

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Měření půdní vlhkosti a teploty

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Pavčina STRNADOVÁ**
Osobní číslo: **E16B0165P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Téma práce: **Měření půdní vlhkosti a teploty**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Zásady pro vypracování

1. Zpracujte přehled metod používaných pro měření půdní vlhkosti a teploty.
2. Zpracujte přehled komerčně dostupných systémů pro tato měření.
3. Zhodnoťte využitelnost jednotlivých systémů pro kontinuální měření parametrů půd v rámci konceptu precizního zemědělství.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:


1. S. U. Susha Lekshmi, D. N. Singh and M. Shojaei Baghini, „A critical review of soil moisture measurement,“ Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, vol. 54, pp. 92-105, 2014.
2. J. David Cooper, Soil Water Measurement: A Practical Handbook. John Wiley & Sons, 2016.
3. Aqeel-ur-Rehman, A. Z. Abbasi, N. Islam, and Z. A. Shaikh, A review of wireless sensors and networks applications in agriculture, Comput. Stand. Interfaces, vol. 36, no. 2, pp. 263270, Feb. 2014.
4. Elektronické informační zdroje.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Robert Vik, Ph.D.**
Katedra technologií a měření

Oponent bakalářské práce: **Ing. Silvan Pretl, Ph.D.**
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: **15. července 2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **21. srpna 2019**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan





Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

Abstrakt

Tato práce uvádí stručně do problematiky půdy z hlediska jejích vlastností souvisejících s vlhkostí a teplotou. Dále se zabývá kritickým hodnocením metod měření půdní vlhkosti a teploty a popisuje je. Udává přehled komerčně dostupných systémů pro tato měření a zabývá se otázkou použití systémů v rámci konceptu precizního zemědělství.

Klíčová slova

Půda, půdní vlhkost, půdní teplota, senzory vlhkosti, senzory teploty, měření půdy, měření vlhkosti, měření teploty

Abstract

This work briefly introduces the issue of soil in terms of its features related to moisture and temperature. It also deals with critical evaluation of soil moisture and temperature measurement methods and describes them. It gives an overview of commercially available systems for these measurements. And it deals with the usage of systems within the concept of precision agriculture.

Key words

Soil, soil moisture, soil temperature, sensors of moisture, sensors of temperature, soil moisture, measurement of moisture, measurement of temperature

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 21.8.2019

Pavλίna Strnadová

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu bakalářské práce Ing. Robertu Vikovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	11
1 PŮDA	12
1.1 PEVNÁ SLOŽKA PŮD	13
1.2 PŮDNÍ VZDUCH.....	14
1.3 PŮDNÍ VODA.....	14
1.3.1 Půdní hydrolimity.....	15
1.4 VLHKOST PŮDY	16
1.5 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI PŮDY.....	18
1.5.1 Struktura.....	18
1.5.2 Zrnitost	18
1.6 TEPLOTA PŮDY	19
2 METODY A SYSTÉMY PRO MĚŘENÍ PŮDNÍ VLHKOSTI A TEPLoty	21
2.1 METODY A SYSTÉMY PRO MĚŘENÍ PŮDNÍ VLHKOSTI.....	21
2.1.1 Gravimetrická metoda	22
2.1.2 Dielektrické metody.....	24
2.1.2.1 Kapacitní metoda	24
2.1.2.2 Reflektometrie ve frekvenční oblasti (FDR-Frequency Domain Reflectometry).....	26
2.1.2.3 Reflektometrie v časové oblasti (TDR – Time Domain Reflectometry).....	27
2.1.2.4 Metoda fázového posuvu (Phase Shift Method).....	29
2.1.2.5 Přenos v časové oblasti (TDT - Time Domain Transmissometry)	30
2.1.2.6 Reflektometrie v amplitudové oblasti (ADR – Amplitude Domain Reflectometry)	31
2.1.3 Radiometrické metody	31
2.1.3.1 Gammaskopická metoda.....	31
2.1.3.2 Neutronová metoda	31
2.1.4 Georadar (GPR – Ground Penetrating Radar).....	32
2.1.5 Snímač tepelného toku (Metoda tepelného pulsu)	33
2.1.6 Optické techniky	34
2.1.6.1 Technika polarizovaného světla	34
2.1.6.2 Technika optických vláken.....	35
2.1.6.3 Spektroskopie v blízké infračervené oblasti.....	35
2.1.7 Tenzometrické techniky.....	36
2.1.7.1 Tenzometr.....	36
2.1.7.2 Odporová metoda (metoda sádrových bločků).....	37
2.1.7.3 Metoda tepelného rozptylu	38
2.2 METODY A SYSTÉMY PRO MĚŘENÍ PŮDNÍ TEPLoty.....	39
2.2.1 Kapalinové půdní teploměry.....	39
2.2.2 Bimetalové půdní teploměry	40
2.2.3 Elektrické půdní teploměry.....	41
2.2.3.1 Elektrické odporové teploměry.....	41
2.2.3.2 Polovodičové teploměry	43
2.2.3.3 Termočlánek.....	44
2.3 KOMERČNĚ DOSTUPNÉ SYSTÉMY PRO MĚŘENÍ VLHKOSTI A TEPLoty PŮDY	44
2.3.1 Komerčně dostupné systémy pro měření vlhkosti půdy	44

2.3.2	<i>Komerčně dostupné systémy pro měření teploty půdy</i>	51
3	PRECIZNÍ ZEMĚDĚLSTVÍ	53
3.1	PRINCIP PRECIZNÍHO ZEMĚDĚLSTVÍ	53
3.2	POUŽITELNOST SYSTÉMŮ PRO MONITOROVÁNÍ PARAMETRŮ PŮDY V PRECIZNÍM ZEMĚDĚLSTVÍ.....	54
3.2.1	<i>Senzory on-the-go</i>	55
3.2.2	<i>Stacionární senzory</i>	56
3.2.3	<i>Systémy založené na metodě dálkového průzkumu země</i>	57
3.3	FARMY BUDOUCNOSTI.....	58
3.4	FIRMY ZABÝVAJÍCÍ SE PRECIZNÍM ZEMĚDĚLSTVÍM	60
	ZÁVĚR	64
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	66

Seznam symbolů a zkratek

DPHP	Dual Probe Heat Pulse Senzor
FDR	Frequency domain reflektometry (reflektometrie ve frekvenční oblasti)
GPR	Ground Penetrating Radar (georadar, půdní radar)
TDR	Time domain reflektometry (reflektometrie v časové doméně)
TDT	Time Domain Transmissionmetry (přenos v časové oblasti)
VWC.....	Volumetric Water Content (objemový obsah vody) (%)
c	rychlost elektromagnetického vlnění ve vakuu (m/s)
C	kapacita (F)
ΔT	doba průchodu vlny podél sondy tam i zpět (s)
dS/m.....	deci Siemens na metr
ϵ_r	relativní permitivita (-)
γ	číslo vyjádření vlhkosti (-)
γ	elektrická vodivost (S)
L	délka sondy (m)
m_w	hmotnost vody (kg)
m_z	hmotnost tuhé fáze půdy (kg)
n	index lomu (-)
μ_r	relativní permeabilita (-)
ρ_d	objemová hmotnost půdy (kg)
ρ_w	objemová hmotnost vody (kg)
t	časový průběh vlny od začátku sondy do konce
Θ	objemová vlhkost (%)
V_w	objem vody (l)
V_T	objem vzorku půdy (l)
V_s	objem pevné fáze (l)
w	vlhkost půdy (%)
w	hmotnostní vlhkost (%)
Z	impedance (Ω)
Z_0	vlnová (charakteristická) impedance (Ω)

Úvod

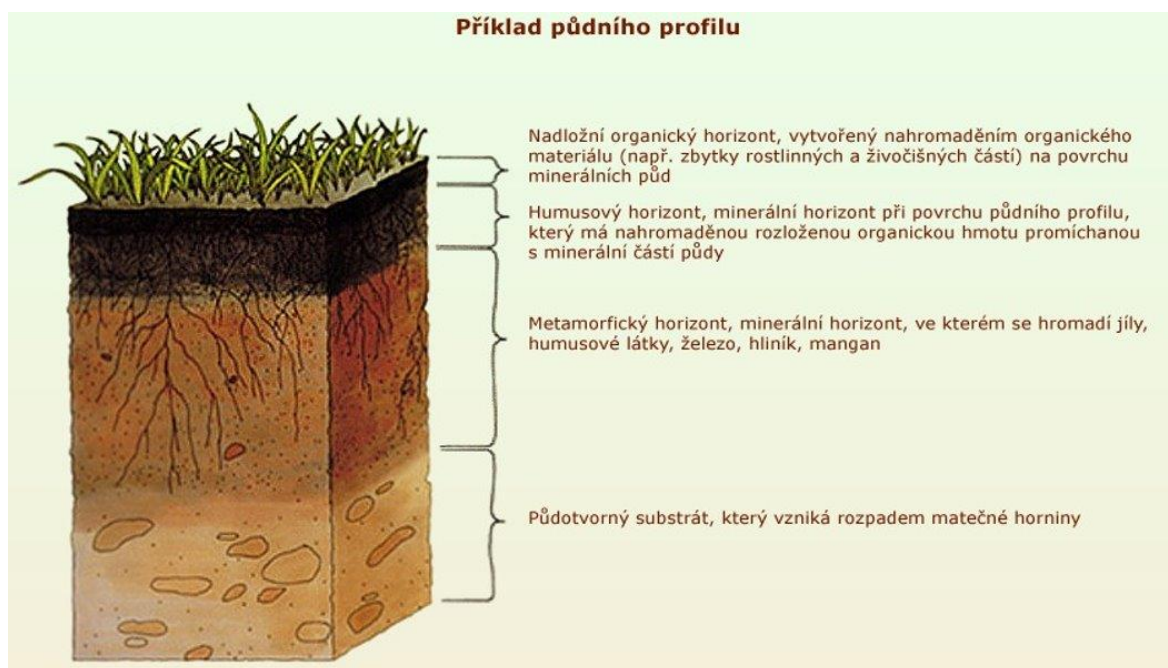
Předkládaná práce je zaměřena na zpracování přehledu metod pro měření půdní vlhkosti a teploty, spolu s uvedením komerčně dostupných systémů použitelných v rámci konceptu precizního zemědělství.

Tato práce vznikla díky tomu, že s přechodem na precizní zemědělství vzrostl zájem o systémy pro monitorování půdní vlhkosti a teploty. Díky těmto systémům jsme schopni získávat potřebné aktuální parametry půdy a tím i zvýšení výnosnosti plodin a efektivní využití zdrojů s tím spojených. Právě kvůli velkému zájmu vznikl i velký rozvoj těchto technologií precizního zemědělství s využitím senzorů monitorujících parametry obhospodařované půdy. Velký zájem je především o bezdrátové snímače teploty a vlhkosti půdy, a to také díky tomu, že půdní sondy jsou velmi přesné, podávají potřebné informace o půdě a řada produktů je již ekonomicky dostupných.

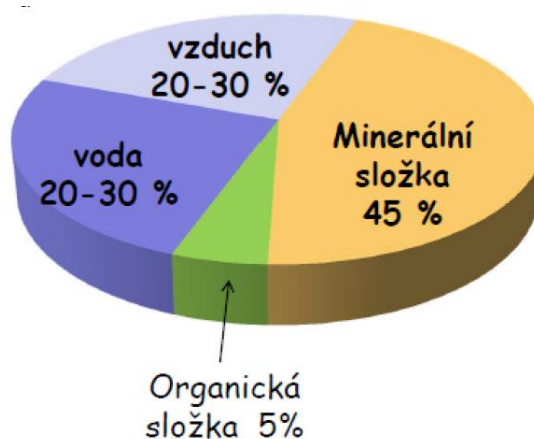
Text je rozdělen do tří částí. První část stručně uvádí do problematiky půdy, zabývá se vlastnostmi půdy či faktory, které souvisejí nebo ovlivňují její vlhkost a teplotu. Druhá část se zaměřuje na metody a systémy měření půdní vlhkosti a teploty a uvádí přehled komerčně dostupných systémů. Třetí část seznamuje s konceptem precizního zemědělství a poukazuje na jeho cíle a uvádí proč je důležité se jím zabývat.

1 Půda

Půda je samostatný přírodní útvar, který vznikl z povrchových zvětralin zemské kůry a z organických zbytků za působení půdotvorných faktorů [1]. Skládá se z půdního roztoku, vzduchu a z pevné složky. Pevná složka vzniká rozpadem a rozkladem hornin (Obr. 1.1). Obohacováním půdní vody o látky z pevné a plynné složky vzniká půdní roztok. Půdní vzduch a půdní roztok, které vyplňují půdní póry, zaplňují 50 % objemu půdy. Podíl jednotlivých složek je závislý na vlhkosti půdy. Tyto složky se vzájemně ovlivňují, tzn. buď se póry zaplní vodou a vytěsní tak vzduch anebo naopak dochází k procesu vysychání a tím dojde ke zvýšení podílu půdního vzduchu. Půdou se zabývá vědní obor pedologie, která zkoumá její charakteristické vlastnosti a vývoj [2, 3].



Obr. 1.1 Půdní profil [4]



Obr. 1.2 Skladba půdy [3]

1.1 Pevná složka půd

Půda obsahuje anorganickou a organickou hmotu (Obr. 1.2). Anorganická hmota se skládá z minerálních částic. Primární minerály tvoří v půdě štěrky, prach či písek. Sekundární jílové minerály naopak tvoří nejjemnější frakci půdy. Podíl jemných a hrubých částic ovlivňuje mechanické vlastnosti půdy, její pórovitost, schopnost vázat vodu, živiny a organickou hmotu a provzdušňenost. Jemnozrnné půdy se hůře provzdušňují, pevněji vážou vodu a lépe živiny. Tedy můžeme říct, že v nich nedochází k tak velkému kolísání podmínek prostředí jako v hrubozrnných půdách, které se snadno zamokří a mají schopnost vázat velké množství živin. U hrubozrnných půd písčitých půd s velkými póry voda rychle oteče. To je způsobeno tím, že tyto půdy snadno a rychle vysychají. I když se v půdě snadno pohybují organizmy a kořeny snadněji rostou, trpí větším kolísáním vlhkosti, teploty a nedostatkem živin či organické hmoty [3].

Zatímco chudé písčité půdy obsahují cca. 1 % organické hmoty, rašelinové půdy obsahují až 80 % této hmoty. Organický podíl tvoří neživá organická hmota, která se může nacházet v různém stupni rozkladu a živé organizmy [3].

Tab. 1.1 Půdní druhy [3]

Procento jílu	Půdní druh	Označení půdy
0-10	Písčitá	Lehká
10-20	Hlinitopísčitá	
20-30	Písčitohlinitá	Střední
30-45	Hlinitá	
45-60	Jílovitohlinitá	Těžká
60-75	Jílovitá	
>75	Jíl	

1.2 Půdní vzduch

Je to vzduch, který vyplňuje půdní póry, které nejsou zaplněny vodou. Aktuální obsah, který se nachází v půdě, se nazývá provzdušněnost, a je možné ji zjistit z celkové pórovitosti a z aktuální vlhkosti vyjádřené objemově [5]. Mezi hlavní plyny, které půda obsahuje, řadíme dusík, kyslík a oxid uhličitý. Obsah oxidu uhličitého činí 12 %. Pohyb plynů v půdě se uskutečňuje prostřednictvím difúze, a to ve směru snižující se koncentrace. Dále se mohou pohybovat prostřednictvím proudění, které je závislé na stabilitě vlhkosti, rychlosti větru a proměnlivostmi atmosférického tlaku [3].

1.3 Půdní voda

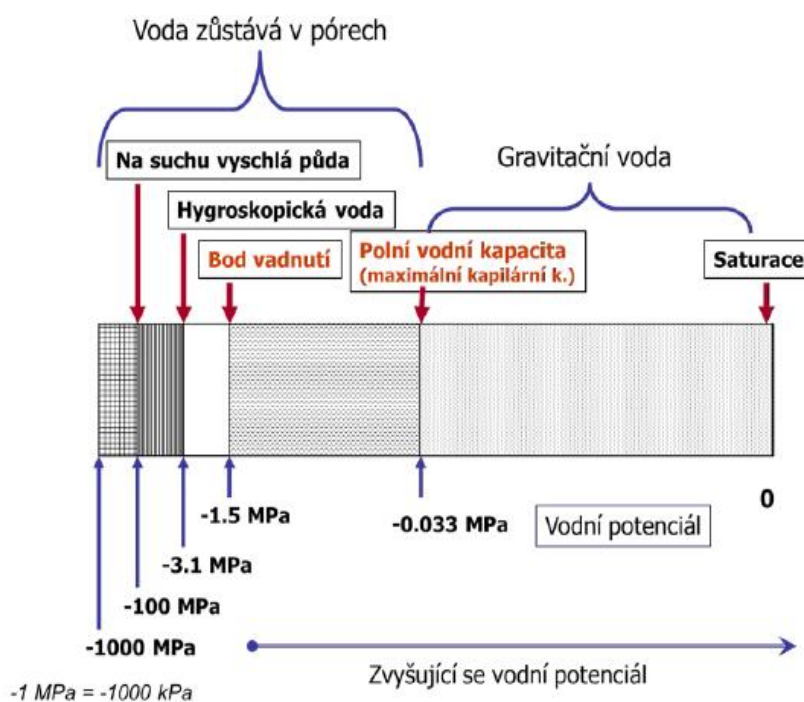
Je to zásadní parametr pro růst rostlin. Voda, která se nachází v pórech, není chemicky čistá, obsahuje určité množství různých rozpuštěných látek. Pokud jsou koncentrace malé, lze tyto látky zanedbat [6]. Voda je hlavní složkou všech organismů a prostředí, v němž probíhají veškeré životní pochody, je rozpouštědlem většiny živin a má velkou tepelnou kapacitu. Množství vody v půdě patří mezi nejdůležitější faktory. Tento faktor určuje růst

rostlin i biologickou aktivitu půdy [3].

Množství vody v půdě reguluje difúzi plynů, pH, naředění půdního roztoku a teplotu. Dále voda v půdě zaplňuje póry, které mají různé tvary a velikosti. Schopnost půdy zadržovat vodu závisí na zrnitosti půdy, obsahu organické hmoty a struktuře. Tuto vodu drží v půdních pórech kapilární síla a absorpce. Síla vazby vody se se zmenšováním pórů a půdních částic roste. Jemnozrné půdy zadržují větší množství vody než půdy hrubozrné. Dále platí, že čím větší podíl organické hmoty se nachází v půdě, tím více půda zadržuje vodu [3].

1.3.1 Půdní hydrolimity

Pro srovnání vlhkostních stavů využíváme tzv. půdní hydrolimity (Obr. 1.3). Ty charakterizují, jak je dostupná voda v půdě. Mohou být charakterizovány procentickým vyjádřením relativní vlhkosti ve vztahu k plné vodní kapacitě nebo pevností vazby vody v půdě, tzv. vodním potenciálem. Pohyb vody začíná z oblasti vyššího vodního potenciálu k oblasti nižšího vodního potenciálu [3].



Obr. 1.3 Půdní hydrolimity [3]

Po velkém přísunu vody mají kořeny rostlin sice dostatek vody, ale pokud zůstane voda v půdě delší dobu, kořeny i organizmy začnou mít nedostatek vzduchu. Takovému stavu říkáme tzv. **plná vodní kapacita**. Po dešti nedřívě dochází k odtoku tzv. gravitační vody (viz kap. 1.4), a to do spodní vrstvy půdy a v půdě zůstává voda, která je vázaná kapilárními silami. Při zaplnění 50–80 % kapilárních pórů vodou označujeme tento stav jako optimální vlhkost, kdy půda je nasycená vodou na tzv. **polní kapacitu**. Optimální proto, že voda je stále ještě snadno dostupná a zároveň je ve volných místech dostatečné množství vzduchu. Při dalším vysychání voda ustupuje i z kapilárních pórů a zůstává jen v mikropórech nebo tvoří tenký vodní film na povrchu částic. Pevnost její vazby se zvyšuje. Při tzv. **bodě vadnutí** dochází k tomu, že voda je vázaná tak silně, že již není dostupná pro rostliny [3].

1.4 Vlhkost půdy

Vlhkost půdy udává, jak velké množství vody se nachází v půdě. Půdní vlhkost existuje ve třech formách: gravitační vlhkost, kapilární vlhkost a hygroskopická vlhkost (Obr. 1.4) [7].

a) Gravitační vlhkost (gravitační voda)

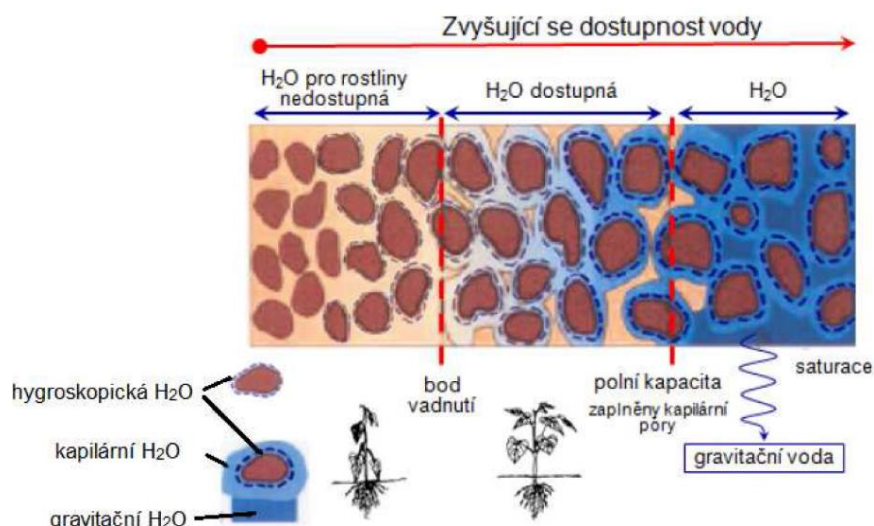
Je definována jako volná vlhkost, která se v půdě pohybuje kvůli působení gravitační síly. Nachází se v makropórech a její rychlost je větší v dobře odvodněné půdě [7].

b) Kapilární vlhkost (kapilární voda)

Je to vlhkost nacházející se v mikropórech půdy, drží se v půdě kvůli soudržnosti a adhezi působící proti gravitační síle. Nachází se v půdních pórech a je zodpovědná za všechny fyzikální chemické mineralogické biologické interakce mezi půdou a okolním prostředím [7].

c) Hygroskopická vlhkost (hygroskopická voda)

Tvoří velmi tenkou vrstvu na povrchu půdních částic. Kvůli tomu, že se nenachází v půdních pórech, ale na povrchu půdních částic, je velmi obtížné ji odstranit kvůli velkým adhezním silám [7].



Obr. 1.4 Zaplnění půdních pórů vodou v závislosti na vlhkosti půdy [3]

S pojmem vlhkost souvisí i možnost jejího vyjádření. Obsah vody v půdě může být vyjádřen buď ve formě hmotnostního podílu vody, nebo jejím objemovým podílem.

Hmotnostní vlhkost

Hmotnostní vlhkost se počítá jako: [3]

$$w = \frac{m_w}{m_z} \cdot 100 (\%) \quad (1.1)$$

kde m_w (kg) je hmotnost vody a m_z (kg) je hmotnost tuhé fáze půdy [8].

Hmotnost m_z udává hmotnost zcela vysušeného vzorku půdy zpravidla při teplotě 105 °C a při konstantní hmotnosti. Výjimku tvoří půdy, které obsahují vysoký podíl organické složky. Tyto půdy sušíme při nižší teplotě [8].

Objemová vlhkost

Ta se používá, pokud potřebujeme vědět, jaká část půdních pórů je zaplněna vodou, vypočte se jako: [6]

$$\Theta = \frac{V_w}{V_T} \cdot 100 (\%) \quad (1.2)$$

kde V_w [l] je objem vody, V_T [l] je objem vzorku půdy [8].

Určení objemové vlhkosti nelze provést u neinertních materiálů, tj. u materiálů, které bobtnají. Hodnota V_T tedy není konstantní, a proto se zavádí tzv. číslo vyjádření vlhkosti γ , které se vypočte jako: [9]

$$\gamma = \frac{V_w}{V_s} \quad (1.3)$$

kde V_w (l) je objem vody a V_s (l) je objem pevné fáze (referenční hodnota) [8].

Vzájemný přepočítání mezi oběma vyjádřeními: [8]

$$\Theta = w \cdot \frac{\rho_d}{\rho_w} \cdot 100 (\%) \quad (1.4)$$

kde ρ_d je objemová hmotnost půdy (kg/m^3), ρ_w je objemová hmotnost vody (kg/m^3) [8].

1.5 Fyzikální vlastnosti půdy

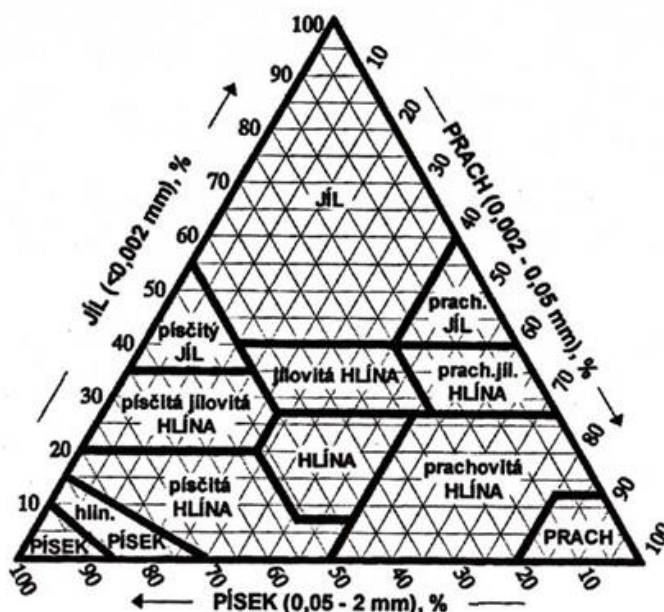
1.5.1 Struktura

Struktura je výsledkem prostorového uspořádání pevných částic a volného prostoru pórů. Základem struktury jsou agregáty. Ty vznikají slepováním bakterií a jílových částic s houbovými vlákny, hrubšími minerálními částicemi, kořeny a nerozloženými zbytky rostlin. Tvorba agregátů závisí na textuře půdy a je řízena přirozenými procesy v půdním prostředí i jejich fluktuací. Mezi procesy, které mají hlavní vliv na strukturu, jsou: zvlhčování a vysoušení, rozmrazání a zamrzání, mikrobiální aktivita a rozklad organické hmoty, aktivita kořenů a půdních živočichů a flokulace indukovaná přítomností kationtů [3]. Stabilita agregátů zlepšuje půdní pórovitost, provzdušněnost, vododržnost a kationtovou výměnnou kapacitu. Tím vznikají vhodné podmínky pro tvorbu kvalitních půd. V případě obsahu nestabilních agregátů má půda špatnou strukturu, snadno se slévá, utužuje a vytváří se škraloupky, které nepropouští vodu ani vzduch. Půdy se stabilní strukturou jsou pórovité, dobře propouští vodu i vzduch a jsou také odolné proti utužení. Dále nechávají pronikat kořeny rostlin i edafon (půdní organizmy) do půdního profilu a umožňují jeho další rozvoj [3].

1.5.2 Zrnitost

Pokud se jedná o písčité půdy (Obr. 1.5) s velkými póry, pak ty zadržují malé množství vody a voda, která v půdě zůstane, není pevně vázaná díky nízkému obsahu jemných částic, koloidů a organické hmoty. Zatímco jemnozrnné půdy zadržují velké množství vody, velká část této vody je tak silně vázaná na jemné částice, koloidy a v mikropórech uvnitř agregátů,

že není dostupná pro rostliny. S tím souvisí i bod vadnutí, který v písčitých půdách nastává při relativní vlhkosti okolo 5 hmotnostních procent, zatímco v jílovitých půdách již při vlhkosti okolo 15 %. V případě, že potřebujeme znát informaci o tom, jak je dostupná voda v půdě pro organizmy, pak potřebujeme znát nejen vlhkost půdy, ale i o jaký půdní druh se jedná a jak velký obsah organické hmoty půda obsahuje [3].



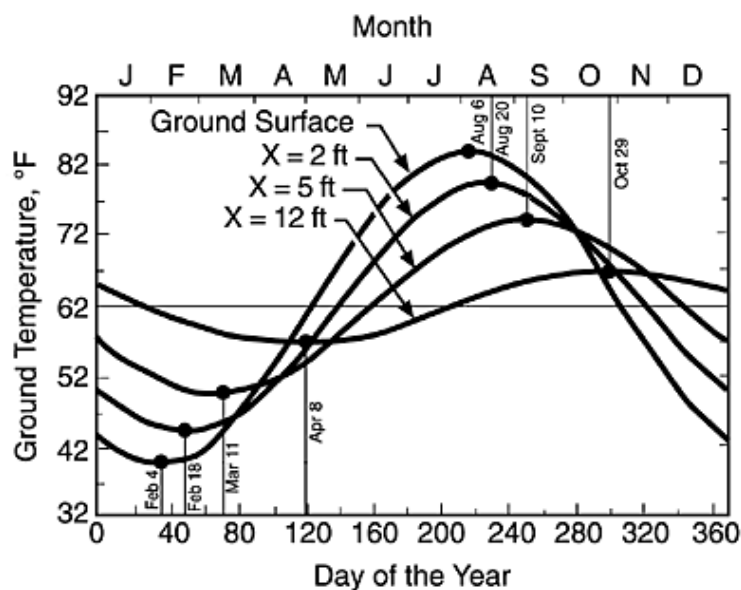
Obr. 1.5 Zrnitost půdy [10]

1.6 Teplota půdy

Teplota patří mezi důležité charakteristiky půdy, ovlivňuje jak vznik a vývoj půdy, tak i její fyzikální, chemické a biologické vlastnosti [5]. Existuje mnoho faktorů, na kterých závisí, tím nejdůležitějším je teplota vzduchu. Holá půda se ohřívá mnohem rychleji, stejně tak i rychleji chladne než půda, kterou pokrývá vegetace, ta působí jako izolační vrstva. Dále platí, že tmavá půda se ohřívá více než světlá půda, vlhká půda má o několik stupňů méně než půda suchá, což je způsobeno spotřebováním sluneční energie na vypařování vody [3].

Neustálé změny energetické bilance aktivního povrchu způsobují jeho proměnlivé ohřívání nebo ochlazování. Nejzřetelnější pravidelné periodické změny vyvolává zdánlivý pohyb Slunce na obloze během dne a určuje tak denní chody teploty půdy. Oběh planety Země je příčinou pravidelné roční změny. Ta souvisí se střídáním ročních období, které se projevují jako roční chod teploty půdy (Obr. 1.6) [11]. Teplotní režim půdy je řízen sezónním

a denním střídáním teplot, přítomností vegetace, vlhkostí a hloubkou profilu [3].



Obr. 1. 6 Průběh teploty v závislosti na dnech v roce [12]

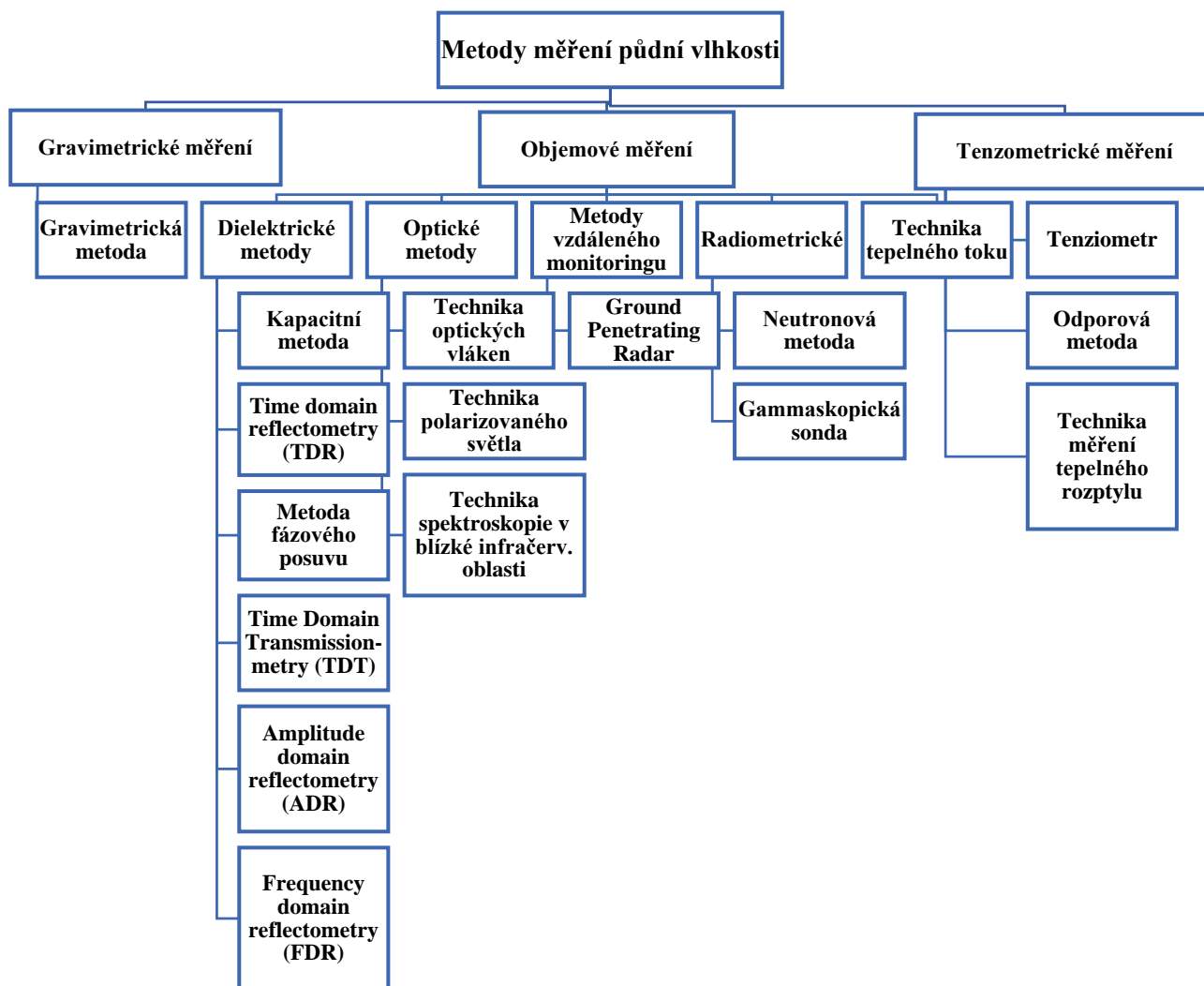
Největší změny teploty jsou na povrchu půdy a tyto změny teploty se snižují směrem do hloubky. Denní změny teploty ovlivňují jen teplotu povrchových vrstev půdy, sezónní změny teploty působí i ve větších hloubkách půdního profilu. V případě změny teploty se začne měnit i rozpustnost látek, rychlost zvětrávání, difúze, redox potenciál i vodní potenciál. Rostliny jsou citlivější na změny teploty v půdě než na změnu teploty vzduchu. Kořeny rostlin reagují na změnu půdní teploty velmi citlivě. Pokud poklesne pod určitou hodnotu, rostliny již nemají schopnost přijímat vodu a začínají vadnout [3, 11].

Tepelný režim půdy je projevem pohlcování, akumulace, přenosu a vyzařování tepla půdou. Zdrojem tepelné energie je sluneční záření, které zemský povrch z části absorbuje a z části odrazí. Největší absorpce probíhá u povrchu, který je tmavý a drsný nebo u terénu s jižní expozicí svahů. Do jaké míry se povrch půdy zahřeje, závisí na tepelné kapacitě půdy, ztrátách energie při vyzařování a při výparu z půdy a na přenosu energie do hlubších vrstev. Tepelnou vodivost půdy ovlivňuje mineralogické složení půdy, obsah humusu, vlhkost a v neposlední řadě textura a struktura půdy [3, 13].

2 Metody a systémy pro měření půdní vlhkosti a teploty

2.1 Metody a systémy pro měření půdní vlhkosti

Metody pro měření půdní vlhkosti lze rozdělovat podle mnoha hledisek. Lze je dělit z hlediska místa jejich použití, a to na metody laboratorní a terénní. Některé metody mohou být použitelné na obou místech. Další dělení je na metody destruktivní a nedestruktivní. U destruktivních metod dochází k narušení půdního profilu, u nedestruktivních nikoliv. Dále se dělí podle měřené veličiny na metody přímé a nepřímé. Metody přímé měří přímo obsah vody v půdě, metody nepřímé měří fyzikální veličiny, které souvisí s vlhkostí, následně se změřená veličina přepočítá prostřednictvím převodního vztahu na vlhkost. U nepřímých metod lze měření provádět opakovaně a výsledky měření jsou známy okamžitě [8]. Nepřímé metody mohou využívat následující fyzikální vlastnosti: relativní permitivita, vodivost, tepelná vodivost, akustická impedance, absorpce neutronů, magnetická rezonance molekul vody a v neposlední řadě optické techniky využívající odrazení a absorpce záření. Dalším hlediskem je dělení metod podle vyjádření obsahu půdní vlhkosti (Obr. 1.7). Podle toho se dělí na metody gravimetrické (hmotnostní), volumetrické (objemové) a tenzometrické (tlakové). Gravimetrická metoda spočívá ve vážení rozdílu hmotností odebraného vzorku před a po vysušení (Obr. 1.8). Volumetrické metody měří změnu vlhkosti v objemovém vzorku půdy. Tenzometrické metody měří rozdílnost tlaků. Tyto rozdílné tlaky vznikají z důvodu různého provlhčování (změna vlhkosti). Mezi tyto metody řadíme tenzometr, odporovou metodu či měření tepelného rozptylu.



Obr. 2.1 Metody pro měření půdní vlhkosti

2.1.1 Gravimetrická metoda

Gravimetrická metoda se řadí mezi metody přímé a destruktivní. Velmi často se používá jako kalibrační metoda pro jiné metody kvůli tomu, že dokáže jako jediná určit přesnou vlhkost půdy [8].

Nejdříve se zváží hmotnost vzorku půdy, poté se tento vzorek vysuší, změří se hmotnost vysušeného vzorku a výsledná vlhkost se spočte ze vztahu 1.1. Pokud spočítáme rozdíl těchto dvou vzorků, dostaneme hmotnost vody, která se nachází v půdě [8].



Obr. 2.2 Postup zjišťování vlhkosti gravimetrickou metodou [14-16]

Pro minerálně lehké až středně těžké půdy, které obsahují humus, dochází k sušení vzorku při teplotě 105 °C, sušení musí probíhat až do hmotnosti vzorku, která se již nemění. Vzorky s objemem 100 cm³ se suší 24 hodin. Porušený půdní vzorek s hmotností 10-20 g stačí sušit 6 hodin. Vzorky jílových minerálů můžeme sušit při 160 °C a vzorky, které obsahují větší množství humusu, se suší při teplotách do 70° C. Pokud zkoumané půdy obsahují příliš velké množství organických látek, používají se techniky vakuového sušení nad sikativem [8].

Nevýhodou této metody je její destruktivní charakter, protože pokud dochází k častému měření, pak dochází k čím dál většímu narušování právě zmíněného půdního profilu a celkovému narušování hydraulických vlastností půdy. Místa odebírání vzorků se tedy musí měnit, s čímž souvisí i to, že v případě nehomogenního rozložení půdní vlhkosti vnášíme chybu do výsledných hodnot vlhkostí. Navíc odběry jsou velmi často časově náročné a obtížné. Tato metoda se tedy nepoužívá při potřebě dlouhodobého sledování, ale je výhodné ji použít pro jednorázové měření vlhkosti, kde navíc ani jiné metody použít nelze [8].



Obr. 2.3 Nástroj pro odebrání půdních vzorků [17]

2.1.2 Dielektrické metody

Dielektrické metody využívají závislost relativní permitivity na vlhkosti. U půdních částic se relativní permitivita pohybuje v rozmezí 4-5, u vody je to cca. 81. Vidíme tedy, že relativní permitivita je velmi závislá na vlhkosti [7].

2.1.2.1 Kapacitní metoda

Tato metoda využívá jako dielektrikum kondenzátoru půdu. Princip kapacitní metody spočívá v porovnání doby nabíjení neznámého kondenzátoru C_2 , jehož dielektrikum je tvořeno půdou s dobou nabíjení referenčního kondenzátoru o známé kapacitě C . Relativní permitivita se tedy stanovuje z měřené nabíjecí doby kondenzátoru. A z té se pak stanovuje vlhkost [18-20].

Tato metoda umožňuje použít pro napájení obvodu (nabíjení kondenzátoru) stejnosměrné i střídavé napětí (oscilátor).

Kapacita prvku C_2 je tvořena elektrodami sondy a částečně i samotnou půdou, která působí jako část dielektrického média pro C_2 . Tento podíl je určen konstrukcí sondy. Pokud se kapacitní sonda sestává ze dvou nebo tří tyčí vložených do půdy, pak půda tvoří velkou část dielektrického média. V případě kapacitního prvku tvořeného dvěma válcovými elektrodami umístěnými nad sebou v přístupové trubce, půda tvoří pouze malou část dielektrického média. V tomto případě je půda ovlivněna pouze elektromagnetickým polem na okrajích elektrod kapacitoru [18].

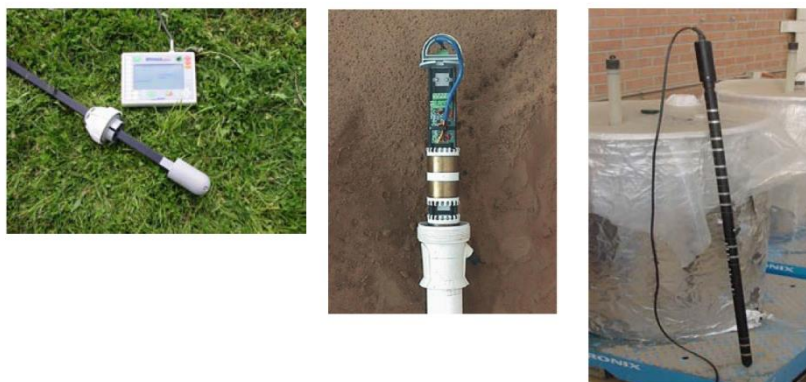
Měřená oblast je omezena na relativně úzký prostor tvaru disku, který se nachází okolo sondy. Sonda je nejcitlivější v oblasti vnitřní části tohoto disku, tzv. sonda je velmi citlivá

na jakoukoli vzduchovou mezeru mezi sondou, přístupovou trubicí a půdou. Typický objem snímáný kapacitními systémy používanými v přístupových trubicích je relativně malý ve srovnání s objemem snímaným neutronovými vlhkoměry (kap. 2.1.3.2). Další skutečností je, že kapalná vlhkost v přístupových trubicích bude mít silný vliv na odečty díky malému snímanému objemu a vlhkosti, která se nachází v blízkosti stěny sondy [18].

Obecně mezi výhody kapacitních metod patří skutečnost, že pokud se provede jejich kalibrace na danou půdu, pak jsou poměrně vysoce přesné. Další výhodou je, že díky variabilitě prostorového uspořádání elektrod je možné měřit současně ve více hloubkách. Dále platí, že jsou vhodné i do zasolenějších půd a mohou se aplikovat při trvalém monitorování nebo řízení závlahy. Mezi nevýhody této metody patří použití malého objemu měřené zeminy a v případě špatného kontaktu mezi zeminou a snímačem vznikají nepřesná měření. Mezi další nevýhody patří vyšší citlivost na teplotu, časté vytváření vzduchových mezer a potřeba kalibrace pro každou měřenou půdu [13].

Kapacitní senzory stejně jako senzory FDR lze umístit do půdy přímo anebo je lze vložit do přístupové trubky a následně celou konstrukci umístit do půdy. Jak pro kapacitní senzory, tak i pro metodu FDR (Frequency Domain Reflectometry) se doporučuje používat kalibrace, která je pro půdu specifická kvůli tomu, že provozní frekvence u kapacitních zařízení je pod 100 MHz. Navíc při těchto nízkých frekvencích může dojít ke změně objemové permitivity v minerálních půdách a výsledky jsou pak více ovlivněny teplotou, slaností, objemovou hustotou a obsahem jílu [18].

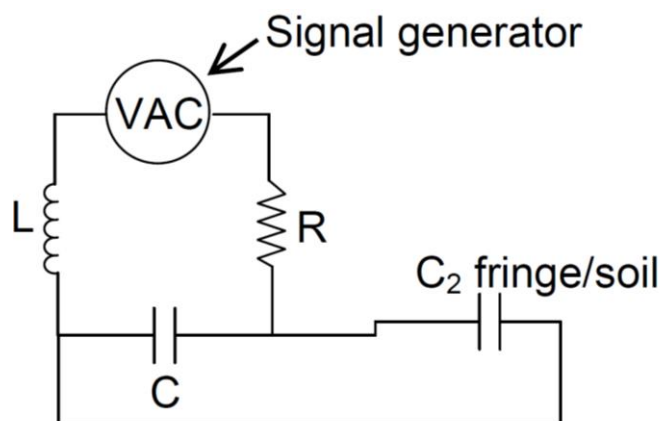
Zástupci kapacitních senzorů jsou např. zařízení Diviner 2000, Enviro-SCAN od firmy Sentek či senzor od firmy Delta-T PR1/6.



Obr. 2.4 Kapacitní senzory: Sentek Diviner 2000, Sentek Enviro-SCAN, Delta-T PR1/6 [18]

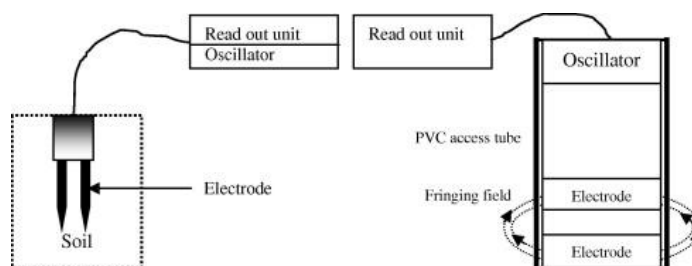
2.1.2.2 Reflektometrie ve frekvenční oblasti (FDR-Frequency Domain Reflectometry)

FDR metoda sleduje signál ve frekvenční oblasti. Použité obvody obsahují oscilátor, který se spolu s RLC prvky nachází v elektrickém obvodu a jsou vodivě spojeny s kondenzátorem C_2 (Obr. 2.5), který je tvořen dvěma kovovými elektrodami. Půda mezi nimi tvoří dielektrické prostředí [18].



Obr. 2.5 Schéma RLC oscilátoru [18]

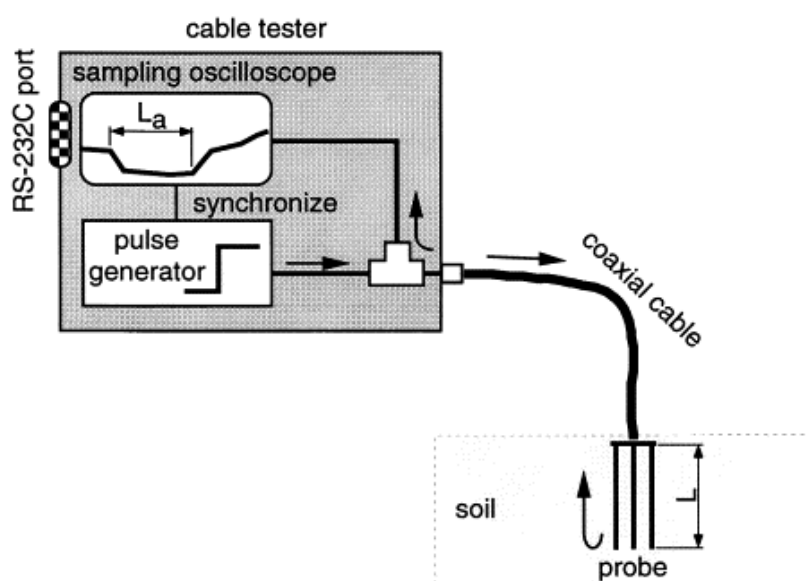
Jeho elektrická kapacita závisí na půdní vlhkosti. Kondenzátor je připojen k oscilátoru, který kmitá na rezonanční frekvenci daného elektrického obvodu. Jestliže se mění půdní vlhkost, mění se i parametry RLC prvků a tím dochází i ke změnám rezonanční frekvence. Při poklesu kapacity, dochází ke zvyšování oscilační frekvence. Relativní permitivitu je pak možné určit přímo ze změny frekvence rezonančního obvodu nebo ze změny parametrů elektrického obvodu tak, aby rezonanční frekvence zůstala zachovaná (Obr. 2.6). Následně se z relativní permitivity určí vlhkost. Oscilační frekvence snímače závisí nejen na obsahu vody, která obklopuje tyče, ale také na objemové elektrické vodivosti půdy, typu jílu a jeho příměsí a na teplotě [18-20].



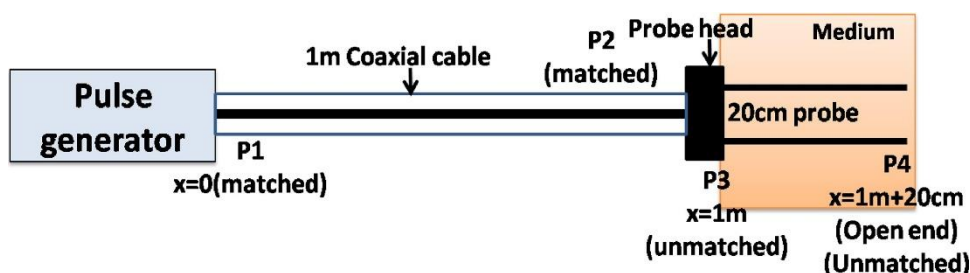
Obr. 2.6 Blokové schéma kapacitního a FDR senzoru [7]

2.1.2.3 Reflektometrie v časové oblasti (TDR – Time Domain Reflectometry)

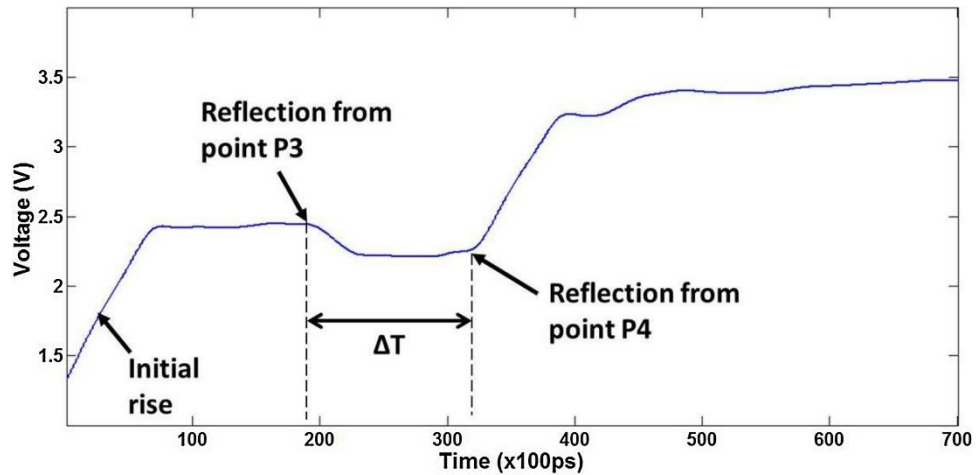
TDR metoda je založena na skutečnosti, že elektromagnetický signál se šíří v různém prostředí různou rychlostí. Relativní permitivita ϵ_r se určuje z měřené doby šíření elektromagnetických vln (vzorec 2.1). Generátor, k němuž je připojena sonda umístěná v půdě vygeneruje elektromagnetický signál, který se šíří přes koaxiální kabel do TDR sondy a zpět (Obr. 2.8). Sonda je obvykle tyčová, vyrobená z nerezové oceli nebo mosazi. Časový průběh t vlny (Obr. 2.9) od začátku až do konce sondy lze měřit vzorkovacím osciloskopem (Obr. 2.7). Šipky ukazují směr elektromagnetických vln, L a L_a představují skutečnou délku sondy a zdánlivou délku sondy [21].



Obr. 2.7 Blokové schéma systému TDR [21]



Obr. 2.8 Model přenosového vedení připojený k pulznímu generátoru pro měření vlhkosti půdy pomocí metody TDR [22]



Obr. 2.9 Průběh vlny procházející podél délky sondy umístěné ve vodě [22]

Relativní permitivita půdy se vypočte podle vzorce: [22]

$$\varepsilon_r = \frac{c \cdot \Delta T}{2 \cdot L^2} \quad (-) \quad (2.1)$$

kde c je rychlost elektromagnetického vlnění ve vakuu (m/s), L je skutečná délka sondy (m), ΔT je doba průchodu vlny podél sondy tam i zpět (s) [22].

Hodnoty vlhkosti půdy se odečítají z kalibračních rovnic, kterými mohou být vztahy mezi θ a dobou šíření, nebo mezi θ a permitivitou [21]. Abychom mohli rovnou odečítat danou vlhkost z měřicího přístroje, stačí do jeho paměti zabudovat tzv. kalibrační křivku, což je závislost půdní vlhkosti na měřené hodnotě [6]. Nejčastěji senzory TDR obsahují dvě nebo tři hrotovité elektrody (Obr. 2.10).



Obr. 2.10 TDR sensor s třemi hrotovitými elektrodami [23]

Mezi výhody této metody patří vysoká přesnost, většinou nevyžaduje kalibraci pro danou půdu, minimální narušení půdy při instalaci, nižší citlivost na běžné zasolení a umožňuje současně měřit i elektrickou vodivost půdy. Mezi nevýhody pak patří vyšší pořizovací cena, omezené možnosti použití v silně zasolených půdách, v půdách s vysokou elektrickou vodivostí a měření nižšího objemu půdy, cca o poloměru 3-4 cm podél elektrod [13].

2.1.2.4 Metoda fázového posuvu (Phase Shift Method)

Při průchodu elektromagnetické vlny podél vlnovodu dochází k jejímu fázovému posuvu mezi vstupem a výstupem. Jak velký fázový posun bude, ovlivňuje dráha, po které se signál šíří, jeho frekvence a rychlost šíření. Rychlost šíření je nepřímo úměrná relativní permitivitě prostředí, z které se pak určí vlhkost. Při konstantní frekvenci a délce zářičů je tedy fázový posun závislý na obsahu vody v půdě [13].

Mezi výhody tohoto senzoru patří jeho poměrně vysoká přesnost při použití kalibrace pro danou půdu, velký objem měřené zeminy a jeho nízké pořizovací náklady. Typickým zástupcem senzoru používající metodu fázového posuvu je senzor VIRRIB od firmy AMET (Obr. 2.11) [13].



Obr. 2.11 Phase Shift senzor od firmy AMET [24]

Mezi jeho nevýhody patří skutečnost, že při instalaci dochází k porušení přirozeného půdního profilu. Další nevýhodou je, že vyžaduje kalibraci pro danou půdu, jeho citlivost na zasolení je $> 3 \text{ dS/m}$ a je vhodný pouze pro trvalé sledování [13].

2.1.2.5 Přenos v časové oblasti (TDT - Time Domain Transmissometry)

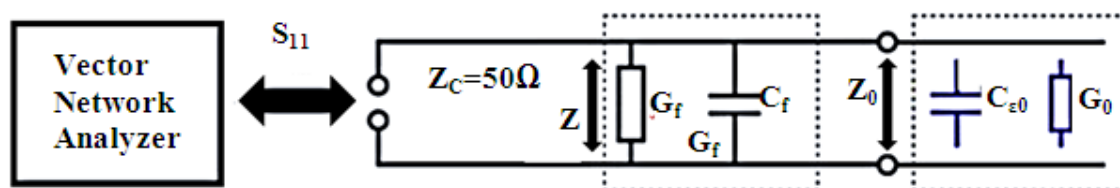
Rozdíl oproti metodě TDR spočívá v tom, že vlna se neodráží na konci zářiče zpět, ale po vyslání pulsu je na konci zářiče přijata a zjišťuje se čas, za který se dostala od začátku sondy až do jejího konce. Proto nemá snímač hrotovité elektrody, ale je tvořený uzavřeným vlnovodem (Obr. 2.12). Stejně jako u metody TDR bude puls měřený pomocí TDT pomalejší ve vlhkých půdách než v suchých půdách, tedy rychlost šíření pulsu souvisí s relativní permitivitou [13].



Obr. 2.12 TDT senzor [25]

2.1.2.6 Reflektometrie v amplitudové oblasti (ADR – Amplitude Domain Reflectometry)

Tato metoda používá oscilátor, který generuje elektromagnetický signál, který prochází podél impedančně přizpůsobeného přenosového vedení (Obr. 2.13) až do doby, než narazí na oblast s jinou impedancí (půda). V této oblasti dojde k tomu, že část signálu se odrazí zpět ke zdroji. Z rozdílu amplitud vyslaného a odraženého signálu se určí impedance a relativní permitivita, z které se následně určí obsah půdní vlhkosti [7].



Obr. 2.13 Schéma impedančně přizpůsobeného přenosového vedení [26]

2.1.3 Radiometrické metody

Tyto metody využívají interakci molekul vody v půdě s různými typy radioaktivního záření.

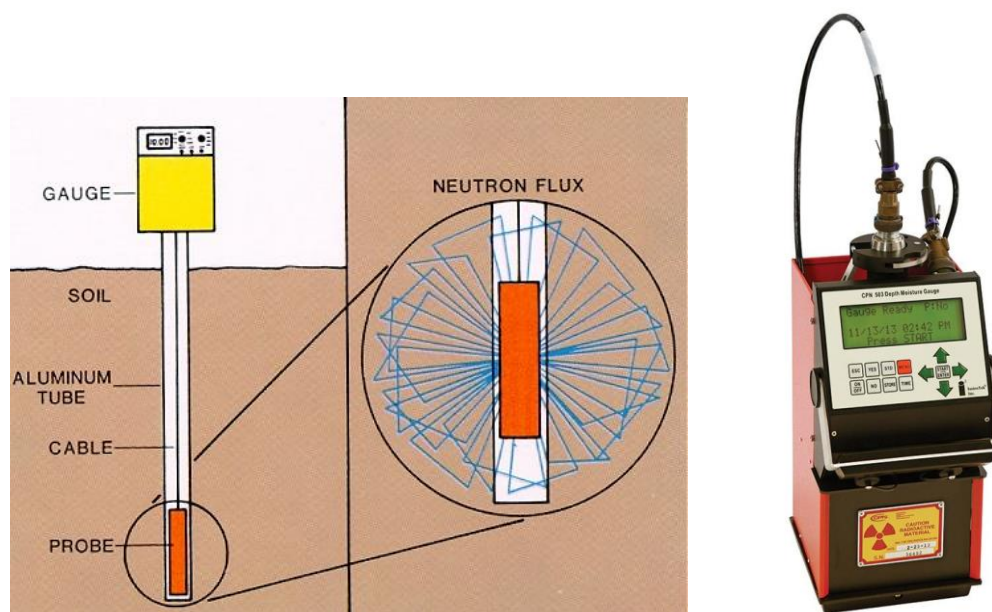
2.1.3.1 Gammaskopická metoda

Tato metoda využívá absorpci a rozptyl gama záření při průchodu hmotou. Tyto jevy jsou závislé na hustotě půdy a platí tedy, že pokud objemová hmotnost bude konstantní, pak oba jevy závisí jen na tom, jaký obsah vody půda obsahuje. Absorpce a rozptyl gama záření při průchodu hmotou je důsledek Comptonova jevu, což je fyzikální děj, při kterém dochází při interakci elektromagnetického záření s atomy lehkých prvků ke změně vlnové délky záření v důsledku předání části své energie atomům nebo jejich elektronům. Změna intenzity záření měřená scintilačním detektorem pak odpovídá vlhkosti v půdě (se změnou vlhkosti se primárně mění množství atomů vodíku v půdě) [7, 27].

2.1.3.2 Neutronová metoda

Metoda je založena na detekci zpomalení neutronů při interakci s jádry vodíků. Neutrony emitované ze zdroje jsou buď zpomaleny opakovanými kolizemi s jádry atomů půdy, nebo jsou těmito jádry absorbovány. Pokud dojde ke srážce neutronu s částicí, která má podobnou hmotnost (jádro vodíku), dojde k jeho zpomalení, jeho energie se zmenší

v průměru na polovinu a vytvoří se tzv. „mrak“ termalizovaných (zpomalených) neutronů. A protože voda je hlavním zdrojem vodíku, pak tato hustota zpomalených neutronů, která se vytváří kolem sondy (Obr. 2.14), závisí na vlhkosti půdy. Tedy změny obsahu vodíku a kyslíku v půdě jsou způsobené především změnou vlhkostí půdy. Hustota půdy má malý, ale měřitelný vliv na koncentraci termalizovaných neutronů kolem detektoru. Efekt je dostatečně malý, aby byl ignorován ve většině kalibrací [18].



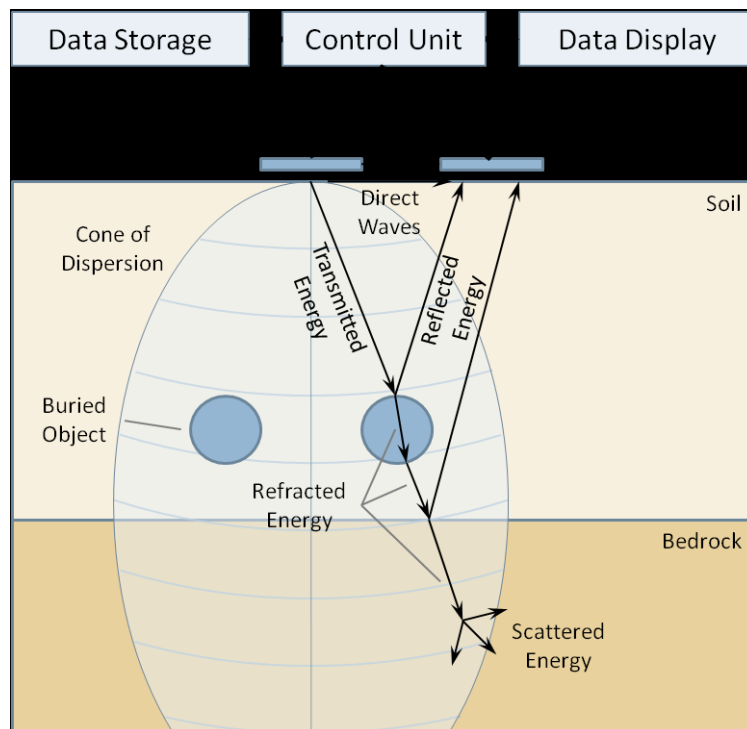
Obr. 2.14 Neutronový vlhkoměr (vlevo) a neutronový vlhkoměr CPN 503 ELITE (vpravo)
[28, 29]

Mezi výhody neutronových sond patří jejich stálost a přesnost, jedna sonda umožňuje měřit v různých hloubkách, výsledek není ovlivněn salinitou půdy a mají stabilní kalibrace pro danou půdu. Mezi nevýhody patří bezpečnostní riziko při používání, tedy sondu mohou obsluhovat jenom speciálně vyškolení pracovníci, dále je zapotřebí provádět kalibraci pro každou půdu. Je to poměrně velký a těžký přístroj a neumožňuje kontinuální měření. Měření v blízkosti povrchu půdy (cca 20 cm) jsou zkreslená, cena na jejich pořízení je vysoká a dosah měření závisí na půdní vlhkosti [13, 18].

2.1.4 Georadar (GPR – Ground Penetrating Radar)

Radar pro pronikání zemského povrchu vyzařuje elektromagnetické vlny přes anténní vysílač a přijímá je anténním přijímačem. GPR je založena na principu (Obr. 2.15) odrazu vysokofrekvenčních elektromagnetických vln od hranic mezi prostředími různých elektromagnetických vlastností. A protože v půdě se výrazně mění jen permitivita, pak se

následně z velikosti odrazu elektromagnetické vlny, která se vrací zpět do přijímače, určuje půdní vlhkost. Přístupy pro měření a zpracování dat a frekvence antén použité v průzkumech musí být zvoleny s ohledem na přesný účel průzkumu a podmínek v terénu [7, 30].



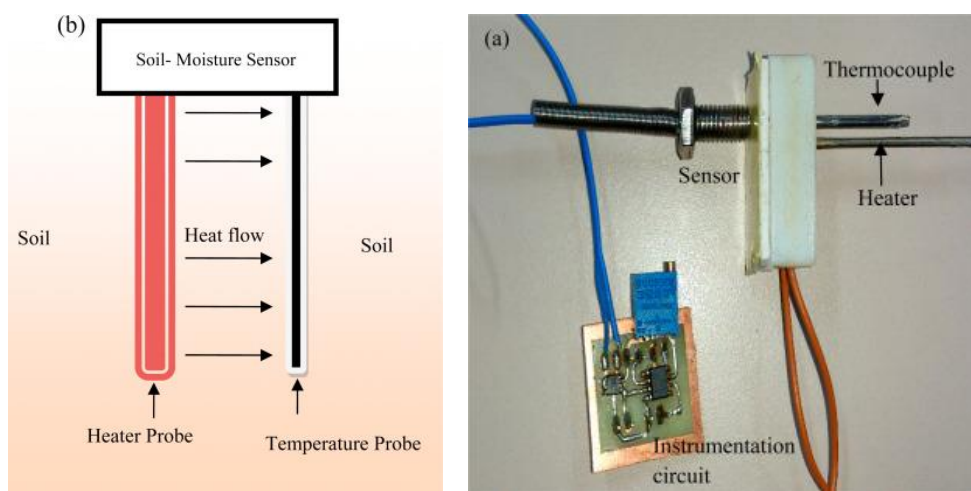
Obr. 2.15 Principiální schéma georadaru [31]

Výhoda této metody spočívá v jednoduchosti měření a zpracování dat, mezi její nevýhody patří skutečnost, že zpracování dat a interpretace mohou být subjektivní. Používá se pouze za příznivých podmínek, tedy pouze v případě písčitéch půd s nízkou kationtovou výměnnou kapacitou, nízkého počtu jiných předmětů, jako jsou kameny, nepřítomnosti jiných drsných povrchů a tvrdých porostných vegetací [7, 30].

2.1.5 Snímač tepelného toku (Metoda tepelného pulsu)

Tato technika, nazývaná také někdy metoda tepelného pulsu, využívá senzor skládající se ze dvou částí (tzv. Dual Probe Heat Pulse Sensor (DHP)), sondy ohříváče a čidla teploty. Oba elementy se instalují do půdy (Obr. 2.16). Nejprve se změří teplota sondy před započítím měření. Následně je do ohříváče vpuštěn tepelný puls a změří se teplota výsledná (jak rychle se teplo šíří od ohříváče k termočlánku). A protože tepelná kapacita vody způsobuje odvod tepla, tzn. suchý materiál se zahřívá rychleji než materiál mokrá, lze z tepelného toku určit obsah vody. Metoda je založena na principu měření rozdílu teploty

způsobeným okamžitým tepelným impulsem. Vzdálenost mezi ohřivačem a termočlánkem je malá (cca. 3 mm). Z tohoto rozdílu teploty a tepelné kapacity půdy lze následně určit vlhkost půdy [7, 32].



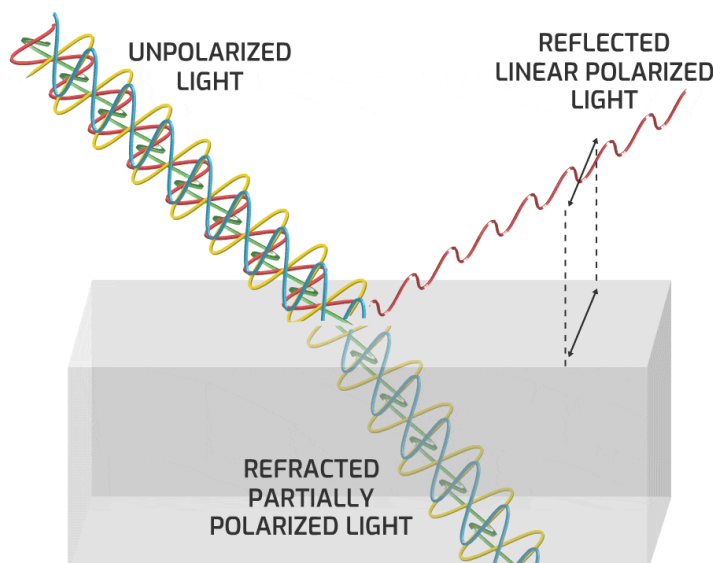
Obr. 2.16 Principiální schéma senzoru využívajícího metodu tepelného pulsu (DPHP) [32]

2.1.6 Optické techniky

Optické techniky jsou založeny na změně charakteru dopadajícího a odraženého světla na povrch půdy. Tyto metody zahrnují použití polarizovaného světla, senzorů na bázi optických vláken a spektroskopie v blízké infračervené oblasti [7]. Využívají se zejména pro monitorování povrchových vrstev půdy.

2.1.6.1 Technika polarizovaného světla

Tato technika je založena na principu, že přítomnost vlhkosti na povrchu půdy způsobuje polarizaci odraženého paprsku. Monochromatický zdroj vysílá nepolarizované světlo na povrch půdy. Při dopadu na povrch půdy dochází k jeho odrazu a zároveň k polarizaci (tzv. polarizace odrazem (Obr. 2.17)). Odražené světlo prochází přes rotující polarizační filtr na fotobuňku. Na té je získáván elektrický signál, odpovídající intenzitě záření s určitou rovinou polarizace, která je závislá na permitivitě (vlhkosti) půdy [7].



Obr. 2.17 Polarizace odrazem [33]

2.1.6.2 Technika optických vláken

Tato technika využívá optické neuzavřené vlákno, které je vloženo do půdy. Světlo se ze zdroje šíří skrz vlákno, na jehož konci narazí na půdu, od níž se odrazí. Podle toho, jak moc je půda vlhká, tak k tak velkému útlumu světla dochází. Index lomu (vzorec 2.2) (resp. odrazu) se tedy mění s množstvím půdní vlhkosti [7].

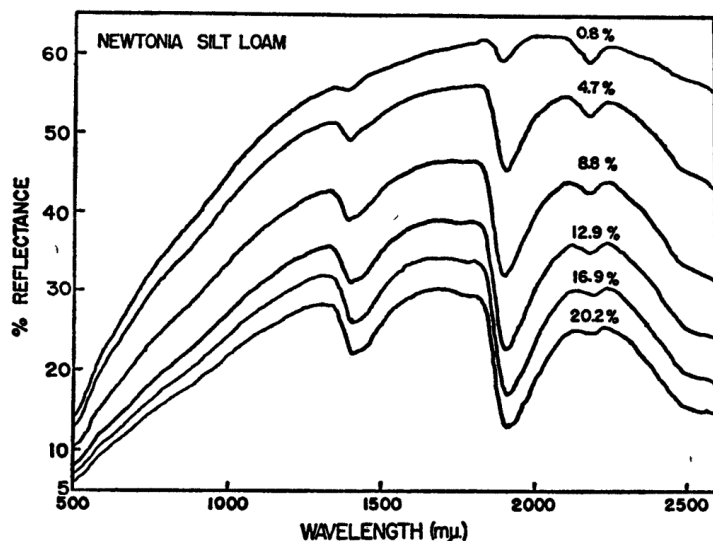
Index lomu se spočítá dle vztahu: [34]

$$n = \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} \quad (2.2)$$

kde μ_r je relativní permeabilita prostředí ($\mu_r = 1$) a ε_r je relativní permitivita prostředí [34].

2.1.6.3 Spektroskopie v blízké infračervené oblasti

Princip této techniky spočívá v absorpci části infračerveného záření jednotlivými molekulami média. Existuje několik pásem (Obr. 2.18) absorpce vlhkosti v blízké infračervené oblasti, nejsilnější jsou vlnové délky 1450, 1940 a 2950 nm. Tyto techniky spočívají v absorpci části infračerveného záření jednotlivými molekulami média. Tedy k jak velké dojde k absorpci, závisí na vlhkosti půdy. I když se jedná o bezkontaktní a rychlou techniku snímání vlhkosti, výsledky měření závisí na vlastnostech povrchu půdy. Hustý porost vegetace navíc omezuje odraz skoro-infračervené spektroskopie od povrchu půdy a tím může ovlivňovat přesnost měření [7]. Tato technika umožňuje vzdálené, ale i kontaktní měření.



Obr. 2.18 Absorpční pásy vody v blízké infračervené oblasti při různých vlhkostech [35]

Mezi výhody těchto senzorů patří: odolnost vůči elektromagnetickému rušení, chemická inertnost, nízká hmotnost, tepelná stabilita a celková vhodnost pro aplikace dálkového průzkumu oproti jiným elektronickým senzorům [7].

2.1.7 Tenzometrické techniky

2.1.7.1 Tenzometr

Po naplnění tenzometru (Obr. 2.19) odvzdušněnou vodou a jeho osazením do půdy, může voda proudit póry v keramické nádobce ven z tenzometru a zase dovnitř. V případě nenasyčení půdy a proudění vody ven z tenzometru, kdy se systém snaží dostat do rovnováhy, dochází ke vzniku podtlaku uvnitř přístroje, který je následně přenášen na ručičku manometru. Proudění ustává v momentě, kdy vzniklý podtlak vyrovná sání půdy [36]. Pokud se stále vlhkost půdy snižuje, půda odsává z tenzometru další vodu a vzniká tak ještě větší podtlak. Pokud se zvýší vlhkost půdy, pak dochází k nasávání vody tenzometrem zpět, proudění se zastaví a podtlak indikovaný na manometru se sníží až k hodnotě korespondující s aktuálním sacím tlakem půdy. V případě plného nasycení půdy, ručička manometru ukazuje nulovou hodnotu, tedy nevzniká žádný podtlak. Můžeme tedy říct, že čtení tenzometru ukazuje aktuální rovnováhu systému půda-voda, tedy tzv. tenzometrický potenciál půdní vody [36].



Obr. 2.19 Půdní tenzometr TMS11A od firmy FIEDLER [37]

2.1.7.2 Odporová metoda (metoda sádrových bločků)

Půdu lze považovat za polovodivý nehomogenní materiál, a platí, že se zvyšující se vlhkostí dochází ke zvýšení elektrické vodivosti. Tuto závislost můžeme popsat vztahem: [8]

$$\gamma = a \cdot w^b \text{ (S)} \quad (2.3)$$

kde γ je elektrická vodivost půdy (S), a , b jsou empirické konstanty (-) a w je vlhkost půdy (-) [8].

Pro měření se používají kovové elektrody, které jsou zalévány do sádrových (Obr. 2.20) nebo nylonových bločků zpevněných tak, aby se zachovala přesná geometrie elektrod. Tyto bločky snižují vliv chemického složení půdního roztoku na měření. Na druhou stranu, pokud jsou dlouhodobě uloženy v půdním profilu, dochází k jejich postupnému rozrušování. S časem se mění kalibrační závislost a musí se po jednom až dvou letech měnit. Další nevýhodou je jejich malá přesnost a nelineární závislost. Vzhledem k malému přírůstku vodivosti při vysokých vlhkostech nejsou vhodné pro měření vysokých hodnot vlhkosti. Nejsou příliš vhodné ani do písčitých půd s rychlými změnami vlhkosti kvůli pomalé reakci na změny vlhkosti (dlouhá doba odezvy). Mají výraznou teplotní závislost a platí, že změna teploty o 1 °C je, jako by se změnila vlhkost o 1 %. Dále v důsledku hystereze se zesložituje postup vyhodnocování, protože k hysterezi půdy se přidává ještě hystereze sádrového bločku, tzn. při stejném sacím tlaku ukazuje rozdílné hodnoty v závislosti na tom, jedná-li

se o proces vysušování nebo zvlhčování. Na druhou stranu tato metoda nevyžaduje údržbu, je jednoduchá, levná, vhodná do zasolených půd až 6 dSm^{-1} . Je vhodné ji aplikovat v řízení závlah, kde je vyžadovaná informace "sucho-vlhko" [8, 13].



Obr. 2.20 Sádřový bloček Watermark (vlevo) a řez senzoru zkonstruovaný ze sádřových bločků (vpravo) [38, 39]

2.1.7.3 Metoda tepelného rozptylu

Sonda (Obr. 2.21) se skládá z porézního bloku, který obsahuje zdroj tepla a teplotní senzor. Změří se teplota bloku před započítím měření. Následně je do ohříváče vpuštěn tepelný puls a změří se teplota výsledná (jak rychle se teplo šíří skrz blok). A protože tepelná kapacita vody způsobuje odvod tepla, tzv. suchý materiál se zahřívá rychleji než mokrý, lze z tepelného toku v porézním materiálu určit obsah vody. Toto zařízení však vyžaduje kalibraci a je dražší ve srovnání s odporovým blokem [7, 19].



Obr. 2.21 Sonda využívající metodu tepelného rozptylu [40]

2.2 Metody a systémy pro měření půdní teploty

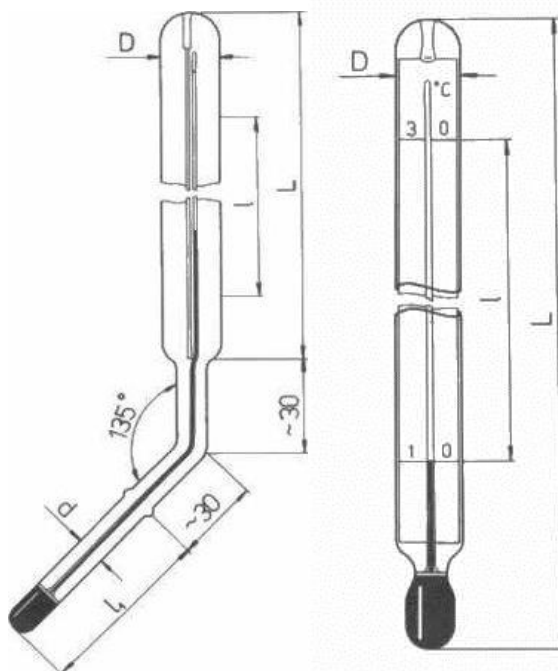
Existuje mnoho systémů pro měření teploty půdy. Tyto systémy využívají principy založené na tepelné roztažnosti použité kapaliny (líh, galium), dále využívají elektrických vlastností látky (kovů i polovodičů) v závislosti na teplotě, měření teploty prostřednictvím bimetalových pásků, termočlánků a s tím souvisejícího termoelektrického jevu. Teplota půdy se měří standardně v hloubkách 5, 10, 20, 50, 100, 150 a 300 cm. [41-43]

2.2.1 Kapalinové půdní teploměry

Kapalinový půdní teploměr měří teplotu na základě tepelné roztažnosti lihu nebo slitin galia v tenké skleněné trubičce (kapiláře) [41, 42]

Teplota varu methyalkoholu je 64,65 °C a teplota tání je -97,78 °C. Galiové teploměry se používají pro běžná meteorologická pozorování [41, 42].

Pro měření teploty půdy do hloubky 20 cm se používá teploměr s ohnutým stonkem (Obr. 2.22). Tento ohyb se nachází mezi jímkou a stupnicí a slouží pro snadnější odečítání ze stupnice [41, 42].



Obr. 2.22 Kapalinový půdní teploměr s ohnutým stonkem (vlevo) a kapalinový půdní teploměr (vpravo) [44]

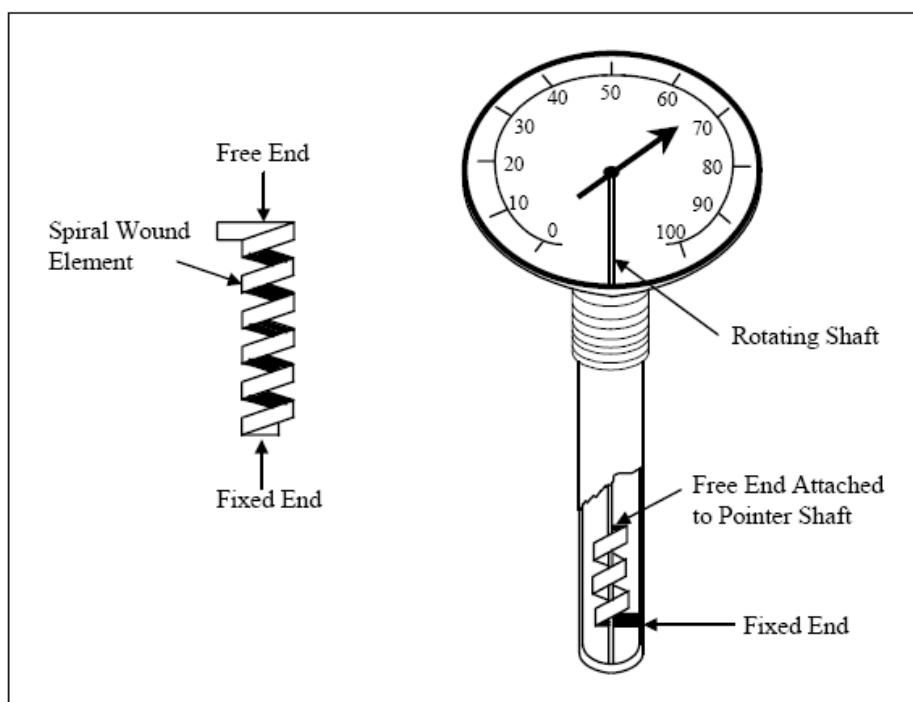
Pro měření ve větších hloubkách se využívá kapalinový půdní teploměr (Obr. 2.22) zavěšený na řetízku a spuštěný do ocelové trubky požadované délky, která je vložena do půdy. Důležité je použití teploměru s velkou časovou konstantou, aby nedošlo ke zkreslení odečtených výsledků během jeho vyjímání z trubky. Při tomto měření je třeba počítat s určitou dobou potřebnou k ustálení měřené teploty [41, 42].

Mezi výhody kapalinových teploměru patří jejich jednoduchá konstrukce, jednoduchá metoda pozorování a možnost měření teploty kdekoli, protože nevyžadují pro provoz elektrickou energii. Nevýhodou je, že se s nimi musí zacházet opatrně, protože skleněný materiál je křehký. Další nevýhodou je, že jsou nepoužitelné pro kontinuální měření kvůli tomu, že neumožňují převod z analogového signálu na digitální a nelze tak provádět dálkový přenos dat [41, 42].

2.2.2 Bimetalové půdní teploměry

Je to teploměr, který k měření teploty využívá bimetalový (dvojkovový) pásek, který se skládá ze dvou kovů s různými činiteli tepelné roztažnosti. Při změně teploty dochází k ohýbání pásku a tento pohyb se přenáší na ručičku přístroje [45].

Pro zvětšení účinnosti a tím i citlivosti čidla se používá bimetal, který je svinutý do šroubovice nebo spirály (Obr. 2.23). Tyto senzory jsou použitelné do 400 °C.



Obr. 2.23 Bimetalový půdní teploměr [46]

2.2.3 Elektrické půdní teploměry

Nejčastěji používanými čidly jsou elektrické odporové prvky, polovodičové prvky (termistory) a termočlánky [42]. Typicky vypadající digitální elektrický půdní teploměr:



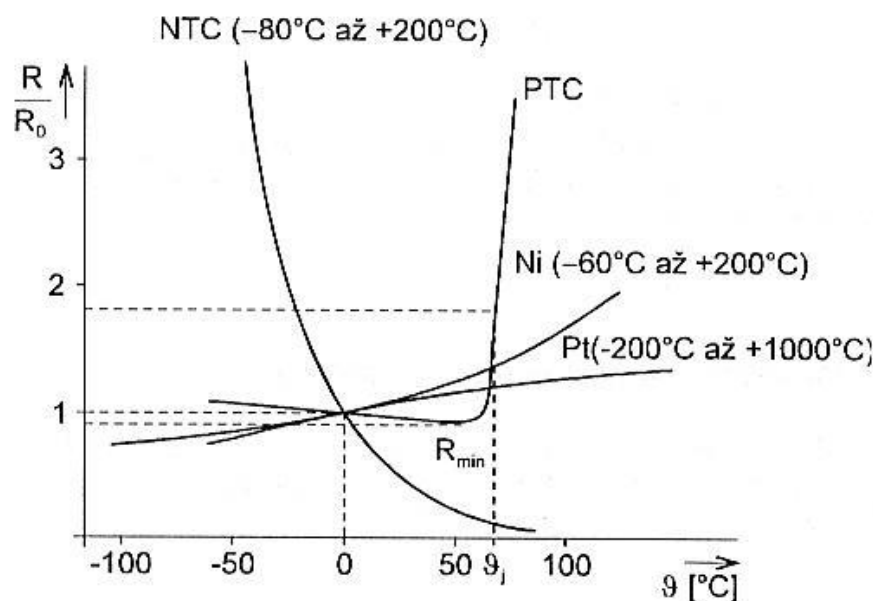
Obr. 2.24 Elektrický digitální půdní teploměr [47]

Tyto elektrické teploměry jsou široce používány v meteorologii pro měření teplot. Jejich hlavní předností je schopnost poskytovat výstupní signál vhodný pro dálkové měření, záznam, ukládání nebo přenos teplotních dat.

2.2.3.1 Elektrické odporové teploměry

Tyto teploměry měří elektrický odpor materiálu, který se mění s teplotou materiálu. Převodní charakteristika graficky znázorňuje tuto závislost (Obr. 2.25). Dobrý kovový odporový teploměr splňuje tyto požadavky: jeho fyzikální a chemické vlastnosti zůstávají stejné v celém rozsahu měření teploty, jeho odpor se bude stále zvyšovat s rostoucí teplotou bez jakýchkoli nespojitostí v rozsahu měření, vnější vlivy jako je vlhkost, koroze nebo fyzikální deformace, významně nezmění jeho odpor, jeho vlastnosti zůstanou stabilní po

dobu dvou let nebo déle [41, 42].



Obr. 2.25 - Převodní charakteristiky platinových sensorových elementů s různými typy odporových sensorů teploty [48]

Výše uvedené požadavky nejlépe splňuje čistá platina, proto se nejčastěji používá pro výrobu elektrických teploměrů. Platina je známá především chemickou netečností, časovou stálostí a vysokou teplotou tání. Používá se vysoce čistá platina, protože jakékoliv nečistoty silně ovlivňují odpor [41, 42]. Dále se mohou odporové teploměry vyrábět např. z niklu, mědi, molybdenu a příležitostně z wolframu pro meteorologické účely [41, 42]. Obvykle jsou hermeticky utěsněny v keramickém pouzdře. Jejich časová konstanta je menší v porovnání s kapalinovými teploměry [41, 42].

Mezi hlavní zdroje chyb při měření teploty pomocí elektrických odporových teploměrů patří samovolné zahřívání prvku teploměru, nedostatečná kompenzace odporu vedení, nedostatečná kompenzace nelinearit ve snímači nebo zpracovatelském nástroji a náhlé změny odporu kontaktů spínačů. K samovolnému zahřívání dochází proto, že průchod proudu odporovým prvkem produkuje teplo, a tak teplota prvku teploměru je vyšší než teplota okolního média. Odpor připojovacích vodičů způsobí chybu ve snímání teploty. Ve spojení s vnitřním vodičem jsou 2vodičové, 3vodičové a 4vodičové systémy. Dvouvodičový systém je nepraktický, protože neumí odstranit vliv odporu vodičů. 3vodičový systém se skládá ze dvou vodičů na jedné svorce odporového prvku a 1 vodiče na druhé svorce. Tato

metoda umožňuje odstranit vliv odporu vodičů za podmínek, že vodič má stejný materiál, délku a elektrický odpor a rozložení teploty. 4vodičový systém se skládá ze dvou vodičů připojených na svorku odolného prvku. Tato metoda může odstranit vliv odporu vodičů. 4vodičový systém má nejvyšší přesnost [41, 42].

2.2.3.2 Polovodičové teploměry

Dalším typem odporového prvku, který se běžně používá, je termistor. Jedná se o polovodič s relativně velkým teplotním koeficientem odporu, který může být buď kladný, nebo záporný v závislosti na skutečném materiálu [42]. Pro měření teploty se používá termistor se záporným teplotním koeficientem odporu. Teplotní rozsahy termistorů se pohybují od běžných $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ až do extrémních rozsahů v oblasti nízkých teplot od $4,2\text{ K}$ a vysokých teplot do $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ [41, 42].



Obr. 2.26 Půdní polovodičová sonda THERM200 [49]

Mezi jejich výhody patří velký teplotní součinitel odporu, který umožňuje snížit napětí aplikované přes odporový můstek při dosažení stejné citlivosti, čímž se snižuje nebo dokonce eliminuje potřeba zohlednit odpor vodičů a jejich změn. Prvky mohou být vyrobeny velmi malé, takže jejich velmi nízká tepelná kapacita může přinést malou časovou konstantu. Na druhou stranu velmi malé termistory s nízkou tepelnou kapacitou mají tu nevýhodu, že při daném rozptylu je účinek samoohřevu větší než u velkých teploměrů. Proto je třeba dbát na to, aby byl ztrátový výkon malý [41, 42].

Ani elektrický odporový teploměr, ani termistor nejsou lineární v rozšířeném teplotním rozsahu, ale mohou se přibližovat lineárnímu výstupu, pokud je rozsah omezen. Proto musí být učiněno ustanovení, které by kompenzovalo tyto nelinearity. To je nutné pro termistory z důvodu dosažení použitelného meteorologického rozsahu měření [41, 42].

2.2.3.3 Termočlánek

Teploměry s termočlánkem využívají termoelektrický jev. V případě dvou vodičů, vyrobených z různých materiálů, které jsou na jednom konci spolu vodivě spojeny, platí, že spojené konce vytvářejí měřicí spoj a volné konce tvoří srovnávací spoj. Pokud měřicí spoj v porovnání se srovnávacím spojem má jinou teplotu, vytváří se mezi těmito vodiči stejnosměrné napětí, které je úměrné rozdílu teplot mezi měřicím a srovnávacím spojem. Toto tzv. elektromotorické napětí je velmi malé a dosahuje maximálně 5,2 mV na 100 °C teplotního rozdílu [41, 42, 50].

Termočlánky se vyrábějí svařováním nebo pájením drátů příslušných kovů. Tyto spoje mohou být velmi malé a mají zanedbatelnou tepelnou kapacitu. Při měření teploty se měří elektromotorická síla, přičemž jeden spoj je udržován na standardní známé teplotě a druhý spoj přebírá teplotu, jejíž hodnotu měříme. Tato elektromotorická síla může být přímo vztažena k rozdílu teplot mezi dvěma spoji předchozí kalibrační systému, a tím je zjištěna neznámá teplota. Velmi dobré přesnosti lze dosáhnout s vhodně citlivým přístrojem, přičemž častá kalibrace je nezbytná. Pro meteorologickou práci je vhodné použít měď-konstantan nebo železo-konstantan [41, 42].

Mezi hlavní zdroje chyb patří změny odporů připojovacích vodičů s teplotou. Tento účinek může být minimalizován udržováním všech vodičů co nejkratších, nejkompaktnějších a dobře izolovaných. Dále mohou vznikat svodové proudy z okolních silových obvodů atd. [41, 42].

2.3 Komerčně dostupné systémy pro měření vlhkosti a teploty půdy

2.3.1 Komerčně dostupné systémy pro měření vlhkosti půdy

Pro měření půdní vlhkosti existuje celá řada komerčně dostupných systémů založených na různých technologiích. Většina z těchto senzorů měří jak vlhkost půdy, tak i její teplotu (Tab. 2.2). Systémy pro měření vlhkosti jsou nejčastěji založeny na dielektrických metodách. Největšími konkurenty na trhu jsou firmy Campbell Scientific, Delta-T Devices, METOS, METER a IMKO. Mezi důležité vlastnosti patří měřicí rozsah, v jakém dané vlhkoměry

měří, přesnost, s jakou měří a rozsah provozních teplot. Většina senzorů měří s přesností okolo $\pm 2-3\%$, v rozsahu 0-100 % VWC a v rozsahu provozních teplot zhruba od -40-60 °C.

Obvykle na trhu najdeme systémy, které nejsou bezdrátové, ale doplněním o vhodný datový záznamník (tzv. data logger) lze z nich informace bezdrátově přenášet, a to přes různé sítě, které udává výrobce připojeného dataloggeru. Mnoho výrobců senzorů, jako je např. firma Campbell Scientific, má i vlastní síť, přes kterou je možné přenášet data. Mezi systémy, které umožňují bezdrátový přenos patří zařízení od firmy Slantrange, EnviroSCAN Sentek 5-wire (RT6), EnviroSCAN Sentek PLUS od firmy Sentek, Smart Sensor 19030 od GARDENY, HydroGO, HydraGO Field od firmy STEVENS a dále pak půdní senzory od firem CLEVER FARM a PYCNO. Většina z nich umožňuje přenos dat přes síť Wi-fi. Některé z nich pak umožňují přenos přes síť LoRa, Sigfox či přes rádiovou síť nebo prostřednictvím satelitu. Výstupy snímačů jsou uvedeny za informací o bezdrátovém vzdáleném přenosu dat (Tab. 2.1, Tab. 2.2).

Mezi senzory, které k měření půdní vlhkosti využívají techniku TDR, patří Trime Pico 32/64 od firmy IMKO, či CS655 a CS650 od firmy Campbell Scientific. Mezi systémy, které jsou založeny na FDR či kapacitní technice patří EC-5, TEROS 11 a 10 HS od firmy METER. Na impedančním principu pracují systémy HydraGO Field a Hydra GO od firmy STEVENS. Mezi tenzometry patří systémy TMS11A od firmy FIEDLER a EQ-3 od firmy Delta-T Devices. Techniku tepelného rozptylu využívá systém 229-L od firmy Campbell Scientific. Odporovou techniku pak využívá systém WATERMARK (model 200SS) s Watermark Handheld Meter od firmy Irrometer či 253-L nebo 257-L od firmy Campbell Scientific. TDT techniku využívají systémy od firmy GroPoint, tedy systémy GroPoint-Lite, GroPoint Profile/Pro a GroPoint Classic. Příkladem neutronového systému je CPN 503 ELITE od firmy ELITE. Techniku spektroskopie v blízké infračervené oblasti využívá start-upová firma AgroCares, tzv. AgroCares Nutrient Scanner.

Tab 2.1 Komerčně dostupné systémy pro měření půdní vlhkosti 1 [51-64]

Název senzoru	Výrobce	Měřicí metoda	Napájecí napětí	Rozsah provozních teplot	Rozsah měření vlhkosti	Přesnost	Bezdrátový vzdálený přenos
CS616	Campbell Scientific	TDR	5-18 V DC	(0-70) °C	(0-50) %	±2,5 %	Externě: 0,7 V DC (čtvercová vlna)
HS2	Campbell Scientific	TDR	6 V DC (4 AA baterie)	Dle připojeného senzoru	(0-50) %	Standardně >3 %	NE (bluetooth, životnost baterie: 6-12 m)
Trime-Pico IPH T3/44	IMKO	TDR	(7-24) V DC	(-15-50) °C	(0-100) %	± (2-4) %	Externě: (0-1) V
PICO-PROFILE	IMKO	TDR	(7-24) V DC	(-15-50) °C	(0-100) %	± 2 %	Externě: IMP-BUS, SDI12, RS485
HD2	IMKO	TDR	4,8 V DC (4 AA baterie)	(-20-70) °C	Dle připojeného senzoru	Dle připojeného senzoru	Externě: IMP-BUS, RS485
TEROS 10	METER	Kapacitní/FDR	(3-15) V DC	(-40-60) °C	(0-70) %	± 1-2 %	Externě: 1-2,5 V
EC-5	METER	Kapacitní/FDR	2,5-3,6 V DC	(-40-60) °C	0-100 %	± 2 %	Externě: 0,2-1,25 V
10HS	METER	Kapacitní/FDR	3-15 V DC	(-40-50) °C	0-69 %	± 3 %	Externě: 0,3 – 1,25 V
PR2 (Analog.)	Delta-T Devices	Kapacitní/FDR	5,5-15 V DC		0-100 %	± 4 %	Externě: 0-1 V
VIRRIB5-LPA/V	IRRIMON	TDT	5,5-18 V DC	Výrobce neuvádí	5-50 %	< 1 %	Externě: 0,2-5 mA/0,2-5 V
VIRRIB 4-20 (kruhová sonda)	IRRIMON	TDT	5,5-18 V DC	Výrobce neuvádí	5-50 %	< 1 %	Externě: 4-20 mA
WATERMARK (model 200SS)	Irrrometer	Odporová	9 V DC	Výrobce neuvádí	0-200 kPa	Výrobce neuvádí	Externě
Soil-Clik	HUNTER	Odporová	24 V AC	Výrobce neuvádí	Výrobce neuvádí	Výrobce neuvádí	Externě
229-L	Campbell Scientific	Metoda tepelného rozptylu	Výrobce neuvádí	Výrobce neuvádí	-10-2500 kPa	Výrobce neuvádí	Externě
253-L	Campbell Scientific	Odporová metoda	Výrobce neuvádí	Výrobce neuvádí	-200-0 kPa	Výrobce neuvádí	Externě
257-L	Campbell Scientific	Odporová metoda	Výrobce neuvádí	Výrobce neuvádí	-200-0 kPa	Výrobce neuvádí	Externě

Název senzoru	Výrobce	Měřicí metoda	Napájecí napětí	Rozsah provozních teplot	Rozsah měření vlhkosti	Přesnost	Bezdrátový vzdálený přenos
VH400	Vegetronix	TDR	3,5-20 V DC	-40-85 °C	Výrobce neuvádí	2 % (při 25 °C)	Externě: 0-3 V
GroPoint-Classic	GroPoint	TDT	5,5-18 V DC	-20-70 °C	0-100 %	± 2 %	Externě: 4-20 mA, 0-5 mA
Soil Humidity sensor	Veinasa	Kapacitní metoda	5-30 V DC, 12-30 V DC	-40-85 °C	0-100 %	± 3 % (0-53 %), ± 5 % (53-100 %)	Externě: 0-2 V, 4-20 mA, RS485, RS232
GS1	METOS	FDR	3-15 V	-40-50 °C	0-57 %	± 1-2 %	Externě: 1-2,5 V
AgroCares Nutrient Scanner	AgroCares	Spektroskopie v blízké infračervené oblasti	Baterie – 3,6 V	Výrobce neuvádí	Spektrální rozsah: 1300-2600 nm	Výrobce neuvádí	NE (USB)
CPN 503 ELITE Hydroprobe	ELITE	Neutronová metoda	Lithium-ion 8,4 V, 4 Ah battery pack	0-60 °C	0.0 to 6.0 in/ft (0.0 to 0.50 gcc)	PRECISION AT 1 MIN.: ±0.024 in/ft (±0.002 gcc) at 2.88 in /ft. (0.24 gcc)	NE (USB)
4P, 4P+	Slantrange	Výrobce neuvádí	9-28 V DC	Výrobce neuvádí	Spektrální rozsah 410-950 nm	Výrobce neuvádí	ANO

Tab. 2.2 – Komerčně dostupné systémy pro měření vlhkosti a teploty půdy [37, 51-54, 59, 65-74]

Název senzoru	Výrobce	Měřicí metoda	Napájecí napětí	Rozsah provozních teplot	Rozsah měření		Přesnost měření		Bezdrátový vzdálený přenos
					Vlhkost	Teplota	Vlhkost	Teplota	
CS655	Campbell Scientific	TDR	(6-18) V DC	(-50-70) °C	(0-100) %	(-50-70) °C	>±1 %	±0,02 °C	Externě: SDI-12, RS485
CS650	Campbell Scientific	TDR	(6-18) V DC	(-50-70) °C	(0-100) %	(-50-70) °C	>±1 %	±0,02 °C	Externě: SDI-12, RS485
SoilVUE10	Campbell Scientific	TDR	Výrobce neuvádí	Výrobce neuvádí	Výrobce neuvádí	Výrobce neuvádí	±1,5 %	±0,15 °C (-30-40 °C)	Externě-SDI-12 (verze 1,4)
Trime Pico 32/64	IMKO	TDR	7-24 V DC	(-15-50) C	(0-100) %	(-15-50) °C	±(1-3) %	±1,5 °C	Externě-(0-1) V
TEROS 11	METER	Kapacitní/FDR	4-15 V DC	(-40-60) °C	0-100 %	(-40-60) °C	±1-2 %	± 1 °C (-40-0 °C)	Externě: DDI sériový, SDI-12
TEROS 12	METER	Kapacitní/FDR	4-15 V DC	(-40-60) °C	0-100 %	(-40-60) °C	±1-2 %	± 0,5 °C (-40-0 °C)	Externě: DDI sériový, SDI-12
SM150T	Delta-T Devices	TDR	5-14 V DC	Výrobce neuvádí	0-100 %	0-40 °C	±3 %	±0,5 °C (0-40 °C)	Externě: 0-1 V
ML3 Theta Probe	Delta-T Devices	TDR	5-14 V DC	Výrobce neuvádí	0-100 %	0-40 °C	± 1 %	± 0,5 °C (0-40 °C)	Externě: 0-1 V
WET-2	Delta-T Devices	TDR	6-10 V DC	(-5-50) °C	0-100 %	0-50 °C	± 3 %	±1,5 °C	Externě: RS232
EnviroSCAN Sentek 5-wire (RT6)	Sentek	Pravděpodobně kapacitní/FDR	solární napájení	(-30-85) °C	Výrobce neuvádí	Výrobce neuvádí	Výrobce neuvádí	Výrobce neuvádí	Cellular rádiový
EnviroSCAN Sentek PLUS	Sentek	Pravděpodobně kapacitní/FDR	baterie	(-20-75) °C	Výrobce neuvádí	Výrobce neuvádí	Výrobce neuvádí	Výrobce neuvádí	Cellular, satelitní
Smart Sensor 19030 (sada)	GARDENA	Výrobce neuvádí	2x AA 1,5 v alkalické baterie	(-1-50) °C	0-100 %	(-1-50) °C	Výrobce neuvádí	Výrobce neuvádí	Wi-fi, LAN, ETHERNET (živ. bat. 6 měs.)
TMS11A	FIEDLER	Tenzometr	3,3 V DC	0-50 °C	-65-0 kPa	(0-50) °C	0,3 kPa	0,3 °C	Externě: RS485
TEROS 21	METER	Tenzometr	3,6 – 15 V DC	-40-60 °C	-2000-(-9) kPa	-40-60 °C	± 10% z odečtu + 2 kPa (-100 do -9 kPa)	± 1 °C	Externě: RS-232, SDI-12
EQ3	Delta-T	Tenzometr	5-14 V	0-40 °C	-1000-0	0-40 °C	±10 kPa (-	± 0,5 °C	Externě:

Název senzoru	Výrobce	Měřicí metoda	Napájecí napětí	Rozsah provozních teplot	Rozsah měření		Přesnost měření		Bezdrátový vzdálený přenos
					Vlhkost	Teplota	Vlhkost	Teplota	
	Devices				kPa		100-0 kPa)		0-1 V
GroPoint-Lite (Digitální verze)	GroPoint	TDT	6-14 V DC (max 18 V DC)	-20-70 °C	0-100 %	-20-70 °C	± 2 %	± 0,5 °C	Externě: SDI-12, RS485, 0-5 mA, 4-20 mA
GroPoint-Profile/Pro	GroPoint	TDT	6-14 V DC (max 18 V DC)	-20-70 °C	0-100 %	-20-70 °C	± 2 %	± 0,5 °C	Externě: SDI-12
Aranet/Substrate	Aranet	Výrobce neuvádí	1 AA alkalické nebo lithiové baterie	-20-55 °C (alk.baterie), -40-60 °C (lith. baterie)	0-100 %	-40-60 °C	± 1-3	±1 °C	ANO do 3 km
HydraProbe 2	Stevens Water	Výrobce neuvádí	9-20 V DC	-10-60 °C	0-100 %	-10-60 °C	Výrobce neuvádí	± 0,3 °C	Externě: SDI-12, RS485
SMEC-300	Spectrum Technologies	Kapacitní	3 V	Výrobce neuvádí	Výrobce neuvádí	0,5-80 °C	3 %	± 0,8 °C	Externě
Soil temperature and humidity sensor	Veinasa	Kapacitní	5-30 V DC, 12-30 V DC	-40-80 °C	0-100 %	-40-80 °C	± 3 % (0-53 %), ± 5 % (53-100 %)	± 0,5 °C	Externě: 0-2 V, 4-20 mA, RS485, RS232
Series nd-Ms10 Soil Moisture	BONAD	FDR	5-30 V DC, 12-30 V DC	-40-85 °C	0-100 %	-40-80 °C	± 3 % (0-53 %), ± 5 % (53-100 %)	±0,5 °C	Externě: 0-2 V DC, 4-20 mA, RS485
MEC-10 RS485 Soil Moisture/ Temperature and EC sensor	BONAD	FDR	3,6-30 V DC, 12-30 V DC	-40-80 °C	0-100 %	-40-80 °C	± 2 % (0-50), ± 3 % (50-100 %)	±0,5 °C	Externě: 0-2 V DC, 4-20 mA, RS485
HD3910.1/HD3910.2	Delta Ohm	Kapacitní metoda	3,6 V DC, 5-30 V DC,	-40-60 °C	0-60 %	-40-60 °C	±0,5 °C	± 3 % (0-50 %)	Externě: RS-485, SDI-12, 0,5 - 3 V

Název senzoru	Výrobce	Měřicí metoda	Napájecí napětí	Rozsah provozních teplot	Rozsah měření		Přesnost měření		Bezdrátový vzdálený přenos
					Vlhkost	Teplota	Vlhkost	Teplota	
5TE/5TM	METOS	Výrobce neuvádí	3,6-15 V DC	-40-60 °C	0-100 %	-40-60 °C	± 2 %	± 1 °C	Externě
HydraGO	STEVENS	ADR	9-20 V DC/ NiMH baterie-3,6 V	-10-65 °C	0-100 %	-10-60 °C	± 1 %	± 0,3 °C	Externě: RS-485, SDI-12
HydraGO Field	STEVENS	ADR	9-20 V DC/ NiMH baterie-3,6 V	-10-65 °C	0-100 %	-10-60 °C	± 1 %	± 0,3 °C	Wi-fi
Půdní senzor Clever farm	Clever farm	Odporová metoda	Výrobce neuvádí	Výrobce neuvádí	Výrobce neuvádí	Výrobce neuvádí	Výrobce neuvádí	Výrobce neuvádí	Sigfox, LORA, NB- IoT
Půdní senzor Pycno	Pycno	Kapacitní metoda	Výrobce neuvádí	Výrobce neuvádí	Výrobce neuvádí	Výrobce neuvádí	Výrobce neuvádí	Výrobce neuvádí	LoRa, Wifi

2.3.2 Komerčně dostupné systémy pro měření teploty půdy

Systémů pro měření půdní teploty existuje na trhu celá řada, velký výběr tvoří teploměry s termočlánky a termistory. Při výběru půdních teploměrů patří mezi nejdůležitější parametry přesnost, s kterou jednotlivé teploměry měří, dále měřicí rozsah, ve kterém měří. Většina půdních teploměrů nejčastěji měří v rozsahu cca od -50 – 75 °C a s přesností $\pm 0,2$ °C. Mezi teploměry, které využívají pro měření půdní teploty termistor patří teploměry 107 a 108 od Campbell, dále ST01 od firmy Hukseflux, Pt100-SM od firmy FIEDLER a Pt100 od firmy METOS. Mezi teploměry využívající termočlánek patří teploměr TCAV-L od firmy Campbell Scientific. Všechny teploměry uvedené v Tab. 2.3 umožňují bezdrátový přenos dat doplněním o vhodný datalogger. Výstupy snímačů jsou uvedeny za informací o bezdrátovém vzdáleném přenosu dat (Tab. 2.3). Přehled dalších komerčně dostupných systémů pro měření půdy, které měří také vlhkost, nalezneme v Tab. 2.2.

Tab. 2.3 Komerčně dostupné systémy pro měření teploty půdy [51, 58, 61, 72, 75-77]

Název	Výrobce	Druh čidla	Měřicí rozsah	Přesnost	Bezdrátový vzdálený přenos
STP01	Hukseflux	Výrobce neuvádí	-30 – 70 °C	Výrobce neuvádí	Externě
SMT172	Metos	Výrobce neuvádí	-30 – 99 °C	Min. $0,5$ °C (-30 – 99 °C)	Externě
109SS-L	Campbell Scientific	Výrobce neuvádí	-40 – 70 °C	$\pm 0,60$ °C (-40 – 70 °C) $\pm 0,49$ °C (-20 – 70 °C)	Externě
CS231-L	Campbell Scientific	Výrobce neuvádí	-55 – 85 °C	$\pm 0,2$ °C (-40 – 85 °C)	Externě
CS225-L	Campbell Scientific	Výrobce neuvádí	-55 – 85 °C	$\pm 0,2$ °C (-40 – 85 °C)	Externě
109	Campbell Scientific	Výrobce neuvádí	-50 – 70 °C	$\pm 0,2$ °C (nad 0 – 70 °C)	Externě
105EL	Campbell Scientific	Výrobce neuvádí	-55 – 125 °C	Dle připojeného dataloggeru	Externě
THERM200	Vegetronix	Výrobce neuvádí	-40 – 85 °C	$\pm 0,5$ °C	Externě: 0–3 V
Pt100-XM	FIEDLER	Odporový snímač (třída A)	-50 – 120 °C	Výrobce neuvádí	Externě
108	Campbell Scientific	Termistor	-5 – 95 °C	$\pm 0,2$ °C (nad 0 – 70 °C)	Externě
107	Campbell Scientific	Termistor	-35 – 50 °C	$\pm 0,2$ °C (nad 0 – 50 °C)	Externě
TCAV-L	Campbell Scientific	Termočlánek	Výrobce neuvádí	Dle připojeného dataloggeru	Externě
TMC6-HD	Onset	Výrobce	-40 – 50 °C	Dle	Externě

		neuvádí		připojeného dataloggeru	
TMC20-HD	Onset	Výrobce neuvádí	-40-50 °C	Dle připojeného dataloggeru	Externě
ST01	Hukseflux	Odporový snímač (Pt-100)	-60-150 °C	Výrobce neuvádí	Externě
PT1000	METOS	Odporový snímač	-30-75 °C	± 1 °C	Externě
S-TMB-M002	Onset	Výrobce neuvádí	-40-100 °C	<± 0,2 °C (0-50) C	Externě
Smart Temperature Sensor 201223	STEVENS	Výrobce neuvádí	Výrobce neuvádí	Výrobce neuvádí	Externě: SDI-12, RS-485

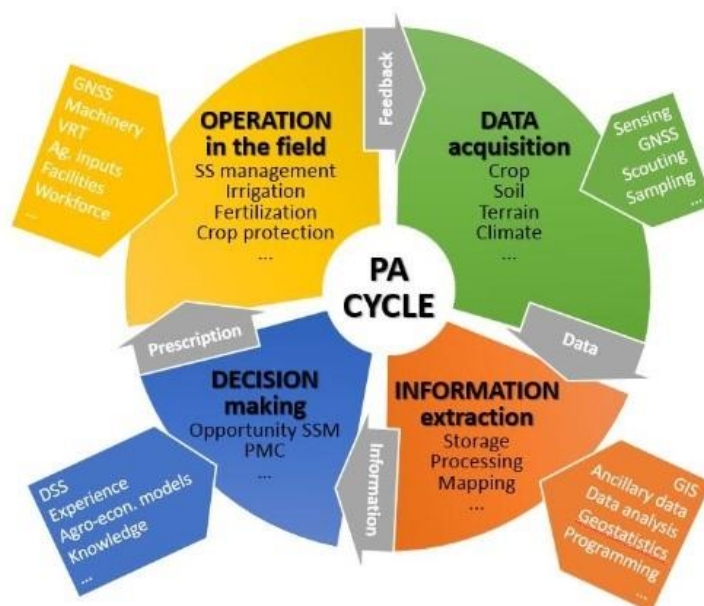
3 Precizní zemědělství

3.1 Princip precizního zemědělství

Digitalizace a moderní technologie zasahují do mnoha oblastí oborů a rozvoj senzorové techniky a zpracování dat v souvislosti s rozvojem internetu je velmi důležitou součástí globálního vývoje inteligentních výrobků. V současné době se tento koncept začíná prosazovat i v oblasti zemědělství a vede ke vzniku tzv. precizního zemědělství [78]. Precizní zemědělství je nová koncepce hospodaření, která využívá moderních technologií [79]. V rámci konceptu precizního zemědělství by se měly používat takové technologie, aby se dosáhlo co největší šetrnosti k přírodě. Precizní zemědělství snižuje náklady na hnojiva a vede k vyšší kvalitě sklizně [80, 81]. Základním cílem precizního zemědělství je tedy: Usměrňovat vstupy a technologie v závislosti na lokálních podmínkách v rámci pole tak, aby bylo možné vykonat správný zásah na správném místě ve správném čase a správným způsobem [81]. Tedy jedním z úkolů jsou variabilní zásahy při hospodaření za účelem zvýšení výnosnosti rostlinné produkce, zvýšení kvality produktů a ochrany přírodních zdrojů a životního prostředí. Přesto, že rok od roku nabývá na popularitě, využívá tuto koncepci jen malá část zemědělců. Možnou příčinou může být systém sběru dat. Pokud tedy hodláme používat data z měření pro popis prostorových závislostí, pak je třeba zajistit dostatečnou hustotu vzorkování. Tato úloha ale není vůbec jednoduchá, protože v případě provedení příliš hustého vzorkování (odběr velkého množství vzorků) dochází ke zbytečně vysokým nákladům. Naopak pokud hustota vzorkování je příliš malá, pak toto vzorkování je nedostatečné pro zhodnocení prostorové variability [82, 83].

Postup precizního zemědělství probíhá ve 4 následujících krocích (Obr. 3.1): [84]

1. Sběr dat - průzkum terénu, vzorkování půdy, zjišťování stavu porostu
2. Analýza dat - mapování, plánování
3. Rozhodování se - srovnání výsledné efektivity vůči potřebným vstupním nákladům
4. Aplikace – nákup nutných prostředků, instalace nových zařízení, využívání nových zařízení



Obr. 3.1. Postup precizního zemědělství [84]

Z hlediska maximalizace výnosů je třeba vyhledávat místa, kde jsou minimální výnosy a provést na nich patřičné úpravy či upravit procesy na nich tak, aby došlo v těchto místech ke zvyšování výnosů na úroveň maximálních.

3.2 Použitelnost systémů pro monitorování parametrů půdy v precizním zemědělství

Variabilitu pozemků rozeznáváme ve dvou směrech, a to jako prostorovou a časovou, přičemž platí, že obě tyto variability se navzájem prolínají. Pokud jde o monitorování půdní vody je důležitým parametrem časová variabilita a je tedy důležité, aby údaje o snímaných vlastnostech byly zaznamenány v čase. Z tohoto důvodu precizní zemědělství staví na senzorových řešeních a dochází tak k rozvoji metod využívající metody dálkového průzkumu a senzorů on-the-go (Obr. 3.2), což jsou senzory umístěné na zemědělských strojích, které umožňují snímat parametry půdy během jízdy [82, 83, 85].

Pomocí pevně instalovaných bezdrátových senzorů, které jsou součástí tzv. internetu věcí, lze sbírat informace o půdě a rostlinách, a to s velkou přesností a spolehlivostí, a lze je přenášet do centrálního systému, zpracovávat je a získávat z nich tak podklady pro rozhodování [78]. A právě to nám umožňuje rozhodovat o různých zásazích na půdě ve správném čase a ve správném rozsahu. Dochází tak ke snižování nákladů na ochranu rostlin, nákladů na přípravky a hnojiva, k větší šetrnosti k životnímu prostředí, nižší spotřebě zdrojů, vyšším výnosům a ke kvalitnější úrodě. Další výhodou použití těchto systémů je jejich poměrně snadná instalace, optimální robustnost, přičemž odpadá obtížné manipulování s

kabely. Tyto senzory umožňují měřit aktuální parametry půdy, jako je např. vlhkost a vodivost půdy. A díky včasnému zachycení např. příchodu onemocnění rostlin lze provést včasný zásah [78].



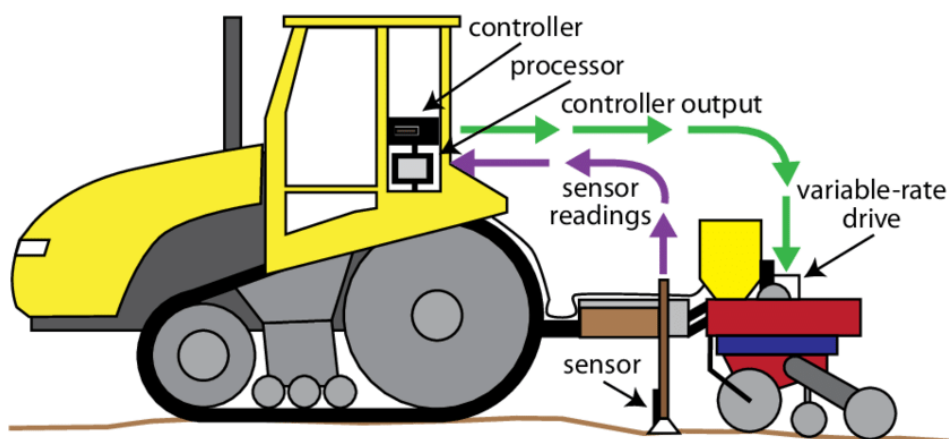
Obr. 3.2 Senzor on-the-go umístěný na traktoru [86]

Pro použití v konceptu precizního zemědělství jsou vhodnější ty metody, které umožňují kontinuální měření teploty a vlhkosti půdy pouze jedinou společnou sondou bez manuálního sběru vzorků a umožňují tak jednoduchou digitalizaci a jednoduchou instalaci. Proto se v precizním zemědělství nevyužívá např. neutronová sonda (kapitola 2.1.3.2), která není vhodná kvůli své robustnosti a náročné instalaci. Dále se nepoužívá gravimetrická metoda (kapitola 2.1.1), u které je navíc ruční vzorkování a následná analýza finančně nákladná a personálně náročná. Tedy určování vlhkosti tak probíhá s časovým zpožděním. V případě kontinuálního měření půdní teploty se využívají hlavně elektrické teploměry, které umožňují digitalizaci naměřených hodnot a následný přenos dat. Nejčastěji používanými čidly jsou elektrické odporové prvky, polovodičové prvky (termistory) a termočlánky.

3.2.1 Senzory on-the-go

Precizní zemědělství omezuje skutečnost, že v současné chvíli neumožňuje získat levně a rychle půdní charakteristiky, a právě tento aspekt byl dalším důvodem, který vedl k vyvinutí tzv. on-the-go senzorů. I když senzory on-the-go (Obr. 3.3) mohou využívat celou řadu principů, nejčastěji staví na principu odporové metody či na principu metody kapacitní [82].

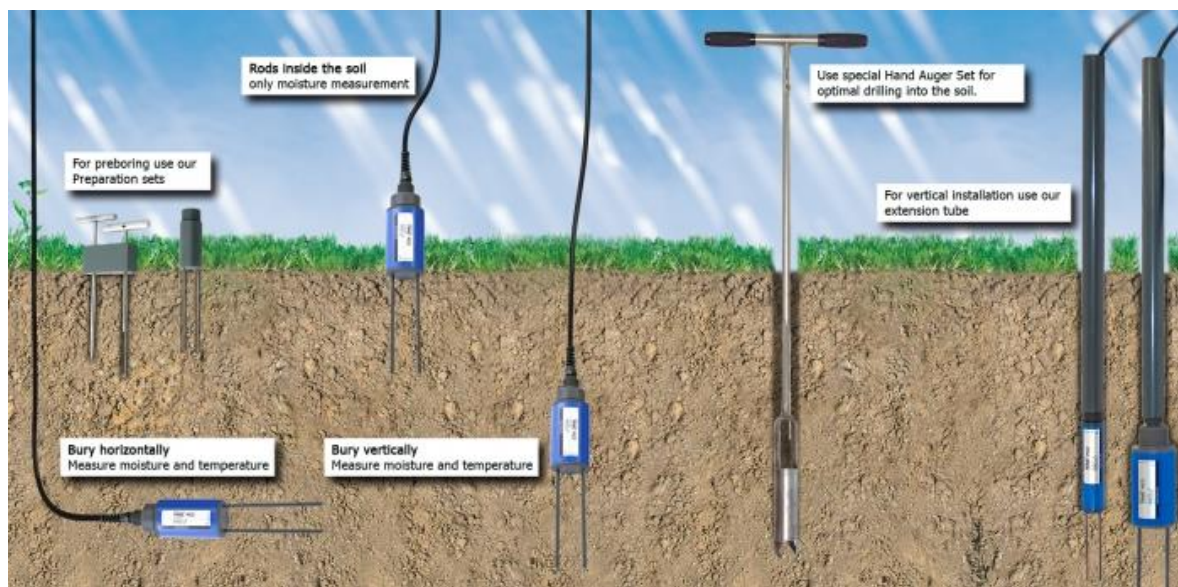
Přístroj se skládá z jednoho či více párů elektrod, které během jízdy prořezávají svrchní vrstvu půdy. Díky tomu, že přístroj je v pohybu je možné získat velké množství vzorků, a právě to dělá tyto senzory efektivnější a rychlejší v porovnání s gravimetrickou metodou. Na druhou stranu mohou nastat problémy u kamenitých půd, či u půd, u kterých nebyla vhodně provedena sklizeň (mnoho zbytků po sklizni) [82, 85].



Obr. 3.3 Sensor on-the-go [87]

3.2.2 Stacionární senzory

Dále se využívají systémy stacionární, což jsou pevně zabudované systémy v půdě (Obr. 3.4). V precizním zemědělství se rozšířily hlavně systémy, využívající metody založené na elektrických principech. Tedy z výše popsaných metod se používají zejména dielektrické metody, které umožňují snadný převod na elektrický signál, a umožňují bezdrátový přenos dat. Mezi ně patří metody kapacitní, FDR, ADR, TDT, metoda fázového posuvu a TDR metoda. Tyto metody dostaly velké obliby díky jejich rychlé odezvě, nízkým nákladům, vysoké životnosti a robustnosti. Poskytují cenné informace o půdních rozdílech a podobnostech, které umožňují rozdělit pole do menších a relativně homogenních oblastí [88].



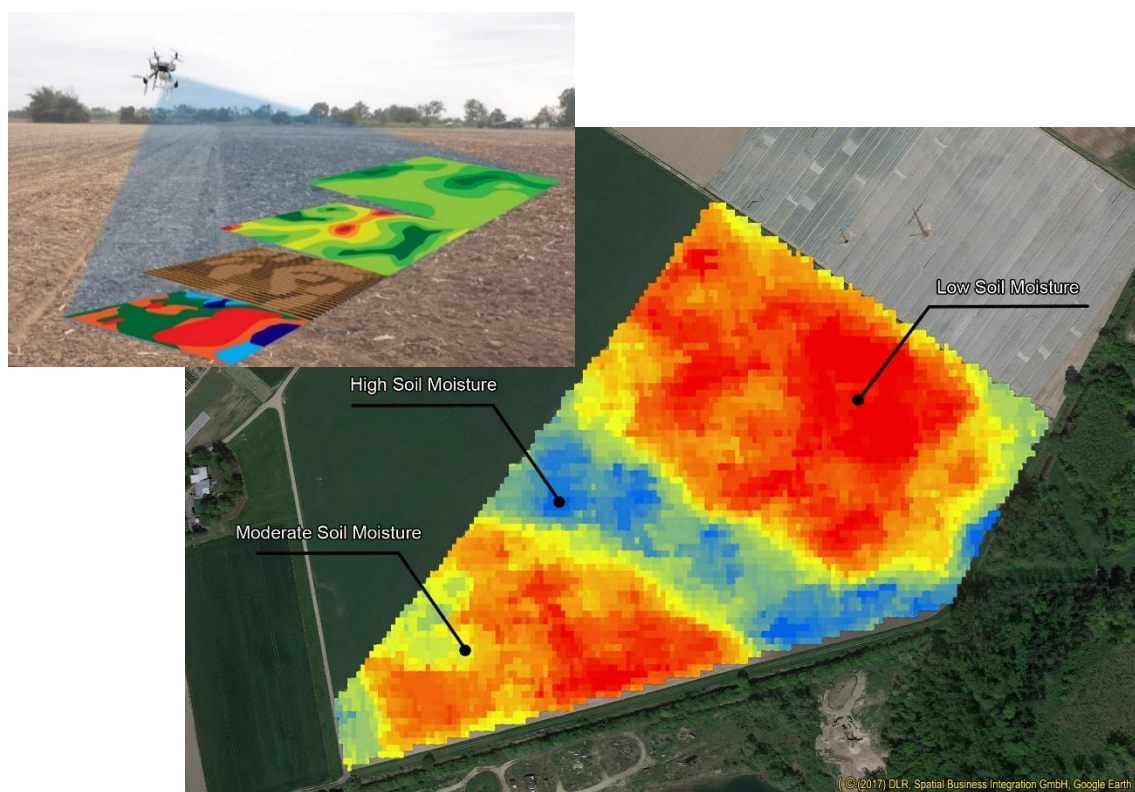
Obr. 3.4 Systémy pevně zabudované v půdě [89]

I když se odporová metoda, jako metoda stacionární příliš nepoužívá, platí, že mnohdy je vymezení na základě hodnot vodivosti přesnější než vymezení z komerčně dostupných map [82].

3.2.3 Systémy založené na metodě dálkového průzkumu země

V rámci precizního zemědělství se také velice často využívají metody umožňující vzdálený monitoring parametrů půdy. Do těchto metod patří všechny metody, které nepoužívají k monitorování vlastností kontakt se sledovaným objektem. Tedy do těchto metod patří metody optické a georadar.

Výhodou těchto metod je schopnost poskytovat rychlé velkoplošné mapování velkých územních celků (Obr. 3.5). Důležité u této metody je zvolit si vhodnou výšku, ze které budeme snímat, což je důležité pro minimalizaci negativních vlivů, jako je např. oblačnost. Od senzorů on-the-go se liší tím, že mapování porostu, zpracování a interpretace dat se provádí samostatně [81, 83, 85]. Výhodou je v konečném důsledku i větší šetrnost k životnímu prostředí. Dalšími technologiemi, které mohou zemědělcům výrazně pomoci, jsou aplikace, jež využívají data z družic. Díky nim mohou zemědělci lépe analyzovat silná a slabá místa svých polí, lépe řídit použití hnojiv a pesticidů či odhadovat výnos plodin [81, 83].



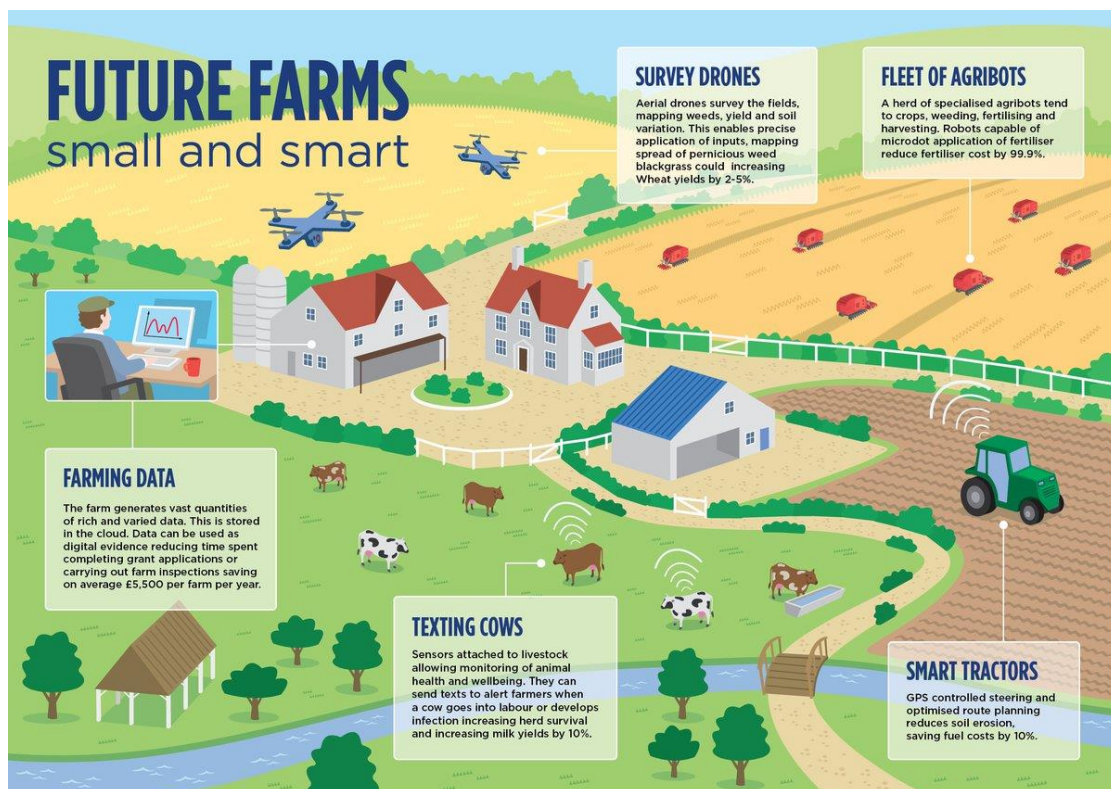
Obr. 3.5 Vlhkostní mapa vytvořená systémem DPZ [90, 91]

Významnou nevýhodou všech současných systémů pro monitorování parametrů půdy je ta, že nemohou být ve většině případů umístěny na pozemcích po celý rok. Většina senzorů půdní vlhkosti musí být instalována brzy ve vegetačním období a musí být odstraněna před sklizní, to zvyšuje nároky na čas a práci. Probíhá intenzivní výzkum v oblasti komunikací, zaměřující se na techniky nevyžadující k přenosu informací šíření vln vzduchem tzv. bezdrátové podzemní sítě (Wireless Underground Signal Network - WUSN). Obsahují bezdrátové propojení uzlů senzorů, ty spolu komunikují prostřednictvím půdy. To umožňuje jejich umístění do hloubek neovlivňovaných polními pracemi, a tedy celoroční instalaci a monitorování [92].

3.3 Farmy budoucnosti

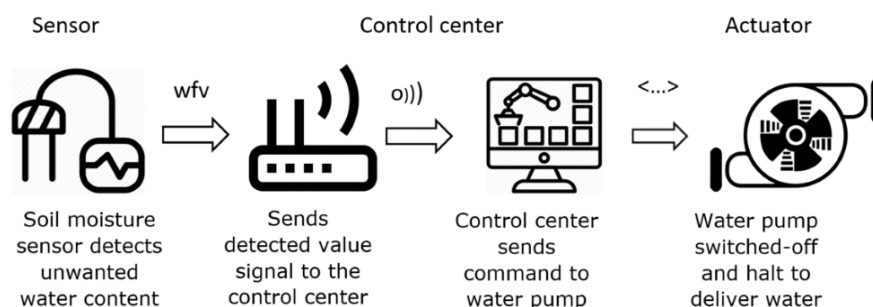
Koncept precizního zemědělství lze tedy chápat jako nasazení velkého množství senzorů v mnoha oblastech (Obr. 3.6). Základní senzory slouží např. pro zjišťování vlhkosti nebo teploty půdy. Dále se využívají senzory umístěné na tělech zvířat pro rozpoznávání blížících se zdravotních potíží. Mohou se využívat také drony, které snímají různé potřebné vlastnosti půdy. Ke konceptu precizního zemědělství patří také osévací a sklízecí systémy využívající GPS, díky čemuž mohou fungovat samostatně bez asistence člověka. Všechny

získané informace z těchto různých systémů se dále přenášejí prostřednictvím bezdrátové přenosu přímo do softwarové aplikace, do které se tato data ukládají a jejímž prostřednictvím lze rozhodovat o vhodných procesech s tím spojených, např. o potřebě zavlažovat, podávat léky nemocným zvířatům, ostříkovat pole napadená škůdci atd.



Obr. 3.6 Chytrá farma budoucnosti [78]

Systémy používané v rámci konceptu precizního zemědělství by měly být propojené dle Obr. 3.7. Konkrétně u systému půdní vlhkosti dochází nejdříve k monitorování půdní vlhkosti, následuje bezdrátové odeslání informací o stavu vlhkosti do kontrolního systému, který v případě nedostatku vody odešle požadavek na zavlažování.







Obr. 3.7 Využití senzorů vlhkosti v rámci závlahového systému [93]

3.4 Firmy zabývající se precizním zemědělstvím

Tab. 3.1 uvádí příklady dnešních startupů v oblasti zemědělství. Kompletní přehled firem zabývajících se precizního zemědělství uvádí Obr. 3.8. V současné době se oblastí precizního zemědělství zabývá celá řada společností, ať již sofistikovaných a pohybujících se již dlouhou dobu v oblasti zemědělských či senzorových aplikací, tak i celá řada nově vzniklých subjektů a startupových firem. Zabývají se jak hardwarovou částí (monitorovacími zařízeními a systémy, komunikace a přenos dat), tak i částí softwarovou (ukládání, zpracování, vizualizace dat atd.). Monitorování vlhkosti půdy patří k základním prvkům v portfoliu v podstatě všech společností, z nichž velká část nabízí spolu se senzorem vlhkosti zabudované teplotní čidlo k měření teploty.


Tab. 3.1 Firmy zabývající se precizním zemědělstvím [94-97]

Název firmy	Co nabízí
	<p>V aplikaci CleverFarm je možné evidovat agronomické činnosti jako aplikaci EPH, setí či sklizeň. Aplikace také hlídá nitrátovou směrnicí i maximální dávky na použití POR. Díky senzorům v aplikaci je možné vidět stav porostu nebo sklizně, bez nutnosti objíždět celou farmu.</p>
	<p>SoilCares umožňuje zemědělcům analyzovat živiny v půdě rychlým, dostupným a spolehlivým způsobem a podává tak informace o vhodném načasování hnojení. Kompaktní zařízení Lab-in-a-Box je rychlý a cenově dostupný mobilní senzorový test pro testování mikro a makro živin v půdě na místě. S tímto ručním skenerem lze sledovat půdní živiny na poli v reálném čase.</p> <p>Zkombinováním chytré aplikace s nutričním skenerem lze získat náhled na úrodnost půdy. Toto zařízení a aplikace se snadno používají ve smartphonu a jsou založeny na špičkovém řešení velkých dat pro rychlou analýzu půdy.</p>
	<p>Tule měří úbytek vody v poli na místo měření dostupné vody v kořenové zóně. Je to jediná technologie na trhu, která dokáže měřit skutečnou evapotranspiraci z rostlin, povrchu půdy a zevnitř rostlinných tkání.</p>
	<p>Cílem je propojit pěstitele s jejich rostlinami, aby jim pomohli zvyšovat produkci a výnosy, a zároveň snižovat plýtvání. Motorleaf může nabídnout kompletní sadu produktů nebo sestavit řešení na základě toho, co již pěstitel na svém místě má nainstalováno. Bezdrátové systémy jsou navrženy tak, aby fungovaly online nebo offline a udržovaly pěstitele připojené, pokud dojde k narušení jejich zdroje internetu.</p>
	<p>Flux IoT z Dallasu nabízí Eddyho, kompaktního robota. Pomocí bezdrátových senzorů může Eddy monitorovat různé vlastnosti půdy, jako jsou úroveň pH, teplota a relativní vlhkost. Má schopnost poznat výskyt kontaminantů a umí poskytovat informace, jak postupovat při řešení problémů.) Pěstitelé mu mohou prostřednictvím aplikace říct přesně to, kolik chtějí ve své produkci mít kalorií, vitamínů atd. Eddy také může řídit růst rostlin tak, aby splňovala požadovaná kritéria</p>

Název firmy	Co nabízí
	<p>Pycno nabízí svým zákazníkům „nejlepší analytickou platformu ve své třídě“, senzory plug-in play a jednoduchý dashboard. Instalace těchto senzorů je tak jednoduchá, že ji zvládne i sám pěstitel. Senzory jsou zcela autonomní se solárním panelem a interní baterií a mohou být použity ve více než 160 zemích. Jednoduchý dashboard v softwaru usnadňuje vizualizaci podmínek v terénu, předpovědi počasí a potenciálních stresových faktorů rostlin. Zásilky upozornění lze přímo na chytrý telefon, díky čemuž dochází ke snížení nákladů na vodu a hnojiva.</p>
	<p>Fieldin nabízí softwarová řešení pro ochranu před škůdci pro sady, háje a vinice. Kombinuje inovativní hardware s řadou senzorů, nejlepší zemědělské postupy, analytiku vědy a vlastní algoritmy do jednoho řešení. Jejich tým využívá farmářskou intuici a zkušenosti s vědou o údajích k vytvoření transparentnosti, sledovatelnosti a spolupráce na farmě. FieldIn pomáhá pěstitelům a organizacím šetřit peníze díky nejlépe zvoleným postupům ochrany před škůdci, snížením celkových aplikací pesticidů a odstraněním nadbytečných postřiků.</p>
	<p>Amber Agriculture se specializuje na inteligentní senzorovou technologii poskytující analytická řešení pro obilný průmysl. Bezdrátové senzory jsou distribuovány s obilím v zásobnících nebo přepravních kontejnerech, aby monitorovaly jejich vnitřní podmínky jako je teplota, vlhkost a těkavé sloučeniny. Tato společnost má velký potenciál k redukování problémů s kažením obilí po celém světě.</p>
	<p>Společnost Grownetics, známá svými „vysoce účinnými“ kultivačními systémy, byla založena za účelem optimalizace indoor kultivací. Kombinací algoritmů pro optimalizaci velkých dat a strojového učení pomáhají jejich produkty pěstitelům snižovat náklady, snižovat spotřebu energie a zvyšovat celkovou kvalitu produktu. Senzory plodin s vysokým rozlišením poskytují mikroklimatickou mapu ve vnitřním pěstitelském prostředí a jsou kombinovány s otevřenými automatizačními systémy a sledováním jednotlivých zařízení a vytvářejí přizpůsobený operační systém navržený tak, aby pokaždé poskytoval kvalitní úrodu.</p>
	<p>Společnost Acuity Agriculture staví bezdrátové polní senzory, které umožňují zemědělcům sledovat stav půdy, měřit výskyt škůdců, naplánovat zavlažování, sledovat kolísání klimatu a předpovídat načasování sklizně. Zakoupené senzory instaluje bezplatně zástupce společnosti Acuity a společnost řídí údržbu zařízení a vzdělávání pěstitelů. Elektronika a software společnosti Acuity Agriculture jsou také navrženy interně, čímž firma může nabízet vynikající produkt za nižší cenu než jejich konkurenti.</p>
	<p>Jejich inteligentní senzory jsou umístěny přímo na rostlinách speciálních a řádkových zemědělských farem a monitorují mikro-variace průměrů stonků, u nichž je vědecky prokázáno, že fungují jako indikátory stresu. Data jsou poté přenášena cloudem v reálném čase, aby mohla další analýza poskytnout zemědělcům příslušná upozornění a doporučení v terénu. Inovativní technologie společnosti Phytech identifikuje vodní stres, takže je při určování rozhodnutí o zavlažování neuvěřitelně přesná.</p>
	<p>Poskytuje senzorové a analytické systémy pro použití na letounech dronů k měření hustoty plodin a plevelů, stresu z napadení škůdci, nedostatku živin a vody. Jejich technologie výrazně snižuje letové náklady, protože vyžaduje</p>

Název firmy	Co nabízí
	pouze 20% překryvání a pokrývá čtyřikrát více plochy na lety než tradiční metody.
	CropX vyvíjí softwarová řešení založená na cloudu integrovaná s bezdrátovými senzory, které zvyšují výnos plodin a šetří vodu a energii. Díky adaptivnímu zavlažovacímu softwaru dochází k nárůstu výnosům z plodin, úsporám vody a energií spojené s náklady za služby, a to s ohledem na životní prostředí. Díky vytvořeným zavlažovacím mapám mohou zemědělci automaticky aplikovat správné množství vody na různé části pole.
	Agrobot vyvinul AGB® systém, který řídí sadu robotů schopných lokalizovat, identifikovat a sbírat jahody na základě jejich velikosti a stupně zralosti. Systém analyzuje plody jeden po druhém, jeho pohyby zaručují přesnost, hladkost a citlivost při ošetření jahod.
	NeoFarms zavádí do mas aeroponiku stavbou vertikálních farem a to o velikosti domácí ledničky, kde dochází k automatickému pěstování plodiny. Jedná se o vysoce produktivní zařízení, jež snižuje náklady na logistiku a zvyšuje efektivní využití plochy.
	Farmeron je jedním z příkladů startupů podporujících zemědělce při optimalizaci jejich činností. Farmeron nabízí službu cloud pro chovatele skotu a zemědělským odborníkům poskytuje možnost ukládat informace o jejich zvířatech, kontrolovat jejich krmení, sledovat produktivitu každého zvířete a sledovat jejich zdravotní stav.
	Gamaya používá drony spolu s umělou inteligencí ve snaze pomoci zemědělcům pěstovat své plodiny co možná nejefektivněji, a to hlavně z hlediska nákladů. Hyperspektrální kamery, které jsou namontované na dronech zaznamenávají změny ohledně obsahu vody, hnojiv a výskyt škůdců. Software AI tyto obrazy analyzuje a upozorňuje zemědělce na zaznamenané změny.
	Semios poskytuje pěstitelům přesné údaje pro každodenní rozhodování, které zvyšují hodnotu plodiny. Robustní síť umožňuje pěstitelům umístit zařízení kdekoli, a to včetně feromonových dávkovačů, automatických pastí, měřičů vlhkosti půdy nebo zařízení na vlhkosti listů.

AGTECH LANDSCAPE 2019



Better Food Ventures

seana@betterfoodventures.com

Seana Day

IN-FIELD SENSORS & SYSTEMS

Field Monitoring Sensors & Solutions

IoT Monitoring Platforms

Precision Irrigation

Soil Sensing / Analysis

Insect Sensing / Monitoring

Precision Applications

Next Gen Logistics

Freshness Control

Cold Chain Monitoring

Processing Technology

Digital Marketplaces

Water Monitoring

Labor Management

Automation / Robotics

Crop / Farm Management Software

Yield Forecasting

Supply Analytics

Quality Mgmt / Compliance

ERP Specialty

ERP Commodity

Food Recovery

Post-Harvest Monitoring

Finance & Insurance

Integrated Solutions (Platform)

Food Safety Track & Trace

Food Safety Detection

Blockchain

Data Aggregators

Value Chain Enablers

Imagery Analytics

Data Analytics (Platform)

Food Safety Detection

Blockchain

Data Aggregators

WWW.BETTERFOODVENTURES.COM

Obr. 3.8 Přehled firem zabývajících se precizním zemědělstvím [98]

Závěr

Nastupující klimatické změny a rostoucí populace vyžadují v rámci udržitelného vývoje i změny v oblasti přístupu k zemědělské produkci, tedy transformaci k tzv. preciznímu zemědělství. Precizní zemědělství je nová koncepce hospodaření, která využívá moderních technologií, jehož základním cílem je usměrňovat vstupy a technologie v závislosti na lokálních podmínkách v rámci pole tak, aby bylo možné vykonat správný zásah na správném místě ve správném čase a správným způsobem. Tzv. jedním z úkolů jsou variabilní zásahy při hospodaření za účelem zvýšení výnosnosti rostlinné produkce, zvýšení kvality produktů a ochrany přírodních zdrojů a životního prostředí.

Proto, aby precizní zemědělství fungovalo, tak je potřeba dostatek dat, což souvisí s nutností monitorování půdních parametrů. Precizní zemědělství lze tedy chápat jako nasazení velkého množství senzorů. Ty by měly umožňovat bezdrátové odesílání informací o půdních stavech do kontrolního systému, který získané informace vyhodnotí a dle toho provede příslušné příkazy, které předává dalším systémům (v případě vlhkosti např. pošle příkaz zavlažovacímu systému).

V rámci konceptu precizního zemědělství je vhodnější používat ty metody, které umožňují kontinuální měření teploty a vlhkosti půdy pouze jedinou společnou sondou bez manuálního sběru vzorků a umožňují tak jednoduchou digitalizaci a jednoduchou instalaci.

Pro monitorování vlhkosti existuje celá řada metod, ovšem jen některé se používají právě v konceptu precizního zemědělství a těmi jsou stacionární metody založené na elektrických principech, metody dálkového průzkumu země a senzory on-the-go. Mezi metody využívajících elektrické principy patří dielektrické metody, které využívají závislosti relativní permitivity na vodě. Tyto metody jsou velmi přesné, je možné s nimi měřit současně ve více hloubkách a hodí se i do zasolenějších půd. Mezi tyto metody patří kapacitní metody a v porovnání s metodou TDR, taktéž metodu patřící do dielektrických metod, mají nižší pořizovací náklady, jsou více citlivé na teplotu, častěji u nich dochází ke vzniku vzdušných kapes a vyžadují kalibraci pro každou půdu.

Další využitelnou metodou pro měření vlhkosti v rámci konceptu precizního zemědělství je metoda dálkového průzkumu země, kde se využívají optické senzory a georadar. Tyto senzory mají v budoucnosti velký potenciál především díky velkoplošnému snímání a vyhnutí se tak nasazení velkého množství např. výše zmíněným elektrickým senzorům. Na druhou stranu existuje u této metody časová prodleva mezi měřením a aplikací

a další nevýhodou je nutné využití specializovaných služeb oproti elektrickým či elektromagnetickým metodám.

V precizním zemědělství použijeme ty systémy, které umožňují bezdrátový přenos dat. Mezi firmy, které nabízejí komerčně dostupné systémy pro měření půdní vlhkosti a které jsou vhodné pro použití v precizním zemědělství, patří Slantrange, Sentek, GARDENA, STEVENS, CLEVER FARM a PYCNO. Většina systémů uvedených v Tab. 2.1 a v Tab. 2.2 od těchto výrobců umožňují přenos dat přes Wi-fi. Některé z nich pak umožňují přenos přes síť LoRa, Sigfox či přes rádiovou síť nebo prostřednictvím satelitu. Ostatní senzory uvedené v Tab. 2.1 a v Tab. 2.2 lze v precizním zemědělství také použít, a to doplněním o vhodný datalogger. Díky dataloggeru mohou data taktéž přenášet bezdrátově.

Pro měření půdní teploty se používají buď tzv. skleněné kapalinové půdní teploměry anebo elektrické teploměry. Skleněné kapalinové půdní teploměry nejsou vhodné pro použití kontinuálního měření kvůli nemožnosti digitalizace a nemožnosti dálkového přenosu dat, zatímco elektrické teploměry se běžně používají v meteorologii pro měření teploty. Mezi komerčně dostupné systémy patří např. STP01a SMT172. Senzory uvedené v Tab. 2.3 tvoří základní zástupce senzorů pro měření teploty a umožňují bezdrátový přenos dat doplněním o vhodný datalogger. Ostatní senzory mají obdobnou konstrukci jako tyto senzory.

Tedy v rámci kontinuálního precizního zemědělství se využívají metody pro měření vlhkosti založené na elektrických, optických principech a pro měření teploty elektrické teploměry kvůli možnosti bezdrátového přenosu dat. Úskalím většiny senzorů půdní vlhkosti je skutečnost, že musí být instalována brzy ve vegetačním období a musí být odstraněna před sklizní, což zvyšuje nároky na čas a práci. A právě kvůli těmto důvodům probíhá intenzivní výzkum v oblasti komunikací, zaměřujících se na techniky nevyžadující k přenosu informací šíření vln vzduchem, tedy tzv. bezdrátové podzemní sítě (Wireless Underground Signal Network - WUSN). Tyto techniky mají jistě velký potenciál v oblasti precizního zemědělství a v případě jejich nasazením by se vyřešilo mnoho problémů týkající se používání ostatních systémů.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Definice, význam a funkce půdy [online]. Ministerstvo životního prostředí [cit. 7.6.2019]. Dostupné z [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/definice_pudy/\\$FILE/OOHPP-Definice_pudy-20080820.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/definice_pudy/$FILE/OOHPP-Definice_pudy-20080820.pdf)
- [2] Půda. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-06-09]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%AFda>
- [3] ŠANTRŮČKOVÁ, Hana. Základy ekologie půdy. 1. České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, 2014. ISBN 978-80-7394-480-3.
- [4] Příklad půdního profilu [online]. [cit. 7.6.2019]. Dostupné z http://www.cittadella.cz/cenia/sites/images/vzdel_modul/obecne-prirodovedny_pohled/jak_vznika_a_kde_se_ztraci_puda/pudni_horizonty_co_je_to_pudni_profil_628.jpg
- [5] ŠIMEK, Miloslav. Základy nauky o půdě. České Budějovice: Jihočeská univerzita, 2003. ISBN 80-7040-630-5.
- [6] KUTÍLEK, Miroslav. Půda planety Země. Praha: Dokořán, 2012. Bod (Dokořán). ISBN 978-80-7363-212-0.
- [7] S.U., Susha Lekshmi, D.N. SINGH a Maryam SHOJAEI BAGHINI. A critical review of soil moisture measurement. Measurement [online]. 2014, 54, 92-105 [cit. 2019-06-07]. DOI: 10.1016/j.measurement.2014.04.007. ISSN 02632241. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263224114001651>
- [8] KUTÍLEK, Miroslav, Václav KURÁŽ a Milena CÍSLEROVÁ. Hydropedologie 10. Vyd. 2. přeprac. Praha: České vysoké učení technické, 2000. ISBN 80-01-02237-4.
- [9] KUTÍLEK, Miroslav. Vlhkost pórovitých materiálů. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1984. Česká matice technická (SNTL).
- [10] Půdní druhy – klasifikace půd podle textury (Zrnitosti) [online]. The COMET Program [cit. 17.8.2019]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/CB/runoff_cz/navmenu.php_tab_1_page_4.1.0.htm
- [11] KLABZUBA, Jiří. Aplikovaná meteorologie a klimatologie. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2001. Edice: 1. ISBN 978-80-213-0778-0.
- [12] Průběh teploty v závislosti na dnech v roce [online]. [cit. 10.6.2019]. Dostupné z: <https://www.builditsolar.com/Projects/Cooling/time-lag-vs-depth.gif>
- [13] RNDr. Tomáš Litschmann, Měření půdní vlhkosti [online]. AMET, Velké Bílovice [cit. 2.3.2019]. Dostupné z https://is.muni.cz/el/1431/jaro2010/Z0075/um/Prednaska_Dr_Litschmann_PudniVlhkost.pdf
- [14] Laboratorní váha G&G E150YC 150g x 0.005g [online]. Tronix.cz, Praha [cit. 17.8.2019]. Dostupné z: <https://www.tronix.cz/p/laboratorni-vaha-g-g-e150yc-150g-x-0-005g>

- [15] Sušárna fluidní Retsch TG 200 [online]. VERKON, s.r.o. [cit. 17.8.2019]. Dostupné z: <https://m.verkon.cz/susarna-fluidni-retsche-tg-200/>
- [16] Sada pro odběr vzorků půdy [online]. Bangco.cz [cit. 17.8.2019]. Dostupné z: http://shop.odberaky.cz/index.php?id_product=436&controller=product
- [17] Fyzikální (koeckého) válečky [online]. [cit. 17.8.2019]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=5054&typ=html
- [18] Field estimation of soil water content: A practical guide to methods instrumentations and sensor technology. 30. VIENNA: International atomic energy agency, 2008. ISSN 1018-5518.
- [19] Field Devices for Monitoring Soil Water Content [online]. Southern [cit. 17.8.2019]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.514.6862&rep=rep1&type=pdf>
- [20] BĀŤKOVÁ, K., Matula, S., Miháliková, M. 2013. Multimediální učebnice hydroopedologických terénních měření. 2. doplněné vydání [on-line]. Česká verze. Česká zemědělská univerzita v Praze. Praha. Nestránkováno. Dostupné z: <http://hydroopedologie.agrobiologie.cz/nepriime.html> ISBN: 978-80-213-2434-3.
- [21] NOBORIO, K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. Computers and Electronics in Agriculture [online]. 2001, 31(3), 213-237 [cit. 2019-06-07]. DOI: 10.1016/S0168-1699(00)00184-8. ISSN 01681699. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168169900001848>
- [22] GURAV, Mangesh, Shahbaz SARIK, Kamlesh SINGH, Gita PENDHARKAR a Maryam SHOJAEI BAGHINI. IITB_TDR: A portable TDR system with DWT based denoising for soil moisture measurement. Sensors and Actuators A: Physical [online]. 2018, 283, 317-329 [cit. 2019-08-19]. DOI: 10.1016/j.sna.2018.09.065. ISSN 09244247. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924424718310926>
- [23] Time Domain Reflectometry [online]. [cit. 17.8.2019]. Dostupné z: <https://soilsensor.com/articles/time-domain-reflectometry-tdr/>
- [24] Phase Transmission Sensor VIRRIB [online]. ResearchGate 2019 [cit. 17.8.2019]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/11-Commercially-Available-Phase-Transmission-Sensor-VIRRIB-R-Soil-Moisture-Sensor_fig7_271515212
- [25] Digital SDI Soil Moisture Sensor [online]. SUTRON [cit. 17.8.2019]. Dostupné z: https://www.sutron.com/product/digital_sdi_soil_moisture_sensor.htm/
- [26] SKIERUCHA, Wojciech a Andrzej WILCZEK. A FDR Sensor for Measuring Complex Soil Dielectric Permittivity in the 10–500 MHz Frequency Range. Sensors [online]. 2010, 10(4), 3314-3329 [cit. 2019-08-19]. DOI: 10.3390/s100403314. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/10/4/3314>
- [27] Comptonův jev. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-08-19]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Comptonův_jev

- [28] Neutron moisture meter [online]. Soilcropandmore [cit. 17.8.2019]. Dostupné z: <http://www.soilcropandmore.info/crops/sorghum/neutron.htm>
- [29] 503 ELITE Hydroprobe [online]. InstroTek [cit. 15.8.2019]. Dostupné z: <https://www.instrotek.com/products/503-elite-hydroprobe>
- [30] ZAJÍCOVÁ, Katerina a Tomas CHUMAN. Application of ground penetrating radar methods in soil studies: A review. *Geoderma* [online]. 2019, 343, 116-129 [cit. 2019-06-07]. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.02.024. ISSN 00167061. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016706118303823>
- [31] Schematic representation of GPR system [online]. ResearchGate 2019 [cit. 17.8.2019]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-GPR-system-operation-Adapted-from-Annan-2009Figures-122_fig1_252085396
- [32] JORAPUR, Nikhil, Vinay S. PALAPARTHY, Shahbaz SARIK, Jobish JOHN, Maryam Shojaei BAGHINI a G.K. ANANTHASURESH. A low-power, low-cost soil-moisture sensor using dual-probe heat-pulse technique. *Sensors and Actuators A: Physical* [online]. 2015, 233, 108-117 [cit. 2019-08-19]. DOI: 10.1016/j.sna.2015.06.026. ISSN 09244247. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924424715300479>
- [33] Polarization explained sony polarized sensor [online]. Thinklucid [cit. 17.8.2019]. Dostupné z: <https://thinklucid.com/tech-briefs/polarization-explained-sony-polarized-sensor/>
- [34] Index lomu [online]. Fayllar [cit. 17.8.2019]. Dostupné z: <http://fayllar.org/oblast-zen--m--cm-1-v-hz-e-ev-typ-excit-metoda.html?page=23>
- [35] Nir soil analysis [online]. AgroCares [cit. 17.8.2019]. Dostupné z: <https://www.agrocares.com/en/news/nir-soilanalysis/>
- [36] BÁŤKOVÁ, K., Matula, S., Miháliková, M. 2013. Multimediální učebnice hydroopedologických terénních měření. 2. doplněné vydání [on-line]. Česká verze. Česká zemědělská univerzita v Praze. Praha. Nestránkováno. Dostupné z: <http://hydroopedologie.agrobiologie.cz/tenzometr.html> ISBN: 978-80-213-2434-3.
- [37] TMS11A [online]. FIEDLER [cit. 10.8.2019]. Dostupné z: <https://fiedler.company/cs/produkty/meteorologick-stanice-sn-ma-e-idla/p-dn-vlhkost/tms11a-p-dn-tenzometry>
- [38] Watermark Soil Moisture Sensor [online]. ResearchGate2019 [cit. 17.8.2019]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Watermark-Soil-Moisture-Sensor-are-installed_fig2_326517589
- [39] Gypsum blocks for measuring the dryness of soil [online]. AgricultureVictoria [cit. 17.8.2019]. Dostupné z: <http://agriculture.vic.gov.au/agriculture/farm-management/soil-and-water/soils/gypsum-blocks-for-measuring-the-dryness-of-soil>
- [40] 229-L [online]. Campbell Scientific, Logan, UT 84321-1784 USA [cit. 10.8.2019]. Dostupné z: <https://www.campbellsci.com/229-l>

- [41] Measurement of Temperature [online]. [cit. 12.5.2019]. Dostupné z:
<https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/ric/Our%20activities/International/CP2-Temperature.pdf>
- [42] Measurement of Temperature [online]. [cit. 25.4.2019]. Dostupné z:
https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=3149
- [43] Teplota půdy. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-08-19]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Teplota_půdy
- [44] Půdní teploměry [online]. Exatherm [cit. 17.8.2019]. Dostupné z:
<http://www.exatherm.cz/meteorological.html>
- [45] Bimetalový teploměr. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-08-19]. Dostupné z:
https://cs.wikipedia.org/wiki/Bimetalový_teplo_měr
- [46] Temperature Measurement [online]. Burning Science [cit. 17.8.2019]. Dostupné z:
<https://burningscience.wordpress.com/biophysics/temperature-measurement/>
- [47] Seeds and soil temperatures [online]. In the Garden with Grandma [cit. 17.8.2019]. Dostupné z:
<https://www.inthegardenwithgrandma.com/blog/2018/3/23/seeds-and-soil-temperatures>
- [48] Platinové teplotní odporové senzory [online]. [cit. 7.6.2019]. Dostupné z:
<https://automatizace.hw.cz/zpracovani-signalu-platinovych-senzoru>
- [49] Soil Temperature Sensor Probes [online]. Vegetronix [cit. 17.8.2019]. Dostupné z:
<https://www.vegetronix.com/Products/THERM200/>
- [50] Snímače teploty-termočlánek [online]. ELUC [cit. 17.8.2019]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1582>
- [51] Campbell Scientific [online]. Campbell Scientific, Logan, UT 84321-1784 USA [cit. 10.6.2019]. Dostupné z: <https://www.campbellsci.com/>
- [52] IMKO [online]. IMKO [cit. 10.8.2019]. Dostupné z: <https://www.imko.de/de/>
- [53] METER [online]. METER [cit. 10.8.2019]. Dostupné z: <https://www.metergroup.com/>
- [54] Delta-T Devices [online]. Delta-T Devices [cit. 10.8.2019]. Dostupné z: <https://www.delta-t.co.uk/>
- [55] IRRIMON [online]. IRRIMON [cit. 10.8.2019]. Dostupné z: <https://maloobchod.irimon.cz/>
- [56] IRRMETER [online]. IRRMETER [cit. 10.8.2019]. Dostupné z: <https://www.irrometer.com/>
- [57] HUNTER [online]. HUNTER [cit. 10.8.2019]. Dostupné z: <https://zavlahy.irimon.cz/>
- [58] Vegetronix [online]. Vegetronix [cit. 10.8.2019]. Dostupné z: <https://www.vegetronix.com/>
- [59] GroPoint [online]. GroPoint [cit. 10.8.2019]. Dostupné z: <https://gropoint.com/>
- [60] Veinasa [online]. Veinasa [cit. 10.8.2019]. Dostupné z: http://en.veinasa.com/Soil_sensor/

- [61] METOS [online]. METOS [cit. 10.8.2019]. Dostupné z: <http://metos.at/>
- [62] AgroCares [online]. AgroCares [cit. 10.8.2019]. Dostupné z: <https://www.agrocares.com/en/products/scanner/>
- [63] ELITE [online]. ELITE [cit. 10.8.2019]. Dostupné z <http://ictinternational.com/products/smart503/neutron-probe-smart503/>
- [64] Slanrange [online]. Slanrange [cit. 10.8.2019]. Dostupné z: <https://www.slanrange.com/>
- [65] SENTEK [online]. SENTEK [cit. 10.8.2019]. Dostupné z: <https://sentektechnologies.com/>
- [66] GARDENA [online]. GARDENA [cit. 10.8.2019]. Dostupné z: <https://www.gardena.com/cz/>
- [67] Aranet [online]. Aranet [cit. 10.8.2019]. Dostupné z: <https://aranet.com/products/>
- [68] Stevens Water [online]. Stevens Water [cit. 10.8.2019]. Dostupné z: <https://www.stevenswater.com/>
- [69] Spectrum Technologies [online]. Spectrum Technologies [cit. 10.8.2019]. Dostupné z: <https://www.specmeters.com/>
- [70] BONAD [online]. BONAD [cit. 10.8.2019]. Dostupné z: <http://www.bndtestequipment.com/>
- [71] Delta Ohm [online]. Delta Ohm [cit. 10.8.2019]. Dostupné z: <https://www.deltaohm.com/en/product/hd3910-1-hd3910-2-soil-volumetric-water-content/>
- [72] STEVENS [online]. STEVENS [cit. 10.8.2019]. Dostupné z: <https://www.stevenswater.com/>
- [73] Cleverfarm [online]. Cleverfarm [cit. 10.8.2019]. Dostupné z: <https://www.cleverfarm.cz/>
- [74] Pycno [online]. Pycno [cit. 10.8.2019]. Dostupné z: <https://get.pycno.co/>
- [75] Hukseflux [online]. Hukseflux [cit. 10.8.2019]. Dostupné z: <https://www.hukseflux.com/>
- [76] Onset [online]. Onset [cit. 10.8.2019]. Dostupné z: <https://www.onsetcomp.com/>
- [77] FIEDLER [online]. FIEDLER [cit. 10.8.2019]. Dostupné z: <https://fiedler.company/cs/>
- [78] Precizní zemědělství v praxi [online]. Česká spořitelna, Únor 2018 [cit. 5.6.2019]. Dostupné z: https://www.csas.cz/content/dam/cz/csas/business_csas_cz/precizni-zemedelstvi/Precizni_zemedelstvi_v_praxi_2018_02.pdf
- [79] PLAŠILOVÁ, Lenka. Půda čelí degradaci. Pomoci může precizní zemědělství [online]. EU-Media, s.r.o. 5.2.2019 [cit. 3.6.2019]. Dostupné z: <https://euractiv.cz/section/evropske-finance/news/puda-celi-degradaci-pomoci-muze-precizni-zemedelstvi/>
- [80] KAVKA, Miroslav. Princip precizního zemědělství [online]. Agris-online 10.12.1998. [cit. 5.6.2019], ISSN 1804-1930 Dostupné z: <http://www.agris.cz/clanek/126796/princip-precizniho-zemedelstvi>
- [81] KROULÍK, Milan. Senzory a technika pro precizní zemědělství [online]. Vega spol. s r. o. 2011-2019, 2.8.2016 [cit. 5.6.2019]. Dostupné z <https://www.agrojournals.cz/clanky/senzory-a-technika->

pro-precizni-zemedelstvi-193

- [82] ADAMCHUK, V.I, J.W HUMMEL, M.T MORGAN a S.K UPADHYAYA. On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* [online]. 2004, 44(1), 71-91 [cit. 2019-06-07]. DOI: 10.1016/j.compag.2004.03.002. ISSN 01681699. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168169904000444>
- [83] Mapování variability pozemků [online]. *Zemědělec* [cit. 10.8.2019]. Dostupné z: <https://www.zemedelec.cz/mapovani-variability-pozemku/>
- [84] Precision Agriculture [online]. Research Group in AgroICT & Precision Agriculture [cit. 17.8.2019]. Dostupné z: <http://www.grap.udl.cat/en/presentation/pa.html>
- [85] HEEGE, Hermann J. Precision in crop farming: site specific concepts and sensing methods : applications and results. New York: Springer, [2013]. ISBN 978-94-007-6760-7.
- [86] Veris U Series Soil Scanner [online]. Vantage [cit. 17.8.2019]. Dostupné z: <https://www.vantage-agrometius.nl/en/product/veris-u-series-soil-scanner/>
- [87] [online]. ResearchGate 2019 [cit. 17.8.2019]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/On-the-go-sensor-texture-electrical-conductivity-EC-or-soil-organic-matter-SOM_fig10_309121121
- [88] MUANGPRATHUB, Jirapond, Nathaphon BOONNAM, Siriwan KAJORNKASIRAT, Narongsak LEKBANGPONG, Apirat WANICHSOMBAT a Pichetwut NILLAOR. IoT and agriculture data analysis for smart farm. *Computers and Electronics in Agriculture* [online]. 2019, 156, 467-474 [cit. 2019-06-07]. DOI: 10.1016/j.compag.2018.12.011. ISSN 01681699. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168169918308913>
- [89] Trime-PICO[online]. Eijkelkamp[cit. 17.8.2019]. Dostupné z: https://en.eijkelkamp.com/products/sensors-monitoring_uk/trime-pico.html
- [90] Soil moisture maps for precision farming – high precision is crucial from the very beginning [online]. SPATIAL BUSSINES INTEGRATION [cit. 17.8.2019]. Dostupné z: <https://www.spatial-business-integration.com/soil-moisture-maps-for-precision-farming/>
- [91] Ground Penetrating Radar (GPR) and drones – double jeopardy! [online]. Sensors and Software[cit. 17.8.2019]. Dostupné z: <https://www.sensoft.ca/gpr/gpr-and-drones-double-jeopardy/>
- [92] DONG, Xin, Mehmet C. VURAN a Saat IRMAK. Autonomous precision agriculture through integration of wireless underground sensor networks with center pivot irrigation systems. *Ad Hoc Networks* [online]. 2013, 11(7), 1975-1987 [cit. 2019-06-07]. DOI: 10.1016/j.adhoc.2012.06.012. ISSN 15708705. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1570870512001291>
- [93] Sensors and Actuators of the IoT [online]. NOVATEC[cit. 17.8.2019]. Dostupné z: <https://www.novatec-gmbh.de/blog/sensors-and-actuators-of-the-iot/>
- [94] Cleverfarm [online]. Clever farm [cit. 10.8.2019]. Dostupné z: <https://www.cleverfarm.cz/>
- [95] AgroCares nutrient intelligence [online]. AgroCares [cit. 10.8.2019]. Dostupné z: <https://www.agrocares.com/en>

- [96] Disrupting Agriculture: A Breakdown On Startup Driven Innovation In AgriTech [online]. Startus insights [cit. 10.8.2019]. Dostupné z: <https://www.startus-insights.com/innovators-guide/disrupting-agriculture-breakdown-startup-driven-innovation-agritech/>
- [97] Smart Sensors in Farming: 10 Startups to Watch in 2018 [online]. Disruptor [cit. 10.8.2019]. Dostupné z: <https://www.disruptordaily.com/smart-sensors-farming-10-startups-watch-2018/>
- [98] AGTECH LANDSCAPE 2019 [online]. The mixing bowl [cit. 17.8.2019]. Dostupné z: <http://mixingbowlhub.com/agtech-2019/>