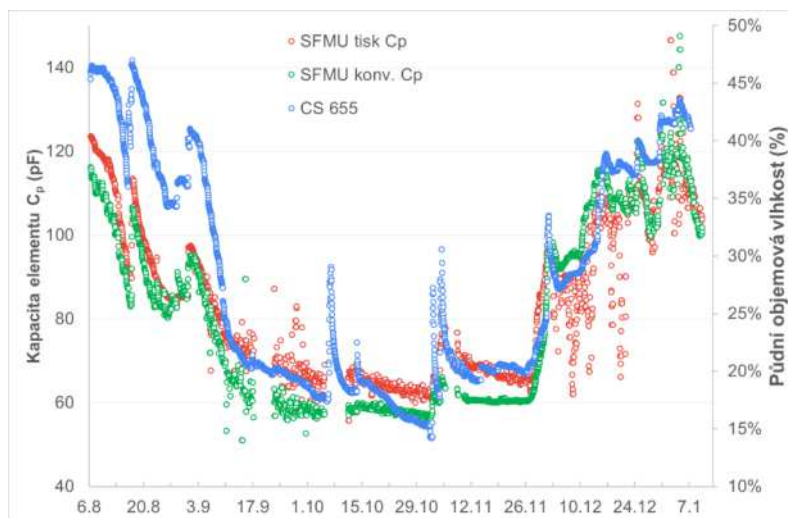
Vzájemná korelace (analýza trendu) datových souborů byla provedena pomocí lineární regrese (LR), metodou MNČ a dále zpřesněny robustní metodou IRWLS $\exp(-e)^2$ (Green 1984), pomocí regresní diagnostiky tzv. regresním tripletem (Meloun, Militký 2012).

² IRWLS $\exp(-e)$: Robustní regresní metoda ze třídy M-odhadů, při níž se minimalizuje čtverec vážených normovaných reziduí $w(eni)$ s vahami $w(e) = \exp(-e)$. K výpočtu se používá iterativně vážená metoda nejmenších čtverců (angl. Iteratively Re-Weighted Least Squares) (TriloByte Statistical Software, QC Expert 3.3).



Pozn.: SFMU tisk. - tištěný uhlíkový sensorový element; SFMU konv. - konvenční sensorový element; CS 655 - referenční senzor Campbell CS 655 (výstupem přímo POV)

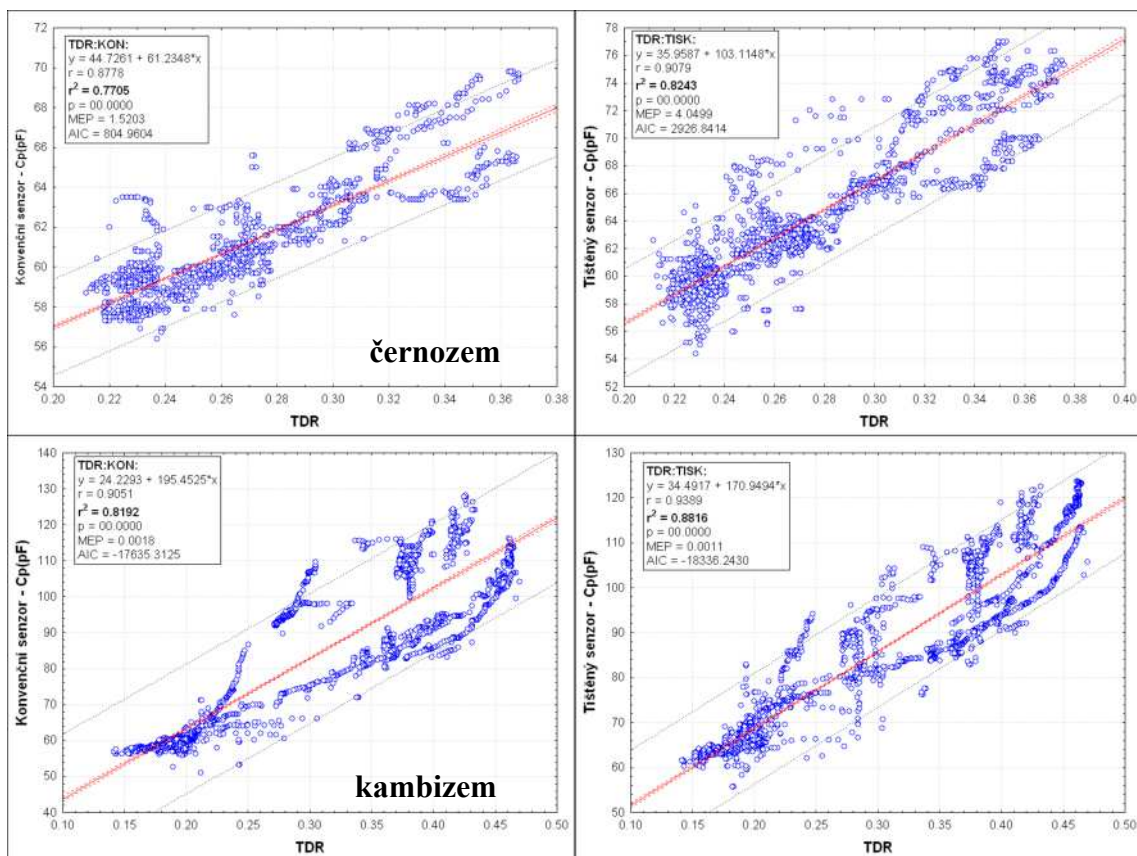
Obr. 4.32: Vývoj kapacity sensorových elementů v závislosti na vlhkosti půdy v hloubce 0–15 cm v provozních podmínkách v období srpen 2021–leden 2022 (půdní typ černozem) v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d. Knínice).



Pozn.: SFMU tisk. - tištěný uhlíkový sensorový element; SFMU konv. - konvenční sensorový element; CS 655 - referenční senzor Campbell CS 655 (výstupem přímo POV)

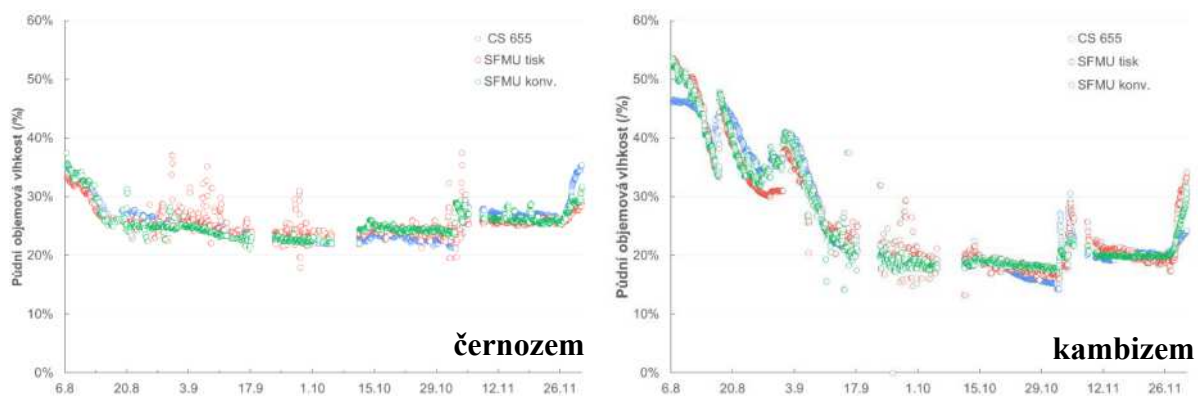
Obr. 4.33: Vývoj kapacity sensorových elementů v závislosti na vlhkosti půdy v hloubce 0–15 cm v provozních podmínkách v období srpen 2021–leden 2022 (půdní typ kambizem) v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d. Knínice).

Vypracované korelace (regresní závislosti) mezi TDR a Cp/pF/ pro konvenční sensorové elementy pomocí MNČ mají parametry: $R = 0,87$ až $0,90$ a $R^2 = 0,77$ – $0,81$ a pro tištěné sensorové elementy: $R = 0,90$ až $0,93$ a $R^2 = 0,82$ – $0,88$ viz obr. 4.34. Při použití robustní metody IRWLS exp(-e) bylo dosaženo pro konvenční i sensorové elementy parametrů na úrovni $R = 0,98$ – $0,99$ a $R^2 = 0,96$ – $0,98$. Veškeré vypracované lineární regresní modely jsou významné dle Fisher-Snedecorova testu významnosti modelu a korektní dle Scottova kritéria multikolinearity (žádný model nevykazuje multikolinearitu). Rezidua všech modelů vykazují heteroskedasticitu (Cook-Weisbergův test heteroskedasticity). Dosažené regresní koeficienty jsou velmi vysoké, dokazují, že nově vyvinuté senzory (jak konvenční, tak i tištěný) měří dané parametry velmi přesně.



Obr. 4.34: Vzájemná korelace mezi kapacitou sensorových elementů a půdní objemovou vlhkostí (POV) naměřenou pomocí referenčních sensorů CS 655 pro půdní typy černozem (nahore) a kambizem (dole) v období srpen–prosinec 2021 v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d. Knínice).

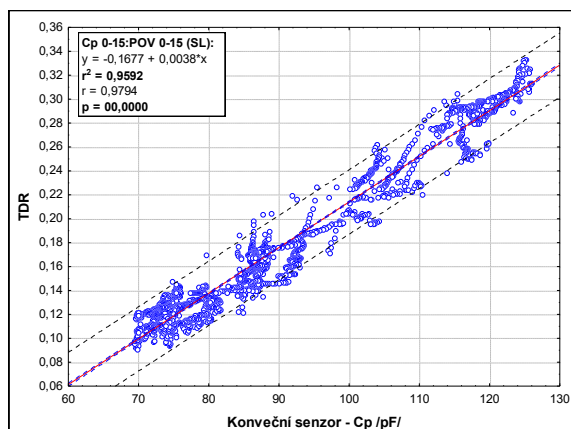
Na obr. 4.35 jsou pak vyneseny shodné závislosti jako na obr. 4.32 a 4.33, ale po provedené zpětné kalibraci obou sensorů. Jak je patrné, data ze všech tří sensorů se velmi dobře shodují.



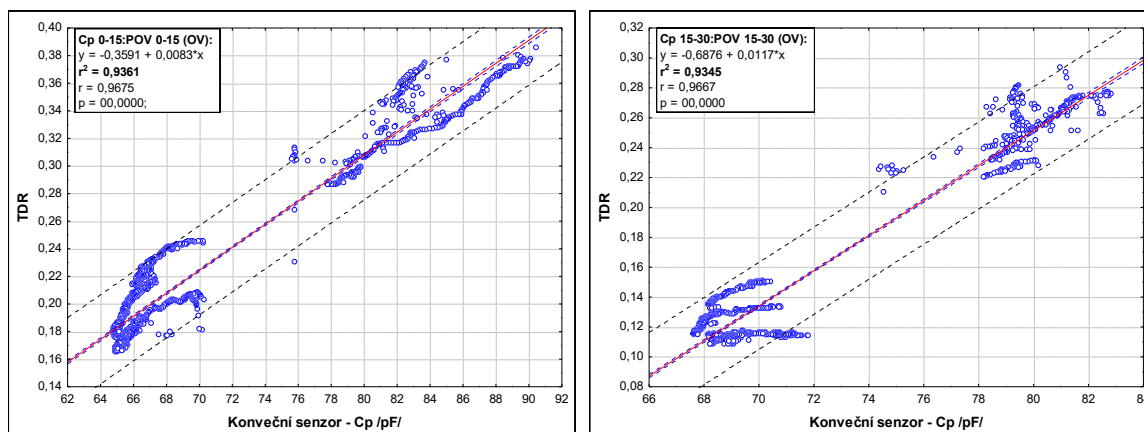
Obr. 4.35: Porovnání hodnot půdní objemové vlhkosti za období srpen–listopad 2021 naměřené pomocí referenčního sensoru Campbell CS 655 a kapacitních sensorových elementů spolu s bezdrátovou měřicí jednotkou SFMUv2 po zpětné kalibraci pro půdní typy černozem (vlevo) a kambizem (vpravo) v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d. Knínice).

V roce 2022 ověřování pokračovalo a vypracované korelace (regresní závislosti) mezi TDR a Cp/pF/ pro konvenční sensorové elementy pomocí MNČ mají parametry: $R = 0,93$ až $0,96$ viz obr. 4.36 a 4.37. Při použití robustní metody IRWLS exp(-e) bylo dosaženo parametrů na úrovni $R = 0,98$ – $0,99$. Veškeré vypracované lineární regresní modely jsou významné dle Fisher-Snedecorova testu významnosti modelu a korektní dle Scottova kritéria multikolinearity (žádný model nevykazuje multikolinearitu). Rezidua všech modelů vykazují heteroskedasticitu (Cook-Weisbergův test heteroskedasticity).

Dosažené regresní koeficienty jsou velmi vysoké a potvrzují výsledky z roku 2021, a zároveň dokazují, že měří POV velmi přesně.



Obr. 4.36: Vzájemná korelace mezi kapacitou senzorových elementů (SFMU konv. - konvenční senzorový element) a půdní objemovou vlhkostí (POV) naměřenou pomocí referenčních senzorů CS 655 (TDR) pro půdní typ kambizem (hloubka 0-15 cm) v období červenec–prosinec 2022 v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d. Knínice).

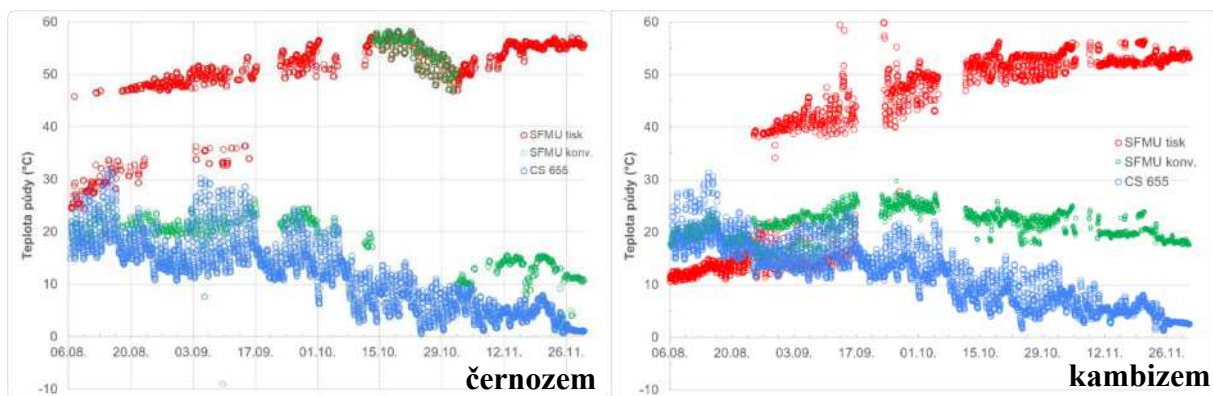


Obr. 4.37: Vzájemná korelace mezi kapacitou senzorových elementů (SFMU konv. - konvenční senzorový element) a půdní objemovou vlhkostí (POV) naměřenou pomocí referenčních senzorů CS 655 (TDR) pro půdní typ černozem (hloubka 0-15 cm /vlevo/ a 15-30 cm /vpravo/) v období červenec–prosinec 2022 v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d. Knínice).

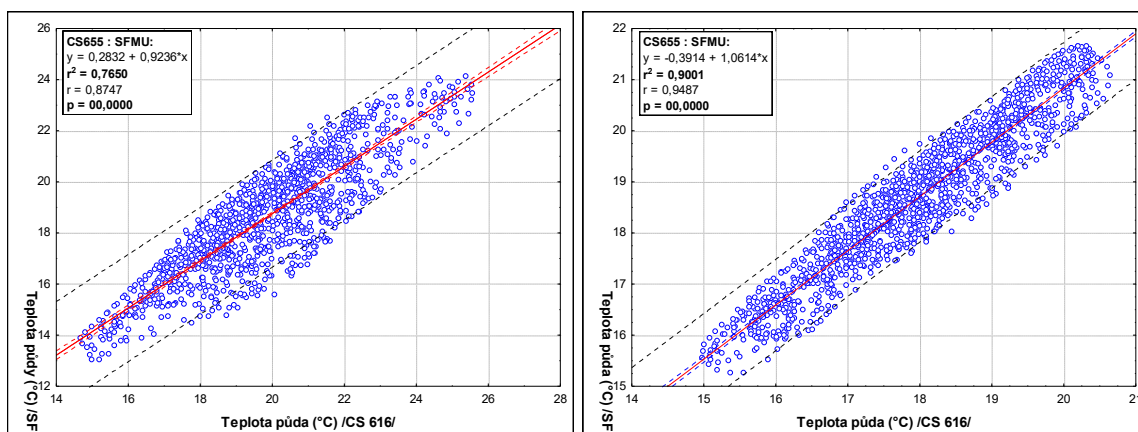
Součástí senzorových elementů pro měření půdní objemové vlhkosti jsou také teplotní senzory ve formě buď NTC termistoru (v případě konvenční varianty) nebo tištěného termistoru na NTC bázi (v případě tištěné varianty). Teplotní snímače jsou na sondě umístěny tak, aby monitorovali teplotu ve stejných hloubkách jako kapacitní senzory (tj. 0–15 cm a 15–30 cm). U každé sondy byl snímán jen teplotní senzor korespondující s měřeným vlhkostním elementem (tj. 0–15 cm).

Na obr. 4.38 je zachycen časový vývoj teploty půdy v hloubce 0–15 cm pro půdní typy černozem i kambizem. Jak je z grafu patrné, došlo v případě obou tištěných termistorů po cca 6 týdnech expozice (sondy byly do půdy instalovány na konci června 2021) k selhání funkce se skokovým nárůstem detekované teploty (prudkému snížení jejich elektrického odporu). Došlo k narušení ochranné vrstvy termistoru a tím k přímé expozici senzorické vrstvy působení kapalných fází (elektrolytu) v půdě.

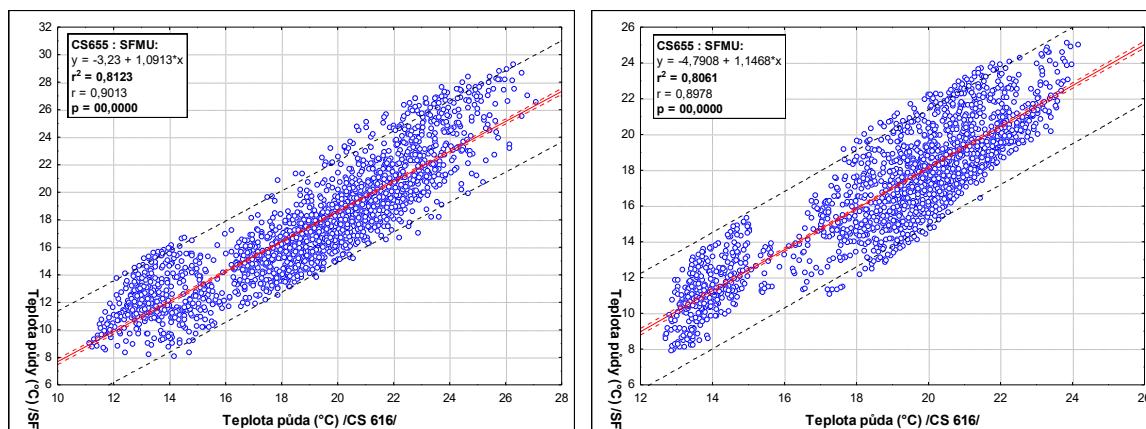
Dále bylo v roce 2022 provedeno porovnání vzájemná korelace mezi NTC termistorem (SFMUv2) a referenčními senzory Campbell CS 655. Výsledky jsou uvedeny na obr. 4.39 a 4.40.



Obr. 4.38: Vývoj teploty půdy v hloubce 0–15 cm v provozních podmínkách v období srpen–listopad 2021 pro půdní typ černozem (vlevo) a kambizem (vpravo) v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d. Knínice).



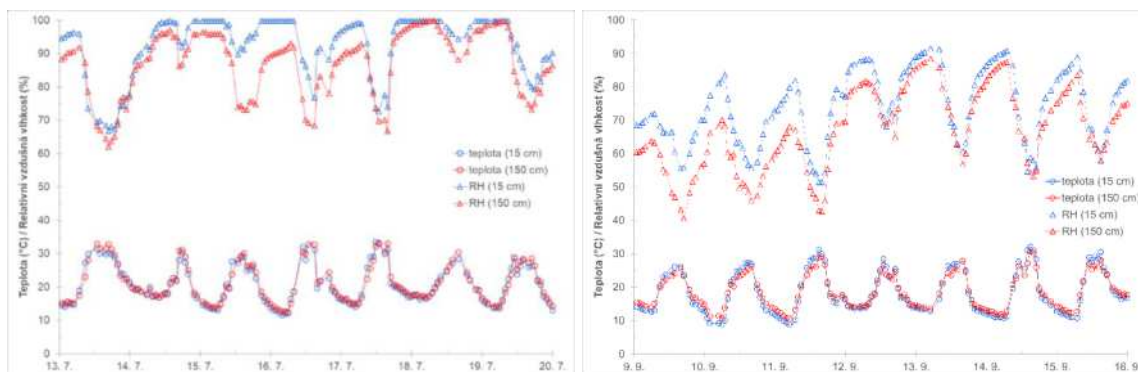
Obr. 4.39: Vzájemná korelace mezi teplotou půdy (°C) naměřenou pomocí referenčních senzorů CS 655 a senzorů SFMUv2 pro půdní typ černozem (vlevo 0–15 cm, vpravo 15–30 cm) v období červenec–prosinec 2022 v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d. Knínice).



Obr. 4.40: Vzájemná korelace mezi teplotou půdy (°C) naměřenou pomocí referenčních senzorů CS 655 a senzorů SFMUv2 pro půdní typ kambizem (vlevo 0–15 cm, vpravo 15–30 cm) v období červenec–prosinec 2022 v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d. Knínice).

Vypracované korelace (regresní závislosti) mezi referenčními senzory CS 655 a NTC termistorem (SFMUv2) pomocí MNČ mají parametry: $R = 0,76$ až $0,90$. Při použití robustní metody IRWLS exp(-e) bylo dosaženo parametrů na úrovni $R = 0,88$ – $0,96$. Veškeré vypracované lineární regresní modely jsou významné dle Fisher-Snedecorova testu významnosti modelu a korektní dle Scottova kritéria multikolinearity (žádný model nevykazuje multikolinearitu). Rezidua všech modelů vykazují heteroskedasticitu (Cook-Weisbergův test heteroskedasticity). Dosažené regresní koeficienty jsou velmi vysoké, dokazují, že nově vyvinuté senzory měří dané parametry (teplotu půdy) velmi přesně.

Součástí vlastní měřicí jednotky SFMUv2 i externího komunikačního modulu jsou také senzory pro měření mikroklimatu, které jsou umístěny v průchodkách typu PG11 na spodní straně ochranných krytů sondy a modulu. Pro tento účel jsou využívány kombinované teplotně-vlhkostní senzory SHT-31 společnosti Sensirion (Sensirion AG, Švýcarsko), které byly zvoleny na základě testování provedeném ve 2. roce řešení projektu (*kap. 4.3, Menšík et al. 2019b*).



Obr. 4.41: Průběh parametrů prostředí (mikroklimatu) – teploty a relativní vlhkosti vzduchu ve výšce 15 cm a 150 cm zemi – měřené pomocí bezdrátové jednotky SFMUv2 umístěné na půdním typu černozem (vlevo) a kambizem (vpravo) v roce 2021 v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d. Knínice).

Senzory jsou osazeny na pinovém konektoru integrovaném ve speciální záslepce vyrobené na míru pomocí 3D tiskárny. Vnější (volná) strana průchodky je pak opatřena výměnným filtrem z filtrační netkané textilie.

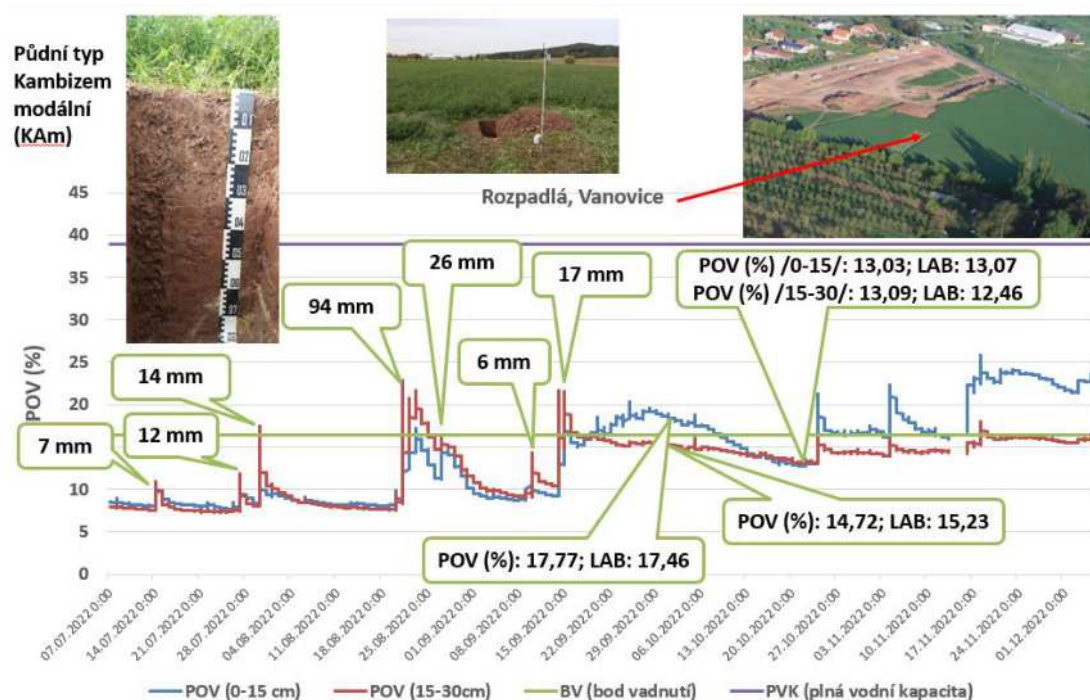
Obr. 4.41 znázorňuje ukázkou průběhu vývoje parametrů mikroklimatu (teploty a relativní vlhkosti vzduchu v místě instalace senzorů (tj. ve výšce 15 cm a 150 cm zemi) měřené pomocí bezdrátové jednotky SFMUv2 v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d. Knínice) pro jednotky instalované na půdním typu černozem a kambizem.

Modelový příklad - Vývoj půdní objemové vlhkosti (POV) v období červenec-prosinec 2022 měřené pomocí multisenzorové jednotky na lokalitě Rozpadlá (půdní typ kambizem)

Na základě získaných výsledků (laboratorní měření, měření v polních podmínkách /in situ/ apod.) v období 2018–2022 a dále na základě regresního modelování (komplexních statistických analýz) byly vypracovány a validovány přepočtové rovnice pro výpočet půdní objemové vlhkosti (POV) z měřené elektrické veličiny (Cp/pF/ - kapacita senzorového elementu).

Na příkladu lokality Rozpadlá (bod 5, obr. 4.20 Mapa rozmístění měřících bodů ...) je uveden průběh POV v hloubce 0–15 a 15–30 cm v období 07-12/2022 viz obr. 4.42. POV se v průběhu roku pohybovala od hodnoty cca 8 % do hodnoty cca 26 %. Dále byly stanoveny základní fyzikální parametry (půdní hydrolimity – bod vadnutí a polní vodní kapacita /PVK/). Hodnoty POV jsou na nízké úrovni, ve většině období pod bodem vadnutí, ke zlepšení došlo v horizontu 0–15 cm v posledním měsíci (listopad). V horizontu 15–30 cm je ve většině období nízký obsah POV. Byly provedeny náhodné odběry půdních vzorků pro stanovení POV laboratorní metodou (fyzikální váleček, resp. váženka). Na základě vyhodnocení viz obr. 4.42 můžeme konstatovat, že měření POV pomocí multisenzorové jednotky SFMUv2 je dostatečně přesné a má vypovídající hodnotu. Rozdíly stanovení se na dané lokalitě pohybují od 0,3–0,5 % POV. Na ostatních lokalitách viz obr. 4.21 (Mapa rozmístění měřících bodů ...) byly rozdíly stanoveny ve většině případech do 1,0–1,5 % POV. Při velmi nízkých vlhkostech v půdě (cca 8–10 %) mohou být rozdíly do 2,0–2,5 % POV, protože při testování bylo zjištěno, že půdě při takto nízkých POV již půda okolo čidel (půdních sond) není taková těsnost, jako při vyšších vlhkostech (obdobné problémy byly zjištěny /potvrzeny/ i u referenčních /standardních/ čidel).

Dále je uveden pro porovnání i průběh srážek za měsíc za období (07-09/2022) z klimatické stanice ČHMÚ Jevíčko (cca 8 km). Na obrázku je prokazatelné zvýšení POV po spadlých srážkách (citlivost nově vyvinutých čidel /půdních sond/ na zvýšení POV v půdě).



Srážky: Klimatická stanice ČHMÚ Jevíčko, VS Jevíčko, VÚRV, v.v.i.

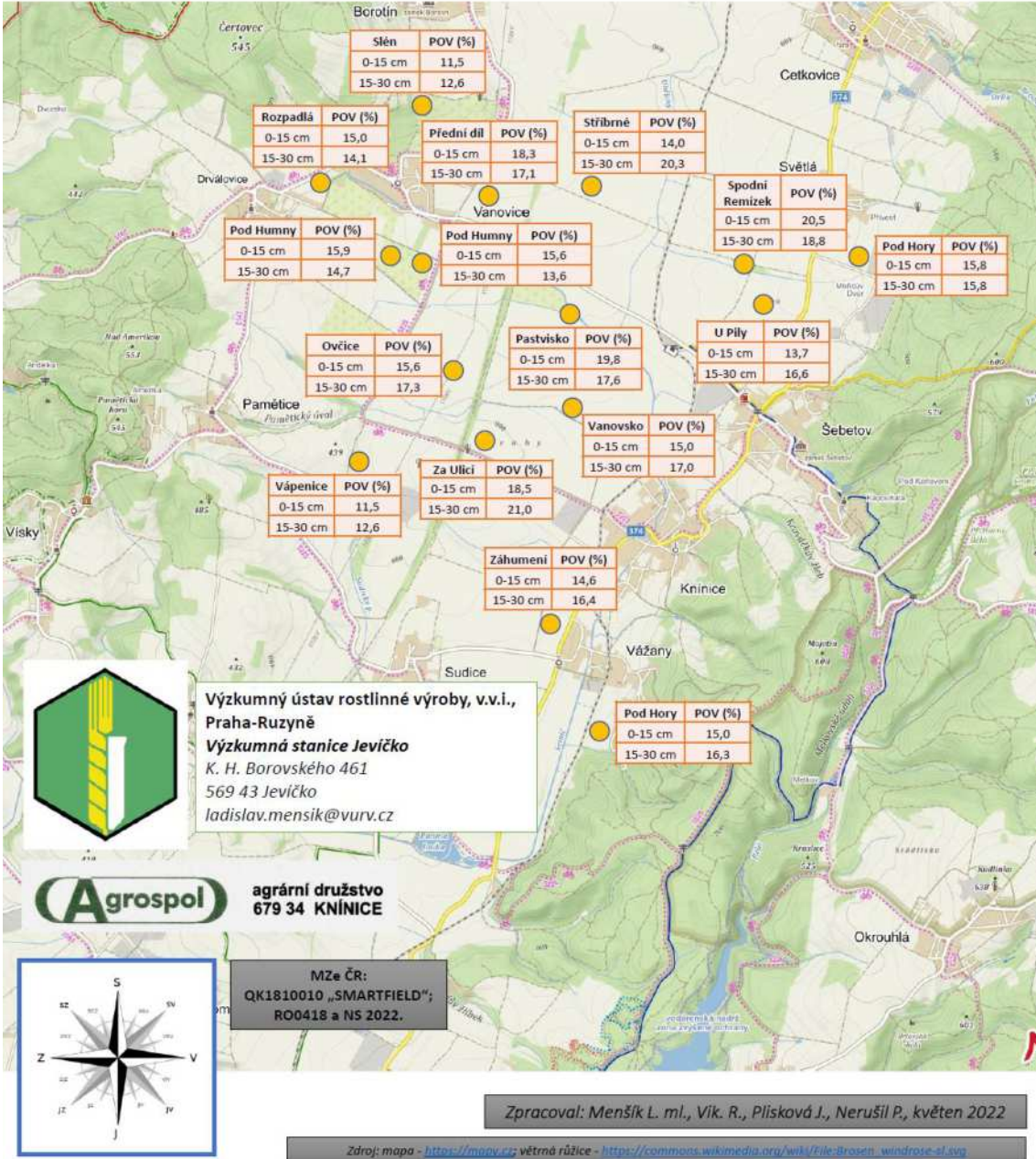
Pozn.: POV - půdní objemová vlhkost

Obr. 4.42. Vývoj půdní objemové vlhkosti (POV) v období červenec-prosinec 2022 měřené pomocí multisenzorové jednotky na lokalitě Rozpadlá (půdní typ kambizem) v porovnání s odběry z fyzikálních válečků stanovovaných laboratorně (LAB).

Modelový příklad – Bodová mapa POV v období 10–11. května 2022

V jarním období v oblasti Boskovické brázdy (Malé Hané) na v lokalitách měřících bodů na modelovém území podniku AGROSPOL, a.d. Knínice v roce 2022 bylo pomocí elektronické měřicí jednotky SFMUv1 bez bezdrátového přenosu dat a instalovaných čidel (půdních sond) vypracována mapa POV v období 10–11.5.2022. Ke každému bodovému měření v hloubkách 0–15 a 15–30 cm byly provedeny standardní odběry půdy pomocí fyzikálních válečků, resp. váženek ve třech opakováních v každé hloubce pro validaci měřených dat. Výsledná bodová mapa POV je uvedena na obr. 4.43. Výstup byl proveden pomocí aplikací MS PowerPoint a Excel. Následně pak byl aplikován (integrován) do vyvinutého software (SmartField Dashboard) viz obr. 4.13. (ukázka reportingu dat).

Bodová mapa půdní objemové vlhkosti (POV %) v období 10-11.5.2022



Obr. 4.43. Bodová map půdní objemové vlhkosti (POV) v období 10-11.5.2022 na modelovém území podniku AGROSPOL, a.d. Knínice.

5. Závěr

SmartField – systém sběru teplotních a vlhkostních dat, je realizován senzorovým systémem tvořeným autonomními multisenzorovými jednotkami pro měření teploty, vlhkosti vzduchu a půdy rozmístěnými v zájmové oblasti (modelový zemědělský podnik AGROSPOL, a.d. Knínice).

Na základě sběru a vyhodnocení dat z provozních podmínek za období 2021–2022 (viz kapitola 4.6) lze konstatovat, že byly prokázány statisticky významné závislosti (lineární regrese, koeficienty determinace R^2) POV na C_p (kapacita senzorového elementu) u senzorových elementů (konvenční, tištěný) s elektronickou vyhodnocovací jednotkou „SFMUv2“ a bezdrátovým přenosem dat pro hloubku sledování 0–15 cm byly stanoveny v poloprovozních a provozních podmínkách (*in situ*) od 0,78–0,80 u půdního typu černozem a 0,63–0,84 (tištěný, resp. konvenční) u půdního typu kambizem. Při ambulantních měřeních nově vyvinutých konvenčních senzorů s elektronickou vyhodnocovací jednotkou „SFMUv1“ v bodové síti bylo dosaženo R^2 (závislost POV na C_p) od 0,76 od 0,80 pro hloubku 0–15 cm a 0,62–0,80 pro hloubku 15–30 cm. Byly porovnány závislosti mezi senzorovými elementy (SFMU konvenční a tištěný senzor) a POV naměřenou pomocí referenčních senzorů TDR – CS 655 (Campbell Scientific, Inc., Logan, USA) - dlouhodobý provozní test multisenzorových měřicích jednotek *in-situ* (červenec-prosinec 2021). Vypracované korelace (regresní závislosti) mezi TDR a C_p pro konvenční senzorové elementy – $R^2 = 0,77–0,81$ a pro tištěné senzorové elementy: $R^2 = 0,82–0,88$. Dosažené regresní koeficienty v provozních podmínkách jsou vysoké až velmi vysoké a dále byly potvrzeny i v roce 2022. Vypracované korelace (regresní závislosti) mezi referenčním senzorem CS 655 a NTC termistorem (SFMUv2) pro měření teploty půdy ($^{\circ}\text{C}$) v hloubkách 0–15 a 15–30 cm pomocí MNČ mají parametry $R^2 = 0,76$ až 0,90.

Na základě získaných výsledků (laboratorní měření, měření v polních podmínkách *in situ* apod.) v období 2018–2022 a dále na základě regresního modelování (komplexních statistických analýz) byly vypracovány a validovány přepočtové rovnice pro výpočet půdní objemové vlhkosti (POV) z měřené elektrické veličiny (C_p/pF - kapacita senzorového elementu) a ty byly integrovány do vyvinutého software (SmartField Dashboard).

Naměřená data z multisenzorových měřicích jednotek (SFMUv2 /SmartField Measuring Unit, Version 2/) byly bezdrátově přenášena do vlastní brány (gateway) pomocí sítě sítě LoRaWAN (nebo může být přenos dat řešen s využitím sítě LoRa operátora České Radiokomunikace a.s. /ČRA/) a pak byla data ukládána do vzdálené databáze (LoRaTech server nebo Server ČRA). Uložená data byla za pomoci vyvinutého software (Smartfield Dashboard) zpracována, analyzována a vizualizována za pomoci platformy Google Workspace s využitím nástrojů Google Sheets a Google Data Studio.



Obr. 5.1: Vizualizace dat v prostředí softwarového nástroje SmartField Dashboard v oblasti Boskovické brázdy v období červenec-prosinec 2022.

Získaná data jsou uživateli interpretována formou časových grafů: (1) jako okamžité hodnoty s periodou jedné hodiny, (2) jako hodinové průměry, (3) jako denní průměrné hodnoty, (4) jako týdenní průměrné hodnoty. Rovněž je dostupná vizualizace polohy, interaktivní filtr umožňující volbu sledovaného období a tabulkový výstup pro snadný export naměřených hodnot ve vybraném období (hodinové průměry, vstupní data apod.) viz *obr. 5.1*. Další možností je i Reporting dat – automatické generování mapových přehledů měřených míst.

6. Přínos metodiky

Ekonomické přínosy vyvinutého a validovaného systému jsou v současné době těžko vyčíslitelné, protože představené výsledky projektu nemají v této fázi charakter komerčního využití (zatím se nenašel partner, který by uvedený systém začal vyrábět na základě licence získaných patentů CZ 309063 B6 a WO2022/037731A1 /WIPO-PCT/).

Nově vyvinutý automatický systém (koncepte autonomních měřících multisenzorových jednotek) sběru teplotních a vlhkostních dat na principu Internetu věcí (IoT), ale přináší významné zlepšení monitoringu vybraných parametrů mikroklimatu (teplota a vlhkost vzduchu a půdy) – data jsou přístupná online (24 hodin denně) a data pochází z obhospodařovaných polí uživatele automatického systému (vysoké prostorové rozlišení cca 1 multisenzorová jednotka na cca 100–150 ha obhospodařované plochy). Uživatel systému může na základě dat o teplotě a vlhkosti vzduchu, resp. půdy, optimalizovat setí/sázení v jarních obdobích, aplikovat minerální hnojiva s ohledem na obsah vody v půdě, pro rychlejší využití rostlinami, včas reagovat (ochrana rostlin apod.) na aktuální podmínky pro rozvoj různých patogenů (chorob), stejně tak jako na zvláštnosti růstu pěstovaných kultur (např. pozdní mrazíky v jarním období – ochrana sadů, výskyt extrémních situací – přísušky, trvalé sucho apod.). Přínosem je rovněž širší a rychlejší osvojení práce s moderními technickými řešeními naplňujícími koncept precizního zemědělství (Zemědělství 4.0) v cílové skupině uživatelů. Další přínosem je možnost využitelnosti naměřených dat (vysoké prostorové rozlišení) pro tvorbu a integraci mezioborových modelů pro uživatele v agro-sektoru, resp. státní správě (agrometeorologické předpovědi apod.).

7. Srovnání novosti postupů a uplatnění metodiky

Zemědělské praxi (prvovýrobě) jsou prostřednictvím této metodiky předkládány nejnovější poznatky, zkušenosti a perspektivy měření parametrů teploty a vlhkosti vzduchu a dále i teploty a vlhkosti půdy pomocí automatického systému (koncepte autonomních měřících multisenzorových jednotek) sběru teplotních a vlhkostních dat na principu Internetu věcí (IoT).

Originalita a jedinečnost řešení spočívá oproti stávajícím komplexním a cenově náročným systémům pro monitoring povětrnostních podmínek a parametrů půdy v konceptu autonomních měřících multisenzorových jednotek s technicky minimalistickým provedením.

Nový automatický má velmi reálný předpoklad se prosadit v precizním zemědělství (Zemědělství 4.0) zejména s ohledem na současné měnící se podmínky prostředí (probíhající globální klimatická změna) ve smyslu sledování (monitorování) parametrů klimatu, resp. mikroklimatu porostů a půdy (teplota, vlhkost), protože v budoucím zemědělském hospodaření (zemědělské výrobě) se tyto parametry stanou klíčovými faktory pro udržitelnou produkci zemědělských plodin a kvalitu potravin včetně krmiv.

8. Seznam publikací, které předcházely metodice

J_{imp} (Článek v odborném periodiku obsažený v databázi WoS)

Zitka, J., Sileny, J., Kudr, J., Koudelkova, Z., Ilieva, L., Richtera, L., Syrovy, T., Adam, V., & Zitka, O. (2022). Fully automated station for testing, characterizing and modifying screen-printed electrodes. *Analytical Methods*, 14(39), 3824–3830. <https://doi.org/10.1039/D2AY01123A>

- Milakin, K.A., Acharya, U., Minisy, I.M., Tumacder, D. Von, Morávková, Z., Taboubi, O., Syrový, T., Syrová, L., Pflieger, J., Bober, P., 2022. Tuning of hydrophobicity of conducting films cast from polyaniline-phytic acid-poly(N-vinylpyrrolidone) dispersions. *Progress in Organic Coatings* 163, 106666. doi: 10.1016/j.porgcoat.2021.106666
- Syrový T., Vik R., Pretl S., Syrová L., Hamá A., Kubá L., Menšík L. 2020. Fully Printed Disposable IoT Soil Moisture Sensors for Precision Agriculture. *Chemosensors* 8: 1–14. doi: 10.3390/chemosensors8040125
- Barpakos D., Moschos A., Syrový T., Koutsis T., Syrova L., Kaltsas G. 2020. A fully printed flexible multidirectional thermal flow sensor. *Flexible and Printed Electronics* 5: 035005. doi: 10.1088/2058-8585/aba6f4

J_{rec} (Článek v odborném periodiku)

- Menšík L. ml., Vik R., Pretl S., Běhounek J., Syrový T., Syrová L., Kubáč L., Menšík L. st. Možnosti uplatnění internetu věcí (IoT) v precizním zemědělství v ČR. *Úroda*. 2019, sv. vědecká příloha, s. 341–350.

P (Patent)

- Syrový T., Pretl S., Vik R., Čengery J., Hamáček A., Menšík L., Kubáč L. 2021. CZ 309063 B6 - Systém pro měření teploty a vlhkosti vzduchu a půdy s bezdrátovým přenosem dat a způsob jeho výroby. Univerzita Pardubice, Západočeská univerzita v Plzni, Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Centrum organické chemie. Přihláška: PV 2020-464, datum udělení: 24.11.2021, 24 s. In. *VĚSTNÍK ÚRADU PRŮMYSLOVÉHO VLASTNICTVÍ*, č. 1, 2022 (Praha - 5. ledna 2022), ISSN 2336-7288. (<https://isdv.upv.cz/webapp!/resdb.pta.frm>)
- Syrový T., Pretl S., Vik R., Čengery J., Hamáček A., Menšík L., Kubáč L. 2022. System for measuring temperature and moisture of air and soil with wireless data transmission and method of its production. Univerzita Pardubice, Západočeská univerzita v Plzni, Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Centrum organické chemie. IPN: WO2022/037731A1, WIPO/PCT, 24.02.2022. https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=WO&NR=2022037731A1&KC=A1&FT=D&ND=3&date=20220224&DB=EPODOC&locale=en_EP

F_{uzit} (Užitný vzor)

- Syrový T., Pretl S., Vik R., Čengery J., Hamáček A., Menšík L., Kubáč L. 2020. Systém pro měření teploty a vlhkosti vzduchu a půdy s bezdrátovým přenosem dat. Univerzita Pardubice, Západočeská univerzita v Plzni, Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Centrum organické chemie. Užitný vzor: CZ 34 562 U1 (Česká republika, Úřad průmyslového vlastnictví), 21 s.
- Pretl S., Vik R., Čengery J., Vaněk K., Hamáček A., Syrový T., Menšík L., Kubáč L. 2021. Měřicí jednotka. Univerzita Pardubice, Západočeská univerzita v Plzni, Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Centrum organické chemie. Užitný vzor: CZ 34 749 U1 (Česká republika, Úřad průmyslového vlastnictví), 22 s.

G_{funk} (funkční vzorek)

- Vik R., Pretl S., Čengery J., Vaněk K., Hamáček A., Menšík L., Syrový T., Kubáč L. 2020. Senzor pro měření teploty a vlhkosti půdy vybavený vyhodnocovacími a bezdrátovými komunikačními prvky. 22190-FV025-2020.
- Vik R., Pretl S., Čengery J., Běhounek J., Janda M., Hamáček A., Menšík L., Syrový T., Kubáč L. 2020. Senzor pro měření teploty a relativní vlhkosti mikroklimatu vybavený vyhodnocovacími a bezdrátovými komunikačními prvky, 22190-FV026-2020.
- Syrový T., Syrová L., Vik R., Pretl S., Čengery J., Hamáček A., Kubáč L., Menšík L. Funkční vzorek: Biodegradabilní senzorový element pro měření půdní objemové vlhkosti, 2020-FV018-UPCE-KPF.
- Vik R., Pretl S., Čengery J., Vaněk K., Menšík L., Syrový T., Kubáč L., Hamáček A. Funkční vzorek: Senzor pro měření teploty a vlhkosti mikroklimatu vybavený vyhodnocovacími prvky a USB rozhraním, 22190-FV026-2019.
- Vik R., Pretl S., Čengery J., Vaněk K., Menšík L., Syrový T., Kubáč L., Hamáček A. Funkční vzorek: Senzor pro měření teploty a vlhkosti půdy vybavený vyhodnocovacími prvky a USB rozhraním, 22190-FV027-2019.
- Syrový T., Syrová L., Vik R., Pretl S., Čengery J., Hamáček A., Kubáč L., Menšík L. Funkční vzorek: Tištěný senzorový element pro měření teploty půdy, 2019-FV014-UPCE-KPF.
- Syrový T., Syrová L., Vik R., Pretl S., Čengery J., Hamáček A., Kubáč L., Menšík L. Funkční vzorek: Tištěný senzorový element pro měření vlhkosti půdy, 2019-FV015-UPCE-KPF.

Z_{tech} (Ověřená technologie)

- Menšík L. ml., Hamáček A., Syrový T., Kubáč L., Vik R., Pretl S., Čengery J., Kašpar P., Soukup R., Vaněk, K., Syrová L., Černý J., Kunzová E., Hlisenkovský L., Nerušil P., Hýbl M., Kopecký P., Doležalová I., Štreblová A., Pfeř L., Menšík L. st. 2021. SmartField – systém sběru teplotních a vlhkostních dat (komplexní

multisenzorová platforma pro detekci teploty a vlhkosti vzduchu a současně i teploty a vlhkosti půdy v různých úrovních) pro podmínky precizního zemědělství na principu Internetu věcí. Ověřená technologie. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., 37 s.

Syrový T., Syrová L., Pretl S., Vik R., Čengery J., Hamáček A., Menšík L., Kubáč L. 2021. Postup tisku senzorů půdní vlhkosti na biodegradabilní substrát. Ověřená technologie. Univerzita Pardubice. 2021-OT005-UPCE-KPF.

R (Software)

Vik R., Pretl S., Čengery J., Vaněk K., Hamáček A., Menšík L., Syrový T., Kubáč L. 2021. Smartfield Dashboard – software pro vizualizaci dat z bezdrátových multisenzorových jednotek SFMUv2. Západočeská univerzita v Plzni. 22190-SW003-2021.

M (Konference)

Menšík L. 2022. SmartField - sběr teplotních a vlhkostních dat pro podmínky precizního zemědělství (Zemědělství 4.0) na principu Internetu věcí (IoT). In Menšík L., Lukáš J., Hlaváčková V. 2022. Precizní zemědělství v podmínkách ČR (webinář a seminář). Praha, Jevíčko. 07-08.12.2022 (CZ).

O (Ostatní)

Menšík L. ml., Vik R., Pretl S., Čengery J., Syrový T., Kubáč L., Hamáček A., Menšík L. st. Vývoj senzorových jednotek měření teploty a vlhkosti půdy pro podmínky precizního zemědělství v ČR na principu Internetu věcí (IoT). Sborník abstraktů. Pedologické dny 2019, 11.-13. září 2019, Srní, CZ, s. 64. /poster, abstrakt ve sborníku/

Syrový T., Kosova S., Krajcír M., Menšík L., Pretl S., Syrová L. Conformal printing of functional structures on 3D shaped objects and techniques for creation of related 3D models, 46th International research conference of Iarigai, 15–18 September 2019, Stuttgart, Germany. /vyzvaná přednáška/

Menšík L. ml., Hamáček A., Syrový T., Kubáč L., Menšík L. st. 2018. Komplexní multisenzorová platforma pro detekci teploty vzduchu a současně i teploty a vlhkosti půdy v různých hloubkách. In Madaras M., Mayerová M., Menšík, L.: Dlouhodobé polní pokusy a jejich přínos k výzkumu půdní kvality - Plodinné a půdní simulační modely: Sborník abstraktů ze semináře a workshopu. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha–Ruzyně: s. 18–19. ISBN 978-80-7427-303-2.

Syrový T., Sima K., Pretl S., Bourek J., Kubáč L., Fabík A. 2018. Printed Sensors for Applications from Smart Packaging to IoT Sensory Solutions, Austrian Packaging Day (COST Action FP1405 MC meeting and final conference), Vienna, Austria, 21. 11. 2018, Book of Abstract. p. 32–33, <http://www.actinpak.eu/exhibition-guide/>

Syrový T. 2018. Printed Sensors Towards To Healthcare, Environmental and IoT Sensing Applications, Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, 26. 11. 2018.

DP (Diplomové práce)

Vaněk K. 2021. Měření vlhkosti a teploty půdy. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Katedra materiálů a technologií.

Janda M. 2020. Testování tištěných senzorů teploty pro aplikace v precizním zemědělství. Plzeň, 2020. Diplomová práce.

Kosová Š. 2019. Tisk a charakterizace vodivých funkčních struktur na 3D objektech. Univerzita Pardubice, Diplomová práce.

Krajcír M. Tvorba 3D modelů objektů pomocí skenovacích a fotografických technik. Univerzita Pardubice, Diplomová práce. 2019

Literatura

- Behzad M., Seyed F.R., Yahya A. 2018. Application of dynamic model to predict some inside environment variables in a semi-solar greenhouse. *Information Processing in Agriculture*, 5: 279–288.
- Berg A., Sheffield J. 2018. Climate Change and Drought: the Soil Moisture Perspective. *Current Climate Change Reports*, 4(2), 180–191. <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0095-0>
- Bhatt R., Hossain, A. 2019. Concept and Consequence of Evapotranspiration for Sustainable Crop Production in the Era of Climate Change. In (Ed.), *Advanced Evapotranspiration Methods and Applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.83707>
- Bína J., Demek J. 2012. *Z nížin do hor: geomorfologické jednotky České republiky*. Praha, Academia. 344 s. ISBN 978-80-200-2026-0.
- Bista D.R., Heckathorn S.A., Jayawardena D.M., Mishra S., Boldt J.K. 2018. Effects of Drought on Nutrient Uptake and the Levels of Nutrient-Uptake Proteins in Roots of Drought-Sensitive and -Tolerant Grasses. *Plants (Basel, Switzerland)*, 7(2), 28. doi:10.3390/plants7020028
- Blanco M., Ramos F., Van Doorslaer B., Martínez P., Fumagalli D., Ceglar A., Fernández F.F. 2017. Climate Change Impacts on EU Agriculture: A Regionalized Perspective Taking into Account Market-Driven Adjustments. *Agricultural Systems*, 156: 52–66.
- Botter G., Peratoner F., Porporato A., Rodriguez-Iturbe I., Rinaldo A. 2007. Signatures of large-scale soil moisture dynamics on streamflow statistics across US climate regimes, *Water resources research*, 43.
- Brady N.C., Weil R.R. 2008. *The nature and properties of soils*. 14th ed. Upper Saddle River, N.J.: Pearson Prentice Hall.
- Brázdil R. *et al.* 2007. *Vybrané přírodní extrémny a jejich dopady na Moravě a ve Slezsku*. Brno, Praha, Ostrava: Masarykova univerzita, Český hydrometeorologický ústav, Ústav geoniky Akademie věd ČR, v.v.i., 2007. 432 s. ISBN 978-80-210-4173-8.
- Brázdil R., Trnka M. *et al.* 2015. *Historie počasí a podnebí v českých zemích XI: Sucho v českých zemích: minulost, současnost a budoucnost*. Centrum výzkumu globální změny Akademie Věd České republiky, v.v.i., 2015, Brno, 402 s., ISBN 978-80-87902-11-0.
- Budhu M. 2011. *Soil Mechanics and Foundations*. 3rd ed. New York: Wiley.
- CleverFarm 2022. <https://www.cleverfarm.ag/cs/produkty/senzory/>
- Cline W.R. 2007. *Global Warming and Agriculture: Impact Estimates by Country*. Washington DC: Center for Global Development.
- Collado A., Tentzeris M.M., 2013a. Inkjet-printed antennas, sensors and circuits on paper substrate. *IET Microwaves, Antennas Propag.* 7, 858–868. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2012.0685>
- CRA 2022. <https://www.cra.cz/cra-iot-internet-veci>
- Culek M. *et al.* 1995. *Biogeografické členění České republiky*. Praha, Enigma. 347 s.
- ČHMÚ 2020. Loňský rok byl v Klementinu druhý nejteplejší za 245 let. Dostupné na: <https://www.novinky.cz/domaci/clanek/lonsky-rok-byl-v-klementinu-druhy-nejteplejsi-za-245-let-40308844>
- ČR. 582 s., 1 CD. ISBN 80-86064-99-9.
- Demek J., Mackovčín P. (eds.) *et al.* 2006. *Hory a nížiny: Zeměpisný lexikon ČR*. Vydání II. Brno, AOPK
- Du T.L.T., Bui D.D., Nguyen M.D., Lee H. 2018. Satellite-Based, Multi-Indices for Evaluation of Agricultural Droughts in a Highly Dynamic Tropical Catchment, Central Vietnam. *Water*, 10, 659. <https://doi.org/10.3390/w10050659>
- Elbasiouny H., El-Ramady H., Elbehiry F., Rajput V.D., Minkina T., Mandzhieva S. 2022. Plant Nutrition under Climate Change and Soil Carbon Sequestration. *Sustainability*, 14, 914. <https://doi.org/10.3390/su14020914>
- Farm21 2022. <https://www.farm21.com/affordable-sensors/>
- Fikejs M., Jambor V., Menšík L., Dvořák L., 2017. HarvestLab's use on John Deere forage harvesters in practice. *Náš Chov* 11, 22–23. (in Czech)
- Fournier S., Reager J., Lee T., Vazquez-Cuervo J., David C., Gierach M. 2016. SMAP observes flooding from land to sea: The Texas event of 2015, *Geophysical Research Letters*, 43.
- Frank S., Witzke H.P., Zimmermann A., Havlík P., Ciaian P. 2014. Climate Change Impacts on European Agriculture: A Multi Model Perspective. *EAAE 2014 Congress „Agri-Food and Rural Innovations for Healthier Societies*, August 26-29, 2014, Ljubljana, Slovenia.
- Fu B., Wang J., Chen L., Qiu Y. 2003. The effects of land use on soil moisture variation in the Danangou catchment of the Loess Plateau, China. *Catena*, 54: 197–213.
- Green J.K., Seneviratne S.I., Berg A.M., Findell K.L., Hagemann S., Lawrence D.M., Gentine, P. 2019. Large influence of soil moisture on long-term terrestrial carbon uptake. *Nature*, 565(7740), 476–479. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0848-x>
- Green, P.J. Iteratively Reweighted Least Squares for Maximum Likelihood Estimation, and Some Robust and Resistant Alternatives. *J. R. Statist. Soc. B* 1984, 46, 149–192.

- Gunda T., Nawagamuwa U.P., Hornberger G.M. 2017. Combined impact of local climate and soil properties on soil moisture patterns. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 1–22. doi: <https://doi.org/10.5194/hess-2017-357>
- Heim Jr, R.R. 2002. A review of twentieth-century drought indices used in the United States, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83: 1149–1165.
- Hlišnikovský L., Kunzová E., Hejman M., Dvořáček V. 2015. Effect of Fertilizer Application, Soil Type, and Year on Yield and Technological Parameters of Winter Wheat (*Triticum aestivum*) in the Czech Republic. *Archive of Agronomy and Soil Science*, 61: 33–55.
- Holzman M.E., Rivas R., Bayala M. 2014. Subsurface soil moisture estimation by VI-LST method. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(11), 1951–1955. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2314617>
- Chamara N., Islam M.D., Bai G.F., Shi Y., Ge Y. 2022. Ag-IoT for crop and environment monitoring: Past, present, and future. *Agricultural Systems*, 203, 103497.
- Charlesworth P. 2000. *Irrigation Insights No. 1, Second Edition, Soil Water Monitoring*. Land & Water Australia, Canberra.
- Chaudhry S., Sidhu G.P.S. 2022. Climate change regulated abiotic stress mechanisms in plants: a comprehensive review. *Plant Cell Rep* 41, 1–31. <https://doi.org/10.1007/s00299-021-02759-5>
- ChirpStack 2022. <https://www.chirpstack.io/>
- IoT Portal CRA 2022. <https://www.iotport.cz/lorawan-sit-pro-iot>
- Jambor V., Loučka R., Menšík L., Hermut J., Nerušil P. 2020. Seminář k aktuálním problémům ve výživě skotu a produkci bioplynu v BPS, zejména v oblasti konzervace objemných krmiv a návaznosti na precizní zemědělství. 30. 1. 2020, Pasohlávky (CZ).
- Jarvis A., Lau C., Cook S., Wollenberg E., Hansen J., Bonilla O., Challinor A. 2011. An integrated adaptation and mitigation framework for developing agricultural research: synergies and trade-offs. *Exp Agric*, 47: 185–203.
- Johnson P. 2007. *The design of an integrated soil moisture sensor for agriculture*. Griffith University. Brisbane.
- Kakumanu M.L., Ma L., Williams M.A. 2019. Drought-induced soil microbial amino acid and polysaccharide change and their implications for C-N cycles in a climate change world. *Scientific Report* 9, 10968. Doi:10.1038/s41598-019-46984-1
- Kang Y., Khan S., Ma X. 2009. Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security—A review, *Progress in Natural Science*, 19: 1665–1674.
- Kerlink 2022. <https://www.kerlink.com/product/wirnet-station/>
- Kim S., Traille A., Lee H., Aubert H., Yoshihiro K., Georgiadis A., Collado A., Tentzeris M.M. 2013b. Inkjet-printed sensors on paper substrate for agricultural applications. *Eur. Microw. Week 2013, EuMW 2013 - Conf. Proceedings; EuMC 2013 43rd Eur. Microw. Conf.* 866–869.
- Kim T., Bao C., Hausmann M., Siqueira G., Zimmermann T., Kim W.S. 2019. 3D Printed Disposable Wireless Ion Sensors with Biocompatible Cellulose Composites. *Adv. Electron. Mater.* 5, 1–7. <https://doi.org/10.1002/aelm.201800778>
- Knox J., Hess T., Daccache A., Wheeler T. 2012. Climate change impacts on crop productivity in Africa and South Asia. *Environ Res Lett*, 7:034032.
- Koste, R.D., Dirmeye, P.A., Guo Z., Bonan G., Chan E., Cox P., Gordon C., Kanae S., Kowalczyk E., Lawrence D., *et al.* 2004. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation, *Science*, 305: 1138–1140.
- Kroulík M., Hůla J., Brant V. 2018. Field trajectories proposals as a tool for increasing work efficiency and sustainable land management. *Agronomy Research*, 16(4): 1752–1761.
- Kušová D., Těšitel J., Boukalová Z. 2017. Willingness to adopt technologies of precision agriculture: A case study of the Czech Republic. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 220: 109–117.
- Lindsey R., Dahlman L. 2020. Climate Change: Global Temperature. *Climate.Gov: News & Features*. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature>
- Lobell D.B., Schlenker W., Costa-Roberts J. 2011. Climate trends and global crop production since 1980. *Science* 2011, 333: 616–620.
- Lone B., Qayoom S., Singh P. *et al.* 2017. Climate Change and Its Impact on Crop Productivity. *British Journal of Applied Science & Technology*, 21: 1–15. doi: 10.9734/BJAST/2017/34148
- LoRaServer 2019. <https://loraserver.io/>
- Loratech 2019. <http://eshop.loratech.cz>
- LoraTech 2022. <http://eshop.loratech.cz/index.php>
- Loučka R., Homolka P., Jančík F., Koukolová V., Kubelková P., Tyrolová Y., Výborná A., Jambor V., Vosynková B., Nerušil P., Menšík L., Nedělník J., Lang J., Šindelková I., Kintl A. 2019. Precision farming to better results in nutrition, in: Loučka, R. (Ed.), *Elements of Precision Agriculture in Livestock Farming*. Institute of Animal Science Praha-Uhřetěves, Praha, 21 p.
- Lukas V., Nudert L., Duffková R., Fučík P., Mezera J. 2019. Mapa výnosového potenciálu pro Zemědělské družstvo Kojčice. URL: http://user.mendelu.cz/xlukas0/publikace/Lukas_Nmap_2018.pdf

- Manzoni S., Schimel J.P., Porporato A. 2012. Responses of soil microbial communities to water stress: results from a meta-analysis, *Ecology*, 93: 930–938.
- Massari C., Brocca L., Moramarco T., Tramblay Y., Lescot, J.F.D. 2017. Potential of soil moisture observations in flood modelling: estimating initial conditions and correcting rainfall, *Advances in Water Resources*, 74: 44–53.
- McCull K.A., Alemohammad, S.H., Akbar, R., Konings, A.G., Yueh, S., and Entekhabi, D. 2017. : The global distribution and dynamics of surface soil moisture. *Nature Geoscience*, 10: 100–104.
- Mekki K., Bajic E., Chaxel F., Meyer F. 2019. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment, *ICT Express*, 5(1):1–7.
- Meloun M., Militký J. 2011. *Statistical Data Analysis, A Practical Guide with 1250 Exercises and Answer Key on CD*; Woodhead Publishing India: New Delhi, ISBN 978-93-80308-11-1.
- Menšík L., Hamáček A., Syrový T., Kubáč L., Menšík L. *et al.* 2018. SMARTFIELD - Automatický systém sběru a zpracování teplotních a vlhkostních parametrů mikroklimatu a půdy pro podmínky precizního zemědělství v ČR na principu Internetu věcí (IoT). Průběžná zpráva za 3. rok řešení. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i. Praha. 52 s.
- Menšík L., Hamáček A., Syrový T., Kubáč L., Menšík L. *et al.* 2019b. SMARTFIELD - Automatický systém sběru a zpracování teplotních a vlhkostních parametrů mikroklimatu a půdy pro podmínky precizního zemědělství v ČR na principu Internetu věcí (IoT). Průběžná zpráva za 3. rok řešení. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i. Praha. 67 s.
- Menšík L., Hamáček A., Syrový T., Kubáč L., Menšík L. *et al.* 2020b. SMARTFIELD - Automatický systém sběru a zpracování teplotních a vlhkostních parametrů mikroklimatu a půdy pro podmínky precizního zemědělství v ČR na principu Internetu věcí (IoT). Průběžná zpráva za 3. rok řešení. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i. Praha. 40 s.
- Menšík L., Hermut J., Nerušil P. *et al.* 2020a. Možnosti pěstování čiroku a bérů v oblasti Malé Hané. Přednáška na odborném semináři, který se uskutečnil 30. 1. 2020 v Hotelu Termal v Pasohlávkách.
- Menšík L., Nerušil P., Míka V., Loučka R., Jambor V. 2019a. History and Current use of Near-Infrared Spectroscopy (NIRS) for the Analysis of Forage and Preserved Feed at Grasland Research Station Jevíčko in the Czech Republic. In: Jambor, V., Malá, S. 18th International Symposium Forage Conservation, Mendel University in Brno, August 13-16, 2019, Brno, Czech Republic, pp. 190-197. ISBN 978-80-7509-670-8.
- Murtaza, G. *et al.* 2015. Climate Change and Water Security in Dry Areas . In: Leal Filho, W. (eds) *Handbook of Climate Change Adaptation*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-38670-1_79
- Myers S.S., Zanobetti A., Kloog I., Bloom A.J., Carlisle E.A., Dietterich L.H., Fitzgerald G., Hasegawa T., Holbrook N.M., Huybers P., Leakey A.D.B., Nelson R., Ottman M.J., Raboy V., Sakai H., Sartor K.A., Schwartz J., Seneweera S., Tausz M., Usui Y. 2017. Rising CO2 threatens food quality. *Nature*, 510: 139–142.
- Němeček J., Muhlhanslová M., Macků J., Vokoun J., Vavříček D., Novák P. 2011. *Taxonomický klasifikační systém půd České republiky. 2. uprav. vyd. Praha, Česká zemědělská univerzita. 94 s. ISBN 978-80-213-2155-7.*
- Novák R., Hrtúsová T. 2018. *Precizní zemědělství v praxi. Česká spořitelna, Ekonomické a strategické analýzy EU Office / Knowledge Centre. 10 s.*
- Oušková V., Vlach M., Možný M. 2022. Suchá dekáda. *Statistika α My* 12(11/12): 32–34. <https://www.statistikaamy.cz/wp-content/uploads/2022/12/1804221112.pdf>
- Pender J.L., Kerr, J.M. 1998. Determinants of farmers' indigenous soil and water conservation investments in semi-arid India, *Agricultural Economics*, 19, 113–125.
- Porter, J.R. *et al.* 2014. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects* (eds Field, C. B. *et al.*) 485–533 (IPCC, Cambridge Univ. Press, 2014).
- Pospíšilová, L.; Vlček, V.; Hybler, V.; Hábová, M.; Jandák, J. *Standard Analytical Methods and Evaluation Criteria of Soil Physical, Agrochemical, Biological and Hygienic Parameters*; Mendel University in Brno: Folia Universitatis Agriculturae at Silviculturae Mendelianae Brunensis: Brno, 2016; ISBN 978-80-7509-438-4.
- Pretl S., Vik R., Čengery J., Vaněk K., Hamáček A., Syrový T., Menšík L., Kubáč L. 2021. *Měřicí jednotka. Univerzita Pardubice, Západočeská univerzita v Plzni, Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Centrum organické chemie. Užité vzor: CZ 34 749 U1 (Česká republika, Úřad průmyslového vlastnictví), 22 s.*
- Quitt E. 1971. *Klimatické oblasti Československa. Studia geographica* 16. Brno, ČSAV-GU: 80 s.
- Raj M., Gupta S., Chamola V., Elhence A., Garg T., Atiquzzaman M., Niyato D. 2021. A survey on the role of Internet of Things for adopting and promoting Agriculture 4.0. *Journal of Network and Computer Applications*, 187, 103107.
- Rayhana R., Xiao G.G., Liu Z. 2021. Printed sensor technologies for monitoring applications in smart farming: a review. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70, 1-19.
- Rejšek K., Vácha R. 2018. *Nauka o půdě. Agriprint, s.r.o. Olomouc. 527 s. ISBN 978-80-87091-82-1.*
- Rosenzweig C., Elliott J., Deryng D., Ruane A.C., Müller C., Arneth A., Boote K.J., Folberth C., Glotter M., Khabarov N., Neumann K., Piontek F., Pugh T.A.M., Schmid E., Stehfest E., Yang H., Jones J.W. 2014.

- Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111: 3268–3273.
- Sánchez-Lugo A., Berrisford P., Morice C., Nicolas J.P. 2018. Temperature. In *State of the Climate in 2018* (Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 99, Issue 8). http://polarmet.osu.edu/PMG_publications/sotc_2018_lr.pdf
- Siebert J., Sünemann M., Auge H. et al. 2019. The effects of drought and nutrient addition on soil organisms vary across taxonomic groups, but are constant across seasons. *Scientific Report* 9, 639. Doi:10.1038/s41598-018-36777-3
- Sigfox 2022. <https://www.sigfox.com/en/coverage>
- Silva L.C.R., Lambers H. 2021. Soil-plant-atmosphere interactions: structure, function, and predictive scaling for climate change mitigation. *Plant Soil* 461, 5–27. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04427-1>
- Smartcultiva 2022. http://www.smartcultiva.com/products_iiot_sensing_sensors_hydroponics.html
- Sophocleous M., Karkotis A., Georgiou J. 2020. A versatile, stand-alone system for a screen-printed, soil-sensing array for Precision Agriculture. In 2020 IEEE SENSORS (pp. 1-4). IEEE.
- Sowerby A., Emmett B.A., Tietema A., Beier C. 2008. Contrasting effects of repeated summer drought on soil carbon efflux in hydric and mesic heathland soils. In *Global Change Biology* (Vol. 14, Issue 10, pp. 2388–2404). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01643.x>
- Speight J.G. 2020. *Natural Water Remediation: Chemistry and Technology*. Butterworth-Heinemann. Elsevier Inc. ISBN 978-0-12-803810-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2013-0-16022-9>
- Starnet 2022. <https://www.starnet.cz/iiot/>
- Steenwerth K.L., Reynolds M.P., Sandoval Solis S., et al. 2014. Climate-smart agriculture global research agenda: scientific basis for action [electronic resource]. *Agriculture and Food Security*, 3 (11): 1–39.
- Syrový T., Pretl S., Vik R., Čengery J., Hamáček A., Menšík L., Kubáč L. 2021. CZ 309063 B6 - Systém pro měření teploty a vlhkosti vzduchu a půdy s bezdrátovým přenosem dat a způsob jeho výroby. Univerzita Pardubice, Západočeská univerzita v Plzni, Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Centrum organické chemie. Příhlaška: PV 2020-464, datum udělení: 24.11.2021, 24 s. In. VĚSTNÍK ÚRADU PRŮMYSLŮVÉHO VLASTNICTVÍ, č. 1, 2022 (Praha - 5. ledna 2022), ISSN 2336-7288. (<https://isdv.upv.cz/webapp/!resdb.pta.frm>)
- Syrový T., Pretl S., Vik R., Čengery J., Hamáček A., Menšík L., Kubáč L. 2020a. Systém pro měření teploty a vlhkosti vzduchu a půdy s bezdrátovým přenosem dat. Univerzita Pardubice, Západočeská univerzita v Plzni, Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Centrum organické chemie. Uživatelský vzor: CZ 34 562 U1 (Česká republika, Úřad průmyslového vlastnictví), 21 s.
- Syrový T., Syrová L., Vik R., Pretl S., Čengery J., Hamáček A., Kubáč L., Menšík L. 2019b. Funkční vzorek: Tištěný senzorový element pro měření teploty půdy, 2019-FV014-UPCE-KPF.
- Syrový T., Syrová L., Vik R., Pretl S., Čengery J., Hamáček A., Kubáč L., Menšík L. 2019a. Funkční vzorek: Tištěný senzorový element pro měření vlhkosti půdy, 2019-FV015-UPCE-KPF.
- Syrový T., Vik R., Pretl S., Syrová L., Hamáček A., Kubáč L., Menšík L. 2020b. Fully Printed Disposable IoT Soil Moisture Sensors for Precision Agriculture. *Chemosensors* 8: 1–14. doi: 10.3390/chemosensors8040125
- Šantrůčková H. 2014. *Základy ekologie půdy*. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. České Budějovice. 125 s. ISBN 978-80-7394-480-3.
- Štěpánová M. 2010. *Mapy podnebí Česka v prostředí Google maps*. Český hydrometeorologický ústav, Univerzita Palackého v Olomouci. Dostupné na: <http://www.geoinformatics.upol.cz/dprace/bakalarske/stepanova10/index.html>.
- Talavera J.M., Tobón L.E., Gómez J.A., Culman M.A., Aranda J.M., Parra D.T., Garreta L.E. 2017. Review of IoT applications in agro-industrial and environmental fields. *Computers and Electronics in Agriculture*, 283–297.
- The Things Network 2022. <https://www.thethingsnetwork.org/>
- Vaněk K. 2021. *Měření vlhkosti a teploty půdy*. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Katedra materiálů a technologií.
- Várallyay, G. et al. 2010. The impact of climate change on soils and on their water management, *Agronomy Research*, 8 (Special Issue II), 385–396.
- Vik R., Pretl S., Čengery J., Vaněk K., Menšík L., Syrový T., Kubáč L., Hamáček A. 2019a. Funkční vzorek: Senzor pro měření teploty a vlhkosti půdy vybavený vyhodnocovacími prvky a USB rozhraním, 22190-FV027-2019.
- Vik R., Pretl S., Čengery J., Vaněk K., Menšík L., Syrový T., Kubáč L., Hamáček A. 2019. Funkční vzorek: Senzor pro měření teploty a vlhkosti mikroklimatu vybavený vyhodnocovacími prvky a USB rozhraním, 22190-FV026-2019.
- Vodafone 2022. <https://www.vodafone.cz/mapa-pokryti/>
- Warrick A.W. 2002. *Soil Physics companion*. Boca Raton: CRC Press. ISBN 0-8493-0837-2.

- WatchNET IoT 2022. <https://www.watchnetiot.com/product-category/agricultural-sensors/>
- Whan K., Zscheischler J., Orth R., Shongwe M., Rahimi M., Asare E.O., Seneviratne, S.I. 2015. Impact of soil moisture on extreme maximum temperatures in Europe, *Weather and Climate Extremes*, 9, 57–67.
- Wu W., Li R., Shao J. 2022. Assessment of Regional Spatiotemporal Variations in Drought from the Perspective of Soil Moisture in Guangxi, China. *Water*, 14, 289. <https://doi.org/10.3390/w14030289>
- Yin H., Cao Y., Marelli B., Zeng X., Mason A. J., Cao, C. 2021. Soil sensors and plant wearables for smart and precision agriculture. *Advanced Materials*, 33(20), 2007764.

Seznam obrázků, tabulek a zkratek

Seznam obrázků

- Obr. 1.1: Obecné schéma uplatnění principů IoT v oblasti precizního zemědělství (převzato s úpravami z Talavera et al. 2017).
- Obr. 3.1: Zaplnění půdních pórů vodou v závislosti na vlhkosti půdy (Šantrůčková 2014).
- Obr. 4.1: Koncepte senzorového IoT systému SMARTFIELD.
- Obr. 4.2: (a) topologie dvouzónové kapacitní sondy umožňující současné měření půdní vlhkosti a teploty ve dvou hloubkách a ukázka jejich reálného provedení (b) v konvenční a (c) plně tištěné variantě (uhlíkový materiál kapacitního senzoru nanášený mikrodispenzínem, termistor tištěný sítotiskem).
- Obr. 4.3: (a) vysušené senzory na různých tiskových substrátech (smrkové dřevo, sklolaminát, dubové dřevo), (b) bubliny vzniklé v uhlíkové vrstvě vlivem odparu zbytkové vlhkosti dřeva.
- Obr. 4.4: Elektronický modul s kombinovaným teplotně-vlhkostním digitálním senzorem (vlevo) a funkční vzorek 22190-FV026-2019 “Senzor pro měření teploty a vlhkosti mikroklimatu vybavený vyhodnocovacími prvky a USB rozhraním” skládající se z elektronické řídicí jednotky a multiplexovací jednotky pro připojení kombinovaných teplotně-vlhkostních digitálních senzorů s rozhraním I2C.
- Obr. 4.5: Modul senzoru mikroklimatu s teplotně-vlhkostním senzorem Sensirion SHT-31.
- Obr. 4.6: Elektronická senzorová jednotka SFMUv2 (SFMU: SmartField Measuring Unit).
- Obr. 4.7: Blokové schéma modulárního systému.
- Obr. 4.8: Modulární multisenzorová měřicí jednotka (SFMUv2) s externím komunikačním modulem v instalačním boxu pro testování v reálných podmínkách (in situ).
- Obr. 4.9: Přehled nejnámějších sítí využívaných v oblasti IoT pro sběr dat.
- Obr. 4.10: Pokrytí ČR sítěmi nejdůležitějšími sítěmi IoT k listopadu 2022.
- Obr. 4.11: Pokrytí ČR sítěmi nejdůležitějšími sítěmi IoT k listopadu 2022 a relativní srovnání hlavních vlastností uvažovaných LPWAN sítí a požadavky IoT senzorového systému SmartField.
- Obr. 4.12: Diagram toku dat a struktury softwaru pro zpracování a vizualizaci dat z měřících jednotek SFMUv2.
- Obr. 4.13: Ukázka vizualizace dat v prostředí softwarového nástroje SmartField Dashboard z měřicí jednotky SFMUv2 v oblasti Boskovické brázdy (Malé Hané) v roce 2022 (nahore) a ukázka reportingu dat (dole).
- Obr. 4.14: Mapa zájmového území (upraveno podle <https://mapy.cz/>).
- Obr. 4.15: Pedologická mapa zájmového území (upraveno podle <http://mapy.geology.cz/pudy/>).
- Obr. 4.16: Mapa podnebí zájmové oblasti – Klimatické oblasti dle Quitta za období 1961–2000 (Štěpánová 2010).
- Obr. 4.17: Budova posklizňové linky (sila) a vlastní silo, na kterém je umístěna základnová stanice sítě LoRaWAN.
- Obr. 4.18: Instalace brány sítě LoRaWAN a příslušných antén na budově sila ve středisku Knínice (vlevo brána sítě LoRaWAN, uprostřed výložník s LTE anténou, vpravo výložník s anténou sítě LoRaWAN).
- Obr. 4.19: Předpokládané pokrytí sítě LoRaWAN modelového území ze základnové stanice ve středisku Knínice (plná čára) a pokrytí z druhé základnové stanice (záložní) ve středisku Vanovice (čárkovaně).
- Obr. 4.20: Mapa rozmístění měřících bodů a zařízení na modelovém území podniku AGROSPOL, a.d. Knínice v roce 2021 (upraveno podle <https://mapy.cz/s/hovalaroju>).
- Obr. 4.21: Mapa rozmístění měřících bodů a zařízení na modelovém území podniku AGROSPOL, a.d. Knínice v roce 2022 (upraveno podle <https://mapy.cz/s/hovalaroju>).
- Obr. 4.22: Instalace multisenzorových jednotek (červen 2021) na modelovém území podniku AGROSPOL, a.d. Knínice na půdním typu černozem a kambizem. Foto L. Menšík.
- Obr. 4.23: Instalace bodové sítě jednotek v pravidelné síti 50x50 m, resp. 25x25m pro měření půdní vlhkosti v hloubkách 0–15 a 15–30 cm (září/říjen 2021) na modelovém území podniku AGROSPOL, a.d. Knínice na půdním typu černozem a kambizem. Foto L. Menšík.
- Obr. 4.24: Instalace multisenzorových jednotek (červen 2022) na modelovém území podniku AGROSPOL, a.d. Knínice. Foto L. Menšík.
- Obr. 4.25: Kalibrační křivka půdní objemové vlhkosti (POV) pro konvenční a tištěný senzor v multisenzorové platformě s bezdrátovým přenosem dat na modelové lokalitě (poli) v hloubce 0–15 cm v provozních podmínkách v období červen–prosinec 2021 pro půdní typy černozem (vlevo) a kambizem (vpravo) v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d. Knínice).

- Obr. 4.26: Odběr půdních vzorků pro stanovení POV resp. PVG pomocí váženek a ambulantní měření pomocí elektronické měřicí jednotky SFMUv1 bez bezdrátového přenosu dat v provozních podmínkách v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d. Knínice). Foto L. Menšík.
- Obr. 4.27: Závislost půdní vlhkosti gravimetrické (PVG) na půdní objemové vlhkosti (PVO) pro půdní typ černozem (vlevo) a kambizem (vpravo) v provozních podmínkách v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d. Knínice).
- Obr. 4.28: Kalibrační křivka půdní objemové vlhkosti sensorového elementu v hloubce 0–15 cm (vlevo) a 15–30 cm (vpravo) v provozních podmínkách v období říjen–listopad 2021 (půdní typ černozem) v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d. Knínice).
- Obr. 4.29: Kalibrační křivka půdní objemové vlhkosti sensorového elementu v hloubce 0–15 cm (vlevo) a 15–30 cm (vpravo) v provozních podmínkách v období říjen–listopad 2021 (půdní typ kambizem) v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d. Knínice).
- Obr. 4.30: Vývoj vlhkosti půdy (prostorové zobrazení dat) na modelové lokalitě (poli) v hloubce 0–15 cm v provozních podmínkách v období říjen–listopad 2021 (půdní typ černozem) v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d. Knínice).
- Obr. 4.31: Instalace 3 ks referenčních senzorů Campbell CS-655 pro měření půdní objemové vlhkosti na půdním typu černozem a kambizem.
- Obr. 4.32: Vývoj kapacity sensorových elementů v závislosti na vlhkosti půdy v hloubce 0–15 cm v provozních podmínkách v období srpen 2021–leden 2022 (půdní typ černozem) v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d. Knínice).
- Obr. 4.33: Vývoj kapacity sensorových elementů v závislosti na vlhkosti půdy v hloubce 0–15 cm v provozních podmínkách v období srpen 2021–leden 2022 (půdní typ kambizem) v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d. Knínice).
- Obr. 4.34: Vzájemná korelace mezi kapacitou sensorových elementů a půdní objemovou vlhkostí (POV) naměřenou pomocí referenčních senzorů CS 655 pro půdní typy černozem (nahore) a kambizem (dole) v období srpen–prosinec 2021 v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d. Knínice).
- Obr. 4.35: Porovnání hodnot půdní objemové vlhkosti za období srpen–listopad 2021 naměřené pomocí referenčního senzoru Campbell CS 655 a kapacitních sensorových elementů spolu s bezdrátovou měřicí jednotkou SFMUv2 po zpětné kalibraci pro půdní typy černozem (vlevo) a kambizem (vpravo) v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d. Knínice).
- Obr. 4.36: Vzájemná korelace mezi kapacitou sensorových elementů (SFMU konv. - konvenční sensorový element) a půdní objemovou vlhkostí (POV) naměřenou pomocí referenčních senzorů CS 655 (TDR) pro půdní typ kambizem (hloubka 0-15 cm) v období červenec–prosinec 2022 v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d. Knínice).
- Obr. 4.37: Vzájemná korelace mezi kapacitou sensorových elementů (SFMU konv. - konvenční sensorový element) a půdní objemovou vlhkostí (POV) naměřenou pomocí referenčních senzorů CS 655 (TDR) pro půdní typ černozem (hloubka 0-15 cm /vlevo/ a 15-30 cm /vpravo/) v období červenec–prosinec 2022 v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d. Knínice).
- Obr. 4.38: Vývoj teploty půdy v hloubce 0–15 cm v provozních podmínkách v období srpen–listopad 2021 pro půdní typ černozem (vlevo) a kambizem (vpravo) v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d. Knínice).
- Obr. 4.39: Vzájemná korelace mezi teplotou půdy (°C) naměřenou pomocí referenčních senzorů CS 655 a senzorů SFMUv2 pro půdní typ černozem (vlevo 0–15 cm, vpravo 15–30 cm) v období červenec–prosinec 2022 v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d. Knínice).
- Obr. 4.40: Vzájemná korelace mezi teplotou půdy (°C) naměřenou pomocí referenčních senzorů CS 655 a senzorů SFMUv2 pro půdní typ kambizem (vlevo 0–15 cm, vpravo 15–30 cm) v období červenec–prosinec 2022 v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d. Knínice).
- Obr. 4.41: Průběh parametrů prostředí (mikroklimatu) – teploty a relativní vlhkosti vzduchu ve výšce 15 cm a 150 cm zemí – měřené pomocí bezdrátové jednotky SFMUv2 umístěné na půdním typu černozem (vlevo) a kambizem (vpravo) v roce 2021 v oblasti Boskovické brázdy (AGROSPOL, a.d. Knínice).
- Obr. 4.42: Vývoj půdní objemové vlhkosti (POV) v období červenec–prosinec 2022 měřené pomocí multisenzorové jednotky na lokalitě Rozpadlá (půdní typ kambizem) v porovnání s odběry z fyzikálních válečků stanovovaných laboratorně (LAB).
- Obr. 4.43: Bodová map půdní objemové vlhkosti (POV) v období 10-11-5.2022 na modelovém území podniku AGROSPOL, a.d. Knínice.
- Obr. 5.1: Vizualizace dat v prostředí softwarového nástroje Smartfield Dashboard v oblasti Boskovické brázdy v období červenec–prosinec 2021.

Seznam tabulek

Tab. 4.1: Dlouhodobé průměrné měsíční a roční teploty (°C) a srážky (mm) ze stanice Jevíčko (1991–2020) dle ČHMÚ Ostrava–Poruba.

Seznam zkratek

3D - třírozměrné
a.d. - agrární družstvo
AIC - Akaikeho informační kritérium
CE - půdní druh černozem
CO₂ - oxid uhličitý
Cp/pF/ - kapacita senzorového elementu
ČHMÚ - Český hydrometeorologický ústav
ČRA - České Radiokomunikace a.s.
DPS - deska plošných spojů
EU - Evropská unie
GSM - Groupe Spécial Mobile (digitální mobilní síť)
GZK - globální změna klimatu
I2C - interní datová sběrnice
IoT - Internet věcí (Internet of Things)
KA - půdní druh kambizem
km - kilometr
LIDAR - Light Detection And Ranging (metoda dálkového měření vzdálenosti)
LoRa - síť pro přenos dat
LoRaWAN - síť pro přenos dat
LoWLAN - Low Power WLAN
LPWAN - Low-Power Wide-Area Network
LTE - technologie vysokorychlostního internetu pro mobilní síť
m - metr
MCU - microcontroller unit (mikrokontrolér)
MEP - střední kvadratické chyby predikce
MNČ - klasická metoda nejmenších čtverců
MT - mírně teplá oblast
MZe ČR - Ministerstvo zemědělství České republiky
NEE - čistá ekosystémová výměna uhlíku
NTC - negative temperature coefficient (záporný teplotní koeficient)
OT - ověřená technologie
PC - osobní počítač
PCIe - standard systémové sběrnice
PoE - napájecí zdroj
POV - půdní objemová vlhkost
PVG - půdní vlhkost gravimetrická
R - korelační koeficient
R² - koeficient determinace
RFID - systém pro zónovou lokalizaci
SFMU - SmartField Measuring Unit
SFMUv1 - SmartField Measuring Unit, Version 1
SFMUv2 - SmartField Measuring Unit, Version 2
TDR - reflektometrie v časové oblasti (time domain reflektometry)
UAV - bezpilotní platforma
USB - univerzální sériová sběrnice
Wi-Fi - bezdrátová komunikace v počítačových sítích
WLAN - Wireless Local Area Network (bezdrátová lokální síť)

Přílohy

Půdní hydrolimity (dostupnost vody v půdě pro rostliny)

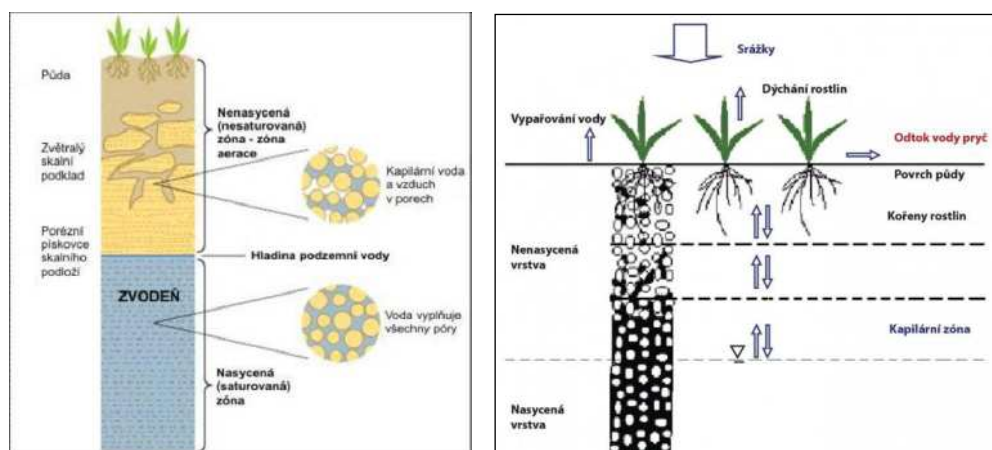
Půda je složitý systém minerální a organické hmoty, která je seskupená do částic neboli agregátů různé velikosti a struktury. Tyto agregáty mezi sebou vytvářejí póry, kde může proudit, nebo být zadržena voda, vzduch a další (Brady, Weil 2008). Voda je hlavní složkou všech organismů a je také prostředím, ve kterém probíhají všechny životní pochody (Šantrůčková 2014). Voda rozpouští většinu živin a má velkou tepelnou kapacitu (Speight 2020).

Za půdní vodu považujeme veškerou vodu v půdě obsaženou, a to s tím, že tato nevytváří souvislou hladinu, která je typická až pro vodu podzemní (Warrick 2002). Z toho plyne, že za půdní vodu považujeme vodu v jakémkoliv skupenství: i jako součást půdních plynů, i v podobě ledových krystalků – jediné, co je odlišující, je skutečnost, že tyto její podoby nevytváří hladinu jako takovou (Rejšek, Vácha 2018). Voda v půdě zaplňuje póry různého tvaru a velikosti (viz *tab. 1*) a schopnost půdy zadržovat vodu, tzv. retenční schopnost půdy, závisí na půdním druhu, struktuře i obsahu organické hmoty (Brady, Weil 2008; Budhu 2011; Šantrůčková 2014; Rejšek, Vácha 2018)³.

Tab. 1: Velikostní rozdělení půdních pórů a jejich schopnost zadržovat vodu v půdním profilu (upraveno podle Šantrůčková 2014; Rejšek, Vácha 2018).

Druh póru	Velikost (mm)	Popis
Makropóry	> 0,08	gravitační voda, provzdušňování půdy, snadné prorůstání kořenů
Mezopóry (zásobní mikropóry)	0,08–0,03	voda zadržena kapilárními silami, houby, kořenové vlášení
Mikropóry (reziduální mikropóry)	0,03–0,005	uvnitř agregátů, pomalý pohyb vzduchu, bakterie a houby – udržují vodu využitelnou pro rostliny
Ultramikropóry	0,005–0,0001	uvnitř jílových částic (shluků), voda není využitelná pro rostliny
Kryptopóry	< 0,0001	neosídlené, příliš malé i pro makromolekuly

Pokud se v půdních pórech vyskytuje kromě vody (ve všech třech skupenstvích) i vzduch, jedná se o nenasycenou zónu (zóna aerace). V zóně nasycení (saturace) se v pórech vyskytuje výhradně jen voda (Kozáková 2015) viz *obr. 1*.



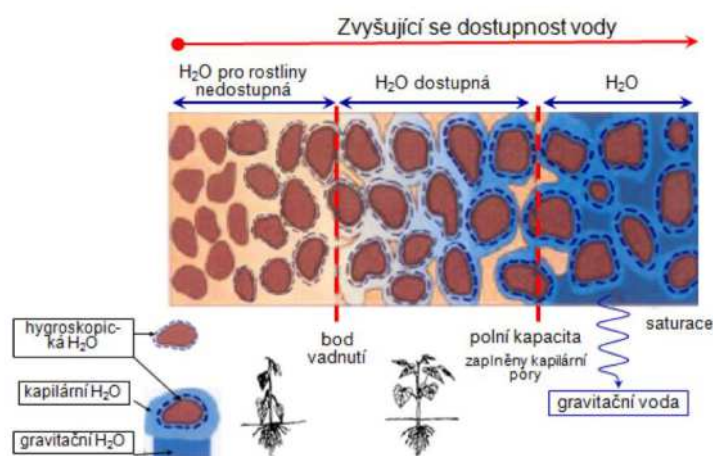
Obr. 1: Základní principy a pojmy související s existencí podzemních vod (upraveno podle Presse & Sievera, 1998; vlevo) a schéma vodních toků (černé části představují vodu, šipky představují směry vodních toků, upraveno podle Novák, Kovář 2017, vpravo).

³ Půda sama o sobě vykazuje mimořádně vysokou vododržnost – a to v první řadě půda humusem bohatá. Organické koloidy dovedou na svůj aktivní povrch navázat velké množství vody, než je jejich vlastní hmotnost. Chceme-li účinně bránit nadměrné ztrátě vody z krajiny, musíme věnovat v budoucnu pozornost dodávání organické hmoty do půdy, tak i aplikaci mechanizačních prostředků v zemědělství i lesnictví ve vhodných obdobích roku, stejně tak jako dodržování správných osevních postupů se zastoupením víceletých pícnin v zemědělství, tak i obnovu lesních porostů v lesním hospodářství.

Nasycená zóna se dělí na dvě oblasti: pásmo kapilárního zdvihu, které se nalézá nad hladinou podzemní vody, a pásmo zvodnění, které se nachází pod hladinou podzemní vody (Kříž 1983). Nenasycené nebo nasycené prostředí zásadním způsobem ovlivňuje infiltraci srážek a propustnost půdy (Kozáková 2015).

Obsah půdní vody závisí na formách poutání, a podle Kutílka (1978) vodu v půdě můžeme rozdělit do tří forem: a) gravitační voda – půdní voda pohybující se ve směru gravitace (gravitační půdní voda vzniká, když kapilární síly nestačí udržet všechnu vodu a začíná se uplatňovat síla gravitační; po srážkách se nasýtí póry ve svrchní půdní vrstvě, z nekapilárních pórů gravitační voda oteče dolů a uvolní prostor pro další srážky /Kutílek 1978/); b) adsorpční voda – půdní voda, vázaná koloidními silami na povrch půdních částic (tvorí na povrchu zrn souvislou blánu tlustou několik molekulárních vrstev, které jsou poutány fyzikálními silami povrchu pevné fáze a silami podmíněnými polárními vlastnostmi molekul vody /Netopil 1970/); c) kapilární voda – půdní voda vázaná kapilárními silami, tj. většinou (ale nikoliv vždy) se pohybující proti směru gravitace (dělí na dva druhy /Kutílek et al. 1993/: vodu zavěšenou /kapilární a semikapilární póry/ a kapilárně vzlínající /podepřenou/).

Množství vody v půdě je jeden z nejdůležitějších faktorů, který určuje koloběh živin, růst rostlin i biologickou aktivitu půdy (Bista et al. 2018; Siebert et al. 2019; Kakumanu et al. 2019). Voda je poutána v pórech kapilárními silami a adsorpcí (Budhu 2011) /pokrývá částice půdy nebo je poutána elektrostatickými silami na půdní koloidy a ionty s různým elektrickým nábojem/. Síla vazby vody se zvyšuje se snižující se velikostí pórů a půdních částic viz obr. 2.



Obr. 2: Zaplnění půdních pórů vodou v závislosti na vlhkosti půdy (Šantrůčková 2014).

Pro pochopení (vysvětlení) vztahů mezi půdními póry a vlhkostí půdy je zapotřebí definovat vodní potenciál půdy (Aslyng 1963, Hopmans, Bristow 2002). Potenciál půdní vody [J/kg] (dále jen „potenciál“) je jedna ze základních veličin, jejíž hodnota reprezentuje energii, kterou je voda vázaná v půdním prostředí (přesněji je to práce, kterou je třeba vložit na dodání čisté vody do daného místa v půdě). Znalost potenciálu a jeho rozložení nám poskytuje informace, ze kterých je možno stanovit směr a rychlost proudění vody v půdním prostředí (Warrick 2002). Toto proudění probíhá ve směru gradientu celkového potenciálu (tedy z místa s vyšším potenciálem do místa o potenciálu nižším) přičemž jeho rychlost je úměrná rozdílu těchto potenciálů (dle Darcyho zákona). Další důležitou charakteristikou půdního prostředí, která má přímou spojitost s potenciálem, je půdní vlhkost.

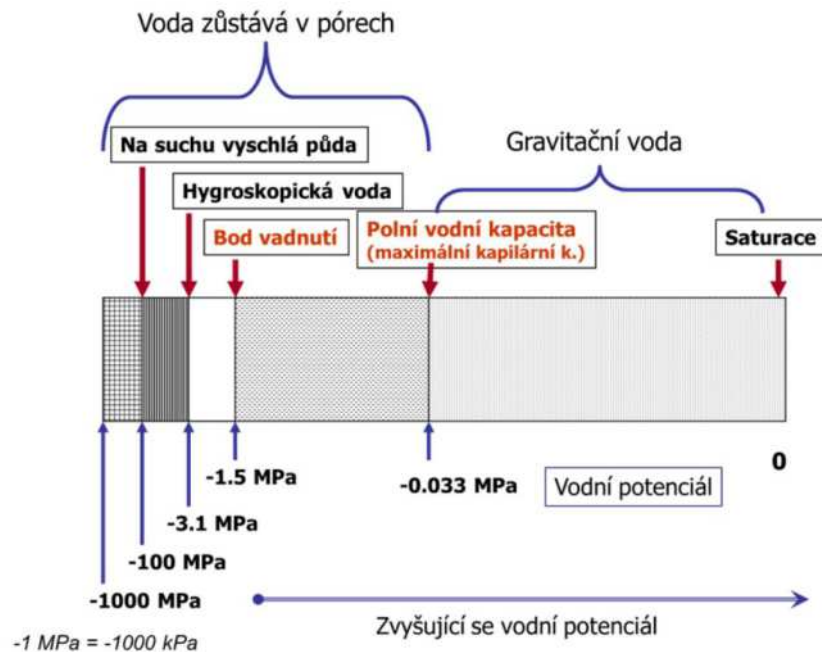
Celkový potenciál se skládá z gravitačního (ϕ_g), tlakového / vlhkostního (ϕ_p), pneumatického (ϕ_a) osmotického (ϕ_0) a zátěžového (ϕ_e) potenciálu. Hlavní složkou celkového potenciálu půdní vody je vlhkostní potenciál, který je způsoben přitažlivými silami půdních částic k vodě a kapilárními silami (tzv. maticními silami) a má proto zápornou hodnotu (práci není třeba vkládat na dodání, ale na odebrání vody z půdy); vyjadřuje se jako sací tlak nebo jako tlaková výška; logaritmus tlakové výšky se označuje pF^4 . Dalšími složkami vodního potenciálu půdy je potenciál gravitační (působení gravitace na vodu), osmotický (vliv rozpuštěných látek), pneumatický (tlak plynů) a zátěžový (vliv zatížení půdy). V běžných situacích se často zanedbávají pneumatický (ϕ_a) osmotický (ϕ_0) a zátěžový (ϕ_e) potenciál, protože projevují prakticky zanedbatelné účinky (Warrick 2002).

Půdní potenciál lze vyjádřit v několika tvarech: energie na jednotkovou hmotnost [J/kg], energie na jednotkový objem [Pa] – dříve [bar] nebo energie na jednotkovou tíhu [m]. Vyjádření potenciálu ve formě měrné energie

⁴ Retenční křivka půdy, graf závislosti sacího tlaku půdy nebo tlakové výšky (viz též vodní potenciál půdy) na vlhkosti půdy. Popisuje schopnost půdy zadržovat vodu při různé vlhkosti. Označuje se také jako retenční čára vlhkosti, popř. s logaritmickou osou potenciálu jako pF -křivka. Rozdíl mezi průběhem křivky při ovlhčování a odvodňování půdy se nazývá hystereze. Retenční křivka půdy je jedním ze základních nástrojů hydropedologie.

[J/kg] není v inženýrských aplikacích praktické. Z tohoto důvodu většinou pracujeme s potenciálem v tlakovém [Pa] či výškovém tvaru [m] (Marshall 1996).

Hodnota vodního potenciálu půdy závisí mj. na vlhkosti půdy (viz též retenční křivka půdy). Rozdíly vodního potenciálu mezi různými místy v půdě určují směr a spolu s infiltrací ovlivňují rychlost pohybu vody v půdě viz obr. 3.



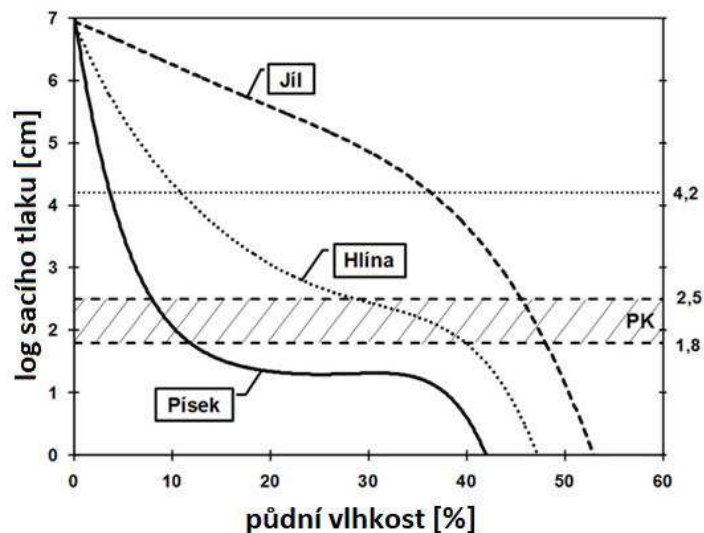
Obr. 3: Znázornění půdních hydrolimitů a definování vodního potenciálu (Šantrůčková 2014).

Retenční křivka je základní vztah popisující chování vlhkosti v nesaturovaném materiálu. Je to vztah mezi objemovou vlhkostí a zápornou tlakovou výškou - sacím tlakem (Vahedifard 2018). Když je materiál nasycený, sací tlak je 0. Graf se většinou zobrazuje v semilogaritmickém měřítku (obr. 4). Na průběh retenční křivky má zásadní vliv zrnitost, mineralogické složení, obsah humusu, hustota a půdní struktura (Matoušková et al. 2013).

Z retenční křivky můžeme zjistit několik bodů důležitých pro proudění vody. Je to saturovaná a reziduální vlhkost a vstupní hodnota vzduchu. Když jsou všechny póry zaplněny vodou, má materiál saturovanou vlhkost. Tato vlhkost trvá až do takového sacího tlaku, kdy dojde k proniknutí první vzduchové bubliny do materiálu. Tento bod se nazývá vstupní hodnota vzduchu. Zbývající vlhkost v materiálu, která již nejde ze vzorku odstranit zvyšováním sacího tlaku je reziduální vlhkost. Na retenční křivce jde ještě zobrazit polní kapacita, což je maximální množství vody, které je schopen daný materiál udržet, aniž by byl drénován gravitačním prouděním (Jandák et al. 2007).

Retenční křivka má jiný tvar pro zvlhčování a jiný pro vysychání materiálu (Mareš 2019). Tomuto jevu se říká hystereze retenční křivky a je dána zejména uzavíráním vzduchových bublin ve slepých pórech a rozdílným smáčecím úhlem na povrchu zrn (Kutílek 1984).

Za půdní hydrolimity považujeme konkrétní půdní vlhkost, která byla změřena za uzančích (smluvených, definovaných) podmínek. Využitelnost půdních hydrolimitů je v praxi omezená – standardně se nestanovují a využívají se především ve výzkumu a pokusnictví (Rejšek, Vácha 2018). Půdní hydrolimity je možné definovat jako hraniční hodnoty vlhkosti, jimiž jsou vzájemně odděleny jednotlivé kategorie vody v půdním prostředí. Hranice mezi kategoriemi přecházejí v určitém intervalu vlhkosti (Jandák et al. 2007). Teoreticky je půdní hydrolimit jasně vymezen: ve skutečnosti to tak ale nemusí být, neboť vlastní hranice půdních vlhkostí jednotlivých horizontů vytváří přechodové intervaly. V praxi pak může docházet při určitých vlhkostech ke kvalitativně odlišným situacím. Přejít od jednoho limitu k druhému je neostrý, ale plynulý (Rejšek, Vácha 2018). Půdní hydrolimit nemůže být vymezen jen a pouze hranicí mezi jednotlivými vlhkostmi: půdní hydrolimit je z praktického úhlu pohledu vymezen též hranicemi různé dostupnosti rostlinám a hranicemi různé pohyblivosti v půdním horizontu viz obr. 4. V současné době klimatických změn (měnících se podmínek prostředí), odlišného rozložení atmosférických srážek v průběhu roku i celkových ročních úhrnů je potřebné věnovat v budoucnu půdním hydrolimitům velkou pozornost.



Obr. 4: Retenční křivka pro písek, hlínu a jíl (upraveno podle Kutílka 1978; Jandáka et al. 2007).

Půdní hydrolimity je možné rozdělit na základní a aplikované. K základním půdním hydrolimitům řadíme retenční vodní kapacitu, bod snížené dostupnosti (lentokapilární bod), adsorpční vodní kapacitu a další (Jandák et al. 2007; Rejšek, Vácha 2018) viz podrobně *tab. 2*.

Dostupnost vody pro rostlinu je dána jejím obsahem v půdních kapilárách a schopností jimi vzlínat. Pokud je půda nasycená (jsou zaplněny všechny póry), je tato voda snadno dostupná pro rostliny i organismy (nasycení půdy vodou je na hydrolimitu plná vodní kapacita). Pokud je zaplněno cca 50–80 % kapilárních pórů vodou – optimální půdní vlhkost (nasycení půdy vodou je na hydrolimitu polní vodní kapacita). Při této vlhkosti je voda stále ještě snadno přístupná a současně je ve volných prostorech dostatečné množství vzduchu. Při snižující se vlhkosti (vysychání) voda opouští kapilární póry a zůstává jen v mikroforech /reziduální mikropóry/ (nasycení půdy vodou je na hydrolimitu bod snížené dostupnosti, resp. Lentokapilární bod) a při pokračujícím vysychání se již tvoří pouze tenký vodní film na povrchu částic (nasycení půdy vodou je na hydrolimitu bod vadnutí). Obsah vody, při kterém již rostliny nejsou schopny překonat síly poutající molekuly vody v půdě, rostliny vadnou. Pokud jsou zavlaženy, obnoví turgor. Bod trvalého vadnutí je dán množstvím vody v půdě, při němž rostlina vadne a již neobnoví turgor po zpřístupnění vody.

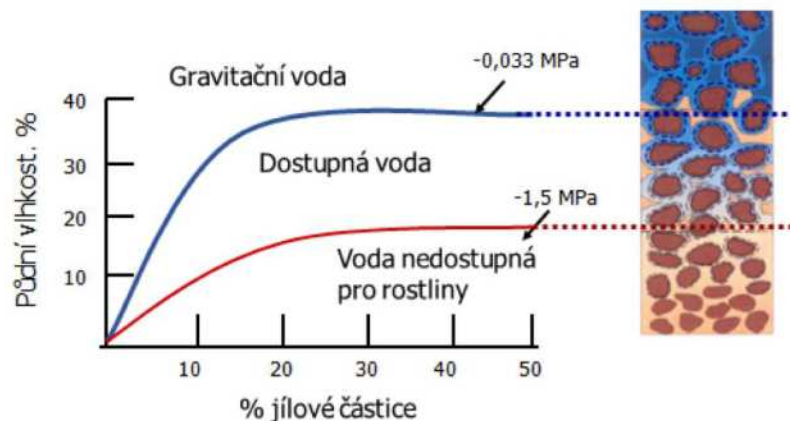
Využitelná vodní kapacita půd (Θ_P) určuje největší možné množství vody, které je plodina schopna odčerpat z půdy nasycené na polní vodní kapacitu (Θ_{PK}), někdy definované jako retenční vodní kapacita. Zásobu (obsah) vody v půdě je praktické vyjadřovat v mm vody, tj. litrech na metr čtvereční (Haberle et al. 2015). Například nasycení půdy na Θ_{PK} při vlhkost 30 % obj. odpovídá 300 l vody v m^3 půdy (hloubka 0–100 cm) a to odpovídá vrstvě 300 mm vody pod každým čtverečním metrem půdy (300 l v krychlovém metru představuje vrstvu vody o výšce 300 mm).

Hodnoty Θ_{PK} a Θ_V , tedy i Θ_P pro danou půdu závisí silně na zrnitostním složení půdy, zvláště obsahu nejmenších částic, jílu. Písčité půdy s velkými póry dovézít zadržet jen malé množství vody a voda, která v půdě zůstane, není pevně vázaná, díky nízkému obsahu jemných částic, koloidů a organické hmoty. Naopak jemnozrné půdy zadrží velké množství vody, ale velká část této vody je tak pevně vázaná na jemné částice, koloidy v mikroforech uvnitř agregátů, že není dostupná pro rostliny. Bod vadnutí pak nastává v písčitých půdách při relativní vlhkosti okolo 5 % hmotnostních a v jílovitých půdách již při vlhkostech okolo 15 % (Šantrůčková 2014) viz *obr. 5*.

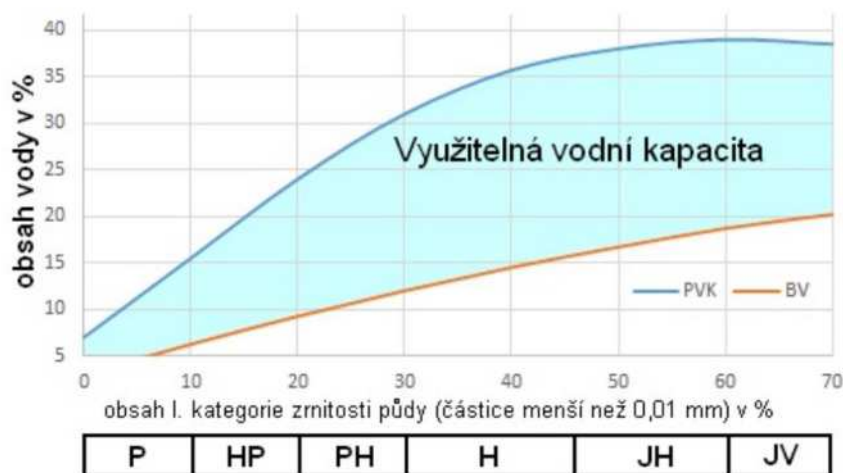
Schopnost půdy zadržovat vodu je dána také jejím zrnitostním složením. Proto dostupnost vody pro rostliny nelze charakterizovat pouze údajem o vlhkosti půdy, ale je třeba znát i půdní druh a obsah organické hmoty v půdě (Haberle et al. 2015). Toho využívají tzv. pedotransferové funkce, které umožňují vypočítat tyto základní hydrolimity (Θ_{PK} , Θ_V) nebo přímo Θ_P na základě zrnitostního složení půdy (*obr. 5*), případně i s pomocí dalších údajů, především obsahu organické hmoty (např. Váša 1960; Vlček et al. 2013, 2014). Na *obrázku 6* jsou schematicky znázorněny hodnoty $PVK - \Theta_{PK}$, $BV - \Theta_V$ a $VVK - \Theta_P$ pro odlišné půdní druhy. Nejmenší obsah využitelné vody mají písčité půdy, které mají také nejnížší úroveň $PVK - \Theta_{PK}$, těžké jílovité půdy jsou sice schopny zadržet velké množství vody (až 40 % obj.), ale velká část je nedostupná pro rostliny. Nejvyšší množství využitelné vody, 170–210 mm, tj. 170–210 l/m^2 (ve vrstvě 1 m), mají středně těžké hlinité a jílovito-hlinité půdy (Haberle et al. 2015).

Tab. 2: Přehled základních a aplikovaných hydrolimitů (upraveno podle Jandák et al. 2007; Rejšek, Vácha 2018).

Základní hydrolimity	
Retenční vodní kapacita Θ_{RVK}	Je to maximální množství vody, které je půda schopna zadržet vlastními silami v téměř rovnovážném stavu po nadměrném zavlažení (maximální infiltraci). Retenční vodní kapacita leží na rozhraní kategorie vody kapilární a gravitační. Z hlediska forem půdní vody je Θ_{RVK} půdní vlhkost daná kapilární vodou: gravitační voda se tedy ve vlhkostním intervalu tohoto hydrolimitu nemá projevit. Zrnitostně těžký horizont bude mít tento hydrolimit výrazně vyšší než horizont zrnitostně lehký.
Adsorpční vodní kapacita Θ_{AV}	Maximální množství vody, které půda zadrží v rovnovážném stavu koloidními silami. Z hlediska forem půdní vody je Θ_{AV} půdní vlhkost daná adsorpční vodou: kapilární voda se tedy ve vlhkostním intervalu tohoto hydrolimitu nemá projevit. Laboratorní stanovení je obtížné: není snadné odlišit, co je vázáno koloidní silou a co je produktem kapilární kondenzace.
Plná vodní kapacita Θ_S	Plná vodní kapacita je hodnota půdní vlhkosti při úplném nasycení všech půdních pórů vodou (maximální množství vody, která půda zadrží v rovnovážném stavu jakýmkoliv silami). Z hlediska forem půdní vody je Θ_S půdní vlhkost rovná pórovitosti daného horizontu. K odlišnostem dochází v případech, kdy nastanou objemové změny v půdě, případně půdní vzduch uzavřený v pórech sníží hodnotu Θ_S .
Maximální kapilární kapacita Θ_{MKK}	Je půdní hydrolimit stanovující hodnotu maximálního nasycení kapilárních půdních pórů. Jeho stanovení je dáno laboratorní metodou dle Nováka. Stav původní při Θ_{MKK} se blíží hodnotám půdní vlhkosti při Θ_{RVK} a Θ_{PK} .
Aplikované hydrolimity	
Lentokapilární bod Θ_{LB}	Je to stav půdní vlhkosti ležících na rozhraní energetických kategorií těžce pohyblivé a lehce pohyblivé kapilární vody. Dochází k přerušení souvislosti kapilární vody, vznikají prstence na styku půdních částic a voda zůstává v nejjemnějších kapilárách. Snižuje se podstatně pohyblivost půdní vody a tím i přítok vody ke kořenům rostlin. Vlhkost je přibližně v jedné třetině mezi polní kapacitou a bodem vadnutí.
Bod snížené dostupnosti Θ_{SD}	Je praktický shodný hydrolimitem Θ_{LB} . Pro jeho stanovení je doporučen výpočet dle vzorce $\Theta_{SD} = \Theta_V + 0,5 (\Theta_{PK} - \Theta_V)$.
Polní vodní kapacita Θ_{PK}	Polní vodní kapacita je půdní vlhkost, kterou je půda schopna v přirozeném strukturálním složení (tj. za své nezměněné struktury) udržet po delší dobu po úplném smělém nasycení vodou infiltrací, přičemž je po tuto dobu eliminována evapotranspirace. Z půdního profilu odtéká pouze voda gravitační. Polní vodní kapacita se prakticky shoduje s retenční vodní kapacitou, liší se pouze v metodě stanovení.
Bod vadnutí Θ_V	Je vlhkost půdy, kdy jsou rostliny trvale nedostatečně zásoby půdní vodou a vadnou (to odpovídá sacímu tlaku vyjádřenému hodnotou dekadického logaritmu záporné tlakové výšky půdní sondy $pF = 4,18$). Obsah vody, při kterém již rostliny nejsou schopny překonat síly poutající molekuly vody v půdě. Dojde-li k nárůstu půdní vlhkosti, rostliny již nereagují (neobnovují svůj růst) – jde tedy o dolní hranici fyziologicky těžko přístupné vody, tj. hranici, které je pro různé rostlinné taxony zcela odlišná – bod vadnutí je různý nejen pro různé rostliny, ale v rámci jednoho taxonu též pro dané vývojové stádium rostliny. Zároveň se projevují i takové jevy, jakými jsou osmotický tlak půdního roztoku či aktuální stav meteorologických prvků.
Využitelná vodní kapacita Θ_P	Využitelná vodní kapacita je rozdíl mezi polní vodní kapacitou a bodem vadnutí ($\Theta_P = \Theta_{PK} - \Theta_V$). Je to množství vody, které se může v půdě zadržet po delší období a je přitom využitelné pro rostliny.



Obr. 5: Závislost dostupnosti vody na půdním druhu /podílu jílovitých částic/ (upraveno podle Šantrůčková 2014).



Pozn.: Modrá křivka znázorňuje hydrolimit polní vodní kapacity (PVK - Θ_{PK}), červená křivka pak hydrolimit bodu vadnutí (BV - Θ_V), rozdíl mezi nimi udává využitelnou vodní kapacitu (VVK - Θ_P). Schéma je vytvořeno pro různé půdní druhy (P - písčité, HP - hlinitopísčité, PH - písčitohlinité, H - hlinité, JH - jílovitohlinité, JV - jílovitá zemina),

Obr. 6: Schématické znázornění dostupnosti vody při různém podílu jílnatých částic (částice $\leq 0,01$ mm). Upraveno podle Čermáka 2009; Haberleho et al. 2015.

Literatura:

- Aslyng H.C. 1963. Soil physics terminology. *Int. Soc. Soil Sci. Bull.* 23, 7–10.
- Bista D.R., Heckathorn S.A., Jayawardena D.M., Mishra S., Boldt J.K. 2018. Effects of Drought on Nutrient Uptake and the Levels of Nutrient-Uptake Proteins in Roots of Drought-Sensitive and -Tolerant Grasses. *Plants (Basel, Switzerland)*, 7(2), 28. doi:10.3390/plants7020028
- Brady N.C., Weil R.R. 2008. *The nature and properties of soils*. 14th ed. Upper Saddle River, N.J.: Pearson Prentice Hall.
- Budhu M. 2011. *Soil Mechanics and Foundations*. 3rd ed. New York: Wiley.
- Čermák V. 2009. Metodika zkoušek užité hodnoty brambor. Nabývá účinnosti dne 11.2.2009, ZUH/3 nahrazuje: VCU2/2.7 ze dne 12.12.2005. ÚKZÚZ Brno 2009.
- Haberle J., Vlček V., Kohut M., Středa T., Dostál J., Svoboda P. 2015. Bilance a určení dostupné zásoby vody v kořenové zóně plodin. *Metodika pro praxi. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i. Praha-Ruzyň*. 34 s.
- Hopmans J.W., Bristow K.L. 2002. Current Capabilities and Future Needs of Root Water and Nutrient Uptake Modeling. *Advances in Agronomy*, 103–183. doi:10.1016/s0065-2113(02)77014-4
- Jandák J., Prax A., Pokorný E. 2007. *Půdoznalství*. 1. vydání. Brno, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, ISBN: 978-80-7157-559-7.
- Kakumanu M.L., Ma L., Williams M.A. 2019. Drought-induced soil microbial amino acid and polysaccharide change and their implications for C-N cycles in a climate change world. *Scientific Report* 9, 10968. Doi:10.1038/s41598-019-46984-1

- Kozáková J. 2015. Variabilita hydroopedologických charakteristik v modelových povodích v pramenné oblasti Blanice. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta. 87 s.
- Kříž H. 1983. Hydrologie podzemních vod. Academia, Praha. 292 s.
- Kutílek M. 1978. Vodohospodářská pedologie. SNTL, Praha, 296 s.
- Kutílek M. 1984. Vlhkost pórovitých materiálů. SNTL, Praha, 210 s.
- Kutílek M., Císlerová M., Kuráž V. 1993. Hydroopedologie. ČVUT, Praha. 150 s.
- Mareš J. 2019. Určení hloubky výparové fronty v pískovcích a dalších poréznych materiálech: využití jehel obalených uraninem. Diplomová práce. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta. 75 s.
- Marshall T.J., Holmes J.W., Rose C.W. 1996. Soil Physics. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 978-0-521-45151-2.
- Matoušková V., Kandra B., Pražák P. 2013. Měření retenčních čar bobtnavých půd. Voda, půda a rostliny, Křtiny, ISBN 978-80-87577-17-2.
- Netopil R. 1970. Základy hydrologie povrchových a podpovrchových vod. Státní pedagogické nakladatelství, Praha. 212 s.
- Novák P., Kovář J. 2017. Jak zadržet vodu v půdě a co ovlivňuje její (ne)dostatek. *Agrojournal* [online]. 18. 9. 2017 [cit. 2020-01-12]. Dostupné z: <https://www.agrojournal.cz/clanky/jak-zadrzet-vodu-v-pude-a-co-ovlivnuje-jeji-ne-dostatek-296>
- Press F., Siever R. 1998. Understanding Earth, 2nd ed. with CD-ROM. xvi + 682 pp. New York, Basingstoke. ISBN 0 7167 2836 2.
- Rejšek K., Vácha R. 2018. Nauka o půdě. Agriprint, s.r.o. Olomouc. 527 s. ISBN 978-80-87091-82-1.
- Siebert J., Sünnemann M., Auge H. *et al.* 2019. The effects of drought and nutrient addition on soil organisms vary across taxonomic groups, but are constant across seasons. *Scientific Report* **9**, 639. Doi:10.1038/s41598-018-36777-3
- Šantrůčková H. 2014. Základy ekologie půdy. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. České Budějovice. 125 s. ISBN 978-80-7394-480-3.
- Vahedifard F., Toan C.D., Thota S.K., Ghazanfari E. 2018. Nonisothermal models for soil-water retention curve. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* **144**, Doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001939
- Váša J. 1960. Půdní vláhové charakteristiky. *Vodohospodářský časopis SAV*, VIII (3), s. 235–243.
- Vlček V., Hybler V., Hladký J., Pospíšilová L. 2014. Vybrané pedotransferové funkce a jejich vhodnost pro orientační hydrofyzikální charakteristiku půd. *Úroda*, **62** (12), 453–456.
- Vlček V., Hybler V., Pospíšilová L. 2013. Ověření vhodnosti vybraných pedotransferových funkcí pro stanovení bodu vadnutí v provozních podmínkách. *Úroda* **61** (12), 368–371.
- Warrick A.W. 2002. Soil Physics companion. Boca Raton: CRC Press. ISBN 0-8493-0837-2.

Název: SmartField – systém sběru teplotních a vlhkostních dat pro podmínky precizního zemědělství na principu Internetu věcí (IoT)

Autoři:

Ing. Ladislav Menšík, Ph.D.
prof. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
doc. Ing. Tomáš Syrový, Ph.D.
Ing. Lubomír Kubáč, Ph.D.
Ing. Ladislav Menšík
a kolektiv

Foto na obálce: Ing. Ladislav Menšík, Ph.D.

Vydal: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha–Ruzyně

Tisk: powerprint s.r.o., Brandejsovo nám. 1219/1, 16500 Praha Suchdol

Vydání: rok 2022

Počet stran: 55

Náklad: 50 ks

ISBN 978-80-7427-391-9

OPONENTNÍ POSUDEK

Formulář pro posudek oponenta z oboru Metodika

Název metodiky: SmartField – systém sběru teplotních a vlhkostních dat pro podmínky precizního zemědělství na principu Internetu věcí (IoT)

Autor/autoři: Ing. Ladislav Menšík, Ph.D.1, prof. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.2, doc. Ing. Tomáš Syrový, Ph.D.3, Ing. Lubomír Kubáč, Ph.D.4, Ing. Ladislav Menšík5 a kolektiv

Předkládající organizace: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.1)
Západočeská univerzita v Plzni2)
Univerzita Pardubice3)
Centrum organické chemie, s.r.o.4)
AGROSPOL, a.d. Knínice 5)

Projekt č.: / podpora na rozvoj výzkumné organizace č.: MZe NAZV QK1810010 „SmartField“

1) Splňuje metodika požadavky na strukturu metodiky?

ANO / NE

I) Cíl metodiky

Komentář:

Komplexní multisenzorová platforma pro detekci teploty a vlhkosti vzduchu a současně i teploty a vlhkosti půdy pro podmínky precizního zemědělství.



II) Vlastní popis metodiky

Komentář:

Metodika je zpracována na vysoké odborné úrovni včetně literárních zdrojů. Metodické postupy jsou velmi dobře zpracovány a prezentovány, včetně statistického zpracování dat (regresní korelace). Naměřená data z multisenzorových měřicích jednotek (SFMUv2 /SmartField Measuring Unit, Version 2/) jsou bezdrátově přenášena do vlastní brány (gateway) pomocí sítě LoRaWAN (nebo může být přenos dat řešen s využitím sítě LoRa operátora České Radiokomunikace a.s. (ČRA)). Jsou také ukládána do vzdálené databáze (LoRaTech server nebo Server ČRA). Uložená data jsou za pomoci vyvinutého software (SmartField Dashboard) zpracována, analyzována a vizualizována za pomoci platformy Google Workspace s využitím nástrojů Google Sheets a Google Data Studio.



III) Vyjádření k "novosti postupů"

Komentář:

Přínosem je zvýšení efektivity a rychlosti sběru potřebných dat v precizním zemědělství. Získaná data jsou uživateli interpretována formou časových grafů a výstupů: (1) jako týdenní průměrné hodnoty, (2) jako denní průměrné hodnoty, (3) okamžité hodnoty s periodou jedné hodiny. Rovněž je dostupná vizualizace polohy, interaktivní filtr umožňující volbu sledovaného období a tabulkový výstup pro snadný export naměřených hodnot ve vybraném období.



IV) Popis uplatnění metodiky (pro koho je určena, jakým způsobem bude uplatněna)

Komentář :

Metodické postupy jsou určeny farmářům v precizním zemědělství.



V) Ekonomické aspekty (odhad nákladů v tis. Kč a ekonomického přínosu uživatele v tis. Kč)

Komentář :

Ekonomické aspekty (přínosy) jsou zatím těžce vyčíslitelné, protože projekt je ve fázi, kdy se hledá výrobce na základě licence získaných patentů CZ 309063 B6, WO2022/037731A1/WIPO-PCT).



VI) Seznam použité literatury

Komentář :

Seznam použité literatury je uveden a je velmi rozsáhlý. Většina citací pochází ze zahraniční literatury.

VII) Seznam publikací, které předcházely metodice / výstupy z originální práce

Komentář :

Rozsáhlý seznam velmi kvalitních publikací (Jimp, Patenty, Užité vzory, Funkční vzorky apod.), které předcházely metodice jsou uvedeny.

2) Dedikace

= uvedení odkazu na příslušný projekt VaV/podporu na rozvoj výzkumné organizace

3) Uzavřená smlouva o využití výsledku (metodiky) s konkrétním uživatelem

Komentář:

Smlouva o využití výsledku (metodiky) je uzavřena s konkrétním uživatelem a to:
AGROSPOL, agrární družstvo
Knínice 338
679 34 Knínice
IČO: 49447564

4) SOUHRNNÉ VYJÁDŘENÍ

(odpovídá požadavkům na metodiku?)

Předložená metodika (metodika pro praxi) odpovídá požadavkům na certifikovanou metodiku. Je vypracována na vysoké odborné úrovni a je podložena seznamem publikací vlastních i zahraničních, včetně Jimp, patentů, užitečných vzorů apod. Její ekonomický přínos je zatím obtížně vyčíslitelný, protože zatím nedosáhla fáze komerčního využití a hledá se výrobce na základě licence získaných patentů CZ 309063 B6, WO2022/037731A1/WIPO-PCT). Je šetrná k životnímu prostředí, je efektivní a umožňuje aplikaci moderních technologií v cílové skupině uživatelů.

POSUDEK ZPRACOVAL/A: doc. RNDr. Lubica Pospíšilová, CSc.

Pracoviště: Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta

Ulice: Zemědělská 1

PSČ, Obec: 61300 Brno

Telefon: +420 545 133 059 **E-mail:** lubica.pospisilova@mendelu.cz

Prohlašuji, že nejsem v zaměstnaneckém či obdobném vztahu k subjektům, které předložily metodiku, nemám osobní ani obdobný vztah k žádnému z předkladatelů a není mi známa žádná skutečnost, která by mohla ovlivnit moji nepodjatost.

16.11.2022

.....
Datum



.....
Podpis / elektronický podpis
zpracovatele posudku

OPONENTNÍ POSUDEK

Formulář pro posudek pracovníka příslušného odborného orgánu státní správy
Metodika

Název metodiky: SmartField – systém sběru teplotních a vlhkostních dat pro podmínky precizního zemědělství na principu Internetu věcí (IoT)

Autor/autoři: Ing. Ladislav Menšík, Ph.D.1, prof. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.2, doc. Ing. Tomáš Syrový, Ph.D.3, Ing. Lubomír Kubáč, Ph.D.4, Ing. Ladislav Menšík5 a kolektiv

Předkládající organizace: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.1)
Západočeská univerzita v Plzni2)
Univerzita Pardubice3)
Centrum organické chemie, s.r.o.4)
AGROSPOJL, a.d. Knínice 5)

Projekt č.: / podpora na rozvoj výzkumné organizace č.: MZe NAZV QK1810010 „SmartField“

1) Splňuje metodika požadavky na strukturu metodiky?

ANO / NE

I) Cíl metodiky

ANO NE

Komentář:

Cílem předložené metodiky je podrobný popis systému pro sběr teplotních a vlhkostních dat (komplexní multisenzorová platforma pro detekci teploty a vlhkosti vzduchu a současně i teploty a vlhkosti půdy v různých úrovních) pro podmínky precizního zemědělství (Zemědělství 4.0) na principu Internetu věcí (IoT).

II) Vlastní popis metodiky

ANO NE

Komentář:

Metodika je formulována dle standardní struktury, jsou navrženy a dostatečně podrobně popsány nové postupy, velmi kvalitně je zpracovaná experimentální část zabývající se podrobným popisem systému pro sběr teplotních a vlhkostních dat pro podmínky precizního zemědělství. Tento systém je podložen 2 získanými patenty. Nově vyvinutý automatický systém sběru teplotních a vlhkostních dat na principu Internetu věcí přináší významné zlepšení monitoringu vybraných parametrů mikroklimatu dostupných online. Uživatel systému může na základě dat o teplotě a vlhkosti vzduchu a půdy optimalizovat setí/sázení v jarních obdobích, aplikovat minerální hnojiva s ohledem na obsah vody v půdě pro rychlejší využití rostlinami, včas reagovat na aktuální podmínky pro rozvoj různých chorob, stejně tak vhodně reagovat na výskyt extrémních situací jako jsou přísušky, trvalé sucho, jarní mrazíky apod.).

III) Vyjádření k "novosti postupů"

ANO NE

Komentář:

Potenciálním uživatelům jsou touto metodikou předloženy nejnovější poznatky a zkušenosti měření parametrů teploty a vlhkosti vzduchu a půdy pomocí automatického systému sběru teplotních a vlhkostních dat na principu Internetu věcí. Originalita řešení spočívá oproti stávajícím komplexním a cenově náročným systémům pro monitoring povětrnostních podmínek a parametrů půdy v konceptu autonomních měřicích multisenzorových jednotek s technicky minimalistickým provedením.

IV) Popis uplatnění metodiky (pro koho je určena, jakým způsobem bude uplatněna)

ANO NE

Komentář :

Metodika je primárně určena pro zemědělské subjekty hospodařící v systému precizního zemědělství.

V) Ekonomické aspekty (odhad nákladů v tis. Kč a ekonomického přínosu uživatele v tis. Kč)

ANO NE

Komentář :

Podle řešitelů, zatím nejde v současné době dobře vyčíslit ekonomické přínosy pro uživatele, protože chybí partner, který by uvedený systém začal vyrábět podle získaných patentů.

VI) Seznam použité literatury

Komentář :

V metodice je uveden rozsáhlý seznam kvalitních, převážené zahraničních titulů.



VII) Seznam publikací, které předcházely metodice / výstupy z originální práce

Komentář :

Seznam publikací, které předcházely metodice je uveden, tematicky odpovídají obsahu metodiky. Jedná se o výstupy typu Jimp (4x), Jrec (1x), P (2x), Fužit (2x), Gfunk (7x), Ztech (2x), R (1x), M (1x), O (5x) a 4x diplomová práce



2) Dedikace

= uvedení odkazu na příslušný projekt VaV/podporu na rozvoj výzkumné organizace



3) Uzavřená smlouva o využití výsledku (metodiky) s konkrétním uživatelem

Komentář:

Smlouva o využití metodiky je podepsána se subjektem AGROSPOL, agrární družstvo.



4) SOUHRNNÉ VYJÁDŘENÍ

(odpovídá požadavkům na metodiku?)

Předložený materiál odpovídá požadavkům kladeným na certifikovanou metodiku, představené postupy jsou nové a vysoce efektivní s velkým potenciálem pro zavedení v podnicích využívajících systém precizního zemědělství. Nevýhodou rychlého uplatnění v ČR může být právě pomalé rozšiřování precizního zemědělství. Po odborné stránce hodnotím metodiku velmi kladně.



POSUDEK ZPRACOVAL/A: Ing. Václav Kadlec, Ph.D.

Pracoviště: Ministerstvo zemědělství České republiky

Ulice: Těšnov 65/17

PSČ, Obec: 110 00, Praha 1

Telefon: +420221812722 E-mail: vaclav.kadlec@mze.cz

Prohlašuji, že nejsem v zaměstnaneckém či obdobném vztahu k subjektům, které předložily metodiku, nemám osobní ani obdobný vztah k žádnému z předkladatelů a není mi známa žádná skutečnost, která by mohla ovlivnit moji nepodjatost.

19.12.2022

Datum

Podpis / elektronický podpis
zpracovatele posudku

Ing. Martin Havičák

Jméno vedoucího pracovníka

19.12.2022

Datum

Podpis (případně razítko
organizace státní správy)
/elektronický podpis
vedoucího pracovníka

Smlouva o uplatnění metodiky č. 14/2022

zpracované v rámci řešení
výzkumného projektu QK1810010 „SmartField“,

uzavřená podle ustanovení § 1746 odst. 2 zákona č. 89/2012 Sb., občanský zákoník

Smluvní strany:

1. **Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.**
se sídlem Drnovská 507, 161 06 Praha 6
IČ: 00027006
DIČ: CZ00027006
Zastoupený *RNDr. Mikulášem Madarasem, Ph.D. (ředitel)*
(dále jen „poskytovatel metodiky“)

2. **AGROSPOL, agrární družstvo**
Knínice 338
679 34 Knínice
Česká republika
IČO: 49447564
DIČ: CZ49447564
zastoupený *Ing. Ladislavem Menšíkem (ředitel, prokurista)*
(dále jen „uživatel metodiky“)

Článek 1

Předmět smlouvy

1.1. Předmětem této smlouvy je uplatnění metodiky (dále jen „metodika“) zpracované v rámci řešení výzkumného projektu QK1810010 s názvem „*SmartField – systém sběru teplotních a vlhkostních dat pro podmínky precizního zemědělství na principu Internetu věcí (IoT)*“.

Článek 2

Autorství metodiky a cíl uplatnění metodiky

2.1. Autoři metodiky jsou: Ing. Ladislav Menšík, Ph.D., doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D., doc. Ing. Tomáš Syrový, Ph.D., Ing. Lubomír Kubáč, Ph.D., Ing. Robert Vik, Ph.D., Ing. Silvan Pretl, Ph.D., Ing. Jiří Čengery, Ph.D., Ing. et Ing. Petr Kašpar, Ph.D., Ing. Radek Soukup, Ph.D., Ing. Kryštof Vaněk, Ing. Lucie Syrová, Ph.D., Ing. Jiří Černý, Ph.D., Ing. Eva Kunzová, CSc., Ing. Lukáš Hlisenkovský, Ph.D., Ing. Pavel Nerušil, Ph.D., Ing. Miloslav Hýbl, Ph.D., Bc. Pavel Kopecký, RNDr. Ivana Doležalová, Ph.D., Ing. Alena Štreblová, Ing. Ladislav Pfejr, Ing. Ladislav Menšík. Zástupcem autorského týmu je Ing. Ladislav Menšík, Ph.D.

2.2. Účel metodiky je: systém pro sběr teplotních a vlhkostních dat (komplexní multisenzorová platforma pro detekci teploty a vlhkosti vzduchu a současně i teploty

a vlhkosti půdy v různých úrovních) pro podmínky precizního zemědělství (Zemědělství 4.0) na principu Internetu věcí (IoT).

Článek 3

Rozsah uplatnění metodiky a předpokládané přínosy

- 3.1.** Rozsah využití metodiky je: Podstatou metodiky je systém pro sběr teplotních a vlhkostních dat (komplexní multisenzorová platforma pro detekci teploty a vlhkosti vzduchu a současně i teploty a vlhkosti půdy v různých úrovních) pro podmínky precizního zemědělství (Zemědělství 4.0) na principu Internetu věcí (IoT). Koncepce systému: senzorový systém je tvořen autonomními multisenzorovými jednotkami pro měření teploty, vlhkosti vzduchu a půdy rozmístěnými v zájmové oblasti (modelový zemědělský podnik AGROSPOL Knínice, a.d.). Naměřená data z multisenzorových měřících jednotek (SFMUv2 /Smartfield Measuring Unit, Version 2/) jsou následně bezdrátově přenášena do vlastní brány (gateway) pomocí sítě LoRaWAN (nebo může být přenos dat řešen s využitím sítě LoRa operátora České Radiokomunikace a.s. /ČRA/) a pak jsou data ukládána do vzdálené databáze (LoRaTech server nebo Server ČRA). Uložená data jsou za pomoci vyvinutého software (Smartfield Dashboard) zpracována, analyzována a vizualizována za pomoci platformy Google Workspace s využitím nástrojů Google Sheets a Google Data Studio. Získaná data jsou uživateli interpretována formou časových výstupů (grafů): (1) jako týdenní průměrné hodnoty, (2) jako denní průměrné hodnoty, (3) okamžité hodnoty s periodou jedné hodiny. Rovněž je dostupná vizualizace polohy, interaktivní filtr umožňující volbu sledovaného období a tabulkový výstup pro snadný export naměřených hodnot ve vybraném období.
- 3.2.** Předpokládané přínosy jsou: Nově vyvinutý automatický systém (koncepce autonomních měřících multisenzorových jednotek) sběru teplotních a vlhkostních dat na principu Internetu věcí (IoT) přináší významné zlepšení monitoringu vybraných parametrů mikroklimatu (teplota a vlhkost vzduchu a půdy) – data jsou přístupná online (24 hodin denně) a data pochází z obhospodařovaných polí uživatele automatického systému (vysoké prostorové rozlišení cca 1 multisenzorová jednotka na cca 100–150 ha obhospodařované plochy). Uživatel systému může na základě dat o teplotě a vlhkosti vzduchu, resp. půdy, včas reagovat (ochrana rostlin apod.) na aktuální podmínky pro rozvoj různých patogenů (chorob), stejně tak jako na zvláštnosti růstu pěstovaných kultur (např. pozdní mrazíky v jarním období – ochrana sadů, výskyt extrémních situací – sucho apod.). Přínosem je rovněž širší a rychlejší osvojení práce s moderními technickými řešeními naplňujícími koncept precizního zemědělství (Zemědělství 4.0) v cílové skupině uživatelů. Další přínosem je možnost využitelnosti naměřených dat (vysoké prostorové rozlišení) pro tvorbu a integraci mezioborových modelů pro uživatele v agro-sektoru, resp. státní správě (agrometeorologické předpovědi apod.).

Článek 4

Úprava vlastnických a uživatelských práv k metodice

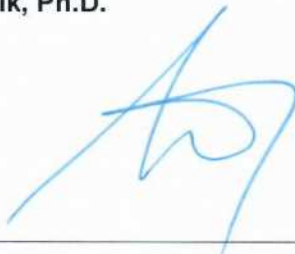
- 4.1.** Poskytovatel metodiky je oprávněn nakládat s metodikou uvedenou v bodě 1.1.

- 4.2.** Uživatel metodiky je oprávněn užívat tuto metodiku k dosažení cíle dle bodu 2.2. po dobu účinnosti této smlouvy. Časové omezení se nevztahuje na metodiky poskytované bezplatně dle bodu 5.1. a 5.8. této smlouvy.
- 4.3.** Uživatel metodiky je povinen postupovat při nakládání s metodikou v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., autorský zákon, ve znění pozdějších předpisů.
- 4.4.** Poskytovatel metodiky prohlašuje, že zpracovaná metodika nezasahuje do práv jiných osob z průmyslového nebo jiného duševního vlastnictví.
- 4.5.** Poskytovatel metodiky upozorňuje, že zpracovaná metodika, vyvinutá v rámci řešení výzkumného projektu je smluvně přístupná všem potenciálním uživatelům.
- 4.6.** Uživatel metodiky nemá právo předat metodiku jinému uživateli.

Článek 5

Závěrečná ustanovení

- 5.1.** Tato smlouva se uzavírá na dobu neurčitou s tříměsíční výpovědní lhůtou. Výpovědní lhůta začíná běžet od prvního dne měsíce následujícího po doručení výpovědi druhé smluvní straně.
- 5.2.** Tato smlouva je v souladu s ustanoveními smlouvy na řešení výzkumného projektu QK1810010.
- 5.3.** Jakékoliv změny a doplnění této smlouvy mohou být provedeny pouze po sobě číslovanými dodatky k této smlouvě, podepsanými zmocněnými zástupci smluvních stran.
- 5.4.** Závazky, práva a povinnosti vyplývající z této smlouvy přecházejí na eventuální právní nástupce smluvních stran.
- 5.5.** Tato smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem podpisu obou smluvních stran.
- 5.6.** Tato smlouva se vyhotovuje ve třech stejnopisech, z nichž každý má platnost originálu. Každá smluvní strana obdrží jeden stejnopis. Jeden stejnopis obdrží poskytovatel účelové podpory na řešení výzkumného projektu v rámci, níž byla metodika zpracována.
- 5.7.** Název a specializace metodiky je součástí této smlouvy. Poskytovatel metodiky předá uživateli při podpisu smlouvy popis této metodiky i v elektronické podobě.
- 5.8.** Metodika je poskytována uživateli bezplatně.
- 5.9.** Údaje o metodice pro evidenci v Rejstříku informací o výsledcích (RIV) dodá příslušný poskytovatel účelové podpory (Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.).
- 5.10.** Tato smlouva bude uvedena ve zprávě o řešení výzkumného projektu za rok 2022.

Za autora metodiky (za autorský tým)	Ing. Ladislav Menšík, Ph.D.
V Jevíčku dne: 12. prosince 2022	(jméno/podpis) 

Podpisy smluvních stran

Za poskytovatele metodiky	RNDr. Mikuláš Madaras, Ph.D. (ředitel)
V Praze dne: 14. prosince 2022	 (jméno a podpis statutárního zástupce, razítko) 
Za uživatele metodiky	Ing. Ladislav Menšík (ředitel)
V Kninicích dne: 13. prosince 2022	 (jméno a podpis statutárního zástupce, razítko) 

v y d á v á

OSVĚDČENÍ

MZE-3318/2023-13134

o uznání metodiky v souladu s podmínkami Metodiky hodnocení výzkumných organizací a programů účelové podpory výzkumu, vývoje a inovací, schválené usnesením vlády dne 8. února 2017, číslo 107 a její samostatné přílohy č. 4 schválené usnesením vlády dne 29. listopadu 2017 č. 837.

Název metodiky: **SmartField – systém sběru teplotních a vlhkostních dat pro podmínky precizního zemědělství na principu Internetu věcí (IoT)**

Autoři: **Ing. Ladislav Menšík, Ph.D. (1), prof. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D. (2), doc. Ing. Tomáš Syrový, Ph.D. (3), Ing. Lubomír Kubáč, Ph.D. (4), Ing. Ladislav Menšík (5) a kolektiv**

Název organizací: **Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i. (1)
Západočeská univerzita v Plzni (2)
Univerzita Pardubice (3)
Centrum organické chemie, s.r.o. (4)
AGROSPOL, a.d. Knínice (5)**

Místo vydání: **Praha**
Rok vydání: **2023**

Metodika byla vypracována v rámci výzkumného projektu/podpory na rozvoj výzkumné organizace č. **MZe NAZV QK1810010 „SmartField“**.

Jméno zástupce odborného útvaru státní správy: **Mgr. Jan Radoš**
Funkce zástupce odborného útvaru státní správy: **ředitel odboru**

V Praze dne: 17.1.2023

Mgr. Jan Radoš

Digitální podpis:
19.01.2023 18:02

.....
Podpis/elektronický podpis zástupce
odborného útvaru státní správy

Souhlas ředitele Odboru precizního zemědělství, výzkumu a vzdělávání MZe: **Mgr. Jan Radoš**

V Praze dne: 17.1.2023

Mgr. Jan Radoš

Digitální podpis:
19.01.2023 18:03

.....
Podpis/elektronický podpis
ředitele/ředitelky Odboru precizního
zemědělství, výzkumu a vzdělávání