

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů**

**Katedra botaniky a fyziologie rostlin**



**Fakulta agrobiologie,  
potravinových a přírodních zdrojů**

**Vliv sucha na klíčení vybraných genotypů pšenice seté  
(*Triticum aestivum* L.) a sóji luštinaté (*Glycine max* L.)**

**Bakalářská práce**

**Autor práce: David Reif**

**Obor studia: Rostlinná produkce**

**Vedoucí práce: prof. Ing. Václav Hejnák, Ph.D.**

**Konzultant: Ing. Jiří Krucký**

© 2024 ČZU v Praze



## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Vliv sucha na klíčení vybraných genotypů pšenice seté (*Triticum aestivum* L.) a sóji luštinaté (*Glycine max* L.)" 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 23. 4. 2024

---

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval panu prof. Ing. Václavu Hejnákovi Ph.D. za odborné vedení při psaní této bakalářské práce, hlavně za mnohé rady a důležité připomínky spojené s touto prací.

Dále bych velice rád poděkoval panu Ing. Jiřímu Kruckému za vytvoření kvalitních podmínek pro provedení výzkumu a následnou pomoc při vyhodnocení a zpracování dat, a hlavně také za věnovaný čas, ochotu a trpělivost, kterou mi věnoval.

Jako dalším bych chtěl poděkovat Obchodnímu družstvu Mrákov a Soukromé zemědělské farmě Krucký za poskytnutí osiva pro provedení pokusu.

V neposlední řadě, poděkování patří také mé rodině a přítelkyni za pomoc a morální podporu, kterou mi poskytovali během studia.

# Vliv sucha na klíčení vybraných genotypů pšenice seté (*Triticum aestivum* L.) a sóji luštinaté (*Glycine max* L.)

## Souhrn

V důsledku neustálých klimatických změn na Zemi dochází v určitých oblastech ke ztrátám vody důležité pro rostliny. Vzniklé sucho se stává stále větším problémem globálního významu. Mezi abiotickými faktory v zemědělství je sucho nejvýznamnější, způsobuje u rostlin vodní stres, jehož působení má vliv na růst a vývoj ve fázi klíčení i během vegetace. Pšenice setá (*Triticum aestivum* L.) a sója luštinatá (*Glycine max* L.) reagují na nedostatek vody omezením růstu v raných vývojových fázích až úplným zastavením. V závislosti na výše uvedených poznatcích byl zkoumáným cílem této práce vliv uměle navozeného vodního stresu pomocí PEG (polyethylen glykol) na klíčení a růstové parametry semen pšenice a sóji.

Dne 25. května 2023 došlo k založení experimentu se semeny pšenice genotypu 'Vanessa' a 'Frisky' a dne 16. června 2023 došlo k založení pokusu se semeny sóji genotypu 'Moravians' a 'Mayrika'. Doba trvání experimentu byla vždy 7 dní. Experiment byl proveden v laboratoři katedry botaniky a fyziologie rostlin, FAPPZ, ČZU v Praze. Pokus byl rozdělen do 4 variant, kontrolní (**K**) a podle použité koncentrace **PEG (5%, 15% a 25%)**. Měření probíhalo **3., 5., a 7. den** od založení. Hodnocenými parametry byly průměrná klíčivost semen (SG), energie klíčení (GE), rychlost klíčení (GR) a index klíčení (GI). Dále délka kořene a nadzemní části, hmotnost FM a DM a poměr R:S.

Ze získaných výsledků této bakalářské práce vyplývá, že vlivem vodního deficitu na semena pšenice a sóji bylo dosaženo výrazného snížení parametrů klíčení a růstu u testovaných semen v porovnání s kontrolní variantou (**K**), kde byly podmínky pro růst semen optimální. Bylo zjištěno, že s rostoucí úrovní vodního stresu klesá rychlost klíčení, klíčivost a růst semen, nebo je vývoj zcela inhibován. Pšenice se ukázala jako více tolerantní, sója byla k podmínkám sucha více senzitivní.

U genotypů pšenice 'Vanessa' a 'Frisky' nebylo zjištěno výrazných rozdílů v hodnocených parametrech semen. U varianty **5% PEG** došlo u pšenice ke stimulaci růstu kořenů oproti nadzemní části u obou genotypů.

Mezi genotypy sóji byly zaznamenány výrazné rozdíly. Genotyp 'Moravians' dosáhl vyšších hodnot u parametrů klíčení. Naopak genotyp 'Mayrika' dosáhl vyšších hodnot u parametrů růstu a vyšší tolerance k suchu. Rovněž se ukázalo, že nízké koncentrace PEG (**5%**) působí na semena sóji stimulačním účinkem u obou zkoumaných genotypů 'Moravians' a 'Mayrika'. Větší stimulační efekt u varianty **5% PEG** byl pozorován u genotypu 'Mayrika' ve všech sledovaných parametrech.

Na základě výsledků vyplývá, že hypotéza této práce byla potvrzena. Existují genotypové a mezidruhové rozdíly v rychlosti klíčení, klíčivosti a růstových parametrech semen pšenice a sóji v závislosti na působení vodního stresu.

**Klíčová slova:** klíčivost, růstové parametry, vodní stres, abiotický stresor, PEG

# Effect of drought on germination of selected genotypes of wheat (*Triticum aestivum* L.) and soybean (*Glycine max* L.)

## Summary

As a result of the constant changes in the Earth's climate, certain areas are losing water that is important for plants. The resulting droughts are becoming a growing problem of global importance. Among abiotic factors in agriculture, drought is the most important, causing water stress in plants, the effects of which affect growth and development at the germination stage and during the growing season. Sown wheat (*Triticum aestivum* L.) and soybean (*Glycine max* L.) respond to water stress by limiting growth in the early developmental stages and even stopping altogether. Depending on the above findings, the effect of artificially induced water stress using PEG (polyethylene glycol) on germination and growth parameters of wheat and soybean seeds was investigated in this study.

On 25 May 2023, an experiment was established with wheat seeds of the genotypes 'Vanessa' and 'Frisky' and on 16 June 2023, an experiment was established with soybean seeds of the genotypes 'Moravians' and 'Mayrika'. The duration of the experiment was always 7 days. The experiment was carried out in the laboratory of the Department of Botany and Plant Physiology, FAFNR, CULS in Prague. The experiment was divided into 4 treatments, control (**K**) and according to the concentration of PEG used (**5%**, **15%** and **25%**). Measurements were taken on the **3rd**, **5th**, and **7th day** after establishment. The parameters evaluated were average seed germination (SG), germination energy (GE), germination rate (GR) and germination index (GI). In addition, root and aboveground length, FM and DM weight and R:S ratio.

The results obtained in this bachelor thesis show that the effect of water deficit on wheat and soybean seeds resulted in a significant reduction of germination and growth parameters in the tested seeds compared to the control variant (**K**), where the conditions for seed growth were optimal. It was found that with increasing levels of water stress, germination rate, germination and seed growth decreased or development was completely inhibited. Wheat proved to be more tolerant, while soybean was more sensitive to drought conditions.

No significant differences in the seed parameters evaluated were found between the wheat genotypes 'Vanessa' and 'Frisky'. In the **5% PEG** variant, wheat showed a stimulation of root growth compared to the aerial part in both genotypes.

Significant differences were observed among soybean genotypes. Genotype 'Moravians' achieved higher values for germination parameters. On the other hand, the genotype 'Mayrika' achieved higher values for growth parameters and higher drought tolerance. It also showed that low concentrations of PEG (**5%**) had a stimulatory effect on soybean seeds in both genotypes 'Moravians' and 'Mayrika' studied. A greater stimulatory effect for the variant **5% PEG** was observed in the 'Mayrika' genotype in all the parameters studied.

Based on the results, it is concluded that the hypothesis of the present study was confirmed. There are genotypic and interspecific differences in germination rate, germination and growth parameters of wheat and soybean seeds as a function of water stress.

**Keywords:** germination, growth parameters, water stress, abiotic stress, PEG

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>Cíl práce.....</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>Literární rešerše.....</b>	<b>12</b>
<b>3.1</b>	<b>Pšenice setá (<i>Triticum aestivum</i> L.).....</b>	<b>12</b>
3.1.1	Historie pěstování pšenice ve světě .....	12
3.1.2	Historie pěstování pšenice v ČR.....	13
3.1.3	Biologická charakteristika .....	13
3.1.3.1	Botanická a morfologická charakteristika pšenice .....	13
3.1.4	Genotypy pšenice.....	14
<b>3.2</b>	<b>Sója luštinatá (<i>Glycine max</i> L.) .....</b>	<b>14</b>
3.2.1	Historie pěstování sóji ve světě .....	14
3.2.2	Historie pěstování sóji v ČR.....	15
3.2.3	Botanická charakteristika.....	15
3.2.3.1	Botanická a morfologická charakteristika sóji .....	15
3.2.4	Genotypy sóji.....	15
<b>3.3</b>	<b>Klíčení.....</b>	<b>16</b>
3.3.1	Definice klíčení .....	16
3.3.2	Průběh klíčení .....	16
3.3.3	Typy klíčení .....	17
3.3.3.1	Jednoděložné rostliny .....	17
3.3.3.2	Dvouděložné rostliny .....	18
3.3.3.3	Hypogeické klíčení.....	18
3.3.3.4	Epigeické klíčení.....	18
3.3.4	Faktory ovlivňující klíčení.....	19
3.3.4.1	Vnitřní faktory.....	19
3.3.4.2	Vnější faktory .....	20
<b>3.4</b>	<b>Stres u rostlin.....</b>	<b>21</b>
3.4.1	Obecná definice stresu .....	21
3.4.2	Stresové faktory .....	21
3.4.2.1	Biotické stresové faktory.....	22
3.4.2.2	Abiotické stresové faktory .....	22
3.4.3	Stresová reakce .....	23
<b>3.5</b>	<b>Sucho .....</b>	<b>24</b>
3.5.1	Definice sucha.....	24
3.5.2	Vliv nedostatku vody (sucha) na klíčení.....	25

3.5.3	Vliv nedostatku vody na růst rostlin.....	27
3.5.3.1	Morfologie .....	28
3.5.3.2	Fyziologie .....	28
3.5.3.3	Biochemie .....	29
<b>4</b>	<b>Metodika.....</b>	<b>31</b>
<b>4.1</b>	<b>Charakteristika rostlinného materiálu .....</b>	<b>31</b>
<b>4.2</b>	<b>Charakteristika pokusných přípravků .....</b>	<b>32</b>
<b>4.3</b>	<b>Charakteristika pokusu .....</b>	<b>32</b>
<b>4.4</b>	<b>Ošetření osiva .....</b>	<b>32</b>
<b>4.5</b>	<b>Postup při zakládání pokusu.....</b>	<b>32</b>
<b>4.6</b>	<b>Založení pokusu pšenice .....</b>	<b>33</b>
<b>4.7</b>	<b>Založení pokusu sója.....</b>	<b>34</b>
<b>4.8</b>	<b>Sledované parametry klíčení semen .....</b>	<b>35</b>
4.8.1	Klíčivost semen (SG).....	35
4.8.2	Energie klíčení (GE).....	35
4.8.3	Rychlost klíčení (GR).....	35
4.8.4	Index klíčivosti (GI) .....	35
<b>4.9</b>	<b>Sledované parametry růstu semen .....</b>	<b>35</b>
4.9.1	Měření kořene a nadzemní části .....	35
4.9.2	Vážení a sušení (FM, DM) .....	36
4.9.3	Poměr Root:Shoot (R:S).....	36
<b>4.10</b>	<b>Zpracování výsledků.....</b>	<b>36</b>
<b>5</b>	<b>Výsledky .....</b>	<b>37</b>
<b>5.1</b>	<b>Vliv sucha na parametry klíčení pšenice seté .....</b>	<b>37</b>
5.1.1	Klíčivost semen (SG).....	37
5.1.2	Energie klíčení (GE).....	37
5.1.3	Rychlost klíčení (GR).....	38
5.1.4	Index klíčivosti (GI) .....	39
5.1.5	Průměrný počet kořenů.....	39
5.1.6	Průměrná délka kořenů .....	40
5.1.7	Průměrná délka nadzemní části .....	41
5.1.8	Hmotnost čerstvé biomasy.....	41
5.1.9	Hmotnost suché biomasy .....	42
5.1.10	Poměr Root:Shoot (R:S) čerstvé biomasy .....	43
5.1.11	Poměr Root:Shoot (R:S) suchá biomasa.....	43
<b>5.2</b>	<b>Vliv sucha na parametry klíčení sóji luštinaté .....</b>	<b>44</b>
5.2.1	Klíčivost semen (SG).....	44
5.2.2	Energie klíčení (GE).....	45
5.2.3	Rychlost klíčení (GR).....	45
5.2.4	Index klíčivosti (GI) .....	46



5.2.5	Průměrná délka kořenů .....	47
5.2.6	Průměrná délka nadzemní části .....	47
5.2.7	Hmotnost čerstvé biomasy .....	48
5.2.8	Hmotnost suché biomasy .....	49
5.2.9	Poměr Root:Shoot (R:S) čerstvé biomasy .....	50
5.2.10	Poměr Root:Shoot (R:S) suché biomasy .....	50
<b>6</b>	<b>Diskuze .....</b>	<b>52</b>
<b>6.1</b>	<b>Parametry klíčení semen a stres .....</b>	<b>52</b>
6.1.1	Pšenice setá ( <i>Triticum aestivum</i> L.) .....	52
6.1.2	Sója luštinatá ( <i>Glycine max</i> L.) .....	53
<b>6.2</b>	<b>Růstové parametry a stres .....</b>	<b>54</b>
6.2.1	Pšenice setá ( <i>Triticum aestivum</i> L.) .....	54
6.2.2	Sója luštinatá ( <i>Glycine max</i> L.) .....	55
<b>7</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>57</b>
<b>8</b>	<b>Literatura .....</b>	<b>58</b>

# 1 Úvod

Změna klimatu představuje dlouhodobé modifikace v atmosférických podmínkách od tropů až po póly. Je to nebezpečí, které začíná ovlivňovat různá odvětví. Zvláště znepokojivým scénářem je zranitelnost zemědělského sektoru na celém světě, kde je ohrožená dostatečná produkce potravin a zásob v důsledku neodvratných výkyvů teplot (Abbass et al. 2022).

Zemědělský sektor je přímo ovlivněn změnou klimatu z důvodu jeho závislosti na průběhu a změnách počasí. Dopady této změny na zemědělský sektor jsou ovlivněny, jak vývojem klimatického systému, stejně tak vztahem mezi počasím a výnosem plodin reagující na nedostatek vody, a tím následné sucho (Crane-Droesch 2018). Takto vzniklé sucho má následně nepříznivé důsledky pro zásobování rostlin vodou, produkci potravin a životního prostředí jako celku. Zejména kvůli těmto velice závažným důsledkům si velká sucha, v minulosti až po současnost, získala širokou pozornost (Liu et al. 2018).

Dle Shaa et al. (2008) je voda klíčová pro růst a vývoj rostlin během celého životního cyklu. Trvalý či dočasný nedostatek dostupné vody v půdním prostředí výrazně omezuje rozrůstání a šíření přírodní vegetace a produktivitu kulturních plodin více než ostatní faktory prostředí.

Nedostatek vody neboli sucho je považováno za jeden z nejzávažnějších abiotických stresů, který může omezovat růst různých rostlin, zejména v suchých a polosuchých oblastech. Účinky sucha na rostliny jsou způsobeny různými faktory včetně nedostatku zavlažovací vody, nízkého srážkového úhrnu, extrémně nízkých nebo vysokých teplot vzduchu a také zasolení (Abdelaal et al. 2021).

Zkoumanou plodinou v bakalářské práci byla pšenice setá (*Triticum aestivum* L.) – genotypy 'Vanessa' a 'Frisky'. Druhou zkoumanou plodinou byla sója luštinatá (*Glycine max* L.) – genotypy 'Moravians' a 'Mayrika'. V současné době je plocha pěstované pšenice v ČR 709,5 tis. ha pro variantu ozimou, která je v našich podmínkách dominantní (MZe 2021). Sója se na území ČR začala pěstovat v omezeném množství před 2. světovou válkou. Až počátkem 90. let se k nám dostaly rané odrůdy z Kanady, díky kterým se pěstební plocha zvýšila na 10 tis. ha. V současné době se na území ČR pěstuje sója na ploše přibližně 19 679 ha (Dostálová 2017; MZe 2021).

Termín stres je často užíván subjektivně a s různými významy. Fyziologická definice a příhodný termín pro stres souvisí s reakcemi na rozličné situace. Stres představuje modifikovaný fyziologický stav, který vzniká v důsledku faktorů, jež mají tendenci narušovat rovnováhu. Zátěž je jakákoliv fyzikální a chemická změna vyvolaná stresem (Shao et al. 2008).

Klíčivost semen a růstové charakteristiky semen jsou klíčovými faktory ovlivňující výnos plodin. Výzkumy naznačují, že index životaschopnosti semen a délka výhonků jsou extrémně citlivé na stres způsobený suchem společně s délkou kořenů a koleoptilů. Délka kořenů, rychlost klíčení semen, konečný růst a klíčivost jsou také ovlivněny množstvím vody v půdě. Absorpce vody semeny výrazně klesá s rostoucí úrovní osmotického stresu (Almaghrabi 2012).

Výsledky této práce dokumentují vliv vodního deficitu v laboratorních podmínkách na semena pšenice seté (*T. aestivum*) a sóji luštinaté (*G. max*).

## 2 Cíl práce

Klíčení semen je ovlivněno působením abiotických stresorů. Sucho, jako významný abiotický stresor, je v současné době velmi aktuální téma. Cílem práce je vyhodnotit vliv navozeného vodního stresu na semena vybraných genotypů pšenice seté (*Triticum aestivum* L.) a sóji luštinaté (*Glycine max* L.). Hypotézou experimentu je, že existují genotypové a mezidruhové rozdíly v rychlosti klíčení, klíčivosti a růstových parametrech semen v závislosti na působení vodního stresu.

## 3 Literární rešerše

### 3.1 Pšenice setá (*Triticum aestivum* L.)

#### 3.1.1 Historie pěstování pšenice ve světě

Pěstování a využití pšenice je od počátků velice úzce spojeno se snahou člověka zajistit si stabilní zdroj potravy a zamezit hladu. Pšenice má dnes zastoupení po celém světě a je řazena k hlavním a velmi důležitým zdrojům potravy pro obyvatelstvo (Igrejas & Branlard 2020).

K prvním počátkům pěstování pšenice ve světě došlo zhruba před 10 000 lety, a to jako součást Neolitické revoluce, která byla charakterizována jako přechod ze způsobu obživy lovem a sběrem na usedlé zemědělství založeném na obdělávání půdy (Shewry 2009).

Murray (1970); Bradley (2014) uvádí, že díky nalezeným archeologickým důkazům by se za pravděpodobné místo prvotního výskytu pěstovaných forem pšenice Starého světa dala označit oblast Úrodného půlměsíce na Blízkém východě. Základem zemědělství v této oblasti bylo mimo pěstování pšenice a ječmene, které byly základními obilninami tehdejší doby, také chov ovcí a koz.

Vůbec první domestikovanou formou byla pšenice jednozrnka (*Triticum monococcum* L.), která měla diploidní počet chromozomů a pěstována byla v oblasti Úrodného půlměsíce. Druhou formou byla tetraploidní pšenice dvouzrnka (*Triticum turgidum* subsp. *dicoccum*), původem z Blízkého východu (Heun et al. 1997).

V Mezopotámii byly objeveny první nálezy dochované civilizace rozprostírající se na březích řek Tigris a Eufrat. Její existence se časuje mezi 9000 až 7000 lety př. n. l. Pomocí radiokarbonové metody byla nalezena divoká forma naduřelé pšenice dvouzrnky (*Triticum turgidum* subsp. *dicocoides*), která byla pravděpodobně předchůdcem domestikované formy. Toto zjištění odkazuje na pravděpodobný pravý původ. Díky malým požadavkům na pěstování a vysoké nutriční hodnotě se divoká forma pšenice stala základem pro zemědělství (Velimirovic et al. 2021).

Zajištění dostatečného množství potravin se stalo pevným základem pro vzestup velkých říší na Blízkém východě a to Babylonu, Asýrie a Egypta. Schopnost pěstovat pšenici měla i zásadní vliv na obyvatelstvo severněji položených oblastí. Zejména z důvodu skladovatelnosti sklizeného zrna, které bylo důležité pro přežití zimy v Evropě. V návaznosti na zmíněných faktorech je pšenice považována za základní stavební kámen, na kterém stojí současná západní civilizace (Curtis & Halford 2014).

Z důvodů expanzivního způsobu vývoje došlo k rozšíření systému hospodaření skrze svět Mediteránu až po oblast Balkánu, a to k ústím řek Dunaje a Rýnu. Studované dokumenty ze stovek nalezišť dokazují pravděpodobné rozšíření po Evropě. Ze zmíněných zdrojů vyplývá, že prvotní důkazy o pěstování pšenice na území Evropy pochází z oblasti Řecka v době 6000 př. n. l., ze kterého došlo k rozšíření do Španělska 5000 př. n. l. Následně na sever až do Anglie a Skandinávie 3000 př. n. l. (Evans & Peacock 1981).

Na území Nového světa se pšenice nevyskytovala a nevyvíjela přirozeně, ale byla dovezena přes Atlantský oceán Kryštofem Kolumbem a jeho posádkou. První přivezená semena byla vyseta v Portoriku roku 1493. V následujících letech po roku 1530 španělští cestovatelé dopravili semena pšenice i do Mexika i na americký jihozápad. Záslouhou

Kapitána Bartoloměje Gosnolda si pšenice našla svou cestu i do Nové Anglie roku 1602 (Davis 2011).

### 3.1.2 Historie pěstování pšenice v ČR

Do oblastí Střední Evropy zasáhlo zemědělství v období 5000 let př. n. l. Hlavní z pěstovaných druhů obilnin byla tetraploidní pšenice dvouzrnka a diploidní pšenice jednozrnka též zvaná pšenice pluchatá neboli obecná. Společně s ní byl pěstován i ječmen a proso (Tempir 1986).

Podle nalezených archeologických důkazů byl první dochovaný záznam o pšenici na území ČR odhadován na období pozdního Neolitu, více než 2000 let před naším letopočtem. Bohužel je velice obtížné blíže specifikovat přesné datum, kdy došlo k systematickému pěstování tehdejšími zemědělci. Velká část historiků a vědců uvádí, že od 6. do 9. století n. l. bylo, na našich polích, hlavní pěstovanou plodinou proso. Nicméně díky svému neustálému vývoji se pšenice stala hlavní obilninou pěstovanou v klimatických podmínkách České republiky (Bonjean & Angus 2011).

V období mezi 8. až 12. stoletím převládalo na území ČR pěstování prosa a pšenice. Konkrétně více výnosových měkkých pšenic, které byly z hlediska zpracování půdy náročnější. Podle nálezů z počátků osídlení slovanským národem byly vytlačeny, z hlediska zpracování půdy, méně náročnější druhy jako primitivní pšenice pluchatá, jednozrnka, dvouzrnka a špalda (Šmelhaus 1980).

Podle Situační a výhledové zprávy, která byla vydána v evidovaném roce 2021 Ústředním kontrolním a zkušebním ústavem zemědělským (ÚKZÚZ) pod správou Ministerstva Zemědělství byla výše osevních ploch pšenice stanovena na 709,5 tis. ha pro pšenici ozimou s hektarovým výnosem 6,47 t/ha a celkovým výnosem 4589,9 tis. tun. Osevní plocha pšenice jarní byla 75,3 tis. ha s hektarovým výnosem 4,93 t/ha a celkovým výnosem 371 tis. tun (MZE 2021).

### 3.1.3 Biologická charakteristika

#### 3.1.3.1 Botanická a morfologická charakteristika pšenice

Pšenice setá (*T. aestivum*) známá také pod názvem pšenice obecná nebo chlebová je autogamní jednoletá rostlina, která spadá do kmene *Triticeae* z čeledi trav (*Poaceae*). Jedná se o alohexaploidní druh složený z 21 párů chromozomů organizovaných ve třech sub-genomech A, B, D, genomu BBAADD,  $2n = 6x = 42$  (Levy & Feldman 2022).

Rostlina pšenice je velmi trsnatá a vytváří od 2 do 5 odnoží na jednu rostlinu. Může dosahovat výšky od 40 do 120 cm, ale co se týče velikosti, květenství a morfologie zrn, dokáže být velice variabilní, a to v závislosti na druhu, genotypu a kultivaru. Přičemž je každý podle potřeb přizpůsoben jiným a specifickým podmínkám prostředí pro růst nebo využití. Podzemní část rostliny je tvořena dvěma typy kořenů, a to semenné a adventivní kořeny. Nadzemní část se skládá ze stébel, která bývají lysá, vzpřímená, válcovitého tvaru s plnými uzly a dutými internodii. Ze stébla vyrůstají po stranách střídavě listy, které jsou ploché 1-3 cm široké a 20-38 cm dlouhé. Velikost listů se odvíjí do jejich přisednutí ke stéblu (van Ginkel et al. 1996).

Dle Zimolky (2005) generativním orgánem u pšenice je složený klas, kde podobně jako u stébla rozlišujeme kolénka a články. Osou klasu je vřeteno, na které jednotlivé klásky přisedají skrze bázi. Na každý jednotlivý článek vřetene klasu připadá jen jeden vícekvětý klásek. Samotný klásek se skládá ze dvou plev bez osin a příslušného počtu květů. Ten může být od 2 do 5, ale i více. Květy jsou obaleny z vnější stany pluchou a vnitřní pluškou. U odrůd s osinatými klasy vyrůstá osina z pluchy. V kvítcích se nachází rovněž pestíky a tyčinky.

V klasu se nachází plod, čímž je v případě pšenice obilka a ta se skládá ze tří částí, těmi jsou obaly, endosperm (jádro) a embryo (zárodek). Vnější obal obilky tvoří oplodí s těsně přiléhajícím osemením (Gooding 2016). Pod vrstvou osemení je přítomna vrstva aleuronových buněk, která hraničí s endospermem. Endosperm je složen z buněk, jež nabývají podoby nepravidelných trojúhelníků až mnohoúhelníků a jsou vyplněné škrobem. Tento úkaz lze pozorovat při příčném řezu. Samotná škrobová zrna mohou být různě veliká čočkovitého tvaru a soustředěně vrstevnatá (Zimolka 2005).

### 3.1.4 Genotypy pšenice

V posledních letech jsou genotypy pšenice seté (*T. aestivum*) z převážné většiny výsledkem kombinace dlouhodobé domestikace a intenzivního šlechtění. Výše zmíněné a praktikované úkony měly za následek výrazné zvýšení podílu zrna na klasech i celkové navýšení tvorby nadzemní biomasy rostliny. V neposlední řadě i adaptace a přizpůsobení stále se měnících klimatických podmínek a pěstitelských technologií. Rozdíly jsou patrné mezi starými a novými genotypy, které mohou být pozorovatelné ve změnách charakteristik porostu, stavby rostliny a klasů v průběhu delších časových řad (Martinek et al. 2022).

## 3.2 Sója luštinatá (*Glycine max* L.)

### 3.2.1 Historie pěstování sóji ve světě

Předchůdcem dnešní kulturně pěstované sóji luštinaté (*Glycine max* L.) byla, jak je všeobecně známo, divoká sója (*Glycine soja* L.) pocházející z oblastí východní Asie, konkrétně Číny, Koreje a Japonska. Dochované záznamy zmiňují, že k prvnímu kulturnímu pěstování sóji došlo přibližně před 4500 lety na území dnešní Číny (Lee et al. 2015).

Na území Asie byla potravinářská sója pěstována již od roku 2800 př. n. l. První zmínky o jejím pěstování v Evropě byly díky dochované dobové literatuře datovány do 17. století a až na počátku 18. století byla vyseta v botanických zahradách, čímž se dostala do povědomí obyvatelstva (Třtře 2022).

V průběhu 18. století se sója kromě rozšíření na území Evropy dostala i do Ameriky. Ve Spojených státech začalo pěstování sóji výrazně stoupat v 20. století. Z počátku se sója pěstovala za účelem zeleného hnojení a krmiv pro hospodářská zvířata. S rozvojem šlechtění sóji přišly nové odrůdy, díky kterým se začala využívat jako základní surovina pro řadu průmyslových výrobků jako je sójový olej a sójová mouka. A následně se stala klíčovou plodinou (Wilcox 2004).

Z hlediska plochy, na které se kulturní sója pěstuje, je v současné době čtvrtou nejrozšířenější plodinou na světě. Její výměra ve světě přesahuje 100 mil. ha. Největšími světovými producenty jsou USA, Brazílie, Argentina a Čína (Baranyk et al. 2010).

### 3.2.2 Historie pěstování sóji v ČR

Na území České republiky se sója začala při omezených možnostech pěstovat už v době před 2. světovou válkou. Ale pouze na malých plochách v nejteplejších oblastech. Při pěstování sóji v našich klimatických podmínkách nastává problém ve splnění růstových parametrů. Konkrétně teplotních podmínek, které plodina potřebuje. Počátkem 90. let se k nám dostaly rané odrůdy z Kanady, což mělo za následek rozšíření pěstebních ploch, které dosáhly úrovně přibližně 10 tis. ha (nejvíce v r. 2015 – 12 tis. ha). Podobného vývoje se dostalo i dalším evropským zemím (Dostálová 2017).

V České republice byl v posledním sledovaném roce 2021/22 zaznamenán nárůst meziroční výměry ploch pěstování o 5 534 ha na celkovou plochu 19 679 ha. Průměrný výnos sóji na našem území a v místních podmínkách byl podle zkoumaných let od 3 až do 3,5 t/ha, přičemž celková produkce dosáhla 51 456 tun (MZe 2021).

### 3.2.3 Botanická charakteristika

#### 3.2.3.1 Botanická a morfologická charakteristika sóji

Sója luštinatá (*G. max*) je luštěnina spadající do čeledi *Fabaceae*, která zahrnuje ještě dalších 40 druhů rostlin. Jedná se o jednoletou, dvouděložnou bylinu, jejíž výška dosahuje od 25 do 200 cm (Kurbanbaev et al. 2023).

Rostlina sóji má silnější křovitý kořen, který je bohatě větvený. Kořeny prvního a druhého řádu jsou stejné délky jako křovitý hlavní kořen a většina kořenové hmoty je rozmístěna v ornici vrstvě. Lodyha tvoří hlavní nadzemní část rostliny a je její osou, na níž nasedají listy, květy a plody. Je přímá, tenká nebo tlustá a u starých odrůd i ovíjívá. Z lodyhy se rostlina sóji dále větví, čímž obsazuje volný prostor kolem sebe. Větve se mohou tvořit po celé délce. Ovšem při nedostatku rostlin může volný prostor obsadit jen částečně. Listy jsou trojčetné, střídavé a dlouze řapíkaté s velkou asimilační plochou. Při zdravém růstu mohou svou velikostí potlačovat výskyt plevelů. Mimo pravých listů má sója i palisty přirostlé k lodyze. Květy sóji jsou oboupohlavní, souměrné, motýlovité a rostou v hroznech z úžlabí listů. Sója má pětičetný kopinatý kalich a nestejně dlouhé kališní lístky. Pavéza je krátká, úzká a přiléhá k rovnému tupému člunku. Samotná koruna je pak světle fialová nebo bílá. Je samosprašná, ale může dojít i k cizímu sprášení. Kvetení trvá až 3 týdny. Plodem je podlouhlý chlupatý lusk, který je mezi semeny zaškrcovaný. Může být zobánkatý a různého tvaru, velikosti i barvy. Počet lusků na jedné rostlině je od 10 do 400 (Baranyk et al. 2010).

### 3.2.4 Genotypy sóji

Na počátku 90. let bylo ve Státní odrůdové knize na území ČR k pěstování registrováno jen 5 genotypů sóji. Po přelomu tisíciletí se situace v Čechách výrazně změnila. Zejména z důvodu dovozu raných genotypů kanadského původu vyšlechtěných ve velmi podobných podmínkách jako jsou v oblastech střední Evropy. Kombinace těchto faktorů výrazně povzbudila registrovanou genotypovou skladbu a výrazně větší uplatnění této kulturně pěstované plodiny v ČR (Houba et al. 2009).

V podmínkách České republiky je třeba volit adekvátní genotypy sóji. Primární uplatnění na našich polích by měly mít genotypy se schopností poskytovat dobrý výnos při kratší vegetační době, a to do cca 130 dnů. Důležité je zohlednit použití odrůd z hlediska odolnosti vůči chladu, kvůli vyšším nárokům sóji na teplo. Pro jižní Moravu a Severo-západní Čechy zejména i odolnost proti suchu (Baranyk et al. 2010).

### **3.3 Klíčení**

#### **3.3.1 Definice klíčení**

Šerá (2014) ve své práci publikuje, že klíčivost, jinak řečeno, schopnost semen vyklíčit je jednou z několika, v praxi používaných a měřených, charakteristik, kterou se vyjadřuje fitness dané měřené populace rostlin. Lze od ní odvodit kvalitu osiva a též udává životaschopnost embryí. Plně vyvinuté zralé semeno (plod), kterým může být například nažka nebo obilka) se označuje u kvetoucích rostlin jako klidové stádium, při kterém jsou všeobecné životní projevy výrazně omezeny. Samotné semeno dosahuje vnitřního obsahu vody jen okolo cca 5-15 % a jeho téměř jediný projev života je velmi slabé dýchání, u nějž spotřebovává dostupný kyslík a vylučuje oxid uhličitý. V tomto klidovém stádiu jsou semena velice dobře schopná odolávat různým nepříznivým podmínkám v prostředí, které je během vývojového cyklu mohou potkat. Například extrémní teploty, sucho, omezený přístup kyslíku či tma.

Klíčení semen je velice komplexní fyziologický a biochemický proces. Zahrnuje přenos signálu a regulaci genové exprese (Li et al. 2017).

Produkce životaschopných semen rostlinou, jejich rozšíření do prostředí a následná schopnost klíčení hrají v životním cyklu rostlin velice důležitou roli. Velice úzce se váže k přežití všech rostlinných druhů a produkci druhů kulturních. Po opuštění mateřské rostliny je hlavním úkolem semene ochránit embryo uvnitř a dopravit se do prostředí s ideálními podmínkami k zahájení procesu klíčení, a tím i dokončení životního cyklu rostliny (Carrera-Castaño et al. 2020; Farooq et al. 2022).

Bewley & Black (1994) obecně definují, že událostí spojené s klíčením mají počátek v prvotním nasání vody suchým semenem až po konec klíčení, kdy dojde k prodloužení osy embryonálního zárodku daného semene.

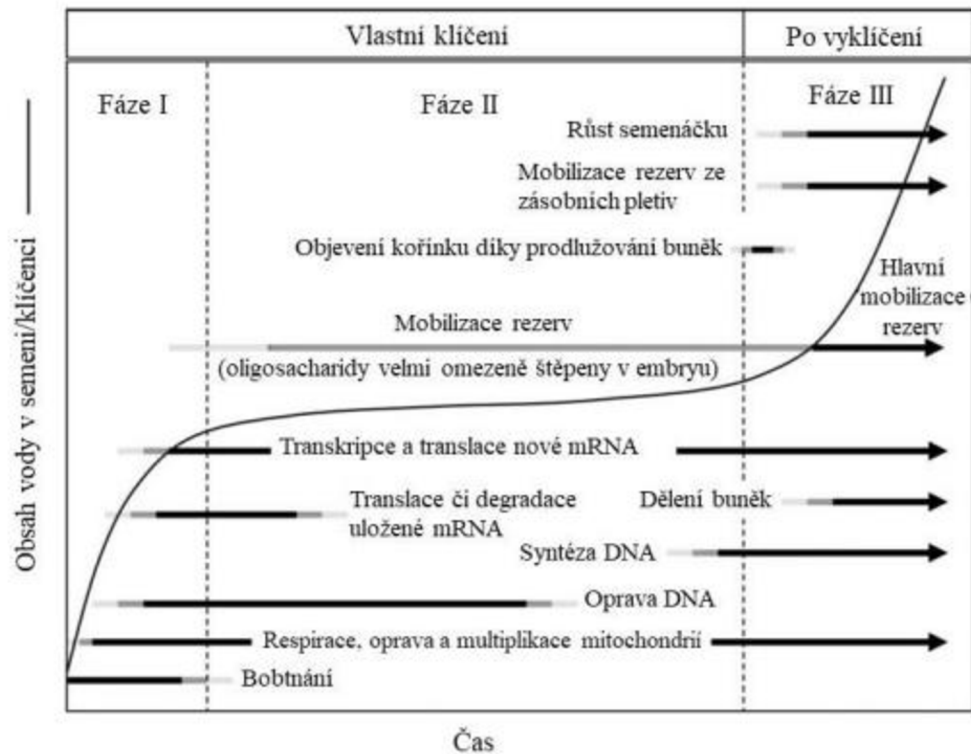
Pozorovatelným znamením, že došlo k vyklíčení semene, je obvykle penetrace vnějších vrstev semene kořenem, jehož počátek tkví v embryu semena. Tento jev nazýváme viditelným klíčením. K následným událostem dochází ve spojení s přesunem zásobních látek v semenu, kterými se vyživuje nově vzniklý semenáček, u nějž dochází k prodloužení (Bewley 1997).

#### **3.3.2 Průběh klíčení**

Graficky znázorněný průběh vývinu během klíčení v závislosti na příjmu vody semenem v čase (Obrázek 1). Zpočátku, kdy se k životaschopnému suchému semenu dostane voda, dochází k velice rychlému nasávání vody (fáze I). Tento jev pokračuje do té doby, dokud nejsou všechny matrice i s veškerým obsahem buněk plně hydratované. Po skončení první fáze nastává interval, při kterém je příjem vody značně omezen (fáze II). V druhé fázi semeno, které nedokončí klíčení, přetrvává bez změny. Jedná se zpravidla o semena, která jsou ve vegetačním klidu nebo mrtvá. K následnému zvýšení příjmu vody dochází s fází III., která je lehce spojená



s konečným klíčením i když jen v malém množství. Po takto mírně zvýšeném příjmu vody dochází následně k ještě větší absorpci. Je to primárně v důsledku zvyšování objemu buněk rostoucího kořene a zbytku semenáčku. To způsobují mitotická dělení a buněčné expanze. Rozdělení klíčení do třech fází (Obrázek 1) je vhodné pro celkovou ilustraci událostí, ke kterým dochází v semenech během klíčení. Ovšem u řady druhů rostlin nelze klíčení tímto způsobem efektivně rozdělit. Například u semen větší velikosti může klíčivost při příjmu vody, do rezervami zatížených kotyledonů, pokračovat i po objevení kořene. Zmíněné fáze nevyjadřují probíhající metabolické děje, k nimž dochází uvnitř semen, a to kvůli jejich splývání (Nonogaki et al. 2010).



Obrázek 1 – Schéma časového průběhu fyzikálních a metabolických dějů během klíčení (upraveno dle Nonogaki et al. 2010)

### 3.3.3 Typy klíčení

#### 3.3.3.1 Jednoděložné rostliny

Jednoděložné rostliny (*Liliopsida*) jsou jednou z hlavních skupin krytosemenných rostlin. Řadí se sem paleta různých druhů od trav až po lilie a orlíky. Typické pro rostliny náležící do této skupiny je přítomnost jen jediného embryonálního listu (monokotyly) v klíčícím semenu, paralelní žilnatina listů a obvykle trojčetné nebo násobné číslo v počtu orgánů v květu (Simpson 2010).

Termín jednoděložné rostliny je označení pro charakterizovanou skupinu rostlin, jejichž znakem je růst vzrostného vrcholu, který vychází z jediné semenné dělohy nazývané kotyledon. U většiny jednoděložných druhů rostlin je hlavní kořen krátkodobý, což má za následek rychlý růst dalších adventivních kořenů. V mnoha případech nabývají vláknité podoby. U všech druhů je absence sekundárního tloušťnutí cévního kambia. Ovšem u některých druhů může nadzemní

část nabývat dřevnaté podoby, a to z důvodu druhotnému tloušťnutí korkového kambia. Většina rostlin nabývá podoby malých bylin, ale některé mohou nabývat i větších rozměrů. Zejména v důsledku sekundárního tloušťnutí meristému a druhotného růstu (Les 2020).

### 3.3.3.2 Dvouděložné rostliny

Dvouděložné rostliny (*Magnoliopsida*) představují jednu ze dvou hlavních skupin kvetoucích rostlin nazývaných dvouděložné nebo dikotyly. Charakterizují se přítomností dvou embryonálních listů (cotyledonů) v klíčícím semeni. Tato skupina rostlin zahrnuje mnoho druhů, od bylin až po stromy, s různými tvary listů, květů a plodů (Mauseth 2008).

Sazenice tedy semenáček dvouděložné rostliny se typicky skládá z hlavního kořene, jednoho páru děložních (kotyledonárních) lístků a plumulárního pupenu s následnými internodii a eofyly. Dokončení klíčení semen u dvouděložné rostliny se vyznačuje rašením plumule ze semena. Tím se uvede do fáze semenáčku (Ghosh & Pal 2015).

U dvouděložných rostlin je, při použití příčného řezu, struktura stonku při rozboru složena z několika částí. Od vnější strany směrem do středu se nachází vrstvy epidermis, kůra a pravidelně rozmístěný prstenec buněk cévního svazku interfascikulárních pletiv. Charakterizovány jsou pomocí sekundárního tloušťnutí buněčné stěny a parenchymatózních dřevných buněk s tenkými primárními buňkami. Přičemž všechny různé buněčné vrstvy jsou velmi dobře definované a mají rozdílné funkce (Wang et al. 2010).

Během klíčení prochází semeno dvouděložných rostlin řadou transformací. Aby bylo schopné vyrůst v dospělého jedince, celý tento proces je velice složitý a zabírá určitý časový interval. Celý proces zahrnuje sérii na sebe navazujících kroků. Prvním krokem je samotné zahájení klíčení. To nastává absorpcí vody, čímž se aktivují biochemické reakce a enzymy. Dále následuje rozpad semenných obalů. Některé druhy mají obal semen tvrdší a je nutné jej nejdříve rozložit. Proces probíhá buď mechanicky, nebo díky expozici vody či chladu. Následně se aktivují enzymy, které rozkládají zásobní látky obsažené v semenu na jednodušší formy, čímž se inicializuje počátek růstu nové rostliny. Postupem času dochází k růstu kořene a klíčku, které vyrůstají ze semene do půdy (Bewley & Black 1994; Kucera et al. 2005; Nonogaki 2019).

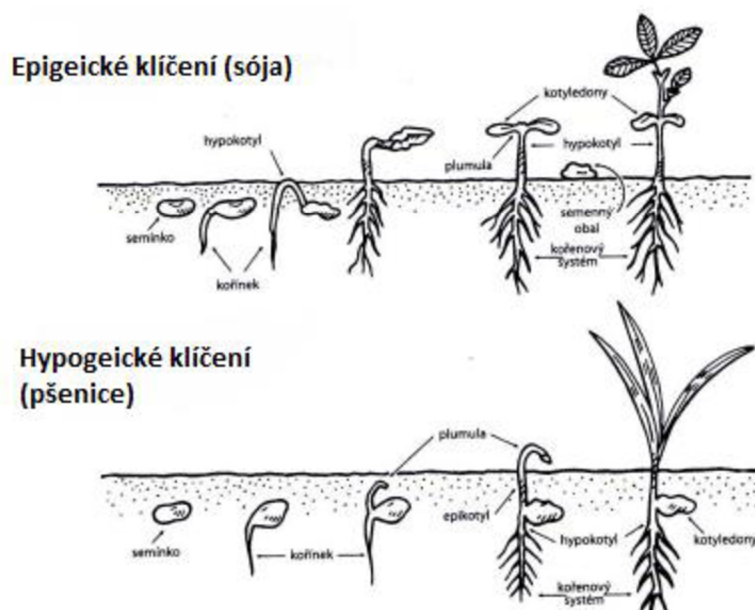
### 3.3.3.3 Hypogeické klíčení

Hypogeický způsob klíčení (Obrázek 2) je typický pro všechny druhy trav. Jako například pšenice nebo kukuřice, ale i pro široké spektrum dalších druhů. Při tomto typu klíčení zůstávají zásobní orgány semen neboli kotyledony skryté v půdě, zatímco plumule si nachází cestu skrz půdu a prorůstá až na její povrch. U druhů s hypogeickým typem klíčení je epikotyl prodlužující se strukturou. Bez ohledu na podzemní nebo nadzemní umístění semene, zásobní část obsahuje živiny, které zajišťují podporu růstovým bodům během klíčení (Joshi 2018).

### 3.3.3.4 Epigeické klíčení

Joshi (2018) ve své práci uvádí, že epigeické klíčení (Obrázek 2) je nejvíce charakteristické pro určité druhy luštěnin jako fazol nebo sója, ale i pro borovice. Obecně je považováno z hlediska evoluce za primitivnější než klíčení hypogeické. U epigeického mechanismu klíčení se kotyledony a zásobní orgány protlačí skrze půdu na povrch, kde dále

poskytují oporu rostoucím bodům. K tomu dochází při zakládání kořenu, přičemž díky prodlužujícímu se hypokotylu, si kotyledon a stále uzavřené plumule nachází cestu vzhůru. Poté co dosáhne nad půdu, kotyledony se otevrou, plumule dále roste a zakládá děložní listy, které postupem času odumřou a opadnou.



Obrázek 2 – Grafické znázornění hypogeického a epigeického průběhu klíčení u pšenice a sóji (upraveno dle Čermák et al. 2004)

### 3.3.4 Faktory ovlivňující klíčení

Klíčivost semen mnoha rostlin může být ovlivněna různými vnějšími faktory a vnitřními charakteristikami samotného semene. Bez pochopení těchto vlivů a bez odpovídající znalosti reprodukčních technik a semenné biologie by bylo náročné produkovat sazenice z těchto semen (Bareke 2018).

#### 3.3.4.1 Vnitřní faktory

Dormance je jedna z vnitřních adaptivních vlastností semen, jejíž funkce je zabránit procesu klíčení za aktuálních podmínek, ve kterých se dané semeno nachází, ale i možných očekávaných podmínek budoucích, jež by mohly výrazně negativně ovlivnit průběh klíčení. A tím i snížit pravděpodobnost úspěchu klíčení nebo přežití sazenic. V případech, kdy se vlivem dormance klíčení zpomalí, zůstávají klidná semena uložená v půdě v trvalé semenné bance po řadu měsíců, ale i desetiletí. Zejména dokud vnější podmínky nebudou natolik příznivé k zahájení klíčení sazenic (Pausas & Lamont 2022).

Dormance se dělí na primární a sekundární. Primární znamená, že semena rostliny vyžadují velmi specifické podmínky pro zahájení procesu klíčení. Pro příklad výrazné snížení okolní teploty po dobu určité časové periody, jejíž trvání záleží na konkrétním druhu. Nebo dále dozrání semena tím, že po opuštění mateřské rostliny dosychají mimo. Indukcí sekundární dormance se rozumí situace, kdy již nedormantní semeno je vystavené náhlým a trvalým

nepříznivým podmínkám. Působení nevalných podmínek vrací semeno zpět do klidového stadia tedy dormance. Primární dormance může být vyvolána působením fyzických vlastností. Jako přítomnost voděodolných obalů na vnější straně semen, které zabraňují infiltraci vody dovnitř semen, ale také fyziologicky prostřednictvím rostlinných hormonů (Reed et al. 2022).

Dle Kildisheva et al. (2020) všechna životaschopná semena, která jsou posbírána čerstvě po opuštění mateřské rostliny, se považují za dormantní, a to zejména pokud nevyklíčí do 4 až 6 týdnů v příznivých podmínkách pro jejich vyklíčení, což znamená dostatek vody v okolí, ale i příznivé teploty.

U kulturně i nekulturně pěstovaných plodin se může vyskytnout zbytková primární dormance v období setí, čímž se výrazně sníží procento vyklíčených jedinců a rychlost jejich vyklíčení na jednotku plochy. Tento jev označený jako převrácená hodnota klíčení ovlivňuje uniformitu a zvyšuje mezerovitost porostu. U většiny sklizených plodin je jednotnost v porostu důležitým faktorem z hlediska následné sklizně kvůli různým stádiím vývoje rostlin a tím nesourodé kvality sklizeného produktu. Ze zmíněných důvodů se postupným procesem domestikace praktikuje selekce. Účelem je eliminovat nebo alespoň minimalizovat dopady dormance v osivech. Dále upřednostňovat rychlejší klíčení, zvyšovat rozsah prahových teplot a vodní potenciál všech druhů (Reed et al. 2022).

#### 3.3.4.2 Vnější faktory

Semeno musí být vystaveno příhodným podmínkám prostředí, včetně dostupnosti vody, optimálních teplotních podmínek, dostatečného přísunu kyslíku a občas i světla. Navíc mohou být nezbytné různé druhy hub nebo jiných mikroorganismů, které hrají klíčovou roli při rozkladu obalu semene a umožňují proces klíčení (Bareke 2018).

Rozsah působení dormance u klíčících semen má vliv na zahájení procesu klíčení. Ve velké míře je ovlivněn i podmínkami prostředí, do kterých se klíčivé semeno dostane po opuštění mateřské rostliny. Mezi hlavní faktory ovlivňující semeno patří především okolní teplota, dostupnost slunečního záření, zásoba vody v prostředí, ale také množství dusičnanů v půdě (Finch-Savage & Footitt 2017).

Teplota patří, z hlediska působení vnějších vlivů, k nejdůležitějším faktorům, které ovlivňují vnitřní procesy jako je dormance a načasování klíčení. Vliv sezónních změn teplot během vývoje semen udává, do jak hluboké dormance bude semeno uvedeno v závislosti na zralosti. U mnoha rostlinných druhů může vliv nižších teplot mít za následek zvýšení hloubky dormance, kdežto rostliny, jejichž dozrávání probíhá za teplot vyšších bývá hloubka dormance při zrání nižší (Footitt et al. 2011; Chahtane et al. 2017; Yan & Chen 2020).

Xue et al. (2021) publikuje, že voda i její množství a dostupnost také hrají velice důležitou roli v klíčení semen. Její hlavní úkon spočívá v hydrataci klíčivého semena. Hydratací semene dochází k podpoře aktivity protoplazmy, dále poskytování rozpuštěného kyslíku pro rostoucí embryo a zvyšování propustnosti skrze semenný obal. Voda také napomáhá při praskání semene a jeho obalů během procesu klíčení a umožňuje přeměnu, jinak nerozpustný zásob potravy uvnitř, na rozpustnou formu a její translokaci do embrya.

## **3.4 Stres u rostlin**

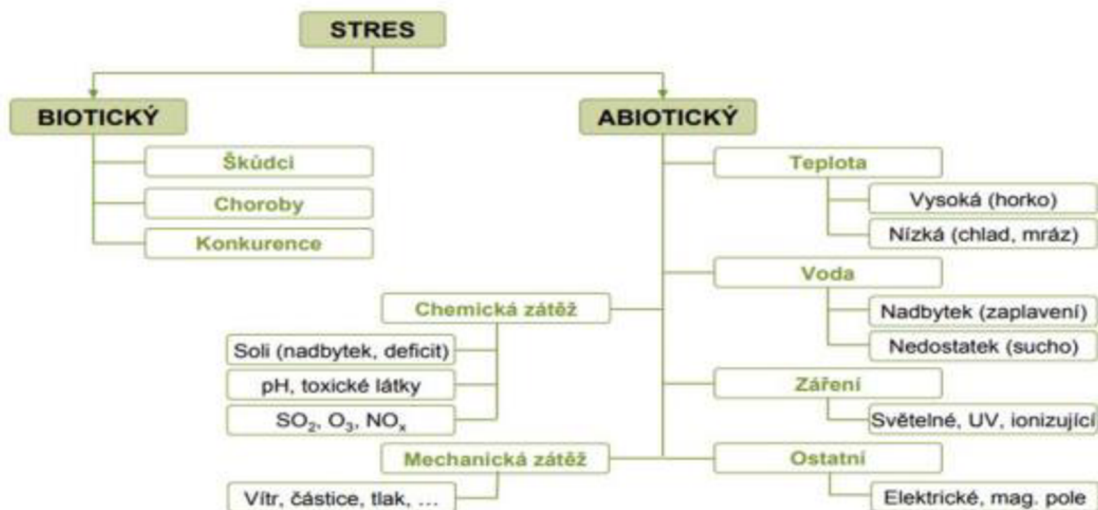
### **3.4.1 Obecná definice stresu**

Stres u rostlin označuje soubor vnějších podmínek prostředí, které negativním způsobem ovlivňují růst, vývoj a celkovou produktivitu rostlin během jejich celého životního cyklu. Působení daných stresových faktorů vyvolává širokou škálu reakcí u rostlin jako je změna genové exprese, buněčného metabolismu, proměny v celkovém růstu, změny výnosu u produkčních plodin a další. Důvody takové reakce, která je u rostlin vyvolána, bývá zpravidla způsobena náhlými změnami v prostředí, v nichž se rostlina vyskytuje. Na druhou stranu u rostlinných druhů, které jsou vůči stresu tolerantní, se dané působení stresu projevuje jen částečně a v daleko menší míře. Reakce následně vede k přizpůsobení se danému stresovému faktoru v závislosti na čase. Rostlinný stres lze zpravidla rozdělit na dvě primární kategorie. Tím je stres biotický a abiotický (Gull et al. 2019).

Hlavní abiotické stresové faktory jako je sucho, vysoké a nízké teploty a salinita, mají celosvětově významný dopad na snížení výtěžku plodin. Všechny rostliny, včetně plodin, vyvolávají reakci na stres. Může vést buď k pasivnímu přežití v metabolickém neaktivním klidovém stádiu (semeno), nebo k aktivní stresové rezistenci, kde rostlina reaguje na stresové podmínky. Stresová odolnost zahrnuje strategii vyhýbání se stresu, což jsou reakce zaměřené na udržení nestresovaných podmínek na buněčné úrovni a úrovni pletiv a tolerance vůči stresu. Jedná se o aktivní reakce rostlin na změny způsobené stresem (Kosová et al. 2018).

### **3.4.2 Stresové faktory**

Hydrosféra, atmosféra a pedosféra vytvářejí ve společné kombinaci podmínky pro růst a vývoj rostlin. Mimo jiné je vhodné prostředí pro rostliny ovlivněno i fyzikálními a chemickými faktory. Společně s vlivem dalších organismů definují jejich konkrétní stanoviště, ať už příznivě či negativně ovlivňují podmínky pro úspěšné dokončení cyklu a přežití rostlinného jedince. Prostředí stanoviště pro růst je ovlivněno kombinací souborů vnějších abiotických a biotických faktorů (Obrázek 3). Tyto vlivy mohou působit na individuální organismus nebo na celé populace (Larcher 2003).



Obrázek 3 – Rozdělení stresových faktorů (upraveno dle Cerkal 2011)

#### 3.4.2.1 Biotické stresové faktory

Biotický stres u rostlin lze charakterizovat jako vnější poškození rostliny jiným živým organismem nebo i skupinou více různých dílčích organismů. Příkladem jsou houby, bakterie, viry, parazitická hád'átka, hmyzí škůdci, plevele i člověk. Míra poškození biotickými vlivy a následná ztráta na výnosech a biomase u plodin je závislá na celé řadě faktorů. Jedná se o konkrétní podmínky prostředí, vývojové fáze dané rostliny nebo druh kauzálně působícího organismu (Moustafa-Farag et al. 2020).

Plísňové napadení, jejichž původcem jsou ve většině případů houby, mohou být nekrotrofní nebo biotrofní. Nekrotrofní zabíjejí hostitelskou buňku sekrecí toxinu. Biotrofní se vyživují živou hostitelskou buňkou. Napadení rostliny houbou může mít za následek vaskulární vadnutí, skvrnitost listů a rakovinu rostlin. Hlístice parazitují na živých částech rostlin a primárně způsobují půdní choroby, které mohou mít za následek omezení přísunu živin k rostlině, následné zastavení růstu a vadnutí. Viry jsou podobně schopné způsobit lokální, ale i systémové poškození, které vede k projevům chlorózy a zakrnutí. Na druhou stranu hmyz a roztoči poškozují rostlinné orgány saním rostlinných šťáv tím, že propíchnou obal rostlinné buňky nebo kladou svá vajíčka na povrch listů (Iqbal et al. 2021).

#### 3.4.2.2 Abiotické stresové faktory

Z důvodu přisedlé povahy setrvávají rostliny na jednom stanovišti bez možnosti přesunu. Musí tak čelit celému spektru abiotických stresorů, mezi které patří těžké kovy, zasolení půdy, vodní deficit (sucho), nedostatečné množství potřebných živin v okolí kořenové soustavy, intenzita světla a jeho složení, kontaminace pesticidy v polních podmínkách ale i mimo ně, a v neposlední řadě extrémní teploty. Zmíněné stresy, ve větším i menším měřítku, negativně ovlivňují produkci kulturních plodin a obecně potravinovou bezpečnost po celém světě. Primární omezení, k němuž dochází při působení abiotického stresu, je výrazné snížení schopnosti a účinnosti fotosyntézy u rostlin, a to z důvodu negativních vlivů na biosyntézu

chlorofylu, výkonnost a funkce fotosystémů, mechanismy výměny elektronů, parametry výměny plynů a dalších (Sharma et al. 2020; Verma et al. 2021).

Reaktivní formy kyslíku (ROS) vyvolané působením abiotického stresu mají inhibiční účinek na růst rostlin. Způsobují snížení výnosu primárně z důvodu výrazného redukcí obsahu chlorofylu, a tím i omezení fotosyntézy. Způsobené škody velice závisí na intenzitě a trvání abiotického stresu (Naing & Kim 2021).

### 3.4.3 Stresová reakce

Vliv environmentálních stresů u rostlin vyvolává široké rozpětí reakcí v závislosti na typu stresu, jeho intenzitě a trvání. Rozmezí reakcí může začínat od změn genové exprese a buněčného metabolismu až po změny v růstu a produktivitě (Anjum et al. 2011).

Reakce různých rostlinných druhů na stesy způsobené podmínkami stanoviště je komplexní jev. Mezidruhově se od sebe výrazně liší, a to projevem sérií individuálních rysů. Mimo toto zjištění se i dodatečně dokázalo, že působení faktorů abiotické povahy stimuluje multi-genové reakce skrz modifikace ve způsobu ukládání a akumulaci primárních a sekundárních metabolitů. Studovaný obor metabolických změn při působení stresu by mohl být slibným způsobem, jak interpretovat reakce a tolerance biotických a abiotických stresů u rostlin. Sledování a profilování metabolických projevů mělo za následek objevení různých typů metabolitů, mezi které patří přítomnost aminokyselin, sacharidů, fenolů, polyamidů, terpenů a dalších nacházejících se v tělech rostlin (Salam et al. 2023).

Rostliny kvůli působení podmínek vnějšího prostředí musely na zmíněné faktory reagovat a přizpůsobit svou životní strategii náročným vlivům prostředí za účelem přežití. Jejich jedinečné buněčné systémy, kterými oplývají, se zapojují do environmentálních reakcí. Tím následně získávají odolnost proti danému působícímu stresu. Postupem let bylo přesně identifikováno a charakterizováno mnoho genů, které mají vliv a regulují reakce a odolnost vůči různým abiotickým stresům. Tyto geny jsou zodpovědné za různorodé buněčné funkce související s odolností vůči stresu a přenosu signálu. Avšak jejich koordinace mezi kořeny a listy, z hlediska celé stavby rostliny, se zatím objasnit nepodařilo (Takahashi & Shinozaki 2019).

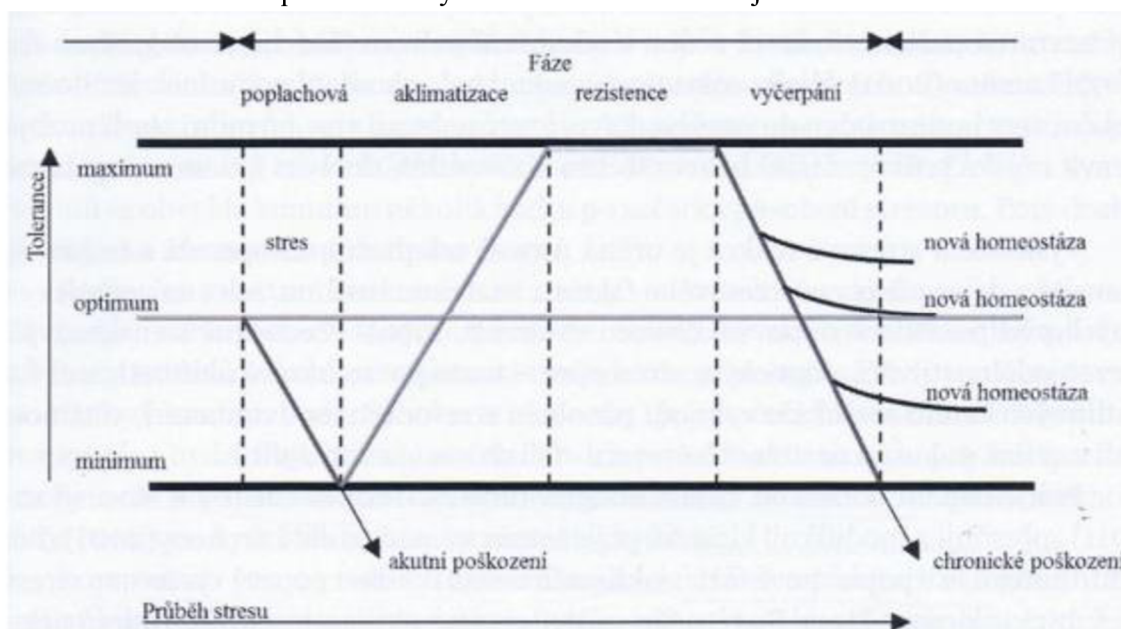
Různé stesy, které mohou na rostliny v prostředí působit, jako je zima, sucho a vysoké zasolení sdílejí řadu společných rysů. Jejich projevy mohou mít podobné účinky a dopady na rostlinu. Například mohou stesy způsobovat osmotický stres pro rostlinné buňky (Gong et al. 2020).

Imunitní systém rostlin si v průběhu let vývoje osvojil četné mechanismy, jak se vypořádat s působením abiotického či biotického stresu nebo jejich vzájemnou kombinaci a jejich detekci. To může mít za následek indukci v produkci sekundárních metabolitů. Způsoby detekce zahrnují transmembránové rozpoznávání. Pro příklad reakci při rozvoji patogenů nebo mikrobiální napadení, a to produkcí polymorfního proteinu NB-LRR většinou R-genů (Isah 2019).

Li et al. (2021) uvádí, že důležitého pokroku bylo dosaženo v oblasti molekulárních reakcí rostlin na abiotické stesy. Kyselina abscisová (ABA), gibereliny (GA), auxiny (IAA), ethylen (ETH), cytokininy (CK), brassinosteroidy (BR) a další rostlinné hormony mají

významný vliv a hrají nenahraditelnou roli při regulaci růstu a klíčení semen, na které působí abiotické stresy. Velké pozornosti se dostává zejména syntéze kyseliny abscisové. Transdukce signálu a jeho transport je významným krokem k pochopení schopnosti rostlin odolávat abiotickým stresům. Všechny reakce, které rostliny vykazují v závislosti na působícím abiotickém stresu, jsou na molekulární úrovni hlavně geny regulující syntézu osmoreaktantů a transportérů a kódující regulační proteiny. Mezi ně patří proteinkinázy, fosfatázy a transkripční faktory.

Dle Levitta (1980) a Kosové et al. (2018) lze stresovou reakci rozdělit do následujících na sebe navazujících fází probíhajících v rostlině, která je vystavená stresovým podmínkám. Počátečním stadiem, kdy dojde k poškození buněčných struktur a funkcí, je fáze poplachová. V situaci, kdy intenzita stresového faktoru nepřekročí úroveň s nevratnými následky, se aktivují kompenzační mechanismy a následuje fáze aklimatizace. Fáze aklimatizace směřuje k posílení odolnosti vůči působícímu stresu. Následuje fáze rezistence, která zahrnuje opatření vedoucí ke zvýšení celkové odolnosti organismu vůči stresovým podmínkám. Při dlouhodobém působení stresu může dojít k vyčerpání rostlinného organismu (fáze vyčerpání) a nakonec k odumření rostlin. Grafické znázornění průběhu daných fází stresové reakce je znázorněno na Obrázku 4.



Obrázek 4 – Grafické znázornění průběhu stresové reakce (upraveno dle Kosové et al. 2011)

## 3.5 Sucho

### 3.5.1 Definice sucha

Sucho patří z hlediska vlivu na prostředí k nejsložitějším hydro-klimatickým nebezpečím. Zejména z důvodu velmi obtížného určení jeho dopadu, závažnosti a konkrétních účincích. Především kvůli jeho velkému záběru v počtu systémů, které postihuje. Obtížnost v obecném definování stresu ze sucha také komplikuje samotné měření, a to z důvodu nejasných počátků a konců, kdy sucho působí v prostorovém rozsahu události. Přičemž se složitost promítá i do časových procesů, které s nimi úzce souvisí (Vicente-Serrano et al. 2020).

Obecně přijímané definice související s definicí sucha klasifikují sucho jako deficit proměnných pevně souvisejících s vodou anebo případů, které s vodou úzce souvisí. Jako jsou



srážkové poměry, stav půdní vlhkosti, zadržování povrchové a podzemní vody v důsledku přirozených variabilit daného prostředí mimo možnosti a kontrolu člověka (AghaKouchak et al. 2021).

Pojmem sucho, v souvislosti s rostlinami, rozumíme situaci, kdy je vodní potenciál půdy výrazně snížen. Což má za následek velmi silné zvýšení příjmů vody skrze kořeny rostlin (Kosová et al. 2018).

Dostupnost vody během celého životního cyklu rostlin je s velkou pravděpodobností nejdůležitějším faktorem omezující jejich růst a produktivitu. V důsledku klimatických změn, které mají vliv na vyrovnanost a úhrn srážek způsobují společně se zvyšujícími se teplotami, že v mnoha regionech jsou problémy se suchem stále častější. V závislosti na změnách se zvyšuje poptávka po zdrojích pitné vody a objevuje se obtížný úkol pro celé odvětví zemědělství. Avšak možnost stálého zavlažování nemusí být v polním prostředí úplně udržitelné řešení celého problému. Proto vzniká tlak na objevení a šlechtění nových genotypů kulturních plodin, které budou vůči stále větší hrozbě sucha, způsobené změnami klimatu, odolné (Gambetta et al. 2020).

Ault (2020) publikuje, že sucho lze klasifikovat z hlediska jeho dopadu, což přímo definuje velmi přibližně časovou závislost pro každý jednotlivý typ. Rozdělujeme ho na meteorologické sucho pocházející z nedostatečného množství srážek, které dopadly za několik po sobě jdoucích týdnů. Na druhou stranu zemědělské sucho má přímo negativní vliv na finální úrodu a může být v tomto stavu i několikaměsíční. Kdežto hydrologické sucho se odvíjí v sezónním a meziročním časovém horizontu. Především v důsledku vyčerpání různých vodních toků nebo hladin nádrží. Jako poslední je sucho socioekonomické.

Avšak tradiční způsoby klasifikace do čtyř typů není adekvátně reprezentativní. Zvláště z důvodů, které nezahrnují širší ekologické dopady a rozměry. V mnoha případech příliš zaměřené na jejich vztahu k člověku. Je velice důležité zvýraznit i aspekty sucha, které se týkají ekologických rozměrů a klást na ně větší důraz. Vlivy způsobující sucho mohou mít výrazný dopad na části ekosystému nebo na ekosystém jako celek. V určitých případech jsou účinky jen dočasné a v jiných mohou být trvalé nebo dokonce naruší celou strukturu ekosystému. Rozdíl mezi dočasným a permanentním je ve skutečných podmínkách jen otázka času. Permanentní označení odkazuje na systém, který se nedokázal vzpamatovat z účinků sucha, a to do takové míry, kdy dosáhne bodu zvratu, ze kterého není obnova do původního stavu možná (Vicente-Serrano et al. 2020).

### **3.5.2 Vliv nedostatku vody (sucha) na klíčení**

Vitalita semen je velice komplexní vlastnost určující životaschopnost a růst v dospělého jedince. Samotný pojem je soubor dílčích vlastností, které zahrnují toleranci ke stárnutí, dormanci daných semen, rychlost jejich vyklíčení po zasetí a uchycení semenáčků v prostředí. Zejména v suboptimálních podmínkách. Tím, jak semena stárnou, stále výrazněji ztrácí svou vitalitu. Tak se stávají i více citlivé na stres způsobený skrz vnější podmínky. K působení stresu z nedostatku vody je semeno vystaveno od prvotního nasátí vody až po objevení kořene. Do značné míry závisí na podmínkách způsobu skladování a genetiky semen. Zejména ve vztahu k původnímu mateřskému prostředí (Bewley et al. 2012; Reed et al. 2022).

Možnost semen vyklíčit a charakteristiky s tím spojené klíčení jsou extrémně důležité faktory z hlediska určování výnosu kulturních plodin. Mezi významné charakteristiky, které pomáhají v klasifikaci osiva patří vitalita semen, index klíčivosti a délka nadzemní části. Ta může být z daleka ta nejcitlivější na stres způsobený suchem. Následovaná je délkou kořenu a případně jejich počtem a délkou koleoptile. Rychlost klíčení semen, konečné procento klíčivosti a míra absorbované vody semeny mohou být výrazně sníženy vzestupem úrovně osmotického stresu. Je mnoho studií, které se zabývají touto problematikou. Možné řešení je hledání určitých rostlinných druhů, které odolávají negativnímu působení sucha a způsoby ošetření osiva pro zmírnění dopadů sucha na rostlinu (Almaghrabi 2012).

Z hlediska působení sucha je klíčení obvykle nejvíce kritickou fází v celém vývoji od založení porostu. Zejména určuje finální úspěšnost a výši úrody v systémech rostlinné produkce (Okçu et al. 2005).

Prvotní a hlavní účinek, který má sucho na semena rostlin je výrazné narušení klíčení a špatné založení porostu. Během klíčení dochází k intenzivnímu růstu a dělení buněk. Současně je tento fyziologický proces nejvíce citlivý a působení sucha jej omezuje zejména tím, že velmi snižuje tlak v turgoru. Zajištění správného růstu je založeno na produkci dceřiných buněk, jež jsou produkovány meristematičtým dělením buněk a následnou expanzí mladých buněk (Anjum et al. 2011).

Je známo, že vystavení rostlin jakémukoliv stresovému faktoru (sucho) vyvolává změny v metabolismu ve všech vývojových fázích. Samotný stres navozený suchem je považován za hlavní limitující faktor v raných vývojových fázích. Týká se to právě klíčení a prvotního vývoje semenáčků hlavně z důvodu jeho klíčové role v aktivaci různých důležitých metabolických procesů, které přímo souvisí s klíčením semen (Basal et al. 2020).

Hellal et al. (2018) uvádí, že snížení procentuální klíčivosti u semen vystavených podmínkám sucha je tímto faktorem mimo jiné ovlivněna i délka kořene a vzrostného vrcholu. Možnosti utváření a současně i udržení čistého vodního potenciálu v polních půdních podmínkách je velice obtížná a těžce proveditelná práce. Způsob stanovení podmínek stresu ze sucha, za pomoci různých osmoticky aktivních materiálů, s nimiž se daří podmínky osmotického potenciálu vytvořit, se považuje za jednu z nejlepších metod pro studium účinků stresu ze sucha na klíčení, a to zejména z výše uvedených důvodů.

Enviromentální stresy negativně působí a výrazně zhoršují vývoj a růst v široké řadě aspektů. Jednou z nich je sucho, které se řadí k těm vůbec nejdůležitějším. Jeho projevem je hlavně osmotický stres, jehož následkem je snížení relativního obsahu vody u semen rostlin ve velmi raných stádiích vývoje. Velmi nízký relativní obsah vody způsobuje celou paletu deformací vedoucích k poruchám pružnosti membrán, možnosti provádět fotosyntézu, dýchání příjmu iontů z prostředí, ale i syntézy esenciálních biomolekul. Řadí se mezi ně hlavně aminokyseliny a proteiny. Reakcí rostliny na sucho se snižují zásoby vody a stomatální vodivost v průběhu transpirace. Naopak zvyšují příjem vody z půdy tím, že se snaží plně rozvíjet rozsáhlý a plodný kořenový systém. Velice důležitý adaptační mechanismus při působení sucha je osmotické přizpůsobení. V reakcích hrají významnou roli reaktivní formy kyslíku (ROS) a kyselina abscisová (Yan et al. 2020).

Ze studií v uplynulých letech vyplývá, že reaktivní formy kyslíku (ROS) plní roli ústředních složek při adaptaci rostlin na působení biotických a abiotických stresů. Současně fungují jako signální molekuly, které regulují klíčení semen, a to jak pozitivně, tak negativně

v závislosti na intenzitě působení. V semenech hrají ROS významnou roli při oslabení endospermu, mobilizaci zásobních látek semen, ochraně proti patogenům a programované buněčné smrti (Li et al. 2017).

Basal et. al. (2020) ve své práci uvádí, že v důsledku zvyšující se míry závažnosti působení sucha na semena výrazně klesá rychlost klíčení. Větší množství inhibitorů v semenu může nabývat stále větších výkyvů při probíhajícím vývoji již naklíčených semenáčků. To znamená, je-li množství dostupné vody pod potřebným množstvím, je proces klíčení zcela potlačen až zastaven.

### **3.5.3 Vliv nedostatku vody na růst rostlin**

U rostlin vystavených stresu z nedostatku vody může docházet k vážnému ovlivnění růstu a vývoje. Hlavně v závislosti na dynamice podmínek prostředí, kterým mohou čelit. Při působení dochází k určitým metabolickým změnám a genovým expresím umožňující rostlinám v takových podmínkách přežít. Samotné kvalitativní a kvantitativní charakteristiky jako kvalita zrna a výnos jsou do výrazné míry ovlivněné stresem ze sucha. Zkoumání zmíněné problematiky a schopností rostlin se vyrovnávat s omezením vody během jejich vývoje a růstu představuje velký dopad pro další vývoj zemědělství. I nadále by mělo být do budoucna v povědomí zejména pro hospodaření v suchých a polosuchých oblastech (Seleiman et al. 2021).

Sucho patří z hlediska stresů působící na rostliny k nejdůležitějším a má velice nepříznivý vliv v celém zemědělském sektoru. Hlavně z důvodu jeho působení na výnos a kvalitu produkce. U rostlin, na které působí stres z nedostatku přístupné vody dochází k určitým výrazným fyziologickým, morfologickým i biochemickým změnám, které snižují a omezují jejich růst a schopnost přežít v prostředí. Při pěstování významných kulturních plodin je riziko nízkého výnosu a kvality daleko větší. Především kvůli velkým ztrátám vody v půdním prostředí (Shahzad et al 2016).

Faktory prostředí, které zahrnují trvání, intenzitu, frekvenci a charakteristiku půdy daných růstových podmínek a stádií, ve kterých se rostliny nachází, mají silný vliv na rozsah, projevy a trvání symptomů. Příznaky souvisejí s působením sucha u rostlin (Seleiman et al. 2021).

Přeorganizování buněčné specializace při působení nepříznivého prostředí může vést k flexibilitě ve fenotypu a vývoji rostlin, což představuje klíčový mechanismus odolnosti vůči stresu. Fenotypová plasticita umožňuje úpravu délky různých fází vývoje rostlin. Tato skutečnost umožňuje rostlinám vyhnout se kritickým fázím růstu, zejména reprodukčnímu vývoji, při vystavení stresu. Dále je důležitá adaptace růstu a vývoje pro efektivní využití zdrojů v takových podmínkách (Chinnusamy & Zhu 2009).

V průběhu posledních několika desetiletí se zaměřením šlechtitelského úsilí na zlepšení tolerance rostlin vůči suchu se soustředilo především na využití genetického potenciálu pro selekci genotypů s vysokým výnosem a schopnostmi odolávat suchu. Klíčovým kritériem ve šlechtitelských programech je výnos. Funguje jako složité měřítko ovlivněné fyziologickými, biochemickými a metabolickými procesy rostlin. Genetika a asociace procesů jsou však značně komplexní a dosud nejsou dostatečně objasněné (Dhanda et al. 2004).

### 3.5.3.1 Morfologie

Z hlediska morfologie rostlin může působení nedostatku vody (sucha) způsobovat širokou škálu modifikací a změn během růstu. Mezi nimi může být deformace listové plochy a pohybu nadzemních orgánů. Stejně tak i ovlivňuje postavení a vývoj kořenové soustavy a v neposlední řadě i produktivitu samotných kulturních plodin. Rostlina zvyšuje absorpci vody a snižuje transpiraci. Většinu svých zdrojů využívá k růstu kořenového systému, čímž se zvyšuje celkový poměr nadzemní a podzemní biomasy (Barooah et al. 2023).

Dle Basal et al. (2020) jsou kořeny prvním rostlinným orgánem, který reaguje na nedostatky vody v okolním půdním prostředí. Následkem mohou rostliny při tomto stavu tvořit jemnější kořeny, díky kterým je následně schopná pronikat skrz menší půdní póry, a tím i do určité míry zvýšit svůj příjem vody.

Shahzad et al. (2016) uvádí, že pokud se působení vodního stresu kumuluje po delší časový interval, může se změnit celkový charakter a stavba rostlinného těla. Například délka kořenů a nadzemních orgánů, množství čerstvé biomasy i sušiny, ale také celkové množství biomasy, kterou rostlina může vytvořit. Různorodá variabilita z hlediska stavby určitých rostlin jako je výška, celkový počet listů a celková průměrná listová plocha, byla sledována a prokázána u rostlin vystavených podmínkám sucha.

Ke konkrétním deformacím na rostlinách patří výrazně pozorovatelné negativní projevy, zvýšení rychlosti stárnutí, povadání, černání a celkové ochabnutí listů a jejich zvýšená lámavost, uzavření květů a jejich křehčí stavba v době kvetení, etiolace, vadnutí, ztuhlost, předčasný opad, stárnutí a žloutnutí listů. Výše zmíněné projevy se řadí k nejčastějším projevům a příznakům indikující působení stresu z nedostatku vody u rostlin. Mezi méně časté projevy může spadat praskání větví a lodyh, odumírání nadzemních částí rostliny, různé nekrózy a zakrnělý růst. Při působení opravdu extrémních projevů vodního deficitu může celá rostlina zemřít (Seleiman et al. 2021).

Pokud je nedostatek vody už velmi vážný, může mít i vliv na prodlužovací schopnosti buněk. Jako následek se přeruší tok vody do xylému a okolních prodlužovacích buněk. Snížená dostupnost vody vede následně k propadům tlaku v turgoru buněk a dehydratace protoplazmy. Naruší se správné fungování mitózy, na jejíž funkci je závislá expanze buněk a jejich dělení. Výsledná rostlina dosahuje nižšího vzrůstu (Gautam et al. 2021).

### 3.5.3.2 Fyziologie

Při vodním stresu dochází k řadě různých fyziologických změn, které v závislosti na jejich rozsahu a závažnosti mohou celkový růst rostliny snížit až o 30-50 %. Mezi změny patří uzavření průduchů, významné snížení aktivity fotosyntézy, rozvoj oxidačního stresu, změna integrity buněčné stěny a produkce metabolitů toxické povahy. Ty mohou mít za následek úhyn konkrétních částí rostliny nebo i úplnou smrt. Jako další efekt, který může absence dostupné vody mít, je ztráta tlaku v turgoru a změna v osmóze, snížení vodního potenciálu v listech, pokles ve vodivosti průduchů na listech vůči CO<sub>2</sub>, snížení koncentrace CO<sub>2</sub>, pokles transpirace, rozvinutí účinnosti a hospodaření s vodou, snížení relativního obsahu vody v rostlinném těle a zvýšení funkce AOX (alternativní oxidázy) a další (Gautam et al. 2021).

Mezi hlavní parametry výrazně ovlivněné suchem, z hlediska fyziologie, je pokles chlorofylu a a b a rychlost a úroveň fotosyntézy. Kompletní vývoj nadzemní části rostliny a dostatečná míra otevřených průduchů jsou z hlediska optimálního průběhu fotosyntézy klíčové. Působením sucha se schopnost rostliny provádět fotosyntézu úspěšně značně limituje, a to z důvodu snížené dostupné listové plochy snížení celkového množství listů a zrychlené stárnutí nových listů (Abdelaal et al. 2021).

Chlorofyl představuje klíčovou složku chloroplastu podílející se na procesu fotosyntézy. Jeho relativní obsah koreluje s pozitivní rychlostí fotosyntézy. Pokles obsahu chlorofylu během stresu je charakteristický znak oxidačního stresu pravděpodobně způsobeného fotooxidací pigmentu a degradací chlorofylu. Fotosyntetické pigmenty jsou pro rostliny nezbytné zejména kvůli dodávání světla a produkci redukčních sil. Oba typy chlorofylu, a i b, vykazují citlivost na dehydrataci půdy. U mnoha druhů rostlin bylo pozorována snížená nebo nezměněná úroveň chlorofylu během stresu způsobeného suchem, přičemž situace závisí na délce a intenzitě (Anjum et al. 2011).

Produkty vznikající během fotosyntézy jsou hlavním materiálním základem, díky kterému je rostlina schopná růst. Míra čisté rychlosti fotosyntézy má přímou souvislost s množstvím dostupné listové plochy vystavené slunečnímu záření. V ní se odráží produktivita daného rostlinného materiálu. Z teoretického hlediska jde o velice spolehlivý index pro měření úrovně biologické aktivity rostlin. Rychlost fotosyntézy a rychlost transpirace se odvíjí od relativního obsahu vody v půdě a při jeho nedostatku se snižuje (Yang et al. 2021).

Působení enviromentálních stresů, ke kterým sucho patří, mají přímý dopad na celý fotosyntetický aparát, a to v podstatě narušením zcela všech hlavních složek fotosyntézy. I včetně transportu elektronů tylakoidem, cyklu redukce uhlíku a stomatální řízení dodávky CO<sub>2</sub> společně se zvýšenou akumulací sacharidů, peroxidativní destrukcí lipidů a narušení rovnováhy vody (Anjum et al. 2011).

Dýchání je dalším fyzikálním procesem, který je významně ovlivněn vážným nedostatkem vody. V jeho důsledku se snižuje produkce a růst rostlin. Je nezbytné soustředit se na dýchání, protože fotosyntéza se odehrává pouze za denního světla v zelených částech rostlin, zatímco každá část rostliny nepřetržitě dýchá. Mitochondrie fungující jako energetické centrály buněk vyžadují adekvátní přísun plynů a hrají klíčovou roli v růstu a přežití rostlin. I přesto, že dýchání má klíčový význam, jeho role za suchých podmínek je stále nedostatečně prozkoumána. Při nedostatku vody je výměna plynů prostřednictvím průduchů omezena kvůli uzavřeným průduchům, což omezuje jak dýchání, tak fotosyntézu. Rychlost dýchání většinou závisí na teplotě regulující události spojené s produkty dýchání. Snížení hladin ATP, NADP a Krebsova cyklu způsobuje zvýšení rychlosti dýchání u stresovaných rostlin (Shahzad et al. 2016).

### 3.5.3.3 Biochemie

Velmi významný vliv sucha u rostlin ovlivňuje i rostlinné buňky a vyvolává různorodé biochemické změny. Mezi ně se řadí poruchy buněčné membrány, produkce osmoticky aktivních látek, akumulace ROS a zvýšená aktivita antioxidantních enzymů (Abdelaal et al. 2021).

Tvorba reaktivních forem kyslíku (ROS) je jedna z prvních a nejčastějších biochemických reakcí rostlinných buněk na abiotické a biotické stresy. Proces tvorby ROS v těle rostlin je známý pod pojmem oxidační vzplanutí. Jedná se o ranou událost při podmínkách vodního deficitu. Rovněž sekundárně slouží jako buněčná signalizace pro rostlinu zahájit obranu reakcí. ROS zahrnují kyslíkové ionty, volné radikály i peroxidy a vznikají přirozeně jako vedlejší produkty. Během vývoje v podmínkách stanoviště, kde je rostlina vystavena nedostatkům vody se hladina ROS stále zvyšuje, což má za následek oxidační poškození proteinů, DNA a lipidů. Pokud vysoká míra ROS přetrvává, může dojít až k peroxidaci lipidů, degradaci proteinů DNA fragmentaci, a nakonec k buněčné smrti (Anjum et al. 2011).

Termín oxidační vzplanutí (Oxidative burst) je označení pro uvolňování určitých druhů ROS během působení vodního stresu. Mezi tyto druhy ROS patří například singletový kyslík  $^1\text{O}_2$ , superoxidový anion  $\text{O}_2^{\bullet-}$ , peroxid vodíku  $\text{H}_2\text{O}_2$  a hydroxylový radikál  $\text{OH}^{\bullet}$ . Tyto tři volné radikály mají zcela devastující vliv na jakoukoliv buňku nebo pletivo. Tedy především z důvodu poškození proteinů, lipidů a jaderných proteinů v dané rostlinné buňce. V podmínkách, kdy má rostlina nedostatek vody, se u rostliny vyvolává oxidační stres, na který navazují reakce reagující na tento druh stres. Zvýšená produkce ROS má za následek akumulaci malonodialdehydu (MDA) a peroxidu vodíku, což jsou hlavní indikátory při poškození rostlin reaktivními druhy kyslíku (Shahzad et al 2016).

Dle Anjuma et al. (2011) si rostlinná těla v průběhu let vyvinula obranný systém. Jsou schopné si vytvořit vnitřní ochranný katalyzovaný enzym, díky kterému je rostlina schopná se vyhnout zranění aktivním kyslíkem, čímž je zajištěn normální stav buněčné funkce. Rovnováha mezi produkcí ROS a aktivním antioxidačním enzymem určuje, zda během oxidační signalizace dojde k poškození. Pokud chce rostlina minimalizovat dopad oxidačního stresu, použije enzymatický i neenzymatický antioxidační systém, do kterého patří nízkomolekulární antioxidanty. Pro příklad glutathion, askorbát nebo karotenoidy a enzymy pohlcující ROS. Zde se zařazuje superoxidodismutáza (SOD), peroxidáza (POD), kataláza (CAT) a askorbátperoxidáza (APX).

## 4 Metodika

Pokusným materiálem byla semena vybraných genotypů pšenice seté (*Triticum aestivum* L.) a sóji luštinaté (*Glycine max* L.), u kterých byla hodnocena rychlost klíčení, klíčivost a růstové parametry semen v závislosti na působení vodního stresu. Semena byla rozdělena do 5 opakování po 20 semenech (100 semen / 1 varianta) a umístěna do sterilizovaných Petriho misek na filtrační papír. Vodní deficit (sucho) byl simulován pomocí polyethylenglykolu (PEG). Experiment byl založen v polovině dubna roku 2023 a hodnocení vybraných parametrů probíhalo ve 3 termínech (**3., 5. a 7. den** od založení experimentu).

### 4.1 Charakteristika rostlinného materiálu

Rostlinným materiálem pro náš výzkum byly dvě kulturně pěstované plodiny, a to pšenice setá (*T. aestivum*) a sója luštinatá (*G. max*). Od každé plodiny byly pro srovnání vybrány dva genotypy. U pšenice 'Vanessa' a 'Frisky', a pro sóju 'Moravians' a 'Mayrika'.

Genotyp 'Vanessa' se vyznačuje kombinací pekařské a krmné kvality, vykazuje střední odolnost proti napadení padlím, skvrnitostí listů, plevami a rzi pšeničnou. S krátkým stonkem (83 cm) a odolností proti poléhání vykazuje tento genotyp vysoké až velmi vysoké výnosy zrna v závislosti na pěstitelské oblasti. Díky střední mrazuvzdornosti je genotyp vhodný pro pěstování ve všech oblastech. Zrno je středně velké genotyp je zákonem chráněný (OSEVA, AGRO Brno, spol.s.r.o. 2023). Genotyp pšenice 'Frisky' je polo-pozdní genotyp, zapsaný v České republice v roce 2015. Spravována společnostmi Limagrain Europe. Má krátkou rostlinnou stavbu s pevným stéblem odolným vůči poléhání a vyniká silnou schopností odnože. Zrno tohoto genotypu je středně velké až malé a s vynikající zimovzdorností. Genotyp je odolný vůči hlavním chorobám, včetně rzi pšeničné, padlí travnímu, rzi plevové, braničnatce na listu a klasickým chorobám, včetně fuzarióz (OSEVA a.s. 2023).

'Mayrika' představuje genotyp sóji, která je velmi raná a charakterizuje se bílým květem. Rostliny dosahují střední výšky, mají vzpřímený až polovzpřímený růstový habitus a stébla jsou šedě ochmýřená. Hmotnost tisíce semen je nízká a pupen semene má žlutou barvu. Rychlost počátečního růstu je vysoká. Genotyp je středně odolný proti bakteriózám a plísním. Má také střední odolnost proti poléhání před sklizní a výška nasazení prvního lusku je vysoká. V porovnání se sortimentem velmi raných genotypů dosahují vysokého výnosu semene (ÚKZÚZ 2018). 'Moravians' je raná fialově kvetoucí genotyp, který má rostliny středně vysoké s růstovým habitem vzpřímeným-polovzpřímeným a žlutohnědě ochmýřeným stonkem. Hmotnost tisíce semen se pohybuje od středně vysoké až po vysokou a barva pupku semene je žlutá. Tento genotyp přináší v pěstitelské praxi výrazná pozitiva, jelikož nevykazuje významná pěstitelská rizika (ÚKZÚZ 2023).

## 4.2 Charakteristika pokusných přípravků

V laboratorním prostředí se využívají vodné roztoky s různým osmotickým potenciálem k realizaci experimentů zaměřených na studium vodního stresu u rostlin. K dosažení těchto cílů je používán polyethylenglykol (PEG), který se považuje se za účinnou metodu simulace stresu ze sucha s omezenými možnostmi metabolického zasahování, protože je rostlinami méně absorbován a není fyto toxický (Basal et al. 2020).

Na základě poznatků byl PEG vybrán pro umělé navození podmínek vodního stresu v laboratorních podmínkách tohoto experimentu a použit ve 3 rozdílných koncentracích (**5% PEG**, **15% PEG** a **25% PEG**). Vybrané koncentrace byly připraveny rozpuštěním PEG v destilované vodě.

## 4.3 Charakteristika pokusu

Semena pšenice i sóji byla během pokusu kultivována v řízených laboratorních podmínkách na Katedře botaniky a fyziologie rostlin, FAPPZ, ČZU v Praze. Proces klíčení spočíval v umístění Petriho misek do klíčidla, tedy inkubátoru s chlazením (Peltier), kde byly nastaveny vhodné podmínky pro klíčení (teplota 23 °C, tma a vlhkost 60 %).

## 4.4 Ošetření osiva

Před samotným založením pokusu bylo osivo pšenice a sóji ošetřeno pomocí roztoku chlornanu sodného (NaClO). Na osivo pšenice byl použit 1% NaClO, který byl pro provedení pokusu dostačující. Na osivo sóji bylo nutné použít vyšší koncentraci roztoku (5% NaClO) zejména z důvodu větší náchylnosti semen na houbové patogeny. Osivo bylo v roztoku ponecháno po dobu 10 minut a následně 5× propláchnuto destilovanou vodou. Vybrané koncentrace byly připraveny naředěním pomocí destilované vody.

## 4.5 Postup při zakládání pokusu

U zvolených kulturně pěstovaných plodin (pšenice, sója) byla hodnocena schopnost klíčení a s tím související další parametry za uměle navozených podmínek sucha pomocí různých koncentrací PEG. Do každé Petriho misky byl na dno uložen filtrační papír, na který bylo následně aplikováno 10 ml roztoku o předem dané koncentraci připadající k jednotlivé testované variantě. Pro zachování přesného rozmístění semen na filtračním papíru byla použita předem vytvořená šablona s číselným označením pozic pro lepší orientaci, která byla umístěna pod spodní část Petriho misky. Semena byla uložena podle pozic na šabloně pomocí dezinfikované pinzety v, co možná nejvíce, pravidelných rozestupech. Každá jednotlivá miska obsahovala 20 semen. Následně byla Petriho miska uzavřena horním víčkem a pomocí fixu popsána podle příslušnosti k dané variantě (**K**, **5% PEG**, **15% PEG**, **25% PEG**). Takto připravené Petriho misky byly umístěny do klíčidla (Obrázek 5). U jednotlivých Petriho misek bylo v následujících dnech měření, a to **3.**, **5.** a **7. den** od založení, sledováno množství klíčících (vyklíčených) semen, délka kořínku a délka hypokotylu. Takto získané hodnoty byly zaznamenány na záznamový arch pro následné zpracování a vyhodnocení. Po každém



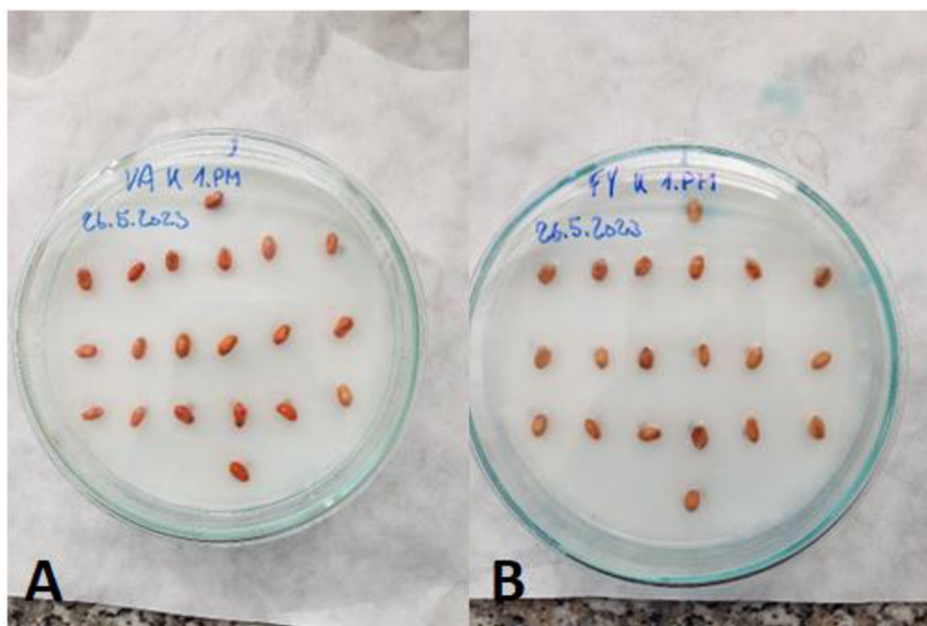
provedeném měření byla semena přemístěna do zcela nové vydezinfikované Petriho misky s novým filtračním papírem a opět bylo doplněno 10 ml roztoku podle dané varianty, aby nedošlo k vysušení filtračního papíru. Po závěrečném měření (7. den) byla zvážena hmotnost čerstvé hmoty (FW). Následně byly semenáčky umístěny do sušárny k vysušení a u takto získaných vzorků byla zvážena hmotnost sušiny (DW).



Obrázek 5 – Příprava semen pšenice a sóji ke klíčení (Autor)

#### 4.6 Založení pokusu pšenice

Dne 26. května 2023 byl založen pokus u pšenice. Do vydezinfikovaných Petriho misek byla rozmístěna podle předem vytvořené šablony semena dvou vybraných genotypů pšenice a to 'Vanessa' (**VA**) a 'Frisky' (**FR**). Byly vytvořeny 4 různé varianty dle koncentrace roztoku pokaždé v 5 opakováních. Varianta první byla kontrola (**K**) – bez PEG, pouze destilovaná voda; druhá varianta byla koncentrace roztoku PEG 5% (**5% PEG**); třetí varianta byla koncentrace roztoku PEG 15% (**15% PEG**) a u varianty čtvrté byla použita koncentrace roztoku PEG 25% (**25% PEG**). Na pokus bylo použito 400 semen pro jeden genotyp. Celkem tedy 800 semen ve 40 Petriho miskách. V den založení (**0. den**) se připravené Petriho misky s rozmístěnými semeny pšenice (Obrázek 6) genotypů 'Vanessa' (**VA**) a 'Frisky' (**FY**) vložily do zařízení pro klíčení, kde byly nastaveny adekvátní parametry prostředí z hlediska teploty a optimální vlhkosti (teplota 23 °C, tma, vlhkost vzduchu 60 %) pro klíčení semen pšenice.

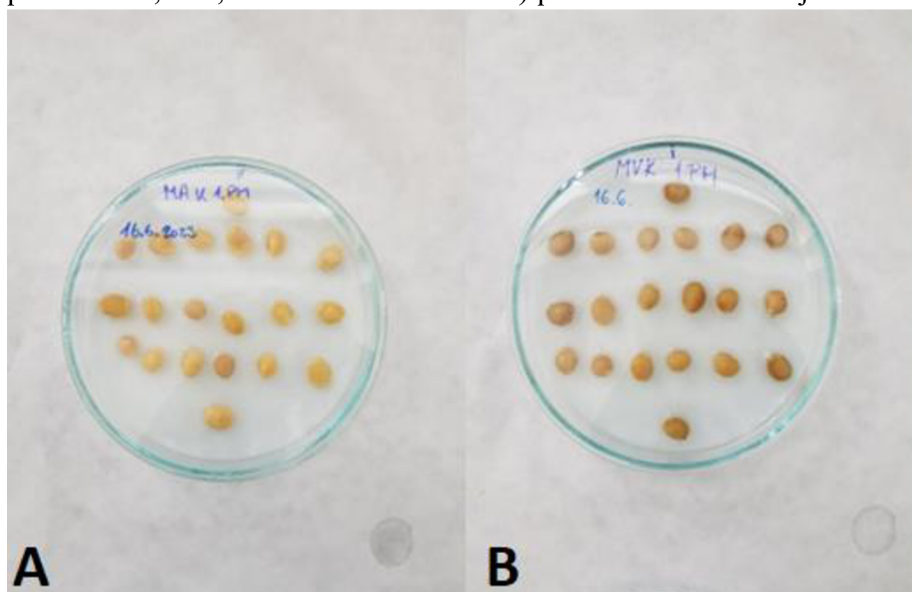


Obrázek 6 – Příprava semen pšenice ke klíčení u genotypu 'Vanessa' (A), genotypu 'Frisky' (B) (Autor)

#### 4.7 Založení pokusu sója

Dne 16. června 2023 byl založen pokus se semeny sóji. Do vydezinfikovaných Petriho misek byla rozmístěna podle předem vytvořené šablony semena dvou vybraných genotypů sóji 'Moravians' (MV) a 'Mayrika' (MA). Vytvořeny byly 4 různé varianty dle koncentrace roztoku pokaždé v 5 opakováních. Varianta první byla kontrola (K) – bez PEG, pouze destilovaná voda; druhá varianta byla koncentrace roztoku PEG 5% (5% PEG); třetí varianta byla koncentrace roztoku PEG 15% (15% PEG) a u varianty čtvrté byla použita koncentrace roztoku PEG 25% (25% PEG).

V den založení (0. den) se připravené Petriho misky (Obrázek 7) vložily do zařízení pro klíčení, kde byly nastaveny adekvátní parametry prostředí z hlediska teploty a optimální vlhkosti (teplota 23 °C, tma, vlhkost vzduchu 60 %) pro klíčení semen sóji.



Obrázek 7 – Příprava semen sóji ke klíčení u genotypu 'Mayrika' (A), genotypu 'Moravians' (B) (Autor)

## 4.8 Sledované parametry klíčení semen

### 4.8.1 Klíčivost semen (SG)

Klíčovost semen (seed germination) vyjadřuje procentuální množství vyklíčených semen daného vzorku za vhodných podmínek v čase vymezeném pro klíčení (tedy v období, kdy je klíčení ukončeno) (Šerá 2014).

$$\text{Klíčovost semen (\%): } SG = Gf/S \times 100$$

Gf počet vyklíčených semen na konci kultivace

S celkový počet testovaných semen

### 4.8.2 Energie klíčení (GE)

Energie klíčení (germination energy) vyjadřuje procentuální množství vyklíčených semen daného vzorku v daném čase (v období před ukončením procesu klíčení). Energie klíčení vypovídá o intenzitě a vyrovnanosti klíčení (Bam et al. 2006).

$$\text{Energie klíčení (\%): } SE = Gt/S \times 100$$

Gt počet vyklíčených semen ve dne t

S celkový počet testovaných semen

### 4.8.3 Rychlost klíčení (GR)

Rychlost klíčení (speed of germination) je poměr počtu vyklíčených semen na začátku a na konci stanovené doby, který se zpravidla vyjadřuje v procentech (Šerá 2014).

$$\text{Rychlost klíčení (\%): } GR = Gt/Gf \times 100$$

Gt počet vyklíčených semen ve dne t

Gf počet vyklíčených semen na konci kultivace

### 4.8.4 Index klíčivosti (GI)

$$\text{Index klíčivosti: } GI = \sum(Gt/Dt)$$

Gt počet vyklíčených semen ve dne t

Dt počet dnů (Šerá 2014)

## 4.9 Sledované parametry růstu semen

### 4.9.1 Měření kořene a nadzemní části

V průběhu pokusu byla provedena měření parametrů růstu ve třech termínech (**3.**, **5.** a **7. den**). Semeno bylo vždy vyjmutο z Petriho misky příslušné varianty a podrobeno měření. Při měření byla pomocí pravítka zjištěna délka kořene a nadzemní části (v případě pšenice i počet kořenů). Výsledné hodnoty byly zapsány pro další vyhodnocení. Následně bylo semeno přesunuto do nové vydesinfikované Petriho misky na filtrační papír a zalito odpovídajícím roztokem dle příslušné varianty.

#### **4.9.2 Vážení a sušení (FM, DM)**

Na konci pokusu (7. den) po provedení měření kořene a nadzemní části, byly obě části pomocí skalpelu odděleny. Následně se odebrané části semen zvlášť zvažily na laboratorní váze OHAUS AX223M. Výsledkem byla hodnota FM (fresh mass = hmotnost čerstvé biomasy). Oddělené části se následně vložily do plechových schránek k sušení do klimatizované komory Memmert 100-800. Vysušený kořen a nadzemní část se následně zvažily na laboratorní váze OHAUS AX223M. Získaná hodnota byla DM (dry mass = hmotnost suché biomasy). Změřené a navážené hodnoty se následně zapsaly pro další výpočty.

#### **4.9.3 Poměr Root:Shoot (R:S)**

Ze získaných hodnot FM a DM, byl následně jako podíl FM kořene a FM nadzemní části vypočítán poměr R:S. Stejným způsobem byl spočten i R:S pro DM.

#### **4.10 Zpracování výsledků**

K výpočtům a vyhodnocení parametrů klíčení a růstu byl použit Microsoft Excel. Vypracované grafy byly rovněž zpracované pomocí programu Microsoft Excel, přičemž byly znázorněny i chybové úsečky k jednotlivým měřeným hodnotám.

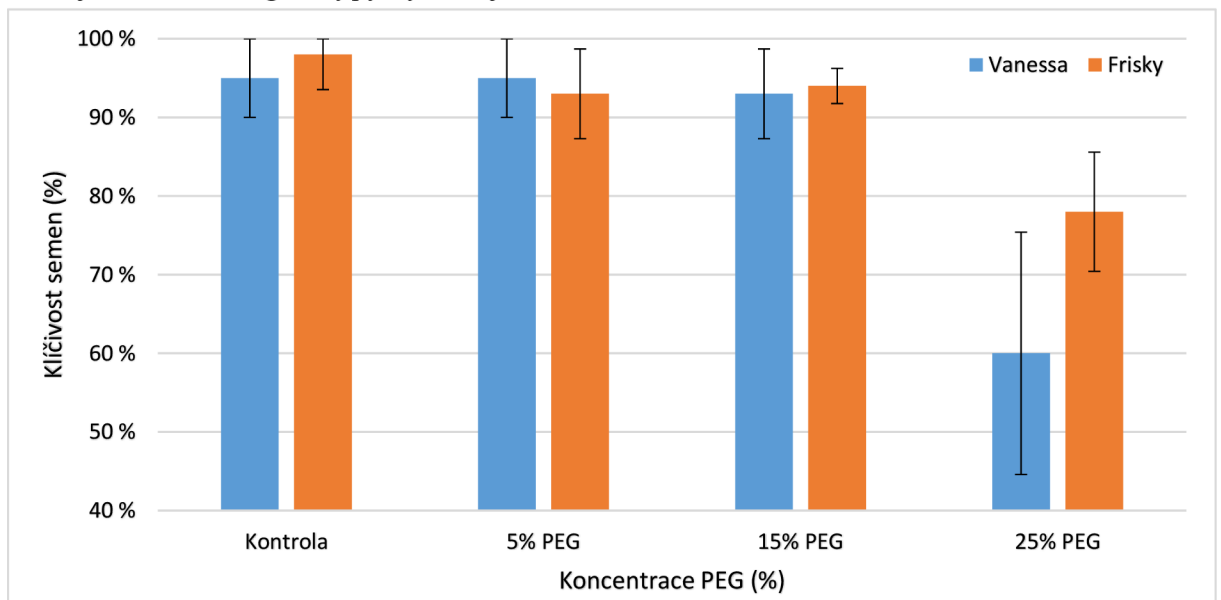
## 5 Výsledky

V této bakalářské práci byl předmětem zkoumání vliv podmínek sucha na klíčení a rané vývojové fáze rostlin a s tím související parametry klíčení. Jako modelové rostliny, použité během pokusu, byly zvoleny dvě kulturně pěstované plodiny – pšenice setá (*Triticum aestivum* L.) a sója luštinatá (*Glycine max* L.).

### 5.1 Vliv sucha na parametry klíčení pšenice seté

#### 5.1.1 Klíčivost semen (SG)

Na Obrázku 8 je vyobrazena průměrná klíčivost semen (SG) dvou vybraných genotypů pšenice seté (*T. aestivum*) na konci pokusu. Nejvyšších hodnot SG dosáhla u obou genotypů varianta kontroly (**K**) a to 95 % ('Vanessa') a 98 % ('Frisky'). Výrazně snížená hodnota SG byla u varianty **25% PEG** – 'Frisky' (78 %), 'Vanessa' (60 %). Z grafu je dále patrné, že u hodnoty SG nebyl zjištěn významný rozdíl mezi variantami **K**, **5% PEG** a **15% PEG**. U varianty **25% PEG** je rozdíl mezi genotypy výraznější a to o 18 %.

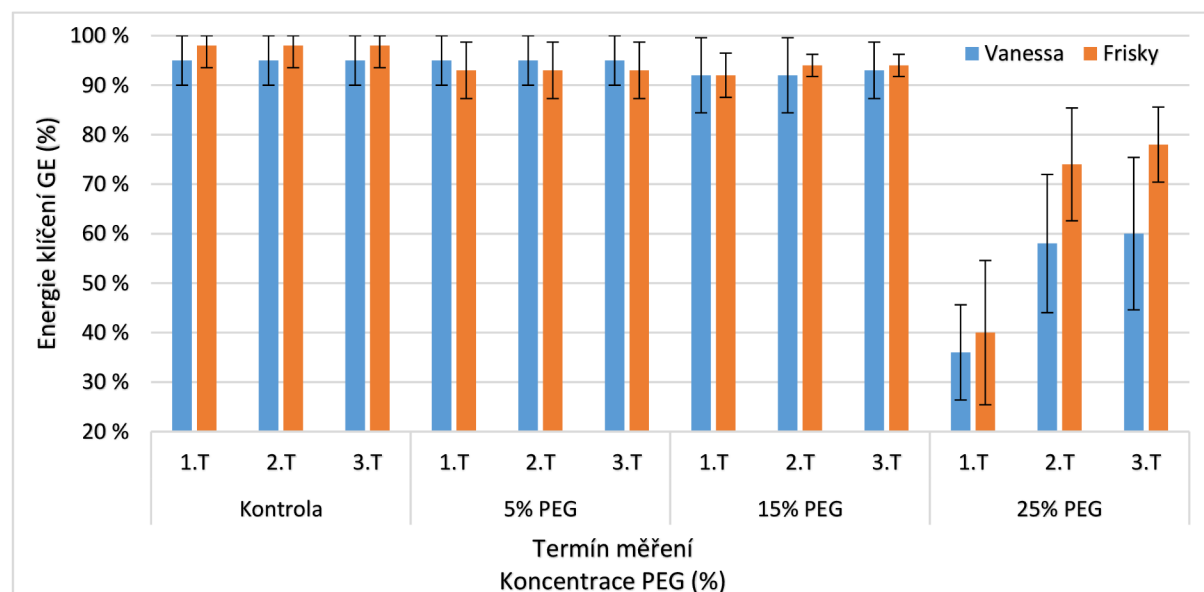


Obrázek 8 – Klíčivost semen (SG) vybraných genotypů *T. aestivum* v závislosti na koncentraci PEG

#### 5.1.2 Energie klíčení (GE)

Na Obrázku 9 jsou zaznamenány průměrné hodnoty energie klíčení (GE) semen pšenice seté (*T. aestivum*) ve třech termínech měření (**3.**, **5.** a **7. den**). Varianty **K**, **5% PEG** a **15% PEG** dosahovaly podobných výsledků během všech termínů měření. Významný rozdíl byl patrný až u varianty **25% PEG**, kde při prvním termínu měření (**3. den**) dosáhla GE u obou genotypů velmi nízkých hodnot (36 %, 'Vanessa'; 40 %, 'Frisky'). Při druhém měření (**5. den**) dochází k navýšení GE, kdy genotyp 'Frisky' (74 %) dosahoval vyšší hodnoty než genotyp

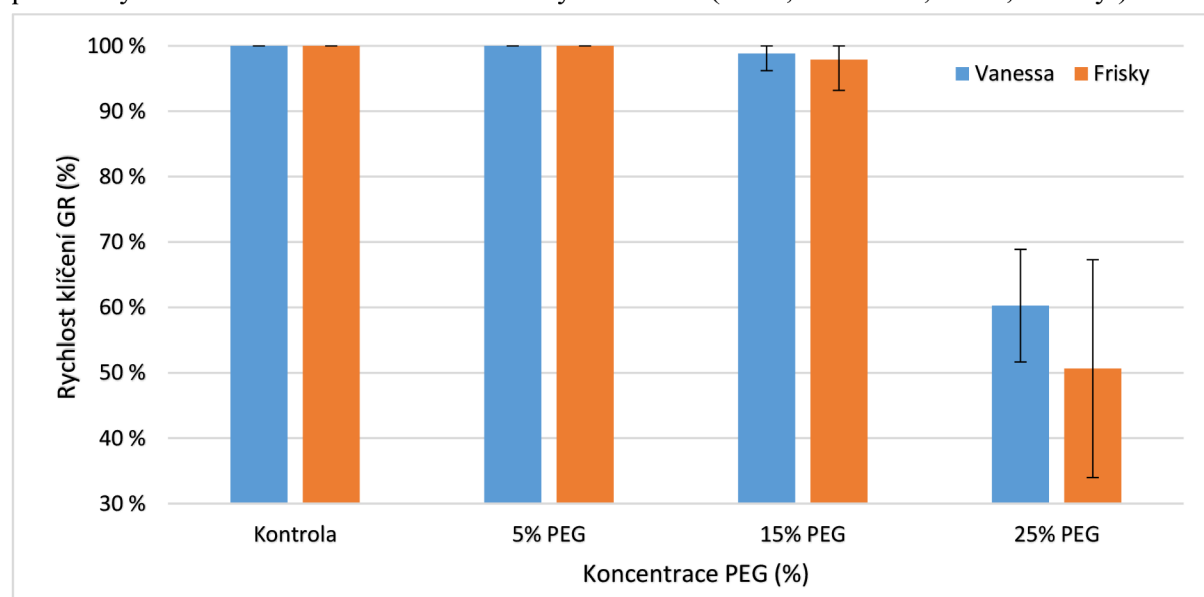
'Vanessa' (58 %). Při závěrečném měření (7. den) dochází k minimálnímu nárůstu GE u obou zkoumaných genotypů, o 2 % u genotypu 'Vanessa' a o 4 % u genotypu 'Frisky'.



Obrázek 9 – Energie klíčení (GE) vybraných genotypů *T. aestivum* v závislosti na koncentraci PEG

### 5.1.3 Rychlost klíčení (GR)

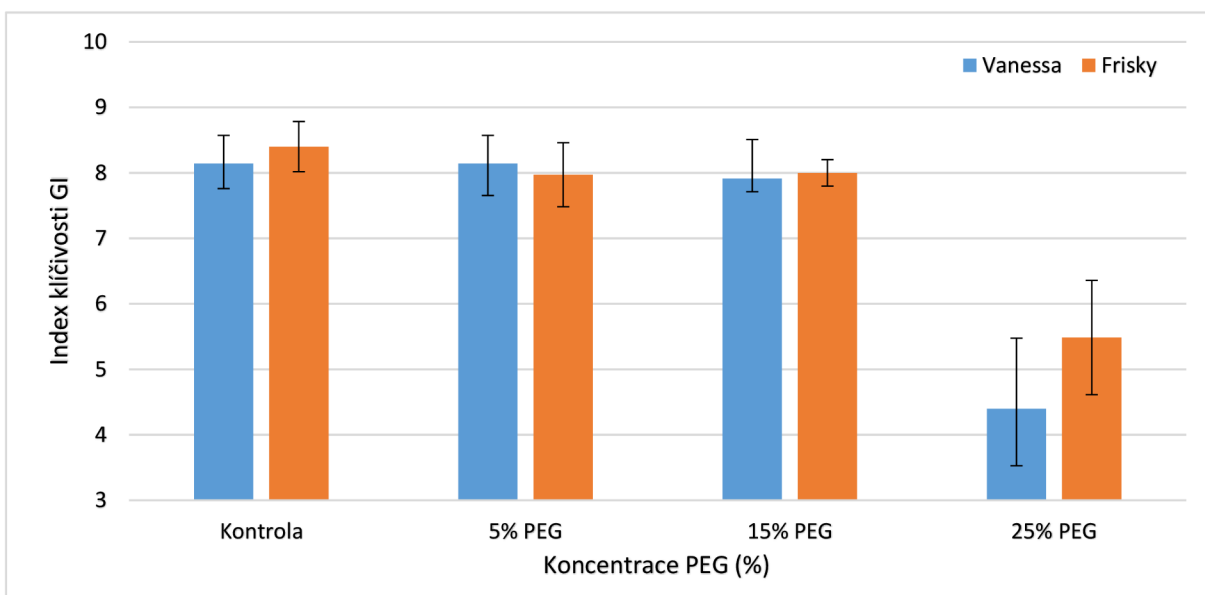
Na Obrázku 10 jsou vyjádřeny průměrné hodnoty rychlosti klíčení (GR) u semen pšenice. Varianta **K** a **5% PEG** dosáhly shodně 100 % pro oba sledované genotypy pšenice ('Vanessa', 'Frisky'). U varianty **15% PEG** byly zaznamenány nižší hodnoty GR o 1 % ('Vanessa') a 2 % ('Frisky'), v porovnání s variantou **K** a **5% PEG**. Varianta **25% PEG** dosahovala nejnižších průměrných hodnot GR ze všech zkoumaných variant (60 %, 'Vanessa'; 51 %, 'Frisky').



Obrázek 10 – Rychlost klíčení (GR) vybraných genotypů *T. aestivum* v závislosti na koncentraci PEG

#### 5.1.4 Index klíčivosti (GI)

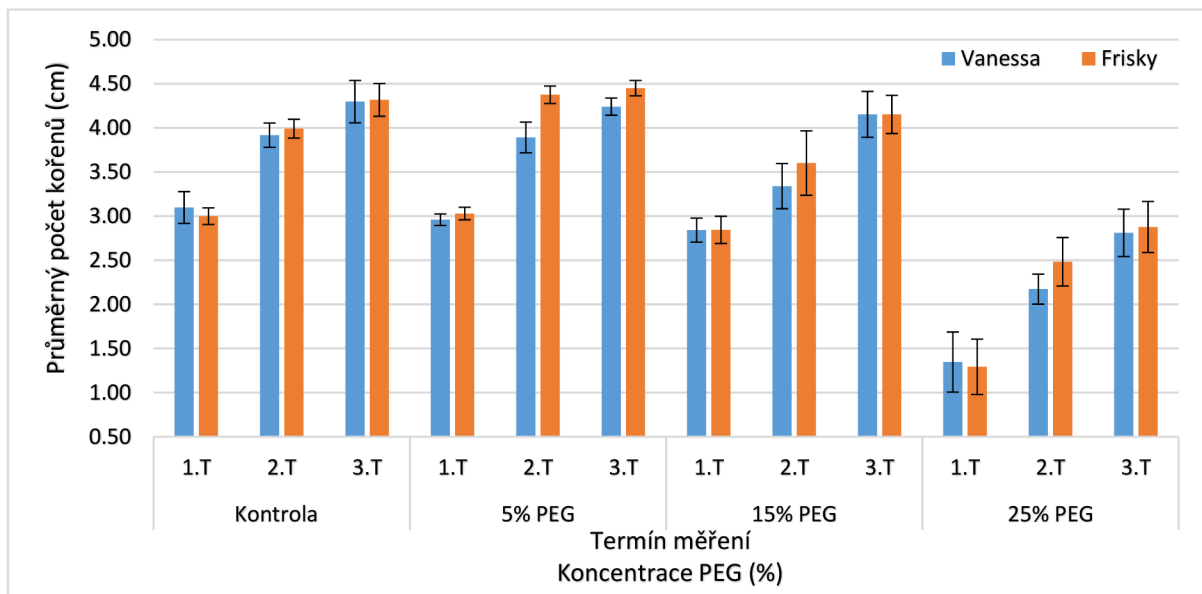
Na Obrázku 11 jsou graficky vyobrazeny výsledné hodnoty indexu klíčivosti (GI) semen pšenice seté. U kontrolní varianty (**K**), **5% PEG** a **15% PEG** bylo dosaženo shodných hodnot GI. Rozdíly v těchto variantách a mezi genotypy byly u parametrů GI minimální. Výrazný rozdíl se vyskytl u varianty **25% PEG**, kde hodnoty GI dosáhly výrazně nižších hodnot než u ostatních zkoumaných variant 4,4 ('Vanessa'), 5,5 ('Frisky'). U varianty **25% PEG** byl i nejvýraznější rozdíl mezi genotypy a to o 1,1.



Obrázek 11 – Index klíčivosti (GI) vybraných genotypů *T. aestivum* v závislosti na koncentraci PEG

#### 5.1.5 Průměrný počet kořenů

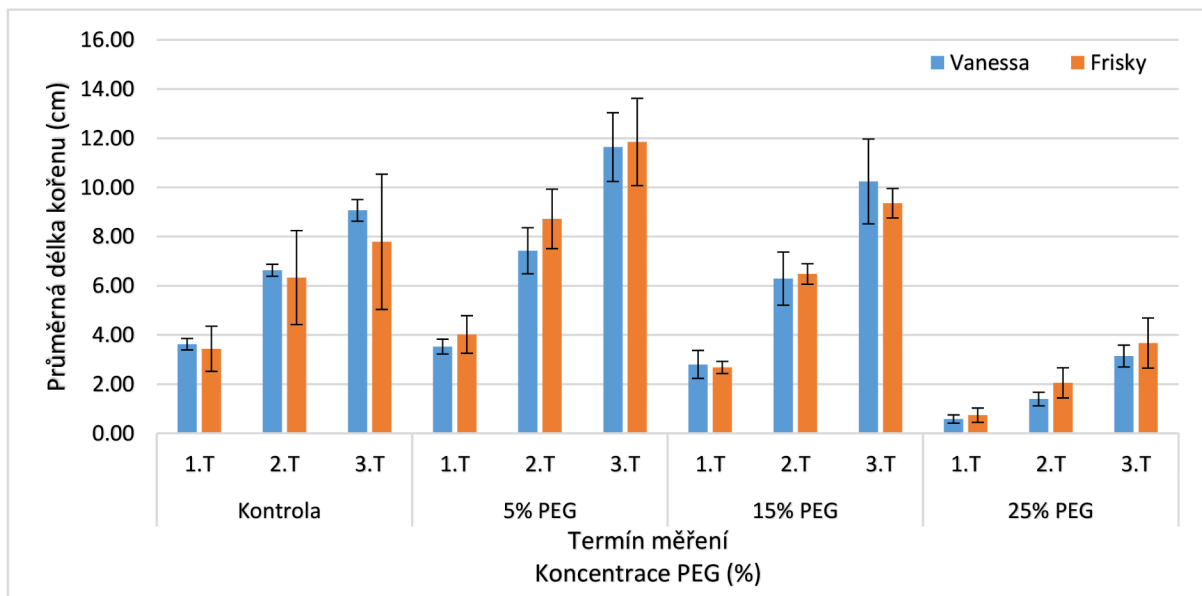
Na Obrázku 12 je zobrazen průměrný počet kořenů na klíčících semenech pšenice seté pro jednotlivé varianty ve třech termínech měření (**3.**, **5.** a **7. den**). Varianty **K**, **5% PEG** a **15% PEG** dosáhly podobných výsledků ve všech termínech měření s minimálními rozdíly mezi genotypy. Výrazný pokles byl zjištěn u varianty **25% PEG**, kde hodnoty dosáhly výrazně nižší úrovně ve všech provedených měření. Při prvním termínu měření (**3. den**), dosáhla hodnota průměrného počtu kořenů u testovaných genotypů pozorovatelně nižších hodnot ('Vanessa' 1,35, 'Frisky' 1,29). Při druhém měření (**5. den**) byl zaznamenán nárůst průměrného počtu kořenů ('Vanessa' 2,81, 'Frisky' 2,48). Při finálním měření (**7. den**) byl nárůst průměrného počtu kořenů minimální ('Vanessa' 2,81, 'Frisky' 2,88). U varianty **25% PEG** nebyl zjištěn výrazný rozdíl mezi genotypy.



Obrázek 12 – Průměrný počet kořenů vybraných genotypů *T. aestivum* v závislosti na koncentraci PEG

### 5.1.6 Průměrná délka kořenů

Na Obrázku 13 jsou vyobrazeny průměrné délky kořenů (cm) testovaných variant genotypů pšenice seté 'Vanessa' a 'Frisky' ve třech dnech měření (3., 5. a 7. den). U varianty **K** a **15% PEG** dosáhly shodných hodnot a nebyly zjištěny výrazné rozdíly mezi testovanými genotypy ('Vanessa', 'Frisky'). Nejvyšších hodnot ve všech termínech měření dosáhla varianta **5% PEG**. Genotyp – 'Vanessa' 3,53 (3. den), 7,42 (5. den) a 11,64 (7. den) a 'Frisky' 4,02 (3. den), 8,72 (5. den) a 11,85 (7. den). Výrazného rozdílu dosáhla až varianta **25% PEG**, u které byly zaznamenány nejnižší hodnoty – 'Vanessa' 0,58 (3. den), 1,39 (5. den) a 3,14 (7. den) a 'Frisky' 0,74 (3. den), 2,05 (5. den) a 3,67 (7. den). Mezi genotypy nebyl zjištěn výrazný rozdíl.

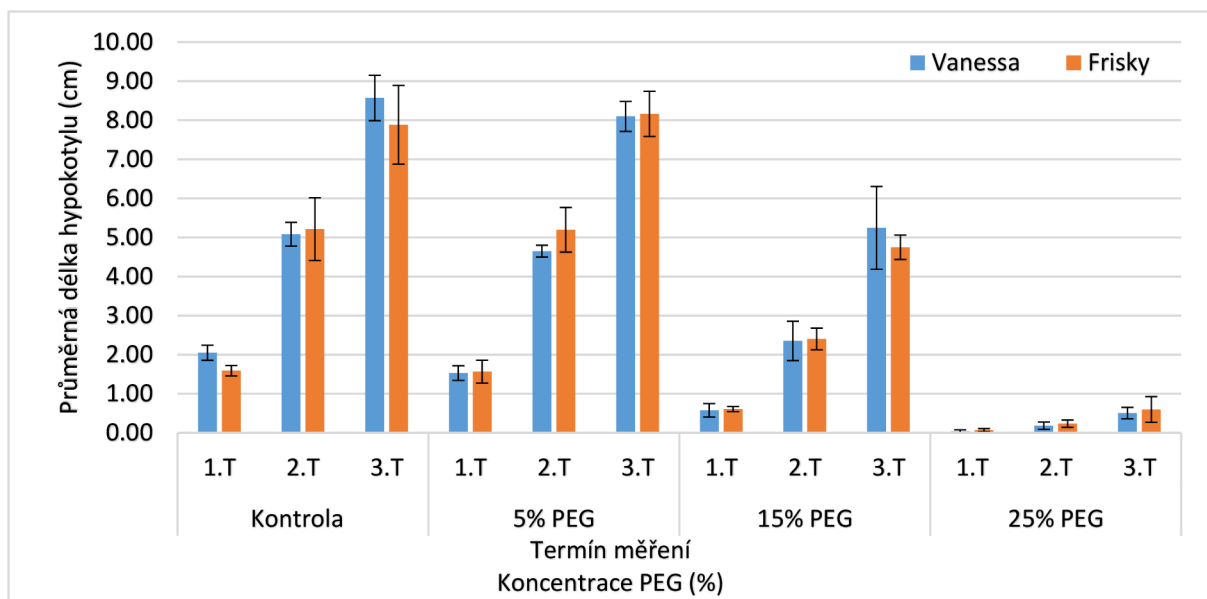


Obrázek 13 – Průměrná délka kořenů vybraných genotypů *T. aestivum* v závislosti na koncentraci PEG



### 5.1.7 Průměrná délka nadzemní části

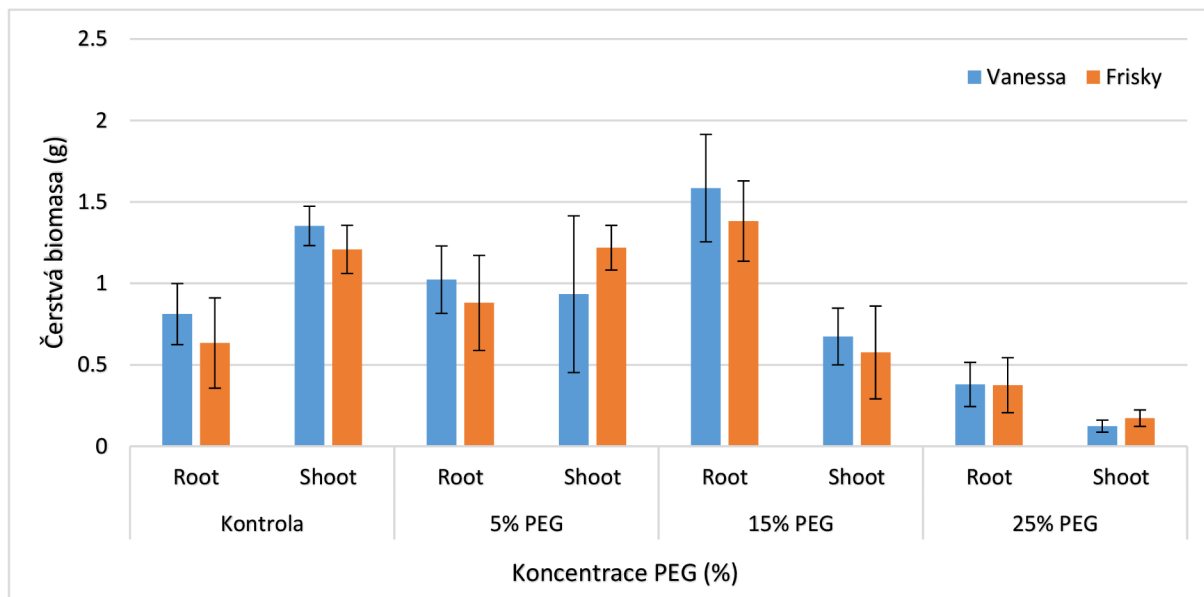
Na Obrázku 14 je zobrazena průměrná délka nadzemní části (cm) z testovaných semen pšenice seté ve třech termínech měření (**3., 5. a 7. den**). U variant **K** a **5% PEG** nebyly zjištěny výrazné odlišnosti. U těchto variant byl rozdíl mezi genotypy ('Vanessa', 'Frisky') minimální. Varianta **15% PEG** dosáhla prokazatelně nižších hodnot oproti **K** a **5% PEG**. Výrazných rozdílů dosáhly hodnoty u varianty **25% PEG**, kde při prvním měření (**3. den**) dosáhla průměrná délka nadzemní části zkoumaných genotypů ('Vanessa', 'Frisky') hranice 0 cm. Při měření druhém (**5. den**) došlo k nárůstu průměrné délky kořenů zkoumaných genotypů – 'Vanessa' (0,18), 'Frisky' (0,23). Při finálním měření (**7. den**) došlo k mírnému nárůstu délky kořenů 0,51 ('Vanessa'), 0,60 ('Frisky'). Rozdíly genotypů varianty **25% PEG** byly minimální.



**Obrázek 14 – Průměrná délka nadzemní části vybraných genotypů *T. aestivum* v závislosti na koncentraci PEG**

### 5.1.8 Hmotnost čerstvé biomasy

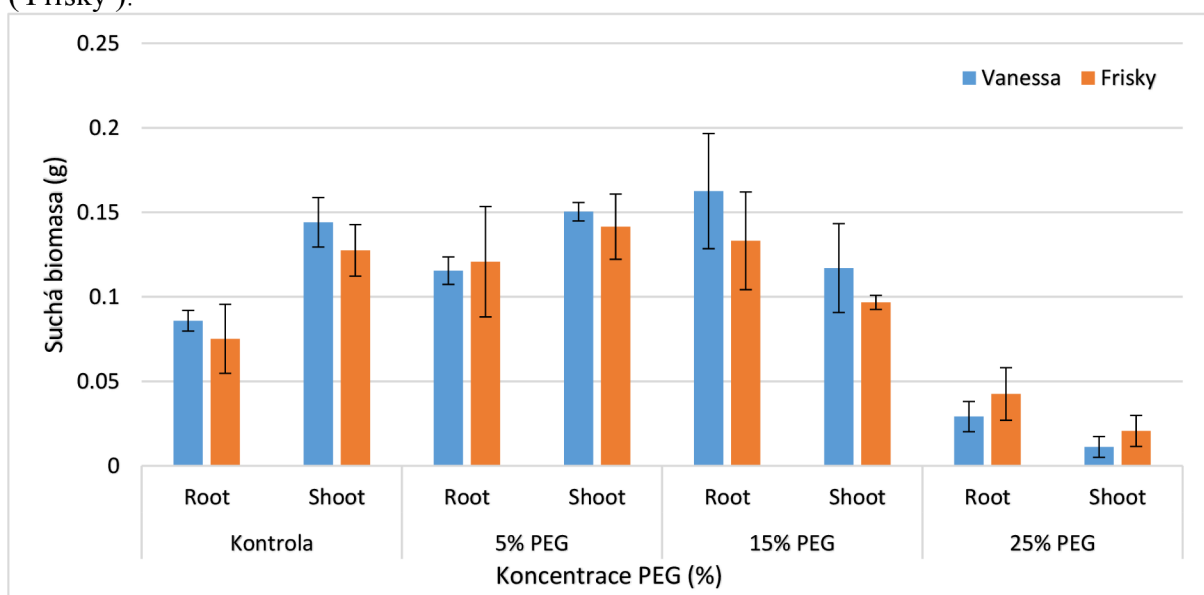
Na Obrázku 15 je vyobrazena hmotnost čerstvé biomasy (FM) naměřená na konci pokusu (**7. den**), kdy byla vytvořená biomasa pšenice seté (kořen, nadzemní část) oddělena od semen a následně zvážena (g). Kontrolní varianta (**K**) vytvořila výrazně více nadzemní biomasy ('Vanessa' 1,352, 'Frisky' 1,209), než kořenové ('Vanessa' 0,812, 'Frisky' 0,634). U varianty **5% PEG** byly hmotnosti kořenové a nadzemní biomasy genotypu 'Vanessa' téměř shodné. Výraznější rozdíl byl zjištěn u genotypu 'Frisky', kde hmotnost nadzemní biomasy o 0,339 g převýšila hmotnost kořenů. Výrazného rozdílu v hmotnosti FM dosáhla varianta **15% PEG**. Kde hmotnost FM kořenové části – 'Vanessa' (1,585), 'Frisky' (1,383) převýšila nadzemní část – 'Vanessa' (0,674), 'Frisky' (0,576). Varianta **25% PEG** vytvořila nejnížší množství FM oproti ostatním variantám, a to hmotnost kořenů 0,3794 ('Vanessa'), 0,375 ('Frisky') a části nadzemní 0,124 ('Vanessa'), 0,1726 ('Frisky').



Obrázek 15 – Hmotnost čerstvé biomasy vybraných genotypů *T. aestivum* v závislosti na koncentraci PEG

### 5.1.9 Hmotnost suché biomasy

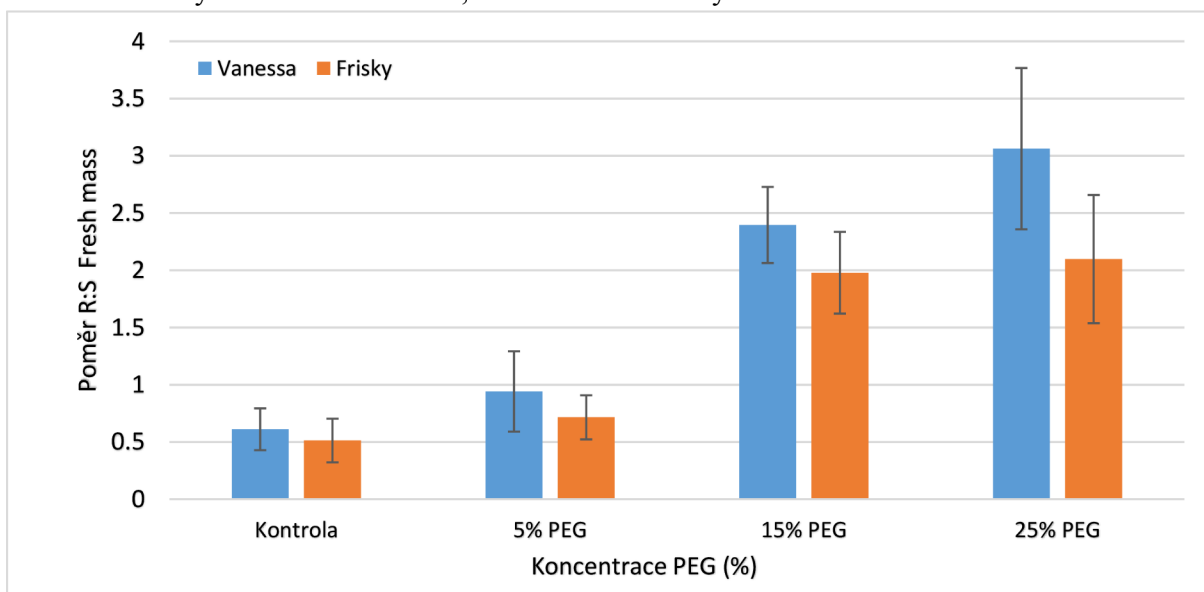
Na Obrázku 16 jsou zobrazeny získané hodnoty hmotnosti (DM) po vysušení čerstvé biomasy v sušárně a zvažení (g). Kontrolní varianta (**K**) po usušení dosáhla vyšší hmotnosti DM u nadzemní části ('Vanessa' 0,144), ('Frisky' 0,128) oproti kořenové ('Vanessa' 0,086), ('Frisky' 0,075). U varianty **5% PEG** byly hmotnosti mezi kořeny ('Vanessa' 0,116, 'Frisky' 0,121) a nadzemní částí ('Vanessa' 0,150, 'Frisky' 0,142) téměř vyrovnané. Varianta **15% PEG** dosáhla výrazného rozdílu mezi genotypy, kde větší hmotnost DM zaznamenal genotyp – 'Vanessa' o 0,029 (kořen) a o 0,020 (nadzemní část) oproti 'Frisky'. U varianty **25% PEG** dosáhla celková hmotnost DM nejnižších hodnot. Hmotnost biomasy byla výrazně nižší u kořene 0,029 ('Vanessa'), 0,043 ('Frisky') i u nadzemní části 0,011 ('Vanessa'), 0,021 ('Frisky').



Obrázek 16 – Hmotnost suché biomasy vybraných genotypů *T. aestivum* v závislosti na koncentraci PEG

### 5.1.10 Poměr Root:Shoot (R:S) čerstvé biomasy

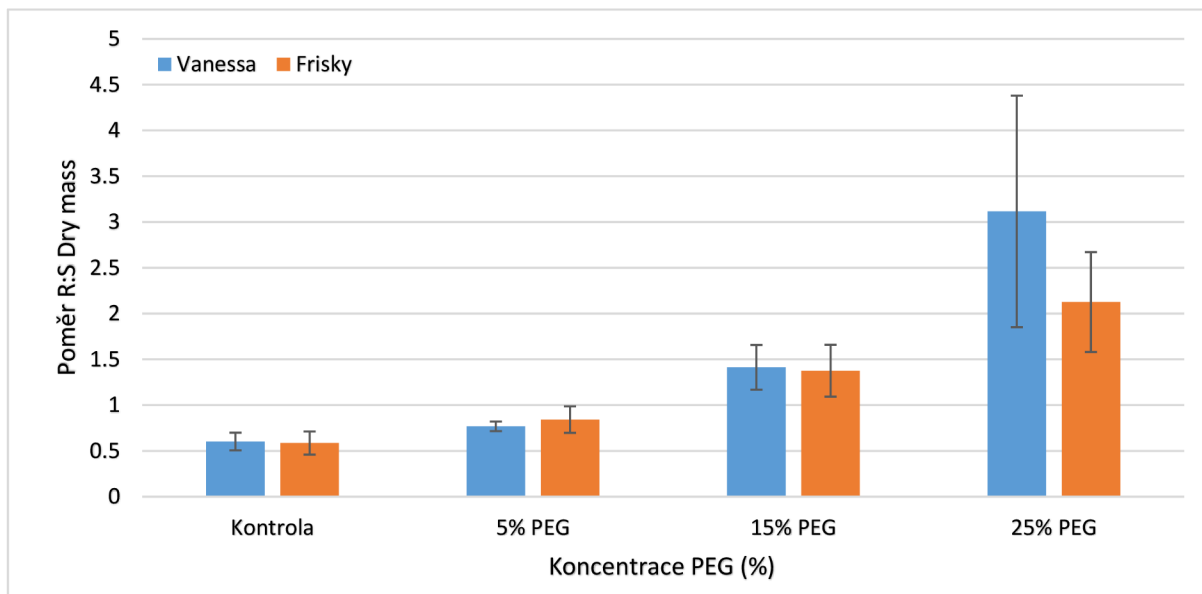
Na Obrázku 17 je vyobrazen poměr kořenové části ku části nadzemní (R:S) z čerstvé biomasy získané z výsledků finálního měření (7. den). U kontrolní varianty (K) dosáhl poměr R:S nejnižších hodnot. V rámci genotypů však bez výrazných rozdílů, a to 0,611 ('Vanessa'), 0,513 ('Frisky'). U varianty 5% PEG došlo k mírnému nárůstu R:S. U genotypu 'Vanessa' byl R:S vyšší o 0,226 oproti 'Frisky'. K výraznému nárůstu došlo až u varianty 15% PEG. Mezi genotypy byly hodnoty R:S rozdílné, a to 2,396 ('Vanessa'), 1,978 ('Frisky'). Varianta 25% PEG zaznamenala nejvyšší hodnoty R:S a výrazného rozdílu mezi genotypy. Přičemž 'Vanessa' zaznamenala vyšší hodnotu R:S o 0,965 více než 'Frisky'.



Obrázek 17 – Poměr Root:Shoot čerstvé biomasy vybraných genotypů *T. aestivum* v závislosti na koncentraci PEG

### 5.1.11 Poměr Root:Shoot (R:S) suchá biomasa

Na Obrázku 18 je zobrazen poměr kořenové části ku nadzemní části z hmotnosti suché biomasy (R:S) získané po vysušení a zvážení. Kontrolní varianta (K) zaznamenala nejnižší hodnoty R:S bez výrazného rozdílu mezi genotypy (0,603 'Vanessa', 0,586 'Frisky'). U varianty 5% PEG došlo k mírnému nárůstu R:S. Mezi genotypy byly hodnoty téměř vyrovnané. Většího nárůstu bylo dosaženo až u varianty 15% PEG – 'Vanessa' (1,413), 'Frisky' (1,375). Nejvyšších hodnot bylo dosaženo u varianty 25% PEG. Přičemž vyšších hodnot R:S dosáhl v této variantě genotyp 'Vanessa' (3,116) oproti 'Frisky' (2,125).

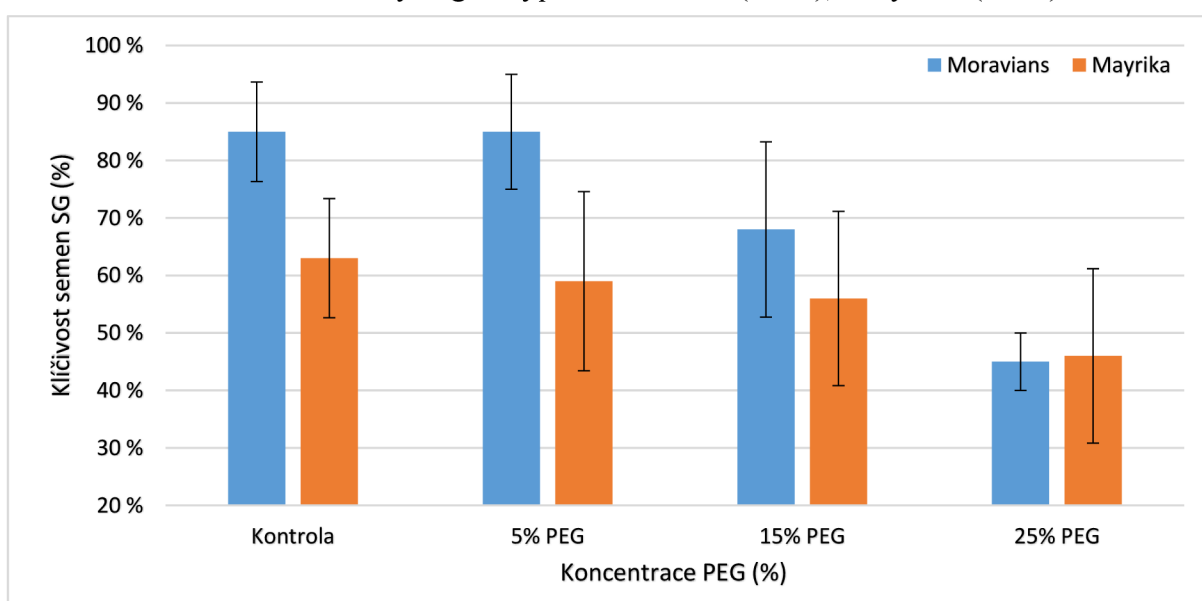


Obrázek 18 – Poměr Root:Shoot ze suché biomasy vybraných genotypů *T. aestivum* v závislosti na koncentraci PEG

## 5.2 Vliv sucha na parametry klíčení sóji luštinaté

### 5.2.1 Klíčivost semen (SG)

Na Obrázku 19 je vyobrazena průměrná klíčivost semen (SG) vybraných genotypu sóji luštinaté (*G. max*) na konci pokusu. U kontrolní varianty (**K**) a **5% PEG** nebyl zjištěn významný rozdíl u hodnot SG, výraznější rozdíl byl patrný mezi genotypy ('Moravians' 85 %, 'Mayrika' 63 %). Ke snížení hodnoty SG došlo až u varianty **15% PEG**, hodnota SG obzvláště u genotypu 'Moravians' (68 %). Hodnota SG genotypu 'Mayrika' (56 %) byla srovnatelná s variantami **K** a **5% PEG**. Varianta **25% PEG** dosáhla prokazatelně nejnižších hodnot SG ze všech variant u obou zkoumaných genotypů 'Moravians' (45 %), 'Mayrika' (46 %).

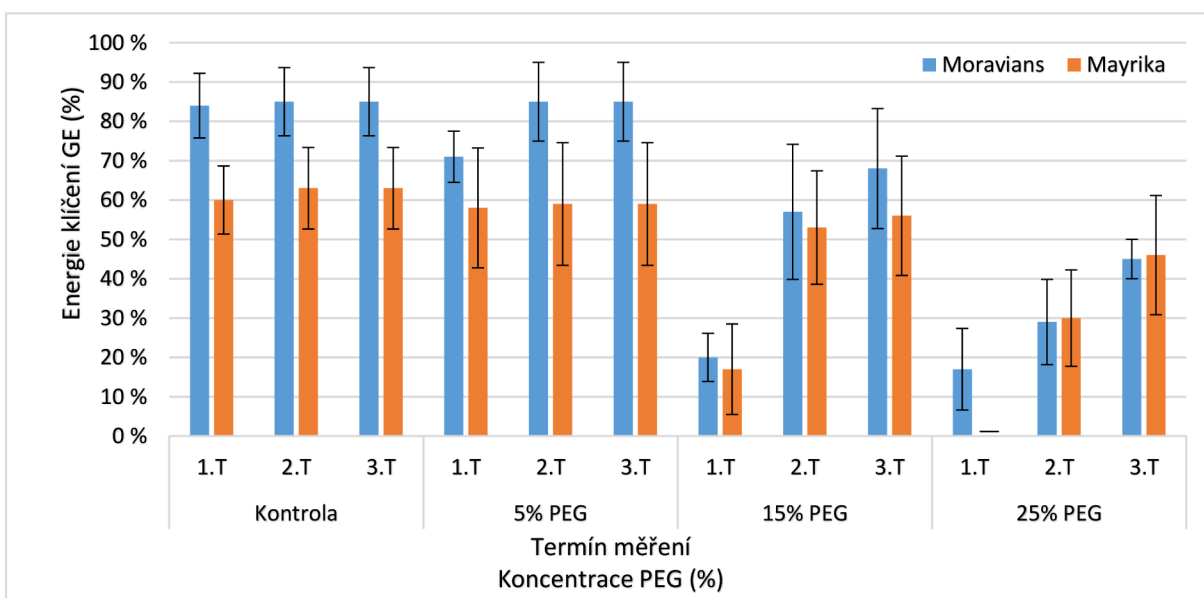


Obrázek 19 – Klíčivost semen (SG) vybraných genotypů *G. max* v závislosti na koncentraci PEG

### 5.2.2 Energie klíčení (GE)

Na Obrázku 20 je graficky znázorněna energie klíčení (GE) semen vybraných genotypů sóji luštinaté ve třech termínech měření (**3., 5. a 7. den**). Varianta **K** a **5% PEG** dosáhly shodných výsledků ve všech měřeních. V obou případech vyšších hodnot GE dosáhl genotyp 'Moravians'. K výraznému poklesu došlo až u varianty **15% PEG** a **25% PEG**. Varianta **15% PEG** při prvním měření (**3. den**) dosáhla nízkých hodnot – 20 % ('Moravians') a 17 % ('Mayrika'). Při druhém měření (**5. den**) došlo k výraznému nárůstu hodnot – 57 % ('Moravians') a 53 % ('Mayrika'). Při finálním měření (**7. den**) byl nárůstu hodnot minimální – 68 % u 'Moravians' a 56% u genotypu 'Mayrika'.

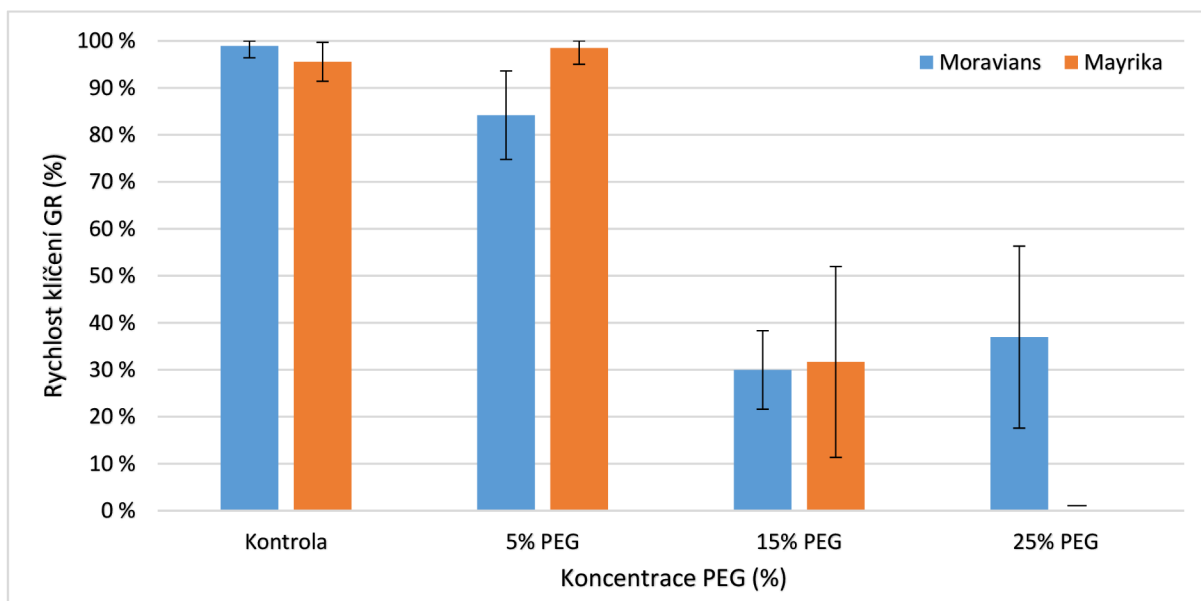
U varianty **25% PEG** při prvním měření (**3. den**) bylo dosaženo nejnižších hodnot GE – 'Moravians' (17 %), 'Mayrika' (0 %). Při druhém měření (**5. den**) byl patrný výrazný nárůstu GE u genotypu 'Mayrika' (30 %) a k jen mírný nárůstu GE u genotypu 'Moravians' (29 %). Při finálním měření (**7. den**) dosáhly hodnoty GE – 45 % ('Moravians') a 46 % ('Mayrika').



Obrázek 20 – Energie klíčení (GE) vybraných genotypů *G. max* v závislosti na koncentraci PEG

### 5.2.3 Rychlost klíčení (GR)

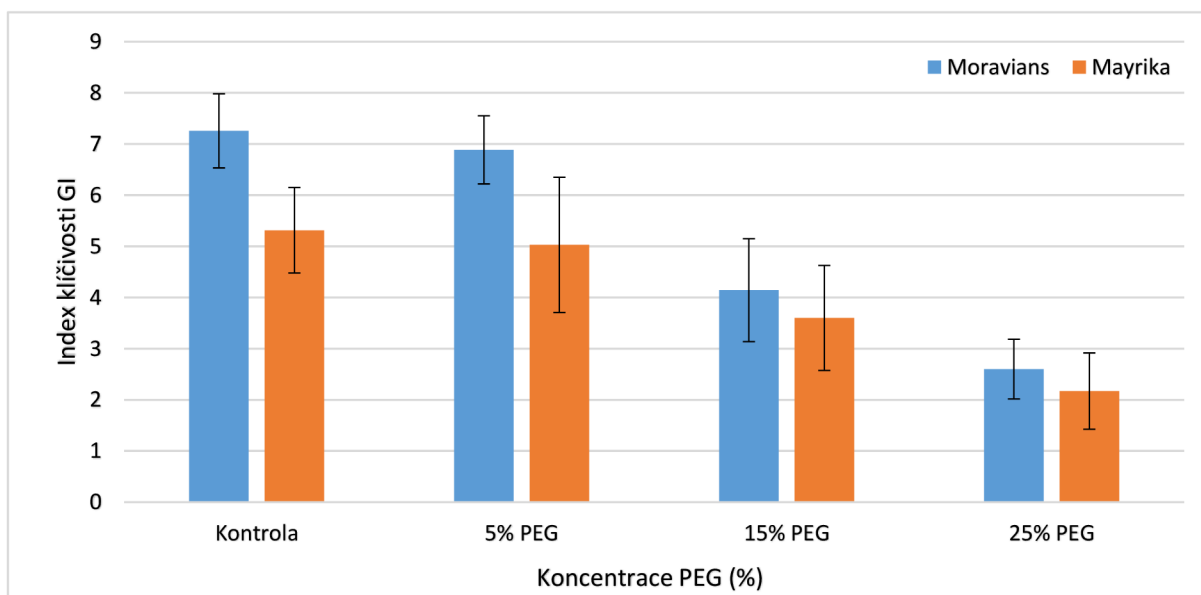
Na Obrázku 21 jsou graficky vyobrazeny hodnoty rychlosti klíčení (GR) semen vybraných genotypů sóji luštinaté. Varianta **K** a **5% PEG** dosáhly velice podobné úrovně hodnot GR. Většího rozdílu bylo dosaženo mezi genotypy u varianty **5% PEG**, kde genotyp 'Mayrika' dosáhl o 12, 29 % vyšších hodnot GR oproti 'Moravians'. Ke snížení hodnot GR bylo dosaženo až u varianty **15% PEG** – 'Moravians' (29,95 %), 'Mayrika' (31,66 %). U varianty **25% PEG** byl patrný největší rozdíl mezi zkoumanými genotypy 'Moravians' (36,94 %) a 'Mayrika' (0 %).



Obrázek 21 – Rychlost klíčení (GR) vybraných genotypů *G. max* v závislosti na koncentraci PEG

#### 5.2.4 Index klíčivosti (GI)

Na Obrázku 22 jsou vyobrazeny získané hodnoty indexu klíčivosti (GI) vybraných genotypů sóji luštinaté. Kontrolní varianta (**K**) a **5% PEG** dosáhly shodných hodnot GI. U obou variant dosáhl vyšších hodnot GI genotyp 'Moravians'. K poklesu hodnot GI došlo u varianty **15% PEG** – 'Moravians' (4,1), 'Mayrika' (3,6). Nejnižších hodnot GI dosáhla varianta **25% PEG**, kde byl pokles hodnot GI výraznější než u ostatních variant 2,6 ('Moravians'), 2,2 ('Mayrika').

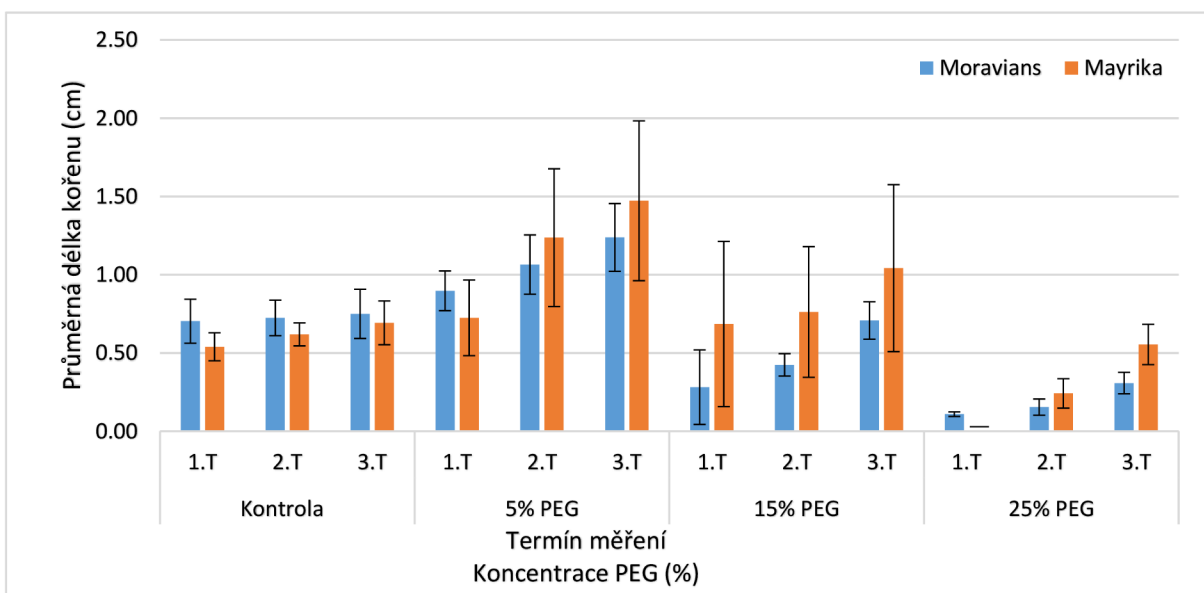


Obrázek 22 – Index klíčivosti (GI) vybraných genotypů *G. max* v závislosti na koncentraci PEG

### 5.2.5 Průměrná délka kořenů

Na Obrázku 23 jsou graficky znázorněny získané hodnoty průměrné délky kořenů (cm) sóji luštinaté ve třech termínech měření (**3.**, **5.** a **7. den**). Kontrolní varianta (**K**) dosahovala srovnatelných hodnot průměrné délky kořenů ve všech termínech měření. Při finálním měření (**7. den**) dosáhly hodnoty 0,75 ('Moravians'), 0,69 ('Mayrika'). U varianty **5% PEG** byly zjištěny největší hodnoty průměrné délky kořenů u jednotlivých měření. Nižších hodnot dosáhla varianta **15% PEG**. U varianty **15% PEG** byl rovněž nejvíce patrný rozdíl mezi testovanými genotypy, kde vyšších hodnot dosáhl genotyp 'Mayrika' při všech termínech měření.

Nejnižší hodnoty oproti ostatním zaznamenala varianta **25% PEG**, při prvním měření (**3. den**) dosáhly hodnoty průměrné délky kořenů obou genotypů sóji téměř nulových hodnot. Při měření druhém (**5. den**) došlo k nárůstu hodnot 0,15 ('Moravians'), 0,24 ('Mayrika'). Při finálním měření (**7. den**) došlo k výraznému nárůstu průměrné délky kořene u genotypu 'Mayrika' (0,55). Nárůst v menší míře byl zaznamenán u genotypu 'Moravians' (0,31).



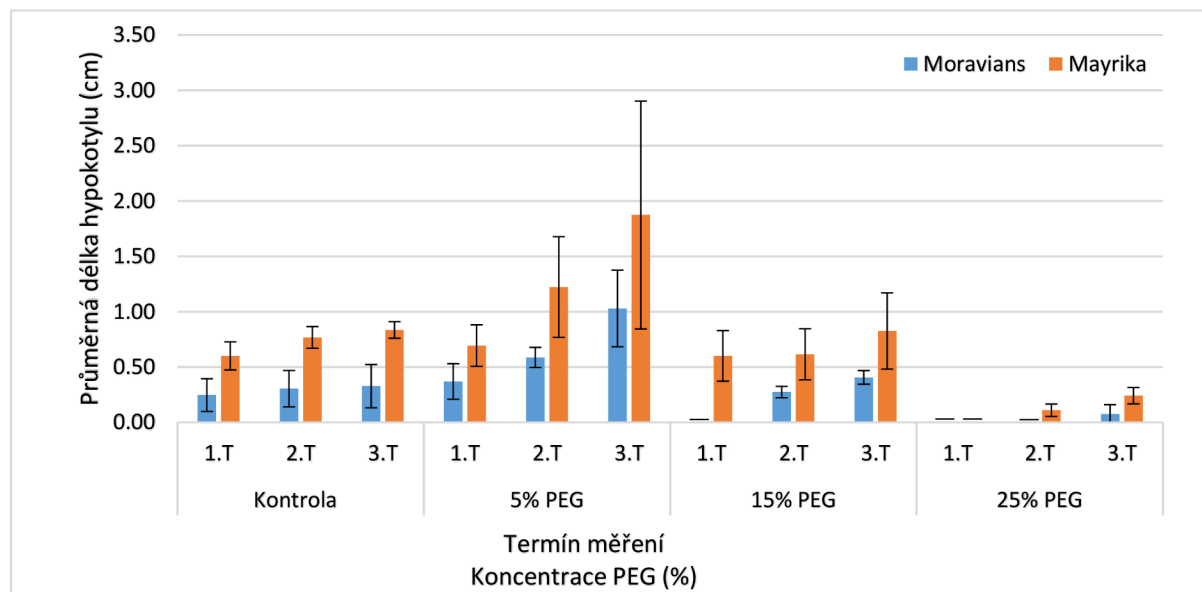
Obrázek 23 – Průměrná délka kořene vybraných genotypů *G. max* v závislosti na koncentraci PEG

### 5.2.6 Průměrná délka nadzemní části

Na Obrázku 24 jsou vyobrazeny získané hodnoty průměrné délky nadzemní části (cm) vybraných genotypů sóji luštinaté získané během třech termínů měření (**3.**, **5.** a **7. den**). Kontrolní varianta (**K**) měla ve všech termínech měření shodné hodnoty bez výrazného nárůstu mezi měřeními. Větší délka nadzemní č. byla zjištěna u genotypu 'Mayrika'. U varianty **5% PEG** byly zjištěny největší průměrné délky nadzemní č. mezi jednotlivým měřením. Varianta **5% PEG** také zaznamenala největší rozdíl mezi genotypy, přičemž vyšších hodnot dosáhl genotyp 'Mayrika'.

Pozorovatelně nižších hodnot dosáhla varianta **15% PEG**. Hodnoty průměrné délky kořene genotypu 'Moravians' a 'Mayrika' této varianty byly téměř srovnatelné s variantou **K**. S rozdílem při prvním měření (**3. den**) při kterém genotyp 'Moravians' dosáhl nulové hodnoty. Ze získaných dat byl viditelný rozdíl mezi genotypy.

Varianta **25% PEG** zaznamenala téměř nulové hodnoty během prvního a druhého měření (**3. a 5. den**). Měření bylo možné až během finálního měření (**7. den**) 0,07 ('Moravians'), 0,24 ('Mayrika').

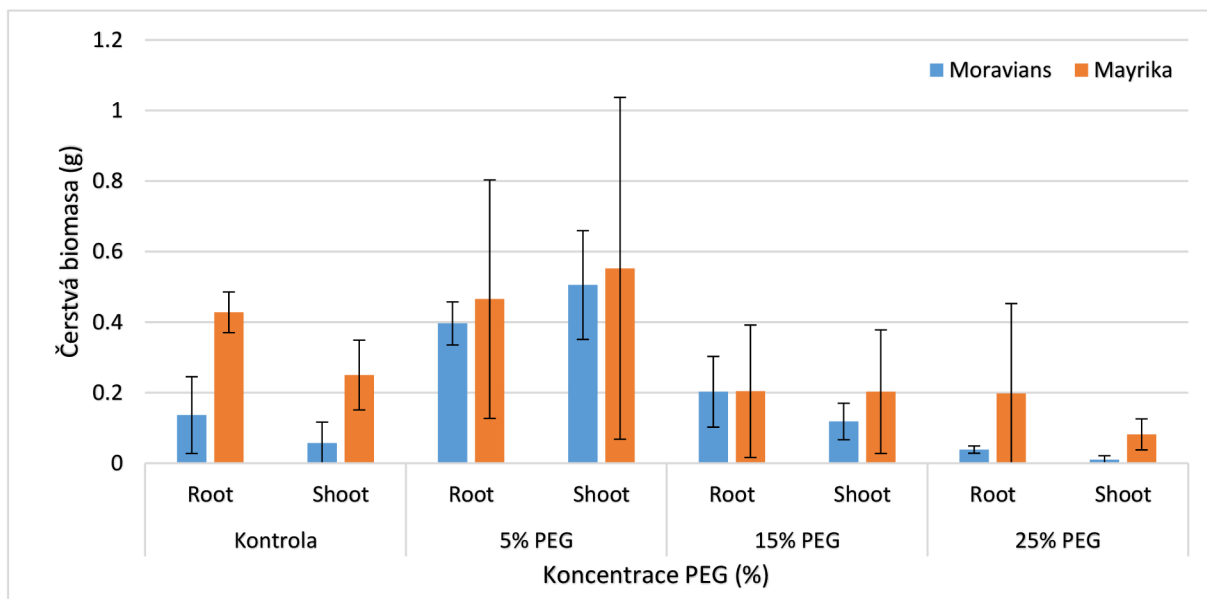


Obrázek 24 – Průměrná délka nadzemní části vybraných genotypů *G. max* v závislosti na koncentraci PEG

### 5.2.7 Hmotnost čerstvé biomasy

Na Obrázku 25 je graficky vyobrazena hmotnost čerstvé biomasy (FM) naměřená na konci pokusu (**7. den**), kdy byla vytvořená biomasa semen sóji luštinaté (kořen, nadzemní část) oddělena a následně zvážena (g). Kontrolní varianta (**K**) zaznamenala vyšší hodnotu FM kořene ('Moravians' 0,136, 'Mayrika' 0,429) oproti nadzemní FM ('Moravians' 0,057, 'Mayrika' 0,250). U této varianty více biomasy vytvořil genotyp 'Mayrika'. Varianta **5% PEG** dosáhla největší hmotnosti FM v části kořene i nadzemní. U této varianty byla část kořenová téměř vyrovnaná s nadzemní částí. Viditelně nižší hmotnosti FM dosáhla varianta **15% PEG**, u které FM kořene zaznamenala hodnoty 0,203 ('Moravians') a 0,204 ('Mayrika'). S tím srovnatelné hmotnosti dosáhla i nadzemní část obou genotypů 'Moravians' (0,118), 'Mayrika' (0,203). U varianty **25% PEG** byl zjištěn výrazný rozdíl mezi genotypy – 'Moravians' 0,039 (kořen), 0,010 (nadzemní č.), 'Mayrika' 0,198 (kořen), 0,082 (nadzemní č.). U této varianty byly hodnoty kořenové části genotypu 'Mayrika' srovnatelné s variantou **15% PEG**.

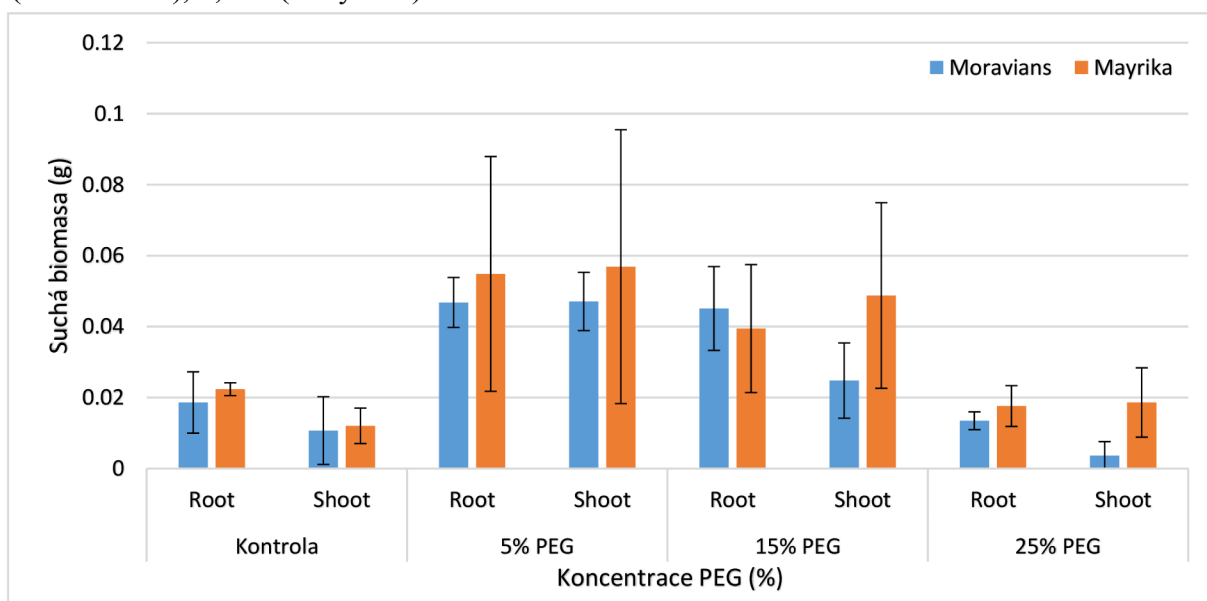




Obrázek 25 – Hmotnost čerstvé biomasy vybraných genotypů *G. max* v závislosti na koncentraci PEG

### 5.2.8 Hmotnost suché biomasy

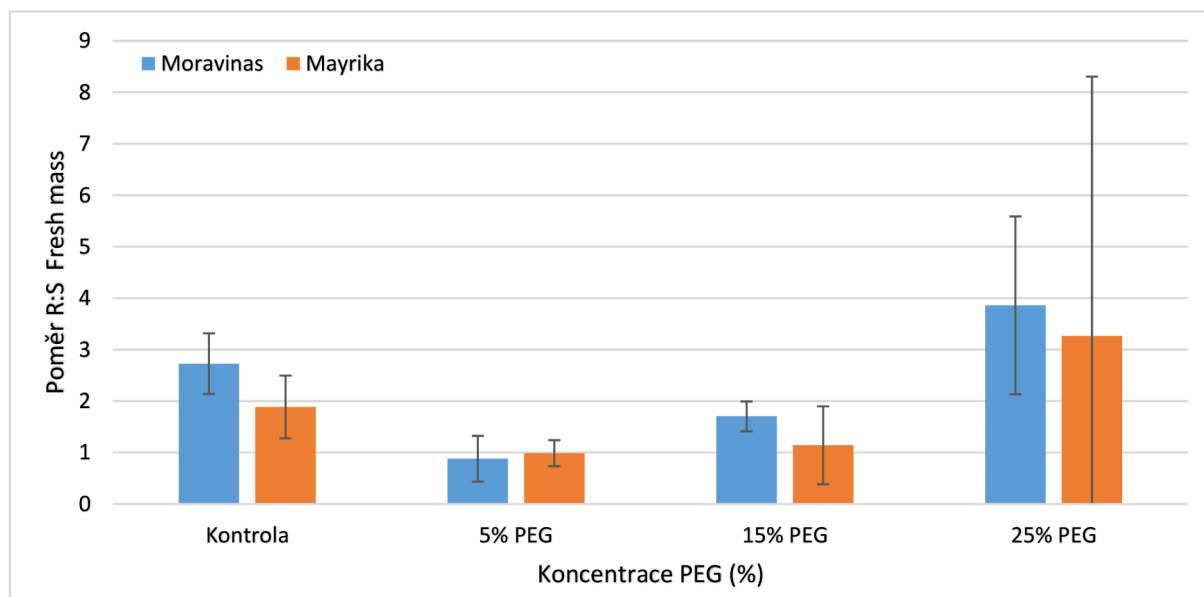
Na Obrázku 26 je zobrazena hmotnost suché biomasy (DM) získané na konci pokusu a následném vysušení a zvažení (g). Kontrolní varianta (**K**) dosáhla po vysušení velmi nízkých hodnot v části kořene (0,019 'Moravians', 0,022 'Mayrika') i v části nadzemní (0,011 'Moravians', 0,013 'Mayrika'). Srovnatelných hodnot dosáhla i varianta **25% PEG**, rovněž byly hodnoty této varianty nejnižší ze všech testovaných variant. Viditelný rozdíl byl i mezi genotypy. Varianta **5% PEG** dosáhla nejvyšších hodnot DM ze všech variant i v rámci genotypů. Hodnoty DM byly vyrovnané mezi kořenem (0,047 'Moravians', 0,054 'Mayrika') a nadzemní č. (0,047 'Moravians', 0,057 'Mayrika') i mezi genotypy. U varianty **15% PEG** dosáhly hodnoty DM kořene 0,045 ('Moravians'), 0,039 ('Mayrika') a nadzemní 0,025 ('Moravians'), 0,049 ('Mayrika').



Obrázek 26 – Hmotnost suché biomasy vybraných genotypů *G. max* v závislosti na koncentraci PEG

### 5.2.9 Poměr Root:Shoot (R:S) čerstvé biomasy

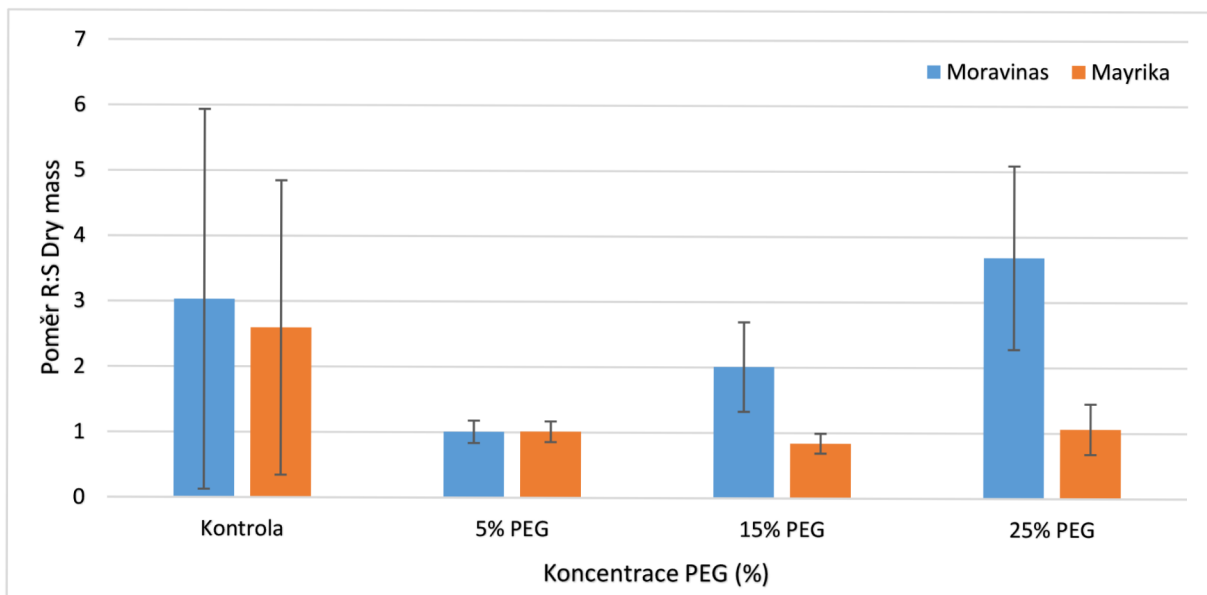
Na Obrázku 27 je vyobrazen poměr kořenové části ku části nadzemní (R:S) z čerstvé biomasy získané finální den měření (7.den). Kontrolní varianta (**K**) dosáhla hodnot R:S – 'Moravians' (2,73), 'Mayrika' (1,89). U varianty **K** byl pozorovatelný rozdíl mezi genotypy. Prokazatelně nejnižší hodnoty R:S dosáhla varianta **5% PEG** – 'Moravians' (0,88), 'Mayrika' (0,99). Varianta **15% PEG** dosáhla hodnot R:S – 1,71 ('Moravians'), 1,14 ('Mayrika'). Nejvyšších hodnot R:S dosáhla varianta **25% PEG** s minimálními rozdíly mezi genotypy – 3,86 ('Moravians'), 3,27 ('Mayrika')



Obrázek 27 – Poměr Root:Shoot čerstvé biomasy vybraných genotypů *G. max* v závislosti na koncentraci PEG

### 5.2.10 Poměr Root:Shoot (R:S) suché biomasy

Na Obrázku 28 je zobrazen poměr kořenové části ku nadzemní části (R:S) z hmotnosti suché biomasy získané po vysušení a zvážení. Kontrolní varianta (**K**) dosáhla podobných hodnot R:S v rámci genotypů – 'Moravians' (3,03), 'Mayrika' (2,59). Prokazatelně nejnižších hodnot dosáhla varianta **5% PEG**, mezi genotypy téměř shodných – 'Moravians' (1,01), 'Mayrika' (1,01). Varianta **15% PEG** dosáhla výrazného rozdílu hodnot R:S mezi genotypy – 'Moravians' (2,01), 'Mayrika' (0,84). Nejvýraznější rozdíl patrný v rámci genotypů byl u varianty **25% PEG**, kde R:S genotyp 'Moravians' dosáhl hodnoty o 2,621 vyšší než genotyp 'Mayrika'.



**Obrázek 28 – Poměr R:S suché biomasy vybraných genotypů *G. max* v závislosti na koncentraci PEG**

## 6 Diskuze

Omezení klíčení semen vybraných kulturních plodin pšenice seté (*Triticum aestivum* L.) a sóji luštěnaté (*Glycine max* L.) způsobené vnějšími vlivy je v současnosti velmi aktuální téma. V této bakalářské práci byl hodnocen vliv navozeného vodního stresu nedostatkem přístupné vody v laboratorních podmínkách pomocí sloučeniny polyethylenglykol-6000 (PEG) v různých koncentracích (**5%**, **15%** a **25% PEG**). Hodnocenými parametry byla průměrná klíčivost semen (SG), energie klíčení (GE), rychlost klíčení (GR), index klíčivosti (GI). Dále byla měřena ve třech termínech (**3.**, **5.** a **7. den**) průměrná délka kořínku a délka hypokotylů testovaných semen. Po ukončení pokusu byla hodnocena hmotnost čerstvé biomasy, suché biomasy a poměr R:S z čerstvé a suché biomasy.

### 6.1 Parametry klíčení semen a stres

#### 6.1.1 Pšenice setá (*Triticum aestivum* L.)

Dle Hossaina et al. (2021) je pšenice klíčová potravina mezi obilovinami, která poskytuje lidem přibližně 20 % jejich kalorií a více než 25 % bílkovin. Tvoří asi 30 % celosvětové produkce obilovin, což činí 734 milionů tun z 214 milionů hektarů. Suché podmínky mají významný a negativní dopad na úrodu pšenice, přičemž sucho ovlivňuje všechny fáze jejího růstu. Pokud se suchá období vyskytnou v raných fázích růstu pšenice, může dojít k nedostatečnému zakořenění rostlin a snížení počtu klásků na jednotku plochy.

Dasgtaki et al. (2020) uvádí, v návaznosti na předchozí studie zabývající se podobnou problematikou, že sucho u pšenice má významný dopad na snížení všech hodnocených parametrů klíčení s nárůstem úrovně působícího stresu.

Ze získaných výsledků této bakalářské práce je patrné, že při vysokých koncentracích **15% PEG** a **25% PEG** dochází k významnému inhibičnímu účinku při klíčení u obou genotypů ('Vanessa', 'Frisky'), což je v souladu s výsledky Kizilgeci et al. (2017). V rámci jejich výzkumu byla pozorována snížená klíčivost u všech sledovaných variant pšenice seté (*T. aestivum*) v podmínkách vodního deficitu. Toto stanovisko podpořil výsledky svého výzkumu i Almaghrabi (2012). Z jeho práce je zřejmé, že inhibiční účinek se projevuje až při velmi vysokých koncentracích PEG (240 g/l a 300 g/l).

Almaghrabi (2012) ve své práci současně pozoroval značné rozdíly zkoumaných parametrů klíčení u osmi vybraných genotypů pšenice zatížených stresem ze sucha. V souladu s tím jsou i výsledky této práce, kdy klíčivost semen (SG) (Obrázek 8) u varianty **K** byla 95 % ('Vanessa') a 98 % ('Frisky'). U vyšší koncentrace stresoru (**25% PEG**) došlo ke snížení počtu vyklíčených semen a projevíly se také rozdíly mezi genotypy – 'Vanessa' (60 % SG), 'Frisky' (78 % SG).

Z toho vyplývá rozdílná tolerance a senzitivita k podmínkám sucha jednotlivých testovaných genotypů. To ve své práci potvrzuje Baque et al. (2016). Hellal et al. (2018) ve svém výzkumu s genotypy ječmene (*Hordeum vulgare* L.) uvádí, že působení PEG na semena během raných fází vývoje má negativní vliv na jejich schopnost vyklíčit ve zdravé jedince. Ovšem tento negativní vliv se minimalizuje na konci testu klíčivosti.

Efekt působení vodního stresu pomocí polyethylen glykolu (PEG) má významný vliv na rychlost klíčení (GR) (Obrázek 10). Při koncentraci 25% PEG došlo k poklesu GR u obou testovaných genotypů pšenice seté – 'Vanessa' (60 %), 'Frisky' (51 %). Naopak u varianty **K**, **5% PEG** a **15% PEG** byla výsledná hodnota GR rovna 100 %. Zjištěné výsledky jsou v souladu s výzkumem Basha et al. (2015), kteří tento jev pozorovali na semenech rajčete (*Solanum lycopersicon* L.).

Výsledky výzkumu dalších parametrů klíčení jako je energie klíčení (GE) (Obrázek 9) a index klíčivosti (GI) (Obrázek 11) získané během provedených měření (**3.**, **5.** a **7.den**) ukazují, že semena pšenice nejsou výrazně ovlivněna nižší koncentrací **PEG (5%, 15%)**, u kterých jsou hodnoty shodné s variantou kontrolní (**K**). Změna nastává až při koncentraci **25% PEG**, kde hodnoty obou genotypů ('Vanessa', 'Frisky') zaznamenaly výrazně nižší hodnoty. Svým výzkumem tyto výsledky potvrzuje i práce Ghanifathi et al. (2011), kteří na základě své studie s genotypy pšenice seté uvádí, že se zvyšující se úroveň působení sucha, jako abiotického stresoru, dochází k výraznému snížení parametrů klíčení, zejména z důvodu sníženého osmotického potenciálu a omezené absorpce vody semeny.

### 6.1.2 Sója luštinatá (*Glycine max* L.)

Stejně jako pšenice je i sója (*G. max*) extrémně klíčovou plodinou pro moderní svět. Zejména díky svému širokému uplatnění v oblasti krmiv, lidské konzumaci a průmyslových účelů. Obsahuje 33 až 45 % proteinů s příznivým složením aminokyselin a 18 až 24 % tuku, přičemž polovina je tvořena nenasycenými mastnými kyselinami, a pouze 5 až 8 % hrubé vlákniny (Staniak et al. 2022).

Stres způsobený suchem je klíčový faktor, který omezuje růst sóji tím, že snižuje rychlost růstu rostlin v období vegetace. Výzkumy se shodují, že množství vody, které rostliny spotřebují, má zásadní vliv na jejich růst a vývoj. Nedostatek vody může negativně ovlivnit rostliny v libovolné fázi, obzvláště během klíčení, což má za následek jejich poškození (Hamayun et al. 2010). Sója je známá svou náchylností na nedostatek vody, který má nejprve dopad na fyziologické a biochemické procesy, což se následně projevuje na morfologii (Zou et al. 2019).

Výsledky této práce získané po provedení pokusu se semeny sóji luštinaté (*G. max*) ukazují vliv indukovaného vodního stresu pomocí vyšších koncentrací PEG (**15% PEG**, **25% PEG**) na semena vybraných genotypů ('Moravians', 'Mayrika'). Projevem působení je výrazné snížení počtu vyklíčených semen a inhibice růstu během celé kultivace. Ze získaných výsledků své práce to potvrzují Vijay et al. (2018), kteří ve svém výzkumu se semeny sóji (*G. max*) též uvádí významné rozdíly a variabilitu v klíčení semen jednotlivých zkoumaných genotypů.

Finální klíčivost (SG) (Obrázek 19) varianty **5% PEG** byla shodná s variantou kontrolní (**K**) u obou testovaných genotypů 85 % ('Moravians') 59 % ('Mayrika'). Pokles klíčivosti nastal až s koncentrací **15% PEG** (68 % 'Moravians', 56 % 'Mayrika') a **25% PEG** (45 % 'Moravians', 46 % 'Mayrika') obzvláště výrazný pokles u genotypu 'Moravians' **25% PEG** o 40 %. Výsledky jsou v souladu s výzkumem Sadeghi et al. (2011), kteří uvádí, že pokles klíčivosti semen sóji je způsobený snížením osmotického potenciálu působením PEG, a to od hranice 0 do -1,2 MPa a výrazněji od -1,6 MPa do -2 MPa.

Begum et al. (2022) díky výsledkům svého výzkumu zaznamenali vliv sucha na energii klíčení (GE) semen sóji. V práci na toto téma uvádí, že při vystavení semen koncentraci **15% PEG** se dramaticky sníží hodnota GE, ovšem žádná změna se nedostaví při koncentraci **10% PEG**. Poukazuje rovněž na rozdílné tolerance zkoumaných genotypů. Hodnoty GE (Obrázek 20) dokumentované v této práci během třech termínů měření (**3., 5., 7.den**) tyto výsledky potvrzují. Je zároveň patrné že, koncentrace **5% PEG** je téměř shodná s kontrolní variantou (**K**) u obou genotypů ('Moravians', 'Mayrika') při všech měřeních. Pokles GE nastává až s koncentrací **15% PEG** během všech provedených měření. Výraznější pokles GE je u koncentrace **25% PEG**.

U semen sóji je z výsledků patrný signifikantní vliv vodního deficitu na rychlost klíčení (GR) (Obrázek 21) s rostoucí koncentrací PEG. Koncentrace **15% PEG** způsobila výrazné snížení GR u obou testovaných genotypů 'Moravians' (29,95 %), 'Mayrika' (31,66 %) oproti kontrolní variantě (**K**). Varianta **25% PEG** vykazovala velmi vysoký vliv na genotyp 'Mayrika' (0 %). Genotyp 'Moravians' dosáhl o 6,99 % vyšší GE oproti **15% PEG**. Shitole & Dhumal ve své práci s kassiou pravou (*Cassia angustifolia*) uvádí, že hodnoty GR s vyšší koncentrací PEG klesají kvůli omezení dostupné vody. V souladu s tím jsou i výsledky mé práce. Rozdíl u koncentrace **25% PEG** mohl být způsoben výběrem neklíčících semen.

Index klíčivosti (GI) (Obrázek 22), stejně jako ostatní parametry klíčení sóji, byl do jisté míry ovlivněn skrze PEG. Úroveň vlivu narůstala s koncentrací. Oba sledované genotypy vykazovaly podobnou úroveň vlivu. Genotyp 'Moravians' zaznamenal výraznější vliv oproti genotypu 'Mayrika'. Tento závěr potvrdil Chiy asi & Tajbakhsh (2013).

## 6.2 Růstové parametry a stres

### 6.2.1 Pšenice setá (*Triticum aestivum* L.)

Ze získaných výsledků této práce je patrný vliv PEG na délku kořenů (Obrázek 13) semen pšenice seté (*T. aestivum*) u všech testovaných variant i v rámci genotypů. Nejvyšší průměrnou délku kořene zaznamenala varianta **5% PEG** ve všech termínech měření (**3., 5. a 7.den**). Naopak nejnižší hodnoty byly změřeny u varianty **25% PEG**. V souladu s tímto zjištěním je i výzkum Almaghrabi (2012), který upozoroval nárůst délky kořene pšenice při působení nižší koncentrace PEG (120 g/l). Důvodem je patrně adaptivní reakce spočívající v prodloužení kořenů pro dosažení zásob vody hlouběji v půdě. Ovšem s rostoucí koncentrací PEG (**25% PEG**) dochází k inhibici růstu.

Délka nadzemní části (shoot) vykazovala úroveň vlivu PEG s rostoucí koncentrací u zkoušených genotypů (Obrázek 14). Nejvyšší hodnoty dosáhla varianta kontrolní (**K**) a **5% PEG**, které byly shodné. Průměrná délka nadzemní části poklesla až u varianty **15% PEG** u obou zkoumaných genotypů. Signifikantní pokles, s téměř úplnou absencí shoot, byl zaznamenán u varianty **25% PEG**. Kizilgeci et al. (2017) pozorovali tento jev ve svém výzkumu na semenech pšenice seté (*T. aestivum*) umístěných do podmínek vodního deficitu. Zjistili, že výrazné snížení shoot je patrné při úrovni -0,9 MPa a -1,2 MPa osmotického tlaku. Vliv vodního deficitu pomocí PEG na pokles délky kořene a nadzemní části semen kukuřice (*Zea mays* L.) pozorovali Partheeban et al. (2017). Mahpara et al. (2022) svým výzkumem na pšenici seté (*T. aestivum*) tvrdí, že úroveň vlivu na růstové parametry semen se odvíjí od

tolerance k suchu zkoumaných genotypů. Současně svým výzkumem dokazují, že k nejvyšší redukci růstových parametrů u semen pšenice dochází při hodnotě -1,2 MPa osmotického potenciálu.

Vliv různých koncentrací PEG na hmotnost FM (Obrázek 15) a DM (Obrázek 16) kořene a nadzemní části, dokumentované v této práci, ukazují výrazné snížení těchto hodnot při působení vyšší koncentrace PEG (**25%**). Současně dochází k poklesu hmotnosti u nadzemní části oproti kořenové při koncentracích **5% PEG** a **15% PEG**. Rovněž tyto varianty zaznamenaly nejvyšší hodnoty FM a DM oproti variantě kontrolní (**K**). Žádný ze zkoumaných genotypů neukázal signifikantně vyšší hodnoty FM a DM oproti druhému. Tyto závěry potvrdili Ghanifathi et al. (2011). Krucký et al. (2022) uvádí, že genotypy pšenice odolnější vůči působení sucha si udržují větší obsah vody při omezené dostupnosti vody.

Poměr Root:Shoot čerstvé a suché biomasy (Obrázek 17), (Obrázek 18) semen pšenice ukazuje nárůst hodnoty s rostoucí koncentrací PEG. Nejnižší poměr byl zjištěn u kontrolní varianty (**K**) a nejvyšší u varianty **25% PEG**. To potvrdili Nagel et al. (2014) na semenech pšenice tvrdé (*Triticum durum* L.). Wu & Cosgrove (2000) uvádí, že důvodem nárůstu R:S je nižší citlivost kořenů oproti nadzemní části v podmínkách vodního deficitu.

### 6.2.2 Sója luštinatá (*Glycine max* L.)

Data reprezentovaná v této práci ukazují vliv PEG na průměrnou délku kořene sóji (*G. max*) (Obrázek 23) při vyšších koncentracích PEG (**15% PEG**, **25% PEG**), u všech provedených měření (**3.**, **5.**, **7.den**) i v rámci obou genotypů ('Moravians', 'Mayrika'). U varianty **15% PEG** došlo k inhibici růstu kořene semen genotypu 'Moravians', genotyp 'Mayrika' zaznamenal nárůst oproti kontrolní variantě (**K**). Vysoká koncentrace PEG u varianty **25% PEG** způsobila výrazné omezení růstu kořene až téměř úplnou inhibici růstu u obou zkoumaných genotypů. Nejvyšší průměrné hodnoty délky kořene oproti variantě kontrolní (**K**) byly zaznamenány u varianty **5% PEG**. V souladu s tím je práce Sun & Shahrajabian (2020), kteří ve svém výzkumu se semeny sóji v podmínkách zvýšeného sucha dokazují znatelný nárůst délky kořene při nízké úrovni osmotického potenciálu (-0,3 MPa, -0,6 MPa) oproti kontrolní variantě. Naopak výrazné omezení růstu při vysoké úrovni osmotického potenciálu -0,9 a -1,2 MPa dochází až k úplné inhibici růstu a vývoje.

Průměrná délka nadzemní části (shoot) semen sóji (Obrázek 24) dokumentovaná v průběhu pokusu ukázala vliv vodního deficitu navozeného pomocí PEG. Patrná je inhibice růstu až úplné zastavení vývoje nadzemní části s rostoucí koncentrací obzvláště u **15% PEG** a **25% PEG**. Naopak růst byl pomocí PEG podpořen u varianty **5% PEG**, kde bylo dosaženo vyšší hodnoty délky shoot oproti variantě kontrolní (**K**). Signifikantně větší délky shoot dosáhl genotyp 'Mayrika' oproti 'Moravians'. Svou prací tyto výsledky potvrzuje i práce Deshmukh et al. (2020) zkoumající vliv vodního deficitu na semena sóji.

Výsledná hmotnost FM a DM (Obrázek 25, Obrázek 26) části kořene a nadzemní části dokumentuje vliv PEG na schopnost semen utvořit množství biomasy v podmínkách vodního deficitu. Z výsledků je patrné snížení biomasy u vyšších koncentracích PEG (**15% PEG**, **25% PEG**). Současně klesá hmotnost nadzemní části na úkor kořenové s nárůstem koncentrace PEG. Nejvíce biomasy vytvořila varianta **5% PEG**, u které byla hmotnost kořenové a nadzemní části v rámci genotypů vyrovnána. Při porovnání genotypů mezi sebou vytvořil více biomasy

genotyp 'Mayrika' oproti 'Moravians'. V souladu se zmíněnými poznatky je i výzkum Pane et al. (2018). Ve své práci popisují vliv PEG na množství vyprodukované biomasy. Dle výsledků jejich výzkumu dochází k omezení tvorby biomasy semen sóji s rostoucí úrovní vodního deficitu u všech testovaných genotypů.

Poměr Root:Shoot (R:S) z čerstvé a suché biomasy (Obrázek 27), (Obrázek 28) dosáhl nejnižších hodnot u variant **5% PEG** a **15% PEG**. S vyšší koncentrací PEG se poměr Root:Shoot zvýšil u varianty **25% PEG**. Současně s nárůstem koncentrace (**15% PEG**, **25% PEG**) se zvyšoval rozdíl v rámci genotypů. Výrazně vyšší poměr zaznamenal genotyp 'Moravians' oproti genotypu 'Mayrika'. Imtiaz et al. (2020) tyto poznatky potvrzují svým výzkumem na fazolích mungo (*Vigna radiata* L.). Rovněž uvádí, že snížení poměru R:S při podmínkách stresu je indikátorem zpomaleného růstu kořenů. Zatímco zvýšení poměru R:S znamená větší růst a prodlužování kořenů na úkor nadzemní části tak, aby dosáhly do větší hloubky a mohly přijímat vodu.



## 7 Závěr

V rámci této bakalářské práce byl sledován vliv navozeného vodního stresu v laboratorních podmínkách pomocí sloučeniny polyethylenglykol-6000 (PEG) u semen modelových rostlin pšenice seté (*Triticum aestivum* L.) – genotypy 'Vanessa' a 'Frisky', a sóji luštinaté (*Glycine max* L.) – genotypy 'Moravians' a 'Mayrika'. Experiment byl rozdělen do 4 variant, podle koncentrace PEG (5%, 15%, 25%) a na variantu kontrolní (K). Měření bylo provedeno 3., 5. a 7. den od založení experimentu. Hodnocenými parametry klíčení byla klíčivost semen (SG), energie klíčení (GE), rychlost klíčení (GR) a index klíčivosti (GI). Dále byla sledována délka kořene, délka nadzemní části a poměr R:S.

Ze získaných výsledků práce bylo dosaženo následujících závěrů:

- Bylo prokázáno, že vodní deficit (sucho) negativně ovlivnil parametry klíčení (SG, GE, GR, GI).
- Sucho inhibovalo růst kořene a nadzemní části, a tím i následné hodnoty FM, DM a poměr R:S u pšenice seté (*T. aestivum*) a sóji luštinaté (*G. max*). U většiny sledovaných parametrů bylo dosaženo nižších hodnot v porovnání s variantou K, kde byly podmínky optimální.
- Z provedeného experimentu je patrné, že se zvyšující úrovní vodního deficitu klesaly hodnoty parametrů klíčení a růstu semen u obou zkoumaných plodin (pšenice, sója).
- Na působení podmínek vodního deficitu, byla ze zkoumaných plodin více tolerantní pšenice a sója více senzitivní.
- U pšenice seté (*T. aestivum*) nebyl v rámci zkoumaných genotypů 'Vanessa' a 'Frisky' prokázán významný rozdíl v parametrech klíčení a růstu semen. Avšak nepatrně vyšších hodnot dosáhl genotyp 'Frisky'.
- Koncentrace 5% PEG působila stimulačním účinkem u obou genotypů ('Vanessa', 'Frisky') semen pšenice. Následkem byl výrazný nárůst kořene oproti nadzemní části.
- U sóji luštinaté (*G. max*) byly pozorovány výrazné rozdíly mezi zkoumanými genotypy 'Moravians' a 'Mayrika'. Vyšších hodnot u parametrů klíčení dosáhl genotyp 'Moravians'. Na druhou stranu vyšších hodnot růstových parametrů a množství vytvořené biomasy dosáhl genotyp 'Mayrika'.
- U semen sóji bylo zjištěno, že u nízké koncentrace stresového faktoru (5% PEG) dochází ke stimulaci růstu kořenů a nadzemní části, a tím i zvýšení těchto sledovaných parametrů.
- Na základě výsledků této práce vyplývá, že hypotéza o existenci genotypových a mezidruhových rozdílů chování semen v prostředí s omezeným přístupem vody byla potvrzena. Tento závěr vyplývá z významně nižších parametrů klíčení a růstu u sledovaných modelových rostlin (pšenice, sója), a také z pomalejšího nástupu klíčení a pozorovatelně nižších hodnot dalších sledovaných parametrů v podmínkách omezené dostupnosti vody.
- Stále se zhoršující situace s množstvím vody v půdě představuje do budoucna velký problém při pěstování plodin, zejména kvůli riziku působení sucha. Kvůli rozšíření znalostí v tomto odvětví pro lepší mapování vlivů a působení sucha na rostliny by se touto problematikou měly výzkumy i nadále zabývat.

## 8 Literatura

Abbass K, Qasim MZ, Song H, Murshed M, Mahmood H, Younis I. 2022. A reievw of the global climate change impacts, adaptation and sustainable mizigation measures. *Environmental Science and Pollution Research* **29**:42539-42559.

Abdelaal K, AlKahtani M, Attia K, Hafez Y, Király L, Künstler A. 2021. The role of plant growth-promoting bacteria in alleviating the adverse effects of drought on plants. *Biology* (e520) DOI: 10.3390/biology10060520.

AghaKouchak A, Mirchi A, Madani K, Baldassarre GD, Nazemi A, Alborzi A, Anjileli H, Azarderakhsh M, Chiang F, Hassanzadeh E, Huning LS, Mallakpour I, Martinez A, Mazdiyasn O, Moftakhari H, Norouzi H, Sadegh M, Sadeqi D, Van Loon AF, Wanders N. 2021. Anthropogenic drought: definition, challenges, and opportunities. *Advancing Earth and Space Sciences* (e2019RG000683) DOI:10.1029/2019RG000683.

Almaghrabi OA. 2012. Impact of drought stress on germination and seedling growth parameters of some wheat cultivars. *Life Science Journal* **9**:590-598.

Anjum SA, Xie X, Wang L, Saleem MF, Man C, Lei W. 2011. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African Journal of Agricultural Research* **6**:2026-2032.

Ault TR. 2020. On the essentials of drought in a changing climate. *Science* **368**:256-260.

Bam RK, Kumaga FK, Ori K, Asiedu EA. 2006. Germination, vigour and dehydrogenase activity of naturally aged rice (*Oryza sativa* L.) seeds soaked in potassium and phosphorus. *Asian Journal of Plant Sciences* **5**:948-955.

Baque A, Nahar M, Yeasmin M, Quamruzzaman M, Rahman A, Azad MJ, Biswas PK. 2016. Germination behavior of wheat (*Triticum aestivum* L.) as influenced by polyethylene glycol (PEG). *Universal Journal of Agricultural Research* **4**:86-91.

Baranyk P, Balík J, Hájková M, Havel J, Kazda J, Lošák T, Málek B, Markytán P, Plachká E, Richter R, Soukup J, Stražil Z, Šaroun J, Škeřík J, Šmirous P, Štranc P, Volf M, Vrbovský V, Zehnálek P, Zelený V. 2010. *Olejníny*. Profi Press s.r.o., Praha.

Bareke T. 2018. Biology of seed development and germination physiology. *Advances in Plants & Agriculture Research* **8**:336-346.

Barooah L, Dutta SA, Das S, Bordoloi A. 2023. Drought stress in vegetable crops: A review. *The Pharma Innovation* **12**:1115-1119.

- Basal O, Szabó A, Veres S. 2020. PEG-induced drought stress effects on soybean germination parameters. *Journal of Plant Nutrition* **43**:1768-1779.
- Basha PO, Sudarsanam G, Reddy MMS, Sankar NS. 2015. Effect of PEG induced water stress on germination and seedling development of tomato germplasm. *International Journal of Recent Scientific Research* **6**:4044-4049.
- Begum N, Hasanuzzaman M, Li Y, Akhtar K, Zhang C, Zhao T. 2022. Seed germination behavior, growth, physiology and antioxidant metabolism of four contrasting cultivars under combined drought and salinity in soybean. *Antioxidants* (e498) DOI: 10.3390/antiox11030498.
- Bewley JD, Black M. 1982. *Physiology and biochemistry of seeds in relation to germination* vol. 2: viability, dormancy and environmental control. Springer-Verlag, Berlin.
- Bewley JD, Black M. 1994. *Seeds: physiology of development and germination*. Pleum Press, New York.
- Bewley JD, Bradford K, Hilhorst H. 2012. *Seeds: physiology of development, germination and dormancy*. Springer Science & Business Media, New York.
- Bewley JD. 1997. Seed germination and dormancy. *The Plant Cell* **9**:1055-1066.
- Bonjean, AP, Angus WJ. 2001. *The world wheat book: a history of wheat breeding*. Lavoisier Publishing, Paris.
- Bradley R. 2014. *The prehistoric settlement of Britain*. Routledge, New York.
- Carrera-Castaño G, Calleja-Cabrera J, Pernas M, Gómez L, Oñate Sanchez L. 2020. An updated overview on the regulation of seed germination. *plants* (e703) DOI: 10.3390/plants9060703.
- Cerkal R. 2011. *Stresy a produkční výkonost polních plodin*. Mendelova univerzita v Brně. Available from [http://web2.mendelu.cz/af\\_291\\_sklad/habilitacni\\_prednasky/habilitacni\\_prednaska\\_cerkal.pdf](http://web2.mendelu.cz/af_291_sklad/habilitacni_prednasky/habilitacni_prednaska_cerkal.pdf) (accessed December 2023).
- Crane-Droesch A. 2018. Machine learning methods for crop yield prediction and climate change impact assessment in agriculture. *Environmental Research Letters* (e114003) DOI: 10.1088/1748-9326/aae159.
- Curtis T, Halford NG. 2014. Food security: The challenge of increasing wheat yield and the importance of not compromising food safety. *Annals of Applied Biology* **164**:354-372.
- Čermák B, Ball DM, Hoveland CS, Lacefield GD, Frelich J, Hintnaus J, Kadlec J, Klimeš F, Lád F, Míka V, Mrkvička V, Peterka A, Slípka B, Voženílková BV. 2004. Vliv kvality krmiv

na produkci a zdravotní nezávadnost mléka a masa: vědecko-odborná publikace. Jihočeská univerzita, České Budějovice.

Dashtaki M, Bihamta MR, Majidi E, Azizinezhad R. 2020. Study of seed germination indices in bread wheat genotypes (*Triticum aestivum* L.) under drought stress simulated with polyethylene glycol. *Environmental Stresses in Crop Sciences* **13**:197-210.

Davis W. 2011 *Wheat belly*. Harper Thorsons, United Kingdom.

Deshmukh SN, Kolhe PN, Kale MR, Varne MD, Pawar K. 2020. Evaluation of drought effect on soybean genotypes mediated through PEG-6000 (Polyethylene Glycol). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* **9**:726-734.

Dhanda SS, Sethi GS, Behl RK. 2004. Indices of drought tolerance in wheat genotypes at early stages of plant growth. *J. Agronomy & Crop Science* **190**:6-12.

Dostálová R. 2017. Sója s výrobky ze sóji. Jak poznáme kvalitu **23**:4-6.

Evans LT, Peacock WJ. 1981. *Wheat science – today and tomorrow*. Cambridge University Press, Cambridge.

Farooq MA, Ma W, Shen S, Gu A. 2022. Underlying biochemical and molecular mechanisms for seed germination. *International Journal of Molecular Sciences* (8502) DOI: [doi.org/10.3390/ijms23158502](https://doi.org/10.3390/ijms23158502).

Finch-Savage WE, Footitt S. 2017. Seed dormancy cycling and the regulation of dormancy mechanism to time germination in field environments. *Journal of Experimental Botany* **68**:843-856.

Footitt S, Douterelo-Soler I, Clay H, Finch-Savage WE. 2011. Dormancy cycling in *Arabidopsis* seeds is controlled by seasonally distinct hormone-signaling pathways. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **108**:20236-20241.

Gambetta GA, Herrera JC, Dayer S, Feng Q, Hochberg U, Castellarin SD. 2020. The physiology of drought stress in grapevine: towards an integrative definition of drought tolerance. *Journal of Experimental Botany* **71**:4658-4676.

Gautam N, Sah M, Bhandari L, Aryal S, Kafle J, Pokharel S, Dhakal K. 2021. Biochemical and physical changes due to drought stress in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Tropical Agrobiodiversity (TRAB)* **2**:72-76.

Ghanifathi T, Valizadeh M, Shahryari R, Shahbazi H. 2011. Effect of drought stress on germination indices and seedling growth of 12 bread wheat genotypes. *Advances in Environmental Biology* **5**:1034-1039.

- Ghiy asi M, Tajbakhsh M. 2013. Osmopriming alleviates drought stress in soybean (*Glycine max* L.) seeds during germination and early growth stages. *Journal of Applied Biological Sciences* **7**:27-32.
- Ghosh A, Pal PK. 2015. Seedling phenology of *Clerodendrum indicum* (L.) exhibiting the unusual epigeal cryptocotylar type of germination. *Acta Botanica Gallica* **162**:233-237.
- Gong Z, Xiong L, Shi H, Yang S, Herrera-Estrella LR, Xu G, Chao D, Li J, Wang P, Qin F, Li J, Ding Y, Shi Y, Wang Y, Yang Y, Guo Y, Zhu J. 2020. Plant abiotic stress response and nutrient use efficiency. *Science China Life Sciences* **63**:635-674.
- Gooding MJ. 2016. The wheat crop. Page(s) 19-49 in Khan K, Shewry PR, editors. *Wheat: Chemistry and Technology*. AACC International, Inc. Saint Paul.
- Gull A, Lone AA Wani NUI. 2019. Biotic and abiotic stresses in plants. Pages 1-19 in De Oliveira AB, editors. *Abiotic and Biotic Stress in Plants*. IntechOpen, London.
- Hamayun M, Khan SA, Shinwari ZK, Khan AL, Ahmad N, Lee I. 2010. Effect of polyethylene glycol induced drought stress on physio-hormonal attributes of soybean. *Pakistan Journal of Botany* **42**:977-986.
- Hellal FA, El-Shabrawi HM, El-Hady MA, Khatab AI, El-Sayed SAA, Abdelly C. 2018. Influence of PEG induced drought stress on molecular and biochemical constituents and seedling growth of Egyptian barley cultivars. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology* **16**:203-212.
- Heun MR, Schaefer-pregl D, Klawan R, Castagna M, Accerbi B, Borghi F, Salamini F. 1997. Site of einkorn wheat domestication identified by DNA fingerprinting. *Science* **278**:1312-1314.
- Hossain A, Skalický M, Brestic M, Maitra S, Alam MA, Syed MA, Hossain J, Sarkar S, Saha S, Bhadra P, Shankar T, Bhatt R, Chaki AK, Sabagh AE, Islam T. 2021. Consequences and mitigation strategies of abiotic stresses in wheat (*Triticum aestivum* L.) under the changing climate. *Agronomy* (e241) DOI: 10.3390/agronomy11020241.
- Houba M, Dostálová R, Hochman M, Holeček J, Hosnedl V, Hýbl M, Huňady I, Ondráčková E, Ondřej M, Ponížil A, Prášil J, Seidenglanz M, Smýkal P, Šmirous P, Vaculík A, Zelený V. 2009. *Luskoviny pěstování a využití*. Kurent, České Budějovice.
- Chahtane H, Kim W, Lopez-Molina L. 2017. Primary seed dormancy: a temporally multilayered riddle waiting to be unlocked. *Journal of Experimental Botany* **68**:857-869.
- Chinnusamy V, Zhu J. 2009. Epigenetic regulation of stress responses in plants. *Current Opinion in Plant Biology* **12**:133-139.

Igrejas G., Branlard G. 2020. The importance of wheat. Springer, Cham. Available from [https://doi.org/10.1007/978-3-030-34163-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-34163-3_1) (accessed September 2023).

Imtiaz AA, Shahriar SA, Baque MA, Eaty MNKE, Falguni MR. 2020. Screening of mungbean genotypes under polyethylene glycol (PEG) induced drought stress condition. *Annual Research & Review in Biology* **35**:1-12.

Iqbal Z, Iqbal MS, Hashem A, Abd\_Allah EF, Ansari MI. 2021. Plant defense responses to biotic stress and its interplay with fluctuating dark/light conditions. *Frontiers in Plant Science* (e631810) DOI: 10.3389/fpls.2021.631810.

Isah T. 2019. Stress and defense responses in plant secondary metabolites production. *Biological research* (e39) DOI: 10.1186/s40659-019-0246-3.

Joshi R. 2018. Role of enzymes in seed germination. *International Journal of Creative Research Thoughts* **6**:1481-1485.

Kildisheva OA, Dixon KW, Silveira FA, Chapman T, Di Sacco A, Mondoni A, Cross AT. 2020. Dormancy and germination: making every seed count in restoration. *Restoration Ecology*, **28**:256-265.

Kizilgeci F, Tazebay N, Namli M, Albayrak O, Yildirim M. 2017. The drought effect on seed germination and seedling growth in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *International Journal of Agriculture, Environment and Food Sciences* **1**:33-37.

Kosová K, Vítámvás P, Urban MO, Prášil IT, Renaut J. 2018. Plant abiotic stress proteomics: the major factors determining alterations in cellular proteome. *Front Plant Science* (e29472941) DOI: 10.3389/fpls.2018.00122.

Krucky J, Hejnák V, Skalický M, Vachová P, Barboričová M, Filaček A, Tunklová B, Petrů V, Kraus K. 2022. Vliv sucha na vybrané fyziologické parametry genotypů pšenice (*Triticum aestivum* L.). Pages 31-36 in Hnilička F, editors. Vliv abiotických a biotických stresorů na vlastnosti rostlin 2022. Česká zemědělská univerzita, Praha.

Kucera B, Cohn MA, Leubner-Metzger G. 2005. Plant hormone interactions during seed dormancy release and germination. *Seed Science Research* **15**:281-307.

Kurbanbaev, I, Abdushukirova, S, Toshmatov, Z, Amanov, A, & Azimov A, Shavkiev J. 2023. Assessment of botanical and genetic collection of soybean for morphological and yield attributes and their impact on nodule-associated bacteria and soil fertility. *SABRAO Journal of Breeding Genetics*, **55**:760-777.

- Larcher W. 2003. Physiological plant ecology. ecophysiology and stress physiology of functional groups. Springer-Verlag, Heidelberg.
- Lee C, Choi MS, Kim HT, Yun HT, Lee B, Chung YS, Kim RW, Choi MS. 2015. Soybean [*Glycine max* (L.) Merrill]: Importance as a crop and pedigree reconstruction of Korean varieties. *Plant Breed. Biotechnol* **3**:179-196.
- Les DH. 2020. Aquatic monocotyledons of North America: ecology, life history and systematics. Taylor and Francis Group, Boca Raton.
- Levitt J. 1980. Responses of plants to environmental stress, volume 1: chilling, freezing, and high temperature stresses. Academic Press, New York.
- Levy AA, Feldman M. 2022. Evolution and origin of bread wheat. *The Plant Cell* **34**:2549-2567.
- Li H, Yue H, Xie J, Bu J, Li L, Xin X, Zhao Y, Zhang H, Yang L, Wang J, Jiang X. 2021. Transcriptomic profiling of the high-vigour maize (*Zea mays* L.) hybrid variety response to cold and drought stresses during seed germination. *Scientific Reports* (e19345) DOI: 10.1038/s41598-021-98907-8.
- Li W, Chen B, Chen Z, Gao Y, Chen Z, Liu J. 2017. Reactive oxygen species generated by NADPH oxidases promote radicle protrusion and root elongation during rice seed germination. *Molecular Sciences* (e110) DOI: 10.3390/ijms18010110.
- Liu W, Sun F, Lim WH, Zhang J, Wang H, Shioyama H, Zhang Y. 2018. Global drought and severe drought-affected populations in 1.5 and 2 °C warmer worlds. *Earth System Dynamics* **9**:267-283.
- Mahpara S, Zainab A, Ullah R, Kausar S, Bilal M, Latif MI, Arif M, Akhtar I, Al-Hashimi A, Elshikh MS, Zivcak M, Zuan ATK. 2022. The impact of PEG-induced drought stress on seed germination and seedling growth of different bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes. *PLOS ONE* (e0262937) DOI: 10.1371/journal.pone.0262937.
- Martinek P, Lecianová E, Dobrovolskaya OB. 2022. Šlechtění pšenice na výnos a mnohořadý klas. *Obilnářské listy* **2**:43-47.
- Mauseth JD. 2008. Botany: An introduction to plant biology. Jones and Bartlett Publishers, Sudbury.
- Ministerstvo zemědělství. 2021. Situační a výhledová zpráva Obilniny – k 23.2. 2022. MZe. Available from [https://eagri.cz/public/portal/-q368747---JLW17TWY/obiloviny-12-2021?\\_linka=a290837](https://eagri.cz/public/portal/-q368747---JLW17TWY/obiloviny-12-2021?_linka=a290837) (accessed December 2023).

Ministerstvo zemědělství. 2021. Situační a výhledová zpráva Olejniny – k 31.7. 2022. MZe. Available from [https://eagri.cz/public/portal/-a37088---pp7eEigk/publikace-situacni-a-vyhledova-zprava-olejniny-2021?\\_linka=a552046](https://eagri.cz/public/portal/-a37088---pp7eEigk/publikace-situacni-a-vyhledova-zprava-olejniny-2021?_linka=a552046) (accessed December 2023).

Moustafa-Farag M, Almoneafy A, Mahmoud A, Elkelish A, Arnao MB, Li L, Ai S. 2020. Melatonin and its protective role against biotic stress impacts on plants. *Biomolecules* (e54) DOI: 10.3390/biom10010054.

Murray J. 1970. The first european agriculture, a study of the osteological and botanical evidence until 2,000 B. C. Edinburgh University Press, Edinburgh.

Nagel M, Navakode S, Scheibal V, Baum M, Nachit M, Röder MS. 2014. The genetic basis of durum wheat germination and seedling growth under osmotic stress. *Biologia Plantarum* **58**:681-688.

Naing AH, Kim CK. 2021. Abiotic stress-induced anthocyanins in plants: their role in tolerance to abiotic stresses. *Physiologia Plantarum* **172**:1711-1723.

Nonogaki H, Bassel GW, Bewley JD. 2010. Germination-still a mystery. *Plant Science* **179**:574-581.

Nonogaki H. 2019. Seed dormancy and germination emerging mechanisms and new hypotheses (e233) DOI: 10.3389/fpls.2014.00233.

Okçu G, Kaya MD, Atak M. 2005. Effects of salt and drought stresses on germination and seedling growth of pea (*Pisum sativum* L.). *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* **29**:237-242.

OSEVA a.s. 2023. Ozimy: Pšenice ozimá. OSEVA. Available from <https://oseva.eu/product/frisky/> (accessed December 2023).

OSEVA, AGRO Brno, spol.s.r.o. 2023. Pšenice ozimá: Odrůdy s elitní pekařskou jakostí E. OSEVA AGRO Brno. Available from <https://www.oseva-agro.cz/index.php/obiloviny/obiloviny-ozime/psenice-ozima> (accessed December 2023).

Pane RF, Damanik RI, Khardinata EH. 2018. Germination performance of selected local soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) cultivars during drought stress induced by Polyethylene Glycol (PEG). International Conference on Agriculture, Environment, and Food Security (e012054) DOI: 10.1088/1755-1315/122/1/012054.

Partheeban C, Chandrasekhar CN, Jeyakumar P, Revikesavan R, Gnanam R. 2017. Effect of PEG induced drought stress on seed germination and seedling characters of maize (*Zea mays* L.) genotypes. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* **6**:1095-1104.



- Pausas JG, Lamont BB. 2022. Fire-released seed dormancy-a global synthesis. *Biological Reviews* **97**:1612-1639.
- Reed RC, Bradford KJ, Khanday I. 2022. Seed germination and vigor: ensuring crop sustainability in a changing climate. *Heredity* **128**:450-459.
- Sadeghi H, Khazaei F, Yari L, Sheidaei S. 2011. Effect of seed osmopriming on seed germination behavior and vigor of soybean (*Glycine max* L.). *ARPN Journal of Agricultural and Biological Science* **6**:39-43.
- Salam U, Ullah S, Tang Z, Elateeq AA, Khan Y, Khan J, Khan A, Ali S. 2023. Plant metabolomics: an overview of the role of primary and secondary metabolites against different environmental stress factors. *Life* (e706) DOI: 10.3390/life13030706.
- Seleiman MF, Al-Suhaibani N, Ali N, Akmal M, Alotaibi M, Refay Y, Dingaroglu T, Abdul-Wajid HH, Battaglia ML. 2021. Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants* (e259) DOI: 10.3390/plants10020259.
- Shahzad MA, Jan SU, Afzal F, Khalid M, Gul A, Sharma I, Sofu A, Ahmad P. 2016. Drought stress and morphophysiological responses in plants. Pages 452-467 in Ahmad P, editors. *Water Stress and Crop Plants: A Sustainable Approach*. John Wiley & Sons, New York.
- Shao H, Chu L, Jaleel CA, Zhao C. 2008. Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. *Comptes Rendus Biologies* **331**:215-225.
- Sharma A, Kumar V, Shahzad B, Ramakrishnan M, Sindhu GPS, Bali AS, Handa N, Kapoor D, Yadav P, Khanna K, Bakshi P, Rehman A, Kohli SK, Khan EA, Parihar RD, Yuan H, Thukral AK, Bhardwaj R, Zheng B. 2020. Photosynthetic response of plants under different abiotic stresses: a review. *Journal of Plant Growth Regulation* **39**:509-531.
- Shewry PR. 2009. Wheat. *Journal of Experimental Botany* **60**: 1537-1553.
- Shitole SM, Dhumal KN. 2012. Effect of water stress by polyethylene glycol 6000 and sodium chloride on seed germination and seedling growth of *Cassia angustifolia*. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research* **3**:528-531.
- Simpson MG. 2010. *Plant Systematics*. Academic Press, Burlington.
- Staniak M, Szpunar-Krok E, Kocira A. 2023. Responses of soybean to selected abiotic stresses photoperiod, temperature and water. *Agriculture* (e146) DOI: 10.3390/agriculture13010146.
- Sun W, Shahrajabian MH. 2020. Soybean seeds treated with single walled carbon nanotubes (SwCNTs) showed enhanced drought tolerance during germination. *International journal of Advanced Biological and Biomedical Research* **8**:9-16.

Šerá B. 2014. Klíčivost jako běžný test v botanickém pozorování, šlechtění a experimentech. Pages 9-17 in Bláha L, Šerá B, editors. Příspěvky v problematice zemědělského lesnictví. Powerprint, Praha.

Šmelhaus V. 1980. Vývoj zemědělské výroby v českých zemích v době Předhusitské. Prameny a studie **21**:14-17.

Takahashi F, Shinozaki K. 2019. Long-distance signaling in plant stress response. Current opinion in plant biology **47**:106-111.

Tempír Z, Novotný F, Maleř J, Ptáček J. 1986. Vývoj techniky sklizně obilnin. Prameny a studie **29**:4-6.

Ťițe V. 2022. The biochemical composition and the nutritive value of fodders from soybean, *Glycine max*, in Moldova. Scientific Papers, Series D. Animal Science **65**:97-102.

ÚKZÚZ. 2023. Seznam doporučených odrůd sóje. Agromanuál.cz. Available from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/ochrana-rostlin-a-pestovani/osivo-a-sadba-1/seznam-doporucenych-odrud-soje-2023> (accessed December 2023).

Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský. 2018. Nově registrované odrůdy – Sója. ÚKZÚZ, Brno.

van Ginkel M, Villareal RL. 1996. *Triticum* L. Record from Proseabase. PROSEA Foundation, Bogor.

Velimirovic A, Jovovic Z, Pržulj N. 2021. From neolithic to late modern period: brief history of wheat. Genetika **53**:407-417.

Verma H, Kumar D, Kumar V, Kumari M, Singh SK, Sharma VK, Droby S, Santoyo G, White JF, Kumar A. 2021. The potential application of endophytes in management of stress from drought and salinity in crop plants. Microorganism (e1729) DOI: 10.3390/microorganisms9081729.

Vicente-Serrano SM, Quiring SM, Peña-Gallardo M, Yuan S, Domínguez-Castro F. 2020. A review of environmental droughts: increased risk under global warming?. Earth-Science Reviews (e102953) DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.102953.

Vijay R, Ravichandran V, Boominathan P. 2018. Assessment of soybean genotypes for PEG induced drought tolerance at germination and seedling leve. Madras Agricultural Journal **105**:1-6.

- Wang H, Avci U, Nakashima J, Hahn MG, Cheng F, Dixon RA. 2010. Mutation of WRKY transcription factors initiates pith secondary wall formation and increases stem biomass in dicotyledonous plants. *Biological Sciences* **107**:22338-22343.
- Wilcox JR. 1987. Soybean history: the first 5,000 years. Pages 1-12 in Wilcox JR editors. *Soybeans: Improvement, Production, and Uses*. American Society of Agronomy, Madison.
- Wu Y, Cosgrove DJ. 2000. Adaptation of roots to low water potentials by changes in cell wall extensibility and cell wall proteins. *Journal of experimental Botany* **51**:1543-1553.
- Xue X, Du S, Jiao F, Xi M, Wang A, Xu H, Jiao Q, Zhang X, Jiang H, Chen J, Wang M. 2021. The regulatory network behind maize seed germination: effects of temperature, water, phytohormones, and nutrients. *The Crop Journal* **9**:718-724.
- Yan M, Xeu C, Xiong Y, Meng X, Li B, Shen R, Lan P. 2020. Proteomic dissection of the similar and different responses of wheat to drought, salinity and submergence during seed germination. *Journal of Proteomics* (e103756) DOI: 10.1016/j.jprot.2020.103756.
- Yan, A., Chen, Z. 2020. The control of seed dormancy and germination by temperature, light and nitrate. *Botanical Review*. **86**:39-75.
- Yang X, Lu M, Wang Y, Wang Y, Liu Z, Chen S. 2021. Response mechanism of plants to drought stress. *Horticulturae* (e50) DOI: 10.3390/horticulturae7030050.
- Zimolka J. 2005. *Pšenice: pěstování, hodnocení a užití zrna*. Profi Press, Praha.
- Zou JN, Jin XJ, Zhang YX, Ren CY, Zhang MC, Wang MX. 2019. Effects of melatonin on photosynthesis and soybean seed growth during grain filling under drought stress. *Photosynthetica* **52**:512-520.