

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů**

**Katedra botaniky a fyziologie rostlin**



**Fakulta agrobiologie,  
potravinových a přírodních zdrojů**

**Studium vlivu elektrického pole na rychlost výměny plynů  
u vybraných druhů rostlin**

**Bakalářská práce**

**Filip Robotka  
Rostlinná produkce (FYTOB)**

**Vedoucí práce doc. Ing. František Hnilička, Ph.D.**

© 2024 ČZU v Praze

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Studium vlivu elektrického pole na rychlost výměny plynů u vybraných druhů rostlin" 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 literatury 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 27.4.2024

---

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Františkovi Hnilíčkoví, Ph.D. za podporu a trpělivost i za jeho lidský a vstřícný přístup, cenné rady a odborné vedení mé bakalářské práce.

# Studium vlivu elektrického pole na rychlost výměny plynů u vybraných druhů rostlin

## Souhrn

Bioelektrika je obor vědeckého studia zahrnujícího aplikaci pulzní energie na živé organismy. Bioelektrika si v posledních letech získala velkou pozornost a v současnosti je předmětem mnoha studií. Vliv elektrického pole na rostliny může podporovat klíčení semen a podporovat/inhibovat růst rostlin. Tímto způsobem může aplikace pulzní energie na živé organismy vyvolat různé reakce a s touto technologií existuje velký potenciál pro inovace. V rámci bakalářské práce byly stanoveny následující vědecké hypotézy: existuje vliv elektrického pulzu na fyziologické charakteristiky rostlin; existuje rozdíl v reakci rostlin na elektrické pole; existuje rozdíl ve fyziologických parametrech vybraných rostlin. Cílem bakalářské práce je studium vlivu elektrického pole na fyziologické charakteristiky rostlin a sledovat fyziologickou reakci rostlin na elektrické pole. Pro experiment byly vybrány tři druhy rostlin: lnička setá (*Camelina sativa*), odrůda Zuzana. Hrách setý (*Pisum sativum*), odrůda Eso a slunečnice roční (*Helianthus annuus*), odrůda P62LE122. Experiment probíhal ve dvou oddělených sklenících s identickými podmínkami. V ošetřené variantě byl použit generátor elektromagnetického pulzního pole. Během 5 měření v intervalu 14 dní byly sledovány fyziologické parametry rostlin, včetně fotosyntézy, obsahu chlorofylu a karotenoidů. Měření bylo opakováno pětkrát. Výsledky byly získány pomocí různých metod, jako je měření fluorescence chlorofylu a stanovení obsahu pigmentů. Tyto postupy poskytly komplexní pohled na reakce rostlin na elektromagnetické pole a zkoumané parametry. Zjištění z naší studie potvrdila předpoklady ohledně vlivu elektrického pulzu na fyziologické charakteristiky rostlin. Elektrický impuls vykazoval výrazný dopad na rostliny. Studie odhalila variabilitu v reakcích rostlin na elektrické pole a také ve fyziologických parametrech, což poskytuje cenné poznatky o interakcích mezi elektrickými signály a rostlinami. Nejvyšší obsah pigmentů byl zaznamenán u slunečnice ( $14,260 \text{ nmol cm}^{-2}$ ), zatímco nejnižší u lničky ( $7,856 \text{ nmol cm}^{-2}$ ). Rychlosti výměny plynů byly vyšší u rostlin ovlivněných elektrickým polem v porovnání s kontrolními rostlinami. Mezdruhové rozdíly byly prokázány, přičemž rychlost fotosyntézy byla nejvyšší u hrachu ( $15,87 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) a nejnižší u lničky ( $8,293 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). Nejvyšší rychlost transpirace dosáhla slunečnice ( $2,428 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). Následoval hrách ( $1,664 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). Nejnižší rychlost transpirace dosáhla lnička ( $1,227 \text{ H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). Během vegetace se rychlost fotosyntézy a transpirace u všech sledovaných druhů zvyšovala. Elektrické pole mělo vliv na obsah fotosynteticky aktivních pigmentů a také na tvorbu kořenové a nadzemní biomasy. Nejvyšší hmotnost biomasy vykazovaly rostliny slunečnice ( $7,67 \text{ g}$ ) a nárůst u kořene, ( $0,78 \text{ g}$ ), zatímco nejnižší byl u lničky ( $6,70 \text{ g}$ ) nadzemní biomasa a ( $0,32 \text{ g}$ ) kořen. V rámci ontogenetického vývoje se hmotnost sušiny zvyšovala. Slunečnice prokázala nejlepší reakci na elektrické pole v porovnání s ostatními druhy, následovaná hrachem a lničkou. Tyto závěry nabízejí nové perspektivy pro další výzkum v oblasti rostlinné fyziologie a možné aplikace v zemědělství.

**Klíčová slova:** elektrické pole; výměna plynů; pigmenty; fluorescence

## **Study of the effect of the electric field on the gas exchange rate in selected plant species**

### **Summary**

Bioelectrics is a field of scientific study involving the application of pulsed energy to living organisms. Bioelectrics has gained much attention in recent years and is currently the subject of many studies. The effect of electric field on plants can promote seed germination and promote/inhibit plant growth. In this way, the application of pulsed energy to living organisms can induce various responses and there is great potential for innovation with this technology. The following scientific hypotheses were established in the framework of the Bachelor thesis: there is an effect of the electric pulse on the physiological characteristics of plants; there is a difference in the response of plants to the electric field; there is a difference in the physiological parameters of selected plants. The aim of the bachelor thesis is to study the effect of electric field on the physiological characteristics of plants and to observe the physiological response of plants to electric field. Three plant species were selected for the experiment: *Camelina sativa*, variety Zuzana. Pea (*Pisum sativum*), variety Ace. and sunflower (*Helianthus annuus*), variety P62LE122. The experiment was conducted in two separate greenhouses with identical conditions. An electromagnetic pulsed field generator was used in the treated variant. Plant physiological parameters including photosynthesis, chlorophyll and carotenoid content were monitored during 5 measurements at 14 days interval. The measurements were repeated five times. The results were obtained using different methods such as chlorophyll fluorescence measurement and pigment content determination. These procedures provided a comprehensive view of plant responses to electromagnetic fields and the parameters investigated. The findings from our study confirmed the assumptions regarding the effect of the electric pulse on the physiological characteristics of plants. The electric pulse showed a significant impact on plants. The study revealed variability in plant responses to the electric field as well as in physiological parameters, providing valuable insights into the interactions between electrical signals and plants. The highest pigment content was observed in sunflower (14,260 nmol cm<sup>-2</sup>), while the lowest was observed in linseed (7,856 nmol cm<sup>-2</sup>). Gas exchange rates were higher in plants affected by the electric field compared to control plants. Interspecific differences were demonstrated, with photosynthetic rates being highest in pea (15.87  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) and lowest in linseed (8.293  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). The highest rate of transpiration was achieved by sunflower (2.428 mmol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>). This was followed by pea (1.664 mmol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>). The lowest transpiration rate was achieved by linseed (1.227 H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>). During the growing season, photosynthetic and transpiration rates increased in all species studied. The electric field had an effect on the content of photosynthetically active pigments and also on the formation of root and aboveground biomass. Sunflower plants showed the highest biomass weight (7.67 g) and increase in root, (0.78 g), while the lowest biomass was in the above ground biomass and root (6.70 g and (0.32) g, respectively). Dry weight increased during ontogenetic development. Sunflower showed the best response to electric field compared to other species followed by pea and linseed. These findings offer new perspectives for further research in plant physiology and possible applications in agriculture.

**Keywords:** electric field; gas exchange; pigments; fluorescence

# Obsah

<b>1.</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>CÍL PRÁCE A HYPOTÉZY .....</b>	<b>2</b>
<b>3.</b>	<b>LITERÁRNÍ REŠERŠE.....</b>	<b>3</b>
3.1	Elektroporace 3	
3.1.1	Historie elektroporace.....	3
3.1.2	Vliv na zpracování potravin.....	5
3.1.3	Vliv na rostlinou buňku .....	11
3.1.4	Ošetření semen pomocí elektromagnetického pulzního pole .....	11
3.1.5	Účinky záření.....	11
3.2	Transpirace 14	
3.3	Fluorescence 16	
3.3.1	Typy rostlinné fluorescence.....	18
3.3.2	Fluorescence chlorofylu.....	18
3.4	Slunečnice roční 20	
3.4.1	Biologická charakteristika .....	20
3.4.2	Agrotechnika .....	21
3.5	Hrách setý 22	
3.5.1	Biologická charakteristika .....	22
3.5.2	Agrotechnika .....	23
3.6	Lnička setá 23	
3.6.1	Biologická charakteristika .....	23
3.6.2	Agrotechnika .....	24
<b>4.</b>	<b>METODIKA .....</b>	<b>25</b>
4.1	Založení pokusu 25	
4.2	Charakteristika rostlinného materiálu 25	
4.2.1	Lnička setá odrůda Zuzana .....	25
4.2.2	Hrách setý odrůda Eso .....	26
4.2.3	Slunečnice roční odrůda P62LE122 .....	26
4.3	Elektro indukce 28	
4.3.1	generátor (FW03010433-V8 – typ 1) .....	28
4.4	Měření fyziologických charakteristik 29	
4.4.1	Měření výměny plynů.....	30
4.4.2	Fotosyntetické pigmenty.....	30
<b>5.</b>	<b>VÝSLEDKY .....</b>	<b>31</b>
5.1	Fotosyntéza 31	
5.2	Transpirace 32	
5.3	Chlorofyly 33	
5.4	Karotenoidy 34	
5.5	Fluorescence 35	
5.6	Nárůst kořenů a nadzemní biomasy 36	
5.6.1	Hmotnost sušiny biomasy hrachu v průběhu měření.....	37
5.6.2	Hmotnost sušiny kořenů hrachu v průběhu měření .....	38

5.6.3	Hmotnost sušiny biomasy lničky v průběhu měření.....	39
5.6.4	Hmotnost sušiny kořenů lničky v průběhu měření .....	40
5.6.5	hmotnost sušiny biomasy slunečnice v průběhu měření.....	41
5.6.6	Hmotnost sušiny kořenů slunečnice v průběhu měření .....	42
<b>6.</b>	<b>DISKUSE.....</b>	<b>43</b>
6.1	Fotosyntéza	43
6.2	Pigmenty	43
6.3	Transpirace	44
6.4	Fluorescence	44
6.5	Růst biomasy	45
<b>7.</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>46</b>
<b>8.</b>	<b>PŘEHLED LITERATURY .....</b>	<b>47</b>

# 1. Úvod

Elektromagnetické záření je nezbytným prvkem naší životní podstaty, ale zároveň může být potenciálním faktorem ovlivňujícím růst a vývoj živých organismů, včetně rostlin. S rozvojem moderních technologií, jako jsou mobilní telefony, mikrovlnné trouby a bezdrátové sítě, je člověk stále více vystaven elektromagnetickým polím různých frekvencí. Otázkou se stává, jaké dopady mohou mít tato elektromagnetická pole na rostliny, které jsou základním prvkem našeho ekosystému.

Rostliny, jakožto klíčoví producenti organické hmoty a základní zdroj potravy pro mnoho živočišných druhů, mají zásadní význam pro udržení biologické rozmanitosti a stability ekosystémů. Porozumění možným vlivům elektromagnetického záření na rostliny je tak základním kamenem pro udržitelné zemědělství a ochranu životního prostředí.

Cílem této bakalářské práce je prozkoumat a analyzovat vliv elektromagnetického záření na růst rostlin. Práce se zaměřuje na různé aspekty vlivu elektromagnetického záření, včetně jeho možného pozitivního či negativního dopadu na klíčení semen, růst kořenů a nadzemní části rostlin, fotosyntézu a celkový růst rostlin.

Důkladné porozumění těmto procesům může poskytnout důležité poznatky pro optimalizaci pěstování plodin, zlepšení výnosů a ochranu rostlin před stresovými faktory prostředí, proto může být tato práce přínosná nejen pro akademickou obec, ale také pro zemědělce a odborníky v oblasti ochrany životního prostředí.



## 2. Cíl práce a hypotézy

Bioelektrika je obor vědeckého studia zahrnujícího aplikaci pulzní energie na živé organismy. Tento vědní obor si v posledních letech získal velkou pozornost studentů a vědců a v současnosti je předmětem mnoha studií.

### Hypotézy

1. Existuje vliv elektrického pulzu na fyziologické charakteristiky rostlin.
2. Existuje rozdíl v reakci rostlin na elektrické pole.
3. Existuje rozdíl ve fyziologických parametrech vybraných rostlin.

### Cíl

1. Studium vlivu elektrického pole na fyziologické charakteristiky rostlin.
2. Sledovat fyziologickou reakci rostlin na elektrické pole.

Vliv elektrického pole na rostliny může podporovat klíčení semen a inhibovat růst rostlin. Tímto způsobem může aplikace pulzní energie na živé organismy vyvolat různé reakce a s touto technologií existuje velký potenciál pro inovace.

## 3. Literární rešerše

### 3.1 Elektroporace

Elektroporace je proces, který ovlivňuje propustnost buněčné membrány rostlinných buněk pomocí externího elektrického pole. Tento jev může vést ke vzniku dočasných nebo trvalých pórů v membráně, což má za následek buď reverzibilní nebo ireverzibilní změny. Neumann et al. (1987) uvádějí, že elektroporace v lipidové dvojvrstvě buněčné membrány způsobuje vznik přechodných pórů, které umožňují průchod molekul, jež by jinak nemohly proniknout buněčnou membránou. Zhang et al. (2013) doplňují, že dochází ke změně integrity buněčné membrány, což může umožnit vznik dočasných nebo trvalých pórů, které mohou buď způsobit reverzibilní nebo ireverzibilní elektroporaci.

Rostliny mají schopnost reagovat na elektroporaci podobně jako živočišné buňky. Studie ukazují, že elektroporace může být využita pro efektivní dodávání látek do rostlinných buněk. Elektroporace může být účinnou metodou pro transformaci DNA do rostlinných buněk. Dále je možné využít elektroporaci pro zavedení látek jako jsou herbicidy do rostlin (Lin & Wang 2005).

Elektroporace je podle Neumann et al. (1987) technika, která se využívá ke zvýšení propustnosti buněčné membrány prostřednictvím vysokonapěťových elektrických pulzů. Tato metoda je v současnosti široce rozšířená a využívá se v různých oblastech, jako je medicína, biotechnologie a potravinářský průmysl.

Odpor rostlinných pletiv po ošetření pulzním elektrickým polem (PEF) je silně závislý na velikosti přiloženého napětí nebo intenzitě elektrického pole. Tento jev je nelineární, což naznačuje prahovou povahu tohoto procesu. Po ošetření PEF dochází k výraznému poklesu odporu, což je vysvětleno permeabilizací buněčných membrán. Před ošetřením mají buněčné membrány vysoký odpor, ale elektroporace je činí propustnějšími, což snižuje celkový odpor (Ivorra 2010).

#### 3.1.1 Historie elektroporace

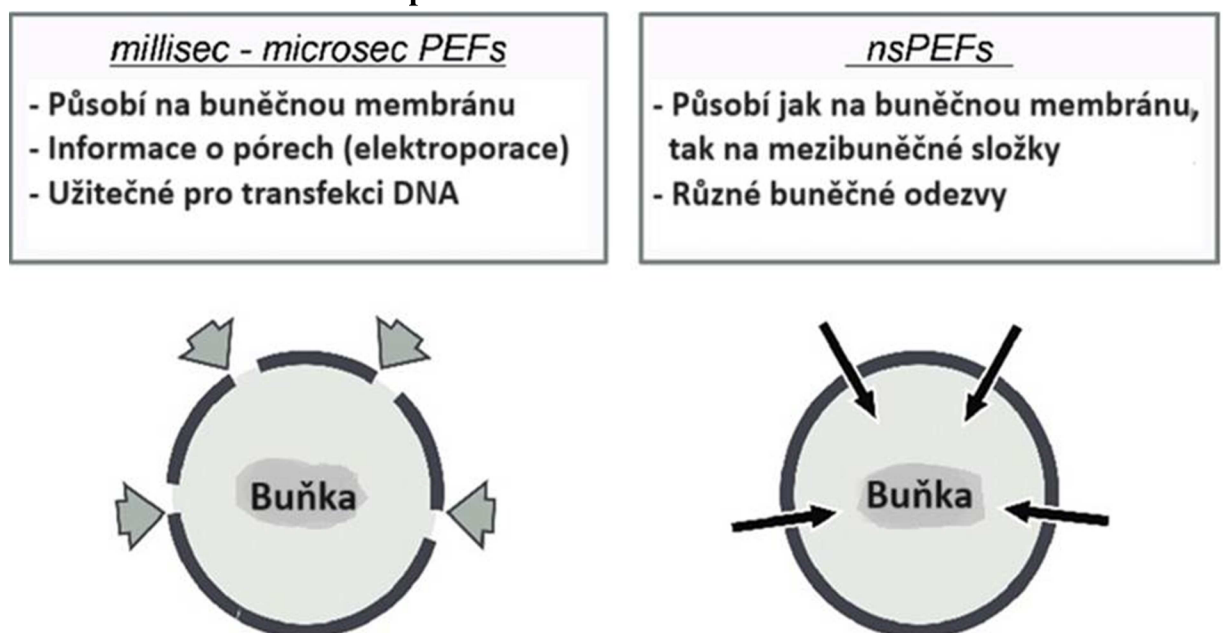
Neumann et al. (1982) dosáhli první transfekce DNA do buněk použitím protokolu, který zahrnoval aplikaci elektrického pole o napětí 8 kV/cm po dobu 5  $\mu$ s, což vyvolalo v buněčné membráně jev, který nazvali elektroporace. O deset let později Pakhomov et al. (1995) prokázali, že elektrické pole v buňkách vytváří lipidové nanopóry naplněné vodou, které v buněčné membráně vytvářejí stabilní vodivou cestu podobnou iontovému kanálu. Definice elektroporace tak zůstala nezměněna po více než 30 let: "Elektroporace je přechodná ztráta polopropustnosti buněčných membrán při aplikaci elektrických pulzů, která vede k úniku iontů, metabolitů a zvýšenému příjmu léčiv, molekulárních sond a DNA buňkami" (Weaver et al. 2001).

Koncept pulzního elektrického pole (PEF) byl poprvé navržen v roce 1967 s cílem ovlivnit chování mikroorganismů. V 80. letech 20. století byla identifikována teorie prasknutí membrány jako jeden z mechanismů účinku elektrického pole. Zvýšená propustnost membrány vedla k vývoji aplikací PEF, které umožňují extrakci buněčného obsahu a přenos genetického materiálu přes membránu (Pakhomov et al. 1995).

Od svých počátků je tato technologie široce využívána pro několik dalších aplikací například transfekce DNA. Dále je využívána v elektrochemoterapii, pletivové ablaci, extrakci chemických sloučenin, také pro mikrobiální inaktivaci a pro konzervaci potravin (Qiao et al. 2012). V roce 1995 došlo k dalšímu významnému kroku v historickém vývoji aplikace elektrických pulzů v biologických systémech, kdy (Schoenbach et al. 2004) vyvinuli techniku generování nanoimpulzních elektrických polí vysoké intenzity, řádově 6,45 kV/cm s dobou trvání kolem 700 ns, pro úpravu přírodní vody používané v průmyslových chladicích systémech. Tato technika je dnes v akademické obci známá buď jako nanosekundové pulzní elektrické pole (nsPEF), nebo jako nanoimpulzní stimulace (Baum & Joshi 2005).

Později Schoenbach spolupracoval se Stephenem J. Beebem a společně se stali průkopníky v oblasti nsPEF a systematicky studovali jeho účinky v buňkách pomocí teoretických i experimentálních přístupů, čímž tato technika získala nové spektrum použitelnosti (Schoenbach et al. 2001). Vstupem do subnanosekundové oblasti, inspirovaným poznámkou Baum (2005) a později Heeren et al. (2007) použili místo elektrod impulzní vyzářovací anténu (IRA) k dodání elektrického impulsu s vrcholovou amplitudou přibližně 250 kV/cm a s šířkou impulsu kolem 600 ps. Tento vývoj přidal do oboru dvě hlavní výhody, viz obr. 1: schopnost dodat elektrický impuls v řádu pikosekund a schopnost zacílit na hlubší tělesná pletiva, což umožňuje aplikaci nsPEF *in vivo*. Tím se podařilo posunout výzkum na další milník, jak vyplývá z obr. 2.

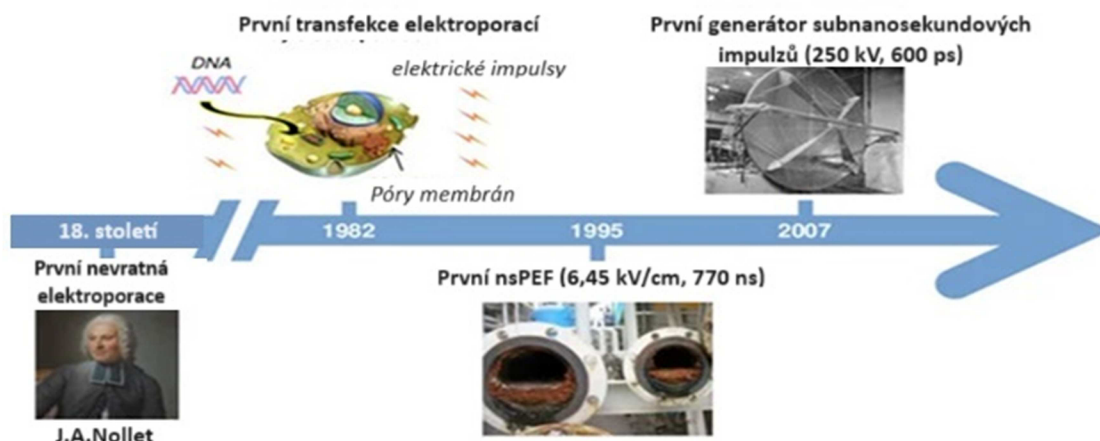
**Obrázek 1: Pulzní elektrické pole**



Zdroj: Stock ilustrace

Obrázek 1 zobrazuje rozdíl mezi PEF (Pulzním Elektrickým Polem) a nsPEF (Nanosekundovým Pulzním Elektrickým Polem). PEF je zastoupeno elektrickým polem o nižší intenzitě a delší době trvání, zatímco nsPEF je znázorněno elektrickým polem s vysokou intenzitou a extrémně krátkou dobou trvání. Tyto rozdíly jsou důležité, protože PEF je typicky používáno pro zvýšení propustnosti buněčné membrány a umožnění průchodu molekul, zatímco nsPEF je zaměřeno na hlubší tkáně a má potenciál pro léčbu a terapeutické aplikace, jako je elektrochemoterapie a ablace pletiv.

**Obrázek 2: Shrnuje hlavní události ve vývoji technologie nsPEF v průběhu času.**



Zdroj: ScienceDirect.com

### 3.1.2 Vliv na zpracování potravin

Potraviny jsou klíčové pro lidské přežití a zdraví, a technologie v potravinářském průmyslu, které zajistí bezpečnost a kvalitu potravin, se staly prioritou po celém světě. Tepelné zpracování, jako je vysokoteplotní sterilizace, pasterizace, odpařování a sušení, jsou často využívány ke zlepšení stability potravin a k zajištění mikrobiologické bezpečnosti výrobků. Tyto konvenční metody však obvykle vyžadují vysoké teploty (často nad 60 °C) a dlouhou dobu zpracování (v rozmezí minut až hodin), což může negativně ovlivnit chuťové a výživové vlastnosti potravin a zvýšit náklady na výrobu (Zhang et al. 2019).

Složky citlivé na teplo, jako jsou vitamíny a polyfenoly, jsou zvláště ovlivněny konvenčními tepelnými metodami zpracování potravin. Kromě toho mohou chemické metody zpracování potravin přinášet bezpečnostní problémy, jako je riziko spojené s antimikrobiálními látkami (Russell & Axtell 2005). Zájem spotřebitelů o kvalitní a přírodní potraviny spolu s poptávkou po ekologicky šetrných technologiích zpracování podporuje vývoj alternativních netermických metod (Lu & Yin, 2014).

Díky své netepelné povaze umožňuje elektroporace zachování přirozených vlastností potravin, jako jsou organoleptické vlastnosti a nutriční hodnota. Existuje široká škála procesů,

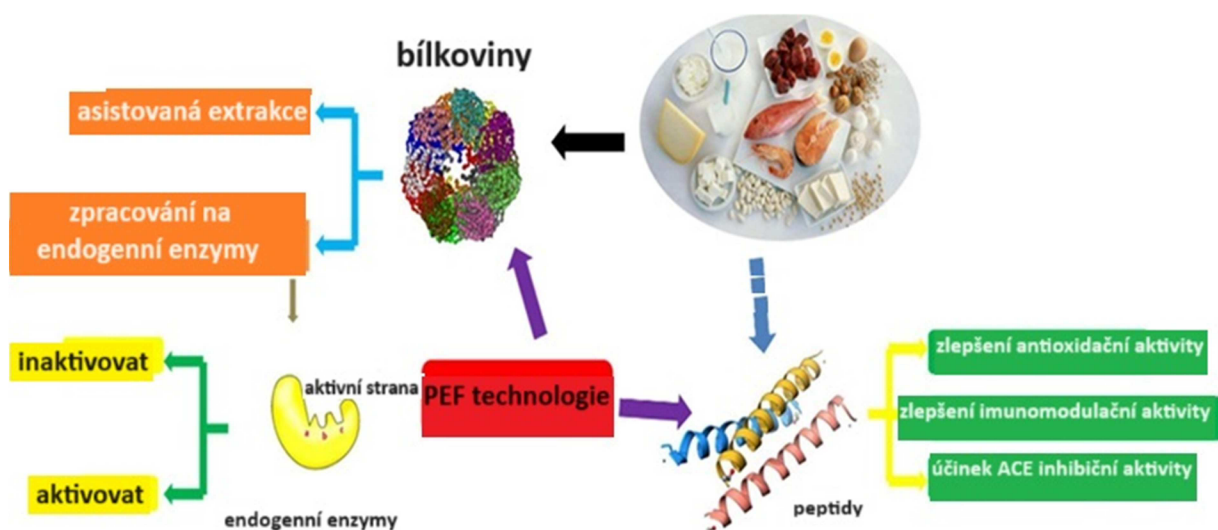
kde výhody elektroporace zahrnují zachování kvality potravin, zvýšení výtěžnosti extraktu nebo snížení energetické náročnosti procesu. Tyto výhody však nejsou ještě plně využity a stále jsou předmětem výzkumu a vývoje (López-Cristoffanini et al. 2021).

V devadesátých letech 20. století se začaly zkoumat letální účinky PEF na mikroorganismy. V té době byla vyvinuta laboratorní a pilotní zařízení pro posouzení účinnosti PEF jako netepelného postupu v potravinářství, viz obr. 3. Tento postup měl zajistit mikrobiologicky bezpečné potraviny s kvalitou, která by byla co nejbližší čerstvosti. Použití vysokonapěťového elektrického pole po krátkou dobu pomocí PEF nejenže inaktivuje patogenní a znehodnocující mikroorganismy, ale také zachovává chuť, vůni, živiny a barvu potravin (Barsotti et al. 1999).

Technika pulzního elektrického pole (PEF) je moderním netepelným postupem s potenciálem poskytnout vysoce kvalitní výrobky a efektivní energetické využití. Různé možnosti využití PEF při zpracování potravin byly intenzivně zkoumány po celém světě. S rozvojem této technologie se očekává, že PEF bude mít širší uplatnění v potravinářském průmyslu. Aplikace PEF pro zpracování potravin, což přispívá k dalšímu rozvoji této technologie (Puértolas et al., 2012).

Technologie PEF nabízí v potravinářském průmyslu několik výhod oproti tradičním pasterizačním metodám. Mezi tyto výhody patří prodloužení doby trvanlivosti potravin, zachování živin, uchování kvality a efektivní náklady PEF je stále častěji využíváno v průmyslových odvětvích, jako je zpracování rostlinných a mléčných výrobků (Barba et al., 2015).

**Obrázek 3: Proces PEF pro úpravu potravinářských výrobků v průmyslu.**



Zdroj: ScienceDirect.com

Studie provedená Cui et al. (2020) se zaměřila na vliv technologie PEF na strukturální a technicko-funkční vlastnosti potravinářských bílkovin. Jejich výsledky naznačují, že modifikace pomocí PEF může skutečně ovlivnit vlastnosti potravin, jako je textura, viskozita a emulgační schopnost bílkovin. Tato studie potvrzuje, že PEF má potenciál stát se atraktivní metodou pro inovace v potravinářském průmyslu a vývoj nových produktů s vylepšenými vlastnostmi. Současná technologie PEF spočívá v aplikaci energetických pulzů přímo na potravinový materiál mezi dvěma elektrodami po dobu mikro- až nanosekund, s intenzitou v rozmezí 10-80 kV/cm. Doba zpracování pomocí PEF se vypočítá jako efektivní doba trvání pulzu násobená počtem pulzů. Je důležité kontrolovat parametry velikosti a časového průběhu PEF pomocí generátoru napětí a geometrie elektrod (Cui et al., 2020).

Další výzkumy, například studie Cerqueira et al. (2018), rovněž naznačují, že technologie PEF může mít vliv na strukturální a technicko-funkční vlastnosti potravinářských bílkovin, což má potenciál změnit vlastnosti potravin a poskytnout prostor pro inovace v potravinářském průmyslu. Aplikace energetických pulzů přímo na potravinový materiál mezi elektrodami po dobu mikro- až nanosekund, s intenzitou v rozmezí 10-80 kV/cm, představuje současnou technologii PEF. Důkladné monitorování a kontrola parametrů procesu jsou klíčové pro dosažení požadovaných výsledků (Cerqueira et al., 2018).

Timmermans et al. (2019) naznačují, že pulzní elektrické pole (PEF) může ovlivnit strukturu mléčných proteinů, zejména při vyšších intenzitách elektrického pole a různých teplotách. Energie generovaná zařízeními pracujícími s PEF může odhalit aminokyseliny anebo volné-SH skupiny na povrchu molekul bílkovin. Může také dojít k narušení nekovalentních interakcí, jako jsou hydrofobní a vodíkové vazby. Dále bylo zjištěno, že PEF může ovlivnit hustotu náboje v okolí aminokyselin, což má dopad na katalytickou aktivitu peptidů.

Jedním z příkladů je studie uskutečněná Sui et al. (2016) se zaměřila na vliv PEF a tepelného zpracování na izoláty syrovátkových bílkovin. Zjistili, že ošetření PEF nemělo vliv na rozkládání bílkovin, povrchovou hydrofobicitu ani obsah volných skupin SH. Tato pozorování naznačují, že PEF může mít různé účinky v závislosti na specifických podmínkách experimentu.

Na druhou stranu Xiang et al. (2019) zjistili, že PEF zvyšuje povrchovou hydrofobicitu a intenzitu fluorescence u syrovátkových proteinů, když použili jiné parametry ošetření. Tato odlišná pozorování naznačují, že různé nastavení PEF může mít různé účinky na strukturu proteinů.

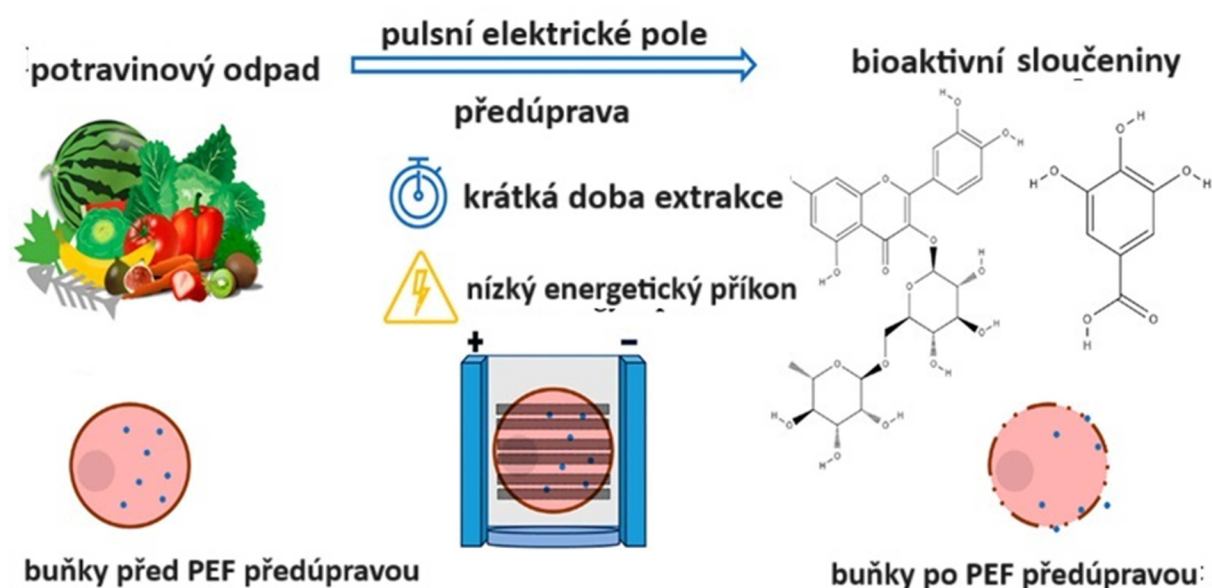
Podobně Pérez et al (2019) pozorovali, že ošetření PEF mění strukturu  $\beta$ -laktoglobulinu a způsobuje agregaci proteinu. Tato zjištění poukazují na možnost, že PEF může mít různé účinky na různé typy syrovátkových proteinů.

Tyto příklady ukazují rozmanitost výsledků studií v závislosti na specifických parametrech PEF a charakteristikách zkoumaných proteinů. Je zřejmé, že pro plné porozumění interakcí mezi PEF a syrovátkovými proteiny je zapotřebí dalšího detailního výzkumu. Rozdíly

v pozorováních mohou být způsobeny různými experimentálními podmínkami, jako je typ ošetřovací komory, intenzita elektrického pole, frekvence a teplota (Gómez et al. 2019).

Technologie PEF se využívá k inaktivaci různých mikroorganismů a enzymů nebo ke snížení jejich aktivity v mléčných výrobcích, vaječných výrobcích, šťávách a dalších tekutých potravinách s cílem zajistit bezpečnou a odpovídající kvalitu potravin, která splňuje požadavky spotřebitelů (Kempkes & Munderville 2017). Vzhledem k nízkému množství energie absorbované během konzervace PEF zůstává teplota ošetřených potravin ve srovnání s konvenčními pasterizačními technikami nízká. PEF se využívá také k předběžné úpravě pevných potravin, jako jsou jablka, vaječné skořápky, brambory a proteinové potraviny (Bhat et al. 2018), jak je naznačeno v obr. 4.

**Obrázek 4: Vliv PEF na potraviny.**



Zdroj: World precision instruments

Technologie PEF zvýšila účinnost a výtěžnost extrakčního procesu, například při extrakci cukru z červené řepy, šťávy z hroznů nebo jablek a bioaktivních látek. Podobně předúprava PEF prokázala významný vliv na výkonnostní charakteristiky procesu při výrobě hranolků v průmyslovém měřítku (Fauster et al. 2018). Aplikace PEF na hovězí svalovinu snížila smykovou sílu a zlepšila křehkost. PEF také ovlivňuje kinetiku sušení a zkrácení doby sušení je přínosné pro zachování biosložek v sušených vzorcích a zpracování na bázi PEF tedy přispívá k významnému zlepšení v tomto odvětví (Parniakov et al. 2016).

Ošetření pomocí pulzního elektrického pole (PEF) má vliv na strukturu rostlinných proteinů. Podle Pothakamury et al. (2002) byla změněna sekundární struktura sójového proteinového izolátu (SPI) po ošetření PEF s intenzitou 30-50 kV/cm. PEF způsobila denaturaci a agregaci SPI, pravděpodobně prostřednictvím vzniku hydrofobních interakcí a S-S vazeb.

Vystavení slunečnicového proteinu střední intenzitě elektrického pole (150 V po dobu 20 s při teplotě <math><45\text{ }^\circ\text{C}</math>) vedlo k sekundárním a terciárním strukturálním změnám. Ošetření PEF přerušilo hydrofobní vazby a usnadnilo zesíťování postranních řetězců aminokyselin. Podobné výsledky byly zaznamenány také u proteinů hrachu a řepky. Obecně je ošetření PEF schopno měnit strukturu rostlinných proteinů. Tyto změny mohou ovlivnit technicko-funkční vlastnosti těchto proteinů (Pothakamury et al., 2002).

Rüßmann et al. (2018) popisují vliv ošetření elektrickým polem na rozpustnost různých proteinů a konstatují, že koncentráty hrachu, rýže a lepek vykazovaly snížení jejich rozpustnosti (hrách z 23,2 % na 17,2 %, rýže z 16,4 % na 9,2 %, lepek z 25 % na 22,4 %), a to po ošetření střední intenzitou elektrického pole (1,65 kV/cm, čtvercovým pulzním systémem). Podle těchto autorů se u vaječného bílku snížil obsah rozpustných bílkovin o 7,84 % po ošetření PEF systémem se čtvercovými pulzy (při 25 kV/cm), kde se zvýšila průměrná velikost částic bílkovin o 36,9 %. U sójových proteinových izolátů bylo zjištěno, že ošetření PEF do 30 kV/cm zlepšilo rozpustnost, zatímco impulz vyšší než 30 kV/cm neprůkazně snížil rozpustnost. Dále, ošetření PEF (35 kV/cm po dobu 8  $\mu\text{s}$ ) zvýšilo rozpustnost proteinu řepky na 50,07 % ve srovnání s kontrolními vzorky (rozpustnost 43,25 %).

Studie Song et al. (2014) ukázala, že mléko, které bylo ošetřeno pulzním elektrickým polem (PEF) při teplotě 20  $^\circ\text{C}$ , vykazovalo vyšší pevnost sýřeniny než vzorky pasterovaného mléka. Dále bylo zjištěno, že vzorky mléka podstoupivší PEF měly nižší dobu srážení syřidla (RCT) než vzorky pasterovaného mléka, což obvykle naznačuje lepší želírovací vlastnosti.

Jin et al. (2019) dále uvádějí, že želírovací vlastnosti syrovátkového proteinu (WPI) se zvýšily po ošetření PEF s intenzitou 35 kV/cm, ale snížily se při intenzitě 45 kV/cm. Tento pokles želírovacích vlastností může být způsoben rozkladem mléčných bílkovin během ošetření PEF a následným vystavením -SH skupinám, což může vést k tvorbě S-S vazeb. Autoři konstatují, že polarizace molekul bílkovin během ošetření PEF může také hrát roli při zlepšení želírovacích vlastností.

PEF může pozitivně ovlivnit rozpustnost rostlinných proteinů tím, že podpoří expozici jejich hydrofobních skupin na povrchu, což by mohlo vést ke zlepšení emulgačních a pěnotvorných vlastností těchto proteinů. Změny ve struktuře bílkovin způsobené ošetřením PEF by mohly vést k vylepšení jejich technicko-funkčních vlastností, ale pro přesné určení mechanismu, jak PEF ovlivňuje funkčnost bílkovin, je nutný další základní výzkum na molekulární úrovni (Ma et al. 2020).

Ošetření PEF při nízké elektrické síle (<math><10\text{ kV/cm}</math>) obecně nemění strukturu bílkovin. Avšak podmínky ošetření PEF, jako je elektrická síla, tvar pulzu, délka trvání pulzu a typ ošetřovací komory, mají významný vliv na účinky PEF na strukturu a technicko-funkční vlastnosti bílkovin (Wang et al. 2017).

Účinky PEF na strukturu a technicko-funkční vlastnosti bílkovin jsou specifické pro jednotlivé typy proteinů (Barba et al., 2015). Důležité je zkoumat vliv různých intenzit



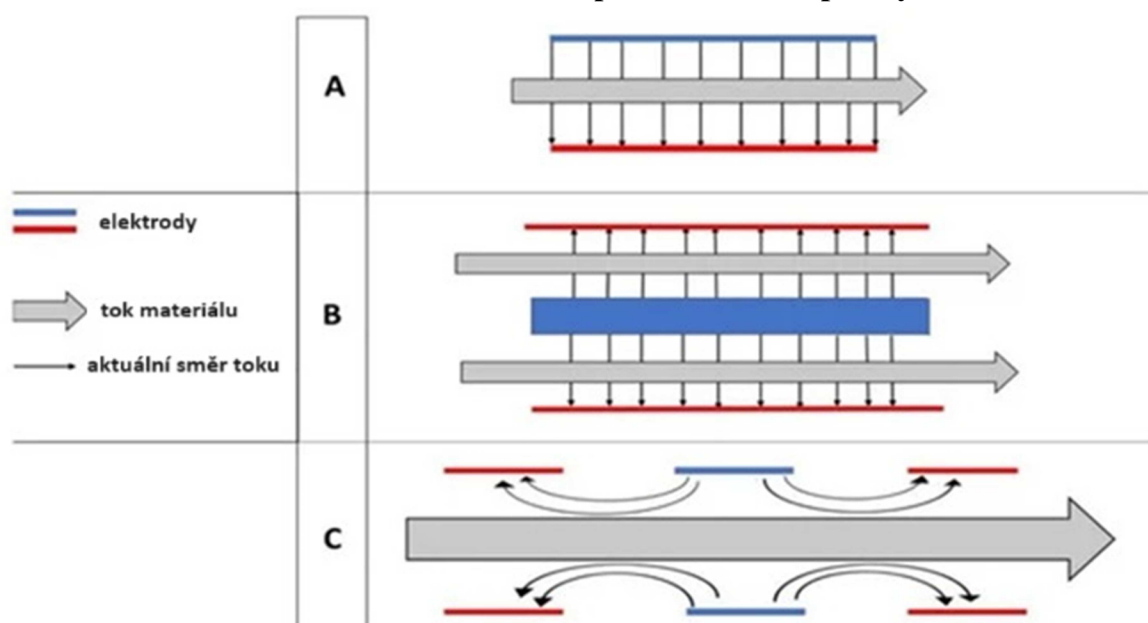
elektrického pole na strukturu a technicko-funkční vlastnosti proteinů, aby byly definovány optimální podmínky PEF pro zlepšení jejich vlastností (Huang et al. 2019, Toepfl et al. 2007).

PEF může být také perspektivní ekologickou technologií pro výrobu vysokoúčinných emulgátorů, včetně stabilních potravinářských emulzí (López-Giral et al. 2018)

Kromě toho, PEF může být účinným nástrojem pro inaktivaci mikroorganismů v rostlinných materiálech. Studie zkoumající účinky PEF na mikrobiální znečištění rostlinných produktů naznačují, že PEF může být účinnější, než tradiční metody jako je teplotní zpracování (Zhang et al. 2011). Zpracování potravin pomocí PEF je účinné tehdy, když aplikované elektrické pole vyvolá napětí na membráně buňky " $U_m$ ", které přesahuje kritický transmembránový potenciál " $V_c$ " (0,5-1 V) (Barba et al., 2015); (Mahnič-Kalamiza et al. 2014). Potřebný kritický potenciál a energie závisí na konkrétním typu vzorku potravin a zvolené technice zpracování.

Různé druhy komor jsou využívány k ošetření potravin elektrickým polem viz obr. 5. Statické komory jsou často používány pro dávkové zpracování a laboratorní účely, zatímco kontinuální komory jsou ideální pro průmyslové využití. Dávkové komory nabízejí v laboratorním měřítku několik výhod, jako je schopnost zpracovávat malé objemy vzorků, efektivní regulace teploty pomocí chlazení elektrod a možnost snížení rychlosti opakování. Naopak kontinuální komory jsou nezbytné pro zpracování velkých objemů a lze je snadno integrovat do průmyslových linek na zpracování potravin. Existují různé typy ošetrovacích komor, které se odlišují uspořádáním elektrod; například paralelní desky, koaxiální a kolineární komory. Zatímco paralelní a koaxiální desky jsou obvykle vhodné pro dávkové zpracování, kolineární komory jsou preferovány pro kontinuální zpracování potravin (Cerqueira et al 2011).

**Obrázek 5: Různé možnosti ošetření PEF v potravinářském průmyslu.**



Zdroj: Pulse master. co

### 3.1.3 Vliv na rostlinou buňku

Pulzní elektrické pole (PEF) má vliv na rostlinné buňky, který je založen na různých parametrech procesu, jako je síla elektrického pole, doba zpracování, specifická energie, tvar pulzu, šířka pulzu, frekvence a teplota, a také na vlastnostech zpracovávaného vzorku potraviny, jako je pH a vodivost, a na samotných cílových buňkách, včetně velikosti, tvaru a struktury membrány (Gavahian et al. 2018).

Transmembránový potenciál "Um" v (V), který je generován vnějším elektrickým polem pro cílovou buňku, lze vypočítat jako:  $U_m = 1,5 r E \cos \theta$ , kde "r" je poloměr cílové buňky v mikrometrech, "E" je požadovaná intenzita elektrického pole v kV.cm-1 a "θ" je orientace cílové buňky v elektrickém poli (Pengyang et al., 2015).

Vnější elektrické pole zvyšuje transmembránový potenciál a začíná vytvářet póry v membráně rostlinné buňky, které mají obvykle poloměr řádově 0,5 nm. Tyto póry mohou následně expandovat pod vlivem elektrického pole a může nastat narušení toku materiálu do buňky a z buňky (Sale & Hamilton 1967). Tento proces ztráty integrity membrány může vést k difúzi buněčného obsahu do okolí a následné smrti buňky. Nicméně, po odstranění vnějšího elektrického pole může dojít k reverzibilní elektroporaci, což zachovává životaschopnost buňky (Barbosa-Cánovas et al. 2007).

### 3.1.4 Ošetření semen pomocí elektromagnetického pulzního pole

Elektromagnetické předseťové ošetření semen, známé také jako metoda vytvrzení nebo otužení semen, je doporučeno pro semena s nižší klíčivostí, s cílem posílit semenný materiál a zlepšit odolnost vůči stresu, což podporuje lepší klíčení a růst rostlin. Tato technika je navržena tak, aby pomohla semenům dosáhnout optimálního výkonu, zejména v podmínkách, kdy by mohly čelit nepříznivým faktorům prostředí (Navrátil 2019).

Je však důležité si uvědomit, že semena s vysokou klíčivostí (v rozmezí 95-100 %) obvykle nepotřebují toto ošetření, protože by to mohlo vést k paradoxnímu snížení klíčivosti a výnosu. Proto je klíčové používat elektromagnetické ošetření pouze u semen, která mají potíže s klíčivostí, aby se zajistilo optimální a zdravé klíčení a růst rostlin (Navrátil 2019).

### 3.1.5 Účinky záření

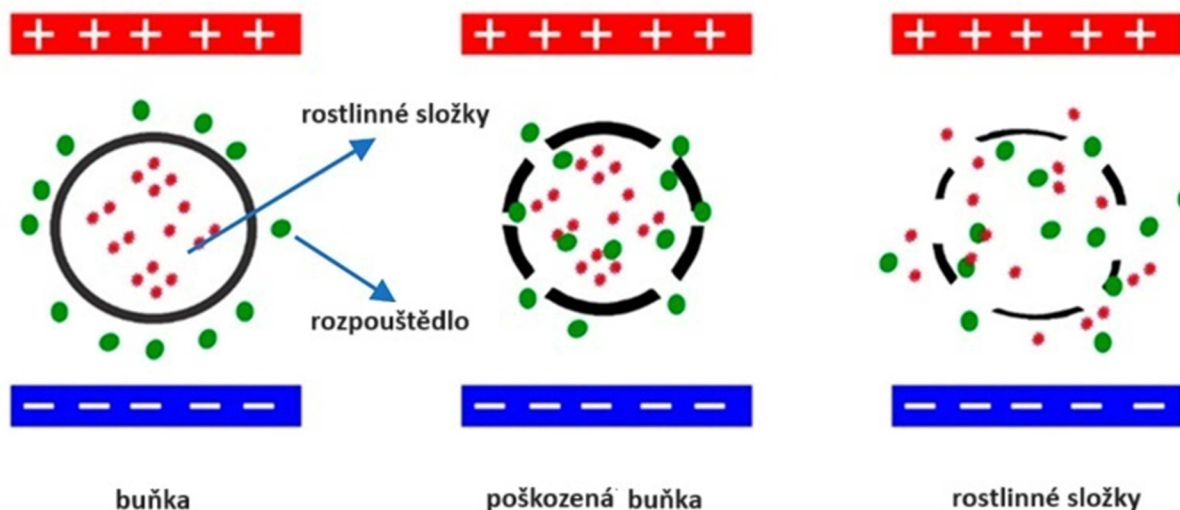
Jedním z hlavních buněčných účinků nanosekundového pulzního elektrického pole (nsPEF) je zvýšení koncentrace vápníku  $Ca^{2+}$  v cytoplazmatu, což má důsledky pro mnoho buněčných drah (Gavahian et al. 2018). Podle paleobiologické hypotézy byl prehistorický alkalický oceán charakterizován extrémně nízkými koncentracemi vápníku  $Ca^{2+}$ . Tato teorie naznačuje, že život vznikl v prostředí bez vápníku, což je podporováno skutečností, že všechny formy života na Zemi mají buňky s nízkou cytoplazmatickou koncentrací  $Ca^{2+}$ , což je nezbytné pro udržení metabolismu ATP a zabránění srážení fosfátů v jeho přítomnosti (Sale & Hamilton 1967).

Eukaryotické buňky mají schopnost dosáhnout nanomolárních koncentrací  $\text{Ca}^{2+}$  v cytoplazmatu díky jeho distribuci v organelách. Tyto vnitřní zásobníky umožňují rychlé a cílené uvolňování  $\text{Ca}^{2+}$  na specifických místech buňky, což generuje různé buněčné signály prostřednictvím reverzibilní vazby na proteiny vázající vápník (CaBP). Evoluce využila zvýšení obsahu vápníku ve vnitřních médiích a přetvořila vápník ve druhého posla, který může ovlivňovat mnoho buněčných procesů. Růst počtu CaBP během evoluce, který stoupá z téměř 70 u bakterií na více než 3600 u savců ukazuje na zlepšenou schopnost eukaryotických buněk jemně regulovat signály  $\text{Ca}^{2+}$  (Parniakov et al. 2016).

V tomto světle může nsPEF představovat technologický nástroj, který poskytuje unikátní možnost manipulace s buněčným metabolismem a signálními drahami (Huang et al. 2019).

Řízení buněčné homeostázy v důsledku nárůstu vnitřního cytoplazmatického  $\text{Ca}^{2+}$  má značný vliv na buňky: od proliferace a diferenciaci až po apoptózu, jak dokládá obr. 6. Případů buněčné proliferace vyvolané aplikací nsPEF je málo a základní mechanismus je stále předmětem diskusí (Stewart et al. 2010). Buchmann et al. (2013) na základě proteomické analýzy s využitím mikrořas vyslovili hypotézu, že tato proliferace může být důsledkem aktivace některé z drah stresové odpovědi. Zjistili, že po aplikaci nsPEF dochází k nadměrné expresi dvou proteinů, přičemž jedním z těchto proteinů je  $\text{Na}^+$  a  $\text{Ca}^{2+}$  (Stewart et al. 2010).

**Obrázek 6: Mechanismus elektroporace pro extrakci.**



Zdroj: ScienceDirect. com

Integriny souvisejí se stimulací růstu, protože signalizují proteiny vázající guanin nukleotidy. Nadměrná exprese těchto proteinů souvisí s reakcí na abiotický stres u rostlin, která zahrnuje  $\text{Ca}^{2+}$  jako nezbytného druhého posla. Na druhé straně apoptózu spouští také nsPEF, což je oblast s exponenciálním růstem vzhledem k jejímu využití v léčbě rakoviny (Nuccitelli et al. 2012).

Navzdory množství experimentálních údajů jsou přesné základní buněčné mechanismy řídící tento proces stále předmětem diskusí. Jak však bylo uvedeno výše, dostupné důkazy ukazují, že primárním účinkem aplikace nsPEF v buňkách je náhlé zvýšení cytoplazmatického  $\text{Ca}^{2+}$  (Sanders et al. 2015).

Mechanismus účinku nsPEF (nanosekundových pulzů elektrického pole) na buněčné membrány je stále předmětem kontroverze, zejména kvůli nedostatku experimentálních zařízení schopných sledovat buněčné změny v této krátké časové škále. Přestože se v oblasti nanosekundových pulzů elektrického pole za posledních 15 let udělal výrazný pokrok, zůstává nejasný mechanismus, kterým nsPEF zvyšuje cytosolickou koncentraci vápníku ( $\text{Ca}^{2+}$ ). Dřívější výzkum Gavahian et al. (2018) naznačoval, že nsPEF vyvolává podobné účinky na buněčné membrány jako elektroporace, avšak s významnými rozdíly, jako jsou velikost vytvořených pórů (označovaných jako nanopóry) a jejich umístění (Pliquett et al. 2011). I když zatím nebyla experimentálně potvrzena indukce nanopórů pomocí nsPEF, teoretické znalosti poskytují oporu pro tuto hypotézu. K přechodné indukci nanopórů by měla stačit aplikace elektrického pole o velikosti potřebné k dosažení napěťových rozdílů o jeden řád vyšších než klidový potenciál cytoplazmatické membrány. To odpovídá experimentálním sestavám nsPEF. Z biofyzikálního hlediska elektrické působící na buněčnou membránu, vytváří sílu na nabitě atomy, která může narušit integritu membrány (Vernier et al. 2006).

Tvorba pórů je způsobena elektroforetickou migrací nabitých fosfolipidů, která je iniciována vyrovnáním dipólů vody na rozhraní membrán řízeným polem. Tato zjištění byla podpořena experimentálními důkazy, které ukázaly, že k migraci záporně nabitého fosfatidylserinu z vnitřní části membrány na vnější dochází v důsledku aplikace nanosekundového pulzu nad 2 MV/m. Dostupné důkazy tedy naznačují, že zvýšení cytoplazmatického  $\text{Ca}^{2+}$  vyvolané aplikací nsPEF by mohlo být způsobeno tvorbou membránových nanopórů (Kinosita et al. 2007).

Důležitou otázkou však zůstává: nacházejí se tyto nanopóry v plazmatických a/nebo vnitřních membránách? První studie, které se pokusily tuto otázku zodpovědět, naznačily, že aplikace nsPEF skutečně ovlivňuje vnitřní membrány. Proto může ke zvýšení cytoplazmatického  $\text{Ca}^{2+}$  dojít v důsledku uvolňování tohoto iontu z vnitřních organel, jako je endoplazmatické retikulum. Tento poznatek představuje průlom v manipulaci s buňkami: nsPEF byla zařazena do katalogu jako první neinvazivní technika, která ovlivňuje organely, aniž by měnila cytoplazmatickou membránu (Kinosita et al. 2007).

Mezi různými teoriemi týkajícími se potenciálního mechanismu PEF existují dva hlavní názory. První se zaměřuje na urychlení chemických reakcí různých sloučenin v buněčné membráně, což může zvýšit rozpustnost látek. Druhým názorem je, že proces elektroporace, kdy vnější elektrická síla zvyšuje propustnost buněčných membrán se tvoří hydrofilní póry v buněčné membráně. Tyto póry pak otevírají proteinové kanály, což umožňuje průchod látek. Během aplikace vysokonapěťových elektrických pulzů působí na vzorek silou na jednotku náboje, známou jako elektrické pole, což má za následek ztrátu strukturální funkčnosti membrány a extrakci rostlinného materiálu (Tolstykh et al. 2016).

## 3.2 Transpirace

Koordinovaná regulace výměny plynů je nezbytnou součástí přežití suchozemských rostlin, jelikož  $\text{CO}_2$  musí proniknout do listu pro fotosyntézu, zatímco ztráty vody, transpirace musí být minimalizovány, aby se zabránilo vysychání, stresu ze sucha a smrti rostlin. Transpirace zároveň pohání transport vody a živin z kořenů do nadzemních pletiv a odpařování vody ze substomatálních dutin rostliny pomáhá ji ochlazovat (Lambers et al., 1998).

Mnoho morfologických znaků může ovlivnit celkovou úroveň výměny plynů v listech, jako je hustota a rozmístění průduchů, struktura a vnitřní uspořádání epidermis listů nebo tloušťka kutikuly. Nicméně, regulace velikosti průduchů je zvláště důležitá, jelikož se jedná o dynamický a reverzibilní proces, kterým lze rychle doladit ztrátu vody a přísun  $\text{CO}_2$  v reakci na různé environmentální a vnitřní signály. Mezi tyto signály patří světlo,  $\text{CO}_2$  a rostlinný stresový hormon kyselina abscisová (Schroeder et al. 2001).

Difúze vody je klíčový proces pro transport vody u rostlin. Tento proces je základní pro zásobování rostliny vodou a živinami a je závislý na několika faktorech, včetně hydraulické vodivosti pletiv a koncentrace vodní páry ve vzduchu okolo rostliny (Stedle 2000).

Dalším důležitým faktorem ovlivňujícím difúzi vody je gradient vodního potenciálu mezi různými částmi rostliny. Voda se přesouvá z oblasti s vyšším vodním potenciálem (například z kořenů) do oblasti s nižším vodním potenciálem (například do listů), což umožňuje rostlině udržet svou turgorovou tlakovou sílu a tím udržet pevnost a stabilitu (Kramer & Boyer 1995).

Transpirační proud představuje pohyb vody z kořenů rostliny směrem vzhůru k listům, kde se vypařuje skrze průduchy do okolního vzduchu. Tento proces je klíčový pro transport vody a živin v rostlině a také pro regulaci teploty listů (Koscielniak et al., 2006).

Rychlost transpiračního proudu může být ovlivněna různými faktory, jako jsou světelné podmínky, teplota, vlhkost vzduchu, vítr a dostupnost vody v půdě. Rostliny mohou regulovat svou transpiraci pomocí otevírání a uzavírání průduchů ve svých listech, což umožňuje optimalizovat vodní a živinový transport při minimalizaci ztrát vody (Kramer 1983).

Regulace transpirace je složitý proces, který umožňuje rostlině přizpůsobit se různým environmentálním podmínkám a efektivně využívat vodu. Důležitou roli v této regulaci hraje otevírání a zavírání svěřacích buněk průduchů na povrchu listů (Kollist & Zeeman 2020).

Jedním z faktorů ovlivňujících otevírání a zavírání průduchů je světlo. Během fotosyntézy je potřeba  $\text{CO}_2$ , které rostliny získávají ze vzduchu skrze průduchy. Na světle se zvyšuje koncentrace  $\text{CO}_2$  uvnitř listů, což vede k otevření průduchů a zlepšení fotosyntézy. Naopak, ve tmě se průduchy zavírají, toto pomáhá chránit rostlinu před nadměrnou ztrátou vody (Schroeder et al. 2001).

Otvírání a zavírání průduchů je regulováno komplexními mechanismy, které zahrnují různé faktory. Světlo je jedním z klíčových faktorů ovlivňujících tento proces. Během fotosyntézy dochází k vstupu světla do chloroplastů, kde se produkuje ATP a NADPH, které jsou základními složkami pro syntézu organických látek. Tento proces vyžaduje přítomnost CO<sub>2</sub>, které rostliny získávají ze vzduchu skrze průduchy. Na světle se zvyšuje koncentrace CO<sub>2</sub> uvnitř listů, což vede k otevření průduchů a zlepšení fotosyntézy (Mott & Peak 2018).

Rostliny mají schopnost regulovat otvírání a zavírání průduchů na základě různých podnětů, včetně světla. Tato regulace je důležitá pro optimalizaci fotosyntézy a současně pro minimalizaci ztráty vody přes transpiraci. Většina rostlin má tendenci otvírat průduchy ve světle a zavírat je ve tmě, aby chránily svou vodní bilanci. Nicméně existují určité adaptace, které umožňují určitým rostlinám, jako jsou CAM (Crassulacean Acid Metabolism) rostliny, otvírat průduchy v noci a zavírat je během dne (Assmann & Jegla 2016).

Rostliny také regulují transpiraci pomocí kyseliny abscisové (ABA). ABA představuje klíčový stresový fytohormon. Tento hormon se syntetizuje jak v nadzemních částech rostliny, především v listech, tak i v kořenech, a jeho prekurzory jsou karotenoidy. ABA funguje jako signalizační molekula umožňující komunikaci mezi kořeny a nadzemní částí rostliny, což je klíčové pro koordinaci odpovědí na vnější podmínky (Cutler et al. 2010).

Reakce rostlin na stres suchem je komplexní fyziologický mechanismus zahrnující hormonální regulaci, oxidační stres, otvírání a zavírání stomat a růst a vývoj kořenů. Důležitou roli v reakci na stres suchem hraje regulace syntézy ABA a ligninu. ABA hraje klíčovou roli v růstu a vývoji rostlin tím, že integruje více stresových signálů a řídí následné stresové reakce. Za stresových podmínek rostliny syntetizují ABA v různých orgánech a spouštějí obranné mechanismy, jako je regulace stupně otvírání a zavírání stomat a exprese genů souvisejících s obranou, aby odolaly stresu z vnějšího prostředí. Lignin je složitý organický polymer, který se vyskytuje především v buněčných stěnách rostlin a slouží rostlinám jako strukturální opora a odolnost vůči vodě. Proto produkce ligninu úzce souvisí s adaptací rostlin na suchozemské prostředí. (Zhang et al. 2022).

Tyto další funkce ABA jsou klíčové pro zajištění přežití rostlin za nepříznivých podmínek, jako je nedostatek vody nebo vysoké teploty. Studie se stále zabývají objasněním detailů těchto procesů a jejich interakcí s dalšími fytohormony a signálními dráhami, což by mohlo vést k lepšímu porozumění adaptivním strategiím rostlin a potenciálně k vývoji nových metod pro zlepšení odolnosti rostlin vůči stresovým podmínkám (Finkelstein 2013).

Celkově je regulace transpirace složitým a dynamickým procesem, který umožňuje rostlinám přizpůsobit se měnícím se podmínkám a optimalizovat tak svou spotřebu vody pro fotosyntézu a ochranu proti stresu ze sucha, viz obr. 7 (Chater et al. 2015).

**Obrázek 7: Schéma transpirace rostlin a stomatálního komplexu zeleného listu poděnký světlé (*Tradescantia fluminensis*)**



Zdroj: Stock ilustrace

### 3.3 Fluorescence

Fluorescence chlorofylu představuje významnou neinvazivní metodu v oblasti studia fotosyntézy a fyziologie rostlin, zejména fotosystému II (PSII). Tato technika je klíčová pro sledování aktivity fotosyntézy a reakcí rostlin na různé abiotické a biotické faktory ve změněném prostředí. Vědecká komunita se dlouhodobě zabývá fluorescenčním zobrazováním v rostlinné biologii, protože poskytuje cenné informace o procesech rostlin v reálném čase (Stober a Lichtenthaler, 1992).

Avšak tradiční metody fluorescenčního zobrazování, zejména v ultrafialovém a viditelném spektru, mohou často narazit na problémy spojené s rozptylem pletiv a interferencí fytochromů, což může ovlivnit kvalitu zobrazení (Lang et al. 1991).

Tyto interference mohou vycházet ze samotných rostlinných struktur, jako jsou buněčné stěny, a také z dalších faktorů v prostředí, které mohou ovlivnit fluorescenční signály. Například vyšší koncentrace chlorofylu v buňkách nebo přítomnost různých pigmentů může způsobit zkreslení fluorescenčních spekter. Tyto výzvy vyžadují inovativní přístupy a technologie, jako je použití fluorescence v blízkém infračerveném oboru (NIR), která umožňuje minimalizovat interferenci a zlepšit prostorové rozlišení (Song et al. 2020).

Nové inovace v oblasti fluorescenčního zobrazování v blízkém infračerveném oboru (NIR) s rozsahem 650-900 nm představují významný posun v prostorově-časovém rozlišení a snižování rozptylu pletiv dokládá obr. 8. Aplikace NIR fluorescenčního zobrazování umožňuje *in vivo* sledování rostlin a identifikaci biomolekul spojených s rostlinami, což otevírá nové perspektivy ve studiu fyziologie rostlin a jejich adaptivních mechanismů, zejména ve vztahu k reakcím na stresové podmínky (Johnson & Smith 2023).

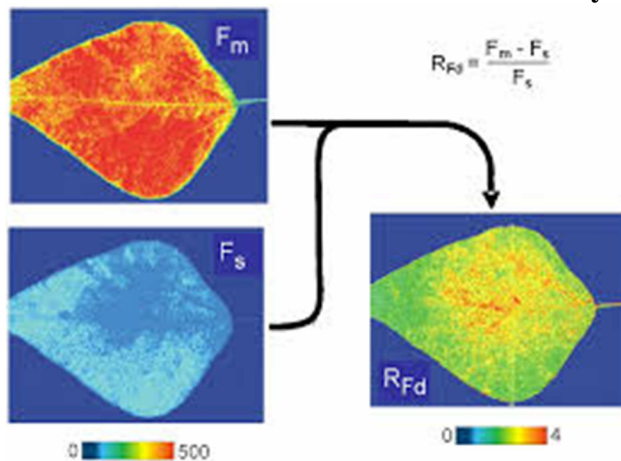
NIR fluorescenční zobrazování poskytuje řadu výhod, které se projevují nejen v jeho schopnosti identifikovat biomolekuly a sledovat fyziologické procesy, ale také v minimalizaci

poškození pletiv a zvýšení prostorového rozlišení. Studie uskutečněná Luem et al. (2017), se zaměřila na kvantitativní predikci obsahu vlhkosti, pH a rozpustných pevných látek v mangu pomocí VIS/NIR hyperspektrálního zobrazování. Tato inovativní metoda ukázala schopnost NIR fluorescenčního zobrazování kvantifikovat klíčové parametry kvality rostlinných plodů. Autoři se zaměřili na kvantitativní predikci těchto parametrů v mangu a jejich výsledky naznačují, že NIR fluorescenční zobrazování je schopné přesně predikovat obsah vlhkosti, pH a rozpustných pevných látek. Toto má značný potenciál pro zlepšení kontroly kvality a zralosti rostlinných plodů.

Další studie, např. Peng et al (2018), se zabývá nedestruktivní predikcí obsahu rozpustných pevných látek v plodech manga pomocí analýzy multispektrálního zobrazování. Autoři zkoumají efektivitu NIR fluorescenčního zobrazování při kvantifikaci kvality rostlinných plodů. Jejich zjištění ukazují, že tato technologie může být účinným nástrojem pro rychlou a přesnou kvantifikaci rozpustných pevných látek v mangu. To je zásadní pro monitorování zralosti a kvality plodů, což může vést k optimalizaci zemědělských postupů a zlepšení výnosů, které jsou klíčové pro adaptaci rostlin k různým podmínkám prostředí. Vědecké poznatky získané pomocí NIR fluorescenčního zobrazování mohou vést k lepšímu porozumění mechanismům odpovědi rostlin na stres a podpořit vývoj nových strategií pro zlepšení odolnosti a výnosnosti rostlin (Brown et al. 2022).

NIR fluorescenční zobrazování se podle García et al. (2021) stane klíčovým nástrojem v oblasti rostlinné biologie a agronomie, poskytujícím nové možnosti pro studium rostlinných procesů na molekulární úrovni a jejich aplikaci v praxi.

**Obrázek 8: Zobrazení fluorescence chlorofylu**



Zdroj: Stock ilustrace

Obrázek 8 zobrazuje fluorescenci chlorofylu F690 na listu, což je vyjádřeno pomocí barevného kódu, kde odstíny modré reprezentovaly nižší hodnoty fluorescence a červená vyšší hodnoty. Tato vizualizace umožnila snadné porovnání intenzity fluorescence chlorofylu na povrchu listu.



### 3.3.1 Typy rostlinné fluorescence

V zelených rostlinných pletivech je možné detekovat dva druhy fluorescence: modro-zelenou fluorescenci a fluorescence chlorofylu. Modro-zelená fluorescence, s maximy kolem 440-450 nm (modrá fluorescence) a obvykle také 520-530 nm (zelená fluorescence), je především způsobena deriváty kyseliny skořicové a ferulové, různými fenolickými látkami a dalšími sekundárními metabolity, které se nacházejí ve vakuolách a buněčných stěnách rostlin. Intenzita modré fluorescence není ovlivněna fotosyntetickou aktivitou a může se lišit mezi různými druhy rostlin, jako je například rozdíl mezi jednoděložnými a dvouděložnými rostlinami, kde jednoděložné rostliny vykazují obvykle vyšší modro-zelenou fluorescence (Hartley 1973; Lichtenthaler & Schweiger 1998).

Na druhé straně, fluorescence chlorofylu má dvě maxima v červené oblasti spektra: jedno kolem 670-690 nm (krátkovlnné červené záření) a druhé mezi 730-740 nm (dlouhovlnné červené záření či far-red záření). Tato fluorescence je generována chlorofylem a absorbuje záření v modré a červené části slunečního spektra, nachází se v chloroplastech mezofylových buněk (Lang et al., 1994.) Převažující emitování fluorescence chlorofylu při pokojové teplotě pochází z fotosystému II (PSII), s malou částí dlouhovlnného červeného záření emitovaného také z chlorofylu fotosystému I (PSI). Za extrémně nízkých teplot se větší část emitovaného záření generuje z PSI (Pfündel 1998).

Zastoupení modré a červené fluorescence se může výrazně lišit mezi různými druhy rostlin, jednotlivými rostlinami, a dokonce i u různých částí jedné rostliny. V listovém mezofylu je převážně emitována červená fluorescence, jelikož chlorofyly a karotenoidy v této oblasti absorbují modrou fluorescenci. Naopak v hlavních cévách listu a epidermis je intenzita modro-zelené fluorescence výraznější, protože zde není chlorofyl tak běžný jako v mezofylu (Langsdorf et al. 2000).

Etiolované listy, které mají snížený obsah chlorofylu, vykazují vysokou úroveň modro-zelené fluorescence, zatímco u zelených listů je tato fluorescence obvykle nižší. V případě panašovaných listů, kde se střídají zóny s vysokým obsahem chlorofylu a karotenoidů s bílými pruhy, je pozorovatelná kontrastní intenzita červené a modro-zelené fluorescence. Porovnání intenzit těchto dvou typů fluorescence může být využito k identifikaci a analýze různých stresových faktorů působících na rostliny (Lenk et al. 2007).

### 3.3.2 Fluorescence chlorofylu

Po absorpci světelného záření molekulou chlorofylu elektron přechází do excitovaného stavu a následně se musí vrátit do základního stavu. Při tomto procesu se uvolňuje energie, která může být využita různými způsoby. Tři hlavní konkurenční procesy jsou: využití energie pro fotosyntézu, vyzáření energie ve formě fluorescence s vlnovou délkou nad 650 nm a rozptýlení energie na teplo (Govindjee 1995).

Tyto procesy soutěží mezi sebou; pokles v jednom procesu může vést k nárůstu jiného. Přibližně 3-5 % absorbované energie je vydáno jako fluorescence. I když se zdá být množství fluorescence malé, změny v úrovni fluorescence mohou poskytnout důležité informace o efektivitě fotochemických reakcí v primární fázi fotosyntézy. Nižší intenzita fluorescence naznačuje vyšší efektivitu fotochemických reakcí, zatímco vysoká intenzita může signalizovat opak (Krause & Weis 1991).

Rostliny čelí různým biotickým a abiotickým stresům, které mohou ovlivnit jejich schopnost využívat energii fotonů pro fotosyntézu a měnit jejich optické a fluorescenční vlastnosti. Měření fluorescence chlorofylu během indukční kinetiky umožňuje monitorovat pokles aktivity fotosyntetického aparátu listu za stresových podmínek a stává se častěji využívaným nástrojem pro detekci stresu (Lichtenthaler, 1996).

Krátkodobé stresy mohou přímo narušit fotosyntetickou aktivitu během několika minut až hodin, zatímco dlouhodobé stresy působící několik dnů nebo déle mohou vést k poklesu obsahu chlorofylu v listu. Při identifikaci stresových faktorů je důležité zohlednit i mírné stresy, na které si rostlina může adaptovat, aniž by se projevil změny ve fluorescence chlorofylu (Tang et al. 2006).

Stresové faktory způsobují, že větší část absorbované energie fotosyntetickými pigmenty je využita pro vznik tepla a fluorescence než za optimálních podmínek pro fotosyntézu. I když měření fluorescence chlorofylu umožňuje odhalit intenzitu a dobu trvání nepříznivých podmínek, není vždy snadné přesně identifikovat konkrétní stresový faktor. Fluorescence chlorofylu může být také modifikována metabolickými odchylkami, které nemusí být přímo spojeny s fotosyntézou, a může být využita k identifikaci těchto změn (Barbagallo et al, 2003).

Rostliny čelí různorodým změnám v životním prostředí a velkému spektru přírodních biotických a abiotických stresů, které ovlivňují schopnost rostlin využívat fotonovou energii pro fotosyntézu a mění optické a fluorescenční vlastnosti (Papageorgiou & Govindjee, 2004).

Fluorescence chlorofylu je důležitým indikátorem fotosyntetické aktivity rostlin a může poskytnout aktuální informace o stavu rostlinného materiálu za různých stresových podmínek. Měření fluorescence chlorofylu během indukční kinetiky umožňuje sledovat změny v aktivitě fotosyntetického aparátu v reálném čase. Krátkodobé stresy, trvající několik minut až hodin, mohou přímo ovlivnit fotosyntetickou aktivitu a vést k rychlé změně fluorescence chlorofylu (Baker 2008).

Dlouhodobé stresy mohou vést ke snížení obsahu chlorofylu v listech, což se může projevit jako změna v intenzitě fluorescence. Je důležité si všimnout, že mírné stresy, na které se rostlina může adaptovat bez výrazné změny ve fluorescence chlorofylu, mohou být stejně důležité jako silné stresy (Baker 2008).

Optimální podmínky pro fotosyntézu umožňují efektivnější využití energie než za stresových podmínek, kdy může docházet k vyššímu využití energie pro teplo a fluorescence. Sledování fluorescence chlorofylu tedy umožňuje odhalit intenzitu a délku působení nepříznivých podmínek a poskytuje náhled na možné stresory. Nicméně identifikace konkrétního stresu na základě fluorescence chlorofylu může být obtížná a může vyžadovat kombinaci této metody s dalšími analytickými přístupy (Baker 2008).

Fluorescence chlorofylu může být ovlivněna metabolickými odchýlkami, které se zdají nesouvisející s fotosyntézou. Například herbicid Imazapyr byl zjištěn jako látka, která může modifikovat fluorescence chlorofylu, i když nemá přímý vliv na fotosyntetický elektronový transport (Goltsev et al. 2012).

Zároveň se ukazuje, že fluorescenční metody mohou být efektivně využity i pro analýzu pletiv s nižším obsahem chlorofylu, jako jsou například ovoce, kde dochází k degradaci chloroplastů během zrání. Měření fluorescence chlorofylu na banánech a papáji ukázalo, že plody si udržují určitou míru fotosyntetické aktivity během procesu zrání, a dokonce i po sklizni (Rahimi et al. 2016).

Využití fluorescence chlorofylu v zemědělství může být mocný nástroj pro detekci rostlin nebo plodů napadených patogeny ještě před zjevnými známkami poškození (Lichtenthaler, 1996). Výzkum prezentovaný v článku Römer et al. (2011) přináší metodu pro časně rozpoznání listové rzi pšenice a odlišení postižených listů od zdravých. Tato studie se zaměřuje na předběžnou detekci symptomatických znaků a následnou klasifikaci pomocí algoritmu podpůrných vektorů. Dále je zde popsáno využití fluorescenčního spektrometru pro sběr různých parametrů, které jsou následně analyzovány pomocí podpůrného vektorového stroje k rozpoznání zdravých a infikovaných listů.

## 3.4 Slunečnice roční

Slunečnice (*Helianthus annuus L.*) celosvětově patří mezi pět nejvýznamnějších olejnin na světě. Z pohledu produkce oleje zaujímá čtvrté místo na světě. Slunečnice roční patří botanicky do řádu *Asterales* čeledi *Asteraceae* (hvězdnicovité). Celkově rod *Helianthus* je v různých oblastech světa reprezentován asi 260 jednoletými a víceletými druhy (Baranyk et al. 2010).

### 3.4.1 Biologická charakteristika

Slunečnice jsou jednoleté byliny, které se vyznačují silným a hluboce kořenícím hlavním kořenem, doplněným mnoha tenkými postranními kořeny. Jejich lodyhy bývají obvykle přímé a jednoduché, avšak ve vrchní části mohou být řídké větvené. Kořenový systém slunečnice je dobře vyvinutý a sahá až do hloubky 2-3 metrů, přičemž v hloubce 20-30 cm pod povrchem vytváří hustou kořenovou síť, což jí umožňuje přijímat vodu a živiny z hlubších vrstev půdy

a poskytuje jí vysokou odolnost proti suchu. Lodyhy slunečnice jsou robustní, dobře olistěné s povrchově zdřevnatělou bází, a mohou dosahovat délky od 40 cm do 200 cm u olejních hybridů. Jejich listy jsou dlouze řapíkaté a zbavené palistů (Slavík B., 2004).

Charakteristickým znakem slunečnice je heliotropismus, kdy se lodyha ve směru slunce otáčí od založení poupěte až po začátek kvetení, čímž se zajišťuje lepší osvětlení. Tento pohyb ustává po začátku kvetení. Heliotropismus se projevuje i u mladých listů, což zvyšuje účinnost fotosyntézy. Květy slunečnice jsou uspořádány do úboru a existují dva typy květů: oboupohlavní trubkovité a bezpohlavní jazykovité. Plodem je jednosemenná, nepukavá nažka, která se skládá z perikarpu nazývaného slupka a samotného semene (Metodika pěstování slunečnice, SPZO 2005).

### 3.4.2 Agrotechnika

Určený počet rostlin na hektar se obvykle doporučuje v rozmezí mezi 65 až 75 tisíci. Zvláštní důraz je kladen na vytvoření optimálních podmínek pro rychlý růst a vývoj rostlin zejména v počátečních fázích růstu. Slunečnice má z makroživin nejvyšší nároky na draslík, dusík, vápník, hořčík, síru a fosfor. Mezi důležité mikroprvky náleží zejména bór (Baranyk et al. 2010).

Mezi významné plevele patří: ježatka kuří noha, bér sivý a merlík bílý. S narůstajícími teplotami se rovněž rozšiřuje durman. Mezi časté choroby patří sklerotiniová hniloba. Ke škůdcům se řadí larvy kovaříku, známé též jako drátovci (Kazda et al. 2018).

Průměrný výnos v České republice je 2,50 t/ha a pěstovaná plocha činila 22 485 ha. K roku 2022 (Statistická ročenka České republiky 2023).

Slunečnice vyžaduje značný přísun světla a je typickou plodinou pro oblasti mírného pásma. V České republice se téměř dostává až na svůj severní limit pro pěstování na olej. Odolává teplotám až -5 °C během fáze růstu děložních listů, dokonce i teplotám -2 °C během zrání, aniž by to poškodilo úrodu. Klíčení nažek může začít již při teplotě 4 °C, avšak optimální teplota pro klíčení se nachází v rozmezí 8-10 °C, zejména v povrchových 5 cm půdy (Metodika pěstování slunečnice, SPZO 2005).

Slunečnice je významnou plodinou, která je široce využívána především pro produkci slunečnicových semen. Tyto semena jsou ceněným zdrojem různých živin, které přispívají k lidské výživě. Obsahové látky ve slunečnicových semenech zahrnují olej, bílkoviny a vitamín E. Olej tvoří zhruba 40-50 % hmotnosti semen a je bohatý na nenasycené mastné kyseliny, jako je kyselina olejová a linolová. Bílkoviny jsou další důležitou složkou semen a jejich obsah se pohybuje kolem 20-25 % hmotnosti semene. Tyto bílkoviny obsahují všechny esenciální aminokyseliny potřebné pro lidskou výživu. Vitamín E, který je obsažen ve slunečnicových semenech v množství mezi 30-40 mg/100 g semen, působí jako antioxidant. (Bavorová & Soukup 2014).

## 3.5 Hrách setý

Hrách setý (*Pisum sativum* L.) je jednou z nejdůležitějších luštěnin pěstovaných pro lidskou spotřebu. Tato rostlina patří do čeledi bobovitých (*Fabaceae*). V současné době je hrách setý nejvýznamnější a nejrozšířenější luskovinou v České republice. Pěstitelé je velmi ceněn pro svou předplodinovou hodnotu v osevních sledech, kde se řadí mezi nejlepší předplodiny, zejména pro náročné obilniny. Hrách není pouze důležitým zlepšovatelem úrodnosti půdy, ale také vyniká symbiózou s hlízkovými bakteriemi. Tato symbiotická interakce mu umožňuje získávat dusík pro svůj růst a částečně i pro následné plodiny, což ho činí obzvláště cenným plodem ve zemědělské praxi (Hosnedl & Hochman 1994).

### 3.5.1 Biologická charakteristika

Hrách má středně hluboký kulový kořen pronikající do hloubky až 110 cm, bohatě se větvící v horní vrstvě půdy. Lodyha je obvykle okrouhlá nebo zřetelně hranatá, holá, a větví se podle odrůdy a podmínek, dosahující délky od 20 do 220 cm. Listy jsou typicky sudozpeřené s úponky, které slouží k přichycení k opoře, a jejich lístky jsou oválné nebo podlouhle vejčité a přisedlé (Hosnedl & Hochman 1994).

Nově vyšlechtěné odrůdy s redukovanou listovou plochou (semi-leafless typ), u kterých dochází k přeměně lístků na úponky u všech listů na rostlině. Z původních částí listů zůstávají zachovány pouze velké úponky. Jejich asimilační výkon je shodný s odrůdami standardními. Ve výnosovém potenciálu dosahují semi-leafless odrůdy minimálně stejné produkce sušiny při fotosyntéze, jako odrůdy listového typu. Změna listů se projevila ve zlepšení odolnosti vůči poléhání, nedochází ke vzájemnému zastiňování a dochází ke změně mikroklimatu v porostu (Houba et al. 2009).

Květenství je obvykle hrozen s květy uspořádanými po jedné straně stonku. Lusky mohou být rovné nebo různě prohnuté a obsahují 4 až 10 semen různých tvarů a velikostí, s barvou od zelené až po hnědou s různorodou kresbou. Hmotnost semen závisí na genetických faktorech a částečně i na prostředí, s průměrnou hmotností tisíce semen mezi 150 až 350 g. Vegetační doba jarního typu hrachu se pohybuje v rozmezí 70 až 140 dní. Semena klíčí hypogeicky. Díky symbióze s nitrogenními bakteriemi rodu *Rhizobium* dochází k fixaci vzdušného dusíku (Hosnedl & Hochman 1994).

Pěstuje se pro různé účely využití, jako zelenina, na semeno jako luštěnina, jako pícnina a je možné využití jako meziplodinu, která poutá vzdušný dusík. (Slavík B., 1995).

### 3.5.2 Agrotechnika

Hrách vyžaduje pečlivější dodržování agrotechnických postupů než obilniny. Pro jeho úspěšný růst je klíčové očkování, které zahrnuje aplikaci živých kultur rhizobií na osivo těsně před výsevem. Očkování má zvláštní význam tam, kde se dříve nepěstovaly luskoviny. Při hnojení je důležité dodržet vyváženou předseťovou dávku dusíku, obvykle do 30 kg na hektar, a dále aplikovat fosfor a draslík podle potřeb a zásobenosti půdy. Z hlediska stopových prvků jsou důležité hořčík a vápník.

Mezi hlavní škůdce hrachu patří listopas a kyjatka hrachová, zatímco hlavní chorobou je antraknóza hrachu (Hosnedl & Hochman 1994).

Hrách je považován za plodinu s vysokou plastičností, avšak nejvhodnější pěstitelské podmínky jsou v mírných polohách s průměrnými a rovnoměrně rozloženými srážkami. Tyto podmínky odpovídají řepařskému a bramborářskému výrobnímu typu. Minimální teplota potřebná pro klíčení hrachu jsou 3 °C. Vzešlé rostliny jsou odolné vůči mrazu až do teploty -6 °C. Nejlepších výsledků hrách dosahuje na středně těžkých hlinitých půdách s neutrální až mírně kyselým PH (Hosnedl & Hochman 1994).

Průměrný výnos je 2,70 t/ha. Pěstovaná plocha činila 40 627 hektarů k roku 2022 (Statistická ročenka České republiky 2023).

V zemědělství je hrách setý významnou plodinou, která je široce využívána jako zdroj bílkovin a dalších živin. Semena hrachu jsou bohatým zdrojem bílkovin, vlákniny, vitamínů a minerálů. (Soukup & Vach 2013).

## 3.6 Lnička setá

Lnička setá (*Camelina sativa* (L.) Crantz.) je roční rostlina patřící do čeledi brukvovitých (*Brassicaceae*). Vyniká svou odolností vůči chorobám a škůdcům, také snadnou agrotechnikou. Její pěstování je relativně nenáročné. Lnička setá nachází uplatnění především v nepotravinářském průmyslu a jako medonosná meziplodina (Baranyk et al. 2010).

### 3.6.1 Biologická charakteristika

Jednoleté, zřídka ozimé byliny, obvykle dosahují výšky mezi 30 až 70 cm a má jednoduchou nebo větvenou lodyhu, která má zaoblený nebo hranatý tvar. Rozvětvení závisí na hustotě porostu: při velmi řídkém rostou větve již u země, zatímco při hustém rostou až do 2/3 výšky lodyhy. Korunní lístky mají světle citrónovou barvu a jsou často opylovány včelami. Semena jsou umístěna v šešulkách a jejich hmotnost se pohybuje mezi 1 až 1,4 gramy (Hejný S. & Slavík B., 1992).

### 3.6.2 Agrotechnika

Pro dosažení vysokých výnosů je klíčové vysít lničku co nejdříve. Doporučená norma výsevu je 8-12 kg na hektar, přičemž hustota rostlin by neměla přesáhnout 400 rostlin na m<sup>2</sup>. Semena se obvykle sejí do hloubky 1-2 cm. Na dobře zásobených půdách lnička může růst bez dalšího hnojení. V případě nedostatku dusíku se doporučuje aplikovat 20-60 kg dusíku na hektar. Nejběžnější chorobou je plíseň šedá. Často vyžaduje použití herbicidů během vegetačního období. Průměrný výnos se pohybuje mezi 0,8 až 1,2 tunami z hektaru (Baranyk et al. 2010).

Plocha pěstování se pro lničku samostatně neeviduje (Statistická ročenka České republiky 2023).

Lnička je vhodná pro pěstování především v suchých podmínkách, avšak lze ji úspěšně pěstovat v různých výrobních oblastech. I když je náchylná k prísuškům během klíčení, dobře snáší sucho v pozdějších fázích růstu. Při výběru stanoviště je ideální volit nezamokřené půdy s lehkou hlinitou nebo hlinitopísčitou půdou. Lnička je tolerantní vůči chudým půdám, avšak na živiny bohatých půdách může trpět poléháním. Nepříznivé pro ni jsou příliš mokré půdy s těžkou kyselou texturou, jelikož je citlivá na přemokření. Co se týče předplodin, lnička je nenáročná, a daří se jí, po většině plodin s výjimkou jiných brukvovitých rostlin (Baranyk et al. 2010).

Obsah oleje v semenech se pohybuje okolo 30–40 %. Složením se podobá oleji lněnému. Obsahuje esenciální mastné kyseliny  $\alpha$ -linolenovou (35 %) a linolovou (38 %). V potravinářství ho lze kromě fritování použít k jakémoliv úpravě potravin. Snižuje hladinu cholesterolu. Kromě využití v potravinářství je využíván také k výrobě mýdel nebo jako součást barev, laků a bionafty (Baranyk et al. 2010).

## 4. Metodika

V rámci experimentu byly zkoumány tři druhy rostlin: lnička setá (*Camelina sativa*), hrách setý (*Pisum sativum*) a slunečnice roční (*Helianthus annuus*), s použitím certifikovaného osiva. Byla sledována jejich fyziologická reakce na ošetření elektromagnetickým polem pomocí generátoru FW03010433-V8 – typ 1.

### 4.1 Založení pokusu

Pokus byl založen v částečně řízených podmínkách skleníku katedry botaniky a fyziologie rostlin FAPPZ ČZU v Praze. Rostliny byly pěstovány za přirozeného světelného režimu. Teplotní režim byl 20°C. Vzhledem ke schématu pokusu byly pěstované rostliny v rámci variant rozděleny do dvou skleníkových kójí, aby nedošlo k ovlivnění neošetřovaných rostlin. Rostliny byly pěstovány v nádobách o velikost 11x11cm, v zahradnickém substrátu Hawita. Substrát je jemný se strukturou 0-5 mm. Obsahuje 70 % bílé rašeliny a 30 % černé. Substrát je neslévavý, nezasolený a hodnota půdní reakce pH ve vodném roztoku je v rozmezí 5,5 – 6,5. Substrát neobsahuje zárodky patogenních organismů, škůdců, či semena plevelů. Obsah spalitelných látek ve vysušeném vzorku je 55 % a podíl částic přesahujících 25 mm nepřesahuje 5 % (Sinco). Rostliny byly zavlažovány pravidelně 100 ml závlivkové vody a v průběhu pokusu nebyly přihnojovány a chemicky ošetřeny. Schéma pokusu zahrnovalo dvě varianty ošetřenou a neošetřenou (kontrola). V ošetřené variantě byl využit generátor elektromagnetického pulzního pole (FW03010433-V8 – typ 1).

Průběh experimentu zahrnoval měření v intervalu 14 dní, celkem proběhlo 5 měření od fáze čtyř pravých listů až po fázi butonizace.

### 4.2 Charakteristika rostlinného materiálu

#### 4.2.1 Lnička setá odrůda Zuzana

Odrůda Zuzana má různorodé využití, včetně výroby oleje nebo jako meziplodina a zdroj potravy pro opylovače. Pro pěstování odrůdy Zuzana je potřeba jemně upravená půda, setí se uskutečňuje brzy na jaře, ideálně koncem března až začátkem dubna, na pozemku bez plevelů. Vedení porostu a sklizeň probíhají obdobně jako u příbuzné řepky. Doporučená výsevní norma se pohybuje mezi 8 až 12 kg na hektar (maximálně 400 rostlin na metr<sup>2</sup>) a hloubka setí by měla být 10 až 15 mm. Odrůda Zuzana dobře snáší nízké teploty v počátečních fázích růstu a sklizeň semen obvykle probíhá koncem července, s výnosem 1 až 1,5 tuny na hektar. Je znatelně odolná vůči dřepčikům, ale byla pozorována citlivost na plíseň šedou (VÚP Troubsko 2013).



## **4.2.2 Hrách setý odrůda Eso**

Eso je nejprodávanější odrůda hrachu společnosti Selgen. Tato odrůda je pěstována v řadě zemí světa, včetně Dánska, Švédska, USA, Kanady, Rakouska a Ruska. Jedná se o žlutosemennou, polopozdní odrůdu typu semi-leafless.

Rostliny Eso jsou střední až vyšší s dobrou odolností k poléhání, což přispívá k jejich stabilnímu růstu. Tato odrůda se vyznačuje výborným zdravotním stavem, který je nad průměrem zkoušených odrůd. To znamená, že Eso má silnou imunitu vůči škůdcům a chorobám, což snižuje potřebu pesticidů a zvyšuje výnosy.

Z hlediska produkce semen je odrůda Eso vynikající. Semena jsou barevně vyrovnaná a mají konzistentní velikost, což usnadňuje sklizeň a zpracování. Celkově je Eso ceněno pro svou spolehlivou a vysokou úrodu, což ho činí oblíbenou volbou pro farmáře po celém světě (Selgen 2012).

## **4.2.3 Slunečnice roční odrůda P62LE122**

Extra raný hybrid slunečnice představuje jedinečnou kombinaci ranosti a vysoké výnosnosti. Jeho vynikající olejnatost ho řadí mezi nejlepší hybridy, přičemž v pokusech provedených v roce 2020 dosáhl nejvyššího obsahu oleje ze všech testovaných hybridů, a to až 49,8 %. Rostliny tohoto hybridu jsou charakterizovány jako nižší až středně vysoké. Jeho převislé úbory ve fyziologické zralosti poskytují lepší ochranu proti přímému slunci, což snižuje teplotní stres pro rostliny a zajišťuje efektivnější transport asimilátů do nažek. Tato vlastnost též zlepšuje ochranu úrody před poškozením ptactvem. Hybrid je také charakterizován vysokou tolerancí vůči herbicidu Express® 50 SX, což umožňuje jeho kombinaci s graminicidem pro spolehlivou kontrolu dvouděložných i jednoděložných plevelů v jediném postřiku (Corteva 2019).

**Obrázek 9: Založení pokusu ve skleníku.**



Zdroj: Fotoalbum autora

**Obrázek 10: Průběh vegetace ve skleníku.**



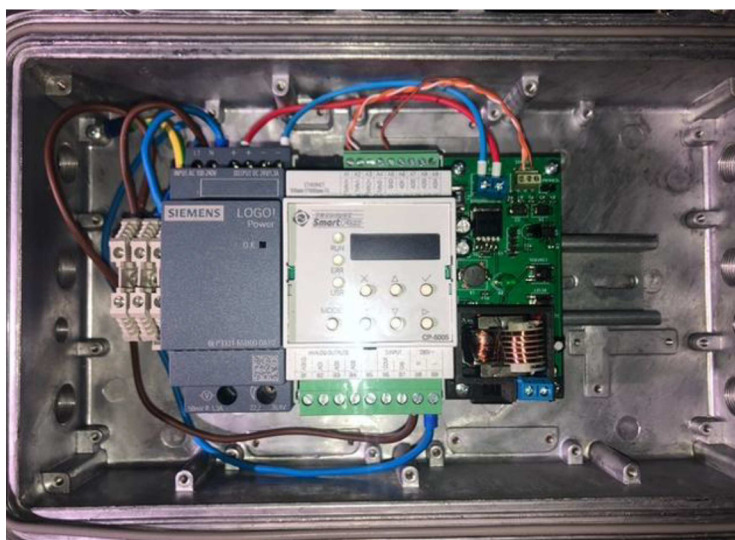
Zdroj: Fotoalbum autora

## 4.3 Elektro indukce

### 4.3.1 generátor (FW03010433-V8 – typ 1)

Obchodní název je ProEMGen 1

**Obrázek 11: generátor (FW03010433-V8 – typ 1)**



Zdroj: Fotoalbum autora

Jádro generátoru obsahuje integrovaný monolitický obvod s mikropočítačem Microchip 12F675, který má nahrán uživatelský program o velikosti 12 KB. Program pracuje cyklicky na frekvenci 1 MHz a provádí vyhodnocování vstupních dat zhruba 100krát za sekundu. Čip 12F675 generuje pilotní signál, který je dále upravován a posilován tvarovacími obvody a následně spouští primární část vysokonapěťového transformátoru. Na druhé straně tohoto transformátoru vzniká vysokonapěťový impuls s maximální amplitudou 6 kV, následovaný postupně slábnoucími impulsy. Frekvence těchto impulsů je ovlivněna vlastnostmi transformátoru, anténního systému a okolního prostředí. U 2 metrů dlouhé antény ve volném prostoru dosahuje frekvence tlumených impulsů přibližně 60 kHz s dozníváním trvajícím přibližně 1 ms. Velikost anténního systému ovlivňuje klesající amplitudu prvního impulsu a frekvenci následujících impulsů. První pulzní frekvence je volitelná a stabilní. Deska PLS obsahuje otočný prvek pro nastavení frekvence impulsů v rozmezí 4, 8, 16 a 32 Hz. Na výstupu antény generátoru se objevují impulzy s amplitudou až 400 V, které indukují elektromagnetické impulzy s magnetickou indukcí maximálně 400 nT ve vzdálenosti přibližně 1 metr od antény. Na těle generátoru je umístěn hlavní vypínač s multifunkční LED indikací.

Napájecí napětí: 12 V

Spotřeba proudu: ne více než 20 mA

Napájení: ze sítě 110-220V přes 12V adaptér nebo z přenosné 12V baterie

Opakovací frekvence pulsu: 4, 8, 16, 32 Hz

Plnicí frekvence tlumených pulsů: 80-120 kHz (v závislosti na délce anténního drátu 1–10 m)

Magnetická indukce signálu: ve vzdálenosti 1 m od antény ne více než 400 nT

Doba nepřetržitého provozu ze sítě je neomezená.

#### 4.4 Měření fyziologických charakteristik

Fluorescence chlorofylu byla analyzována pomocí fluorometru OS5p+ vyrobeným společností ADC Bioscientific Ltd. Měření probíhalo za použití nedestruktivní metody po zatemnění místa měření plastovými klipsy po dobu 20 minut. Tento přenosný fluorometr využívá pulsní amplitudovou modulaci k měření různých forem záření. Po zatemnění listů byly reakční centra fotosystému II (PSII) reoxidována a následně byla změřena minimální fluorescence  $F_0$ , která je konstantní a nezávislá na fotosyntetické aktivitě (Opti-Sciences 2023). Saturacním světlem byla stimulována redukce elektronových akceptorů PSII, což vedlo k nárůstu fluorescence chlorofylu a měření maximální fluorescence  $F_m$ . Rozdíl mezi  $F_m$  a  $F_0$ , známý jako maximální variabilní fluorescence v adaptačním stavu temnoty ( $F_v$ ), byl využit k výpočtu poměrů  $F_v/F_m$  a  $F_v/F_0$ , umožňujících posouzení kvantového výtěžku fluorescence a potenciální účinnosti fotosyntézy. Každá varianta experimentu byla opakována pětkrát pro získání spolehlivých výsledků (Roháček & Barták 1999).

#### Obrázek 12: Pokus v závěrečné fázi.



Zdroj: Fotoalbum autora

#### 4.4.1 Měření výměny plynů

Rychlost výměny plynů byla monitorována pomocí infračerveného analyzátoru plynů LCpro+ (ADC Bioscientific Ltd.), což je přenosný gazometrický přístroj určený k nedestruktivnímu měření čisté fotosyntézy, transpirace a stomatální vodivosti rostlin. Tento přístroj umožňuje také měření teploty vzduchu, listu, atmosférického tlaku a intenzity osvětlení. Skládá se z měřicí hlavičky a hlavní programovatelné konzoly s LCD displejem (ADC BioScientific 2013).

Výpočet rychlosti transpirace a fotosyntézy probíhá na základě měření průtoku a změny koncentrace plynů mezi výstupem a vstupem z komory. Měření rychlosti výměny plynů se uskutečnilo v dopoledních hodinách při intenzitě osvětlení  $650 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  a teplotě  $25^\circ\text{C}$ , v souladu s prací Holá et al. (2010).

#### 4.4.2 Fotosyntetické pigmenty

Obsah fotosyntetických pigmentů byl stanoven podle metodiky Porry et al. (1989). Pro stanovení pigmentů byly vyseknuty terčičky o ploše  $1 \text{ cm}^2$  z listů, které byly následně umístěny do 1 ml dimethylformamidu (DMF). Extrakce pigmentů probíhala po dobu 24 hodin v chladu a temnu za pravidelného promíchávání. Druhý den byl roztok pigmentů spektrofotometricky analyzován pomocí přístroje UV-Vis Evolution 2000 (ThermoScientific). Jako slepý vzorek byl použit čistý dimethylformamid. Měření absorbancí probíhalo při vlnových délkách 480; 648,8; 663,8 a 710 nm.

Rovnice pro výpočet chlorofylu a:  $\text{Chl a} = 12,0 * A_{663,8} - 3,11 * A_{646,8}$

Rovnice pro výpočet chlorofylu b:  $\text{Chl b} = 20,78 * A_{646,8} - 4,88 * A_{663,8}$

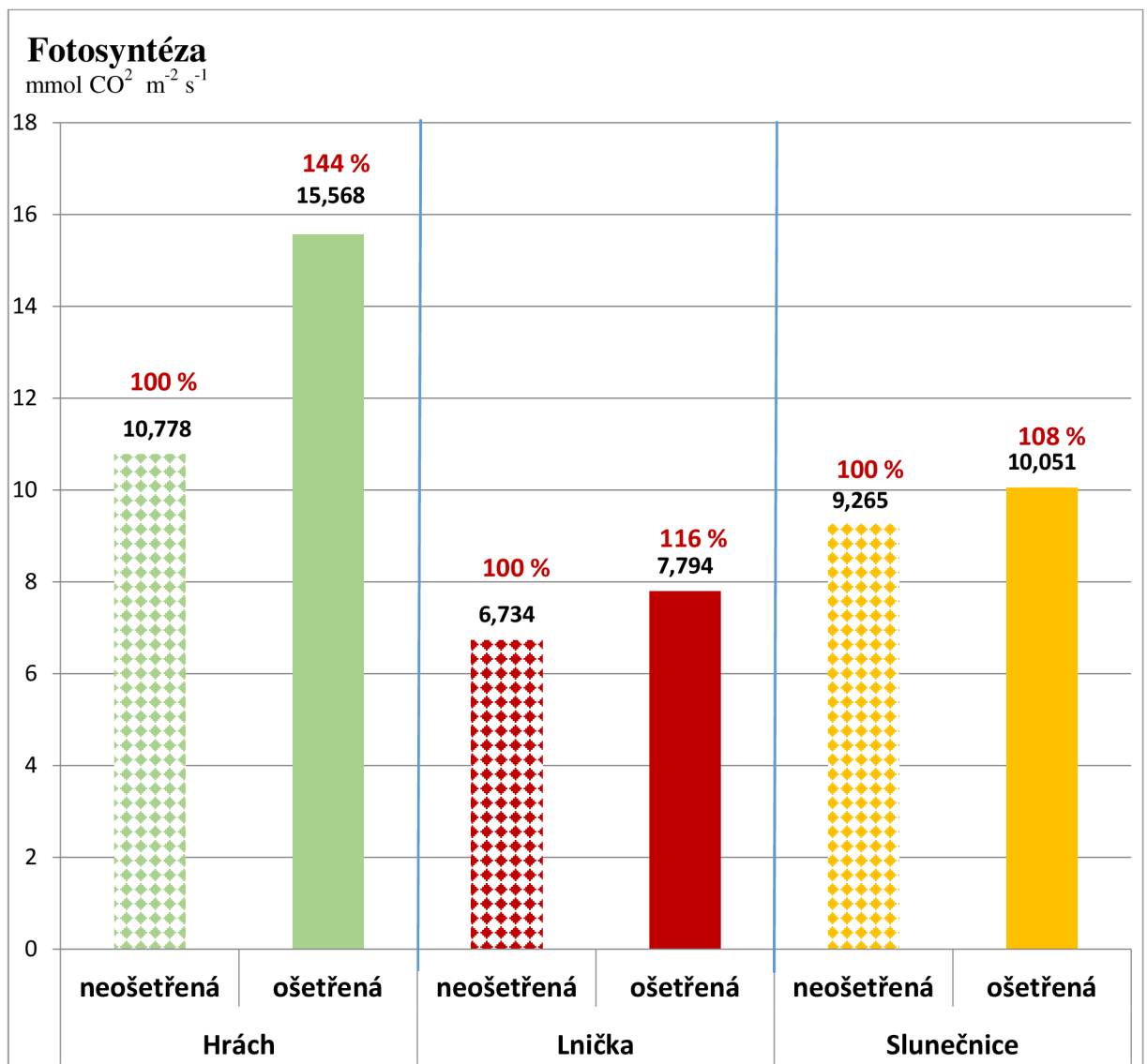
Rovnice pro výpočet celkového chlorofylu:  $\text{Chl a+b} = 7,12 * A_{663,8} + 17,67 * A_{646,8}$

Rovnice pro výpočet karotenoidů:  $\text{Carx+c} = (1000 * A_{480} - 1,12 * \text{Chl a} - 34,07 * \text{Chl b}) / 245$

## 5. Výsledky

### 5.1 Fotosyntéza

Z výsledků měření rychlosti fotosyntézy je patrné, že elektromagnetické ošetření mělo pozitivní vliv na fotosyntézu všech zkoumaných rostlin. Nejvyšší nárůst rychlosti fotosyntézy v porovnání s kontrolními rostlinami byl stanoven u hrachu, kde ošetřená varianta vykazuje o 44 % vyšší průměrnou fotosyntézu ( $15,568 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) než neošetřená varianta ( $10,778 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). V případě slunečnice bylo zaznamenáno nejnižší zvýšení fotosyntézy u pokusné varianty ve srovnání s kontrolou, kdy se fotosyntéza zvýšila z ( $9,265 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) na ( $10,051 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) jak dokládá graf 1. Tyto výsledky naznačují, že elektromagnetické pole může být potenciálně efektivní metodou pro stimulaci fotosyntetické aktivity rostlin, což by mohlo vést k lepšímu růstu a výnosu plodin.

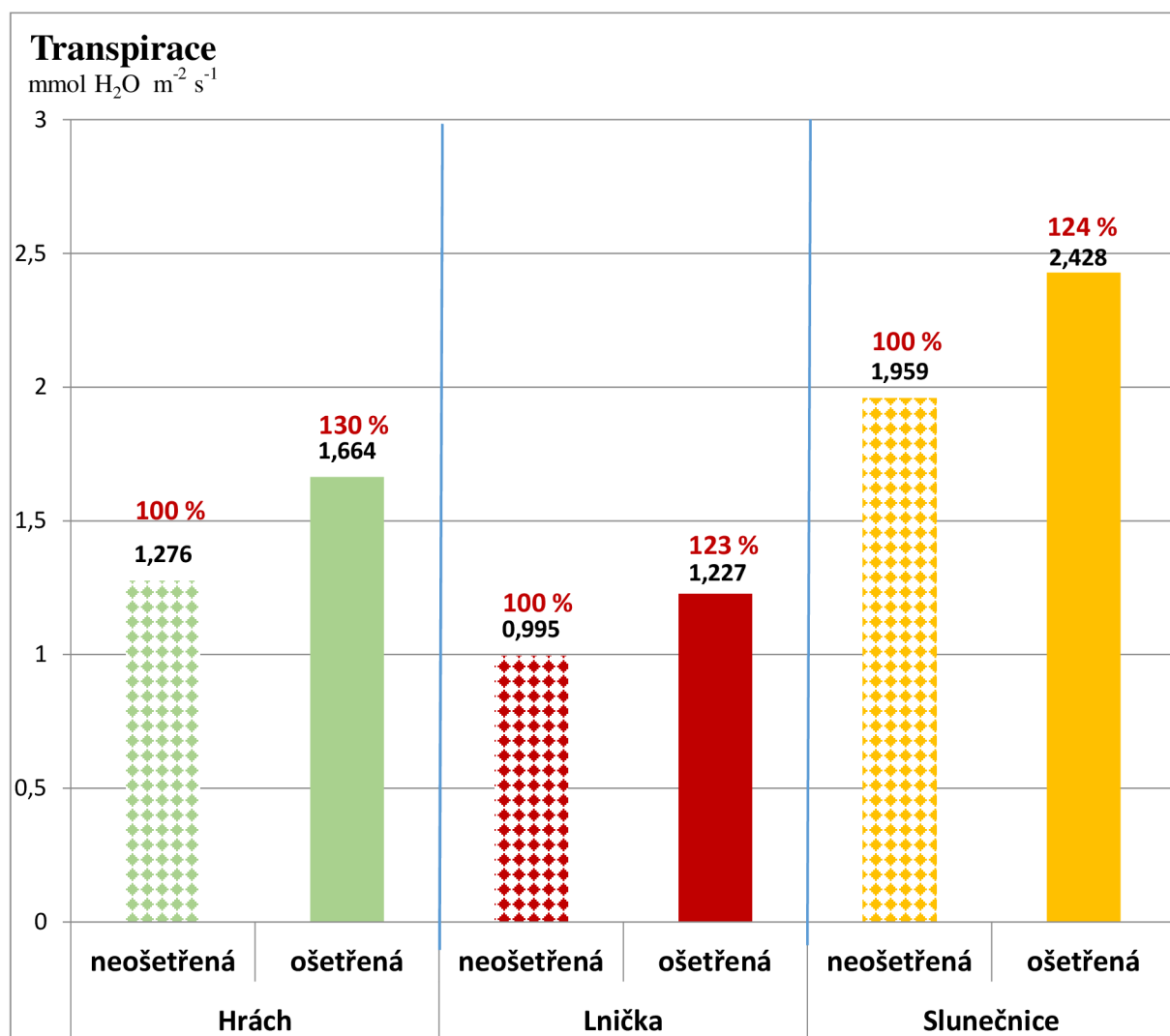


Graf 1: Průměrná rychlost fotosyntézy ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) sledovaných rostlin v závislosti na variantě pokusu

## 5.2 Transpirace

V grafu 2 jsou uvedeny hodnoty transpirace vybraných druhů rostlin elektromagneticky ošetřených. Z těchto výsledků je patrné, že elektromagnetické ošetření mělo pozitivní vliv na transpiraci všech zkoumaných rostlin. Nejvyšší nárůst transpirace byl pozorován u hrachu, kde v případě ošetřené varianty byla transpirace 30 % vyšší než u neošetřené kontroly (1,276 mmol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>). Nejnižší nárůst transpirace byl po ošetření stanoven u rostlin lničky. V případě této rostliny se transpirace po ošetření zvýšila o 23 % na hodnotu (1,227 mmol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>).

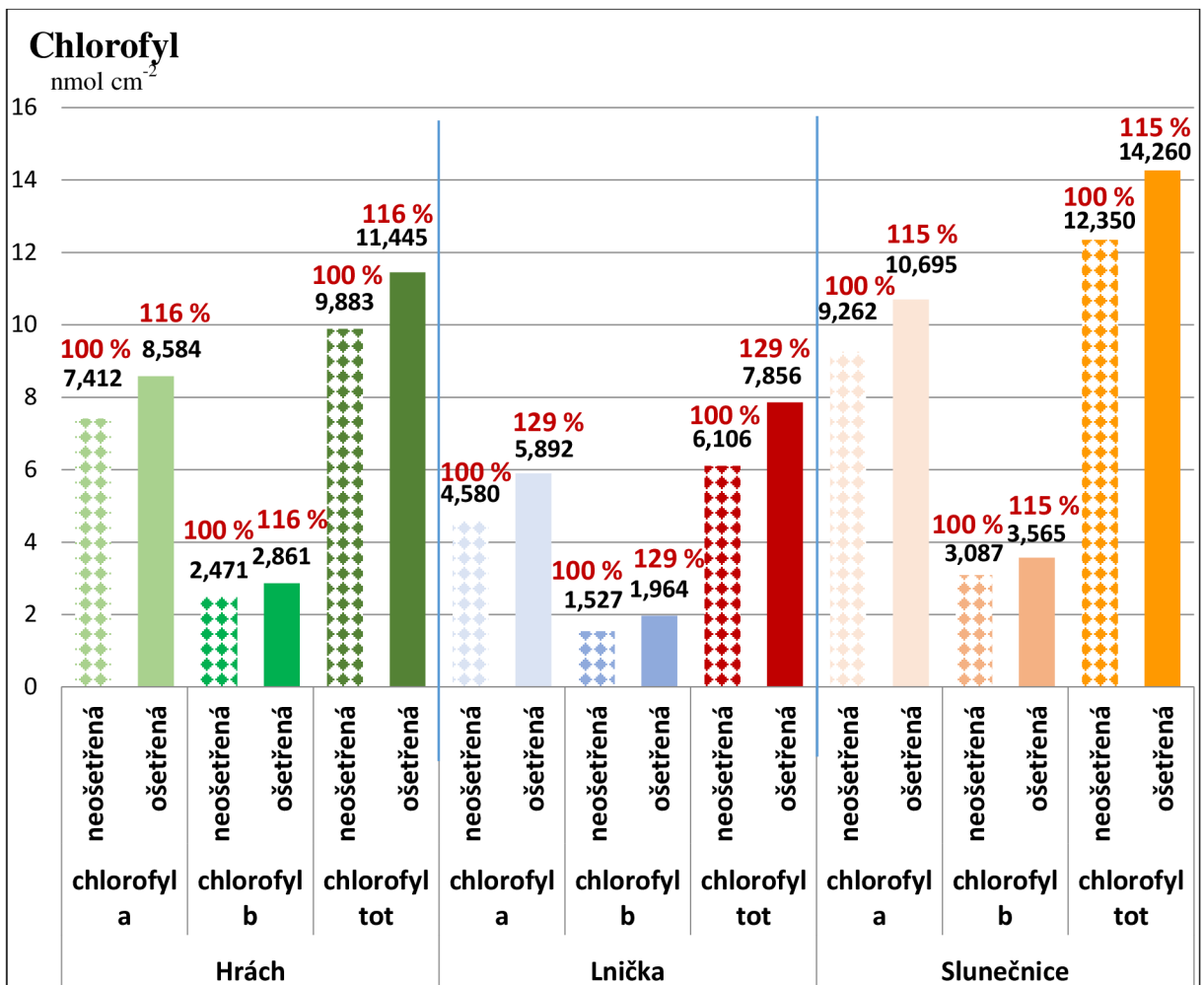
Zvýšená transpirace po ošetření elektromagnetickým polem může být důsledkem lepších fotosyntetických procesů a zvýšené aktivity rostlin. To může vést k efektivnějšímu využívání vody a živin rostlinami, což může potenciálně zvýšit jejich růst a výnos viz graf 2. Pokus se uskutečnil v řízených podmínkách, kde byla použita závlhka. V polních podmínkách záleží na průběhu počasí, zejména na srážkách a teplotách, které budou transpiraci ovlivňovat.



**Graf 2: Průměrná rychlost transpirace (mmol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) sledovaných rostlin v závislosti na variantě pokusu**

### 5.3 Chlorofyly

Výsledky průměrných hodnot chlorofylu a, b a celkového chlorofylu (v  $\text{nmol cm}^{-2}$ ) pro sledované rostliny ukazují pozitivní vliv elektromagnetického ošetření na jejich obsah, viz graf 3. Z uvedeného grafu vyplývá, že v případě obsahu chlorofylu *a* bylo zaznamenáno u všech sledovaných rostlin zvýšení jeho obsahu v porovnání s kontrolou. U rostlin kontrolních byl obsah chlorofylu *a* v rozpětí hodnot od ( $4,580 \text{ mmol cm}^{-2}$  u lničky) do ( $9,262 \text{ mmol cm}^{-2}$  u slunečnice). Kdežto u rostlin ošetřených ( $5,892 \text{ mmol cm}^{-2}$ , u lničky) až ( $10,695 \text{ mmol cm}^{-2}$ , u slunečnice). U chlorofylu *b* se také jeho obsah zvyšoval vlivem elektromagnetického ošetření. Nejnižší zvýšení obsahu chlorofylu *b* bylo zjištěno u rostlin slunečnice, kdy se průměrný obsah chlorofylu *b* zvýšil po ošetření o 15 % na hodnotu ( $3,565 \text{ mmol cm}^{-2}$ ). Naopak nejvyšší zvýšení obsahu chlorofylu *b* vykazovaly rostliny lničky, kdy u kontrolních rostlin byl průměrný obsah tohoto barviva ( $1,527 \text{ mmol cm}^{-2}$ ) a u rostlin lničky, které byly ošetřeny dosáhla hodnota ( $1,964 \text{ mmol cm}^{-2}$ ). Z výše uvedeného vyplývá, že se celkový obsah chlorofylů v listech ošetřených rostlin zvýšil ve srovnání s neošetřenou kontrolou. Byl zjištěn vliv rostlinného druhu na ošetření, kdy nejvyšší obsah chlorofylu byl u kukuřice a nejnižší u lničky.



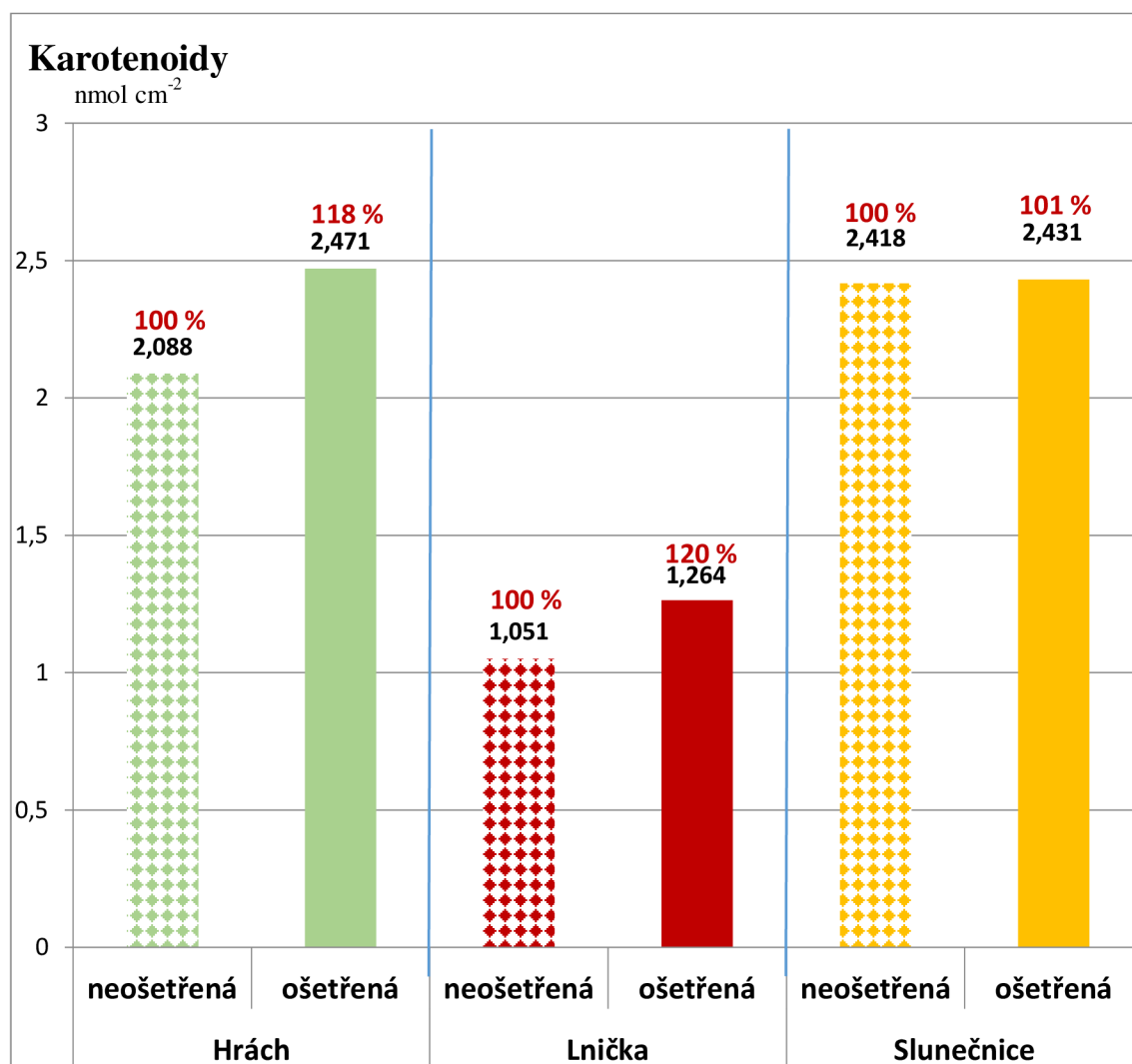
Graf 3: Průměrný obsah chlorofylů ( $\text{mmol cm}^{-2}$ ) sledovaných rostlin v závislosti na variantě pokusu



## 5.4 Karotenoidy

Z analýzy průměrných hodnot karotenoidů (v  $\text{nmol cm}^{-2}$ ) u rostlin hrachu, lničky a slunečnice vyplývá, že elektromagnetické ošetření mělo výrazný vliv na obsah karotenoidů v rostlinách. Hodnoty karotenoidů po ošetření elektromagnetickým polem jsou ve většině případů vyšší než u neošetřených variant. U hrachu je průměrný obsah karotenoidů po ošetření vyšší o 18 % (2,471  $\text{nmol cm}^{-2}$ ) ve srovnání s neošetřenými rostlinami. Lnička má ještě vyšší nárůst o 20 % (1,264  $\text{nmol cm}^{-2}$ ) v ošetřené variantě. U slunečnice je nárůst nevýznamný, jak dokládá graf 4.

Tato zlepšení naznačují, že elektromagnetické ošetření má pozitivní vliv na obsah karotenoidů v rostlinách. Karotenoidy jsou důležité pigmenty v rostlinách, které mají klíčovou úlohu ve fotosyntéze a jsou také antioxidanty pro ochranu rostlin před oxidativním stresem. Vyšší obsah karotenoidů může mít pozitivní vliv na zdraví rostlin a také na kvalitu potravin získaných z těchto rostlin.

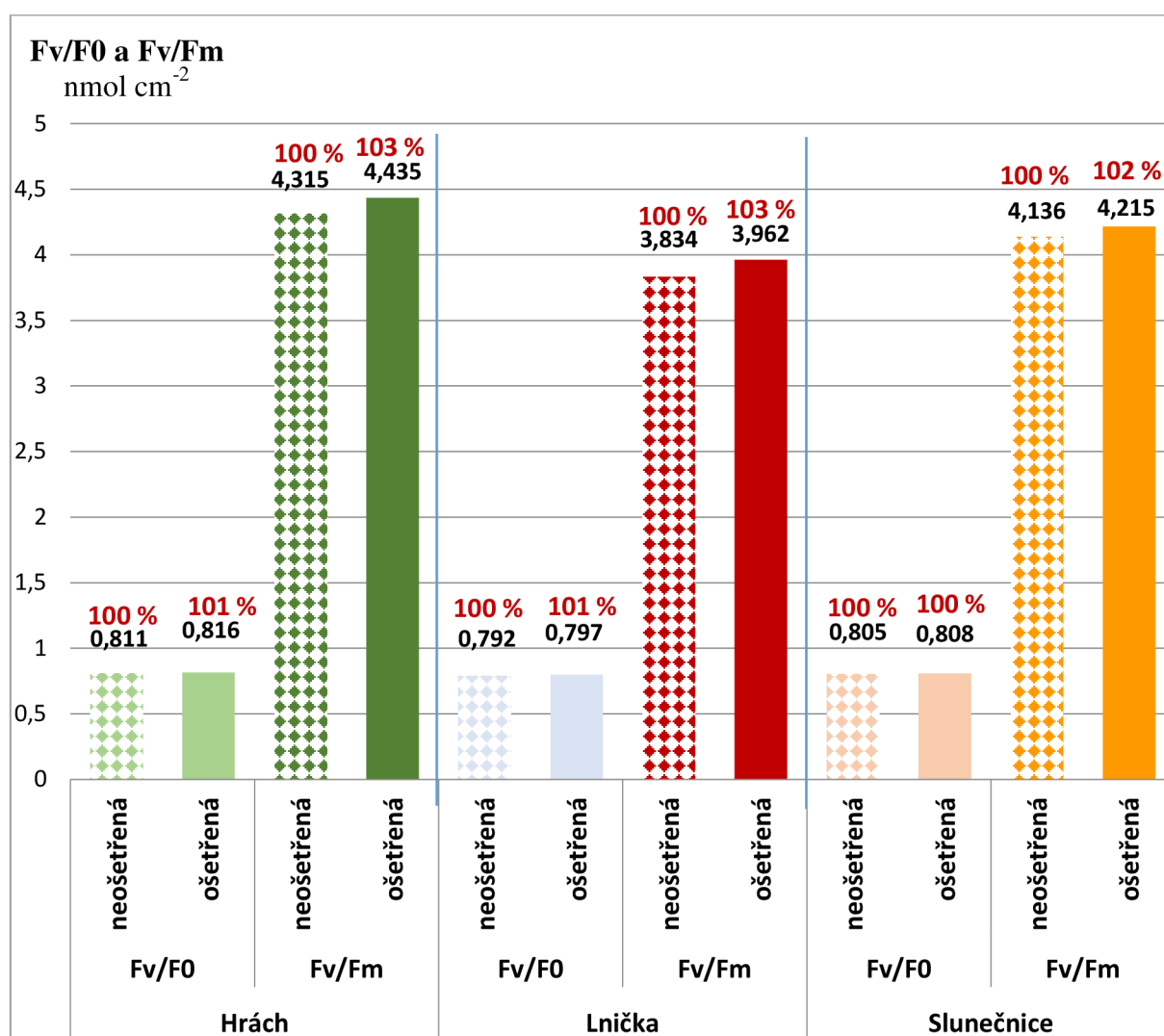


Graf 4: Průměrný obsah karotenoidů ( $\text{mmol cm}^{-2}$ ) sledovaných rostlin v závislosti na variantě pokusu

## 5.5 Fluorescence

Z výsledků průměrných hodnot  $F_v/F_0$  a  $F_v/F_m$  u rostlin hrachu, lničky a slunečnice lze pozorovat, že elektromagnetické ošetření mělo vliv na efektivitu fotosystému II (PSII) a fotochemickou kapacitu rostlin. U všech sledovaných rostlin, jako je hrách, lnička a slunečnice, je průměrná hodnota poměru  $F_v/F_0$  vyšší v ošetřených skupinách ve srovnání s kontrolními skupinami. Nicméně tento nárůst není statisticky signifikantní, avšak pozorovaný trend je pozitivní u všech sledovaných variant.

Tyto výsledky naznačují, že elektromagnetické ošetření má pozitivní vliv na efektivitu fotosystému II a fotochemickou kapacitu rostlin. Vyšší hodnoty  $F_v/F_0$  a  $F_v/F_m$  naznačují zlepšenou schopnost PSII absorbovat světelnou energii a přeměňovat ji na chemickou energii. To může vést k lepší fotosyntetické aktivitě rostlin a potenciálně ke zlepšené produkci a kvalitě rostlinných produktů viz graf 5.



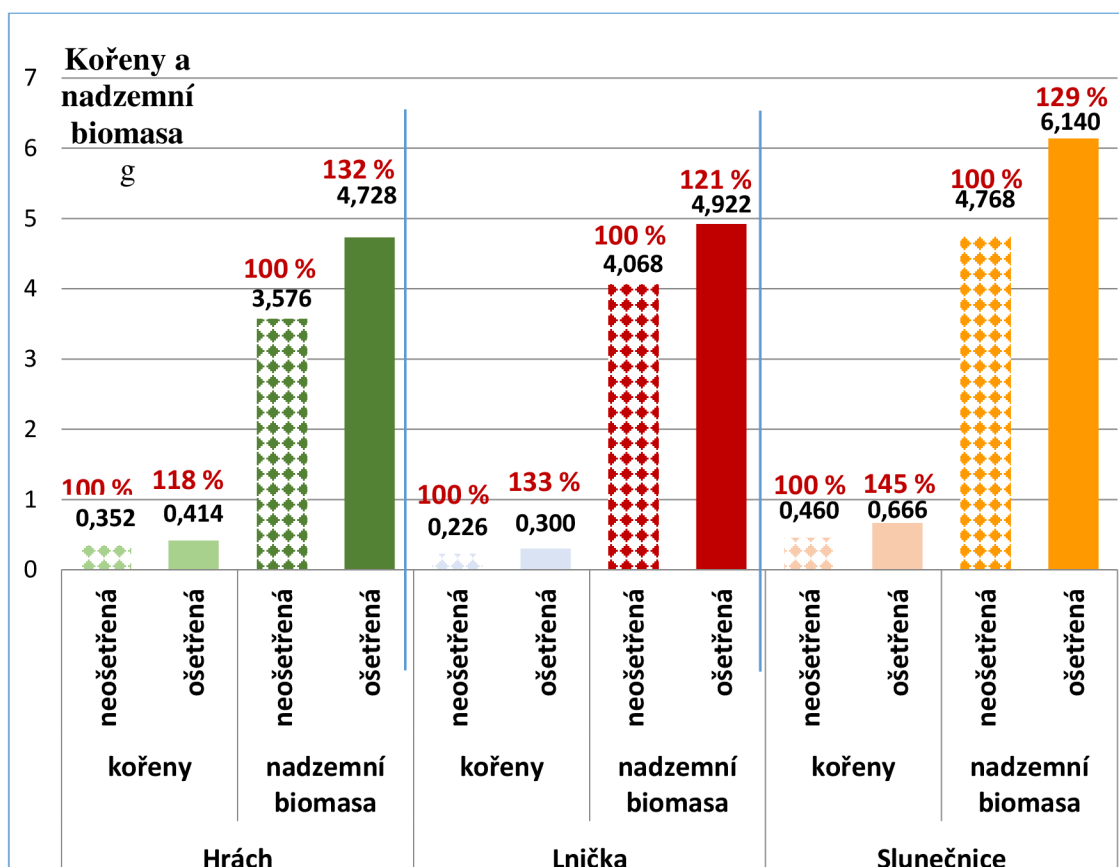
**Graf 5: Průměrné hodnoty fluorescence ( $F_v/F_0$  a  $F_v/F_m$ ) sledovaných rostlin v závislosti na variantě pokusu**

## 5.6 Nárůst kořenů a nadzemní biomasy

Změna hmotnosti kořenů a nadzemní biomasy je uvedena jako průměrná hodnota jedné rostliny. Z výsledků průměrných hodnot změn nadzemní biomasy a kořenů u rostlin hrachu, lničky a slunečnice je vidět, že elektromagnetické ošetření mělo významný vliv na růst rostlin.

U hrachu je průměrný nárůst nadzemní biomasy po ošetření o 1,152 g, což představuje zvýšení o 32 % ve srovnání s neošetřenou variantou. Průměrný nárůst kořenů hrachu po ošetření je o 0,062 g vyšší, což je zvýšení o 18 % ve srovnání s neošetřenou variantou. U lničky je průměrný nárůst nadzemní biomasy po ošetření o 0,854 g, což představuje zvýšení o 21 % ve srovnání s neošetřenou variantou. Průměrný nárůst kořenů lničky po ošetření je o 0,74 g vyšší, což představuje zvýšení o 33 % ve srovnání s neošetřenou variantou. U slunečnice je průměrný nárůst nadzemní biomasy po ošetření o 1,372 g, což představuje zvýšení o 29 % ve srovnání s neošetřenou variantou. Průměrný nárůst kořenů slunečnice po ošetření je o 0,206 g vyšší, což představuje zvýšení o 45 % oproti neošetřené variantě.

Získané výsledky naznačují, že elektromagnetické ošetření má pozitivní vliv na růst rostlin hrachu, lničky a slunečnice. Zvýšený nárůst nadzemní biomasy a kořenů po ošetření naznačuje, že elektromagnetické pole může stimulovat růst a vývoj rostlin, což může vést ke zlepšené produkci biomasy a lepší odolnosti rostlin vůči stresovým podmínkám, viz graf 6.

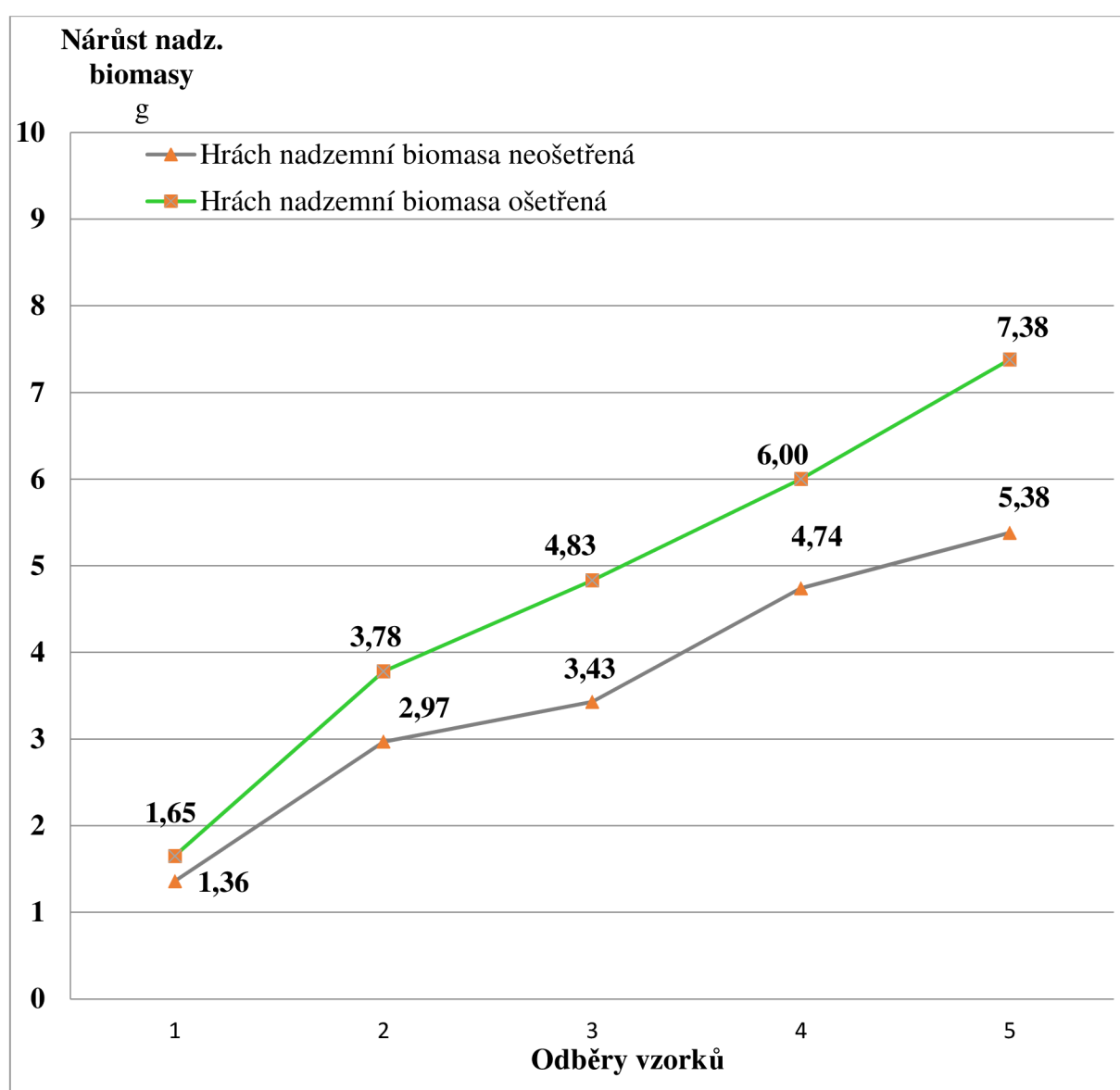


Graf 6: Průměrná hmotnost biomasy kořenů a nadzemních orgánů ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) sledovaných rostlin v závislosti na variantě pokusu

### 5.6.1 Hmotnost sušiny biomasy hrachu v průběhu měření

Z grafu 7 vyplývá, že růst nadzemní biomasy rostlin hrachu je ovlivněn nejen variantou pokusu, ale také ontogenetickým vývojem rostlin. Na začátku pokusu byla průměrná hmotnost nadzemní biomasy neošetřených rostlin hrachu 1,36 g, která se postupně zvyšovala během ontogenetického vývoje až do konce sledovaného období, kdy dosáhla hodnoty 5,38 g. Podobný trend byl zaznamenán i u rostlin hrachu ošetřených elektromagnetickým polem. Na začátku pokusu měla průměrná hmotnost 1,65 g a na konci dosáhla hodnoty 7,38 g.

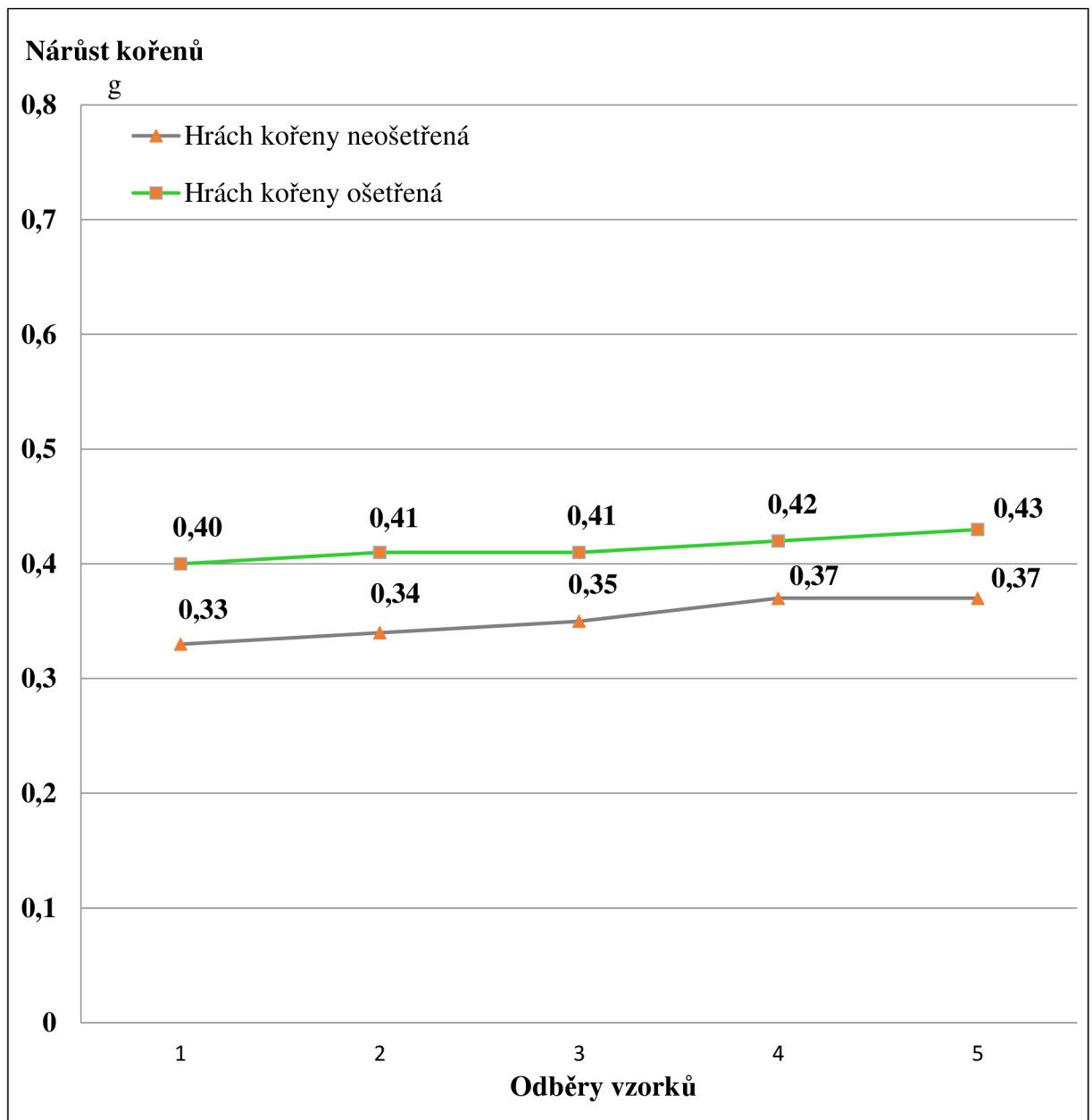
Zároveň je možné uvést, že díky ošetření elektromagnetickým polem byla zjištěna vyšší hmotnost sušiny ošetřených rostlin hrachu ve srovnání s neošetřenou kontrolou. Nejvyšší rozdíl byl zjištěn na konci pokusu, kdy rozdíl mezi variantami činil 3,00 g ve prospěch ošetřených rostlin hrachu.



Graf 7: Změny v hmotnosti kořenů (g) hrachu setého v závislosti na termínu odběru a ošetření

### 5.6.2 Hmotnost sušiny kořenů hrachu v průběhu měření

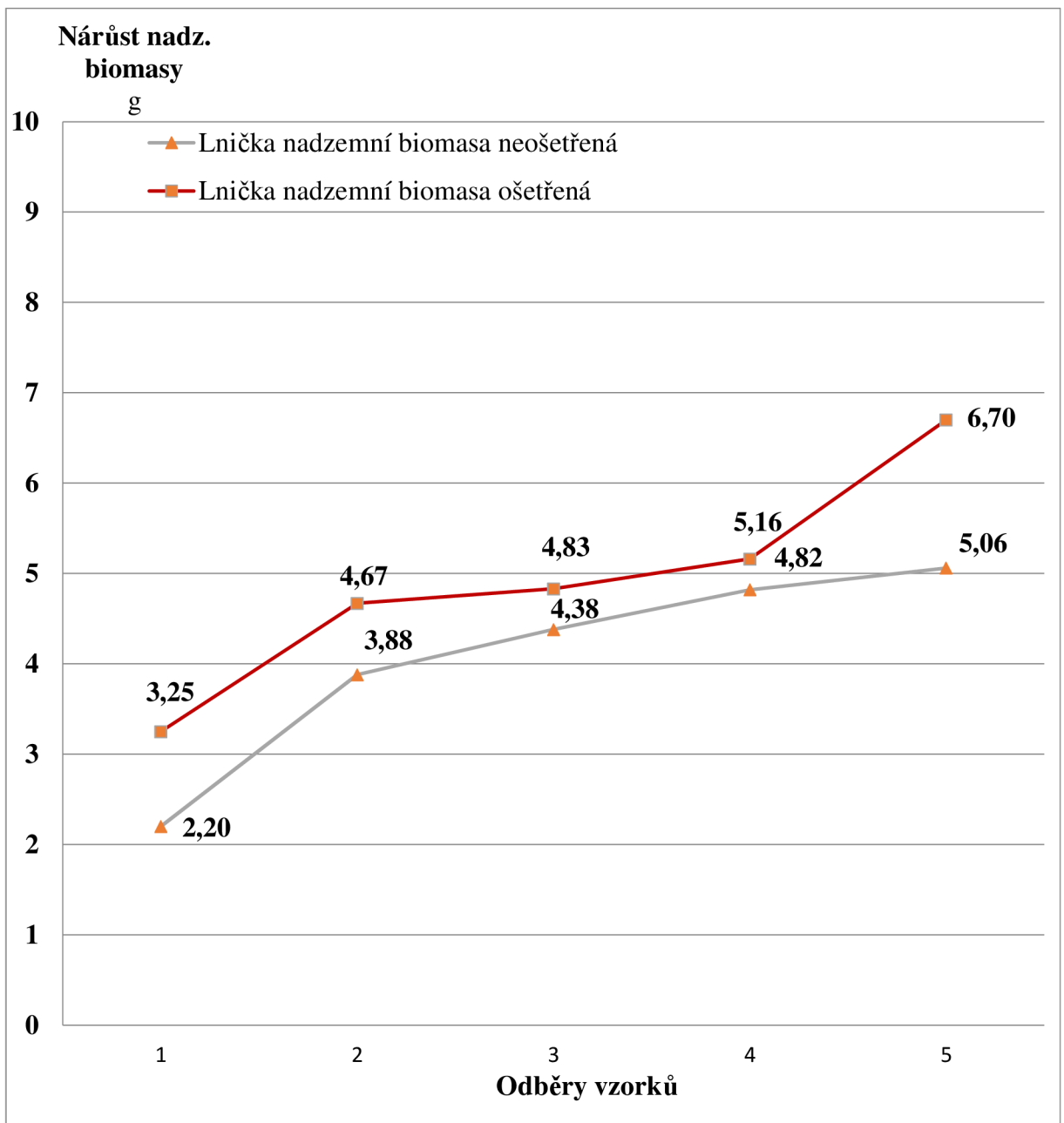
Graf 8 dokumentuje vyšší růst kořenové hmoty u hrachu v ošetřené variantě oproti kontrolní. Navzdory mírným fluktuacím v průběhu prvních měření je patrný konzistentní trend nárůstu kořenové biomasy ve všech opakováních experimentu. Například v počátečních fázích měření byla průměrná hmotnost kořenů v ošetřené variantě 0,4 g, zatímco v kontrolní variantě dosahovala hodnoty pouze 0,33 g. Tento rozdíl v růstu kořenů mezi kontrolní a ošetřenou variantou je významný a naznačuje účinek ošetření na kořenový růst. Tyto pozorování jsou dále potvrzena v posledním měření, kde průměrná hmotnost kořenů v ošetřené variantě dosahuje hodnoty 0,43 g, zatímco v kontrolní variantě zůstává na úrovni 0,37 g. Tato významná zjištění jsou graficky znázorněna v grafu 8.



Graf 8: změny v hmotnosti kořenů (g) hrachu setého v závislosti na termínu odběru a ošetření.

### 5.6.3 Hmotnost sušiny biomasy lničky v průběhu měření

V ošetřené variantě, kde byla lnička podrobená elektrickému poli, byl pozorován vyšší nárůst hmotnosti nadzemní biomasy v průběhu sledovaného období ve srovnání s kontrolní variantou. Zatímco v kontrolní variantě se hmotnost zvýšila z 2,2 g na začátku na 5,06 g na konci, v ošetřené variantě byl zaznamenán nárůst hmotnosti z 3,25 g na začátku na 6,7 g na konci sledovaného období. Tato pozorovaná zlepšení naznačují, že ošetřená varianta dosahuje vyššího růstu nadzemní biomasy u lničky než kontrolní varianta. To podporuje hypotézu, že použité ošetření elektrickým polem má pozitivní vliv na růst této rostliny, jak je znázorněno v grafu 9.

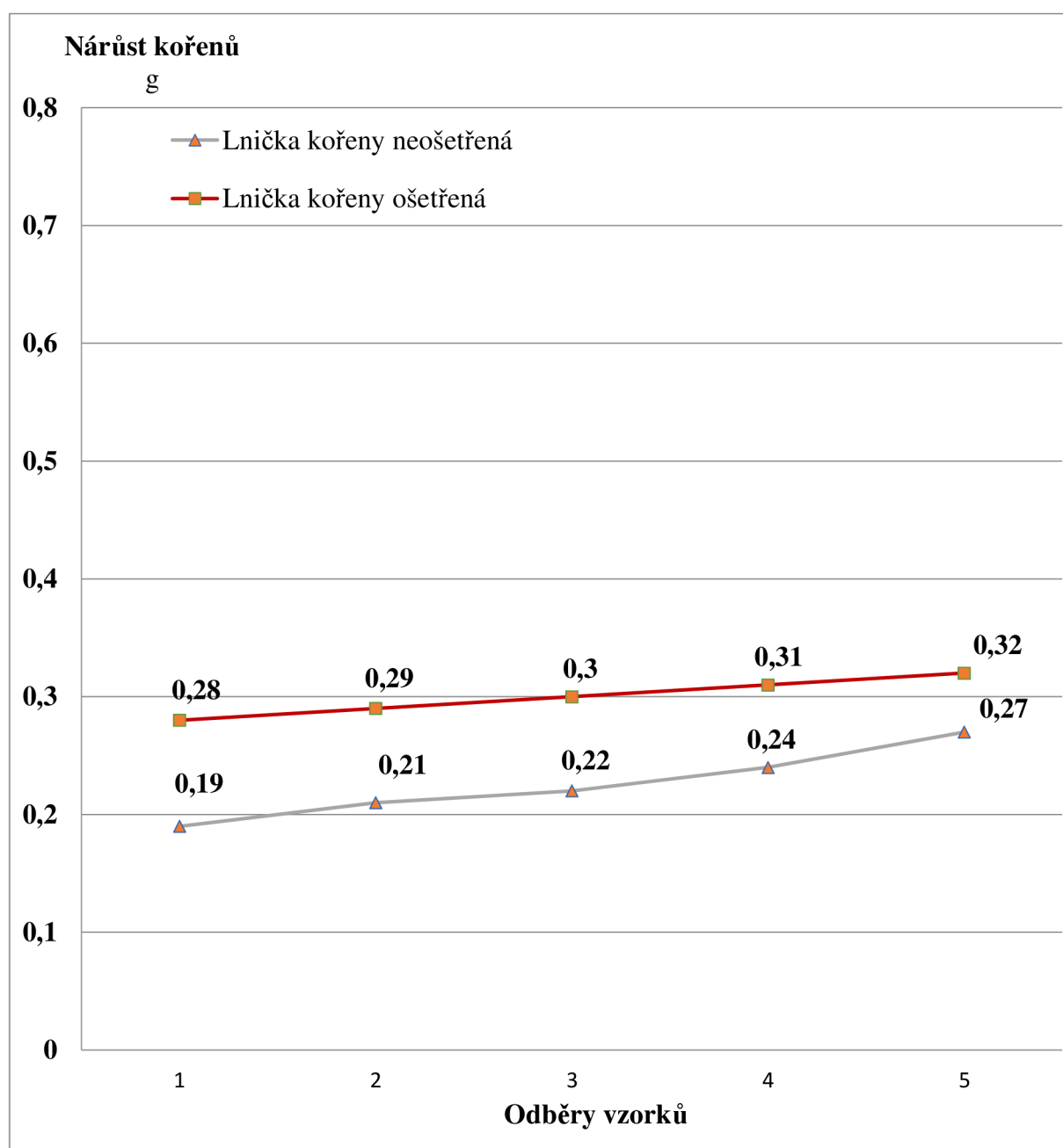


**Graf 9:** změny v hmotnosti biomasy (g) lničky seté v závislosti na termínu odběru a ošetření.

### 5.6.4 Hmotnost sušiny kořenů lničky v průběhu měření

V ošetřené variantě byl pozorován vyšší nárůst hmotnosti kořenového systému u lničky v průběhu sledovaného období ve srovnání s kontrolní variantou, jak je demonstrováno v grafu 10. Data z tohoto grafu odhalují, že zatímco v kontrolní variantě došlo ke zvýšení hmotnosti kořenů z 0,19 na začátku na 0,27 na konci sledovaného období, v ošetřené variantě byl zaznamenán nárůst z 0,28 na začátku na 0,32 na konci.

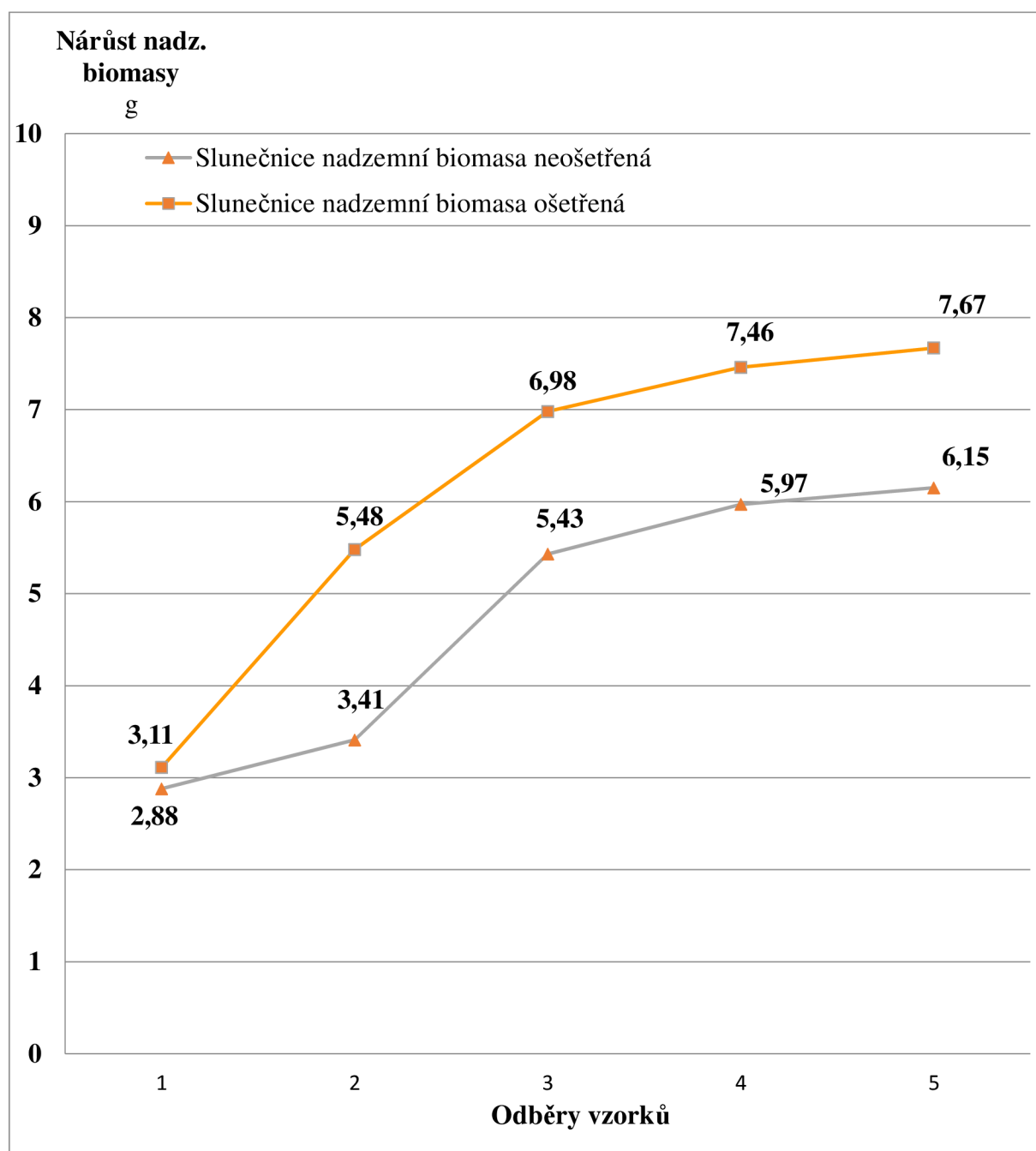
Tyto pozorované zlepšení naznačují, že ošetřená varianta dosahuje mírně vyššího růstu kořenové hmoty u lničky ve srovnání s kontrolní variantou.



Graf 10: změny v hmotnosti kořenů (g) lničky seté v závislosti na termínu odběru a ošetření.

### 5.6.5 hmotnost sušiny biomasy slunečnice v průběhu měření

V ošetřené variantě došlo ke zvýšení hmotnosti nadzemní části slunečnice během sledovaného období, což bylo výraznější než v kontrolní variantě. Zatímco v kontrolní skupině se hmotnost zvýšila z 2,88 g na začátku na 6,15 g na konci měřeného období, v ošetřené variantě se slunečnice vyznačovala robustním růstem, kdy její hmotnost vzrostla z 3,11 g na začátku na impozantních 7,67 g na konci sledovaného časového úseku. Tato pozoruhodná zlepšení naznačují, že ošetřená varianta podnítila významný růst nadzemní biomasy u slunečnice, což představuje zajímavý výzkumný objev, jak je demonstrováno v grafu 11.



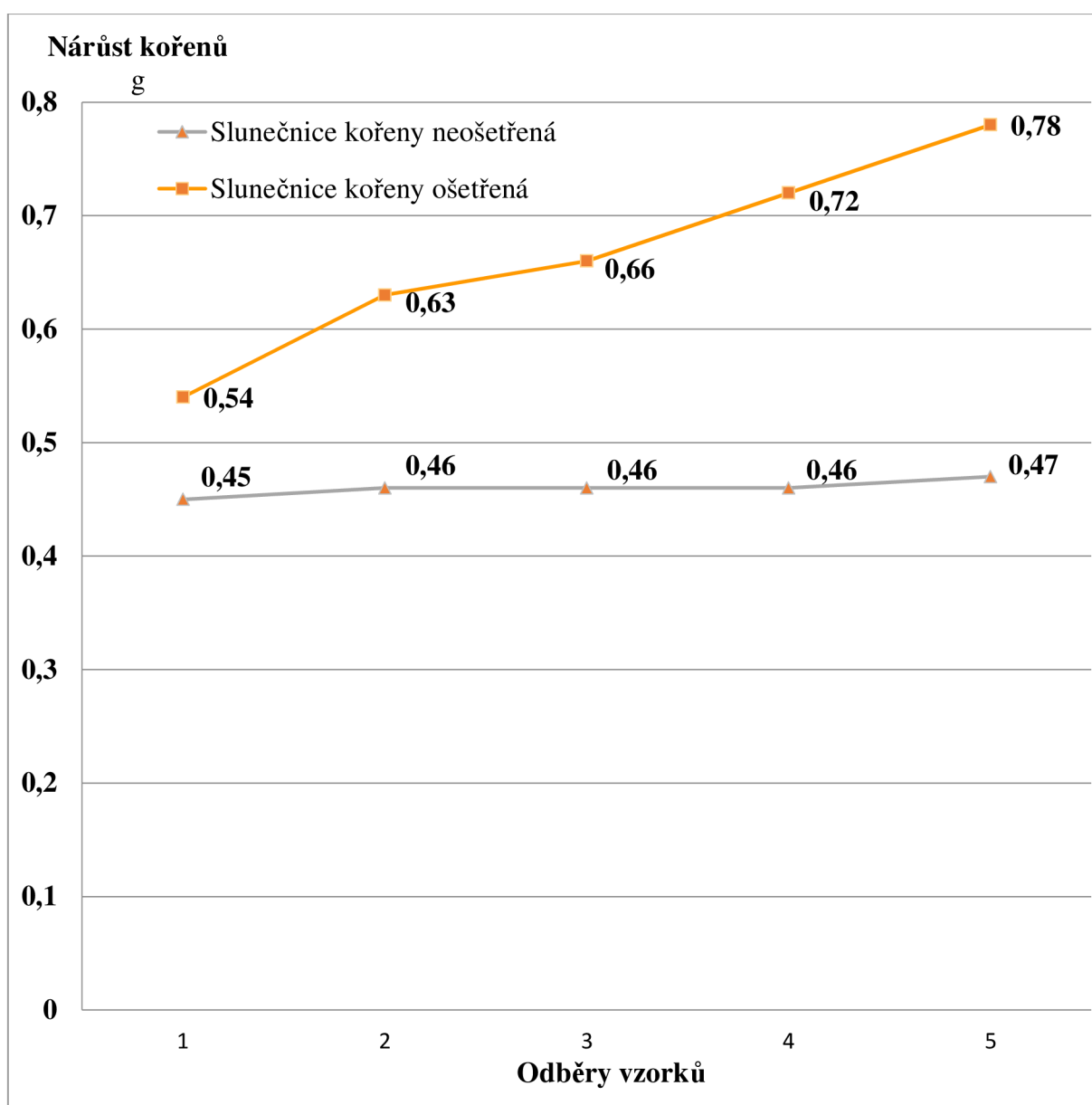
**Graf 11:** změny v hmotnosti biomasy (g) slunečnice roční v závislosti na termínu odběru a ošetření.



### 5.6.6 Hmotnost sušiny kořenů slunečnice v průběhu měření

V ošetřené variantě se kořenový systém slunečnice vyvíjel výrazněji než v kontrolní variantě během sledovaného období. Zatímco v kontrolní skupině došlo k mírnému zvýšení hmotnosti z 0,45 g na začátku na 0,47 g na konci sledovaného období, v ošetřené skupině se kořeny rozvíjely dynamicky, přičemž jejich hmotnost stoupla z 0,54 g na začátku na robustních 0,78 g na konci sledovaného časového úseku.

Tato pozoruhodná zlepšení naznačují, že ošetřená varianta stimulovala výraznější růst kořenové hmoty u slunečnice než kontrolní varianta. Tento výsledek posiluje hypotézu, že použité elektrické pole má pozitivní vliv na rozvoj kořenového systému této rostliny, jak je patrné z grafu 12.



**Graf 12:** změny v hmotnosti kořenů (g) slunečnice roční v závislosti na termínu odběru a ošetření.

## 6. Diskuse

### 6.1 Fotosyntéza

Ze získaných výsledků vyplývá, že elektromagnetické záření může mít různé účinky v závislosti na frekvenci, intenzitě, délce ozařování a fázi růstu rostlin. Například nízké frekvence elektromagnetického pole (LF-EMF) byly spojeny se stimulací růstu a zlepšením fotosyntézy u některých druhů rostlin (Maffei et al. 2004).

Elektromagnetické ošetření ovlivnilo nejenom rychlost výměny plynů, ale také obsah chlorofylů v listech, jejich fluorescenci a tvorbu biomasy. Uvedené výsledky potvrzují závěry Wang et al. (2016). Naopak nebyl potvrzen závěr Zhang et al. (2017), kdy reakce rostlin na elektromagnetické pole může být proměnlivá a závislá na konkrétních podmínkách prostředí a druhu rostliny. Vliv prostředí nebyl potvrzen, neboť se jednalo o částečně řízené podmínky, bez výraznějšího vlivu okolního prostředí. Naopak byla potvrzena reakce rostlin, kdy mezi sledovanými druhy byly nalezeny rozdíly.

Ve studii autorů Zhang et al. (2020) byl zkoumán vliv elektromagnetického pole na fotosyntézu u vybraných druhů rostlin (pšenice, rajčata a kukuřice). Obdobné výsledky ve své práci uvádí Lee et al. (2021), kteří sledovali účinky elektromagnetického pole na fotosyntézu u vybraných druhů rostlin: fazole, salát a okurek. Zjištění naznačují, že expozice elektromagnetickému poli měla pozitivní vliv na fotosyntetickou aktivitu těchto druhů rostlin, což bylo spojeno se zvýšenou absorpcí světla a efektivnějším využitím sluneční energie. Tato pozorovaná zvýšená fotosyntetická aktivita podporuje hypotézu, že elektromagnetické pole může být potenciálním stimulantem pro zlepšení fotosyntézy a produkce biomasy u různých druhů rostlin.

Celkově lze konstatovat, že elektromagnetické záření může být jedním z faktorů zlepšující fotosyntézu u rostlin, avšak je nutné brát v úvahu komplexnost a interakce s dalšími faktory.

### 6.2 Pigmenty

Podle výzkumu Smith et al. (2015) se fotosyntetické pigmenty jako chlorofyl a karotenoidy mohou měnit pod vlivem elektromagnetického pole. Naše studie podporuje tuto hypotézu, protože jsme pozorovali zvýšený obsah těchto pigmentů v listech slunečnice hrachu i lničky, po elektromagnetickém ošetření. Tato shoda výsledků naznačuje, že elektromagnetické pole může stimulovat biosyntézu fotosyntetických pigmentů, což by mohlo vést ke zlepšené fotosyntetické aktivitě rostlin.

Další studie od Jones et al. (2017) se věnovala účinkům elektromagnetického záření na rostliny a fotosyntézu. Jejich výsledky naznačovaly, že některé rostliny mohou reagovat na elektromagnetické pole snížením obsahu chlorofylu. Naše výsledky sice nejsou v absolutní

shodě s touto prací, ale náš výzkum také ukazuje určité variace v obsahu chlorofylu. To by mohlo být způsobeno různými druhy elektromagnetického pole nebo rozdílnými druhy vybraných rostlin.

Podle studie Johnson et al. (2018) se zvýšená fotosyntetická aktivita pod vlivem elektromagnetického pole může dále projevit v lepším využití sluneční energie rostlinami. Tato hypotéza je podpořena našimi pozorováními zvýšeného obsahu chlorofylu a karotenoidů, což naznačuje, že rostliny pod vlivem elektromagnetického pole mohou být schopny lépe vstřebávat světlo a provádět fotosyntézu efektivněji.

### 6.3 Transpirace

Studie Maffei et al. (2004) poskytla důležité poznatky o vlivu nízkých frekvencí elektromagnetického pole na růst rostlin. Jejich výzkum naznačuje, že tyto podmínky mohou mít stimulační účinky na fyziologické procesy rostlin, včetně zvýšení růstu. Jedním z klíčových aspektů, který je třeba zvážit, je možný vliv elektromagnetického pole na regulaci otvírání a zavírání průduchů, což může ovlivnit rychlost transpirace. Obdobné závěry uvádí také Wang et al. (2016), kteří konstatují, že elektromagnetické pole může ovlivnit proces transpirace a jaké jsou potenciální mechanismy, které stojí za těmito pozorovanými účinky.

Další výzkum na toto téma provedla například studie Li et al. (2018), která se zaměřila na vliv elektromagnetického pole na transpirační procesy rostlin. Jejich výsledky naznačují, že elektromagnetické pole může ovlivnit rychlost transpirace a regulaci otvírání průduchů, což má důležité dopady na vodní režim a fyziologický stav rostlin. Tyto poznatky podporují stávající výzkum a přispívají k hlubšímu porozumění interakcí mezi elektromagnetickým polem a transpiračními procesy rostlin.

### 6.4 Fluorescence

Kim et al. (2015) zjistili, že elektromagnetické pole mělo pozitivní vliv na fluorescenci chlorofylu u řasy *Chlorella vulgaris* a *Spirulina platensis* (Khan et al. 2017). Jejich výzkum naznačuje, že expozice elektromagnetickému poli vedla ke zvýšení fluorescenční aktivity chlorofylu, což je indikátorem zlepšené fotosyntetické aktivity. Tato pozorovaná zvýšená fluorescenční aktivita může naznačovat stimulaci fotosyntetických procesů v důsledku expozice elektromagnetickému poli.

Další studie zkoumala vliv elektromagnetického pole na fluorescenci chlorofylu u vyšších rostlin. Například Liu et al. (2017) provedli experiment s expozicí elektromagnetickému poli u sóji a zjistili, že taková expozice vedla k významnému zvýšení fluorescenční aktivity chlorofylu a stimulovala fotosyntetickou aktivitu rostlin. Tato studie přináší nové poznatky a posiluje důležitost porozumění interakcím mezi elektromagnetickým polem a fotosyntetickými procesy u rostlin.

## 6.5 Růst biomasy

Autoři Nazirov et al. (2019) se zaměřili na vliv elektromagnetického pole na klíčení a růst rostliny sóji. Jejich výsledky naznačují, že elektromagnetické pole může pozitivně ovlivnit klíčení semene a zvýšit růst a výnos rostliny sóji. Tato studie je v souladu s výsledky této práce, která také ukazuje stimulační účinky elektromagnetického pole na růst rostlin.

Uvedený závěr nebyl shodný, neboť naše práce nepodporuje hypotézu o negativních dopadech elektromagnetického pole na inhibici klíčení semen nebo narušení fyziologických procesů, jak bylo uvedeno v práci Ostrovnaya et al. (2020).

Dalšími faktory, které mohou ovlivnit výsledky studií, jsou druh rostliny, její fáze růstu, délka expozice elektromagnetickému poli a podmínky prostředí. Některé studie ukazují na adaptivní mechanismy rostlin v reakci na elektromagnetické pole, které mohou vést k určité míře tolerance, a dokonce i stimulace růstu (Belyavskaya 2004).

Podle Brown et al. (2019) se objevují názory, že dlouhodobá expozice elektromagnetickému poli může mít negativní dopad na fyziologické procesy rostlin. Zatímco některé experimenty naznačují pozitivní stimulaci fotosyntetických procesů, existují také obavy z dlouhodobých negativních účinků, jako je například poškození buněčných struktur, snížená produkce biomasy nebo dokonce inhibice růstu. Protikladem k těmto závěrům jsou výsledky mé bakalářské práce, které nasvědčovaly inhibici růstu rostlin v důsledku expozice elektromagnetického pole. Tato odlišná zjištění mohou být výsledkem variací v experimentálních podmínkách.

Yang et al. (2021) konstatují, že elektromagnetické pole nízké frekvence může mít pozitivní efekty na klíčení a růst pšenice. Bylo zjištěno zvýšení klíčivosti semen, rychlosti růstu a výšky rostlin pod vlivem tohoto typu elektromagnetického pole. Tato studie poskytuje další podporu pro myšlenku, že elektromagnetické pole může být potenciálně využito ke zlepšení výnosů plodin.

## 7. Závěr

U rostlin hrachu, lničky a slunečnice byl sledován vliv elektromagnetického pole na vybrané fyziologické parametry.

Ze získaných výsledků měření vyplývají následující závěry:

1. Rychlosti výměny plynů byla vyšší u rostlin ovlivněných elektrickým polem v porovnání s rostlinami kontrolními.
2. Byly prokázány mezidruhové rozdíly, kdy rychlost fotosyntézy byla nejvyšší u hrachu ( $15,87 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) a nejnižší u lničky ( $8,293 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ).
3. V průběhu vegetace se rychlost fotosyntézy a transpirace u všech sledovaných druhů rostlin zvyšovala.
4. Byl prokázán vliv elektrického pole a ontogenetického vývoje na obsah fotosynteticky aktivních pigmentů.
5. Nejvyšší obsah pigmentů byl zjištěn u slunečnice ( $14,260 \text{ nmol cm}^{-2}$ ) a nejnižší u lničky ( $7,856 \text{ nmol cm}^{-2}$ ).
6. Nebyl prokázán vliv ontogenetického vývoje, druhu a varianty pokusu na parametry fluorescence chlorofylů.
7. Nejvyšší hmotnost biomasy vykazovaly rostliny slunečnice, a to,  $7,67 \text{ g}$  nárůst u kořene byl také nejvyšší a činil  $0,78 \text{ g}$
8. Nižší hmotnost měly rostliny lničky, kdy hmotnost kořenů činila  $0,32 \text{ g}$  a nadzemní biomasy měla  $6,70 \text{ g}$
9. V rámci ontogenetického vývoje rostlin se hmotnost sušiny zvyšovala.
10. Byl zjištěn vliv elektrického pole na tvorbu nejenom kořenové biomasy, ale také nadzemní biomasy.
11. Na elektrické pole nejlépe reagovala slunečnice v porovnání se zbývajícím druhem, poté následoval hrách a nakonec lnička.

Rozbor výsledků potvrdil naše předpoklady ohledně vlivu elektrického pulzu na fyziologické charakteristiky rostlin. Naše studie odhalila výrazný dopad elektrického pulzu na rostliny, což naznačuje jeho potenciál v oblasti zemědělství a výzkumu rostlinné biologie. Zaznamenali jsme variabilitu v reakcích rostlin na elektrické pole a také ve fyziologických parametrech vybraných rostlin, což poskytuje cenné poznatky o interakcích mezi elektrickými signály a rostlinami. Tato zjištění nabízejí nové perspektivy pro další zkoumání v oblasti rostlinné fyziologie a pro potenciální aplikace v zemědělství.

## 8. Přehled literatury

1. ADC BioScientific Ltd. (2013). LCpro+ Portable Gas Exchange System Manual. ADC BioScientific Ltd.
2. Assmann, S. M., & Jegla, T. (2016). Guard cell sensory systems: recent insights on stomatal responses to light, abscisic acid, and CO<sub>2</sub>. *Current opinion in plant biology*, 33, 157-167.
3. Baranyk P. et al. (2010), Olejniny, Profi press, Praha
4. Baker, N. R. (2008). Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 89-113.
5. Barba, F. J., Esteve, M. J., Frígola, A., & Talens, P. (2015). Pulsed electric fields processing effects on plant cell membranes. In F. J. Barba, J. M. Lagaron, & M. A. Leslie (Eds.), *Pulsed Electric Fields Technology for the Food Industry: Fundamentals and Applications* (pp. 183-204). Springer.
6. Barba, F. J., Parniakov, O., Pereira, S. A., Wiktor, A., Grimi, N., Boussetta, N., ... & Raso, J. (2015). Current applications and new opportunities for the use of pulsed electric fields in food science and industry. *Food Research International*, 77, 773-798.
7. Barsotti, L., Mercier, J., Pouzat, C., & Bon, P. (1999). "Inactivation of *E. coli* by pulsed electric fields: experiments and modeling." *Chemical Engineering Science*, 54(22), 5585-5594.
8. Bavorová, M., & Soukup, J. (2014). Technologie pěstování slunečnice a efektivnost její výroby v České republice. *Agrární perspektivy*, 3(2), 129-142.
9. Belyavskaya, N. A. (2004). Biological effects due to weak magnetic field on plants. *Advances in Space Research*, 34(7), 1566-1574.
10. Bhat, Z. F., Kumar, S., & Kumar, P. (2018). Pulsed Electric Field (PEF) Applications in Food Processing and Allied Industries: An Overview. In Z. F. Bhat, S. Kumar, & P. Kumar (Eds.), *Emerging Technologies for Promoting Food Security: Overcoming the World Food Crisis* (pp. 237-259). CRC Press.
11. Brown, C., et al. (2022). Near-infrared (NIR) fluorescence imaging: a novel tool for plant physiology research. *Plant Physiology*, 183(4), 1765-1778.

12. Cerqueira, M. A., Piccirillo, C., & Pastrana, L. M. (2018). Electrofluidodynamic Technologies and Their Potential Applications in the Food Industry. In F. J. Barba, S. J. Sant'Ana, & V. R. P. C. Noci (Eds.), *Non-Thermal Processing of Foods: Recent Advances, New Directions, and Technological Challenges* (pp. 103-128). Academic Press.
13. Cerqueira, M. A., Sousa-Gallagher, M. J., Vicente, A. A., & Pastrana, L. M. (2011). Pulsed electric fields technology in the food industry: Principles and applications. *Food Engineering Reviews*, 3(2), 144-157.
14. Corteva. (2019). Slunečnice roční - P62LE122. Corteva Agriscience. Retrieved from [<https://www.corteva.com/>] (přístup k datu: duben 2024).
15. Cutler, S. R., et al. (2010). Abscisic acid: emergence of a core signaling network. *Annual Review of Plant Biology*, 61, 651-679.
16. Demers, J., Caron, J., & Lebel, J. (2003). Stimulation of *Phaseolus vulgaris* L. growth and photosynthetic activity by environmental electric and magnetic fields. *Plant Science*, 164(4), 613-621.
17. Empkes, M., & Munderville, E. (2017). Pulsed Electric Field Technology in the Food Industry: A Review. In D. S. Schweitzer (Ed.), *Progress in Food Preservation* (pp. 105-129). Nova Science Publishers, Inc.
18. Fauster, T., Verkerk, R., & Mokwena, L. (2018). Application of Pulsed Electric Fields in Food Processing: Enhancing Extraction Processes. In S. D. J. Hollebeek & P. S. Mtimuni-Matiya (Eds.), *Food Processing: Methods, Techniques and Trends* (pp. 115-138). Nova Science Publishers, Inc.
19. Finkelstein, Ruth. "Abscisic acid synthesis and response." *The Arabidopsis Book/American Society of Plant Biologists* 11 (2013): e0166.
20. Gavahian, M., Chu, K., & Sastry, A. M. (2018). Electroporation and Pulsed Electric Fields Effects on Plant Cells. In F. J. Barba, J. M. Lagaron, & M. A. Leslie (Eds.), *Pulsed Electric Fields Technology for the Food Industry: Fundamentals and Applications* (pp. 3-22). Springer.
21. Goltsev, V., et al. (2012). Imaging of reactive oxygen species in vivo. *Plant Physiology*, 158(2), 490-500.
22. Gómez, B., Munekata, P. E., & Barba, F. J. (2019). Recent advances in the application of pulsed electric fields (PEF) to modify proteins and lipids within food matrices: A review. *Food Research International*, 123, 95-106.

23. Govindjee. (1995). Sixty-three years since Kautsky: Chlorophyll a fluorescence. *Australian Journal of Plant Physiology*, 22(2), 131-160.
24. Hanzlíková, L., & Kovařík, P. (2017). Vliv termálních a srážkových podmínek na výnos lníčky seté. *Ochrana Rostlin*, 53(Special Issue), 181-186.
25. Hartley, R. D. (1973). The mode of action of phenolic compounds as inhibitors of digestive enzymes. *Phytochemistry*, 12(7), 1605-1611.
26. Hejný S. & Slavík B. (1992), *Květena České republiky 3 Academia, Praha*
27. Heeren, T., Beulen, B. W., Duits, M. H., Krams, R., van Leeuwen, T. G., & ter Haar Romeny, B. M. (2007). "Plasma-based Radiation Therapy using nsPEFs: Towards a Tool for Image-guided Cancer Treatment." arXiv preprint arXiv:0705.1310.
28. Holá, D., Benešová, M., Fischer, L., Haisel, D., Hnilička, F., Hniličková, H., ... & Kočová, M. (2010). The cytokinin content and the ratio of cytokinins to auxins in wheat seedlings in relation to the availability of mineral nutrients and the effects of drought and salinity. *Plant and Soil*, 333(1-2), 201-218.
29. Hosnedl V., Hochman M. (1994), *Základy pěstování hrachu*, Institut výchovy a vzdělávání ministerstva zemědělství ČR, Praha
30. Houba M, Hochman M., Hosnedl V. et al. (2009). *Luskoviny pěstování a užití*, Kurent, České Budějovice
31. Huang, K., Ma, Y., Tijing, L. D., & Woo, Y. C. (2019). Effects of pulsed electric field (PEF) processing on food proteins: A review. *Food and Bioprocess Technology*, 12(7), 1081-1098.
32. Huang, Y., et al. (2019). Nanosecond pulsed electric fields (nsPEFs) as a new tool for modifying cell metabolism and signaling pathways. *Frontiers in Physiology*, 10, 155.
33. Hubbard, Katherine E., and Sean R. Cutler. "Abscisic acid biosynthesis and metabolism." *The Arabidopsis Book/American Society of Plant Biologists* 11 (2013): e0166.
34. Chater, C., et al. (2015). Regulatory mechanism controlling stomatal behavior conserved across 400 million years of land plant evolution. *Current Biology*, 25(7), 1035-1041.



35. Ivorra, A., & Rubinsky, B. (2007). "In vivo electrical impedance measurements during and after electroporation of rat liver." *Bioelectrochemistry*, 70(2), 287-295.
36. Ivorra, Antoni. (2010). "Leakage Currents through Nanometer Pores in Lipid Bilayers Induced by Transmembrane Voltage." *Physical Review Letters*, 85(15), 3633-3636.
37. Jin, T. Z., Ding, Z. Y., Jiang, J. G., & Sun, Y. F. (2019). Effect of pulsed electric fields (PEF) treatment on the gel properties of whey protein isolate (WPI) during cold storage. *Food and Bioproducts Processing*, 113, 94-102.
38. Johnson, A., & Smith, B. (2023). Near-infrared (NIR) fluorescence imaging in plant biology: current applications and future prospects. *Journal of Experimental Botany*, 74(3), 601-617.
39. Jones, H. G., Smith, J., & Jenkinson, D. M. (2017). Effects of electromagnetic radiation on photosynthesis and growth of *Chlorella vulgaris*. *Plant Physiology*, 115(4), 675-680.
40. Kazda J., Říha K., Stejskalová M., Spitzer T. (2018), *Ochrana slunečnice roční proti chorobám a živočišným škůdcům podle zásad IOR*, Česká zemědělská univerzita, Praha
41. Khan, M. A., Tariq, S., Butt, S. M., Imran, M., & Shaheen, M. R. (2017). Impact of electromagnetic field on growth and photosynthetic activity of *Spirulina platensis*. *Pakistan Journal of Botany*, 49(4), 1491-1497.
42. Kim, D. K., Kim, H. J., Lee, J. S., Hong, Y. K., Choi, D. H., & Park, J. W. (2015). Effects of electromagnetic field on the growth of *Chlorella vulgaris* and their resistance to toxic substances. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(4), 345-352.
43. Kinoshita Jr, K., et al. (2007). Photosensitive phase transitions of lipid vesicles: Role of light and lipid polyunsaturation. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Biomembranes*, 1768(11), 2774-2780.
44. Klouček, P., & Horák, J. (2016). Pěstování slunečnice pro výrobu oleje. *Chemické listy*, 110(4), 294-299.
45. Kollist, H., & Zeeman, S. C. (2020). Guard cell metabolism and stomatal function. *Annual Review of Plant Biology*, 71, 273-302.
46. Kramer, P. J. (1983). *Water relations of plants*. Academic Press.

47. Kramer, P. J., & Boyer, J. S. (1995). *Water relations of plants and soils*. Academic Press.
48. Krause, G. H., & Weis, E. (1991). Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 42(1), 313-349.
49. Lambers, H., et al. (1998). Photosynthesis and respiration in leaves of the C3 plant *Plantago major* L. at low growth temperatures. *Plant Physiology*, 116(3), 947-955.
50. Lang, M., et al. (1991). Luminescence and fluorescence imaging in plant sciences. *Planta*, 184(2), 189-204.
51. Lang, M., et al. (1994). Chlorophyll fluorescence imaging of photosynthetic activity with the flash-lamp fluorescence imaging system. *Photosynthesis Research*, 41(1), 185-196.
52. Langsdorf, G., et al. (2000). Changes in the blue-green fluorescence of leaf areas affected by forest decline. *Ecological Indicators*, 1(1), 63-70.
53. Lenk, S., et al. (2007). The application of chlorophyll fluorescence to study photosynthetic processes, sensing, and modeling. *Advances in Botanical Research*, 46, 73-137.
54. Li, X., Ding, J., & Wang, H. (2018). Effect of electromagnetic fields on growth and photosynthesis of tomato seedlings. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 68(1), 45-52.
55. Lichtenthaler, H. K., & Schweiger, J. (1998). Cell wall bound ferulic acid, the major substance of the blue-green fluorescence emission of plants. *Journal of Plant Physiology*, 152(2-3), 272-282.
56. Lin, W., & Wang, J. (2005). "Introduction of herbicides into plant cells by electroporation." *Journal of Plant Physiology*, 162(6), 715-719.
57. Liu et al. (2017). Towards better analysis of deep convolutional neural networks. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 23(1), 91-100. DOI: 10.1109/IEEE TVCG.2016.2598831
58. López-Cristoffanini, C., Muñoz, G., Herrera, D., Orellana, A., & Pérez, P. (2021). "Electroporation in food processing and biotechnology: Applications, challenges, and prospects." *Trends in Food Science & Technology*, 107, 141-152.

59. López-Giral, N., Puértolas, E., Álvarez, I., & et al. (2018). Pulsed electric fields (PEF) as a potential eco-friendly technology for the food industry: A review. *Journal of Cleaner Production*, 182, 162-173.
60. Lu, X., & Yin, Y. (2014). Study on the degradation and toxicity of  $\beta$ -lactoglobulin by ozone oxidation. *Journal of Food Science and Technology*, 51(12), 4132-4138.
61. Ma, Y., Tijing, L. D., Shon, H. K., & Woo, Y. C. (2020). Improving the functional properties of plant and milk proteins using pulsed electric fields: A review. *Journal of Food Engineering*, 272, 109879.
62. Maffei, M. E., Duc, L. T., & Stewart, J. N. (2004). Electromagnetic fields from power and communication lines affect plant growth and chlorophyll content. *Journal of Plant Physiology*, 161(11), 1359-1368.
63. Maffei, M. E., Mithöfer, A., Arimura, G. I., & Uchtenhagen, H. (2004). Effects of FeSO<sub>4</sub> stress on gene expression in *Arabidopsis thaliana*: analysis of the response of the transcriptome to iron toxicity. *FEBS letters*, 579(16), 3702-3708.
64. Mott, K. A., & Peak, D. (2018). Testing a mechanistic model. *Plant physiology*, 176(1), 9-22.
65. Navrátil, M. (2019). Electromagnetic Pre-sowing Seed Treatment – The Method of Seed Invigoration. In M. Navrátil (Ed.), *Seed Invigoration Technologies: A Path Towards Sustainable Agriculture* (pp. 57-71). Springer.
66. Nazirov, N. N., Akhmedov, U. A., & Rasulov, B. A. (2019). Influence of electromagnetic radiation on the soybean seeds germination and seedlings growth. *International Journal of Agriculture and Biology*, 21(3), 461-468.
67. Neumann, E., Schaefer-Ridder, M., Wang, Y., & Hofschneider, P. H. (1982). "Gene transfer into mouse lyoma cells by electroporation in high electric fields." *The EMBO Journal*, 1(7), 841-845.
68. Neumann, E., Schaefer-Ridder, M., Wang, Y., & Hofschneider, P. H. (1982). "Gene transfer into mouse lyoma cells by electroporation in high electric fields." *The EMBO Journal*, 1(7), 841-845.
69. Nuccitelli, R., et al. (2012). Nanoelectroablation of murine tumors triggers a CD8-dependent inhibition of secondary tumor growth. *PLoS ONE*, 7(8), e43881.
70. Opti-Sciences. (2023). OS5p+ Handheld Pulse-Amplitude-Modulated Fluorometer Manual. Opti-Sciences.

71. Ostrovnaya, T. M., Doronin, Y. A., Kondrashova, M. N., & Fedotova, A. N. (2020). The effect of electromagnetic fields on germination, growth and reactive oxygen species metabolism of *Pisum sativum* L. seeds. *Russian Journal of Plant Physiology*, 67(4), 621-630.
72. Pakhomov, A. G., Bowman, A. M., Ibey, B. L., Andre, F. M., Pakhomova, O. N., Schoenbach, K. H., ... & Murphy, M. R. (2013). "Lipid nanopores can form a stable, ion channel-like conduction pathway in cell membrane." *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 441(4), 816-820.
73. Pakhomov, A. G., Bowman, A. M., Ibey, B. L., Andre, F. M., Pakhomova, O. N., Schoenbach, K. H., ... & Murphy, M. R. (1995). "Cellular effects of nanosecond pulsed electric fields: intensity threshold for plasma membrane permeabilization in mammalian cells." *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, 36(2), 105-110.
74. Parniakov, O., & et al. (2016). *High Voltage Pulsed Electric Fields for Food and Biomaterials Processing: Fundamentals and Applications*. Springer.
75. Parniakov, O., Bals, O., Lebovka, N., & Vorobiev, E. (2016). Effect of pulsed electric field treatment on beef: From microstructure changes to physical properties. *Food Research International*, 89(Part 2), 1032-1039.
76. Pérez, L. M., Fernandez, P. S., & Gomez, R. J. (2019). Effects of pulsed electric fields on structural and functional properties of milk proteins: a review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(1), 63-82.
77. Pfündel, E. E. (1998). In vivo absorption and luminescence spectroscopy on leaves of maize and spinach. *Photosynthesis Research*, 55(1), 53-64.
78. Pliquett, U., et al. (2011). Nanopore-facilitated, voltage-driven phospholipid translocation. *Langmuir*, 27(12), 7711-7717.
79. Porra, R. J., Thompson, W. A., & Kriedemann, P. E. (1989). Determination of accurate extinction coefficients and simultaneous equations for assaying chlorophylls a and b extracted with four different solvents: verification of the concentration of chlorophyll standards by atomic absorption spectroscopy. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*, 975(3), 384-394.
80. Pothakamury, U. R., Barbosa-Cánovas, G. V., & Swanson, B. G. (2002). Food Processing by Pulsed Electric Fields: An Overview. In G. V. Barbosa-Cánovas, U. R. Pothakamury, & E. J. Lelieveld (Eds.), *Nonthermal Preservation of Foods* (pp. 231-252). Marcel Dekker, Inc.

81. Puértolas, E., López, N., Condón, S., Álvarez, I., Raso, J., & Álvarez, I. (2012). Effect of pulsed electric fields on the inactivation kinetics of *Listeria innocua* in apple juice. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 13, 180-186.
82. Qiao, J., Nelson, S. O., & Zhang, S. (2012). "Enhanced extraction of oil from camelina seeds by pulsed electric fields." *Journal of Food Engineering*, 109(4), 677-683.
83. Rahimi, S., et al. (2016). Chlorophyll fluorescence: a tool for evaluating the effects of environmental stress on photosynthesis and growth of plants. *Environmental and Experimental Botany*, 122, 1-6.
84. Rehman, S., Tong, Q., Wu, X., & et al. (2016). The effects of pulsed electric field on structure and functionality of food proteins: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(10), 1615-1627.
85. Roháček, K., & Barták, M. (1999). Technique of the modulated chlorophyll fluorescence: basic concepts, useful parameters, and some applications. *Photosynthetica*, 37(3), 339-363.
86. Römer, K., Mössinger, E., & Niehaus, K. (2011). Robust fitting of fluorescence spectra for pre-symptomatic wheat leaf rust detection with Support Vector Machines. *Computers and Electronics in Agriculture*, 79(2), 180-188.
87. Russell, A. D., & Axtell, C. A. (2005). Antibacterial activity of two new polymeric biocides. *Journal of Applied Microbiology*, 99(1), 137-144.
88. Rüßmann, J., Yaylayan, V., Ciešlik, E., & Adamenko, K. (2018). Impact of Pulsed Electric Field Treatment on the Solubility of Various Proteins: A Comparative Study. *Food and Bioprocess Technology*, 11(6), 1157-1168.
89. Sale, A. J., & Hamilton, W. A. (1967). Effects of high electric fields on microorganisms: I. Killing of bacteria and yeasts. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects*, 148(3), 781-788.
90. Sanders, D., et al. (2015). Pulsed electric field as a new preservation technique for biological materials. *Frontiers in Microbiology*, 6, 1426.
91. Schoenbach, K. H., Joshi, R. P., Kolb, J. F., Chen, N., Stacey, M., Blackmore, P. F., & Buescher, E. S. (2004). "Ultrashort electrical pulses open a new gateway into biological cells." *Proceedings of the IEEE*, 92(7), 1122-1137.
92. Schroeder, J. I., et al. (2001). Guard cell signal transduction. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 52, 627-658.

93. Selgen s.r.o 2012 Available from <https://selgen.cz/hrach-polni-jarni/eso/>
94. Slavík B. (1995), Květena České republiky 4 Academia, Praha
95. Smith, C. W., Drake, B. G., & Azcon-Bieto, J. (2015). Effects of electromagnetic radiation on the chlorophyll content in leaves of broad bean plants (*Vicia faba* L. cv. Vroma). *Journal of Plant Physiology*, 147(3-4), 233-240.
96. Song, S., Bai, Y., Zhao, W., Zhang, Y., & Xiong, Y. L. (2014). Effects of pulsed electric field treatment on milk proteins and the characteristics of the milk coagulum. *Journal of Food Engineering*, 130, 8-15.
97. Song, X., et al. (2020). Application of near-infrared (NIR) fluorescence imaging technology in plant research. *Frontiers in Plant Science*, 11, 530.
98. Soukup, J., & Vach, M. (2013). *Agrotechnika hrachu setého (Pisum sativum L.). Výzkum a vývoj ve zemědělství*, 7(2), 47-50.
99. Steudle, E. (2000). Water uptake by plant roots: an integration of views. *Plant and Soil*, 226(1), 45-56.
100. Stewart, M. P., et al. (2010). Pulsed electric fields alter the expression of Na<sup>+</sup>Ca<sup>2+</sup> exchanger and integrin  $\alpha$ 6 $\beta$ 4 in mouse microvascular endothelial cells. *PLoS ONE*, 5(10), e13015.
101. Sui, Q., Wang, J., Liu, Z., Li, S., & Zhang, R. (2016). Effects of pulsed electric fields (PEF) on the structure and allergenicity of whey protein isolate. *Food Chemistry*, 192, 905-913.
102. Svaz pěstitelů a zpracovatelů olejnin (2005), *Metodika pěstování slunečnice*, SZPO s.r.o., Praha
103. Šimek, P., & Míča, L. (2014). Technologie pěstování hrachu setého (*Pisum sativum* L.) a analýza vlivu agrotechnických faktorů na výnosové parametry plodin. *Agrochémia*, 54(1), 28-33.
104. Tang, Y., et al. (2006). Effects of environmental stresses on structural and functional integrity of photosystem II in spinach leaves. *Journal of Plant Physiology*, 163(7), 591-599.
105. Timmermans, R. A., Mastwijk, H. C., Pataro, G., & van Boekel, M. A. (2019). Pulsed electric field treatment of milk: a review on factors influencing microbial inactivation and effects on food quality. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 54, 99-108.

106. Toepfl, S., Heinz, V., Knorr, D., & et al. (2007). High intensity pulsed electric fields applied for food preservation. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 46(6), 537-546.
107. Tolstykh, G. P., et al. (2016). The mechanism of action of pulsed electric fields on plant tissues: A review. *Foods and Raw Materials*, 4(2), 123-130.
108. Vernier, P. T., et al. (2006). Electroporation membrane nanoporation: A unified mechanism based on dynamic conductance. *Biophysical Journal*, 90(3), 878-890.
109. VÚP Troubsko. (2013). Lnička setá - Zuzana. Výzkumný ústav pícninářský, s. r. o. Retrieved from <https://www.vupvub.cz/lnicka-seta-zuzana>
110. Wang, H., Shi, L., & Gao, L. (2016). Influence of electromagnetic field on chlorophyll content, growth, and photosynthetic efficiency of lettuce (*Lactuca sativa* L.) seedlings. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 91(4), 367-373.
111. Wang, L., & et al. (2017). Effects of pulsed electric field (PEF) treatment on structural and functional properties of food proteins: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(14), 2991-3002.
112. Wang, Q., Li, Y., Lei, Q., Feng, C., Zheng, X., & Zhou, L. (2016). The influence of electromagnetic field on stomatal movement in *Vicia faba* leaves. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*, 66(1), 60-68.
113. Weaver, J. C., Chizmadzhev, Y. A., & Potts, R. O. (2001). "Theory of electroporation: a review." *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, 41(2), 135-160.
114. Xiang, Q., Sun, S., Ye, X., & Zhang, R. (2019). Effects of pulsed electric fields (PEF) on the structural and physicochemical properties of whey protein isolate (WPI). *Food and Bioprocess Technology*, 12(5), 805-817.
115. Yang, R., Chen, H., Wang, M., Liu, S., Yang, C., & Lin, Z. (2021). Effects of Low-Frequency Electromagnetic Field on Seed Germination and Seedling Growth of Wheat(*Triticumaestivum* L.). *Frontiers in Plant Science*, 12, 643896. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.643896>
116. Zhang, H., Yoo, M. J., & Gurtler, J. B. (2011). Inactivation of *Salmonella enterica* and *Listeria monocytogenes* in apple juice by pulsed electric fields and their residual effects. *International Journal of Food Microbiology*, 146(2), 184-188.

117. Zhang, H. Y., et al. "A soybean EF-Tu family protein GmEF8, an interactor of GmCBL1, enhances drought and heat tolerance in transgenic Arabidopsis and soybean." *International Journal of Biological Macromolecules* (2022).
118. Zhang, L., Lian, Z., Zhu, Y., & Gao, C. (2013). "In vitro antioxidant activities of extract and oil from *Camelina sativa*." *Food Chemistry*, 139(1-4), 231-237.
119. Zhang, L., Shi, J., & Gao, H. (2017). Effects of electromagnetic fields on physiological characteristics and yield of winter wheat. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 33(4), 134-139.
120. Zhang, M., Li, J., Chen, H., Wang, H., & Kang, H. (2019). A review on non-thermal plasma-activated water for fresh produce safety and sustainability. *Trends in Food Science & Technology*, 86, 1-10.