

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra pedologie a ochrany půd



Metodika lokálního monitoringu půdních vlhkostí na zemědělských pozemcích ohrožených suchem

Certifikovaná metodika

prof. Ing. Radka Kodešová, CSc.

Ing. Ondřej Jakšík, Ph.D.

Ing. Aleš Klement, Ph.D.

Ing. Miroslav Fér, Ph.D.

Ing. Antonín Nikodem, Ph.D.

Ing. Lukáš Brodský, Ph.D.

Praha, 2015

Adresa autorů:

prof. Ing. Radka Kodešová, CSc., Ing. Ondřej Jakšík, PhD.,
Ing. Aleš Klement, PhD., Ing. Miroslav Fér, PhD., Ing. Antonín, Nikodem, PhD.,
Ing. Lukáš Brodský, Ph.D.

Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta agrobiologie, potravinových
a přírodních zdrojů, Katedra pedologie a ochrany půd

Kamýcká 129, 165 21 Praha 6 – Suchbát

WWW.CZU.CZ

ISBN: 978-80-213-2547-0

Tato metodika vznikla za finanční podpory Evropské kosmické agentury (ESA, European Space Agency) a programu ESA ARTES 20 (Integrated Applications Promotion) v rámci řešení projektu DROMAS - Agricultural Drought Monitoring and Assessment Driven by Satellites. Obsahem této metodiky je návrh strategie monitoringu půdních vlhkostí na pozemcích, které byly vytipovány jako potenciálně ohrožené suchem. Nicméně stejný postup (výběr a příprava čidel) by měl být realizován při monitoringu půdních vlhkostí i za jiným účelem, například při hodnocení režimu půdní vody na geomorfologicky členitých územích, kde je půda ohrožena vodní erozí a podobně. Metodika zahrnuje návrh vhodných čidel, jejich kalibraci, rozmístění čidel na pozemku a časový harmonogram monitoringu. Dále je ukázáno, jak lze z průběhu monitorovaných půdních vlhkostí vyhodnotit dostupnost vody pro rostliny a tím na daném pozemku a v monitorovaném období prokázat či vyvrátit výskyt půdního sucha.

Oponenti:

Ing. Miroslav Tesař, CSc., Ústav pro hydrodynamiku, AV ČR

Ing. Veronika Jirků, Ph.D., Ministerstvo zemědělství

Obsah:

1. Úvod	5
2. Cíle	5
3. Vlastní popis metodiky	6
3.1. Výběr čidel pro měření půdní vlhkosti	6
3.2. Kalibrace čidel pro měření půdní vlhkosti.....	7
3.3. Časový harmonogram monitoringu půdních vlhkostí	15
3.4. Instalace čidel na pozemcích	16
3.5. Hodnocení půdních vlhkostí	19
4. Přínos metodiky	22
5. Srovnání novosti postupů.....	22
6. Popis uplatnění metodiky.....	23
7. Ekonomické aspekty.....	23
8. Dedikace	23
Literatura	24
Seznam použité související literatury	24
Normy pro stanovení fyzikálních a hydraulických charakteristik půdy.....	25
Seznam předcházejících publikací autorů týkající se kalibrace čidel pro měření půdní vlhkosti	26
Summary.....	27

1. Úvod

Globální změny klimatu, které mají za následek extrémní jevy, jako jsou povodně či naopak extrémní sucha, negativně ovlivňují zemědělskou produkci jak na území ČR, tak v celé Evropě. Nedostatek atmosférických srážek a ekonomické škody v oblasti zemědělství v důsledku sucha se stávají velmi častým problémem. Škody lze vyčíslit jak na straně zemědělské výroby (ztráty v zemědělské produkci), tak v případě státní správy (kompenzace vyplácené zemědělským podnikům). Monitoringem klimatického, hydrologického i půdního sucha se zabývá Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ). Kvalifikace sucha (a následně i vzniklých škod) je založena především na meteorologických datech. K dispozici jsou i data půdních vlhkostí měřených na vybraných stanicích, které ale vypovídají o specifických podmínkách na dané stanici (půdní typ, obvykle rovinný povrch, upravený travní porost, atd.). Tato síť nemůže postihnout informace o půdních vlhkostech v potřebném detailu (tj. nerovnoměrnou distribuci srážek, morfologii terénu, půdní variabilitu, nároky určitých plodin na vodu a extrakci vody z půdy atd.). Řada lokálních extrémů nemusí být patrná z globálních map, které jsou také veřejně dostupné na portálu ČHMÚ <http://portal.chmi.cz/portal/dt>. Je tedy žádoucí, aby přímo na takových zemědělských pozemcích proběhl lokální monitoring půdních vlhkostí, který by negativní vliv vlhkostních podmínek prokázal. Na druhou stranu škody na zemědělské produkci nemusejí vždy vzniknout v důsledku půdního sucha. V takových případech by proto bylo vhodné doplňujícím monitoringem vliv nevhodných vlhkostních podmínek vyvrátit.

2. Cíle

Cílem této metodiky je poskytnout návod jak postupovat při návrhu systému lokálního monitoringu půdních vlhkostí za účelem potvrzení či vyvrácení negativního vlivu půdního sucha na zemědělskou produkci.

3. Vlastní popis metodiky

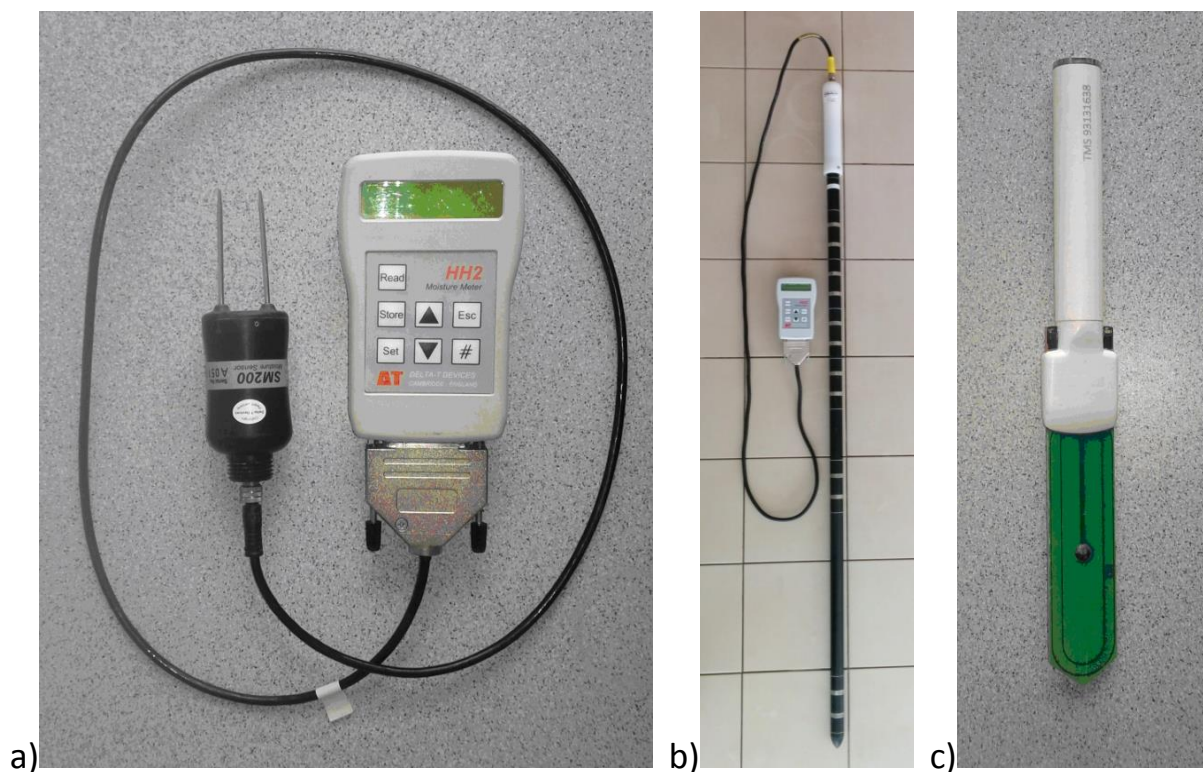
3.1. Výběr čidel pro měření půdní vlhkosti

Pro hodnocení půdního sucha je potřeba vyhodnotit zásoby vody v profilu do dostatečné hloubky. Na trhu existuje celá řada senzorů, které lze využít pro kontinuální monitoring půdních vlhkostí. Sensory jsou nejčastěji založeny na měření elektrických vlastností vlhké půdy. Některé senzory pro měření vlhkostí v půdním profilu, jako je například sonda Profile Probe type PR2 (Delta-T Devices Ltd., 2008), lze instalovat přímo z povrchu. Obvykle jsou však senzory instalovány z vykopané sondy. Většina senzorů vyžaduje připojení k externím čtecím a záznamovým zařízením. Což ztěžuje jejich širokou aplikaci pro monitoring půdních vlastností standardním způsobem obhospodařovaných zemědělských pozemků. Dalším limitujícím prvkem je mnohdy i vysoká cena jak senzorů, tak datalogerů. V posledních letech byl ve spolupráci Českého vysokého učení technického v Praze (ČVUT) a firmy TOMST s.r.o. vyvinut senzor TMS3, u kterého byla řada problémů eliminována. Výhodou je jeho relativně nízká pořizovací cena. Každý senzor obsahuje vlastní dataloger s rozsáhlou pamětí a baterii s dlouhou životností. Testování v terénu navíc ukázalo, že je odolný vůči vnějším vlivům včetně zásahu zemědělské techniky. Délka senzoru je 15 cm a kromě půdní vlhkosti, měří i teplotu půdy a vzduchu. Testování vykazovalo podobnou přesnost měření jako zavedené dlouhodobě testované a vyvíjené přístroje (což je ukázáno v další části).

S ohledem na optimalizaci ceny a zároveň získání reprezentativního souboru dat jsou pro monitoring navrženy následující senzory (obrázek 1):

1. Senzor TMS3 (TOMST, 2014) – průběžný monitoring půdních vlhkostí v hloubce 4-15 cm, půdní teploty a teploty vduchu na vybraných místech daného pozemku. Tento monitoring zachytí průběžné změny v povrchové vrstvě půdy.
2. Sonda Profile Probe type PR2 (Delta-T Devices Ltd., 2008) a čtecí zařízení HH2 – cílená měření půdní vlhkosti v půdním profilu v hloubkách 10, 20, 30, 40, 60 a 100 cm (nebo jen do hloubky 40 cm, záleží na délce sondy).

3. Senzor SM200 (Delta-T Devices Ltd., 2006) nebo SM300 (Delta-T Devices Ltd., 2010) a čtecí zařízení HH2 – doplňkové orientační mapování povrchových půdních vlhkostí v hloubce 0-5 cm.



Obr. 1: Senzor SM200 a čtecí zařízení HH2 (a), sonda Profile Probe PR2 (b) a senzor TMS3 (c).

Pro měření půdních vlhkostí mohou být zvoleny i jiné senzory. Záleží na dostupných financích. Dále pak na způsobu hospodaření na daném pozemku a poloze, tj. zda instalované přístroje nebudou ohroženy zemědělskou technikou, popřípadě zcizeny či záměrně poškozeny.

3.2. Kalibrace čidel pro měření půdní vlhkosti

Pro správnou interpretaci měřených dat je potřeba senzory kalibrovat pro každou půdu. Následující postup lze užít pro kalibraci všech dostupných senzorů. Na vybraných lokalitách jsou odebrány jak neporušené (5-10 vzorků), tak porušené půdní vzorky. Neporušené půdní vzorky jsou užity pro stanovení aktuální půdní vlhkosti a objemové hmotnosti půdy. Pro jejich odběr jsou používány Kopeckého válečky o objemu 100 cm³. Válečky jsou pomocí

odběrové hlavy a palice zatlačeny do půdy tak, aby nedošlo k porušení půdní struktury. Po vyjmutí válečků z půdy jsou seříznuty horní a dolní okraje a váleček je opatřen víčky. Válečky s půdou a víčky jsou umístěny v plastových sáčcích a v chladicím boxu transportovány do laboratoře. Zde jsou válečky s půdou zváženy (hmotnost m_1), pak vysušeny při 105°C a následně opět zváženy (hmotnost m_2). Rovněž je zjištěna hmotnost každého kovového válečku (hmotnost m_3). Aktuální půdní vlhkost (θ) je pak stanovena podle následující rovnice:

$$\theta = \frac{(m_1 - m_2)}{\rho_w} / V \quad (1)$$

kde ρ_w je měrná hmotnost vody (1 g cm⁻³ při 20°C), a V je objem válečku (100 cm³). Objemová hmotnost půdy (ρ_d) je pak dána následujícím vztahem:

$$\rho_d = (m_2 - m_3) / V \quad (2)$$

Na odebraných vzorcích mohou být také stanoveny retenční čáry půdních vlhkostí, viz níže část 3.5.

Porušené půdní vzorky jsou vysušeny a rozmělněny na jemnozem. Takto upravené půdy jsou pak nahutněny do nádob (kontejnerů, válců apod.) o známém objemu a užity pro kalibraci senzorů. Velikost nádob se řídí podle délky senzorů a dosahu elektrického impulzu daného senzoru. Nádoby by neměly být příliš velké, aby nedocházelo k nežádoucí nehomogenitě rozložení půdních vlhkostí. Například pro senzor TMS3 byly otestovány plastové válce o objemu $V_K = 1\,471\text{ cm}^3$ (průměr 10,5 cm a výška 17 cm), které byly ve spodní části překryty netkanou textilií tak, aby se půdní vzorek nemohl vysypat, ale zároveň aby byl umožněn odtok přebytečné vody v případě přesycení půdního vzorku vodou. Objemová hmotnost nahutněného půdního vzorku by měla odpovídat objemové hmotnosti zjištěné na neporušených 100 cm³ půdních vzorcích. Hmotnost půdy nahutněné do válců (m_K) je pak:

$$m_K = V_K \rho_d \quad (3)$$

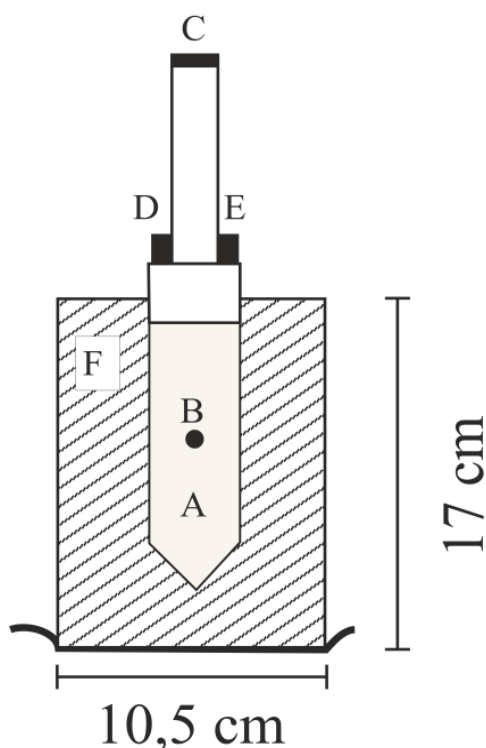
Takto připravený vzorek může být také použit nejen pro kalibraci senzoru TMS3 (obrázek 2), ale i pro souběžnou kalibraci senzorů TMS3 a SM200 (SM300) a to tak, že senzor TMS3 je umístěn v půdě trvale a senzor SM200 jen při měření. Po naplnění válce jsou pak pomocí senzoru TMS3 odečteny jednotky (COUNTS)

popřípadě pomocí senzoru SM200 hodnoty v mV pro suchou půdu. Poté jsou půdní vzorky postupně zvlhčovány. Přidané množství vody (ΔV_w) se řídí celkovým objemem pórů v půdním vzorku (V_p) a zvoleným počtem zvlhčovacích kroků (N):

$$P = (\rho_z - \rho_d) / \rho_z \quad V_p = V_K P \quad \Delta V_w = V_p / N \quad (4)$$

Kde P je pórovitost a ρ_z je specifická hmotnost půdních částic.

Pro řádné promísení půdy s vodou je potřeba při prvních krocích materiál z válců vysypat na táč, na kterém je půda pomocí rozprašovače zvlhčena, homogenizována a pak opět nasypána do válce. Po každém zvlhčení je válec zvážen, aby mohla být gravimetricky zjištěna půdní vlhkost (θ) (V v rovnici 1 odpovídá objemu kalibračního válce/nádoby V_K) a současně jsou odečítány jednotky (COUNTS) pomocí senzoru TMS3 a hodnoty v mV pomocí senzoru SM200/SM300. Způsob kalibrace odpovídá postupu popsanému již dříve Kodešovou et al. (2011) pro senzory SM200 a ECH2O EC-5.



Obr. 2. Schéma umístění senzoru TMS3 v půdním vzorku. A - měření půdní vlhkosti, B, D – měření teploty, C - měření teploty a snímání uložených dat, E – dioda, F – půda.

V případě senzoru TMS3 je předpokládána lineární závislost přímo mezi měřenými jednotkami (C) a půdními vlhkostmi:

$$\theta = a_1 C / 10^4 + b_1 \quad (5)$$

Hodnoty v mV (X) měřené pomocí senzoru SM200 musí být nejdříve pomocí následující linearizační rovnice přepočteny na odmocninu z dielektrické konstanty (ϵ):

$$\epsilon^{1/2} = 1,41 \times 10^{-14} X^5 - 4,75 \times 10^{-11} X^4 + 6,21 \times 10^{-8} X^3 - 3,91 \times 10^{-5} X^2 + 1,61 \times 10^{-2} X + 1,01 \quad (6)$$

Tato rovnice vznikla proložení částí dat v linearizační tabulce (rozsah 0 až 1 800 mV) uvedené v manuálu k senzoru SM200. Rovnice platí v rozmezí 0 až 1 220 mV. Body dané odmocninou z dielektrické konstanty a půdní vlhkosti stanovené gravimetricky jsou pak proloženy pomocí lineární rovnice:

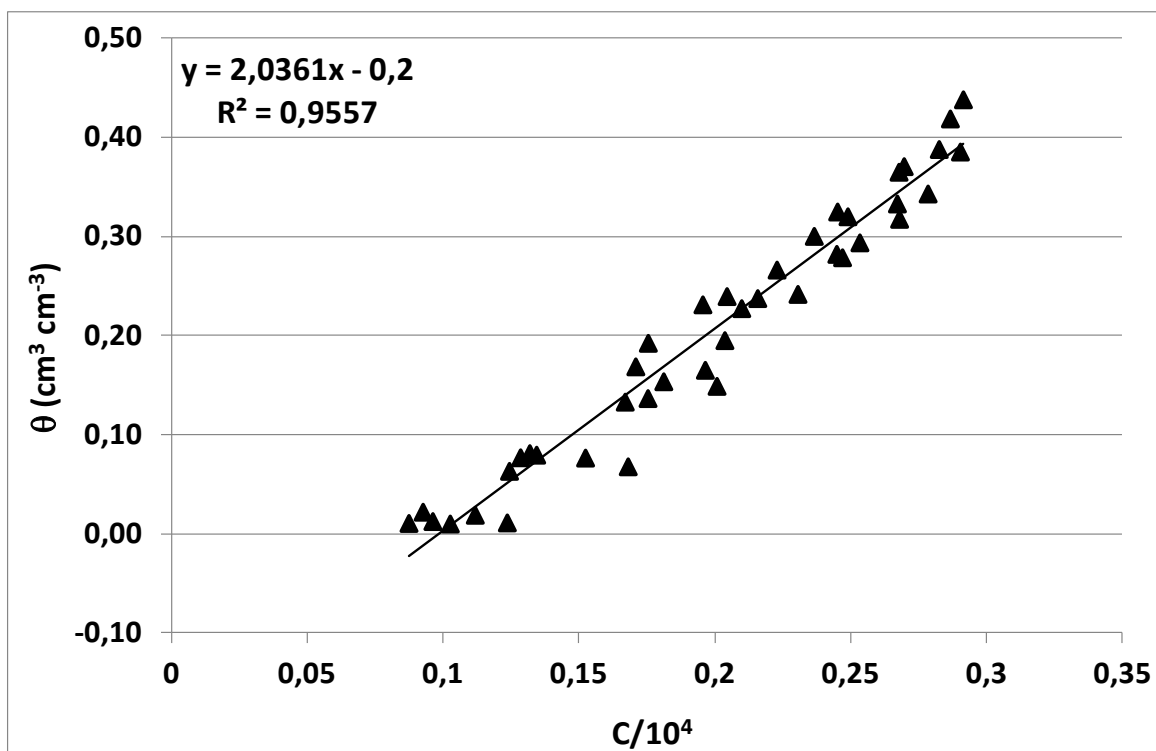
$$\epsilon^{1/2} = a_2 \theta + b_2 \quad (7)$$

Dále je uveden příklad kalibrace obou senzorů pro půdní vzorky odebrané z povrchových horizontů na šesti lokalitách z oblasti Rakovníka: U všech vzorků byly stanoveny základní půdní vlastnosti (tabulka 1).

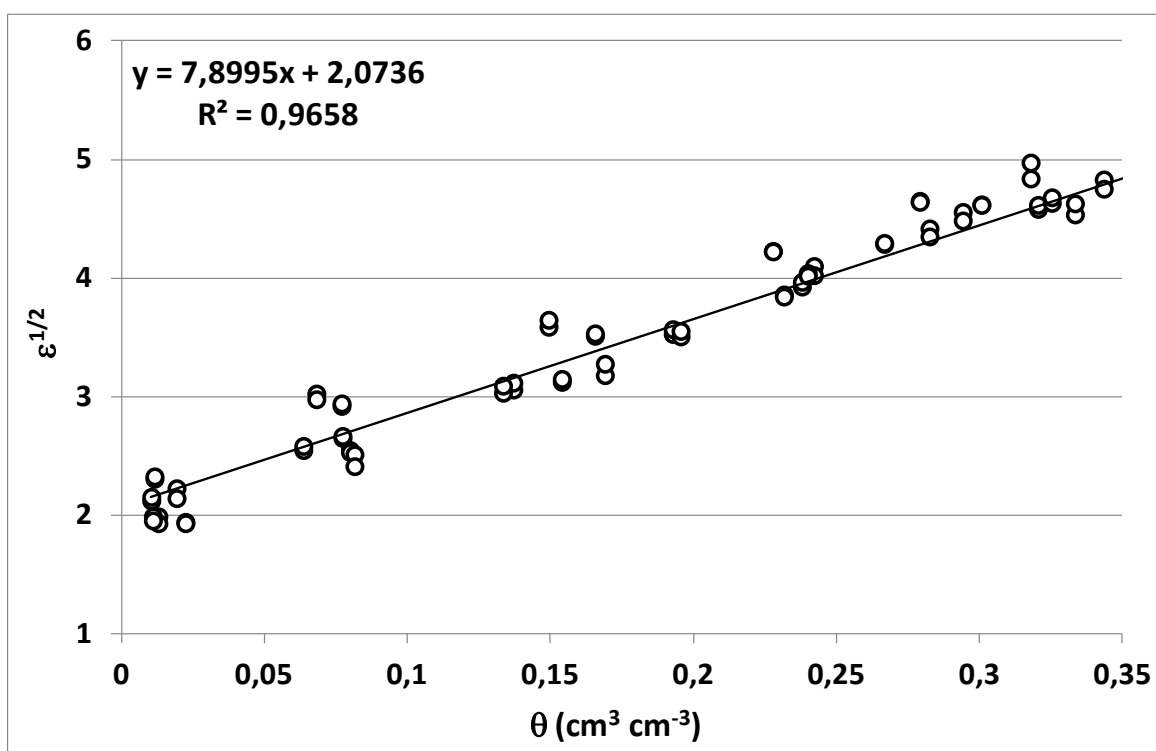
Tab. 1: Půdní vlastnosti.

Lokalita	pH _{H₂O}	pH _{KCl}	Cox (%)	Salinita (mS cm ⁻¹)	ρ_z (g cm ⁻³)	Jíl (%)	Prach (%)	Písek (%)
Lašovice	6,21	5,47	1,61	49,80	2,53	12,0	66,0	22,0
Lišany	6,30	5,95	1,51	64,30	2,54	14,0	34,0	52,0
Lužná	5,87	5,44	1,47	51,85	2,50	6,0	23,0	71,0
Oráčov	5,39	5,08	3,83	64,45	2,47	10,5	40,0	49,5
Pšovlky	6,36	5,90	0,98	79,55	2,63	22,5	37,0	40,5
Tytry	4,90	4,44	1,99	38,70	2,54	16,5	66,0	17,5

Byly vyhodnoceny kalibrační rovnice pro jednotlivé půdy zvlášť i celková kalibrační rovnice pro všechny studované půdy. Obrázek 3 a obrázek 4 ukazují příklady kalibrací pro oba senzory. Výsledné parametry kalibračních rovnic jsou uvedeny v tabulce 2.



Obr. 3. Příklad kalibrace pro senzor TMS3. Zobrazený vztah vznikl na základě dat získaných pro všechny půdy.



Obr. 4. Příklad kalibrace pro senzor SM200. Zobrazený vztah vznikl na základě dat získaných pro všechny půdy.

Tab. 2: Parametry kalibračních rovnic a koeficientů determinace.

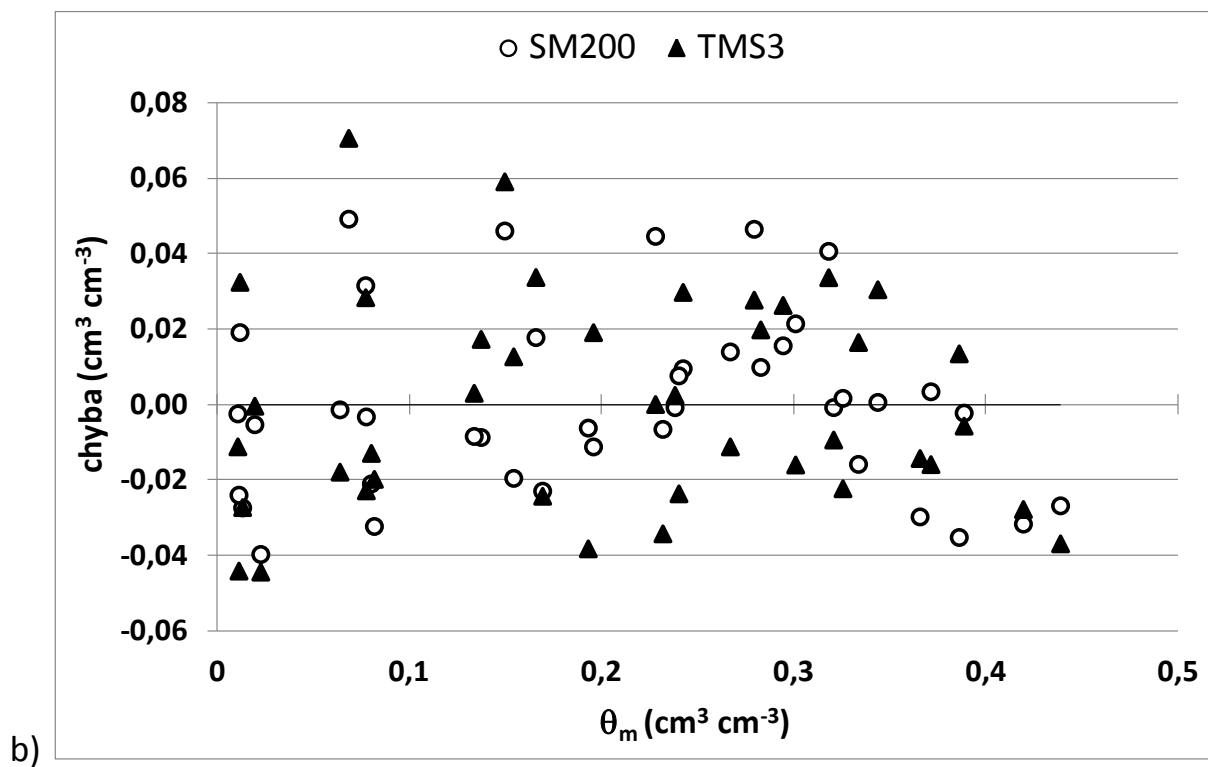
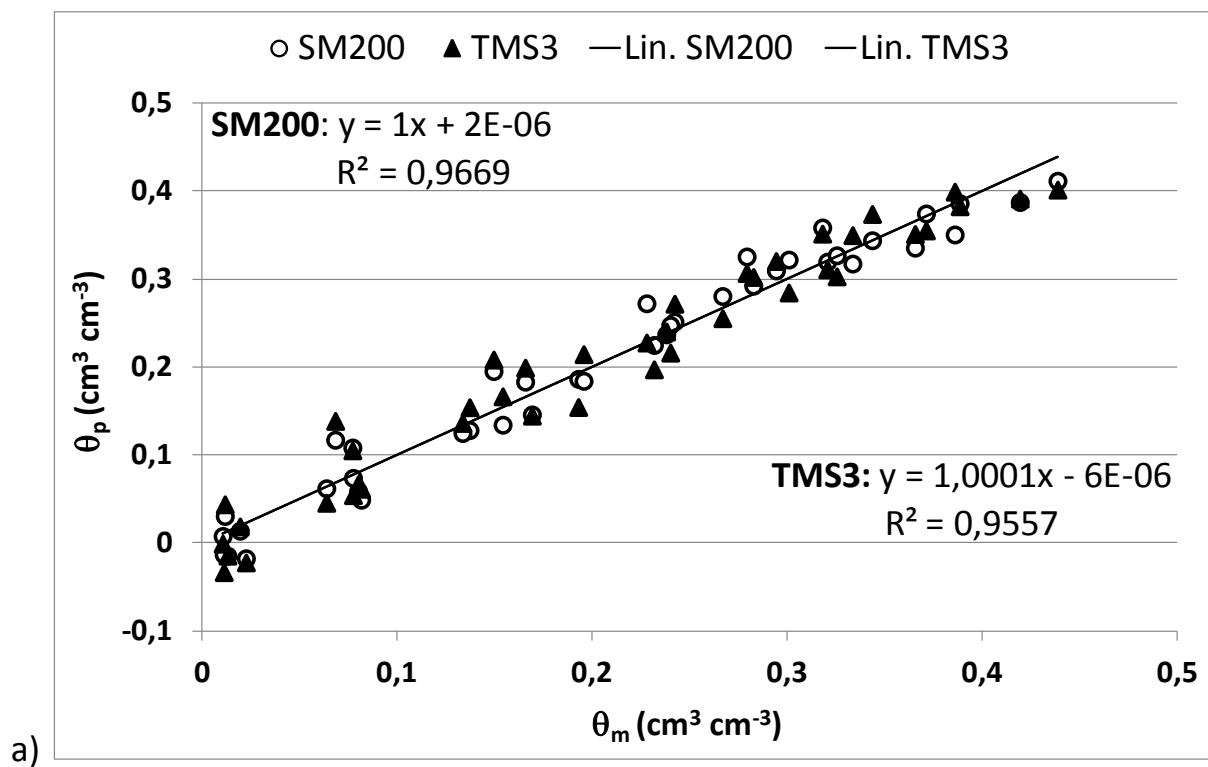
Lokalita	a_1	b_1	R^2 (%)	a_2	b_2	R^2 (%)
Lašovice	2,30	-0,253	97,72	7,27	2,22	98,61
Lišany	2,09	-0,195	98,32	8,04	1,98	98,54
Lužná	1,88	-0,181	99,55	8,17	1,99	98,78
Oráčov	1,82	-0,157	99,31	8,47	1,82	98,51
Pšovlky	2,26	-0,282	96,04	8,26	2,34	99,30
Tytry	2,07	-0,182	99,61	8,10	1,98	98,61
všechny lokality	2,04	-0,200	95,57	7,90	2,07	96,58

Dalším krokem je vyhodnotit přesnost měření při použití senzorů a vyhodnocených parametrů kalibračních rovnic. Obrázek 5 ukazuje vztahy mezi půdními vlhkostmi stanovenými gravimetricky a vypočtenými pomocí kalibračních rovnic, a chyby měření vypočtené jako rozdíl půdních vlhkostí stanovených pomocí senzorů a půdních vlhkostí určených gravimetricky. Zobrazené chyby (obrázek 5b) ukazují, že celkové kalibrační rovnice mohou být užity pro orientační měření na všech sledovaných lokalitách. Odchyly rovněž naznačují, že oba senzory vykázaly podobnou přesnost.

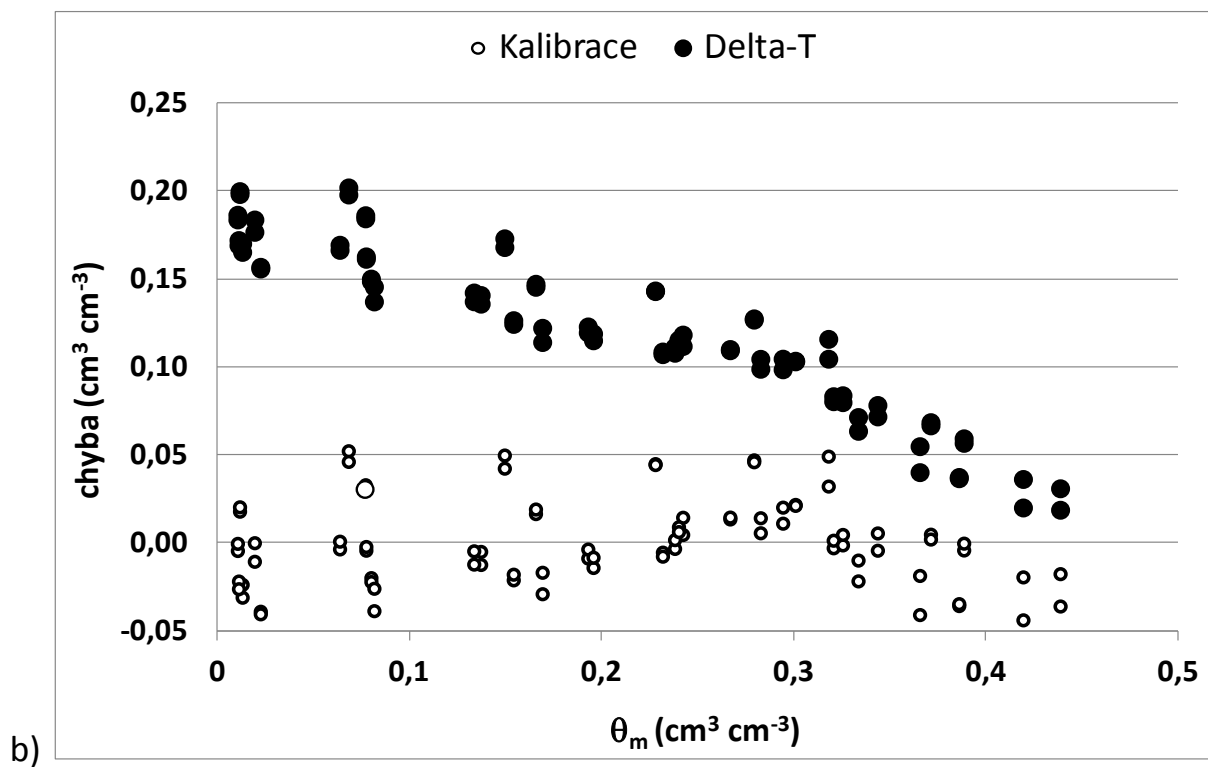
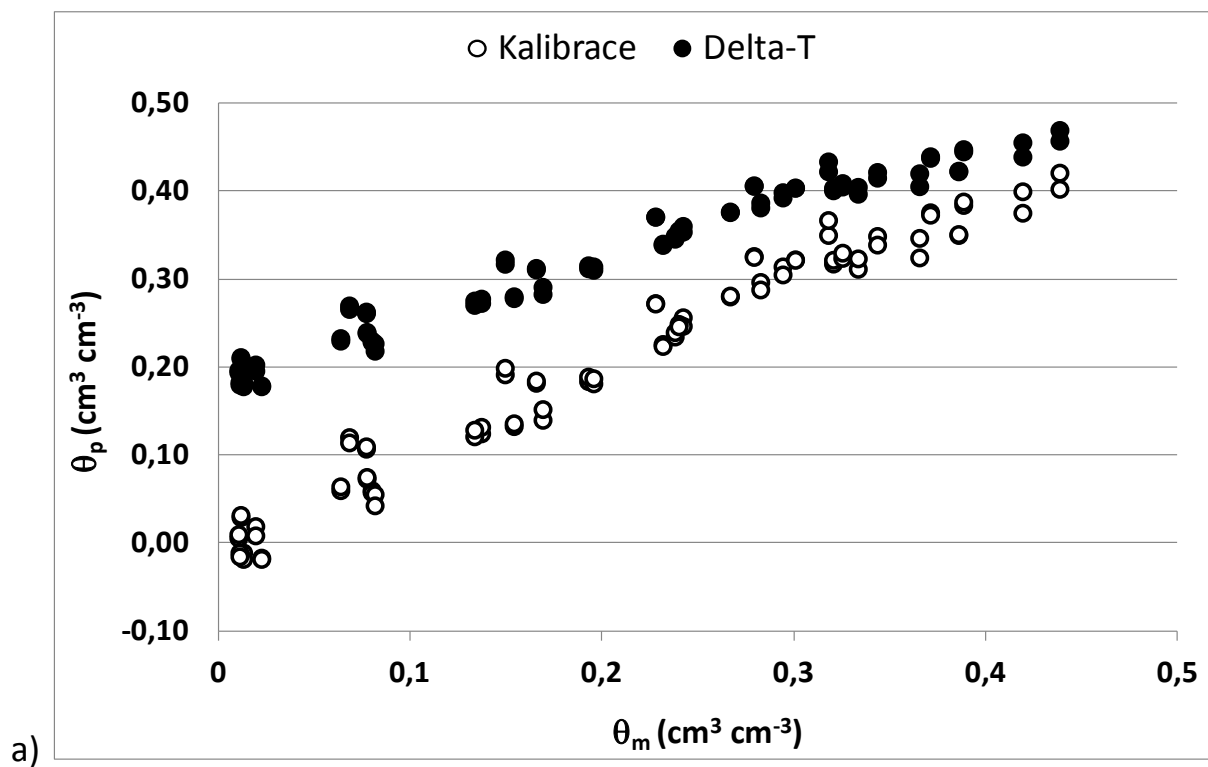
Je potřeba poznamenat, že pro orientační měření pomocí senzoru SM200 (SM300) je možno použít parametry doporučené výrobcem, které jsou pro minerální a organickou půdu uvedené v tabulce 3. Chyba měření při užití parametrů pro minerální půdu je pak pro testované půdy ukázána v obrázku 6. Je evidentní, že pro tyto lokality vyhodnocení vlhkostí pomocí parametrů v tabulce 3 je velmi nepřesné.

Tab. 3: Parametry kalibrační rovnice (7) doporučené výrobcem pro senzor SM200, SM300 a Profile Probe PR2 (Delta-T Devices Ltd., 2006, 2010, 2008).

Půda	a_2	b_2
Minerální půda	8,4	1,6
Organická půda	7,7	1,3



Obr. 5: Závislost půdních vlhkostí určených gravimetricky θ_m a zjištěných pomocí senzorů θ_p při použití celkové kalibrační rovnice (a) a chyby měření (b).



Obr. 6: Závislost půdních vlhkostí určených gravimetricky θ_m a změřených pomocí senzoru SM200 θ_p a parametrů kalibrační rovnice zjištěných pro testované půdy nebo doporučených výrobcem (a) a chyby měření při užití obou kalibračních rovnic (b).

Podobnou kalibraci lze provést pro sondu Profile Probe PR2. Kalibrace je ale ztížena rozměrem senzoru a manipulací s dostatečně velkými vzorky půdy. V tomto případě je možné provést srovnávací měření s již nakalibrovanými menšími senzory nebo se spolehnout na parametry dodané výrobcem, které poskytnou orientační informaci o bilanci vody (podobně jako senzor SM200). Navíc jsou pro přepočet objemové půdní vlhkosti z odmocniny dielektrické konstanty (7) doporučeny stejné parametry a_2 a b_2 (tabulka 3). Rozdíl mezi vyhodnocením dat měřených různými senzory spočívá v rozdílné linearizační rovnici převádějící měřené hodnoty v mV na odmocninu z dielektrické konstanty (ϵ). V případě sondy Profile Probe PR2 je to následující rovnice:

$$\epsilon^{1/2} = 1,22 \times 10^{-16} - 3,57 \times 10^{-13}X^5 - 4,13 \times 10^{-10}X^4 + 2,34 \times 10^{-7}X^3 - 6,72 \times 10^{-5}X^2 + 5,53 \times 10^{-3}X + 1,12 \quad (8)$$

Pro měření by tak mohly být aplikovány kalibrační parametry zjištěné pro senzor SM200.

Je nutno zdůraznit, že kalibraci senzorů je potřeba provést na několika (alespoň 3) vzorcích pro každou půdu. Zároveň je nutno otestovat, zda lze použít jednu kalibrační rovnici pro všechny senzory daného typu nebo zda je nezbytné provést kalibraci pro každý z nich.

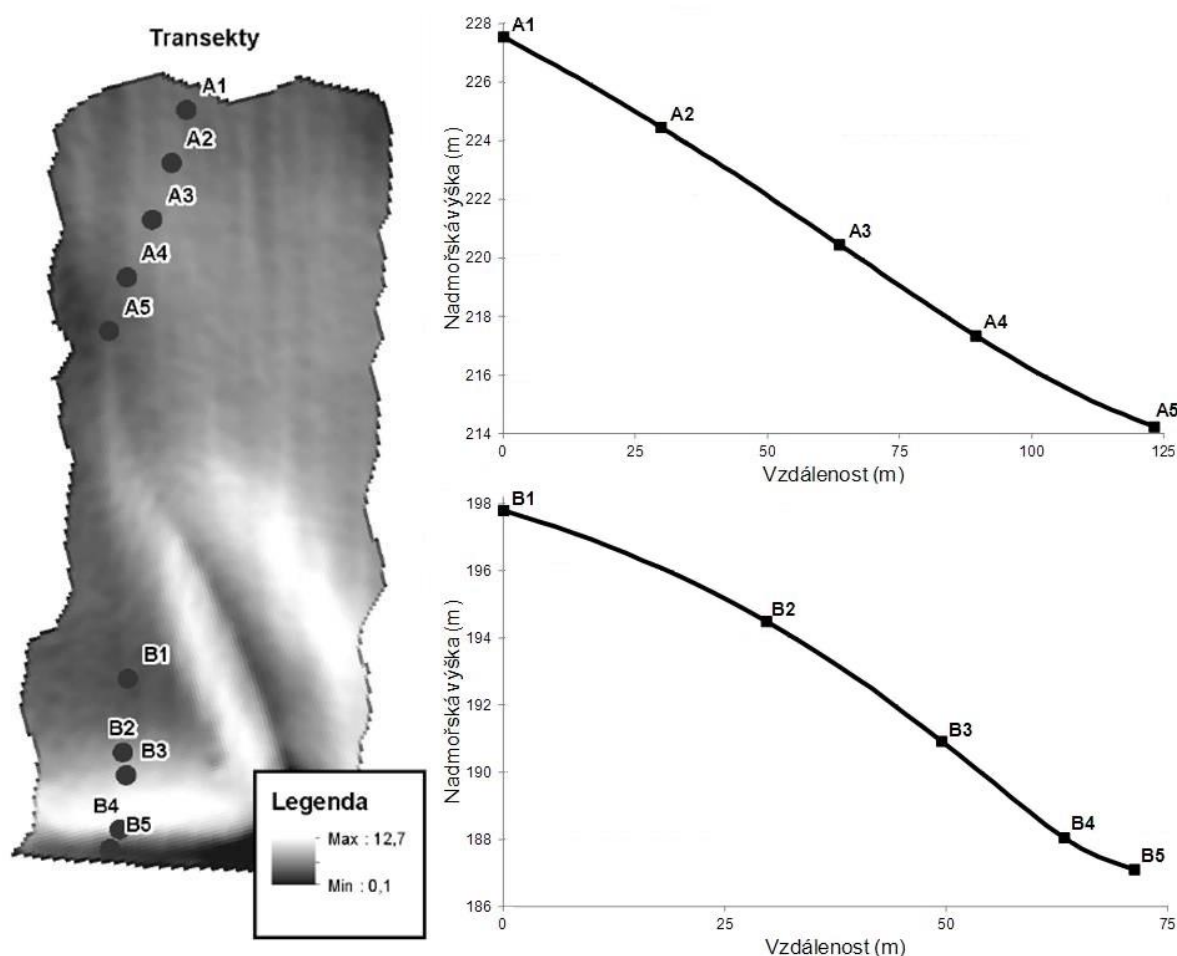
3.3. Časový harmonogram monitoringu půdních vlhkostí

Monitoring půdních vlhkostí by měl probíhat v průběhu celého vegetačního období. Na počátku vegetačního období musí být instalovaná čidla pro kontinuální monitoring půdních vlhkostí, tj. například senzory TMS3, a pažnice pro měření sondou Profile Probe PR2. Monitoring je ukončen před sklizní. Před instalací senzorů a pažnic je vhodné nejdříve plošně zmapovat povrchovou půdní vlhkost (například pomocí senzoru SM200/SM300 nebo jiných senzorů, které lze snadno zasunout do půdy). Na základě prostorové analýzy půdních vlhkostí, provedené pokud možno v předcházejícím roce, je možné lépe vytipovat umístění senzorů pro kontinuální monitoring. Měření senzory, které nejsou trvale instalovány na sledované lokalitě, např. sondou Profile Probe PR2, se provádějí s ohledem na účel měření. V případě monitoringu zacíleného na

výskyt sucha by první měření měla být provedena na počátku vegetačního období a pak opakovaně v době nedostatečných vodních srážek. V tomto i dalších případech je vhodný monitoring v pravidelných intervalech, či při výskytu extrémních hydrologických situacích.

3.4. Instalace čidel na pozemcích

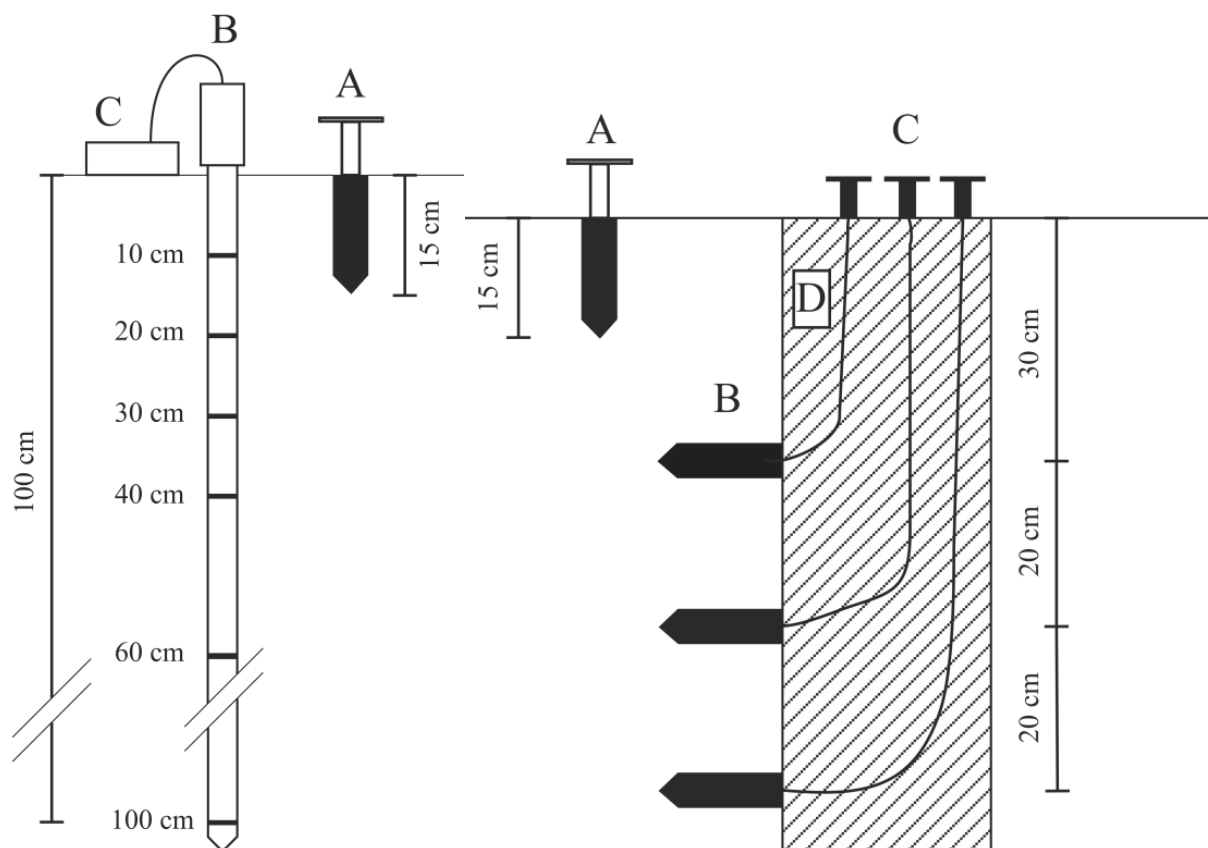
Na pozemcích označených, že jejich produkce byla a je opakovaně zasažena suchem, je potřeba nejdříve vybrat místa, kde je předpokládán nepříznivý vliv nedostatku půdní vody na vegetaci. Tento výběr může být proveden na základě informací o opakovaném snížení úrodnosti na dané části pozemku anebo na základě plošného zmapování povrchové půdní vlhkosti pomocí senzoru SM200/SM300. Na geomorfologicky členitých lokalitách lze v případě dostatku financí sledování půdních vlhkostí provést v několika bodech jednoho nebo více výškových transektů tak, aby byla zohledněna různá nadmořská výška, sklonitost, zakřivení terénu, expozice svahu apod. Příklad umístění čidel ve výškových transektech je uveden na obrázku 7.



Obr. 7: Příklad lokalizace míst monitoringu půdní vlhkosti v transektech A a B (odstíny šedi indikují sklonitost území).

Na vybraných místech jsou pak instalována čidla pro měření půdních vlhkostí, například Senzor TMS3 (vertikálně umístěný senzor pro průběžný monitoring půdních vlhkostí v hloubce 4-15 cm, který zachytí průběžné změny v povrchové vrstvě půdy) společně s pažnicí pro sondu Profile Probe PR2 (cílené měření půdní vlhkosti v půdním profilu do hloubky 100 nebo 40 cm). Alternativně je možné použít dva a více senzorů TMS3 instalovaných do různých hloubek (Jankovec a kol., 2014). V tomto případě jsou půdní vlhkosti ve všech hloubkách instalace zaznamenávány průběžně a není nutné na lokalitu dojíždět. Navíc je tato varianta vhodná na lokalitách, kde není možné (díky například výskytu skeletu) instalovat pažnice pro Profile Probe PR2. Na druhou stranu instalace vyžaduje vykopání sondy a podle počtu senzorů i větší náklady. Schéma instalace je pro oba zmíněné případy zobrazeno na obrázku 8. Jak již bylo

několikrát zmíněno lze podle možností zvolit i celou řadu jiných senzorů, které umožní tento monitoring realizovat.



Obr. 8. Schéma instalace senzorů: a) pažnice a senzor Profile Probe PR2 a senzor TMS3: A – TMS3, B – PR2, C - čtecí zařízení HH2, b) sada senzorů TMS3: A – TMS3 pro instalaci na povrchu, B – TMS3 s kabely pro instalaci do hlubších vrstev, C – snímání zaznamenaných dat, D – zasypaná sonda.

Podrobnosti o vlastní aplikaci senzorů a čtecích zařízení (tj. o jejich charakteristikách a nastavení, instalaci do půdy, obsluze apod.) jsou uvedeny v manuálech k senzorům. Některé ze senzorů umožňují vertikální i horizontální uložení. Důležité je, aby byly senzory umístěny primárně do neporušené půdy. V případě, že jsou vykopány sondy, ze kterých jsou senzory zasunuty do půdy, je nutno dbát na to, aby sonda byla pečlivě zasypana tak, aby nedocházelo k nežádoucímu ovlivnění měřených hodnot (například zvýšenou perkolací vody z povrchu nebo naopak vysycháním půdy apod.).

3.5. Hodnocení půdních vlhkostí

Obecně neexistuje jednoznačná definice půdního sucha. Na webových stránkách ČHMÚ (<http://portal.chmi.cz/portal/dt>) je obsah půdní vody sledovaný pod travním povrchem hodnocen následujícím způsobem. Aktuální vlhkosti půdy jsou vyjádřeny v procentech využitelné vodní kapacity (VVK). VVK je pro konkrétní půdní profil daná hodnota maximálního množství vody, které je rostlina schopna využít. Matematicky se jedná o rozdíl mezi polní vodní kapacitou a bodem vadnutí. Popis kategorií je uveden v tabulce 4. Zjednodušeně lze říci, že stav sucha je indikován kategoriemi 5 a 6, kdy je vlhkost půdy pod 30% VVK. Za normální stav lze považovat kategorie 2 až 4, v nichž se vlhkost půdy pohybuje v rozmezí 30 až 90% VVK. Kategorie 1 s vlhkostí nad 90% VVK představuje přebytek vody.

Tab. 4: Kategorie půdní vlhkosti ve vrstvě 0 - 10 cm.

Kategorie	Popis	Hodnota
1	velmi vysoká	> 90 % VVK
2	vysoká	70-90 % VVK
3	dobrá	50-70 % VVK
4	slabá	30-50 % VVK
5	nízká	10-30 % VVK
6	velmi nízká	0-10 % VVK

(<http://portal.chmi.cz/portal/dt>)

Hodnoty polní vodní kapacity a bodu vadnutí lze pro každou půdu stanovit z průběhu změřené retenční čáry půdních vlhkostí, která vyjadřuje vztah mezi objemovou půdní vlhkostí (θ) a tlakovou výškou (h). Průběh retenčních čar půdních vlhkostí je možné stanovit v laboratoři pomocí podtlakových a přetlakových přístrojů (ISO 11274:1998/Cor 1:2009). Drenážní křivky retenčních čar půdních vlhkostí jsou stanoveny na neporušených půdních vzorcích tak, že jsou vzorky půdy nejdříve nasyceny na hodnotu objemové vlhkosti blízké nasycení (například na sytátku) a po té jsou umístěny do přístrojů a v několika postupných tlakových krocích jsou drénovány vždy do ustáleného stavu. Body

retenčních čar jsou pak dány objemovými vlhkostmi půdních vzorků zjištěnými gravimetricky θ ($\text{cm}^{-3} \text{ cm}^{-3}$) a odpovídajícími tlakovými výškami h (cm) danými nastavenou hodnotou podtlaku vody nebo přetlaku vzduchu. Polní vodní kapacita je pak objemová vlhkost (θ) odpovídající logaritmu tlakové výšky (h) rovnému 2,5. Bod vadnutí je objemová vlhkost odpovídající $\log(h) = 4,18$.

Přibližně je možné vypočítat hodnoty polní vodní kapacity a bodu vadnutí pomocí van Genuchtenovy (1980) rovnice, která vyjadřuje vztah $\theta(h)$:

$$\theta_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) = (1 + (\alpha|h|)^n)^{-m} \quad (9)$$

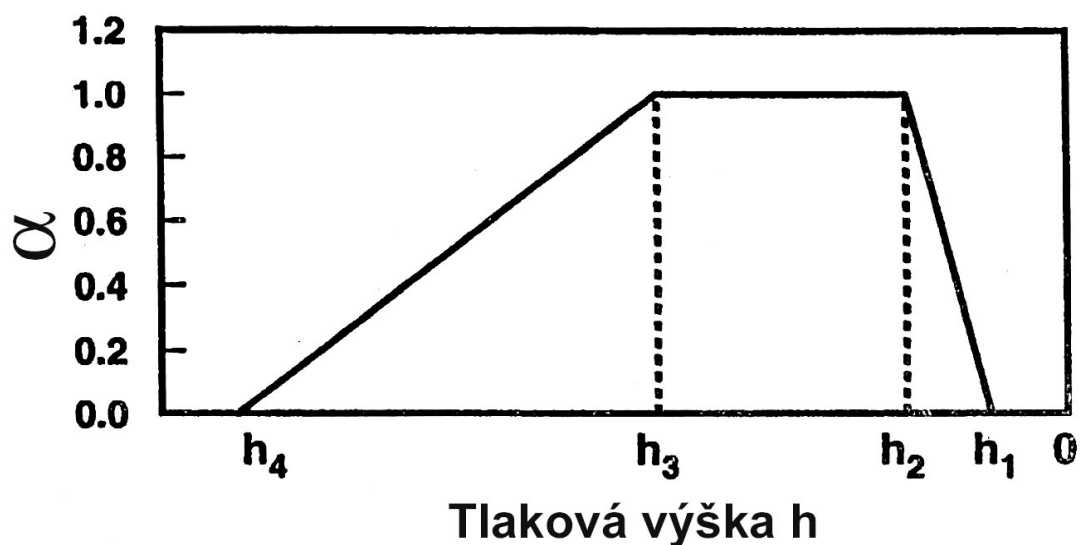
a parametrů θ_r , θ_s , α , n a m vyhodnocených pro 5 texturních tříd Wöstenem et al. (1999) (tabulky 5 a 6).

Tab. 5: Definice texturních tříd podle Wösten et al. (1999).

Hrubozrnná	jíl < 18% a písek > 65%
Střednězrnná	18% < jíl < 35% a písek > 15% jíl < 18% a 15% < písek < 65%
Středně až jemnozrnná	jíl < 35% a písek < 15%
Jemnozrnná	35% < jíl < 60%
Velmi jemnozrnná	jíl > 60%

Tab 6: Parametry retenčních čar pro texturní třídy podle Wösten et al. (1999).

	θ_r ($\text{cm}^{-3} \text{ cm}^{-3}$)	θ_s ($\text{cm}^{-3} \text{ cm}^{-3}$)	α (cm^{-1})	n (-)	m (-)
Hrubozrnná	0,025	0,403	0,0383	1,377	0,274
Střednězrnná	0,010	0,439	0,0314	1,180	0,153
Středně až jemnozrnná	0,010	0,430	0,0083	1,254	0,203
Jemnozrnná	0,010	0,520	0,0367	1,101	0,092
Velmi jemnozrnná	0,010	0,614	0,0265	1,103	0,094



Obr. 9: Funkce $\alpha(h)$ vyjadřující schopnost rostlin extrahovat vodu.

Přístup založený na kategoriích půdní vlhkosti (tabulka 4) však nezohledňuje skutečné schopnosti různých rostlin extrahovat vodu z půdy. Při modelování extrakce vody kořeny rostlin jsou proto užívány funkce, které tento jev popisují. Nejčastěji je užívána funkce $\alpha(h)$ (obrázek 9), kterou navrhl Feddes et al. (1978). Jedná se o bezrozměrnou funkci vyjadřující schopnost rostlin extrahovat vodu (α) v závislosti na tlakové výšce (h). Maximální hodnota α je 1 (stav rostliny bez vláhového stresu). Nižší hodnoty pak představují vláhový stres v důsledku přemokření nebo naopak v důsledku snížené dostupnosti vody pro rostliny či dokonce nulová schopnost extrahovat vodu z půdy. Tlakové výšky h_1 , h_2 , h_3 a h_4 v obrázku 9 jsou specifické pro každou rostlinu. V tabulce 7 jsou uvedeny hodnoty pro vybrané plodiny. Při simulaci režimu půdní vody pomocí matematických modelů je zohledněno, že hodnota h_3 závisí na hodnotě potenciální transpirace (T_p). V tabulce 7 jsou proto dány 2 hodnoty h_3 pro 2 extrémní hodnoty T_p . Hodnota h_3 odpovídající aktuální potenciální transpiraci je tak vypočítána interpolací z uvedených tabulkových hodnot. Pro zjednodušení lze v našich podmínkách uvažovat h_3 odpovídající $T_p = 0,3 \text{ cm den}^{-1}$. Na základě znalosti retenční čáry půdních vlhkostí a parametrů funkce $\alpha(h)$ je pak možné lépe charakterizovat vláhové podmínky pro danou rostlinu.

Tab. 7: Tlakové výšky h_1 , h_2 , h_3 a h_4 funkce $\alpha(h)$ v obrázku 9. Hodnota h_3 závisí na hodnotě potenciální transpirace (T_p). V tabulce jsou dány 2 hodnoty h_3 pro 2 extrémní hodnoty T_p .

Tlaková výška (cm)	Pšenice ^a	Kukuřice ^a	Cukrová řepa Brambory ^a	Vojtěška ^b	Tráva ^a
h_1	0	-15	-10	-10	-10
h_2	-1	-30	-25	-25	-25
$h_{3,H} T_p=0,5 \text{ cm den}^{-1}$	-500	-325	-320	-1500	-200
$h_{3,L} T_p=0,1 \text{ cm den}^{-1}$	-900	-600	-600	-1500	-800
h_4	-16000	-8000	-16000	-8000	-8000

^a Wesseling et al. (1991), ^b Taylor and Ashcroft (1972)

Dalším důležitým kritériem je hloubka kořenů a stav půdní vody v celém půdním profilu. Některé rostliny mají totiž schopnost kompenzovat nedostatečný obsah vody ve svrchních částech půdního profilu zvýšenou extrakcí vody z oblastí s vyšším obsahem vody. Dalším rozhodujícím kritériem při hodnocení snížené dostupnosti vody pro rostliny na jejich vývoj je i délka období nedodatečných vláhových podmínek. Hodnocení vláhových podmínek je proto vhodné posoudit modelově což není obsahem této metodiky.

4. Přínos metodiky

Metodika shrnuje postup při návrhu, přípravě a realizaci monitoringu půdní vlhkosti se zaměřením na mapování výskytu sucha na území ČR. Velká pozornost je věnována kalibraci senzorů pro jednotlivé půdy, která je velmi často zanedbávána, a testování jejich přesnosti. Postupy uvedené v této metodice jsou obecně platné a tudíž aplikovatelné pro analýzu půdních vlhkostí nejen v terénu ale i v laboratoři.

5. Srovnání novosti postupů

V současné době neexistuje metodika, která by se návrhem podrobného monitoringu půdních vlhkostí na zemědělských pozemcích zabývala. Neexistuje

ani jednotný postup zabývající se přípravou senzorů před jejich instalací do půdy.

6. Popis uplatnění metodiky

Metodika je primárně určena týmům, které by se měly zabývat lokálním monitoringem půdních vlhkostí za účelem potvrzení či vyvrácení negativního vlivu půdního sucha na zemědělskou produkci. Díky obecné platnosti uvedených postupů při přípravě a testování senzorů je metodika rovněž určena organizacím, které pomocí různých senzorů monitorují půdní vlhkosti i za jiným účelem.

7. Ekonomické aspekty

Ekonomické aspekty využití této certifikované metodiky jsou nepřímé a nevyplývají pro její přímé uživatele. Ekonomický přínos vyplývá z využití výsledků cíleného monitoringu pro hodnocení skutečného režimu půdní vody na dané lokalitě. Výsledky monitoringu by pomohly státní správě zefektivnit vyplácení kompenzací zemědělským podnikům za škody na zemědělské produkci v důsledku nepříznivých vláhových podmínek. Naopak jednotlivým subjektům by pomohly nároky na tyto kompenzace prokázat či pomoci při návrhu opatření, které by ztrátám na zemědělské produkci zamezily.

8. Dedikace

Tato metodika vznikla za finanční podpory Evropské kosmické agentury (ESA, *European Space Agency*) a programu ESA ARTES 20 (*Integrated Applications Promotion*) v rámci řešení projektu DROMAS - Agricultural Drought Monitoring and Assessment Driven by Satellites, No.4000108595/13/NL/US.

Literatura

Seznam použité související literatury

Delta-T Devices Ltd. (2008): User Manual for the Profile Probe type PR2. Version: PR2-UM-3.0. Delta-T Devices Ltd., Cambridge, UK.

Delta-T Devices Ltd. (2006): User Manual for the SM200 Soil Moisture Sensor. Delta-T Devices Ltd., Cambridge, UK.

Delta-T Devices Ltd. (2010): User Manual for the SM300 Soil Moisture Sensor. Delta-T Devices Ltd., Cambridge, UK.

Feddes R. A., Kowalik P. J., Zaradny H. (1978): Simulation of Field Water Use and Crop Yield, John Wiley & Sons, New York, NY.

Jankovec, J., Šanda M., Haase, T. (2014): Měření půdní vlhkosti a teploty na experimentálních povodích s využitím stanic TOMST-TMS3. V Brych, K., Tesař. M. (eds), Sborník příspěvků z konference, Hydrologie malého povodí 2014, Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, v.v.i. Český hydrometeorologický ústav, ISBN 978-80-02-02525-2, ISBN 978-80-87577-32-5, 166-168.

TOMST (2014): TMS - TOMST® Measuring System. [cit. 22.03.2014], Dostupné na: <http://tomst.cz/site/en/tms.html>

Taylor, S. A. Ashcroft, G. M. (1972): Physical Edaphology. Freeman and Co., San Francisco, California, p. 434-435.

van Genuchten, M. Th. (1980): A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 892-898.

Wesseling, J. G., Elbers, J. A., Kabat, P., van den Broek, B. J. (1991): SWATRE: instructions for input, Internal Note, Winand Staring Centre, Wageningen, the Netherlands.

Wösten, J.H.M., Lilly, A., Nemes A., Le Bas, C. (1999): Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. Geoderma, 90, 169-185.

Normy pro stanovení fyzikálních a hydraulických charakteristik půdy

ISO 11272:1998: Soil quality – Determination of dry bulk density.

ISO 11277:2009: Soil quality – Determination of particle size distribution in mineral soil material – Method by sieving and sedimentation

ISO 11508:1998: Soil quality – Determination of particle density

ISO 11274:1998, ISO 11274:1998/Cor 1:2009: Soil quality – Determination of the water-retention characteristic – Laboratory methods

ISO 11275:2004: Soil quality – Determination of unsaturated hydraulic conductivity and water-retention characteristic – Wind's evaporation method

ISO 11465:1993: Soil quality – Determination of dry matter and water content on a mass basis – Gravimetric method

ISO 11461:2001: Soil quality – Determination of soil water content as a volume fraction using coring sleeves – Gravimetric method

ISO 16586:2003: Soil quality – Determination of soil water content as a volume fraction on the basis of known dry bulk density – Gravimetric method

Seznam předcházejících publikací autorů týkající se kalibrace čidel pro měření půdní vlhkosti

Kočárek, M., Kodešová, R. (2012): Influence of temperature on soil water content measured by ECH2O-TE sensor. *International Agrophysics*, 26, 259-269.

Kodešová, R., Kodeš, V., Mráz, A. (2011): Comparison of two sensors ECH2O EC-5 and SM200 for measuring soil water content. *Soil and Water Research*, 6(2), 102–110.

Jakšík, O., Chmelíková, K., Schmidtová, Z., Kodešová R. (2014): Porovnání senzorů SM200 a TMS3 pro měření půdní vlhkosti. V Brych, K., Tesař. M. (eds), *Sborník příspěvků z konference, Hydrologie malého povodí 2014*, Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, v.v.i. Český hydrometeorologický ústav, ISBN 978-80-02-02525-2, ISBN 978-80-87577-32-5, 166-168.

Summary

This work has been supported by European Space Agency and program ESA ARTES 20 (Integrated Applications Promotion) within the project DROMAS - Agricultural Drought Monitoring and Assessment Driven by Satellites. The goal of this work was to propose methodology for monitoring of soil water contents within the drought threatened areas. Methodology includes: selection of suitable sensors for soil water monitoring, procedure of sensors calibration, monitoring time schedule, sensors distribution within the area and their installation in soils and possible approach how to evaluate measured soil water contents (i.e. to identify drought during the monitoring period).

The method for complex measurement of soil water contents within the target area using three approaches is proposed: 1) The sensor SM200/SM300 with HH2 Moisture Meter (Delta-T Devices, Ltd., 2006, 2010) is suggested to measure spatial surface soil water content variability; 2) The PR2 Soil Moisture Profile Probe with HH2 Moisture Meter (Delta-T Devices, Ltd., 2008) is selected for repeated one-shot measuring of soil water contents within the selected soil profiles (or alternatively set of four TMS3 dataloggers is suggested for continual monitoring of soil water contents within the selected soil profile); 3) The TMS3 datalogger (<http://tomst.com/site/en/tms.html>) is proposed for continual measurement of surface soil water content at selected spot. Simultaneous calibration of sensors SM200 (PR2) and TMS3 for soils packed in plastic columns under laboratory conditions follows procedure described by Kodešová et al. (2011). Monitoring time table is based on a particular plant vegetational season. Selection of monitoring spots depends on: 1) identification of spots in past repeatedly impacted by drought, 2) spatial surface soil water content variability, 3) terrain morphology. Finally, two approaches are suggested to identify periods of limited water availability for plants: 1) the categories of soil water contents derived for grass (<http://portal.chmi.cz/portal/dt>), 2) the water stress response function proposed by Feddes et al. (1978), which is different for different plants (Wesseling et al., 1991, Tailor and Ashcroft, 1972).

Název	Metodika lokálního monitoringu půdních vlhkostí na zemědělských pozemcích ohrožených suchem
Autoři	prof. Ing. Radka Kodešová, CSc., Ing. Ondřej Jakšík, Ph.D., Ing. Aleš Klement, Ph.D., Ing. Miroslav Fér, Ph.D., Ing. Antonín Nikodem, Ph.D., Ing. Lukáš Brodský, Ph.D.
Vydavatel	Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů, Katedra pedologie a ochrany půd
Vydání	2015
Náklad	50
Počet stran	27
Tiskárna	powerprint s.r.o., Brandejsovo nám. 1219/1, 165 00 Praha 6 – Suchbátka
ISBN	978-80-213-2547-0