

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra fyziky



Bakalářská práce

**Elektrické kapacitní charakteristiky pšeničných zrn – nástroj pro
monitoring imbibice**

Jiří Šamša

© 2023 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jiří Šamša

Informační a řídicí technika v agropotravinářském komplexu

Název práce

Elektrické kapacitní charakteristiky pšeničných zrn – nástroj pro monitoring imbibice

Název anglicky

Electrical capacitance characteristics of wheat grains – tool for imbibition monitoring

Cíle práce

Na základě literární rešerše navrhnout a provést experimenty za účelem prozkoumání souvislostí mezi elektrickými vlastnostmi (elektrická kapacita a ztrátový faktor) a imbibicí obiliek pšenice.

Metodika

- Vypracování literární rešerše s využitím vědeckých databází: Web of Science, Scopus, Google Scholar a dalších.
- Na základě aktuálního stavu poznání navrhnout vhodný způsob měření odpovídajících elektrických veličin. Průběžně zjišťovat i stupeň imbibice obilných zrn.
- Vyhodnotit výsledky statistickými metodami.

Doporučený rozsah práce

30 – 40

Klíčová slova

Elektrická kapacita, klíčení, měření, analýza

Doporučené zdroje informací

BLAHOVEC, J. Zemědělské materiály. PRAHA: VŠZ, 1993.

Lev J., and Blahovec J., 2017. Imbibition of wheat seeds: Application of image analysis. *Int. Agrophys.*, 31, 475-481.

NELSON, S. Dielectric properties of agricultural materials and their applications. Boston, MA: Elsevier, 2015. ISBN 9780128023051.

Rathjen J.R., Strounina E.V., and Mares D.J., 2009. Water movement into dormant and non-dormant wheat (*Triticum aestivum* L.) grains. *J. Exp. Botany*, 60, 1619-1631.

Předběžný termín obhajoby

2023/2024 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Jakub Lev, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra fyziky

Elektronicky schváleno dne 29. 1. 2021

prof. Ing. Martin Libra, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 10. 2. 2021

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 30. 03. 2023

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "**Elektrické kapacitní charakteristiky pšeničných zrn – nástroj pro monitoring imbibice**" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne datum odevzdání _____

Poděkování

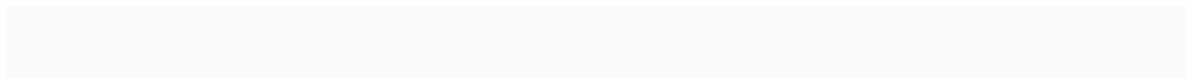
Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu práce panu Ing. Jakobovi Lvovi, Ph.D. za cenné rady a pomoc při měření praktické části. Rád bych také poděkoval mému otci Jiřímu Šamšovi za asistenci při přípravě součástí k praktické části, zároveň chci poděkovat mé sestře Evě Jiroutkové a Jakobovi Trojánkovi za pomoc s překladem. Dále děkuji všem ostatním, kteří mě v mém snažení podporovali.

Elektrické kapacitní charakteristiky pšeničných zrn imbibice

Abstrakt

Měření dielektrických vlastností osiva je dosud málo probádanou oblastí. Cílem této práce bylo navrhnout a sestavit měřicí sestavu, díky které by bylo možné tyto vlastnosti měřit. Za tímto účelem byla na základě literární rešerše navržena sestava s využitím můstkové metody s LCR můstkem. Byli provedeny dva sety měření při určité frekvenci 100 kHz. Z naměřených dat a grafů se prokázala opakovatelnost měření a velmi podobné průběhy. Pomocí charakteristik dielektrických vlastností v reálném čase a pomocí fotek spolu s charakteristikou změny délky v reálném čase, byli rozlišeny počáteční fáze klíčení. Práce dále potvrdila, že závislost elektrické kapacity a ztrátového faktoru na čase má rostoucí tendenci.

Klíčová slova: Elektrická kapacita, klíčení, měření, analýza



Electrical capacitance characteristics of imbibition wheat grains

Abstract

Measuring the dielectric properties of seeds is an area that has not yet been explored. The goal of this work was to design and build a measuring set-up that would make it possible to measure these properties. For this purpose, based on literature research, an assembly was designed using the bridge method with an LCR bridge. Two sets of measurements were made at a certain frequency 10^5 Hz. The measured data and graphs proved the repeatability of measurements and very similar trends. Using real-time characteristics of dielectric properties and using photos together with real-time length change characteristics, individual stages of germination were distinguished. The work further confirmed that the dependence of electrical capacity and loss factor on time has an increasing tendency.

Keywords: Electrical capacity, germination, measurement, analysis

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Cíl práce	2
3. Teoretická rešerše	3
3.1. Biologická část semene	3
3.1.1. Morfologická stavba semen	3
3.1.2. Embryo.....	3
3.1.3. Endosperm	3
3.1.4. Perisperm	4
3.1.5. Oplodí	4
3.1.6. Testa.....	4
3.2. Funkce vody v semenech	4
3.3. Vliv teploty na klíčení	9
3.4. Dormance	5
3.4.1. Primární dormance.....	5
3.4.1.1. Exogenní dormance	5
3.4.1.2. Endogenní dormance	5
3.4.2. Sekundární dormance	5
3.4.3. Možnosti odstranění dormance	6
3.5. Klíčení	6
3.5.1. 1. Fáze – Bobtnání (imbibice).....	7
3.5.1.1. Proces nasátí vody do semene.	8
3.5.2. 2. Fáze – aktivace biochemických procesů.....	8
3.5.2.1. Pohyb vody během druhé fáze klíčení.....	8
3.5.3. 3. Fáze – růst klíčku.....	8
3.5.3.1. Pohyb vody během třetí fáze klíčení	8
3.6. Dielektrické vlastnosti zemědělských materiálů.....	9
3.6.1. Polarizace.....	10
3.6.2. Relativní permitivita	10
3.6.3. Elektrická pevnost.....	12
3.6.4. Dielektrické ztráty.....	13
3.6.5. Komplexní relativní permitivita.....	14
3.6.5.1. Permitivita rostlinných dielektrik	14
3.6.6. Relaxace permitivity	15
3.6.6.1. Relaxace permitivity u zemědělských materiálů.....	16
3.7. Metody měření dielektrických vlastností	16

3.7.1.	Můstkové metody měření dielektrických vlastností	17
3.7.2.	Metody sledování pohybu vody v osivu	18
4.	Metoda práce.	19
4.1.	Popis vzorků.....	19
4.2.	Instrukce a postup při přípravě měřicí sestavy.....	19
4.3.	Postup měření.....	23
5.	Výsledky a diskuse	24
5.1.	První set měření.....	25
5.2.	Druhý set měření	27
5.3.	Shrnutí výsledků.....	28
Závěr	31
Seznam rovnic	32
Seznam použitých zdrojů	33

Seznam obrázků

Obr. 1	Průřez semene [1]	3
Obr. 2	Výskyt primární a sekundární dormance. [1,2]	6
Obr. 3	Fáze klíčení na základě přijímání vody. [1]	7
Obr.4	Ukázka izolantů jako podmnožina dielektrik [16]	9
Obr.5	Ukázka procesu polarizace dielektrika [12]	10
Obr. 6	- schematické znázornění elektrické vodivosti zemědělských materiálů v závislosti na jejich vlhkosti [10]	12
Obr.7	- fázové poměry v dielektriku [13].	13
Obr.8	- fázový Diagram složek proudové hustoty [13].	13
Obr. 9	- charakteristika permitivity v závislosti na frekvenci – několik druhů semen rostlin [10]......	15
Obr.10	- frekvenční závislost a složek komplexní permitivity a ztrátového tangentu $\tan \delta$ [13]......	15
Obr.11	- závislost relativní permitivity biologických materiálů na frekvenci elektrického pole [10]......	16
Obr. 12	- ukázka Wienova můstku [23]......	17
Obr. 13	- ukázka Scheringova můstku [23].	17
Obr.14	- ukázka obecné formy měřicího můstku využíván v primitivních LCR metrech [25]......	18
Obr. 15	- schéma zvoleného zapojení.	19
Obr. 16-	3D modely mikro svorek.....	21
Obr.17	- 3D modely misky.	21
Obr. 18	- ukázka a popis poskládaného nástroje.	22
Obr.19	- blokové schéma měřicího postupu.	23
Obr. 20	- ukázka polohy vzorku během prvního setu měření. Vzorek č.2	24
Obr. 21	- ukázka polohy vzorku během druhého setu měření. Vzorek č.3	24

Obr.22 - graf změny kapacity v reálném čase.	25
Obr.23 - graf změny ztrátového faktoru v reálném čase: Pro přehlednost jsou vyneseny pouze 2 vzorky.	26
Obr.24 - změna délky vzorků v čase.	26
Obr.25 - graf změny kapacity v reálném čase.	27
Obr.26 - graf změny kapacity v reálném čase.	28
Obr.27 - graf změny délky v reálném čase.	28
Obr. 28 - kombinovaný graf regresní křivky (oranžová dC – pF/s) a kapacity (modrá, C – pF) s vytyčenými inflexními body pro popsání oblastí.	29
Obr. 29 - graf změny délky za čas prvního vzorku prvního setu měření.	30

Seznam tabulek

Tabulka 1: Jednotlivé hodnoty relativní permitivity různých materiálů – uvedené hodnoty byly měřeny při následujících podmínkách (Kapaliny při 20 °C, plyny při 25 °C, tlaku 101,325 kPa) [15].	11
Tabulka. 2 Vlastnosti odrůdy osiva vybraného pro experiment. [20]	19
Tabulka. 3 Naměřená data změny délky (d) a její procentuální nárůst, naměřené maximální a minimální hodnoty kapacity a ztrátového faktoru.	29

Seznam použitých zkratk

Ep – Elektrická pevnost.

EP – Elektrické pole.

1. Úvod

Pšenice je nejvýznamnější potravinářskou plodinou na světě, využívající se v celém spektru potravinářského a hospodářského komplexu [4,5]. Nicméně oblast měření dielektrických vlastností osiva, je stále málo probádanou oblastí, i když by tato oblast mohla pomoci v usnadnění kontrolních procesů v semenářství například k mapování pohybu vody v semenu nebo zjišťování obsahu vlhkosti v osivu. Tato Bakalářská práce se zabývá návrhem a sestavením měřicí sestavy pro měření dielektrických vlastností osiva a ověření její funkčnosti.

Tato práce v teoretické rešerši postupně vysvětluje biologické vlastnosti osiva a jednotlivé fáze klíčení. Následně popisuje jednotlivé parametry dielektrických materiálů a dále souvislosti mezi dielektrickými parametry a zemědělskými materiály. Tyto souvislosti byly popisovány zejména pro osivo pšenice. Jsou zde popsány i jednotlivé světové výzkumy související s dielektrickými vlastnostmi materiálů a zkoumající pohyb vody v zemědělských materiálech.

V metodice práce je popsána odrůda měřeného vzorku osiva. Následně je detailně popsán podrobný postup přípravy měřicí sestavy a řešení její problematiky na základě teoretické rešerše. Dále je uveden postup měření experimentu. Naměřené hodnoty byli vyhodnocovány a analyzovány celkem z osmi semen pšenice (odrůdy *Viriato*). Měření probíhalo ve dvou různých setech a v různé poloze měřených vzorků. Ve vyhodnocení naměřených dat jsou ukázány grafy průběhů změny délky semene a kapacitních vlastností osiva v reálném čase. V neposlední řadě naznačuje možnosti mapování klíčení pomocí elektrických vlastností, zejména kapacity a ztrátového faktoru.

1.1. Cíl práce

Cílem této práce je navrhnout a sestavit měřicí sestavu pro monitoring imbibice a ověřit jeho funkčnost při měření dielektrických vlastností vybrané odrůdy osiva. V rámci práce budou naměřená data elektrických veličin zanalyzována a následně mezi sebou porovnána. Ve shrnutí výsledků bude zmapován přibližný pohyb vody v měřených vzorkách

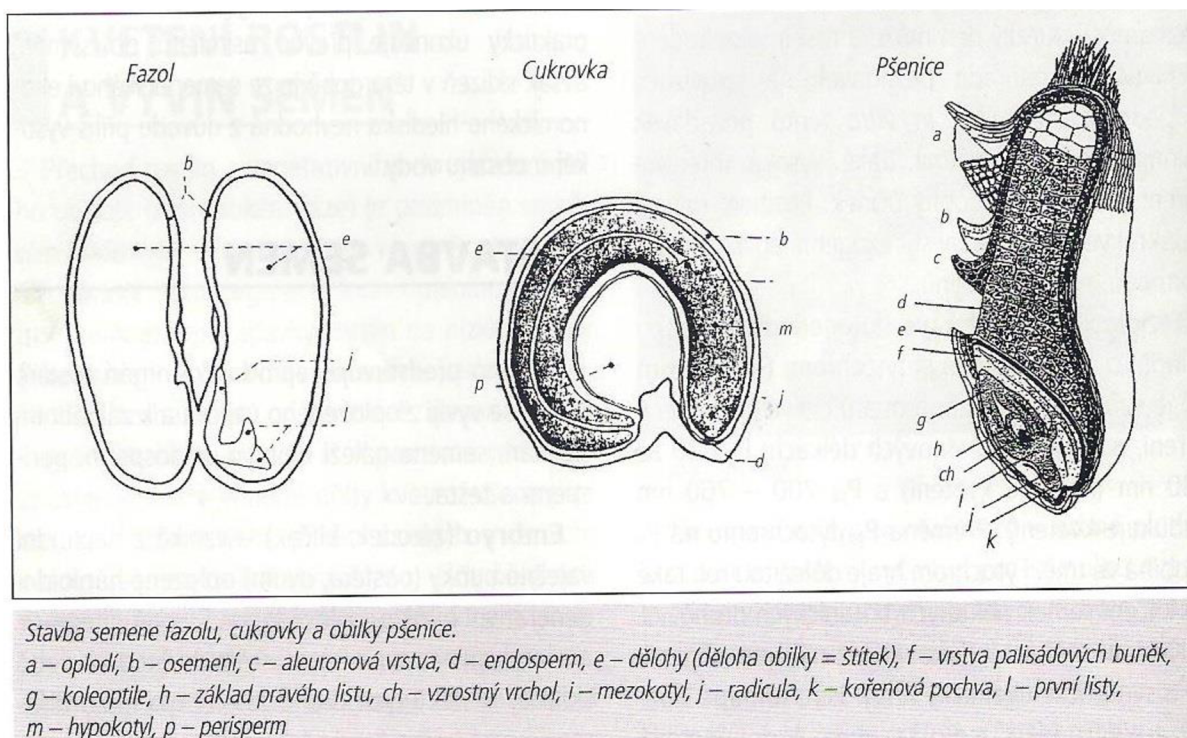
2. Teoretická rešerše

2.1. Biologická část semene

V biologické části semene popíšu jednotlivou skladbu a složení semene. Dále zde uvedu jednotlivé fáze klíčení se zaměřením na imbibici, a funkci vody v jednotlivých fázích, jak se do semene nasává a za jakých podmínek probíhají jednotlivé fáze.

2.1.1. Morfologická stavba semen

Semeno je reprodukční orgán rostlin. Vzniká v momentě, kdy dojde k oplození vajíčka. Díky semenům se mohou rostliny množit a rozrůstat. Skládá se z embrya, endospermu nebo perispermu, oplodí a testy [1,3] viz obr.1.



Obr. 1 Průřez semene [1]

2.1.2. Embryo

Embryo je základ semene a zároveň je to základ každé nové rostliny. Jedná se o živou část semena, která zároveň po nasání vody tvoří aktivní a řídicí část nově klíčící rostliny. Embryo je buňka oplozená pylem po opylení rostliny. Jedná se tedy o zárodek klíčku nové rostliny [1,3].

Embryo se skládá z:

- **Embryonální osy a dělohy.**
- **Plumuly** – vegetační vrchol výhonu. Někdy i s náznaky listů
- **Radikuly** – vegetační vrchol kořene.

2.1.3. Endosperm

Endosperm (viz obr. 1) je část semene, která vzniká už během vývinu diploidního jádra semene a ze zárodečného vaku osiva. Semena, která ho mají, jako je například pšenice viz

obr.1, slouží jako vnitřní výživové pletivo a obklopuje jádro. Rostliny, které ho během klíčení nevyužívají, zaniká již během vývoje [1,3]. Semena se tedy dále dělí:

- **Semena s endospermem.**
- **Semena bez endospermu** – mohou být zcela bez nebo se endosperm vyčerpá již během vývoje semene. Je tomu tak například u semen sóji [1,3].

2.1.4. Perisperm

Semena, která endospermem nedisponují mohou mít takzvaný perisperm. Ten plní podobnou úlohu jako endosperm, jedná se tedy o výživové pletivo a disponují tím například semena cukrové řepy, jak je patrné z obr. 1 [1,3].

2.1.5. Oplodí

Oplodí je vrchní obal semene (viz obr.1 bod a) vznikající při přeměně květních částí a stěn semeníku. Vzniká tak, že tyto dvě části navzájem srostou a chrání semeno před vnějšími vlivy, které by na semeno mohly negativně působit [1,3].

2.1.6. Testa

Testa neboli osemení (viz obr.1 bod b) vzniká při přeměně a vývinu semen. Fyziologicky ovlivňuje propustnost kapalin myšleno zejména vody a plynů, u semínek především kyslíku. Díky její schopnosti vytvoření určitého stupně propustnosti, může vykonávat nezanedbatelný regulační vliv na celý metabolismus, růst vnitřních tkání a orgánů semene. Jinak řečeno ovlivňuje celý proces klíčení a má i vliv na dormanci semen [1,3].

2.2.Funkce vody v semenech

Voda figuruje a ovlivňuje prakticky veškeré aspekty života semene. Tudiž je dobré ji zařadit mezi nejdůležitější složky semene, ať už se jedná o vývin nebo růst. Voda může život semene příznivě ovlivňovat, ale také jej vážně až nenávratně poškodit [1,2].

Voda ovlivňuje:

- **Zrání a formování semen**
- **Klíčení semen**
- **Skladování zásob a stav klidu** – semena jsou před klíčením takzvaně v dehydratovaném stavu.

Z toho vyplývá, že vztah mezi semenem a vodou nejde brát na lehkou váhu. Tento vztah je nejen důležitý pro nastartování klíčení jako počáteční aspekt, ale může být i rizikem. Riziko vzniká hlavně při nežádoucím a příliš zrychleném bobtnání (imbibice) v první fázi klíčení. Tehdy může dojít až ke ztrátě životaschopnosti semene [1,2].

Při snížení obsahu vody v semenu pod určitou úroveň přejde semeno do takzvaného klidového stavu, tzv. stav vyschnutí nebo také dehydratace, kdy je činnost osiva utlumená. To je pro některá semena velice příznivé, jelikož to některá semena před zasetím požadují. Je tomu tak například u pšenice [1,2,8].

Naopak pokud se zvýší obsah vody v semenu nad určitou úroveň, spustí se imbibice a započne fáze klíčení semen viz obr.3. Semeno při tomto stavu přechází do aktivní části života s cílem vyklíčit a stát se plnohodnotnou rostlinou schopnou se rozmnožit [1,2,8].

2.3.Dormance

Dormanci lze definovat jako stav při, kterém je semeno chráněno před klíčením, i když jsou pro klíčení příznivé podmínky (dostatek vody, světla a při správné teplotě). Dormance tedy přímo zabraňuje započatí klíčení což funguje jako obranný mechanismus a zabraňuje prorůstání semene k mateřské rostlině. Dormance může způsobovat řadu problémů při posuzování klíčivosti osiva. Dormanci dělíme na primární a sekundární. [1,2]

2.3.1. Primární dormance

Ta se dále dělí na vnitřní (tzv. Endogenní) a Exogenní. Primární dormance se projevuje pouze u některých rostlin a jejich semen, při vývinu semene. [1,3]

2.3.1.1. Exogenní dormance

K této dormanci dochází, když nejsou k dispozici živiny potřebné pro proces klíčení. Jedná se především o stav, kdy semeno má nedostatek vody a kyslíku. Což nejčastěji způsobuje vnější obaly semene (Testy). [1,3]

Takto izolované semeno často klíčí pouze vnitřně, čímž tedy probíhá pouze maximálně druhá fáze klíčení a zbytek semene je neklíčivé. Je to z důvodu vysokého stupně nepropustnosti testy. [1,3] Tato dormance zabraňuje:

- Příjem vody
- Výměně plynů – dýchání semene.
- Odvodu inhibičních látek z embrya.

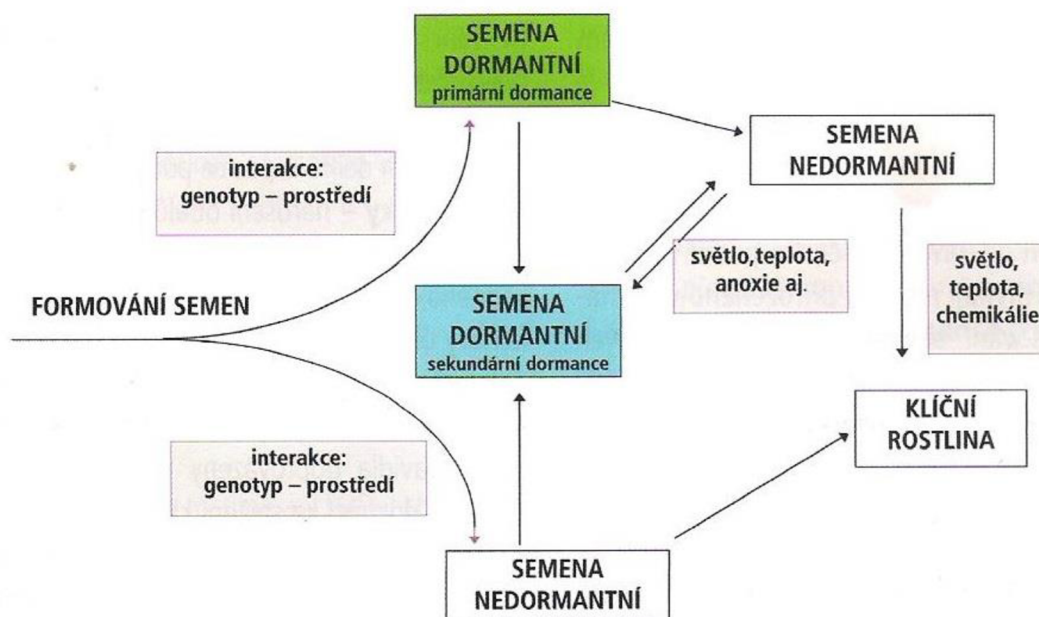
2.3.1.2. Endogenní dormance

Jedná se o nejčastější typ primární dormance. Majoritní podíl pro její vznik mají vrozené vlastnosti semene a ty odpovídají druhovým a odrudovým charakteristikám. Každý typ semene má své podmínky, které musí být splněny, aby byl započat proces klíčení. Hlavní složky Endogenní dormance jsou zejména přítomnost inhibitorů klíčení (Aba). Tuto dormanci vyvolávají vnější podmínky při procesu zrání: [1,3]

- Délka dne v závěrečném období zrání – dlouhý den může dormanci indukovat
- Vláhové podmínky – může ji zvyšovat nebo naopak snižovat.
- Teplota v období zrání.
- Stáří mateřské rostliny.

2.3.2. Sekundární dormance

Sekundární dormance je opětovně vyvolaná dormance u zralých semen. Jak je patrné z obr.2, je tomu tak i u nedormantních rostlin a jejich semen. Sekundární dormance je vyvolána především za nepříznivých podmínek pro klíčení například při nedostatku vody takzvaného vodního stresu, špatného světelného spektra nebo při nevhodné teplotě. [1]



Obr. 2 Výskyt primární a sekundární dormance. [1,2]

2.3.3. Možnosti odstranění dormance

Už víme, že dormance může působit nepříznivě na proces klíčení, ale je to také určitý obranný mechanismus mateřské rostliny. Nicméně, ne vždycky ji potřebujeme a po určité době se toho potřebujeme zbavit. Sekundární dormance se zbavit nemůžeme, protože se vyskytuje u nedormantních semen, ale můžeme ji ovlivnit a předcházet jí. Naopak je tomu u primární dormance. [1,3]

V přírodě se dormance semena zbavují například fyzikálními změnami půdy, což může být i při zamrznání a rozmrznání půdy (záleží to na druhu a odrůdě semene). Občas se o to postarají i některé mikroorganismy. [1,3]

Lidé si v minulosti také našli způsoby, jak se zbavit dormance. Nejčastější a nejpřirozenější způsob je takzvané posklizňové dozrávání semen. Dále jsou různé úpravy a ošetření semen, které se dělají při testech klíčivosti nebo přípravě osiva na sadbu. Jednotlivé úpravy jsou [1,3]:

- **Skarifikace** – mechanická úprava semen, při které se narušují jejich vnější obaly.
- **Chemické ošetření** – narušují se vnější obaly semen pomocí chemických látek. Například slabým roztokem kyseliny sírové.
- **Ošetření selektivními enzymy** – podobný princip jako chemické ošetření, klade se větší důraz na dobu expozice.
- **Teplotní ošetření** – narušování vnějších obalů semene pomocí tepelných šoků. Docházíme k podobnému efektu jako při skarifikaci.

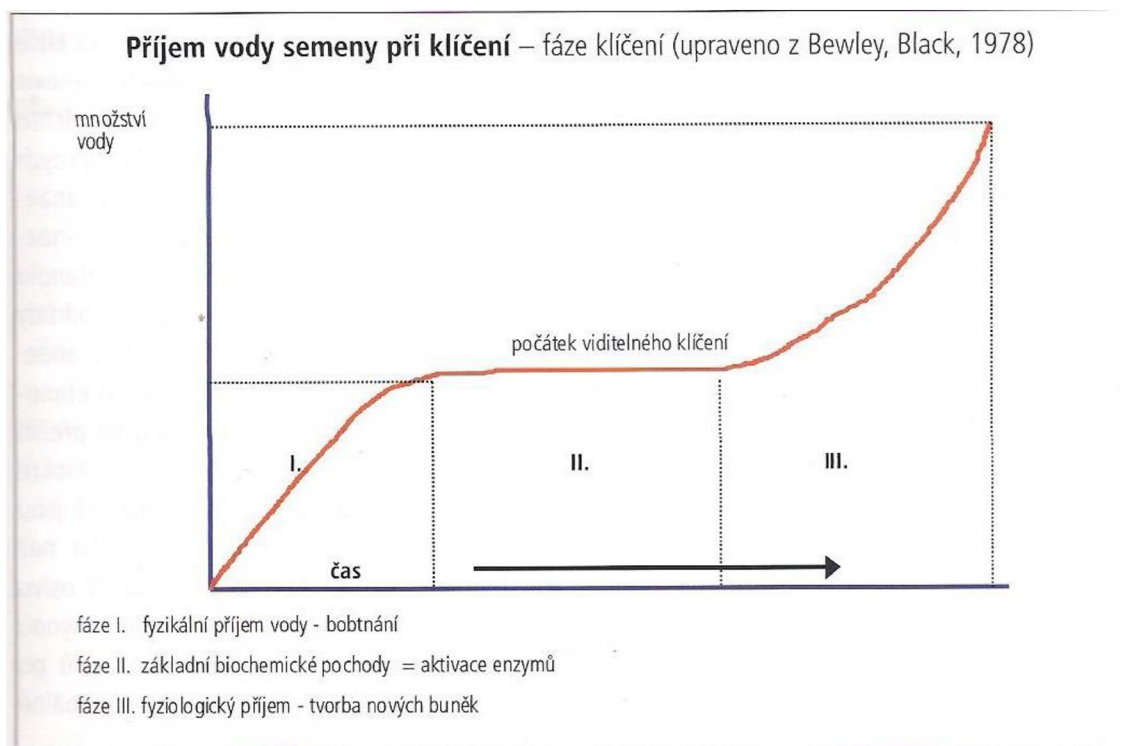
2.4. Klíčení

Klíčení je proces, při kterém se transformuje semeno do klíčku a poté do plnohodnotné rostliny. Začátek klíčení začíná v momentě, kdy semeno začne do sebe nasávat vodu viz obr.3. To způsobí, že obilka přejde z klidového stavu (nebo stavu dehydratace) a začne se transformovat. Klíčení poté končí (viz obr.3) při vytvoření embryonální osy neboli, když vyroste koříněk u klíčku. Celý proces klíčení trvá při teplotě 20 °C a příznivých podmínkách 20 hodin

[2]. Klíčení dělíme na různé fáze a každá je něčím specifická. Jak přijímáním vody, kyslíku atd. Jelikož je voda jednou z primárních složek, jsou fáze totožné s fázemi příjmu vody do semene [1].

Jednotlivé fáze klíčení:

- **1. fáze – bobtnání nebo také imbibice**
- **2. fáze – aktivují se biochemické procesy**
- **3. fáze – růstu klíčku**



Obr. 3 Fáze klíčení na základě přijímání vody. [1]

Proces nasátí vody a její následný pohyb v obilce závisí na vlastnostech rostliny. Záleží i na jednotlivých odrůdových vlastnostech rostliny pšenice, jako jsou podmínky navlhnutí, dostatek nebo hloubka dormance. [9]. Pro pochopení problematiky procesu nasátí a pohybu vody jsem si vybral nedormantní obilku pšenice (*Triticum aestivum*), podle popsaného experimentu v odborném článku [8] (volně přeloženo do češtiny) „Pohyb vody dormantních a nedormantních semen pšenice“.

2.4.1. 1. Fáze – bobtnání (imbibice)

Imbibice je první ze tří fází klíčení viz obr. 3, při kterém dochází k rychlému příjmu vody. Je to fyzikální proces, spočívající v hydrataci polymeru [2]. Je to přímo řízený proces, který je závislý na množství přijaté vody. Obsah vody, které je semeno schopné přijmout je závislé na několika faktorech [1]:

- **Chemické složení**
- **Velikost semen** – jeho ukládací kapacita
- **Hydratační schopnosti semene** – jednotlivých složek Embrya např. embrya a vnitřních pletiv.

Bobtnání a zejména jeho rychlost se řídí fyzikálními zákony. Rychlost je tedy dána rozdílem mezi vodním potenciálem prostředí a vodního potenciálu semene. Dále závisí na stupni propustnosti vnější vrstvi. Největší rozdíl potenciálů nalezneme zejména na začátku, kdy je semeno v dehydratovaném stavu a má nejmenší vodní potenciál. Tedy na začátku je také příjem vody největší a nejrychlejší, nazývá se náhlé nasávání a trvá cca 1 hodinu, poté přejde na hlavní nasávání. Postupně po dosažení určitého bodu v množství se příjem vody utlumí a semeno přejde do druhé fáze klíčení, jak je patrné z obr.3 [1, 2].

2.4.1.1. Proces nasátí vody do semene.

Za počátek bobtnání (neboli imbibice) a obecně začátek klíčení považujeme, když se přes mikropyl, jak je možné vidět na Obr.1, začne hydratovat embryo a začnou se plnit zásobníky vody v semenu [8]. Díky největšímu rozdílu vodního potenciálu je tato fáze vzhledem k přijatému obsahu vody nejrychlejší. Po „náhlém nasávání“ a během prvních dvou hodin je už embryo a osemení částečně hydratováno, i když je zbytek semena stále dehydratovaný. Jak tedy plyne ze studií, mikropyl je hlavním vstupem vody do semena, jelikož vnější obaly semene tomu zabraňují [1,2].

Zásobní kapacita vody se koncentruje mezi oplodím a osemením v dutých a hadicových buňkách oplodí. Tyto buňky v kombinaci s vnějšími obaly pomáhají svádět vodu k embryu a štítku, kde jsou membrány vnějších obalů mnohem tenčí [2,8]. Během hlavního nasávání dochází i k hydrataci dalších částí jako je například kořínek. S dalším příjmem vody postupuje voda v semenu a rozšiřuje se mezi další části embrya a zvyšuje se zásoba v oplodí [2,8].

2.4.2. 2. Fáze – aktivace biochemických procesů

Druhou fází klíčení zaznamenáváme při útlumu příjmu vody, jak je vidět na obr.3. Vyznačuje se zejména aktivací enzymů v již klíčících semenech. Druhou fází také provází hydratace proteinů, strukturální a sub buněčné změny a také prodlužování buněk [1,8].

V určitém bodě opět začne znovu stoupat množství nasávané vody v obilce a započne třetí a poslední fáze klíčení.

2.4.2.1. Pohyb vody během druhé fáze klíčení

Během druhé fáze klíčení sice dochází ke stagnaci v nasávání vody do obilky, ale naopak se zvyšuje pohyb vody a aplikace v samotném semenu. Druhá fáze je spojená s pomalejší hydratací endospermu [8], oproti hydrataci embrya, ze zásobníků vody v obilce. Embryo je tím pádem vždy více hydratováno než endosperm.

Je to dáno hlavně menším rozdílem vodního potenciálu v samotném semenu. Dále to také ovlivňuje vysoké procentuální množství škrobu a bílkovin v této části obilky [1,8].

2.4.3. 3. Fáze – růst klíčku

Třetí fáze je poslední fáze klíčení a vyznačuje se zejména již viditelným růstem klíčku (rostlinky) a vyšším příjmem vody do osiva. V neposlední řadě je třetí fáze spojená s metabolickou aktivitou s primárním výskytem u živých semen [1,8].

2.4.3.1. Pohyb vody během třetí fáze klíčení

Po stagnaci v příjmu vody ve druhé části, přichází ve třetí části největší příjem vody než v obou předchozích fázích. Voda se v této části koncentruje zejména v místech rýhy ve spodní části semene a také v mnohem menším množství i v hřbetní části obilky [8].

2.5. Vliv teploty na klíčení.

Klíčení by se dalo popsat jako sled chemických reakcí a transformací, které mohou fungovat pouze v určitém rozsahu teploty. Každý druh a odrůda osiva má svou vlastní minimální, optimální a maximální teplotu. Teplota, při které klíčení probíhá, může stejně jako ostatní faktory buď příznivě ovlivňovat klíčení anebo naopak ho zpomalit či úplně zastavit a přispět tak k návratu dormance nebo výskytu sekundární dormance u nedormantních semen. Takováto semena mohou ztratit schopnost klíčivosti. [1,3]

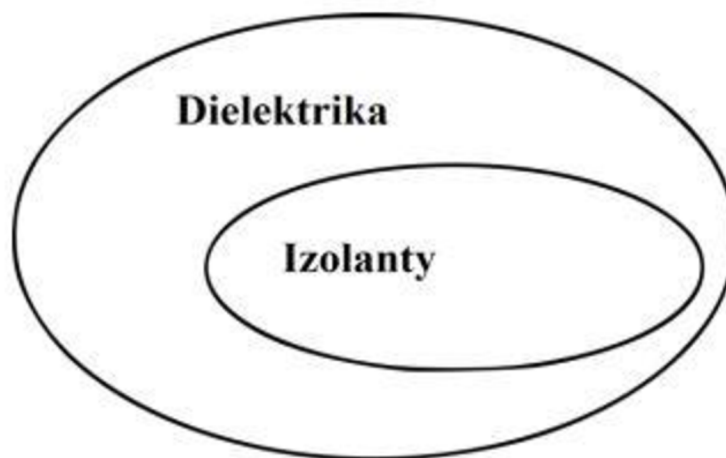
2.6. Světlo a jeho vliv na klíčení

Světlo nemusí být u většiny semen nutná podmínka k započetí klíčení na rozdíl od vody nebo teploty. Nicméně světlo ovlivňuje jednotlivé fáze klíčení a v některých případech je taky indikuje. Citlivost na světlo a tmu začíná již v první fázi klíčení (imbibice). Světlo ovlivňuje klíčení prostřednictvím Fytochromového systému (pomocí fytochromu P_r), které může spolu s vodou první fázi klíčení indikovat. Světlo tedy má vliv na foto blastické chování semen, které ovlivňuje jejich pozdější adaptaci. [1,3]

2.7. Dielektrické vlastnosti zemědělských materiálů

Biologické materiály a zejména ty zemědělské produkty jako je obilka pšenice, mají určité elektrické vlastnosti. Tyto elektrické vlastnosti v obilkách souvisí s rozložením a transportem nosičů elektrických nábojů. Toto je již známé například u kondenzátorů, který jak je vidět na obr. 5, na jedné straně elektrod udržuje kladný náboj a na druhé záporný [10, 14]. Mezi nimi je vložné nějaké dielektrikum, to může být obyčejné vakuum, ale pokud mezi dvě elektrody vložíme nějaké dielektrikum, zvětší se přítomné množství nosičů náboje mezi elektrodami a úměrně se zvýší i permitivita dielektrika [12].

Dielektrikum může být jakýkoliv izolant, nikoliv však naopak a zároveň to mohou být i vodivé materiály, jak je popsáno v tab. 2 a vidět na obr. 4, nezáleží ani na skupenství dielektrika. Mohou být jak pevná, kapalná i plynná, každý z nich se vyznačuje specifickými vlastnostmi i různými druhy polarizace, která v nich vzniká [13]. Dielektrikum může být i naše obilka pšenice, pokud má zmíněná obilka schopnost ukládat energii z vnějšího elektrického pole na elektrodách. [10].

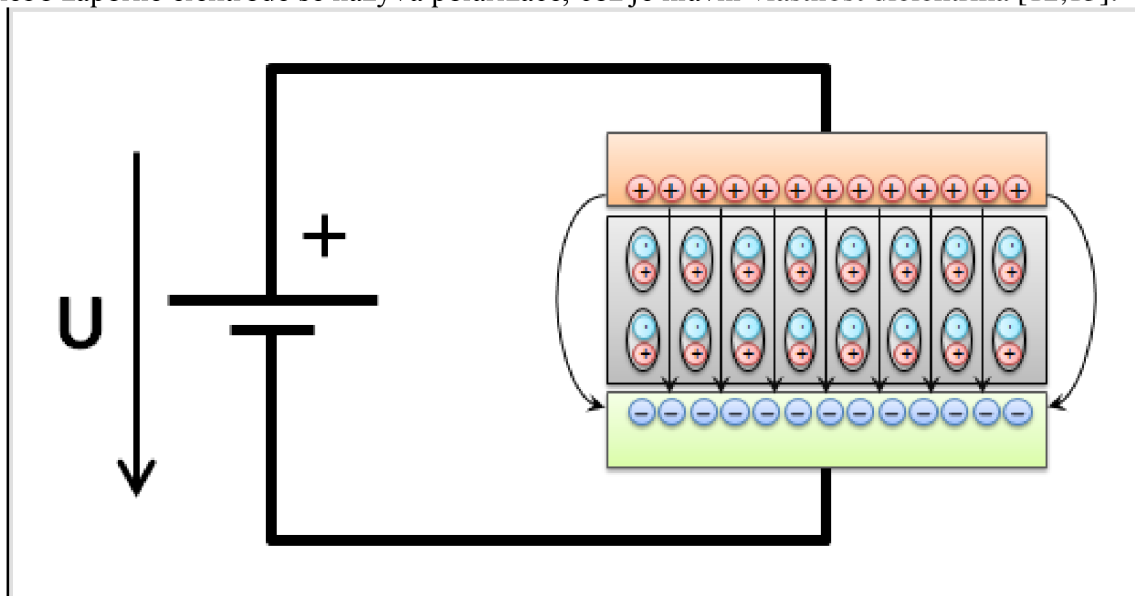


Obr.4 - ukázka izolantů jako podmnožina dielektrik [16]

Hlavní vlastností dielektrika je tedy schopnost polarizace a schopnost hromadění elektrické energie [12], tyto jevy jsou popsány níže. Parametrem dielektrika je relativní permitivita viz níže, dále to je ztrátový faktor [10,12].

2.7.1. Polarizace

Dielektrikum, včetně naší obilky pšenice, obsahuje soubor nábojů s kladnou nebo zápornou orientací viz obr. 5 vyznačeno + a -. Pokud materiál vložíme do působnosti elektrického pole, začne mezi elektrodami působit vnější elektrické pole a dochází k posunu elektricky nabitých částí (zmíněných nábojů) [13]. Tento proces pohybů ve směru ke kladné nebo záporné elektrodě se nazývá polarizace, což je hlavní vlastnost dielektrika [12,13].



Obr.5 - ukázka procesu polarizace dielektrika [12]

Při polarizaci je ještě důležitý takzvaný dipólový moment. Je důležitý zejména kvůli tomu, že provází celý proces polarizace viz obr. 5. Elektrický dipól vzniká, jestliže jsou dva elektrické náboje, které jsou opačně orientované (mají opačné znaménko viz obr.5) se stejnou velikostí Q (C) a odděleny určitou vzdáleností d (m). Elektrický dipól je dán velikostí dipólového momentu, pokud jsou Q stejně velké, dá se jeho velikost určit následovně [13]:

$$\mathbf{p}_t = Qd^{\rightarrow} \text{ (Cm)} \quad (1)$$

Existují různé druhy polarizací a liší se zejména tím, v jakém materiálu se proces provádí, jaká je jeho struktura a podle toho jaké mají nosiče náboje mezi sebou vazby. Polarizace jako procesy bychom mohli rozdělit do tří základních skupin (ke každé je uveden příklad) [16].

- Deformační – pružná nebo posuvná – elektronová polarizace
- Relaxační – orientační, nepružná – iontová relaxační polarizace
- Mígrační – objemová – migrační polarizace (Maxwell-Wagnerova polarizace).

2.7.2. Relativní permitivita

Jelikož je polarizovatelnost obecně špatně měřitelná, proto se v praxi spíše užívá tzv. relativní permitivita ϵ_r . Relativní permitivita určuje kolikrát se zvětší kapacita, pokud je mezi elektrodami nějaké dielektrikum (příklady dielektrik viz níže tab.2) oproti tomu, pokud tam žádné není [13]. Každé dielektrikum má tedy určitou velikost permitivity viz tab.2. Relativní

permitivita je bezrozměrná hodnota a je dána vztahem mezi absolutní permitivitou a permitivitou vakua [10,13]:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \text{ (Fm}^{-1}\text{)} \quad (2)$$

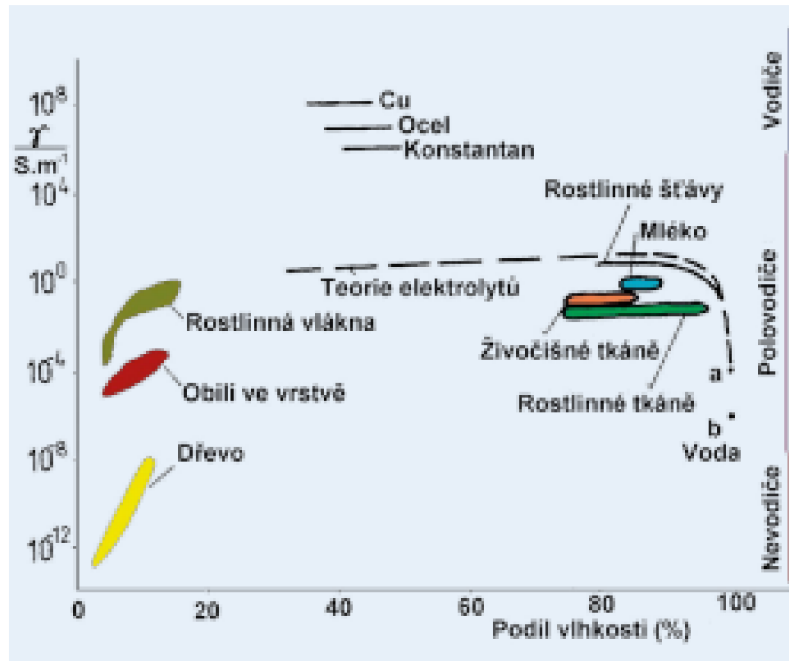
Relativní permitivitu můžeme také určit jako poměr elektrického posuvného pole D a intenzity elektrického pole E [16].

Tabulka 1: Jednotlivé hodnoty relativní permitivity různých materiálů – uvedené hodnoty byly měřeny při následujících podmínkách (Kapaliny při 20 °C, plyny při 25 °C, tlaku 101,325 kPa) [15].

Voda	81	Dusík	1,000 528
Petrolej	2,1	Helium	1,000 066
Aceton	21,4	Vodík	1,000 252
Papír suchý*	2,6	Vzduch	1,000 536
Olej*	2,5 - 4,2	Diamant	5,5
Slída*	6 – 7	Sůl kamenná	5,9
Sklo*	4,9 – 6,9	Plexisklo*	3 – 4,5

2.7.3. Konduktivita

Konduktivita γ neboli měrná vodivost, určuje schopnost daného materiálu vést elektrický proud. Zemědělské materiály se řadí mezi tzv. nedokonalá dielektrika, a tudíž jejich schopnost vést proud je nižší, než u běžných dielektrik [10]. Jejich konduktivita se pohybuje v rozmezí 10^{-8} až 10^1 Sm^{-1} . U zemědělských materiálů záleží na množství disociovaných iontů v těchto materiálech a jejich pohyblivost závisí na přítomnosti vody v materiálu, jak je patrné z obr.7 a teploty vnějšího prostředí [10].



Obr. 6 - schematické znázornění elektrické vodivosti zemědělských materiálů v závislosti na jejich vlhkosti [10]

Konduktivitu můžeme spočítat pomocí následujícího vzorce pro stejnosměrný zdroj:

$$\gamma = \frac{i_d}{E} \text{ (Sm}^{-1}\text{)} \quad (3)$$

Kde:

- γ – konduktivita (Sm^{-1})
- E – intenzita elektrického pole (Vm^{-1})
- i_d – proudová hustota (Am^{-2})

Pro střídavé pole, musíme rozdělit konduktivitu na reálnou a komplexní složku a k té přidat ještě přidat kruhovou frekvenci při které se dielektrikum/materiál měří [10]:

$$i_d = (\gamma + j\omega\varepsilon)E \text{ (Am}^{-1}\text{)} \quad (4)$$

kde $(\gamma + j\omega\varepsilon)$ je komplexní konduktivita a dále:

- γ – konduktivita (Sm^{-1})
- ω – kruhová frekvence (Hz)
- E – intenzita střídavého pole (Vm^{-1})
- i_d – proudová hustota (Am^{-2})
- ε – permitivita (F.m^{-1})

2.7.4. Elektrická pevnost

V souvislosti s vlastnostmi dielektrických materiálů je dobré zmínit i elektrickou pevnost (dále E_p). V homogenním poli představuje E_p intenzitu elektrického pole, při které dojde k průrazu. Při průrazu (je podmíněno vyšší úrovní napětí) dochází k zvyšování obsahu volných nosičů náboje i jejich pohyblivosti. To se projevuje především postupnou, i když prudkou ztrátou dielektrických vlastností zejména, nárůstem vodivosti ve velmi krátkém čase (10^{-8} s) [13]. Při čistě elektrickém průrazu ovlivňují E_p obvyklé chemické složení a vnitřní uspořádání materiálu. Mezi vnější vlivy, které ovlivňují E_p a řadíme frekvenci a plocha elektrod [13].

Elektrickou pevnost dielektrik můžeme definovat jako podíl průrazného napětí, při kterém dochází k průrazu a tloušťky dielektrika. Určujeme tedy podle následujícího vzorce [13].

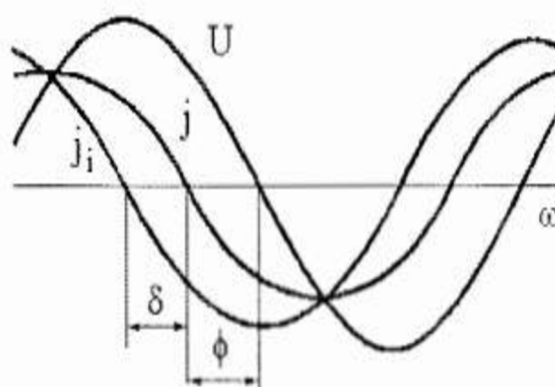
$$E_p = U_p \frac{U_p}{d} \quad (\text{Vm}^{-1}) \quad (5)$$

2.7.5. Dielektrické ztráty

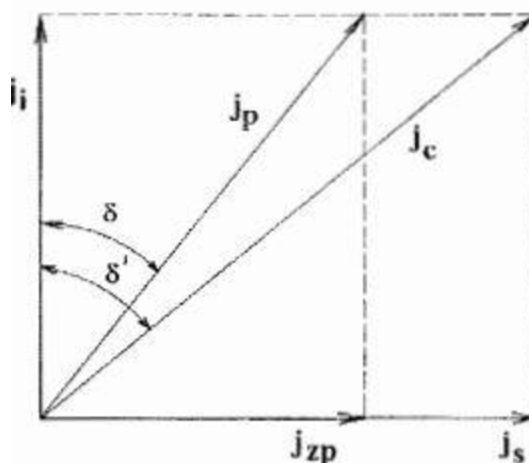
Pokud dielektrikum připojíme na zdroj s harmonickým průběhem, začnou se v dielektriku pohybovat volné i vázané nosiče náboje. Díky energii tvořené elektrickým polem se začne tato energie měnit na kinetickou energii nosičů [10, 16]. Část této energie se mění v teplo, které se označuje i jako ztrátový úhel δ (rad). Dochází k tomu kvůli srážkám nosičů náboje, které mají kladnou nebo zápornou hodnotu náboje s neutrálními nosiči náboje [16].

Tato tzv. ztrátová energie se může jevit jako neúčinná a nežádoucí. Je tedy fakt, že v mnoha případech jsou tyto ztráty nežádoucí, ale existují případy, kdy těchto ztrát využíváme, například při ohřevu v mikrovlnné troubě, kdy pomocí mikrovln rozkmitáme molekuly vody uložené v pokrmu. Frekvence těchto mikrovln se drží těsně pod relaxační frekvenci ve vodě (v místech kde jsou ztráty nejvyšší). Tím se i zajistí rovnoměrný ohřev pokrmu [18,16].

Dielektrické ztráty se liší podle druhu materiálu, chemického složení a jsou závislé na teplotě. Dále také záleží, o jaký druh polarizace se jedná, jelikož podle [16] u pružných polarizací (například pružná elektronová polarizace) se nosiče náboje pohybují pouze na krátkou vzdálenost a jsou tedy téměř bezztrátové. Z toho logicky vyplývá, že u relaxačních polarizací (například iontové polarizace) se musí nosiče náboje přemisťovat na delší vzdálenost a musí vydat více energie [13,16].



Obr.7 - fázové poměry v dielektriku [13].



Obr.8 - fázový Diagram složek proudové hustoty [13].

Jak již bylo řečeno, dielektrické ztráty jsou vyjádřeny ztrátovým úhlem δ (rad) a jedná se o fázový posuv mezi napětím a proudem, v ideálním případě je tento úhel 90° nebo také $\frac{\pi}{2}$. Jedná se tedy o zpoždění proudové hustoty, jak je vidět na obr. 8 a 9. a v praxi vyjadřuje míru energie elektrického pole (střídavé elektrické pole) přeměněné na teplo v dielektriku. I když v technice se spíše setkáváme s termínem ztrátový faktor nebo ztrátový činitel vyjádřený jako $\text{tg } \delta$ a v ideálním případě se blíží k 0 [16]. Ztrátový tangent je dán vztahem:

$$\text{tg } \delta = j\varepsilon_i/\varepsilon_r \quad [-] \quad (6)$$

- ε_r – reálná složka permitivity

- $j\epsilon_i$ – imaginární složka permitivity

Podle [10] znamená ztrátový tangent míru středního příkonu, který je absorbován jednotkovým objemem dielektrika. Mluvíme-li o biologických materiálech a jejich ztrátách musíme přihlídnout, že to nejsou dokonalá dielektrika a jsou navíc závislé na teplotě, frekvenci, a především na obsahu vody uložené v materiálu.

2.7.6. Komplexní relativní permitivita

Stejně jako u stejnosměrného zdroje je i v tomto případě polarizovatelnost špatně měřitelná a v praxi se využívá tzv. komplexní relativní permitivita, která je vyjádřena komplexním číslem [10,16]:

$$\epsilon = \epsilon_r - j\epsilon_i \quad [-] \quad (7)$$

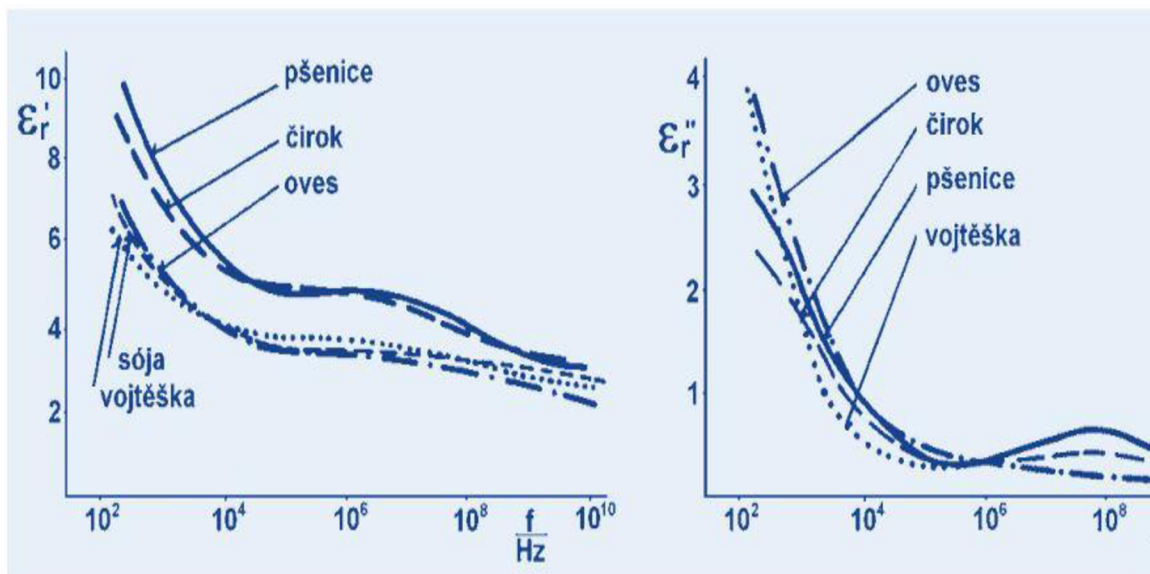
- ϵ_r – reálná složka permitivity – určuje schopnost ukládat energii v elektrickém poli materiálu [21].
- $j\epsilon_i$ – imaginární složka permitivity – vyjadřuje ztráty a zároveň schopnost absorbovat nebo rozptýlit energii [21].

Komplexní permitivitu ϵ je zvykem ji dále dělit na dielektrickou a vodivostní, jelikož se na ztrátách podílí jak vázané, tak i volné, nosiče náboje.

U polárních dielektrik je komplexní relativní permitivita navíc ovlivňována teplotou, tlakem a v neposlední řadě i velikostí elektrického pole atd [16]. Mezi tato dielektrika můžeme zařadit například sklo nebo různé druhy plastů [14]. V opačném případě je nepolární dielektrikum nezávislé na teplotě a frekvenci. Zejména z toho důvodu, že se u nepolárních dielektrik uplatňuje elektronová polarizace. Elektronová polarizace se projevuje vychýlením elektronového obalu, který běžně splývá s těžištěm jádra atomu, a tak vzniká indukovaný dipólový moment [10,13,16].

2.7.6.1. Permitivita rostlinných dielektrik

U materiálu rostlinného původu je permitivita závislá na obsahu vody uložené v materiálu [10]. Je proto běžné vyhodnocovat permitivitu v charakteristikách závislosti při určité vlhkosti a v závislosti na frekvenci viz obr. 9. Dále je dobré vyhodnocovat dielektrické vlastnosti v době, kdy je například semeno dostatečně hydratováno vodou a v započatém procesu klíčení. Jak bylo popsáno v člancích [10,17].

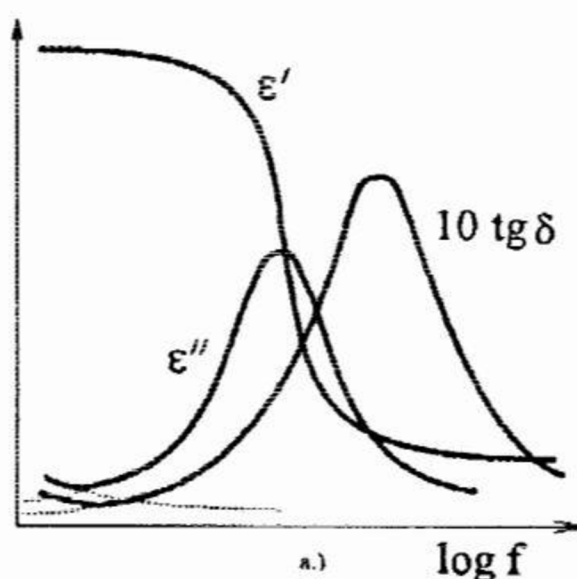


Obr. 9 - charakteristika permitivity v závislosti na frekvenci – několik druhů semen rostlin [10].

2.7.7. Relaxace permitivity

Stále se budeme bavit o střídavém elektrickém poli a pod pojmem relaxace si lze představit změnu permitivity (proto relaxace permitivity), které vyvolává elektrické pole [10]. Ve střídavém elektrickém poli je elementární dipól určen vlastní kruhovou frekvencí ω_r (nebo je také možno setkat se s názvem relaxační frekvence), kterou je elementární dipól schopen se v závislosti na teplotě pohybovat v prostředí molekul [10,13].

S relaxační frekvencí je třeba vzít na vědomí další parametr, a to relaxační dobu τ . Podle [13] je relaxační doba charakterizována jako opožděná polarizace, při které klesá vektor polarizace ze své stacionární hodnoty. Podle [10,13] je relaxační doba s relaxační frekvencí ve vztahu $\tau = \omega^{-1}$. Pro bližší pochopení následujícího vysvětlování zde uvádím obr. 11, a to frekvenční závislost a složek komplexní permitivity a ztrátového tangentu $\text{tg } \delta$.

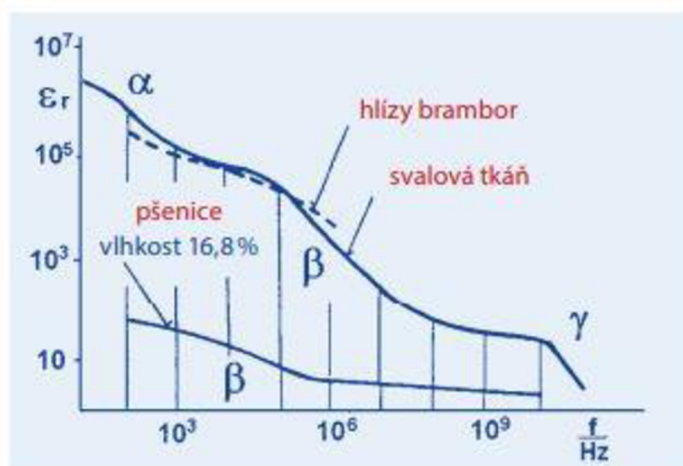


Obr.10 - frekvenční závislost a složek komplexní permitivity a ztrátového tangentu $\text{tg } \delta$ [13].

Pokud nastane situace, kdy úhlová frekvence ω vnějšího elektrického pole bude ve vztahu $\omega < \omega_r$ s relaxační frekvencí, dochází k velmi malým ztrátám. Neboť z důvodu pomalého natáčení elementárních dipólů, které se dokážou během jedné půlperrody rychle zorientovat a začnou se transportovat ve směru vnějšího elektrického pole [16]. Díky tomu se zvyšuje hodnota relativní permitivity ϵ_r (reálná složka komplexní permitivity) [13]. Naopak nejvyšších ztrát (energie elektrického pole přeměněné na teplo $-j\epsilon_i$) se nám dostane, pokud se začne ω rovnat ω_r (čím více se přiblížíme k té hodnotě, ztráty se zvýší), kdy dipóly přijímají nejvyšší možné množství energie. Během této situace už dipóly přestávají stíhat sledovat elektrické pole (jak je vidět na obr.11). Začne také vznikat relaxační oblast, kdy začne permitivita prudce klesat ϵ_r . V posledním případě, kdy $\omega < \omega_r$ se už dipóly tolik rozkmitají, že už se nestíhají zorientovat v jedné půlperiodě a v podstatě zamrznou (přestanou se otáčet). Z toho důvodu jsou permitivita ϵ' a ztráty velmi malé $j\epsilon_i$ [13].

2.7.7.1. Relaxace permitivity u zemědělských materiálů

Podle autora Schwan [24] se relaxace dělí na 3 základní disperzní oblasti α , β a γ (nebo procesy – jak je patrné z obr.11).



Obr.11 - závislost relativní permitivity biologických materiálů na frekvenci elektrického pole [10].

Začneme úsekem α , kdy tento relaxační proces souvisí s variabilitou kapacity vnější buněčné membrány s polarizací dielektrika v blízkosti elektrod. Hlavní příčinou relaxačního procesu β jsou Maxwellovy-Wagnerovy procesy polarizace a polarizace buněčných membrán [10]. Pro účely této práce je tato oblast klíčová a je tedy vhodné zmínit, že při prozkoumávání zeleninové dužiny byla zjištěna charakteristická frekvence, a to $f = 10^5$ [Hz] [19] (při této frekvenci budeme zjišťovat kapacitní vlastnosti našeho osiva). Posledním relaxačním procesem je oblast γ disperze souvisí s dielektrickou relaxací molekul vody s charakteristickou frekvencí 20 GHz [10].

2.8. Metody měření dielektrických vlastností

Měření dielektrických vlastností materiálů se provádí v proměnlivém elektrickém poli, při určité úhlové frekvenci [s^{-1}] a vyhodnocují se složky komplexní relativní permitivity ϵ_r a $j\epsilon_i$ [10]. Díky tomu se samozřejmě určují i další dielektrické vlastnosti (např. konduktivita), které jsme si popsali výše.

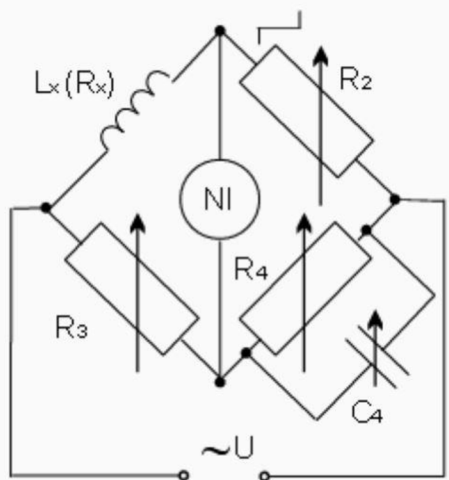
Metody pro určování dielektrických vlastností zemědělských materiálů se nijak neliší od určování u běžných materiálů (příklady dielektrik tab. 2). Za účelem měření dielektrických materiálů je tedy potřeba formovat elektrický obvod a nahradit příslušné prvky za

materiál, jehož příslušné vlastnosti chceme měřit a zároveň je potřeba se držet běžných elektrotechnických pravidel při tvorbě těchto tzv. náhradních obvodů [10,13,16].

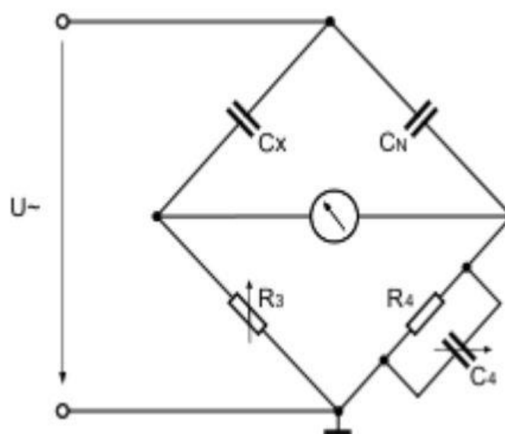
2.8.1. Můstkové metody měření dielektrických vlastností

Pokud chceme měřit dielektrické vlastnosti zemědělských materiálů nabízí se nám možnost měřit je pomocí měřících můstků. Měřící můstky se běžně využívají k přesnému měření elektrických veličin kapacity, odporu i indukčnosti [23, 10]. Při měření je potřeba znát i frekvenci, při které měření probíhá, jak jsme si popsali výše. Podle frekvenčního rozsahu vybíráme metodu i přístroj vhodně uzpůsobený pro dané měření, protože nic jako universální měřidlo neexistuje [10, 16, 13].

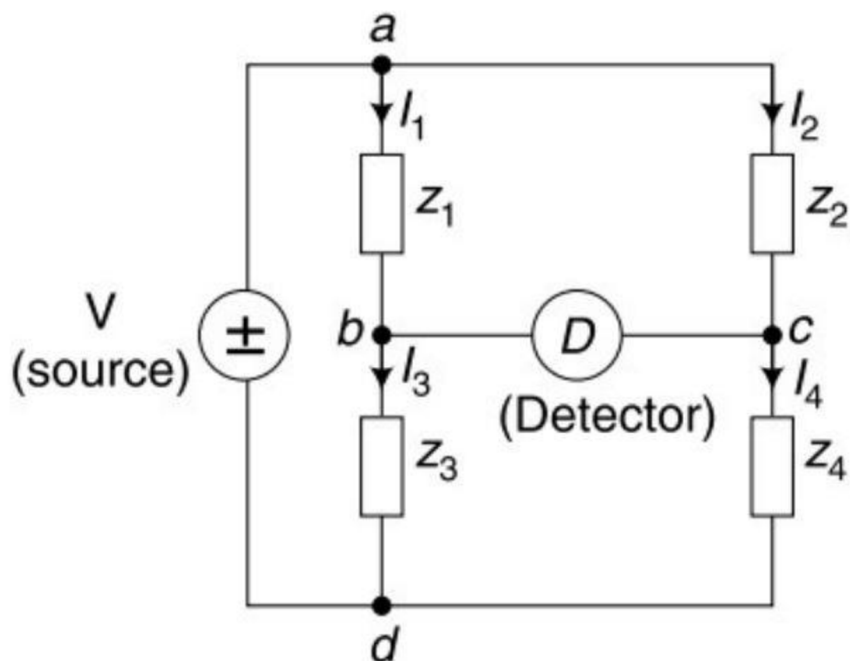
Frekvenční rozsahy se pro ulehčení rozdělují na vysoké, střední a nízké rozsahy. Pro měření při nízkých frekvencích v rozsahu od 10^{-1} do 10^1 Hz mohou být po vhodné úpravě použity i měřící můstky (kvůli špatné citlivosti z důvodů vysoké impedance dielektrika) nebo se používají metody zjišťování časové závislosti proudu protékající měřeným obvodem při přechodovém ději tzn. při nabíjení a vybíjení kondenzátorů. Střední rozsahy jsou v rozsahu od 10^2 do 10^6 Hz, pro měření v tomto rozsahu se hojně využívají můstkové metody a tato měření patří mezi ty nejpřesnější a nejméně náročné. Mezi nejznámější můstky využívající se řadí LCR (tento můstek byl využit pro účely této práce), Wienův můstek nebo Scheringův můstek, jejich ukázky jsou vidět na obr.11,12,13. Ve vysokých frekvencích od 10^6 do 10^9 Hz se nejčastěji používají rezonanční metody [10,23, 16].



Obr. 12 - ukázka Wienova můstku [23].



Obr. 13 - ukázka Scheringova můstku [23].



Obr.14 - ukázka obecné formy měřícího můstku využíván v primitivních LCR metrech [25].

2.8.2. Metody sledování pohybu vody v osivu

Jak již bylo řečeno, klíčovou složkou pro celý proces klíčení je voda. Tyto metody se dají rozdělit na destruktivní a nedestruktivní [8]. Pomocí destruktivní metody se dá zjistit přesné prosakování vody do jádra, endospermu a její postup osivem od úplného počátku do konce. Podle [8] se pro tuto vizuální metodu nejvíce hodí marker I/KI, vzhledem k malé velikosti, jsou rozpuštěné látky schopny vázat se na škrobovou tkáň. Problém této metody je rozříznutí semen během měření.

Pro účely této práce jsou důležité spíše nedestruktivní metody sledování pohybu vody v osivu, jako je například zjišťování obsahu vlhkosti pomocí hmotnosti. Tuto metodu použila autorka [8], kdy po deseti ti minutách probíhalo vážení osiva pšenice. Příjem vody byl z počátku rychlý, ale zhruba po pěti hodinách zpomalil. To potvrdili i autoři [2], kteří určili v první fázi klíčení, že nejdříve nastává náhlé nasávání, kdy během první hodiny dochází k nejprudšímu nárustu hydratace osiva a následně nastává hlavní nasávání, celý proces trvá cca 5-7 hodin. Pro sledování dynamického pohybu vody v osivu, je možné použít obrazovou analýzu. Například autorka [8] použila mikro magnetickou resonanci pro detekci pohybu vody při klíčení pšeničných semen nebo podle [26], který použil MRI a rozlišil 2 fáze klíčení ječmene.

V neposlední řadě by mělo být možné sledovat různé fáze klíčení a pohyb vody v osivu pomocí dielektrických vlastností. Podle autora [25], který popisuje dielektrické vlastnosti osiva, jejich závislost na frekvenci a obsahu vlhkosti. Měření těchto vlastností probíhalo u pšenice, kukuřice, ovsa a ječmene ve frekvenčním rozsahu od 1 do 50 MHz. Při tomto experimentu zjistili, že relativní permitivita ϵ s obsahem vlhkosti obilí, při kterékoliv dané frekvenci roste. Zároveň při dané vlhkosti se buď ϵ permitivita snižuje, ovšem pokud během této dané vlhkosti zvyšujeme frekvenci zůstávají hodnoty permitivity konstantní. Další měření v rozmezí od 1 do 50MHz [25] a v rozsahu od 50 kHz do 30 MHz [22] naznačili, že by se mohl ztrátový faktor zvyšovat nebo naopak snižovat, při různé frekvenci a v závislosti na obsahu vlhkosti.

3. Metoda práce.

3.1. Popis vzorků

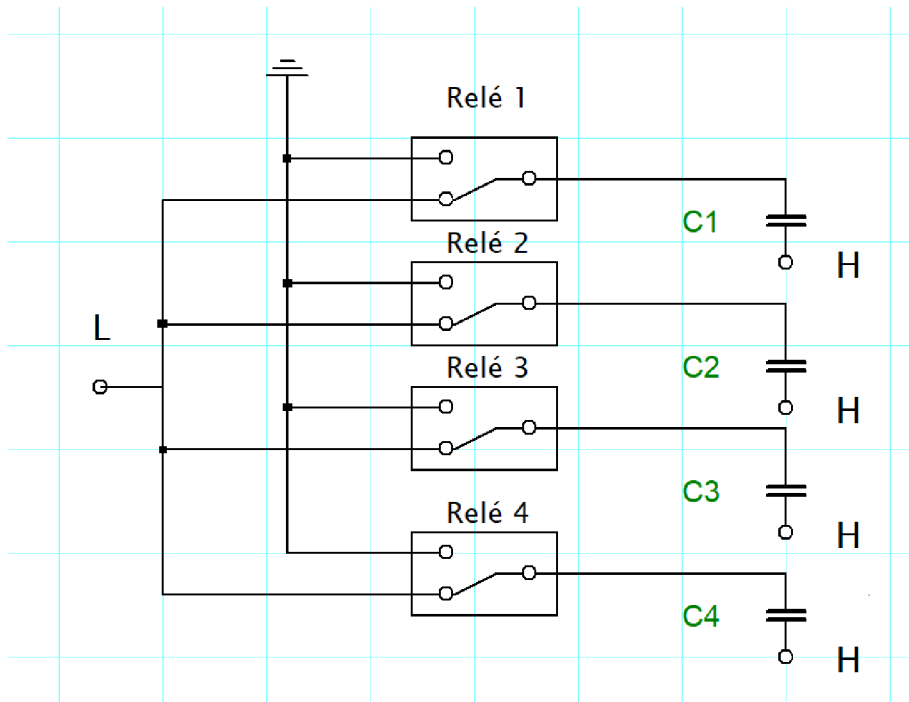
Jako vzorky pro měření dielektrických vlastností, byla vybrána semena pšenice ozimé odrůdy *Viriato*. Toto osivo bylo sklizeno dne 08. 08. 2022 na katastrálním území obce Turska na Praze západ (PSC 25265) od dodavatele Václava Kubelky (IČO: 76161056). Odrůda *Viriato* se řadí mezi potravinářskou jakost A (viz tab. 2). Tato odrůda pšenice se vyznačuje výbornou výnosností i ve stresových podmínkách a skvělou mrazuvzdorností [20].

Tabulka. 2 Vlastnosti odrůdy osiva vybraného pro experiment [20].

číslo poklesu (sec)	E	333
obsah NL (%)	A	13,1
Zeleného test (ml)	A	47
objemová hmotnost (g/l)	E	810

3.2. Instrukce a postup při přípravě měřící sestavy.

Úplně na začátku bylo potřeba zvolit vhodnou metodu pro měření dielektrických vlastností. Z dostupných informací popsané v teoretické rešerši byla vybrána metoda měření pomocí LRC můstků, který je se svým frekvenčním rozsahem od 20 Hz do 10 GHz zcela dostačující. Pro potřebu této práce bylo vybráno měření při stálé frekvenci 100 kHz. Po zvolení můstkové metody se vypracovalo schéma zapojení, jak je patrné z obr.13. Následně bylo potřeba připravit aparaturu, kdy byla snaha zajistit příznivé podmínky pro klíčení, pohodlné ovládání přístroje a přístup k osivu. Důvody, proč byl řešen frekvenční rozsah u můstku a snaha zajistit příznivé podmínky klíčení, což plyne z teoretické rešerše výše.



Obr. 15 - schéma zvoleného zapojení.

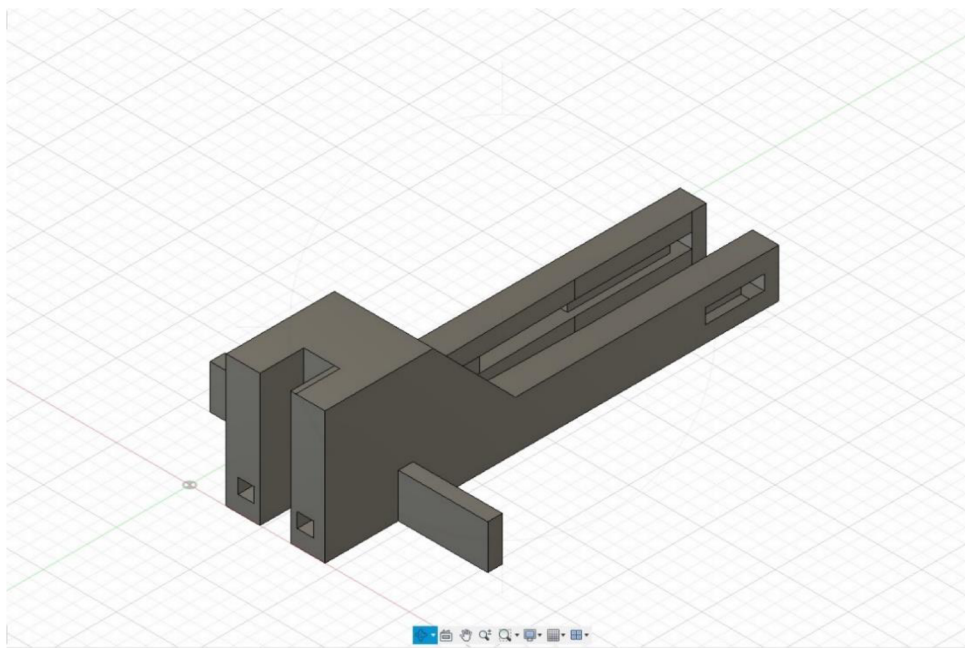
Popis schématu: osivo a jejich úchyty jsou označeny značkou kondenzátorů. Písmena L (angl. Low) znamená nízký a H (angl. High) znamená vysoký potenciál na svorkách LCR metru. Uzemnění bylo řešeno připojením na zemnicí vodič můstku.

Měření experimentu se uskutečnilo v univerzitní fyzikální laboratoři na Katedře fyziky, České zemědělské university. Měření trvalo týden a obsahovalo celkem 2 sady měření po čtyřech obídkách. Před popisem měřicího nástroje a postupem měření je potřeba zmínit veškeré součásti nutné k provedení experimentu:

Součásti potřebné k provedení experimentu:

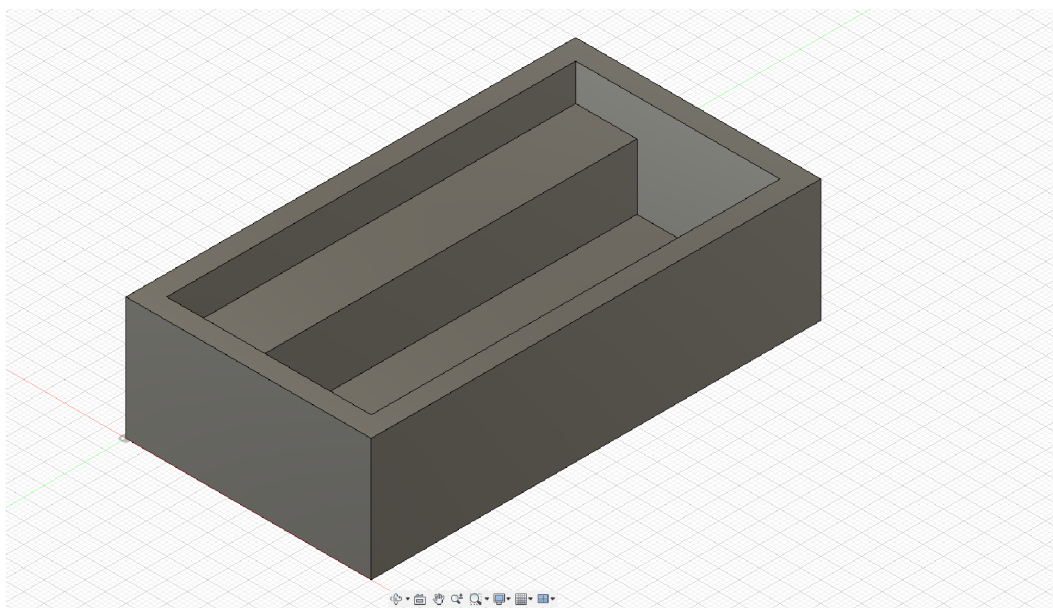
- 1) měřicí můstek – LCR můstek s kabely včetně svorek (GWInstek LCR-8110G)
- 2) počítač: procesor Intel core i5, 8 GB RAM
- 3) vlastnoručně vyrobené komponenty (miska s víčkem a mikro svorky pro úchyt vzorků, propojovací vodiče a podložka pod relátka viz obr. 15)
- 4) fotoaparát – Canon EOS750D
- 5) vzorek – Pšenice (odruďa)
- 6) destilovaná voda 100 ml (určeno pro 1 set měření)
- 7) agar 0,8g (určeno pro 1 set měření)
- 8) prosvěcovací deska
- 9) pinzeta a rukavice
- 10) odměrka (min na 100 ml)
- 11) vařič
- 12) 2x I/O moduly (Quido USB 4-4 Papouch 15067)
- 13) desinfekční prostředek - např. líh + tenký látkový papír
- 14) stojan na fotoaparát
- 15) propojovací vodiče a nerezové drátky o průměru 0.5 mm

Prvotním problémem, který byl potřeba vyřešit, bylo vymyslet úchyt osiva a přivést k němu elektrické pole, aby bylo možné měřit jeho dielektrické vlastnosti pomocí zvoleného můstku. Byly navrženy mikro svorky o rozměrech: x (délka) 9 mm, y (šířka): 30 mm a z (hloubka): 9 mm. Mikro svorky byly navrženy v modelovacím programu Fusion 360 od firmy Autodesk viz obr.16 a následně vytištěny na 3D tiskárně. Cílem bylo zajištění snadného přístupu k osivu, ale s nízkou tuhostí materiálu, neboť po nasátí vody do semene se logicky zvětší jeho rozměry. Do svorek byly zavedeny vnější kanálky pro nerezový drátek o průměru 0,5 mm, kterým bylo přivedeno elektrické pole ke vzorkům (viz Obr.16). Aby byla zaručena větší stabilita, jsou tyto svorky pro úchyt osiva po čtyřech kusech navzájem propojené. Počet čtyř kusů byl určen, protože jsme limitováni počtem relátek, které jsou na jednom I/O modulu pouze čtyři.



Obr. 16- 3D modely mikro svorek.

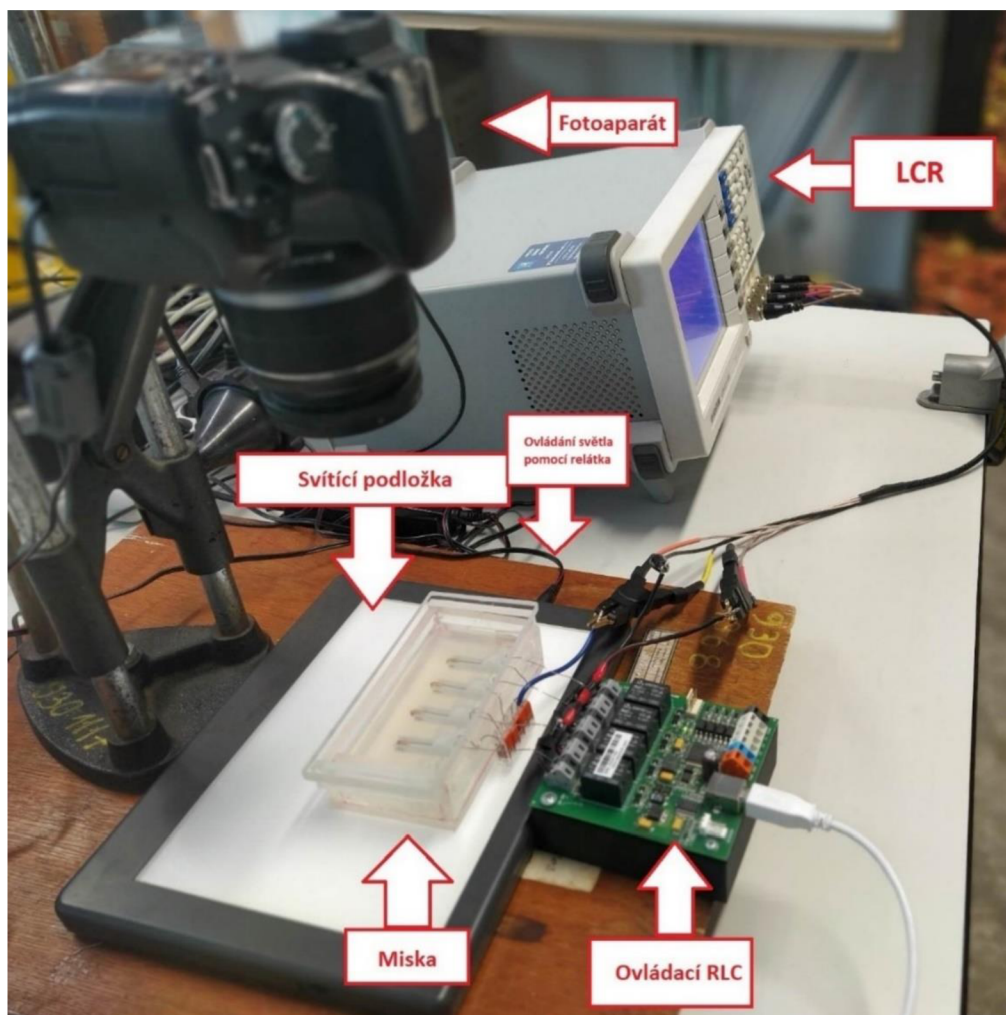
Další nutností bylo zajistit dostatek vody pro osivo. Tento problém byl vyřešen agarem, což je přírodní polysacharid a používá se jako živé médium pro kultivaci mikroorganismů a rostlin. Agar je potřeba před použitím uvařit a nechat projít varem. Agar taje při 96° a tuhne při 40° . Byla proto vyrobena miska s poličkou pro mikro svorky a slepena z plexy skla lepidlem, který zaručil nepropustnost a dostatečnou tepelnou ochranu až 90°C . Miska byla navržena, aby pojmul dostatečné množství agaru a tím pádem i dostatek vody pro hydrataci osiva (viz. Obr.17). Miska má rozměry x: 111 mm, y: 62 mm a z: 25 mm. Z důvodu vyloučení zkratu, jsme umístili do misky poličku o rozměrech x:100 mm, y: 15 mm a z: 18 mm, aby drátky neležely na agaru, a přesto zrno mělo přístup k vodě. Celkový objem misky pro roztok destilované vody s agarem bylo 100 ml. K misce bylo i vyrobeno víčko, aby se nejen zlepšily podmínky klíčení pro osivo, ale aby se i zajistila stabilita svorek v misce



Obr.17 - 3D modely misky.

V neposlední řadě bylo potřeba přivést k osivu EP pomocí elektrod z vhodného inertního materiálu, byli tedy vybrány nerezové drátky o tloušťce 0.5 mm. Tyto drátky byly využity zejména z plynoucích obav koroze, protože budou velmi blízko roztoku a ve vlhkém prostředí. Jelikož byla ambice udělat přívod elektrického pole k úchytům pomocí nerezových drátků co nejkratší, byla tedy navržena i podložka pod I/O modul do správné výšky s dírami pro jeho úchyt. Podložka byla stejně jako mikro svorky vytištěna na 3D tiskárně.

Nyní je čas přikročit k celkovému popisu nástroje, který je vidět na Obr. 15. Pod stojan s fotoaparátom byla položena svítící deska, která byla ovládána relátkem na modulu s pomocí programu z počítače. Na tuto podložku přímo pod objektivem fotoaparátu, byla položena miska zajištěná víčkem s mikro svorkami a pečlivě vybraným osivem. Od svorek, byly vyvedeny nerezové drátky připojené k výstupům druhého I/O modulu. Přivedení měřícího můstku bylo řešeno následovně: Měřící vodič s L potenciálem (na Obr. 18 oranžový vodič) je přiveden přímo na spínací relátka pomocí propojovacího vodiče, takže byl aktivní pouze při sepnutém měření. H potenciál (na Obr.18 červený vodič) bylo potřeba propojit do jednoho vývodu a přivést ho na svorky můstku. Tento problém byl vyřešen svedením nerezových drátků od vzorků do Wago svorky a připojením na H potenciál k LCR můstku. Připojení na kostru (na Obr.18 žlutý vodič) bylo řešeno také propojovacím vodičem stejně jako v případě L potenciálu a připojeno na uzemňovací vodič měřícího můstku.



Obr. 18 - ukázka a popis poskládaného nástroje.

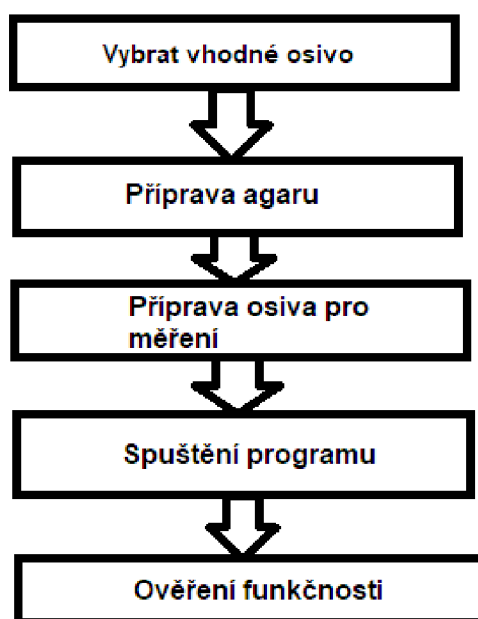
Aby nebylo potřeba lidské přítomnosti během několika denního procesu měření, byl sestaven ovládací program v programovacím jazyce Pythonu verze 2.7.0. Program funguje tak, že každých deset minut sepne nejdříve relátka připojená ke svorkám a LCR můstek provede měření. Naměřená data uloží do příslušné tabulky. Poté sepne druhé relátka ovládající svítící podložku, ta se rozsvítí a fotoaparát vyfotí fotku. Fotografie se poté uloží do příslušného adresáře. Tento proces se opakuje, dokud měření neskončí a program nebyl vypnut.

3.3. Postup měření.

Jak je patrné z blokového schéma na Obr. 19. Je postup a příprava měření rozdělena do pěti kroků. Je třeba hned na začátek klást co největší důraz na desinfikování a čistotu, aby se semena nekontaminovala. Veškeré úkony (až na spuštění programu) byly prováděny v jednorázových rukavicích a miska i pinzeta byla vždy pečlivě vydesinfikována.

V prvním kroku je potřeba vybrat vhodné vzorky pro měření. Vzorky byly vybírány vizuální metodou z velkého množství semen. Byla snaha, aby měly podobné rozměry a tvar, následně byly od ostatních odděleny, dokud na nich nebylo provedeno měření. Ve druhém kroku je potřeba si připravit roztok s agarem. Je třeba pomocí váhy odvážit 100 g destilované vody a přidat 0,8 g agaru ve formě prášku. Následně nechat roztok agaru v tepelně odolné odměrce projít 2 minuty varem na připraveném vařiči. Následně se odměrka odložila vedle na látkový papír a nechala se nějaký čas zchladnout. Nakonec se roztok agaru přelil do misky a nechal se zatuhnout. Doba tuhnutí trvala 20 až 30 minut. Mezitím byla provedena kalibrace LCR můstku a nastaven správný obvod měření a frekvence.

Ve třetím kroku byly pinzetou a v rukavicích opatrně vkládány vzorky do mikro svorek. Je potřeba si dát pozor, aby svorky s osivem nevisely ve vzduchu. Dále je podmínkou, aby vzorky byly v kontaktu s drátky – ideálně ve stejném místě jako u ostatních. Mezery mezi vzorkem a drátkem jsou nežádoucí. Poté už je potřeba co nejrychleji spustit program a ověřit jeho funkčnost při měření (relátka spínají, fotoaparát fotí a data s fotkami se ukládají do příslušných složek).



Obr.19 - blokové schéma měřícího postupu.

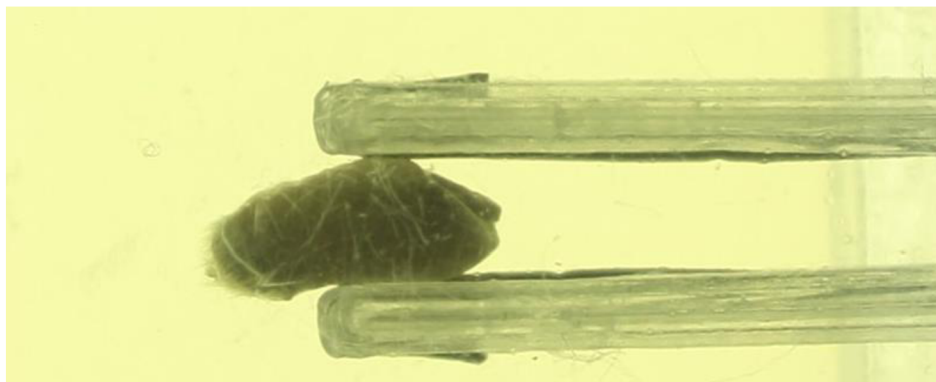
4. Výsledky a diskuse

Data byla měřena ve dvou setech po čtyřech vzorkách. Z osmi vzorků vyklíčilo celkem sedm. Byly měřeny elektrické vlastnosti semen, kapacita a ztrátový faktor. Data byla přes program zapisována do tabulky ve tvaru: čas měření, id (id se bralo podle relátka a označuje pořadí semen), kapacita C a ztrátový faktor. Měření probíhalo vždy po kalibraci LCR můstku při frekvenci 100 kHz. Další hodnoty, které byly určovány, jsou hodnoty změny délky vzorku v čase. Délka byla získávána z fotek vyfocených při každém měření a zjišťována pomocí programu 3D malování a přepočtem pixelů na mm. Šířka semene nemohla být spolehlivě vyhodnocena, protože vzorky byly z boku stlačovány svorkami. Naměřené hodnoty byly poté zanalyzovány a vyhodnoceny pomocí programu Microsoft excel. V grafech jsou jednotlivé vzorky v legendě popsány jako seed_ (id vzorku v jeho pořadí).

První a druhý set se od sebe liší polohou vzorků ve svorkách. V prvním setu měření byly vzorky položeny na spodní část (strana s drážkou směrem dolů) a embryem směrem k měřicímu aparátu (viz Obr. 20.). Během druhého měření vznikla myšlenka upravit polohu semene tak, aby bylo semeno položené na bok a nerezový drátek ležel v drážce osiva se směrem embrya k měřicí aparatuře (viz Obr 21). Každé semeno bylo tedy vyhodnocováno zvlášť a porovnáváno v rámci setu, ve kterém bylo měřeno.



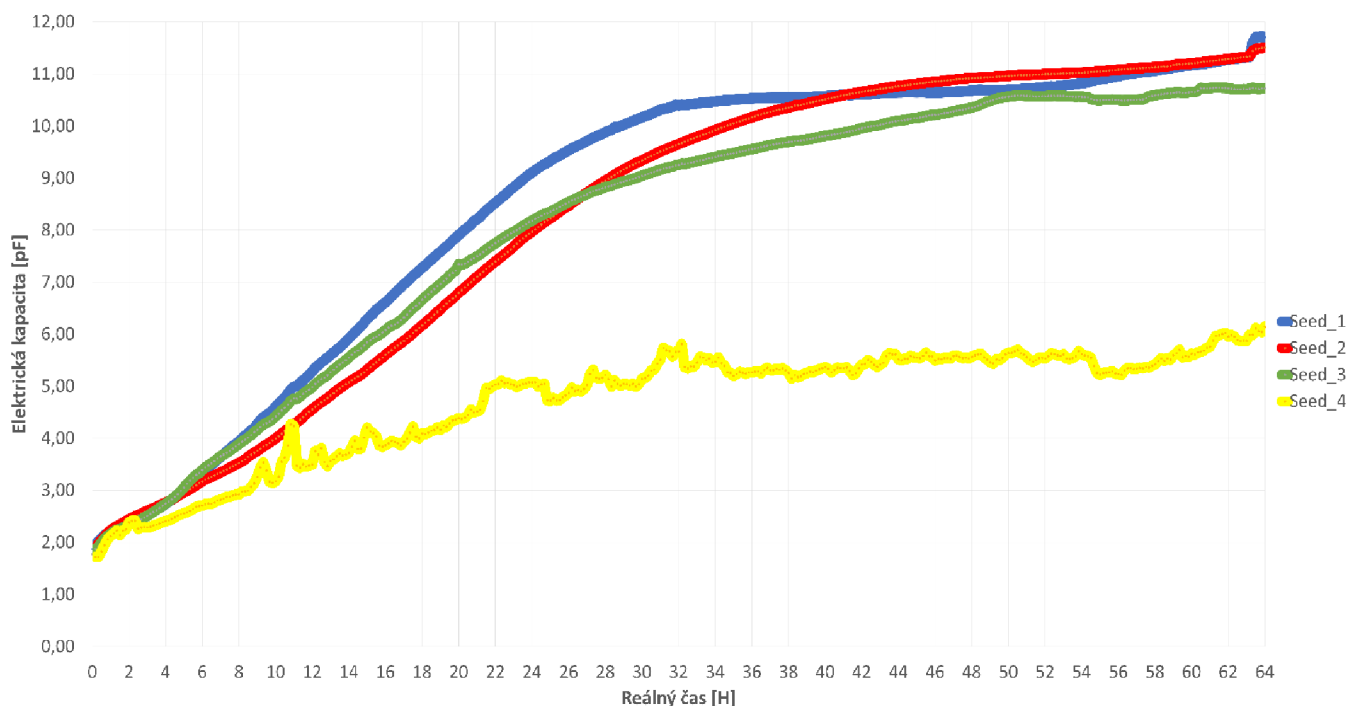
Obr. 20 - ukázka polohy vzorku během prvního setu měření. Vzorek č.2



Obr. 21 - ukázka polohy vzorku během druhého setu měření. Vzorek č.3

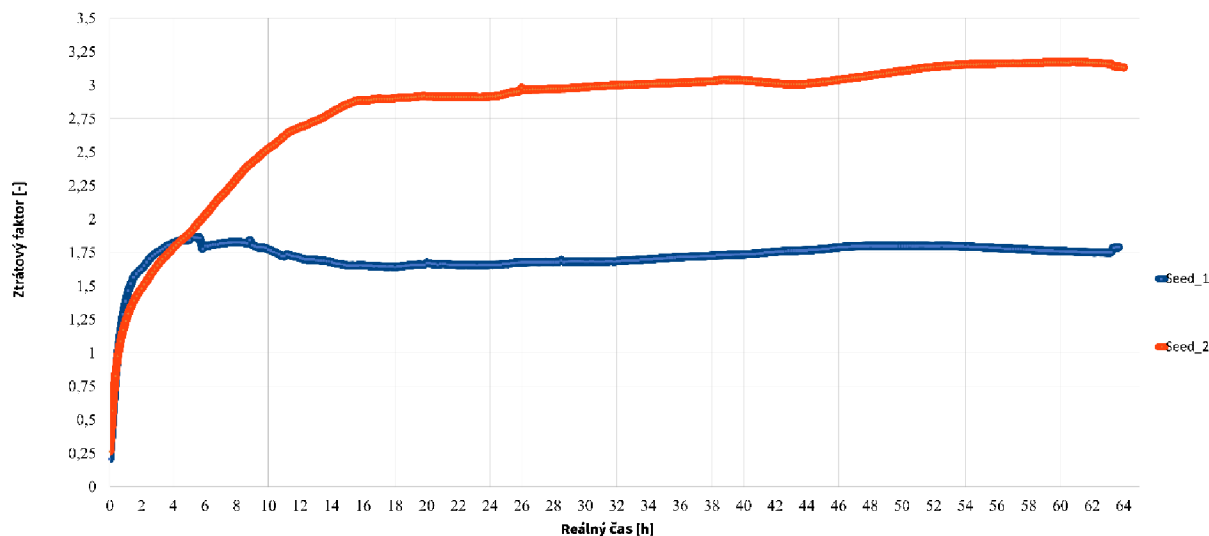
4.1. První set měření

První set měření trval 64 hodin a během této doby bylo získáno celkem 4620 hodnot k vyhodnocení. Hodnoty byly sbírány po deseti minutách. Během tohoto měření jeden vzorek nevyklíčil (Seed_4). Při ukončení měření bylo zjištěno, že tento čtvrtý vzorek byl nepatrně ve vzduchu a nebyl v kontaktu s elektrodami, jsou zde ale vyneseny jeho hodnoty. Nevyklíčení, ale mohlo být také způsobeno dormancí tohoto vzorku. U ostatních vzorků jsme naměřili velmi podobné průběhy, jak je patrné Obr. 22 a Obr.23, kde jsou zachycené nárůsty kapacity a ztrátového faktoru v reálném čase.



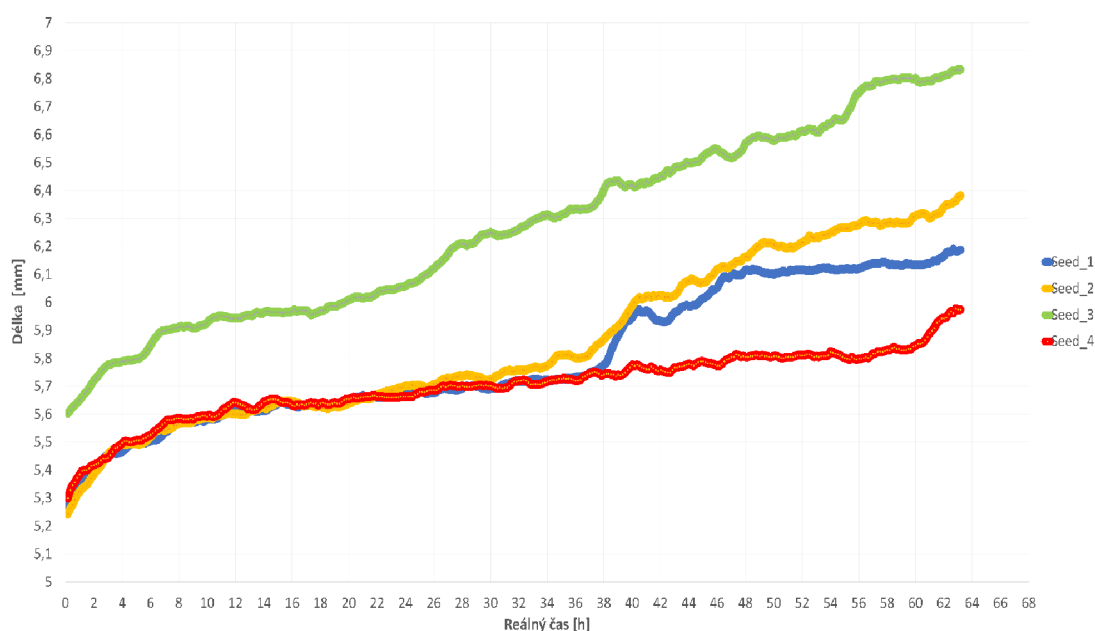
Obr.22 - graf změny kapacity v reálném čase.

Hodnoty kapacity měřené pomocí LCR můstku vykazují z počátku strmý nárůst (viz Obr. 22) kapacity, to trvá podle dat do necelých osmi hodin. Tento prvotní nárůst je spojený s první fází klíčení, kdy začíná hydratace osiva a voda začne postupně pronikat přes mikropyle do osiva (viz. teoretická rešerše). V této fázi dochází k významné hydrataci vzorku, která je patrná i z nárůstu délky v prvních hodinách měření (viz Obr. 24). Poté přichází relaxace, kdy se nárůst postupně zpomaluje až téměř zastaví a hodnota kapacity zůstává takřka konstantní. To je zapříčiněné tím, že se postupně s hydratací snižoval vodní potenciál vzorku v blízkosti elektrod. Dochází tedy k velmi malé změně vodního potenciálu a kapacita i ztrátový faktor se jeví jako konstantní. Dále je možné z grafů (viz Obr.22,23 a 24) vyvodit, že s narůstající hydratací osiva, hodnota kapacity i ztrátového faktoru narůstá. Hodnoty kapacity u vzorků seed_1 a seed_3 vrcholí cca ve dvacáté sedmé hodině, kdy je semeno už dostatečně hydratované a ukončilo se klíčení.



Obr.23 - graf změny ztrátového faktoru v reálném čase: Pro přehlednost jsou vyneseny pouze dva vzorky.

Jak je patrné z grafu na Obr. 23 má ztrátový faktor velice podobný průběh jako u kapacity. Vykazuje tedy prudký nárůst zhruba do sedmé hodiny a poté se nárůst zpomaluje až úplně začne stagnovat zhruba od třinácté hodiny měření. Zajímavé je, že u vzorku č.1 (Obr. 23 seed 1, modrá barva) je tento jev mnohem prudší a vrcholí již v cca páté hodině. Na Obr. 24 jsou znázorněny změny délky vzorků v čase. Z grafu je patrný nejprve rychlý růst, do přibližně páté hodiny. Tato doba potvrzuje tedy první fázi klíčení, kdy dochází k nabobtnání semen (detailněji je popsáno ve shrnutí výsledků). U vzorku č. 2 vidíme mnohem prudší a delší nárůst ztrátového faktoru, i když kapacita zůstává velmi podobná s ostatními. To naznačuje vyšší ztráty u tohoto vzorku, což je nejspíše zapříčiněno chybou metody měření. Poté dochází ke stagnaci nárůstu délky osiva a výraznější zvětšení semen (dle Obr. 24) je patrné až ve čtyřicáté hodině, kdy už byly vidět klíčky semen (ověřeno vizuální kontrolou fotografií). Konkrétní hodnoty vyplývající z těchto dat jsou vypsány v tabulce č. 3 pod prvním setem měření.

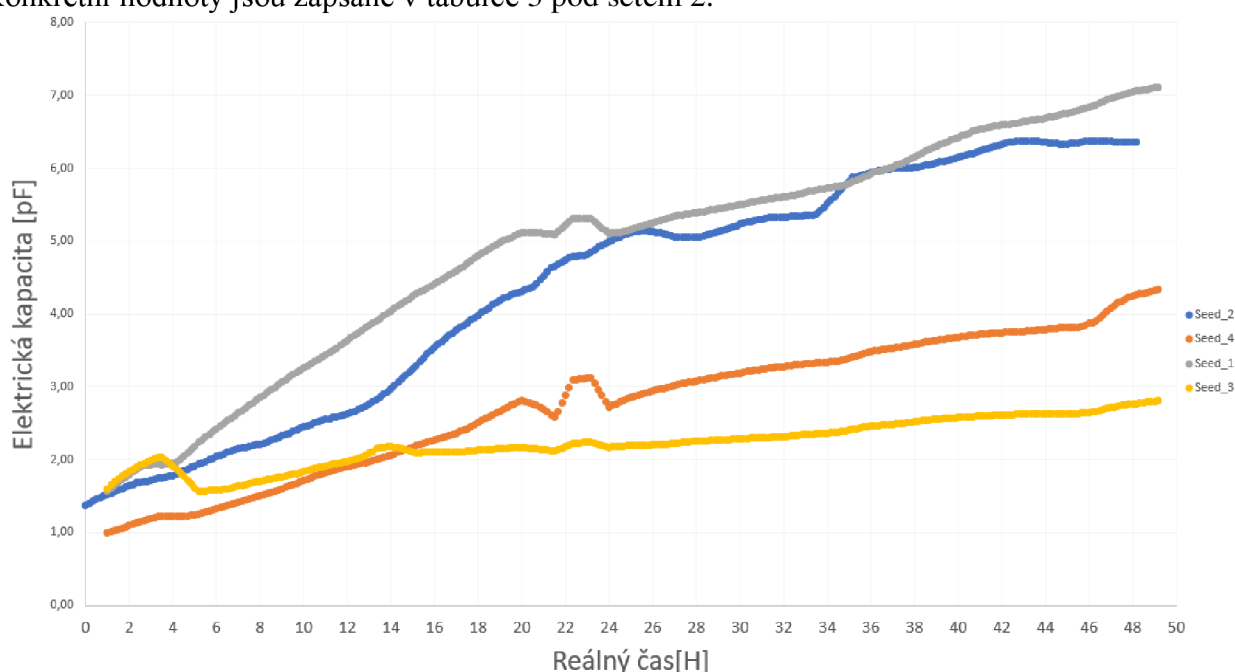


Obr.24 - změna délky vzorků v čase.

Délka vzorků se v čase zvětšovala, v důsledku hydratace semen. Délka vzorků v prvním setu se v průměru zvětšila o 16,765 % a souběžně s tím se zvedala jak kapacita, tak i ztrátový faktor. Okolo čtyřicáté hodiny je z grafu (Obr.24) patrné prudší zvětšení rozměrů, to je způsobeno postupným vyklíčením semene. To bylo kontrolováno vizuální metodou na pořízených fotografiích při zjišťování délky. Z těchto poznatků je vidět, že vzorek č.3 nejvíce a nejrychleji vyklíčil a byl tedy nejdelší ze všech.

4.2. Druhý set měření

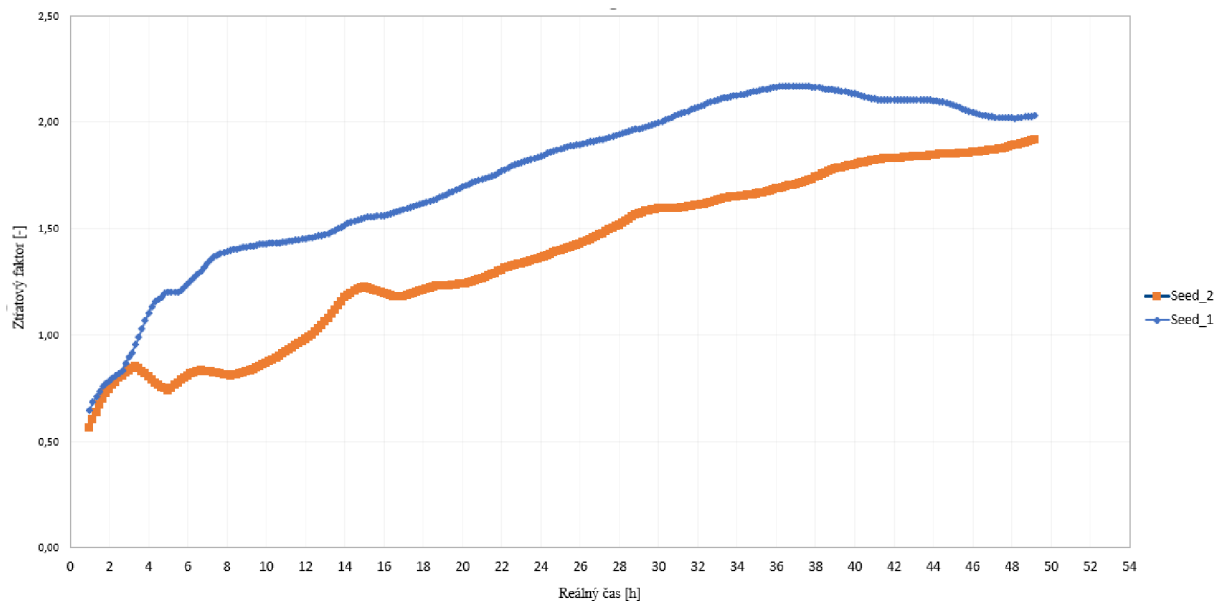
Po skončení prvního měření, bylo provedeno hned druhé s několika málo změnami. Semena se vkládala do mikro svorek na agaru bokem a tím se zlepšila manipulace s nimi při přípravě měření a z důvodu lepšího uchycení vzorků s cílem snížení ztrát. V tomto setu měření nám veškerá semena vyklíčila. Měření trvalo celkem čtyřicet devět hodin padesát dva minut a bylo naměřeno celkem 3576 hodnot. Data byla vyhodnocena stejným způsobem jako v prvním setu. Konkrétní hodnoty jsou zapsané v tabulce 3 pod setem 2.



Obr.25 - graf změny kapacity v reálném čase.

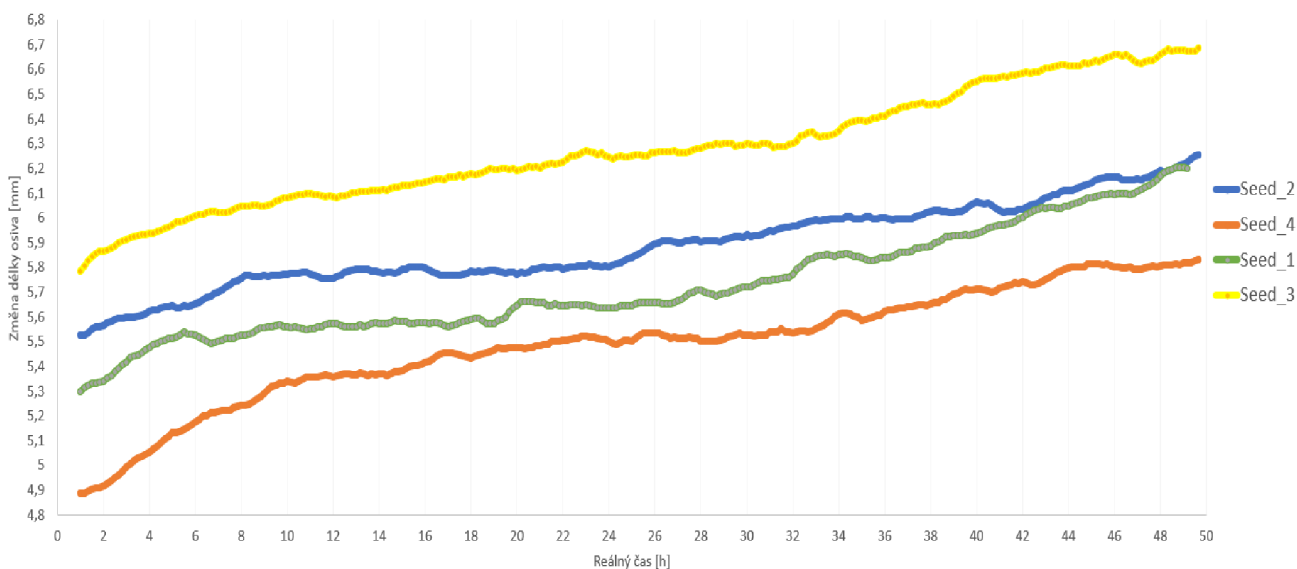
Z grafů 25, 26 a 27 je patrné, že kapacita i ztrátový faktor mají vzrůstající charakter jako v předchozím případě. Ovšem v tomto setu vidíme mnohem vyrovnanější nárůst kapacity (až na seed_3). U vzorku č.1 vidíme strmý nárůst kapacity v prvních fázích (v prvních 3 hodinách), poté je drobná odchylka, ale pak se voda dostává do endospermu (umístění elektrod na osivu) a nárůst kapacity i ztrátový faktor opět roste. Tento náběh trvá zhruba do osmnácté hodiny, kdy začíná nárůst kapacity pomalu klesat. To by mělo být způsobeno postupující hydratací ve vzorkách, což potvrzuje i nárůst délky osiva v reálném čase na obr. 28.

Jinak je tomu ovšem u vzorku č.3, kdy ze začátku je sice vidět určitý nárůst kapacity do čtvrté hodiny. Nicméně poté se kapacita jeví téměř pořád konstantní (což mohlo být způsobeno nedokonalým dotykem elektrod se vzorkem). Konkrétní hodnoty je možné vidět v tabulce č. 3.



Obr.26 - graf změny kapacity v reálném čase.

Pokud se budeme bavit o ztrátovém faktoru, tak u vzorků vidíme podobný průběh jako v předchozím setu (viz Obr. 23 a Obr.26). Do čtvrté hodiny vidíme strmý nárůst ztrát, když se voda dostává přes mikropyle do embrya. Poté ztrátový faktor stále roste, ale pomaleji, když je vodní potenciál v tuto dobu nižší. Změna délky semene postupně vzrůstá s tím, jak se hydratuje osivo. Ve druhém setu se vzorky nabobtnali průměrně o 15,25 %. Zároveň je možné okolo čtyřicáté hodiny zaznamenat nárůst délky osiva stejně jako v předchozím setu měření. V této době bylo potvrzeno u všech vzorků viditelný klíček na fotografiích.



Obr.27 - graf změny délky v reálném čase.

4.3. Shrnutí výsledků

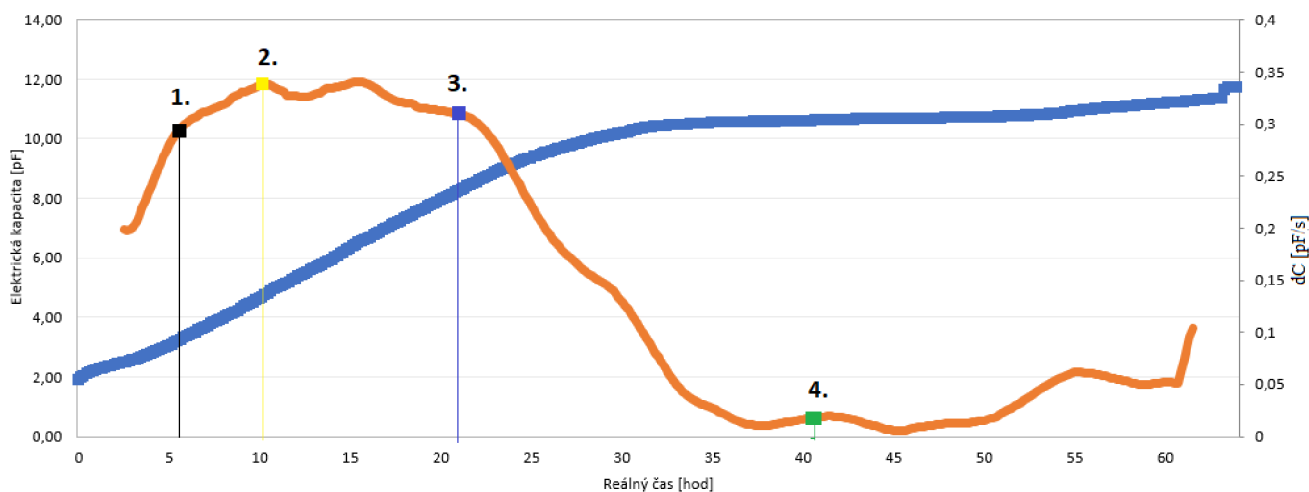
Z vykreslených grafů obou setů měření je patrné a možné potvrdit, že při klíčení semene se zvyšuje kapacita i ztrátový faktor. To je samozřejmě zapříčiněno zvyšujícím se obsahem vody v semenu, nejprudší nárůst je v počátečních fázích klíčení, poté se rychlost zvyšování kapacity a ztrátového faktoru zpomaluje (viz Obr.28).

Z hodnot v tabulce 2 je patrné, že hodnoty kapacity se v prvním setu měření držely v jednotkách pF. a maximálně se mírně držely nad úrovní první desítky pF. V druhém setu měření se hodnoty kapacity také pohybovaly pouze v jednotkách pF. Nejvyšší hodnotu kapacity jsme naměřili u vzorku č.3 prvního setu a to 12,254 pF. Ztráty se u prvního setu pohybovaly v rozmezí od 0,2 do 3,17. Ačkoliv nejvyšší hodnotu 4,6 jsme naměřili u vzorku č.4, který byl ve vzduchu, tudíž měl nejvyšší ztráty, a proto není započítán. Pokud porovnáme naměřené hodnoty, lze se domnívat, že změna polohy by mohla být příčinou poklesu nárůstu kapacity ve druhém setu měření.

Tabulka. 3 Naměřená data změny délky (d) a její procentuální nárůst, naměřené maximální a minimální hodnoty kapacity a ztrátového faktoru.

Měření	d [mm]		d [%]	Tg δ [-]		C [pF]	
	začátek	konec	Nárůst	min	max	min	max
Seed 1	5,27	6,21	15,19	0,207	1,867	1,866	11,721
Seed 2	5,18	6,41	19,18	0,264	3,174	1,769	11,507
Seed 3	5,44	6,85	20,51	0,158	1,900	1,776	12,254
Seed 4	5,22	5,95	12,18	0,207	4,661	1,866	6,144
Set 2							
Seed 1	5,16	6,19	16,67	0,410	2,177	1,309	7,138
Seed 2	5,51	6,26	11,93	0,339	1,930	1,219	6,415
Seed 3	5,71	6,72	15,03	0,348	2,882	1,307	2,831
Seed 4	4,85	5,86	17,23	0,259	2,784	0,919	4,391

Podle autorky [8] můžeme celkem dobře popsat jednotlivé fáze průniku vody do osiva, viz teoretická rešerše. Díky naměřeným datům, vneseným grafům a fotkám pořízeným během měření, vznikla myšlenka zmapovat postup vody během procesu klíčení a vytyčit tři přibližné oblasti klíčení. Toho bylo docíleno pomocí první derivace kapacity (je možnost to samé udělat i pro ztrátový faktor), která nám vyjadřuje rychlost nárůstu kapacity v reálném čase a ukázaly se u všech velmi podobné průběhy. Pro tyto účely a lepší přehlednost byl náhodně vybrán vzorek č.1 prvního setu měření. Výsledky byly porovnány se změnou délky v čase a kontrolovány vizuální metodou na fotografiích. Díky analýze těchto dat a porovnání grafů byly vyhodnoceny 3 přibližné oblasti klíčení a bod, kdy byl na fotografiích viditelně vidět klíček, a tedy definitivní konec klíčení. Pro přehlednost je zde uveden i samostatný graf pro změnu délky v čase pro seed_1 (vybraný vzorek) prvního setu měření Obr. 29.

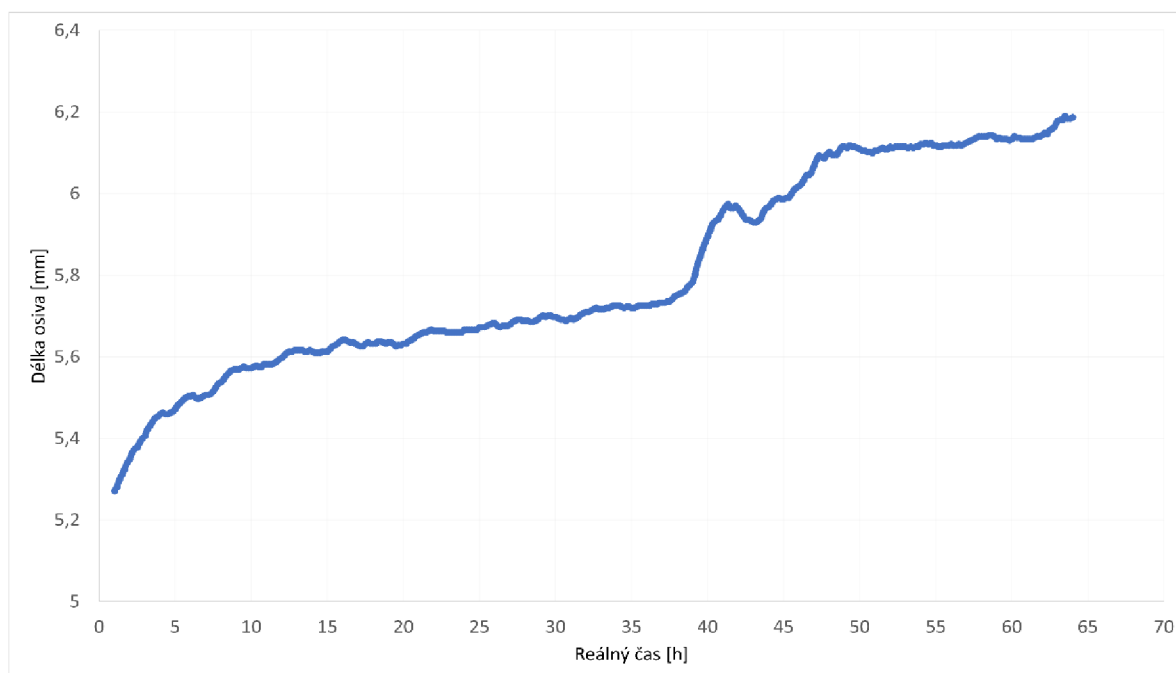


Obr. 28 - kombinovaný graf regresní křivky (oranžová dC – pF/s) a kapacity (modrá, C – pF) s vytyčenými inflexními body pro popsání oblastí.

První oblastí, která byla vyhodnocena je rychlý nárůst kapacity, který trval do šesté hodiny a padesáti dvou minut od spuštění experimentu. V této době docházelo zároveň k prudkému nárůstu délky osiva, tento jev jasně ukazuje na první fázi klíčení neboli imbibici. Což se shoduje s výsledkem od autorky [8] u které to trvalo do sedmé hodiny. Tato oblast je na Obr. 28 označena od počátku k bodu 1. Voda se v této době dostávala do obalu semena a započala v této době hydratace embrya přes mikropyle.

Druhá oblast označená na grafu (Obr. 28) od bodu 1 k bodu 2. Tato oblast trvala do desáté hodiny a třiceti dvou minut, kdy došlo k maximálnímu nárůstu kapacity. V této době pravděpodobně začala hydratace endospermu. Voda v té době se dostávala a začala se koncentrovat v oblasti nejbližší k elektrodám. Pokud tuto dobu porovnáme i se nárůstem délky, vidíme na Obr.29 velmi mírný nárůst až postupnou stagnaci. Toto by mohlo souviset s druhou fází klíčení.

Třetí oblast se vyznačuje pomalou stagnací nárůstu kapacity, to ukazuje na ukončení hydratace oblastí nejbližší elektrodám a mohlo by poukazovat na ukončení třetí fáze klíčení. K dalšímu prudkému nárůstu délky ještě dochází ve čtyřicáté hodině, kdy byl potvrzen viditelný klíček (na Obr.28 označen jako bod č. 4). Zároveň došlo v této době i k nárůstu kapacity.



Obr. 29 - graf změny délky za čas prvního vzorku prvního setu měření.

Na grafech je vidět i určitý šum, například na Obr. 28 od čtyřicáté páté. hodiny, kdy došlo k výkyvům hodnot. Šum se podařilo během zpracování dat až zůstaly jen ty největší výkyvy. Ty jsou způsobeny chybou měření a parazitními vlastnostmi vodičových propojek. Tyto chyby mají charakter systematické neboli konstantní chyby.

Po zhodnocení těchto hodnot vyvstává myšlenka, že by elektrické pole mohlo ovlivňovat samostatný růst osiva. To znamená, že by EP mohlo ovlivňovat samostatné fáze klíčení a případně je urychlovat nebo naopak zpomalovat. V tomto experimentu byly ukázány velmi podobné časové průběhy, které jsou popisované v literatuře např. od autorky [8].

Závěr

Podle získaných dílčích informací z předchozích experimentů byla sepsána teoretická rešerše. Na základě této rešerše byla navržena a vytvořena sestava pro měření dielektrických vlastností osiva (kapacity a ztrátového faktoru). Pomocí této sestavy byl navržen a proveden experiment k ověření její funkčnosti.

Na základě měření a pořízených fotografií, byla vyhodnocena data a vyneseny grafy díky čemuž se ověřila funkčnost sestavy. Pomocí pořízených fotografií byla zjištěna změna délky v reálném čase (viz Obr.22 a Obr. 27). Na základě grafů (Obr. 25 a 26) je patrné, že kapacita i ztrátový faktor mají rostoucí charakter, alespoň při měřené frekvenci 100 kHz. Dále je patrné, že největšího nárůstu kapacity a ztrátového faktoru dochází přímo v prvních fázích klíčení.

Ve shrnutí měření byli analýzou zmapovány 3 významné oblasti měření popsané z grafů na Obr. 28 a Obr. 29, které potvrdily podobný průběh u většiny měřených vzorků. Díky těmto oblastem byly nastíněny přibližné fáze klíčení a ukázalo se, že je možné pomocí můstkové metody (měřením kapacitních vlastností) přibližně mapovat pohyb vody v semenu.

Tento experiment byl proveden s cílem prohloubit vědomosti v oblasti měření elektrických vlastností zemědělských materiálů. Dále se pokusit pomocí výsledků, zmapovat pohyb vody v semenu a znázornit pomocí kapacitních vlastností přibližné oblasti klíčení.

Seznam rovnic

- (1) - Vztah pro dipólový moment (cm)
- (2) - Vztah po permitivitu (Fm^{-1})
- (3) - Vztah po konduktivitě (Sm^{-1})
- (4) - Vztah pro proudovou hustotu (Sm^{-1})
- (5) - Vztah elektrické pevnosti (Vm^{-1})
- (6) - vztah ztrátového tangentu (-)
- (7) - vztah komplexní relativní permitivity (-)

Seznam použitých zdrojů

- [1] Houba M. a Hosnedl V. Osivo a Sadba 1. vydání 2002 Vydalo nakladatelství Ing Martin Sedláček – ISBN 80-902413-6-0
- [2] Lev a Blahovec, 2017 - Imbibition of wheat seeds: Application of image analysis – článek vydán v - Int. Agrophys., 2017, 31, 475-481 doi: 10.1515/intag-2016-0072
- [3] Šroller J. a Kolektiv. Speciální fyto technika rostlinná výroba 1. vydání 1997 Praha vydalo nakladatelství Ekopress, s.r.o – ISBN 80-86119-04-1
- [4] Pšenice obecná – Muni [online] viděno (13.02.2023) - <https://cit.vfu.cz/vegetabilie/plodiny/czech/psenice.htm>
- [5] Plochy osázené v roce 2022 – Kurzy.cz (viděno 13.02.2023) dostupné z - <https://www.kurzy.cz/zpravy/660330-soupis-ploch-osevu-k-31-5-2022-v-roce-2022-cini-plocha-3-530-tis-ha-tj-o-627-ha-vice-nez-v/>
- [6] Obilniny skupiny 1 – agrobiologie.cz (viděno 13.02.2023) dostupné z - https://agrobiologie.cz/SMEP3/Pestovani_rostlin_cviceni_Obilninny/etext.czu.cz/php/skripta/kapitola3185.html?titul_key=81&idkapitola=2
- [7] Materiály ke studiu – Libvernskaskola.cz (viděno 13.02.2023) dostupné z - <https://libvernskaskola.wgz.cz/rubriky/poznavacka-semen/psenice-obecna-triticum-aestivum/novy-prispevek>
- [8] RATHJEN, J. R., E. V. STROUNINA a D. J. MARES, 2009. Water movement into dormant and non-dormant wheat (*Triticum aestivum* L.) grains. *Journal of experimental botany*. 60(6), 1619–31. ISSN 1460-2431
- [9] A Genetic Framework for Grain Size and Shape Variation in Wheat (viděno 06.02.2023) dostupné z - <https://academic.oup.com/plcell/article/22/4/1046/6096965>.
- [10] BLAHOVEC, J., 2017. Elektrické a optické vlastnosti zemědělských produktů a potravin
- [11] Kondenzátory [online] viděno 06.03.2023 <https://cs.khanacademy.org/science/fyzika-elektrina-a-magnetismus/xe9fba794b097c46d:elektricky-proud-a-obvody/xe9fba794b097c46d:kondenzatory/a/capacitors-article>
- [12] Elektrostatické pole (viděno 06.03.2023) dostupné z <http://old.spsemoh.cz/vyuka/zae/el5.htm>
- [13] LIPTÁK, J. and J. SEDLÁČEK, 2005. Úvod do elektrotechnických materiálů. Praha: Vydavatelství ČVUT. ISBN 978-80-0103-191-9.
- [14] Dielektrikum v elektrickém poli (viděno 06.02.2023) dostupné z - <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/447>
- [15] Elektrické pole a elektrický náboj (viděno 13.02.2023) dostupné z - <https://slideplayer.cz/slide/3681211/>
- [16] MENTLÍK, V. Dielektrické prvky a systémy. 1. vydání. Praha: BEN – technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
- [17] NELSON, S. O., 2008. Dielectric properties of agricultural products and some applications.

- [18] Jak funguje mikrovlnná trouba (viděno 13.02.2023) dostupné z - <https://www.okay.cz/blogs/rady-a-tipy/jak-funguje-mikrovlenna-trouba>
- [19] SCHWAN, H. P., 1977. Field interaction with biological matter. *Annals of the New York Academy of Sciences*. B.m.: Wiley, 303(1), 198–213. ISSN 00778923.
- [20] Pšenice Viriato (viděno 13.02.2023) dostupné z: <https://ragt-osivo.cz/sites/default/files/public/medias/variety/pdfs/Viriato.pdf>
- [21] Stuart O. Nelson 2010 - *Fundamentals of Dielectric Properties Measurements and Agricultural Applications*.
- [22] KNIPPER, N. v., 1959. Use of high frequency currents for grain drying.
- [23] Měření kondenzátoru (viděno 19.03.2023) dostupné z - <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1976>
- [24] SCHWAN, H. P., 1957. Electrical properties of tissue and cell suspensions. *Advances in biological and medical physics*. B.m.: Elsevier, 5, 147–209. ISSN 00652245.
- [25] NELSON, S. O., 1965. Dielectric Properties of Grain and Seed in the 1 to 50-MC Range. *Transactions of the ASAE*. B.m.: American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE), 8(1), 0038–0048.
- [26] Gruwel MLH, Chatson B., Yin XS a Abrams S., 2001. Studie magnetické rezonance příjmu vody v celých zrnech ječmene. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 36, 161-168. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2621.2001.00445.x>
- [27] Kondenzátory (viděno 06.03.2023) dostupné z - <https://cs.khanacademy.org/science/fyzika-elektrina-a-magnetismus/xe9fba794b097c46d:elektricky-proud-a-obvody/xe9fba794b097c46d:kondenzatory/a/capacitors-article>