

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra botaniky a fyziologie rostlin



**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

**Stanovení fyziologických rozdílů vybraných genotypů řepy
cukrové na vodní deficit**

Bakalářská práce

Petr Bahník

Rostlinná produkce

doc. Ing. František Hnilička, Ph.D.

© 2024 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci " Stanovení fyziologických rozdílů vybraných genotypů řepy cukrové na vodní deficit" 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 21. 04. 2024

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval doc. Ing. Františkovi Hnilčkov, Ph.D za ochotu, lidský a vstřícný přístup, pomoc, odborné vedení a za čas strávený nad mou bakalářskou prací. Dále bych chtěl poděkovat Bc. Tomášovi Rýglovi za ochotu a pomoc při měření a odebírání vzorků a také Farmě Kejklíček za možnost provedení pokusu na jejich pozemcích.

Stanovení fyziologických rozdílů vybraných genotypů řepy cukrové na vodní deficit

Souhrn

Cukrová řepa (*Beta vulgaris* ssp. *vulgaris*) je bulevnatá okopanina, kterou pěstujeme zejména jako jednoletou plodinu pro její zásobní orgán, kterým je bulva. Díky své hospodářské a technologické hodnotě, kdy jejím průmyslovým zpracováním získáváme cukr a líh, je jednou z nejhodnotnějších pěstovaných plodin. Průměrná sklizňová plocha v České republice se pohybuje okolo 63 000 ha a průměrný výnos zde dosahuje 65 t na ha.

V současné době dochází ke stále častějším teplotním výkyvům vysokých teplot a období sucha. Ty následně způsobují omezenou distribuci vody rostlinám a vyvolávají u nich vodní deficit. Tento stres se na rostlině projevuje morfologickými, fyziologickými a molekulárními změnami. Dlouhodobé působení tohoto stresoru je pro ně letální. Proto je důležité se zabývat touto problematikou a následné poznatky využít při budoucím šlechtění nových odrůd, které by byly k tomuto stresoru tolerantní. Vzhledem k těmto skutečnostem byl vybrán vodní deficit jako stresový faktor.

Cílem této bakalářské bylo zjistit, zda existují významné rozdíly mezi sledovanými genotypy a fyziologickými parametry. Z toho vyplývá i dílčí cíl práce, kterým bylo stanovit, jak jsou uvedené charakteristiky ovlivněny případným vodním stresem a vývojovou fází. Stanovené hypotézy byly následující: existují rozdíly mezi jednotlivými genotypy v reakci na případný vodní stres; existují rozdíly v rychlosti výměny plynů, obsahu fotosyntetických pigmentů a jejich fluorescence; lze uvedené metody využít ve screeningu reakce na stres.

Vliv vodního deficitu byl sledován v zemědělském podniku v Královohradeckém kraji, Farma Kejklíček. Pokus byl koncipován jako polní, kdy sledovanou rostlinou byla řepa cukrová: Adela, Dolerosa a Viola. Všechny porosty byly založeny tradiční metodou pěstování s hlubokou orbou na třech lokalitách. U rostlin byla měřena během vegetace gazometricky rychlost fotosyntézy a transpirace, obsah fotosynteticky aktivních pigmentů, jejich fluorescence a osmotický potenciál. Celkem bylo provedeno 6 měření v odlišných vývojových fázích.

Z výsledků práce je patrné, že genotyp měl statisticky průkazný vliv na rychlost výměny plynů, obsah fotosynteticky aktivních pigmentů a jejich fluorescenci. Nejvyšší průměrná rychlost fotosyntézy byla naměřena u odrůdy Viola ($12,02 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). Naopak nejnižší fotosyntézu měla odrůda Dolerosa ($11,64 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). Nejvyšší rychlost transpirace byla pozorována u odrůdy Dolerosa ($2,97 \text{ mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) a nejnižší u odrůdy Adela ($2,31 \text{ mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). Celkový obsah chlorofylu a karotenoidů byl nejvyšší u odrůdy Dolerosa ($19,46 \text{ nmol} \cdot \text{cm}^{-2}$ a $3,36 \text{ nmol} \cdot \text{cm}^{-2}$). U odrůdy Viola byl zjištěn nejnižší obsah chlorofylů, a to ve výši $18,21 \text{ nmol} \cdot \text{cm}^{-2}$. V případě karotenoidů byl jejich obsah nejnižší u odrůdy Adela. U této odrůdy byl obsah karotenoidů $3,20 \text{ nmol} \cdot \text{cm}^{-2}$. Nejvyšší hodnota maximálního kvantového výtěžku fluorescence a potencionální účinnost fluorescence byla pozorována u odrůdy Viola (0,65 a 1,96). Naopak u odrůdy Adela byly tyto parametry nejnižší (0,62 a 1,79). Nejvyšší efektivitu využití vody měla odrůda Adela ($5,73 (10^{-3})$) a nejnižší odrůda Dolerosa ($3,99 (10^{-3})$). Dále z výsledků vyplývá, že vodní deficit a ontogenetický vývoj měly

statisticky průkazný vliv na rychlost výměny plynů, obsah fotosynteticky aktivních pigmentů, fluorescenci chlorofylů a osmotický potenciál. Také byla potvrzena existence genotypových rozdílů na působení vodního deficitu, kdy odrůda Viola byla nejvíce tolerantní a odrůda Adela nejméně.

Klíčová slova: cukrová řepa, fotosyntéza, transpirace, vodní režim, vodní deficit

Determination of physiological differences of selected sugar beet genotypes for water deficit

Summary

Sugar beet (*Beta vulgaris* ssp. *vulgaris*) is a bulbous perennial crop grown mainly as an annual crop for its storage organ, the tuber. It is one of the most valuable cultivated crops due to its economic and technological value, where its industrial processing produces sugar and alcohol. The average harvested area in the Czech Republic is around 63 000 ha and the average yield is 65 t/ha.

Currently, there are increasingly frequent high temperature fluctuations and droughts. These result in a limited distribution of water to the plants, causing a water deficit. This stress is reflected in morphological, physiological and molecular changes in the plant. Long-term exposure to this stressor is lethal to plants. It is therefore important to study this issue and to use the subsequent knowledge in the future breeding of new varieties tolerant to this stressor. In view of these facts, water deficit was selected as a stress factor.

The aim of this thesis was to determine whether there are significant differences between the genotypes and physiological parameters studied. Hence, the sub-objective of the thesis was to determine how these characteristics are affected by any water stress and developmental stage. The hypotheses established were as follows: there are differences between genotypes in response to possible water stress; there are differences in gas exchange rates, photosynthetic pigment content and their fluorescence; and the above methods can be used in screening for stress response.

The effect of water deficit was monitored on a farm in the Royal Hradec Králové Region, Kejklíček Farm. The experiment was designed as a field experiment, with sugar beet as the plant of interest: Adela, Dolerosa and Viola. All crops were established using the traditional method of cultivation with deep ploughing at three locations. Photosynthetic and transpiration rates, photosynthetically active pigment content, fluorescence and osmotic potential of the plants were measured gasometrically during the growing season. A total of 6 measurements were made at different developmental stages.

The results of the study show that genotype had a statistically significant effect on the rate of gas exchange, the content of photosynthetically active pigments and their fluorescence. The highest average photosynthetic rate was measured in the cultivar Viola ($12.02 \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). On the other hand, the lowest photosynthetic rate was observed in the cultivar Dolerosa ($11.64 \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). The highest transpiration rate was observed in the cultivar Dolerosa ($2.97 \text{mmol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) and the lowest in the cultivar Adela ($2.31 \text{mmol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). The total chlorophyll and carotenoid contents were highest in the cultivar Dolerosa (19.46 and $3.36 \text{nmol}\cdot\text{cm}^{-2}$, respectively). The lowest chlorophyll content of $18.21 \text{nmol}\cdot\text{cm}^{-2}$ was found in the variety Viola. In the case of carotenoids, their content was the lowest in the variety Adela. The carotenoid content of this variety was $3.20 \text{nmol}\cdot\text{cm}^{-2}$. The highest value of maximum quantum yield of fluorescence and potential fluorescence efficiency was observed in the variety Viola (0.65 and 1.96, respectively). On the other hand, these

parameters were lowest in the cultivar Adela (0.62 and 1.79). The highest water use efficiency was observed in cultivar Adela (5.73 (10^{-3})) and the lowest in cultivar Doleresa (3.99 (10^{-3})). Furthermore, the results showed that water deficit and ontogenetic development had statistically significant effects on gas exchange rate, photosynthetically active pigment content, chlorophyll fluorescence and osmotic potential. The existence of genotypic differences on the effect of water deficit was also confirmed, with the variety Viola being the most tolerant and the variety Adela the least tolerant.

Keywords: sugar beet, photosynthesis, transpiration, water regime, water deficit

Obsah

1	Úvod	10
2	Cíl práce a hypotézy	11
3	Literární rešerše	12
3.1	Botanická charakteristika cukrové řepy	12
3.2	Historie a současnost pěstování cukrové řepy	14
3.2.1	Historie pěstování cukrové řepy	14
3.2.2	Současnost pěstování cukrové řepy	15
3.3	Založení porostu	16
3.3.1	Organické hnojení	17
3.3.2	Minerální hnojení	18
3.3.3	Ošetření během vegetace	19
3.3.4	Sklizeň	20
3.4	Významné plevele v cukrové řepě	20
3.5	Významné choroby a škůdci cukrové řepy	20
3.6	Primární metabolismus rostlin obecně	21
3.7	Transpirace	22
3.8	Obecná charakteristika stresu	24
3.9	Vodní deficit - sucho	31
3.10	Vodní deficit	33
3.11	Mechanismy odolnosti vůči vodnímu deficitu	37
3.11.1	Morfologické adaptace	37
3.11.2	Fyziologické adaptace	38
3.11.3	Molekulární adaptace	40
3.12	Fluorescence chlorofylů	41
4	Metodika	43
4.1	Popis sledovaného materiálu	43
4.2	Založení pokusu – pokusné lokality	44
4.3	Průběh počasí během vegetačního období	45
4.4	Měření fyziologických charakteristik	47
4.4.1	Rychlost výměny plynů	47
4.4.2	Obsah fotosynteticky aktivních pigmentů	47
4.4.3	Flourescence fotosynteticky aktivních pigmentů	48
4.4.4	Osmotický potenciál	48
4.4.5	Efektivita využití vody (WUE)	49
5	Výsledky	50
5.1	Rychlost fotosyntézy	50

5.2	Rychlost transpirace	51
5.3	Efektivita využití vody	53
5.4	Obsah fotosynteticky aktivních pigmentů	53
5.5	Fluorescence chlorofylů	56
5.6	Osmotický potenciál	59
6	Diskuze	61
6.1	Rychlost fotosyntézy	61
6.2	Rychlost transpirace	61
6.3	Efektivita využití vody	62
6.4	Obsah fotosynteticky aktivních pigmentů	63
6.5	Fluorescence chlorofylů	64
6.6	Osmotický potenciál	65
7	Závěr	67
8	Seznam použité literatury	69
9	Seznam obrázků	94
10	Seznam tabulek	95
11	Seznam grafů	96

1 Úvod

Cukrová řepa (*Beta vulgaris* ssp. *vulgaris*) je bulevnatá okopanina, kterou pěstujeme zejména jako jednoletou plodinu pro její zásobní orgán, kterým je bulva bohatá na škrob, sacharózu, inulin, vitamíny a minerály. Jedná se o jednu z nejstarších pěstovaných plodin. Její počátky sahají do starověkého Říma a Řecka. Díky své technologické hodnotě, kdy jejím průmyslovým zpracováním získáváme cukr a líh, je jednou z nejhodnotnějších pěstovaných plodin. Dalším důvodem, pro který je pěstována, jsou její hospodářské hodnoty plynoucí z vysokého výnosového potenciálu a zlepšování půdní úrodnosti. Stala se významným prvkem v tradičním norfolkském osevním postupu, kde hraje úlohu přerušovače sledu ozimých obilnin. Mimo technologické a hospodářské hodnoty má cukrovka díky svému obsahu nutričních látek velkou výživnou hodnotu a hraje důležitou součást potravy lidí a zvířat.

Díky stále novějším odrudám a to zejména herbicidně tolerantních je cukrová řepa jednou z nejproduktivnějších plodin mírného pásma. To plyne také ze stále novějších pěstebních technologií, které vedou k intenzifikaci jejího pěstování. I přesto všechno je stále jednou z nejnáročnějších plodin pro pěstování a její podíl na výrobě cukru činí pouze něco okolo 20 %. Největším producentem této plodiny je Rusko, jehož podíl na celkové výrobě je cca 15 %. Celkově se nejvíce cukrové řepy vyprodukuje v Evropě a to zejména v její severní části. Země z této části Evropy, které hrají významnou roli v pěstování této plodiny, jsou Německo, Francie, Nizozemsko, Belgie a Polsko. Průměrná sklizňová plocha v České republice se pohybuje okolo 63 000 ha a průměrný výnos zde dosahuje 65 t na ha.

Aby cukrová řepa dosáhla požadovaného výnosu a jakosti je nutný dostatek srážek ve vhodné vegetační fázi vývoje. Ty hrají jeden z nejvýznamnějších limitujících a nejnebezpečnějších faktorů. Při nedostatku vody, rostlina trpí vodním deficitem, který zásadně ovlivňuje celkový vývoj, kvalitu a produktivitu všech plodin, včetně cukrové řepy.

V současné době dochází ke stále častějším teplotním výkyvům vysokých teplot a období sucha. Ty následně způsobují omezenou distribuci vody rostlinám a vyvolávají u nich vodní deficit, který výrazně negativně ovlivňuje účinnost jejich transpirace a fotosyntézy. Tento stres způsobený nedostatkem vody se na rostlině projevuje morfologickými (např. redukce nadzemní biomasy), fyziologickými (např. hormonální úprava) a molekulárními (např. úprava koncentrace stresových proteinů) změnami. Při dlouhodobém působení vodního deficitu na rostliny je pro ně následně letální. V současné době je nejúčinnějším opatřením vůči tomuto stresu správné dodržování agrotechniky, používání organických hnojiv a také využívání vodních závlah. Dále je nutné pěstovat plodiny v jejich optimálních podmínkách a popřípadě vybírat odrůdy, jež jsou tolerantní vůči určitému limitujícímu faktoru.

Na základě těchto skutečností je velmi důležité se zabývat touto problematikou a využívat metody screeningu tohoto stresové faktoru, jako je měření fluorescence a výměny plynů. Následně ze získaných poznatků a informací budou obdrženy podklady, které by bylo možné v budoucnu využít pro vyšlechtění nových odrůd, které budou odolné vůči suchu.

2 Cíl práce a hypotézy

Vodní deficit je jedním z významných abiotických stresových faktorů, které ovlivňují vývoj a produktivitu rostlin. Pro jeho snížení je možné využití nejenom závlahy, ale také odolnější genotypy.

Hlavním cílem práce je zjistit, zda existují významné rozdíly mezi genotypy a fyziologickými parametry.

Dílčími cíli práce jsou:

- a) zjistit, jak jsou uvedené charakteristiky ovlivněny případným stresem;
- b) zjistit, jak jsou uvedené charakteristiky ovlivněny vývojovou fází.

Vzhledem k navrženým cílům bakalářské práce jsou navrženy následující hypotézy:

- 1) existují rozdíly mezi jednotlivými genotypy v reakci na případný vodní stres;
- 2) existují rozdíly v rychlosti výměny plynů u sledovaných genotypů;
- 3) existují rozdíly v obsahu pigmentů a jejich fluorescence u sledovaných genotypů;
- 4) lze uvedené metody využít ve screeningu reakce na stres.

Cukrová řepa byla vybrána z toho důvodu, že je nedílnou součástí zemědělství v České republice. Jedná se o plodinu obsahující značné množství energie, vitamínů, a minerálů, čímž hraje nezaměnitelnou roli ve výživě lidí a zvířat. Jejím průmyslovým zpracováním získáváme cukr a líh. Díky své hospodářské a výživové hodnotě ji řadíme mezi nejvýznamější pěstované kulturní plodiny.

Vzhledem ke stále častějším výskytům vysokých teplot a období sucha byl pro tuto práci vybrán vodní deficit jako stresový faktor. Při jejím nedostatku dochází k omezení růstové schopnosti, snížení kvality a také výrazné redukci výnosu sklizené plodiny. Na základě těchto skutečností je důležité se zabývat touto problematikou a následné poznatky využít při budoucím šlechtění nových odrůd.

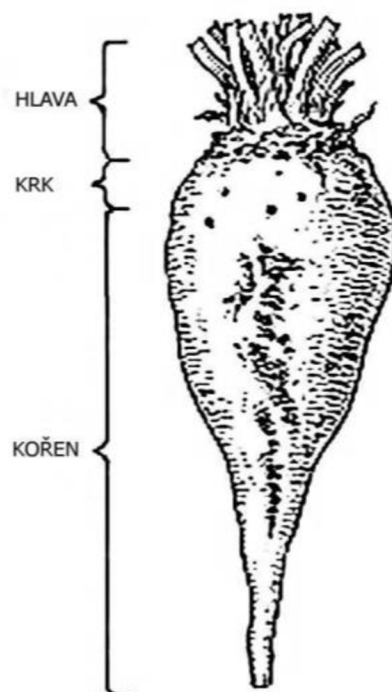
3 Literární rešerše

3.1 Botanická charakteristika cukrové řepy

Cukrová řepa neboli *Beta vulgaris* ssp. *vulgaris* je jednou z nejvýznamnějších zemědělských plodin, kterou pěstujeme. Je to dvouděložná, dvouletá rostlina a dokáže snášet lehké zasolení půdy, čímž ji řadíme mezi halofyty. Tato plodina se řadila do čeledi *Chenopodiaceae* (Brar et al. 2015). V současné době se čeleď *Chenopodiaceae* řadí do čeledi *Amaranthaceae* (Stevens 2001).

V prvním roce růstu se vytváří pouze vegetativní části, kterými jsou listová růžice a kořenová bulva. Tento vegetativní vývoj charakterizoval Van de Sande Bakhuyzen (1949) do tří různých fází. První fází je růst výhonku, druhá je růst zásobních kořenů a třetí fází je tvorba zásobních cukrů. Následně druhý rok se vytváří generativní orgány, kdy se z osy srdéčka tvoří hlavní lodyha (Jůzl & Elzner 2014). Aby rostlina přešla do této fáze, je nutné docílit vernalizace. Stonek se poté začne prodlužovat a vytváří větve, které nesou květní stvoly. (Wood & Scott 1974). Cukrová řepa je cizosprašná rostlina a má oboupohlavné květy (Jůzl & Elzner 2014).

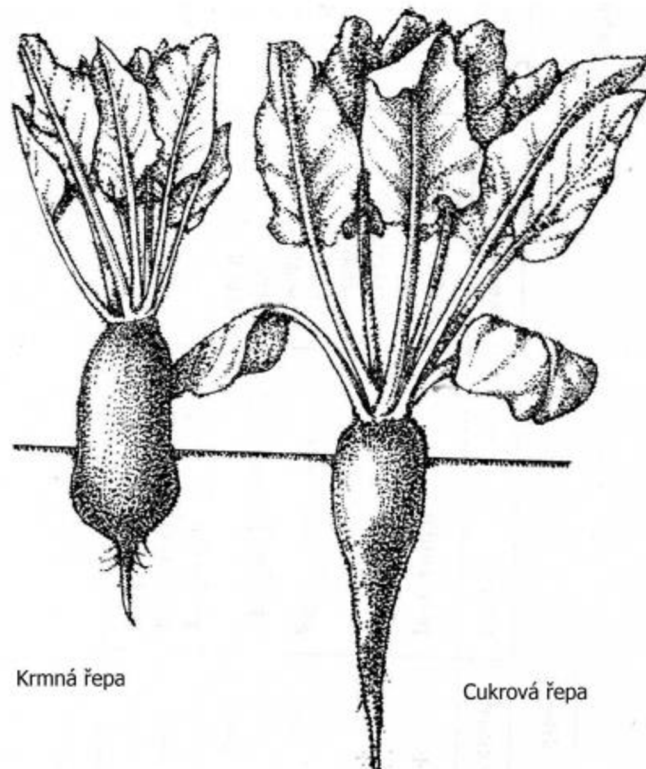
Bulva řepy je kuželovitá, protáhlá a má vřetenovitý tvar. Má bílou barvu a je tvořena ze tří částí (viz obrázek 1). Vrchní je hlava, která je odvozena od epikotylu. Jedná se o zkrácený stonek, ze kterého v prvním roce vyrůstá listová růžice, ve druhém roce vegetace vytváří květní stonek (Jůzl & Elzner 2014). Milford a Houghton (1999) uvádí, že velikost této části je zejména podmíněna způsobem obhospodařování, počasím, genotypem, úrodností a typem půdy. Další částí je krk, jenž je odvozen od hypokotylu a nevyrůstají z něj kořeny ani listy. Tato část tvoří hranici mezi vlastním kořenem a hlavou. Spodní část je vlastní kořen (radix) a jedná se o největší díl. Na rozdíl od hlavy a krku z ní vyrůstají kořenové vlásky.



Obrázek 1: Části bulvy (Jůzl & Elzner 2014)

Nejvyšší koncentrace kořinků je u kořenové rýhy (Jůzl & Elzner 2014). Dle Brown a Biscoe (1985) cukrová řepa vytváří rozsáhlý kořenový systém, který umožňuje čerpat vodu a živiny z hloubky až 1,5 m. Takto plně rozvinutá a zdravá bulva může dosahovat hmotnosti kolem 1 – 2 kg a obsahuje 8 – 22 % hmotnosti sacharózy (Yamane 2023). Nejvyšší koncentrace cukru se dle Mahn et al. (2002) nachází v kořenu a snižuje se směrem k hypokotylu.

Děložní lístky jsou dlouhé a kopinaté. Právě listy jsou oválné, celistvé a mají silné řapíky (viz obrázek 2). Vytváří listovou růžici, která vyrůstá z vrchní části bulvy a tvoří spirálu, kdy na vnější části jsou nejstarší listy a uprostřed nejmladší (Benda 2000). V průměru dokáže cukrová řepa vytvořit 44 až 55 listů. (Jůzl & Elzner 2014).



Obrázek 2: Bulva a pravé listy řepy (Rybáček et al. 1985)

Cukrová řepa vytváří soubor nepravých plodů, které se nazývají klubičky a jsou tvořeny kulovitými nažkami, jež jsou uzavřeny v tvrdém a zaschlém okvětí (Jůzl & Elzner 2014). Semena klíčí epigeicky (nadzemní klíčení) (Milford & Houghton 1999).

Tato rostlina patří mezi okopaniny a řadí se mezi širokořádkově pěstované plodiny stejně jako kukuřice nebo sója. Pěstování okopanin je velmi náročné z finanční stránky i z pracovní. Avšak po sklizni po sobě zanechávají velké množství posklizňových zbytků, jejichž zorání přináší množství živin do půdy a přispívá ke zdokonalení půdní úrodnosti. Při zakládání porostů okopanin jsou používána statková hnojiva, čímž také přispívají ke dlouhodobému zlepšení půdní úrodnosti. Z tohoto důvodu se cukrová řepa používá jako přerušovač zhoršujících plodin, nejčastěji ozimých obilovin. Dalším důvodem pěstování okopanin je jejich výživová a hospodářská hodnota. Okopaniny obsahují velké množství vitamínů, minerálů a organických látek, kterými jsou například škrob, sacharóza, inulin. Díky všem těmto látkám

jsou energeticky bohaté a tvoří významnou složku potravy lidí i hospodářských zvířat. Využívají se pro přímé zkrmování nebo jsou z nich vyráběny průmyslové výrobky. Pro přímé zkrmování je nejčastěji používána krmná mrkev a brambory. Cukrová řepa se naopak nejvíce využívá pro průmyslové účely, kdy je z ní vyráběn cukr nebo líh. Při výrobě těchto produktů vzniká odpad, který je následně použitelný jako krmivo pro hospodářská zvířata (Jůzl & Elzner 2014).

3.2 Historie a současnost pěstování cukrové řepy

3.2.1 Historie pěstování cukrové řepy

Počátky pěstování cukrové řepy sahají do dob antického Řecka a Říma, konkrétně do dob mezi lety 200 až 1500 před naším letopočtem. Odtud se následně šířila do Evropy. Zpočátku se cukrovka pěstovala jako zelenina nebo pícnina (Jůzl & Elzner 2014). Stehlík et al. (1956) konstatují, že v 17. a 18. století našeho letopočtu, kdy u nás panovala doba trojhonného hospodářství, byla cukrová řepa známá jako pícnina. V roce 1770 byly Vlasteneckou hospodářskou společností uvedeny instrukce k pěstování cukrové řepy jakožto pícniny.

Roku 1605 byla objevena sladkost cukrové řepy, jejíž šťáva se podobala té z cukrové třtiny. Tento objev učinil francouzský agronom a spisovatel Olivier de Serres. Dalším významným milníkem byl rok 1747, kdy německý chemik Andreas Sigismund Marggraf zhotovil cukr z cukrové řepy. Na tento významný průlom navázal Franz Karel Achard, který se zasloužil o rozvoj řepného cukrovarnictví. Na začátku 19. století založil s finanční pomocí pruského krále Fridricha Viléma III. první cukrovar na světě. Tento malý cukrovar se nacházel v Dolním Slezku ve městě Konary (Dudek 1993).

Achard se během svého života věnoval šlechtění cukrové řepy, která dosahovala cukernatosti až 10 %. Jeho výsledky z těchto pokusů se staly základem pro všechny odrůdy dnešní doby. Následně se v závislosti na tyto události zakládaly další cukrovary. Ty vznikaly v Rusku, Rakousku a Francii. V tomto období byl založen také první český cukrovar v Hořovicích. Tento závod fungoval v letech 1800–1805 (Dudek 1993).

Podle Stehlík et al. (1956) byly popsány instrukce k pěstování této plodiny Vlasteneckou hospodářskou společností. V těchto záznamech už bylo zmíněno, že musí být kladen důraz na organické hnojení chlévským hnojem pod tuto plodinu, aby se zabránilo poklesu cukernatosti bulev. Dalším důležitým varováním, které vyplývalo z instrukcí, bylo zamezení olamování chrástu. Při zakládání porostů se používala tzv. srovnadla, což je obdoba dnešních smyků a také žebřin.

Záznamy též uvádí tři různé způsoby, jakými je možné cukrovou řepu vysít:

1. Osiva lze rozhodit na široko stejně jako obilí.
2. Druhý způsob popisuje setí semen do řádku. V souvislosti s tímto principem je zde důkladně popsána metoda setí různorodými secími stroji, které jsou základem pro moderní secí stroje. Tato zařízení byla konstruována tak, že vždy po cca 8 až 13 cm se uvolnilo jedno semínko.

3. Třetí metodou je vypěstování cukrové řepy na záhonech a poté následné přesazení do polních podmínek. Při používání této metody často docházelo k poškození hlavního kořínku a tím k horšímu růstu, takže se od tohoto způsobu později odstoupilo (Stehlík et al. 1956; Švachula et al. 2006).

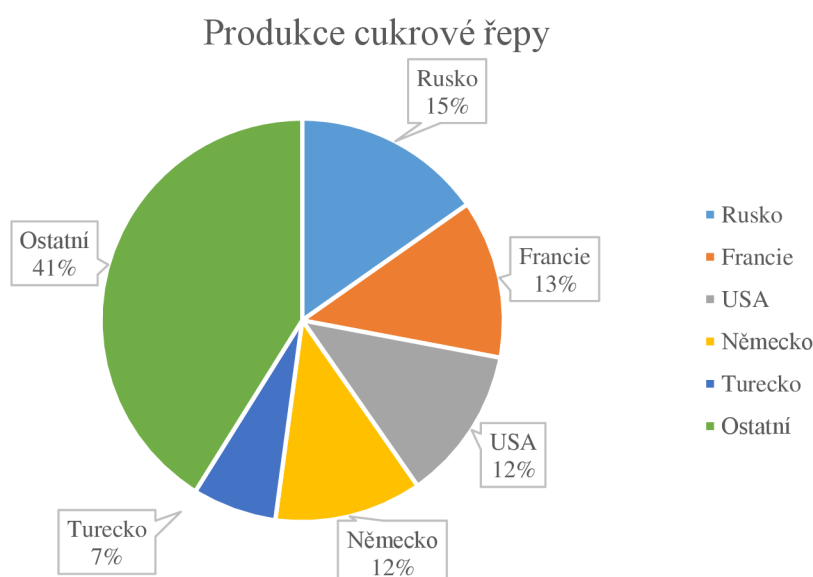
Instrukce k pěstování této plodiny důkladně informují o tzv. hrobkování. Jedná se o zpracování půdy, které zlepšuje vodní režim v půdě, snižuje ztrátu živin vyplavováním a zároveň omezuje působení vodní i větrné eroze. Při tomto zpracování půdy dochází také k regulaci plevelných společenstev. Množství jedinců na 1 ha se pohybovalo v rozmezí 50 až 100 tisíc v závislosti na tom, jaký byl použit způsob setí. Kultivace během vegetace se prováděla pomocí tzv. ježků. V těchto dobách se cukrová řepa sklízela ručně vykopáváním pomocí motyk (Stehlík et al. 1956; Švachula et al. 2006).

3.2.2 Současnost pěstování cukrové řepy

V roce 2021 dle FAO (2023) činila celosvětová produkce cukrové řepy 270 156 001,24 t, z toho 180 585 360,39 t bylo vyprodukováno v Evropě. Největším producentem cukrové řepy bylo v tomto roce Rusko s podílem 15,25 % z celkové výroby. Na prvních pět největších pěstitelů cukrové řepy odkazuje tabulka 1 a graf 1.

Tabulka 1: Nejvýznamnější pěstitelé cukrové řepy (FAO 2023)

Pořadí	Stát	Množství (t)
1.	Rusko	41 201 668,60
2.	Francie	34 365 390,00
3.	USA	33 339 950,00
4.	Německo	31 945 400,00
5.	Turecko	18 250 000,00



Graf 1: Poměr největších pěstitelů cukrové řepy (FAO 2023)

Sklizňová plocha v České republice od hospodářského roku 2018/19 do 2022/23 dosahuje průměrné hodnoty téměř 63 000 ha a v důsledku zavádění nových pěstitelských postupů dosahuje stále lepších výnosů. Díky tomu je nejproduktivnější plodinou mírného pásma. V České republice během hospodářského roku 2022/23 byla plocha, na které se pěstovala cukrová řepa, 61 410 ha. Celkem se na této ploše sklídilo 4 419 965 t s průměrným výnosem 71,99 t na ha. Průměrná cukernatost bulev v tomto hospodářském roce dosahovala 16,71 % a vyrobilo se 588 164 t bílého cukru (Bílý 2023). Výsledky řepných kampaní za posledních pět let jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2: Řepná kampaň 2018 až 2023 (Bílý 2023)

Hospodářský rok	Sklizňová plocha (ha)	Množství zpracované řepy (t)	Výnos řepy (t/ha)	Výroba cukru (t)
2022/23	61 410	4 419 965	71,99	588 164
2021/22	63 916	4 350 016	68,06	623 740
2020/21	62 205	3 886 501	62,48	506 323
2019/20	60 630	3 689 705	60,86	509 057
2018/19	66 151	3 806 121	57,54	572 798

3.3 Založení porostu

V současné době je nejobvyklejším podzimním zpracováním půdy pro cukrovou řepu stále klasická hluboká orba, během které dochází k zapravení statkových hnojiv do orničního profilu, čímž obohacujeme půdu především o fosfor, draslík a dusík. Jedná se o základní operaci konvenčního systému hospodaření. Poté následuje jarní předseťová příprava. Poslední dobou se také prosazují minimalizační metody zpracování půdy. Jedná se např. o mělké zpracování půd nebo bezorebné technologie, které mají pozitivní vliv např. na strukturu půdy, hospodaření s půdní vláhou, zvyšování množství organické hmoty v půdě a v neposlední řadě omezování vlivu větrné a vodní eroze (Badalíková & Červinka 2008).

Jedním typem tohoto zpracování je pásové zpracování půdy neboli strip till. Podstatou této technologie je zpracování (nakypření) pásu, kde bude plodina uložena a zbytek půdy zůstává nezpracován. To že je pás prokypřen, přispívá k rychlejšímu ohřevu půdy a tím k růstu kořenů. Navíc plodina může čerpat vodu z nenakypřeného meziřádku, kde se nachází větší množství posklizňových zbytků. Takovýto připravený pás zabezpečuje vhodné podmínky pro vývoj plodiny (Brant et al. 2016).

Hlavním záměrem podzimní přípravy půdy je zajistit vhodné fyzikální, chemické a biologické vlastnosti půdy, dále vytvořit optimální podmínky pro vysokou půdní vzcháživost semen a v neposlední řadě podpořit rozvoj kulovitěho kořene cukrové řepy (Pulkrábek et al. 2007). Nynější zpracování půdy pro cukrovou řepu začíná podmítkou, která by se měla provádět hned po sklizni předchozí plodiny (Brant 2021). Podzimní hluboká orba se uskutečňuje do hloubky 30 cm. Dochází při ní k obracení půdy, což vede k zapravení posklizňových zbytků, organických a minerálních hnojiv. Pro snadnější a dřívější zpracování půdy na jaře se doporučuje ošetření hrubé brázdy na podzim, např. pomocí železných smyků

nebo bran (Brant 2021). Pulkrábek et al. (2015) zmiňují, že pro zlepšení zadržovací schopnosti půdy je prováděno podrývání nebo dlátování. Toto opatření se uskutečňuje brzy z jara nebo na podzim, a to do hloubky maximálně 45 cm.

Cílem jarního zpracování půdy je urovnání povrchu a vytvoření optimálního seťového lůžka. Tím se zajistí podmínky pro vysokou vzcházivost osiva. Pro jarní přípravu půdy se v nynějších dobách používají moderní kombinátory, které slučují a současně provádí tři pracovní operace. Jedná se o smykování, kypření a utužování. Stejně jako u orby, tak i jarní příprava musí být prováděna za optimální vlhkosti (Jůzl & Elzner 2014).

V současné době je vyséváno geneticky upravené jednoklíčivé osivo, jehož klíčivost se pohybuje okolo 95 % a více. Díky tomu je v polních podmínkách při dobré předseťové přípravě dosaženo vzcházivosti 70 až 90 % (Jůzl & Elzner 2014).

Cukrová řepa je vysévána přesným secím strojem na vzdálenost v řádku 18 až 21 cm a mezi řádky 45 až 50 cm. Díky tomuto přesnému stroji předcházíme nutnosti jednocení. Tyto vzdálenosti odpovídají výsevnímu množství 1,06 až 1,31 VJ (výsevní jednotka). Jedna VJ se rovná 100 tisíc klubiček. Množství rostlin cukrové řepy se pohybuje v rozmezí 95 až 100 tisíc jedinců na hektar. Termín výsevu cukrové řepy u nás začíná v polovině března a končí koncem dubna, při čemž teplota v hloubce setí musí dosahovat minimálně 5 °C. S opožděujícím se výsevem klesá výnos. Při včasném výsevu se zvyšuje výnos a také cukernatost. Optimální hloubka výsevu je 2 až 3 cm. Za sucha je hloubka výsevu vyšší (až 4 cm) a naopak za vlhka nižší (2 cm). Setí by se mělo provádět nejpozději do druhého dne ode dne jarní přípravy půdy (Chochola 2010; Jůzl & Elzner 2014).

3.3.1 Organické hnojení

Cukrová řepa je jednou z nejnáročnějších plodin na výživu, protože vytváří velké množství biomasy s vysokým obsahem zásobních látek zejména sacharidů. Nejvíce živin čerpá z půdní úrodnosti, proto je nutné o ni pečovat a provádět hnojení organickou hmotou pro její zachování. Z toho vyplývá, že základem optimálního pěstování cukrové řepy je hnojení statkovými hnojivy. Takovýmto nejvhodnějším hnojivem je chlévský hnůj. Naopak nejméně živin čerpá z přímého hnojení. Cukrová řepa má také velké nároky na půdní strukturu a množství vápníku, draslíku a hořčíku v půdě. Tyto prvky musí být v půdě dobře zásobovány, jelikož jejich odběr je u cukrové řepy vyšší než u ostatních plodin. Při výnosu 1 tuny bulev s adekvátním množstvím řepného chrástu je průměrný odběr živin taký to: 4,4 kg N, 0,7 kg P, 5,6 kg K, 2,0 kg Ca, 0,8 kg Mg a 0,9 kg Na (Hřivna et al. 2014). Dle Chocholy (2010) je náročnost této plodiny také způsobena trváním její vegetace, která je dlouhá a dochází při ní ke ztrátám živin.

Vzhledem k těmto nárokům je pro dosažení vysokého výnosu nutné provést správně a kvalitně základní agrotechniku, zpracování půdy, organické hnojení a osevní sled. Pokud jsou splněny všechny tyto podmínky, dochází k optimálnímu využívání živin z přímého hnojení a z půdní zásoby (Chochola 2010).

Pulkrábek et al. (2007) uvádí, že nejvhodnější organickou hmotou pod cukrovku je chlévská mrva. Její optimální množství činí 40 t/ha. Ovšem efektivní využití této organické hmoty závisí zejména na termínu zaorání. Zaorání by se mělo uskutečnit v září. Dalšími

organickými hnojivy, která se dají využít je např. kejda se slámou nebo lihovarské výpalky (se slámou nebo samostatně).

Richter et al. (2002) dále konstatují, že takto pravidelně dodávaná organická hnojiva do půdy jsou významně důležitá pro zachování její úrodnosti.

3.3.2 Minerální hnojení

Minerální hnojení cukrové řepy se odvíjí z rozborů půdy a rostlin, které vykonává Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský. Dávku dusíku navíc lze stanovit operativně z jarní zásoby v půdě nebo všeobecně podle korekčních tabulek (Richter & Škarpa 2013). V tabulce 3 jsou znázorněny veškeré minerální hnojařské zásahy při pěstování cukrové řepy a jejich optimální termíny.

Hnojení fosforem a draslíkem se optimálně uskutečňuje na podzim a je ho nutné zapravit do orničního profilu. Pro toto hnojení se nejčastěji využívá superfosfát nebo draselná sůl. Dávku tohoto hnojení určuje zejména půdní rozbor, ale je také upravována dle zrnitosti a pH půdy (Pulkrábek et al. 2007). Podle výsledků z agrochemického zkoušení zemědělských půd při nízkém obsahu těchto živin hnojíme minimálně 115 kg P₂O₅ na ha a 120 až 180 kg K₂O na ha. Při vyhovujícím obsahu můžeme dávku ponížít na 60 kg P₂O₅ na ha a 90 až 120 kg K₂O na ha. Pokud ve výsledcích dosáhneme dobrých až velmi vysokých obsahů, lze dávky ještě snížit nebo hnojení úplně vypustit (Richter & Škarpa 2013).

Aplikace dusíkatých hnojiv představuje jednu z nejnáročnějších operací. Dojde-li k přehnojení cukrové řepy tímto prvkem, zákonitě se sníží cukernatost bulev. Je to způsobeno činností nitrátreduktázy, která zpracovává přijímané nitráty (Pulkrábek et al. 2007). Bittner (2012) uvádí, že dusík je základní stavební prvek organických sloučenin, což znamená, že při správném hnojení tímto prvkem se zvyšuje výnos biomasy. Podle Pulkrábka et al. (2007) je základní hnojení dusíkem uskutečněno na jaře, nejčastěji v březnu nebo dubnu. Jako hnojivo je nejčastěji používán ledek amonný s vápencem (LAV), DAM 390 nebo síran amonný. Přihnojení tímto prvkem se uskutečňuje do konce května pomocí LAV, přičemž dávka by neměla překročit 60 kg N na ha. Celková dávka hnojení by se měla dle Venclová (2021) odvíjet od zásoby dusíku v půdě. Ta je dána součtem amonného a nitrátového v půdní vrstvě nejlépe do 90 cm a stanovuje se na začátku jara. Venclová (2021) dále konstatuje, že tato zásoba se pohybuje v rozmezí 44 až 341 kg N na ha. Z toho vyplývá, že na některých místech tato zásoba pokrývá celkovou potřebu a lze ho vypustit. Uvedená autorka také uvádí, že neoptimálnější dávka dusíku je 80 kg N na ha, při které cukrová řepa dosahuje nejvyšších výnosů. Při aplikaci 120 kg N na ha se výnos výrazně nezvyšuje a v porovnání s náklady na dusíkaté hnojivo je tato dávka nerentabilní.

Hnojení hořčíkem se uskuteční, pokud je jeho nedostatek zjištěn při rozbořech půdy a rostlin. Jako hnojivo se často používá Kieserit nebo hořká sůl, která se aplikuje optimálně v březnu (Pulkrábek et al. 2007; Richter & Škarpa 2013).

Bór aplikujeme podobně jako hořčík, a to jen v případě jeho nedostatku, který je zjištěn z rozborů rostlin a půdy. Bórem optimálně hnojíme v červnu, a to přípravkem Borax, Bortrac nebo kyselinou boritou (Pulkrábek et al. 2007; Hřivna et al. 2014).

V posledních letech hraje také klíčovou roli přihnojení sodíkem a sírou. Sodík má významný vliv na tvorbu sušiny v kořenech a nadzemních částech během růstu a zároveň v období sklizně zvyšuje cukernatost. Aplikován může být na podzim před orbou nebo pomocí mimokořenové výživy v podobě NaNO_3 . Síra má zásadní vliv na syntézu bílkovin a její deficit může být řešen pomocí listové výživy nebo aplikací na podzim před orbou např. pomocí přípravku Kieserit (Richter & Škarpa 2013).

Tabulka 3: Hnojařské zásahy (Pulkrábek et al. 2007)

Hnojařský zásah	Termín		Vhodné hnojivo	Omezující podmínky
	Optimální	Nejpozdnější		
Vápnění	k předplodině	na zmrzlou půdu	šama, vápenec	do jiné vrstvy než N-NH_4
Hnojení fosforem a draslíkem	srpen	před poslední orbou	Superfosfát, draselná sůl	zaorat do orničního profilu
Hnojení dusíkem před setím či při výsevu	březen, duben	do 30. 5.	LAV, DAM 390, Síran amonný, Močovina	do $100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ aplikací nenadělat koleje, dávku přes 60 kg aplikovat 10 dní před setím
Přihnojení N	květen	do 30. 5., do růstové fáze 31	Ledek vápenatý, LAV	do $60 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$
Hnojení hořčíkem	březen	červenec	Kieserit, síran hořečnatý	při prokázáném deficitu v půdě či rozbory rostlin
Hnojení bórem	červen	do 30. 7.	Solubor, kyselina boritá, Borax	při prokázáném deficitu v půdě či rozbory rostlin

Pokud budeme očekávat vysoký výnos biomasy, tak zpravidla rostlina bude potřebovat vyšší množství živin, které si z půdy odebere pro svůj růst. Nadbytek některé živiny negativně ovlivňuje růst rostliny a následně zpracování cukru, což se nepříznivě projevuje na ekonomické stránce (Chochola 2010).

3.3.3 Ošetření během vegetace

Cílem těchto operací je potlačení škůdců a chorob, které mají negativní vliv na růst cukrové řepy. Jednou z operací je mechanické ošetření porostu, díky kterému dochází k rozrušení půdního škraloupu, a především redukcí plevelných společenstev zejména plevelné řepy, kterou nelze regulovat pomocí selektivních herbicidů. Další operací je chemické ošetření porostu, pomocí kterého omezujeme vliv škůdců a plevelů, aplikací herbicidů, insekticidů a fungicidů. Chemická ochrana rostlin se nejčastěji uskutečňuje v těchto sledech, jak uvádí Jůzl a Elzner (2014):

- Preemergetní aplikaci – před vzejitím cukrovky
- 1. Postemergetní aplikace – po vzejití cukrovky
- 2. Postemergetní aplikace – 8 až 10 dní po první aplikaci
- 3. Postemergetní aplikace – 10 až 18 dní po druhé aplikaci

3.3.4 Sklizeň

Sklizeň plodiny nastává v technologické zralosti, kdy je optimální poměr mezi cukry a necukry. Ta nastává koncem září, kdy chrást žlutne a rozklesává se. Při sklizni se značně ovlivňuje jakost bulev. Nekvalitní sklizeň snižuje výnos, zhoršuje skladovatelnost a snižuje výtěžnost bílého cukru. Abychom docílili kvalitní sklizně a vysoké jakosti, je nutno dbát na tyto faktory: optimální doba sklizně, zdravotní stav porostu, výška sřezu bulev, mechanické poškození bulev, podíl příměsí a nečistot (Jůzl & Elzner 2014).

3.4 Významné plevele v cukrové řepě

Plevele jsou jedním z nejrozšířenějších faktorů, které negativně ovlivňují výnos plodin (Oerke 2006). Tyto rostliny konkurují cukrovce v boji o vodu, živiny a světlo, navíc způsobují komplikace při sklizni (Jursík et al. 2013). Z počátku vegetace má cukrová řepa velmi pomalý růst, čímž má malou konkurenční schopnost vůči plevelným společenstvům (May 2003). Proto je nutné regulaci plevelů uskutečnit do 60 dnů po vzejití (Gerhards et al. 2017). Po plném zapojení porostu má plodina vysokou konkurenceschopnost proti nově vzešlým plevelům (Jursík et al. 2018). Mezi nejvýznamnější a nejčastější plevele cukrové řepy řadíme laskavce, merlíky, ježatku kuří nohu a plevelnou řepu. V závislosti na předplodině, agrotechnice a chemické ochraně se mohou v porostech cukrové řepy vyskytovat ozimé plevele (např. heřmánky, svízel přítula, zeměděm lékařský atd.), časně jarní plevele (např. oves hluchý, hořčice polní atd.) a další pozdně jarní plevele (např. béry, rdesna atd.). Velmi rozšířené jsou také vytrvalé plevele zejména pýr plazivý (Jursík et al. 2013). Zoschke a Quadranti (2002) konstatují, že jednoděložné plevele jsou škodlivější než dvouděložné. Plevelná řepa se u nás nejvíce rozšířila v 80. a 90. letech v důsledku nekvalitního osiva, které k nám bylo dováženo ze Středomoří (Chochola 2010). Problematika tohoto plevelu spočívá v tom, že jeho citlivost na herbicidy je v podstatě stejná jako u kulturní cukrové řepy, tudíž ji nelze regulovat selektivním herbicidem (Jursík et al. 2018).

3.5 Významné choroby a škůdci cukrové řepy

Nejvýznamnějšími škůdci v raných růstových fázích jsou maločlenec čárkovitý, květilka řepná, dřepčík rdesnový a řepný. Jejich negativní vliv je úspěšně odstraňován mořením osiva a jejich výskyt je méně častý (Kazda et al. 2010). Závažnou chorobou v těchto raných fázích je řepná spála. Jedná se o houbovou chorobu, která způsobuje odumírání malých rostlin a hlavní ochranou proti ní je také moření osiva (Bittner 2013). Významným živočišným škůdcem je háďátko řepné, které způsobuje zakrslost bulev a přílišnou tvorbu postranních kořínků. Hlavní ochrana a zároveň preventivní opatření spočívá v dodržování osevních sledů. Z fyto-sanitárních důvodů by se proto cukrová řepa měla pěstovat s odstupem čtyř až šesti let (Bittner 2013). Mezi významné škůdce se řadí i mšice, které sáním mízy poškozují listy, jež následně umírají a jsou také hlavním přenašečem virových chorob, přičemž nejvýznamnější je virové žloutnutí řepy (Kazda et al. 2010). Další významnou virovou chorobou je rizomanie, jejíž virus je přenášen houbou *Polymixa betae*. Rostlina napadená rizománií má prodloužené řapíky, listy bez lesku, velké množství postranních kořínků a úzký kořen. Ochranným opatření je pěstování tolerantních odrůd (Jůzl & Elzner 2014). Mezi nejvážnější houbové choroby

cukrové řepy řadíme skvrničnatku řepnou, která se vyskytuje při vysokých teplotách a vysoké vlhkosti vzduchu. Způsobuje šedé skvrny na listech, jež jsou hnědě až červeně ohraničeny. Ty postupně splývají a list následně umírá. Při výskytu choroby je nutné, co nejdříve aplikovat fungicid (Weiland & Koch 2004). Padlí řepné je další houbovou chorobou, která se projevuje za vlhkého a teplého počasí. Příznaky napadení touto chorobou se projevují na starších listech, kdy můžeme na jejich povrchu pozorovat bílé, prachovité kolonie. Účinnou ochranou proti padlí je aplikace fungicidu (Francis 2002).

3.6 Primární metabolismus rostlin obecně

Dle Bowyer a Leegood (1997) se jedná o základní proces, jež provádějí fotoautotrofní organismy. Při tomto procesu je energie světleného kvanta přetvářena na energii chemickou. Tato reakce je dle Larcher (1988) zabezpečována pomocí fotosynteticky aktivních pigmentů, které jsou nepostradatelnou součástí tohoto procesu, protože zachycují fotosynteticky aktivní radiaci. Bowyer a Leegood (1997) dále konstatují, že vzniklá energie pocházející z této reakce je dále využita pro syntézu organických látek zejména sacharidů. Fotosyntéza se rozděluje na dvě části.

První je světelná (fotochemická), během ní dochází k zachycení fotonů ze světelného záření a štěpení vody pomocí energie získané z tohoto záření. Štěpení vody nazýváme fotolýza vody (Hillova reakce) a jejím výsledkem jsou H^+ a elektrony sloužící pro syntézu $NADPH + H^+$ a ATP. Ty jsou použity jako zdroj energie pro syntézu organických látek. Jako vedlejší produkt této reakce vzniká O_2 . Světelná fáze se skládá ze čtyř komplexů, které zajišťují průběh celého procesu. Jsou jimi fotosystém (PS) II, I, komplex cytochromů b_6/f a ATP-syntáza. Světelná fáze fotosyntézy se uskutečňuje v membránách thylakoidů chloroplastu (Larcher 1988; Bowyer & Leegood 1997).

Druhou fází je temnostní (syntetická), při této je fixován CO_2 , z něhož jsou následně za pomoci velkého množství enzymatických reakcí a meziproduktů syntetizovány organické látky ($C_6H_{12}O_6$). Odehrává se ve stromatu chloroplastu. Rostlina přijímá CO_2 skrze průduchy. Při této reakci se spotřebovává energie, jež vznikla ve světelné fázi (ATP a $NADPH+H^+$), čímž může probíhat i ve tmě, dokud nejsou spotřebovány zásoby této energie (Raines 2003; Tamoi et al. 2005).

Podle Peterhansel et al. (2010) fotorespirace (světelné dýchání) snižuje schopnost fixace CO_2 a snižuje výtěžek fotosyntézy. Nastává to v případě, že ve vzduchu je nízká koncentrace CO_2 a naopak vyšší O_2 . Rubisco se v tomto případě začíná chovat jako oxygenáza a fixuje O_2 místo CO_2 . Tím následně místo fosfoglycerátu vzniká fosfoglykolát a z něj následně glykolát. Při tomto procesu se netvoří ATP (Peterhansel et al. 2010).

Dýchání neboli respirace je dle Plaxton a Podestá (2006) základní projev ve všech živých buňkách a probíhá neustále. Jedná se soubor oxidačně-redukčních reakcí. Respirace se uskutečňuje ve všech živých buňkách, které obsahují mitochondrie.

Podle uvedených autorů celý tento proces startuje v cytozolu glykolýzou, během ní je rozkládána glukóza a výsledným produktem je pyruvát, který vstupuje do mitochondrií. Pyruvát vstupující do matrix mitochondrií se zapojuje do Krebsova cyklu a jeho následnou oxidací je uvolňován CO_2 , který je vydáván do okolního prostředí, a H^+ . Ty se poté vážou na NADH a

FADH a dávají vzniku $\text{NADH}+\text{H}^+$ a $\text{FADH}+\text{H}^+$. Tyto energeticky bohaté sloučeniny putují na vnější membránu mitochondrií a zapojují se do dýchacího řetězce (Plaxton & Podestá 2006).

3.7 Transpirace

Larcher (1988) konstatuje, že je to proces, během něhož je voda z rostliny vydávána v podobě vodní páry přes průduchy nebo epidermis. Autor dále konstatuje, že se voda nevypařuje jen z vnějšího povrchu ale i z povrchů vně rostliny, kdy je voda vypařována ze stěn mezofilních buněk, které jsou v kontaktu se vzduchem. Dle Kutílka (2012) rostlina nejvíce transpiruje přes listy a to pomocí stomatární transpirace. Trimble (2022) udává i třetí typ transpirace, která probíhá skrz lenticely a dochází při ní k nejmenším ztrátám vody. Jedná se o lentikulární transpiraci.

Díky tomuto procesu dle Pallardy (2008) vzniká energetický gradient, pomocí něhož je přijímána voda společně s živinami. Tento gradient také uvádí vodu v rostlině do pohybu. Vzniká na základě rozdílu obsahu vodní páry mezi plochou, ze které se voda odpařuje a prostorem, jež obklopuje toto místo. Aby docházelo k transpiraci, musí být obsah vodní páry v místě odparu vyšší než v okolí. S rostoucím gradientem stoupá také množství vody, které rostlina odpaří.

Na tento proces mají zásadní vliv následující faktory. Prvním jsou anatomicko – morfologické vlastnosti (např. hustota a rozmístění průduchů, stavba listů, listová plocha, hustota průduchů). Druhým je fyziologický stav (např. hladina hormonů) a posledním jsou vnější faktory (např. sucho, koncentrace CO_2). Tento proces je také nezbytný pro ochlazování rostlin (Nilson & Assmann 2007). Dle Kutílka (2012) při významném deficitu vody v půdě nastává uzavírání průduchů, tím rostlina zamezí ztrátám vody a zároveň omezí příjem CO_2 , čímž zhorší svůj růst a vývoj.

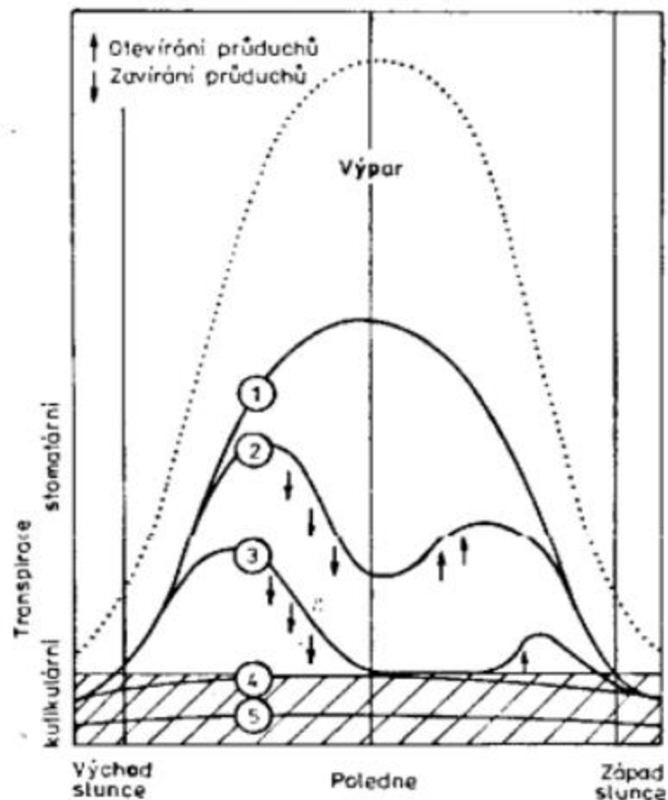
Rozlišujeme dva druhy uzavírání průduchů. Prvním je hydroaktivní reakce, která je způsobena vysokým obsahem vody v listech. Oproti tomu druhé je uzavírání zapříčiněné nízkým obsahem vody v listech. Tuto reakci nazýváme hydropasivní (Buckley 2019). Rozlišujeme i fotoaktivní reakci, během níž dochází k rychlému otevírání průduchů. S tímto jevem se setkáváme v ranních hodinách, kdy rostlina přechází ze tmy na světlo (Saracin et al. 2023).

Nilson a Assmann (2007) dále konstatují, že mechanismus otevírání a zavírání průduchů je řízen kořenovým systémem. Odtud je do horních částí rostliny přenášen chemický signál, který indikuje uzavírání stomat v případě působení vodního stresu. Tento chemický signál tvořený v kořenech je kyselina abcisová (ABA), která následně řídí uzavírání průduchů. Pokud je tato kyselina navázána na receptor ve svěrací buňce, tak dochází ke snížení stomatární vodivosti a omezení vstupu K^+ do nich. Pro znovuotevření stomat je nutné opětovné zvýšení turgoru ve svěracích buňkách, čehož je docíleno přísunem H_2O a K^+ . Autoři také konstatují, že mimo podpory uzavírání průduchů kyselina abcisová zabraňuje jejich otevírání, pomocí aktivace Ca^{2+} kanálů plazmatické membrány. Tím dochází ke zvýšení koncentrace Ca^{2+} , který stimuluje depolarizaci plazmatické membrány a odtok aniontů. Díky depolarizaci je docíleno deaktivace kanálků přivádějící K^+ .

Z výše uvedeného je patrné, že iontové kanály hrají klíčovou roli v regulaci transpirace. Jak již bylo řečeno se zavíráním a otevíráním průduchů se mění stomatální vodivost, což je

odrazem změny turgoru uvnitř buněk. Ten se mění v závislosti na odtoku a přítoku vody do jejich těl, který je ovlivněn koncentrací příslušných iontů. Těmito ionty jsou K^+ a Cl^- . Při jejich vysoké koncentraci dochází k proudění vody do svěřacích buněk a průduchů zůstává otevřen. Pokud dochází k odtoku těchto iontů, odtéká i voda z buněk. Výsledek je snížení turgoru a uzavření průduchů (Nilson & Assmann 2007).

Larcher (1988) konstatuje, že pokud je rostlina vystavena vodnímu deficitu, dochází u ní k omezení ztrát vody, díky zavírání průduchů. Dle obrázku 3 je patrné, že rostlina vystavená suchu nejvíce transpiruje v ranních a poté v podvečerních hodinách. Křivka 1 znázorňuje normální průběh stomatární transpirace. Ta se s východem slunce zvyšuje, v poledne dosáhne maximální úrovně a následně s blížícím se západem slunce transpirace klesá. Křivka 2 a 3 ukazuje stomatární transpiraci u rostlin vystavených vodnímu deficitu. U nich v ranních hodinách opět stoupá, ale s nastávajícím polednem dochází k částečnému uzavírání průduchů (šípky dolů) a tím i k omezení tohoto procesu. V odpoledních až podvečerních hodinách nastává otevírání průduchů (šípky nahoru) a nárůst transpirace. Křivka 3 navíc znázorňuje stomatární transpiraci při úplném zavření průduchů během poledne a odpoledne. Při dlouho trvajícím vodním deficitu dochází u rostlin k přerušení transpirace probíhající přes průduchy. Poté rostlina transpiruje pouze pomocí kutikulární transpirace. Tuto skutečnost ukazuje křivka 4. Poslední křivka s číslem 5 představuje snížení kutikulární transpirace, která nastává při vysychání membrán, což vede k jejich smršťování. Zvýrazněný obdélník ve spodní části obrázku představuje oblast, ve které probíhá pouze kutikulární transpirace.



Obrázek 3: Denní průběh transpirace (Larcher 1988)

3.8 Obecná charakteristika stresu

Podle Lewitt (1980) je stres definován jako vliv přírodních faktorů, které mají negativní dopad na živé organismy, což se projevuje zpomalením jejich vývoje a je způsobován kteroukoliv změnou vnějšího prostředí. Autor definuje dva základní pojmy. Těmi jsou stres a reakce (strain), kterou lze vysvětlit jako odpověď na působící stres, při němž dochází k chemickým a fyzikálním změnám. Tato reakce může být vratná (elastická), kdy dojde k regeneraci poškozených částí nebo naopak stálá (plastická). Pokud v rostlině nastanou trvalé deformace, tak nedojde k obnově a rostlina zůstane poškozena. To lze prokázat na výzkumu Li et al. (2019), kteří pozorovali snížení rychlosti fotosyntézy, omezenou tvorbu sušiny a celkové snížení výnosu cukrové řepy, která byla vystavena vodnímu deficitu. Při silném působení tohoto stresu docházelo k nevratným změnám snížení výnosu, akumulace sušiny a rychlosti fotosyntézy. Jak ukazuje dále jejich výzkum, oporoti tomu byly tyto negativní reakce u přechodného vodního deficitu reverzibilní. Nielsen a Orcutt (1996) uvádí, že stres je souborem velkého množství reakcí.

Schulze et al. (2005) konstatují, že stres je určité odklonění se od optimálního vývoje rostliny, které je způsobeno vysokým tlakem škodlivých faktorů. Dle poškození rostliny vyvolané těmito nepříznivými faktory, ať už nedostatkem nebo přebytkem, lze odvodit sílu stresu. Ovšem tuto sílu není snadné zjistit, protože pokud je rostlina vystavena slabému stresu po krátkou dobu, negativní projev na rostlině není tak výrazný. Stejně tak tomu je i u silného stresu. Pokud je ale rostlina vystavena takovému stresu po delší dobu, lze na ní pozorovat fyziologické změny. Takový stres se nazývá chronický (Orcutt & Nilsen 2000). Následky z vystavení stresovým faktorům se projevují v různých časových intervalech. Při působení stresu ze zamokření nebo sucha se negativní vliv projeví za delší dobu, než tomu je u stresu z teplotních extrémů. Ten se projeví za kratší dobu (Boyer 1982).

Lichtenthaler (1988) charakterizuje stres jako určitý druh napětí, který působí na rostlinu. Pokud toto napětí působí slabě a krátkou dobu, tak se rostlina na tento stres adaptuje. Díky této adaptaci se částečně omezují výnosové ztráty. To lze znovu prokázat na výzkumu Li et al. (2019), kteří pozorovali zvýšení efektivity využití vody, tolerance k suchu a rychlosti fotosyntézy u cukrové řepy, která byla vystavena mírnému vodnímu deficitu. Naopak pokud působí stresor silně a dlouhou dobu tak na rostlině vzniká poškození, které v určitých případech vede k jejímu úmrtí.

Stresor neboli stresový faktor je název pro nepříznivý faktor, který má negativní vliv na vývoj a růst rostliny. Stresor vytváří škody na rostlinných orgánech nebo celých rostlinách. Takovéto škody jsou často nenávratné a následně pro organismus letální. Tyto nepříznivé faktory zasahují kořeny, nadzemní části rostliny, a dokonce jejich semena, jež mají sníženou životaschopnost, čímž oslabují následnou generaci (Bláha et al. 2003). To dokazuje pokus Misra et al. (2020), kteří zkoumali vliv sucha a zamokření na růst a vývoj cukrové třtiny. V obou případech došlo ke snížení délky listů, hmotnosti sušiny kořenů, hmotnosti sušiny nadzemní biomasy a celkové výšky. V případě vodního deficitu docházelo k větším morfologickým změnám než u varianty se zamokřením.

Stres je obtížně definovatelný, protože co pro jednu rostlinu může být vyhovující, je pro druhou škodlivé (Mahajan & Tuteja 2005). Tento spletitý stav je podmíněn rozdílností mezi rostlinnými druhy, kdy jejich buňky mají různé chemické, fyzikální vlastnosti a rozličné vnitřní

prostředí buněk. Dle Larcher (1987) je projev stresu závislý také na stupni ontogeneze, adaptivnosti rostliny, ročním období, denní době a zejména na genetickém kódu. V případě rozdílnosti v genetickém kódu, lze pozorovat odlišnost u jednotlivých odrůd rostlin. To dokazuje výzkum Ferweez a Bashandy (2021), kdy odrůda cukrové řepy Kawamera dosahovala vyšší tolerance vůči suchu než odrůdy Top, Hosam a Hercule. Příkladem může být rozdíl ve složení vegetace na poušti a v zamokřených půdách. Na poušti nalezneme xerofyty, které jsou přizpůsobeny na život v suchých oblastech, protože dobře snáší vodní deficit. Naopak v zamokřených oblastech nalezneme hygromyfyty, jež jsou přizpůsobeny životu v blízkosti vody. Druhým příkladem je výskyt halofytů u moře, kde je vyšší salinita. Tyto druhy jsou přizpůsobené vyššímu zasolení. V závislosti na vyšší salinitě nedaleko pobřeží nenajdeme vnitrozemské druhy, které nedovedou snášet takovéto podmínky (Larcher 1987; Larcher 2003).

Larcher (1987) konstatuje, že při působení stresu se na rostlině vytváří určité specifické příznaky. To znamená, že určitý stresový faktor napadá vždy charakteristická místa. Např. dojde-li k poškození radiací je příznakem poškození thylakoidní membrány. Což demonstruje studie Wi et al. (2005) na *Arabidopsis* sp. Jako další příklad můžeme uvést poškození mrazem, kdy se v rostlinných buňkách tvoří ledové krystaly, které vytváří osmotické poruchy a svým zvětšeným objemem vytváří mrazové praskliny na plodinách, jak uvádí výzkum Wassan et al. (2021). Larcher (1987) dále uvádí, že kromě specifických projevů existují také nespecifické, které jsou dány intenzitou působení stresu. Jedná se např. o tvorbu stresových hormonů, tvorbu bílkovin nebo aktivitu enzymů. Autor dále konstatuje, že stres neovlivňuje pouze orgány, které jím jsou zatíženy, ale toto napětí působí na celou rostlinu. Při zhutnění půdy se zdá, že stresu jsou vystaveny pouze kořeny, ovšem při tomto stresu je narušen vodní režim rostliny, fotosyntéza, nastává zpomalení vývoje a dochází k opadávání listů. Wang et al. (2019) pozorovali vliv tohoto významného stresoru na rostliny. Pokusnou rostlinou byla sója na zhutněném pozemku a výsledek ukazoval na významnou redukci počtu listů, plochy listů, výšky rostliny a délky kořenů oproti variantě bez zhutnění.

V rostlině, která je vystavena působení nějakého stresového faktoru, se odehrávají fyziologické, morfologické, biochemické a molekulární změny. Ty negativně ovlivňují buněčné procesy, membránový systém a v neposlední řadě metabolismus rostlin. Dochází k redukci nadzemní hmoty, zpomalení růstu, zpoždění kvetení a snížení výnosu (Wang et al. 2001; Madhava et al. 2006). V rostlině se snižuje turgor, čímž je ovlivněn vodní režim (Munns 2002). Může nastávat uzavírání průduchů, čímž je omezen příjem CO₂ a tím i poutání uhlíku. Toto zásadně negativně ovlivňuje fotosyntézu, jelikož je snížena tvorba sacharidů. Zhao et al. (2020) sledovali snížení stomatalní vodivosti a účinnosti fotosyntézy u ozimé pšenice vystavené vodnímu deficitu. Při nedostatku CO₂ rostlina tvoří malé, tlusté listy, které obsahují velké množství chloroplastů. Tento obranný mechanismus vyrovnává ztráty CO₂, ale pro rostlinu je velmi energeticky namáhavý a dochází k jejímu vyčerpávání (Munns & Tester 2008). Dle Larchera (1987) je průběh těchto změn řízen pomocí fytohormonů. Dle Fahad et al. (2015) se jedná o endogenní nízkomolekulární látky, které přenáší informace mezi buňkami, pletivy, orgány a významně ovlivňují vývoj rostlin. Ty jsou rozváděny pomocí vodivých pletiv (floém a xylém) a buněčných transportů. To dokazuje výzkum Jiang a Hartung (2008), kteří sledovali tvořící se kyselinu abcisovou v kořenech vystavených suchu. Odtud se xylémem dostává do nadzemních částí a ovlivňuje stomatární aktivitu. Síla tohoto signálu je dána koncentrací příslušného hormonu, která je ovlivněna jeho degradací, rychlostí transportu, biosyntézou a

odbouráváním. Buňky, pletiva nebo orgány následně reagují na tento signál díky příslušným receptorům a vyvolávají v rostlině specifické obranné reakce (Fahad et al. 2015). Např. Narusaka et al. (2003) pozorovali na protoplastech rostlin *Arabidopsis* sp., že kyselina abcisová řídí expresi genů omezující stres ze zasolení. Podlešáková et al. (2012) konstatují, že rostlinné hormony neřídí tyto obranné reakce samostatně ale obvykle společně s dalšími specifickými fytohormony, které působí jako antagonisty či synergisty. Autoři dále uvádí, že v rostlinách se vyskytují ve velmi nízkých koncentracích. Zhao et al. (2021) zmiňují těchto pět základních fytohormonů:

- Auxiny – Látky regulující větvení stonku, dlouhivý růst a stimulaci buněčného dělení.
- Giberiliny – Slouží k regulaci indukce kvetení a klíčení semen. Stejně jako auxiny indukují dlouhivý růst.
- Cytokininy – Tyto látky ovlivňují klíčení semen, buněčné dělení, stárnutí pletiv a tvorbu laterálních pupenů.
- Kyselinu abcisovou – Tato látka hraje významnou roli při působení stresorů na rostlinu, zejména sucha a zasolení, kdy ovlivňuje metabolické a vývojové procesy v rostlině.
- Ethylen – Jedná se o plynový stresový hormon, který stimuluje stárnutí, zrání, opad plodů, listů a květů (Iqbal et al. 2014; Fahad et al. 2015; Zhao et al. 2021)

V posledních dobách se objevují další fytohormony, které ovlivňují růst rostlin. Mezi nejnověji objevené můžeme řadit jasmonáty, kyselinu salicylovou, brassinosteroidy, strigolakton, karakaniny a oxid dusnatý (Peleg & Blumwald 2011; Zhao et al. 2021)

Pokud je rostlina vystavena stresu, tak nastávají kvantitativní a kvalitativní změny proteinů v buňkách. Těmito proteiny jsou např. prolin a deriváty glycinu. Besaliev et al. (2021) sledovali zvýšení koncentrace prolinu v zrna jarní pšenice, která byla vystavena suchu. Dochází ke zvyšování nebo snižování koncentrace enzymů, fytohormonů nebo dokonce k tvorbě látek, které za normálních okolností neprodukuje, kdy těmito substancemi jsou reaktivní formy kyslíku. Jejich zvýšenou koncentraci pozorovali Keller et al. (2021), v horní části kořenu v oblasti dřevě cukrové řepy, která byla vystavena mrazu. Pro tvorbu těchto látek je nutné velké kvantum energie. Té má následně rostlina nedostatek, netvoří biomasu a tím pádem u ní stagnuje vývoj a růst (Nielsen & Orcutt 1996). Příkladem může být stres vyvolaný chladem. Při působení tohoto nepříznivého faktoru na rostlinu se ve větší míře syntetizují dehydriny. Ty brání rostlinu před chladem tím, že na sebe vážou vodu (Holková et al. 2010). To dokazuje výzkum Vítámvás et al. (2019), kteří pozorovali zvýšenou akumulaci těchto látek u pšenice seté vystavené mrazu. Dalším příkladem je snižování koncentrace nitrátoreduktázy a současně zvyšování množství hydrolázy, alfaamylázy, ribonukleázy. Pokles nitrátoreduktázy dokazuje výzkum Singh et al. (2019), kdy při vystavení rostliny rýže seté těžkým kovům byl pozorován pokles tohoto prvku. Dochází také k nárůstu koncentrace kyseliny abcisové. To nastává tehdy, když se v rostlině projevuje vodní deficit, jak dokazuje výzkum Itam et al. (2020) na pšenici seté vystavené suchu (Nielsen & Orcutt 1996; Bláha et al. 2003).

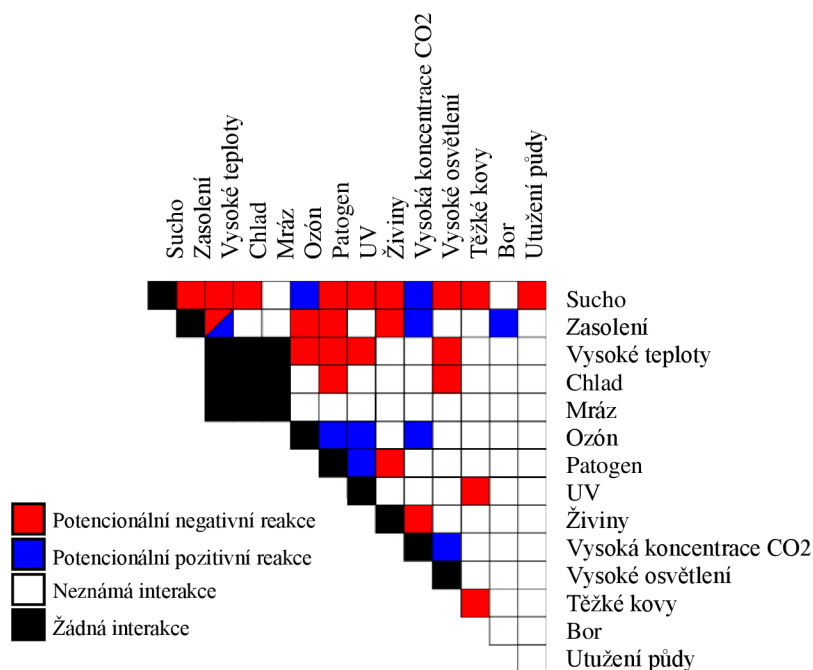
Wang et al. (2001) konstatují, že existuje velké množství stresorů, ale jejich výsledné poškození na rostlinách je podobné. Jedním takovýmto příkladem je osmotický stres vyvolaný zasolením nebo suchem. Ty u rostliny způsobují negativní vlivy odlišnými způsoby, ale

vyvolávají u ní obdobné obranné procesy. O tom vypovídá studie Ors et al. (2021), kteří zkoumali vliv sucha a stresu ze zasolení na rajčatech. Oba stresory vyvolávaly u rostliny obdobné obranné procesy, které vedly ke snížení rychlosti fotosyntézy, množství chlorofylů, stomatální vodivosti a celkové sušiny.

Stresové faktory jsou rozdělovány na dvě hlavní skupiny. Jednou jsou stresory vyvolané vnějším prostředím. Těmto stresorům se říká abiotické a řadíme k nim např. zasolení, vodní stres, extrémní teploty, nedostatek nebo naopak nadbytek živin. Tyto faktory lze rozdělit ještě na fyzikální a chemické. Druhou hlavní skupinou jsou stresory biotické, které jsou vyvolány působením živých organismů na rostliny. Nejčastějšími stresory z této skupiny jsou herbivorní a parazitické organismy (Kůdela et al. 2013). Šíření biotických stresorů je závislé na změnách klimatu, protože vlivem oteplování dochází k rychlejšímu šíření patogenů (Bale et al. 2002; Luck et al. 2011). Pokud je rostlina vystavena abiotickému stresoru, tak se stává oslabenou a snadněji napadnutelnou patogeny (Amtmann 2008). Tabulka 4 rozděluje stresové faktory dle Cerkala (2011). Abiotické stresory při působení na rostlinu mezi sebou vzájemně interagují, protože nikdy nepůsobí samostatně. Toto vzájemné působení má na rostlinu negativní vliv, ale může být i pozitivní. Příklad pro negativní interakce je kombinace sucha a tepla, kdy jejich působením vznikají větší škody, než kdyby působily samostatně (Vile et al. 2012). To lze znovu prokázat na výzkumu Ors et al. (2021), kteří pozorovali vyšší negativní účinky při současném působení stresu ze sucha a zasolení na rajčatech. Při samostatném působení byly méně škodlivé. Pozitivní interakce může nastat při současném působení sucha a O_3 , kdy zmíněné sucho sníží stomatální vodivost a tím vzroste odolnost vůči ozonu Löw et al. (2006). Často se setkáváme i s tím, že stresory mezi sebou neinteragují nebo jejich vzájemné působení není ještě známo. Vzájemné vazby stresových faktorů jsou navíc ovlivněny intenzitou, kterou každý z nich působí, a také druhem rostliny. Toto vzájemné ovlivňování je podrobněji znázorněno na obrázku 4 (Suzuki et al. 2014).

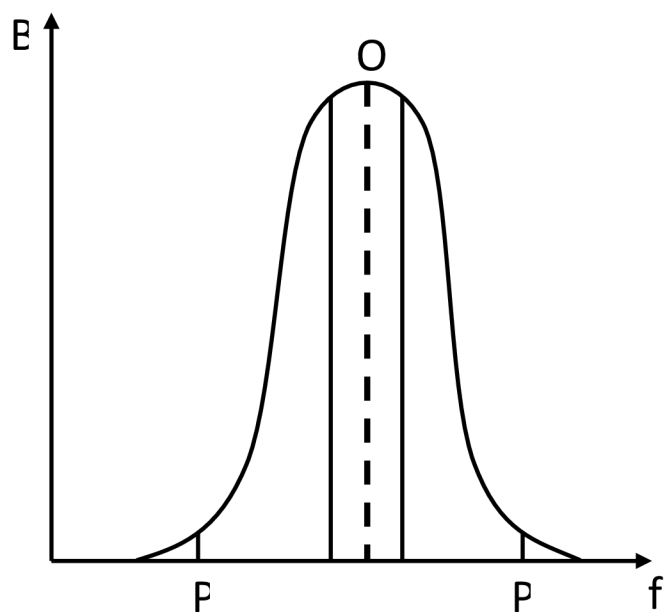
Tabulka 4: Rozdělení stresových faktorů (Cerkal 2011)

Abiotické faktory		Biotické faktory
Fyzikální	Chemické	
Vítr	Nedostatek O_2 v půdě	Herbivorní organismy
UV/viditelné záření	Nedostatek/nadbytek živin v půdě	Patogenní organismy
Vysoká/nízká teplota	Zasolení	Parazitismus
Nedostatek/nadbytek vody	Toxické látky v půdě/ve vzduchu	Alelopatie
	Těžké rizikové látky	Působení člověka



Obrázek 4: Stresová matice (Suzuki et al. 2014)

Dle Kůdely et al. (2013) je stres u rostliny vyvoláván nedostatkem nebo naopak velkou intenzitou působícího faktoru. Rostlina má nejoptimálnější růst v oblasti ekologického optima (O). V tomto rozmezí rostlina netrpí stresem z nadbytku nebo nedostatku. Ekologické pesimum (P) vyznačuje oblast mezi optimem a hranicí snesitelnosti minima nebo maxima. Pokud dojde k překročení míry snesitelnosti, ať už v minimu či maximu, nastává u rostliny zpomalený růst nebo smrt. Ekologické optimum a pesimum se během ontogenetického vývoje mění. Celý tento děj znázorňuje obrázek 5, kdy osa x ukazuje velikost faktoru (f) a osa y vyjadřuje hmotnost biomasy (B). Autoři dále konstatují, že růst rostliny je omezen prvkem, kterého je nedostatek. Toto tvrzení je odvozeno z Liebigova zákona minima.

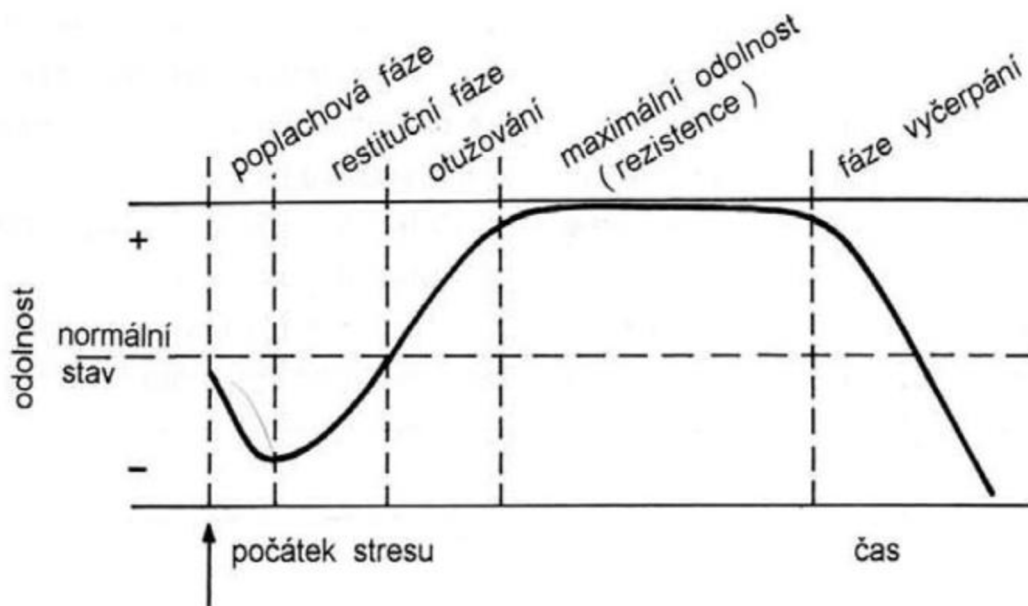


Obrázek 5: Křivka tolerance (Kůdela et al. 2013)

Jednou z hlavních charakteristik rostlin je, že se nemohou pohybovat z místa na místo. Tím, že jsou pevně spojeny se stanovištěm, nemohou jednoduše před stresem utéct. V závislosti na tuto nevýhodu si vytvořily různé obranné mechanismy, které se pohybují na molekulární úrovni (Shao et al. 2007). Jedním takovým je exprese genů DREP, které zvyšují odolnost vůči suchu. Zaki a Radwan (2022) pozorovali expresi těchto genů u brambor vystavených stresu ze sucha. V dnešní době je nejúčinnějším opatřením proti stresu vytvoření tolerance, kdy je rostlina schopna žít i pod vystavovaným napětím. Toho je v dnešní době docíleno zejména pomocí šlechtění rezistentních odrůd (Nelson et al. 2018).

Dle Larcher (1987) se rostlina brání stresu na dvou úrovních. První je „vyhýbání se stresu“, kdy je rostlina vybavena obrannými mechanismy, které nedovolí stresoru do ní proniknout a ovlivnit ji (např. silná kutikula). Hnilička a Hniličková (2016) uvádí, že se může např. jednat o CAM cyklus. Rostliny využívající typ tohoto metabolismu ve dne uzavírají průduchy, kdy jsou vystaveny vysokým teplotám. V noci poté průduchy otevírají a fixují CO_2 . Piterková et al. (2005) konstatují, že se jedná o druh pasivní obrany s dlouhodobou pasivní povahou. Dle Levitt (1980) se do tohoto typu obrany proti stresu může řadit např. prodlužování kořenů, silná kutikula a impregnace buněčné stěny. Autor dále uvádí, že při vyhýbání se stresu si rostlina vytváří metabolické, fyzikální a chemické bariéry. V případě, že stresor začne působit na rostlinu a pronikne do jejího vnitřního prostředí, nastane v ní tvorba tolerance vůči němu. To představuje druhou úroveň obrany. V této době nastává zmiňované zpomalení růstu a vývoje (Larcher 1987). Mazhar et al. (2020) pozorovali morfologické změny kukuřice seté vystavené stresu ze sucha a zasolení. U kukuřice docházelo ke snížení hmotnosti sušiny a délky listů. Dle Piterkové et al. (2005) se jedná o aktivní druh obrany, pomocí ní je docíleno snížení negativního vlivu stresoru. Jedná se např. o produkci glycinbetainu, který napomáhá k osmoregulaci, v cukrové řepě vystavené suchu, jak je patrné z pokusu Islam et al. (2020).

Stresová reakce (viz obrázek 6) znázorňuje obranou reakci, jak se rostlina vypořádá se stresovým faktorem. Jedná se o značné množství fyziologických reakcí, které na sebe postupně navazují. Je rozdělena do několika na sebe navazujících částí. První částí je poplachová fáze, při níž rostlina začíná reagovat na stres, kterému je vystavena. Během ní nastává poškození rostlinných struktur a je snižována její životaschopnost. Pokud je rostlina vystavena velmi silnému stresu, může v této fázi dojít k úmrtí rostliny, protože je překročena maximální snesitelná mez. Nedojde-li ke smrti rostliny, tak tato fáze přechází ve fázi restituční, při níž aktivuje příslušné obranné mechanismy, čímž se přizpůsobuje na účinkující stres. Díky tomu může rostlina přejít ve fázi odolnosti, kdy si pomocí zmíněných obranných mechanismů vytvoří zvýšenou odolnost na působící stres. Poslední fází této reakce je fáze vyčerpání, ta však nastává při dlouhodobém působení stresoru, které vedou k trvalým deformacím nebo zániku rostliny. Nedojde-li k nevratným deformacím ani k smrti, tak se rostlina zregeneruje do počátečního stavu před vystavením stresu a s větší odolností vůči němu. Všechny tyto obranné a regenerační mechanismy vyžadují velký přísun energie, čímž dochází k poklesu výnosů, schopnosti rozmnožování a růstu (Larcher 1987). Stresová reakce je dle Lewitt (1980) rozdělena na tři fáze. První je alarmová, která nastává okamžitě při působení stresu. Během ní je narušen rovnovážný stav mezi prostředím a rostlinou, což vede k aktivaci obranných mechanismů. Následuje fáze aklimační, během níž se rostlina postupně adaptuje na stres. Po plné adaptaci přechází rostlina ve fázi tolerance, ve které dokáže přetrvávat několik týdnů. Tato doba se ovšem odvíjí od síly, kterou stres působí. Pokud není stres pro rostlinu letální a je ukončena jeho působnost, nastává fáze obnovy. Během ní znovu nastane rovnováha mezi prostředím a rostlinou.



Obrázek 6: Stresová reakce (Larcher 1987)

Jedním z nejzákladnějších preventivních opatření proti negativnímu dopadu stresu na rostliny je jejich správné obhospodařování a racionální výběr odrůd rezistentních vůči limitujícímu stresu (Farooq et al. 2012). Další možností je využití pomocných antistresových látek, které potlačují působící stres. Příkladem může být omezení vodního deficitu použitím 5-

aminolevulové kyseliny (Petříková et al. 2012). Vodní deficit může být omezen také pomocí mykorrhizních hub žijící v symbióze s kořeny rostlin, které podporují příjem vody s živinami a růstem kořenového systému (Douds et al. 2005). Dalšími látkami pro omezení stresu mohou být huminové látky, zejména fulvokyseliny. Tyto látky také podporují růst kořenů (Petříková et al. 2012). V současné době existují studie, díky kterým lze omezit dopad stresu ze sucha na rostlinu použitím bakterií pro podporu růstu, které fixují dusík. Ty se nacházejí v oblasti rhizosféry a omezují působící stres pomocí různých strategií. Např. tvorbou fytohormonů a syntézou 1-aminocyklopropan-1-karboxylátdeaminázy. Jejich využití je ekologické a snadno použitelné v genetickém šlechtění (Saber Riseh et al. 2021). Li et al. (2019) konstatují, že u cukrové řepy pro zmírnění stresu ze sucha a zlepšení výnosu lze použít deficitní zavlažování, které zvyšuje obsah sušiny kořene rostliny.

Pro změření intenzity stresu se dle Kúdely et al. (2013) používají specifické metody a přístroje. Pro určení této intenzity se nejčastěji používá fluorometr, který měří fluorescenci chlorofylů, a chlorofylmetr sloužící pro stanovení obsahu chlorofylu v rostlině. Výsledné údaje nachází uplatnění při určování a následným pěstováním odrůd rezistentních vůči danému stresoru.

Larcher (1987) uvádí, že stres je součástí života všech rostlin. Díky němu rostliny neztrácejí schopnost adaptace, čímž si zajišťují stálou obranu. Je důležitý pro vývoj tolerantních druhů, kdy na základě selekce vybírá pouze ty nejlepší, a celkově pro evoluci nových rostlinných kultur.

3.9 Vodní deficit - sucho

Kúdela et al. (2013) konstatují, že voda je pro rostlinu jednou z nejdůležitějších složek a její nedostatek je jedním z nejnebezpečnějších stresorů. To je patrné na složení rostliny, protože voda tvoří 90 % z její hmotnosti biomasy. V semenech se obsah vody pohybuje od 5 do 15 %. Pro rostlinu je životodárná a zajišťuje průběh velkého množství životních funkcí. Nejdůležitějším dějem je udržení vnitrobuněčného napětí. Tvoří prostředí pro průběh životních reakcí. Má transportní funkci, jelikož zajišťuje příjem a rozvod velkého množství látek, které v ní jsou rozpuštěny, po rostlině. V neposlední řadě se velmi podílí na teplotním režimu rostliny. Dle Agrostis (2021) rostlina vyčerpá 500 g vody na tvorbu 1 g sušiny. Existuje mnoho definic pro sucho. Dle Blum (2005) je sucho určité období, kdy rostlina trpí nedostatkem vody a nastává u ní vodní deficit. Lipiec et al (2013) charakterizují tento jev jako výsledek nerovnováhy mezi vodou v systému půda – kořeny a evapotranspiračními požadavky okolního prostředí.

Podle Ciscar (2012) dojde v budoucích letech k nárůstu okolní teploty a zvýšení výskytu tepelného stresu, čímž se tento stresor stává nejzávažnějším. Svým působením výrazně omezuje růst, kvalitu a výnos plodin. Z toho vyplývá, že je nutné do budoucna vyšlechtit rostliny odolné proti suchu (Mittler 2006; Anjum et al. 2011). Dle Lambers et al. (2008) se jedná o nejničivější faktor. Podle Ahuja et al. (2010) bude docházet ke stále častějšímu a intenzivnějšímu výskytu sucha.

Sucho nastává tehdy, je-li vysoká evapotranspirace a výrazný deficit srážek (Mishra & Cherkauer 2010). To má za následek nedostatečné množství vody pro optimální vývoj rostlin, tím pádem nemůže využít svůj výnosový potenciál. Tento stav následně nazýváme zemědělské

sucho (Manivannan et al. 2008). Rostliny trpící tímto stresem mají nízkou rychlost dělení buněk. Tvoří malé listy, jejich stonky se prodlužují a ve větší míře jsou tvořeny kořeny. V neposlední řadě je narušena stomatální vodivost společně s využitím vody v rostlině (Li et al. 2009). Při nedostatku vody se zvyšuje koncentrace kyseliny abscisové, která zpomaluje růst. (Yamaguchi-Shinozaki & Shinozaki 2006).

V případě cukrové řepy jsou suchem výrazně ovlivněny produkční znaky i kvalitativní znaky. Kvůli nedostatku vody je narušen příjem živin. Tím se zhoršuje celkový růst a účinnost fotosyntézy, což má za následek snížení výnosů kořenů řepy a cukru. Se stoupajícím stresem ze sucha dochází ke snižování produkčních znaků. Naopak pokud je cukrová řepa vystavena suchu, tak dochází k nárůstu kvalitativních znaků. Čím vyšší sucho je, tím vyšší výtěžnosti cukru a indexu kvality docílíme (Ferweez & Bashandy 2021).

Dle Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ) je sucho neurčitý stav, kdy máme deficit vody v atmosféře, půdě nebo v rostlinách. V České republice sucho nastává, pokud je nedostatek srážek na určitém místě v určitý čas. Sucho je jev často trvající dny až měsíce. Vyskytuje se nepravidelně a náhodně. Společně s ním se v místě působení mnohdy vyskytují vysoké teploty vzduchu, déle trvající sluneční záření, bezoblačnost a nízká relativní vlhkost vzduchu. Nelze pro něj najít jednotné kritérium, jelikož v různých oblastech má sucho různé parametry. Pro rozmanitost tohoto jevu neexistuje společná definice, proto ho ČHMÚ dělí na tři typy, kterými jsou půdní, klimatické a hydrologické (Český hydrometeorologický ústav 2016). Česká meteorologická společnost (2017) ještě charakterizuje socioekonomické sucho a Kúdela et al. (2013) zmiňují fyziologické sucho. Dále podle České meteorologické společnosti (2017) lze sucho rozlišit na stálé, které způsobuje ariditu klimatu na daném místě. To je způsobeno velkým rozdílem mezi srážkami a výparem, který je mnohokrát vyšší. Příkladem místa, kde se tento typ sucha vyskytuje, jsou např. pouště. Dalším typem sucha je sezónní sucho, kdy se pravidelně během roku střídají období sucha, během něhož spadne minimální množství srážek a dešťů. Posledním je nahodilé sucho, které postihuje oblasti s vlhkým (humidním) klimatem. Jedná se o odchylky indexů sucha od normálu v dané oblasti. Tento typ sucha se vyskytuje nepravidelně a jeho trvání je od týdnů po roky.

Podle Českého hydrometeorologického ústavu (2016) a České meteorologické společnosti (2017) rozdělujeme sucho na:

a) Půdní (agronomické) sucho

představuje nedostatek vody ve vrchní části půdního profilu, jež vznikl dlouhodobým působením klimatického sucha. Rostliny, které zde mají uložené kořeny, trpí nedostatek vody. Tím jsou narušeny podmínky pro jejich optimální růst. Jeho projev je u všech rostlinných druhů rozličný.

b) Klimatické (meteorologické) sucho

je stav, během něhož nastává srážkový deficit. Ten je určen rozdílem aktuálních srážek na daném místě a dlouhodobým průměrem k danému místu. Pokud nám tento rozdíl vyjde záporně tak na daném místě se vyskytuje klimatické sucho. Při vyhodnocování tohoto jevu je důležité také brát v potaz rozložení srážek během roku na daném území a velikost rozdílu srážek.

c) Hydrologické sucho

je charakterizováno poklesem hladin povrchových vod (rybníky, jezera, řeky atd.) a také dochází k úbytku zásob podzemních vod. Vzniká v reakci na dlouhodobý nedostatek srážek. Navíc tento jev může být umocněn lidským faktorem, kdy spotřebováváme velké množství vody.

d) Socioekonomické sucho

je typem sucha, který je sledován na základě ekonomických ukazatelů a má dopad na kvalitu života. Je to stav, kdy nelze vyhovět různým poptávkám z důvodu nedostatku vody. Z pravidla je vyvoláno zemědělským, hydrologickým nebo meteorologickým suchem. Zásadní vliv má také např. ekonomická vyspělost na daném místě a vodohospodářská opatření.

e) Fyziologické sucho

Jedná se o stav, kdy rostlina má nedostatek vody pro její růst a vývoj. Tento jev nastává i v případě, že rostlina není pod vlivem půdního či klimatického sucha a má dostatek vláhy. Dochází k tomu v případě, že v půdě je rozpuštěno stejné nebo dokonce větší množství látek, než je obsaženo v kořenech. Tyto látky se pohybují z místa s vyšší koncentrací do nižší. Tím je zamezen příjem vody do rostliny. Dochází k tomu např. na těžkých jílovitých půdách (Kůdela et al. 2013).

3.10 Vodní deficit

Vlivem sucha nastává v rostlině vodní deficit. To je způsobeno výrazným rozdílem mezi transpirací a příjmem vody, kdy výdej vody je výrazně vyšší než příjem. Tento stres postihuje každou rostlinu a vede k narušení vodního gradientu, snížení turgoru, denaturaci bílkovin a poškození buněčných membrán. V závislosti na tomto stresu si rostliny vytvořily obranné mechanismy na biochemické, morfologické a fyziologické úrovni. Vodní deficit se projevuje v rozmezí od několika minut, kdy dochází ke změně fosforylace bílkovin až po několik hodin. Po této době dochází k expresi genů a denaturaci bílkovin (Bray 1997; Shao et al. 2008; Farooq et al. 2012).

Z hlediska růstu a produkce rostlin vodní deficit ovlivňuje už v první řadě klíčivost rostlin a tím i plné zapojení porostu, což znamená prvotní ztráty na výnosu. Během růstu dochází vlivem dělení, zvětšování, diferenciací buněk k nárůstu biomasy, hmotnosti a objemu rostliny. Pokud má rostlina nedostatek vody dochází k narušení těchto procesů. To je zejména způsobeno ztrátou turgoru, sníženým příjmem energie a činností enzymů. (Kiani et al. 2007; Farooq et al. 2009a). To prokazují Kiani et al. (2007) a Hussain et al. (2009), kteří pozorovali omezenou produktivitu a růst u slunečnice roční pod vlivem vodního deficitu. V orgánech se snižuje ukládání biomasy, ale tento proces neprobíhá u každé organely stejnou mírou (Farooq et al. 2012). U některých je pokles vyšší, a naopak u některých nižší, což prokazuje pokus Liu et al. (2011), kde na jejich výzkumu šalvěje červené asijské byly výhonky oproti kořenům poškozeny více. Vlivem vodního deficitu dochází k poklesu růstu, počtu a rašení listů, čímž je snížena listová plocha (LAI) (Kramer & Boyer 1995). Nejčastěji se index listové plochy používá k určení míry výměny plynů (Bréda 2003). Nooden (1988) uvádí, že je to způsobeno

brzkým stárnutím, které nastává v důsledku sucha. Stres z nedostatku vody má za následek narušení vývoje rostlin. Ten se výrazně urychluje a snižuje svou dobu trvání (Farooq et al. 2012). To znamená, že rostlina zkracuje svou vegetativní fázi a brzo u ní nastupuje fáze reproduktivní (Desclaux & Roumet 1996). Např. vlivem sucha je dle McMaster a Wilhelm (2003) zkrácena doba růstu u pšenice seté a ječmene. Toto tvrzení ovšem neplatí u všech plodin, protože je-li dle Geerts et al. (2008) merlík quinoa vystaven suchu dochází k prodloužení vegetativní fáze. Dle Farooq et al. (2012) vodní deficit silně ovlivňuje rostlinu i během reproduktivní fáze. Při jeho působení je snižována fertilita pylových zrn a následující nasazení zrna. Tyto negativní dopady se projevují na sníženém výnosu, které jsou patrné z pokusu Schussler a Westgate (1995) uskutečněného na kukuřici.

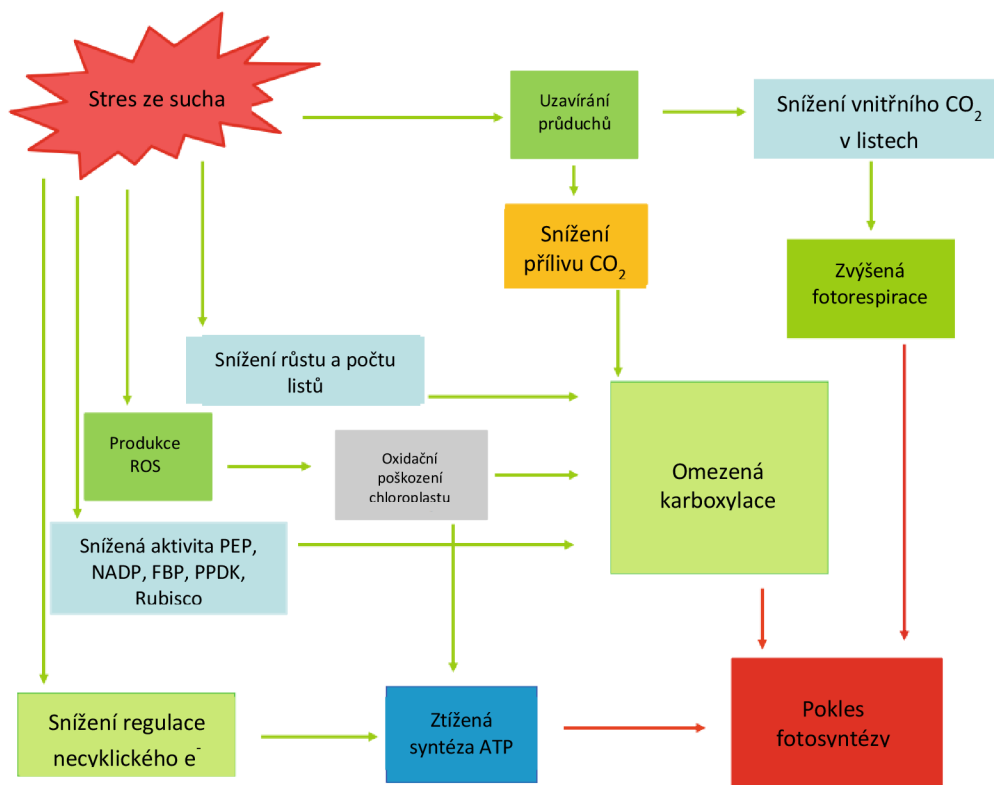
Stres z nedostatku vody ovlivňuje vodní režim v rostlině. Je snížen relativní obsah vody (RWC). Tato hodnota vyjadřuje množství vody, kterou rostlina potřebuje pro své plné nasycení. Dochází také k poklesu tlakového (turgorového) a osmotické potenciálu. Ty jsou součástí vodního potenciálu rostliny (Kirkham 2005; Agrostis 2021).

Agrostis (2021) uvádí, že pokud má rostlina nedostatek vody, tak její vodní potenciál se nachází v rozmezí -2 až -5 MPa. Oproti tomu rostliny, které mají dostatek vody, je jejich vodní potenciál roven rozmezí -0,2 až -0,6 MPa. Dále autor konstatuje, že hodnota vodního potenciálu je u různých rostlinných druhů rozdílná. Hygrofyty nemohou snížit svůj vodní potenciál tak jako xerofyty, které mohou klesnout až na -6,5 MPa a více (Ogburn & Edwards 2010). Hygrofyty dokážou snížit svůj vodní potenciál maximálně na -1 MPa (Brunetti et al. 2018). Většina kulturních rostlin (např. pšenice setá) dokáže snížit svoji hodnotu na hodnotu -1 až -2 MPa (Liang et al. 2002). Dle Larcher (2003) u rostlin, které už nejsou schopny snížit svůj vodní potenciál, nastává trvalý bod vadnutí. Každá rostlina má rozdílnou hodnotu vodního potenciálu, při níž nastává trvalý bod vadnutí. Dále Larcher (1988) konstatuje, že dochází-li ke snižování vodního potenciálu, tak nastává také pokles buněčného tlaku (turgoru) vlivem smršťování protoplastu. Podle Nilsen a Orcutt (1996) dochází při vodním deficitu k omezení výdeje vody transpirací, protože jsou zavírány průduchy a také klesá objem vody v buňkách rostlin. Dále dle Ouvrard et al. (1996) si odrůdy, jež mají v genetické výbavě vyšší toleranci k suchu, zachovávají vyšší vodní potenciál po delší dobu než odrůdy bez vyšší tolerance k suchu. Reddy et al. (2004) konstatují, že se zvětšující se silou sucha rovnoměrně klesá obsah vody uvnitř rostliny. Vlivem sucha se zhoršuje efektivita využití vody (WUE) (Medrano et al. 2015). Ta vyjadřuje podíl mezi fotosyntézou a transpirací neboli množství vody, které je využito na tvorbu sušiny (Larcher 2003). Dle Zámečnickové (2000) rostliny, jež mají lepší efektivitu využití vody, jsou odolnější vůči suchu. Sekhon et al. (2010) konstatují, že díky hodnotě WUE, můžeme určit, jak účinně je voda přeměněna na výnos. Dle Ebmeyer a Hoffmann (2022) cukrová řepa, která má vyšší efektivitu využití vody, může poskytovat větší výnosy. Autoři dále uvádí, že rozdíly v potencionálním výnosu jednotlivých genotypů jsou odvozeny od rozdílnosti genotypů ve WUE. Ebmeyer a Hoffmann (2022) také konstatují, že cukrová řepa potřebuje nejvíce vody počátkem léta, kdy u ní nastává nejrychlejší růst.

Rostlina podle Singh a Singh (2004) pro svůj růst a vývoj používá látky, které jsou rozpuštěny ve vodě. Takto rozpuštěné živiny jsou součástí cirkulace vody uvnitř plodin. Díky tomu je zajištěn jejich transport po celé rostlině. Singh a Singh (2004) dále uvádějí, že nastává zpomalení difúze rostlinných živin a změna složení půdního roztoku. Farooq et al. (2009a) konstatují, že v závislosti na tomto jevu dochází ke snížení vodního potenciálu, čímž je snížena

zmiňovaná rychlost difúze. Při vodním deficitu nastává omezený příjem vody a tím i důležitých živin pro růst a vývoj. Prvky, jejichž obsah v rostlině je při nedostatku vody výrazně snížen, jsou dle Subramanian et al. (2006) dusík a fosfor. Gutierrez-Boemond a Thomas (1999) uvádí, že příjem těchto látek je ovlivňován vzájemným působením kořenů a půdy na jejich rozmezí. Podle Kramer a Boyer (1995) je kvůli sníženému příjmu živin ovlivněna propustnost buněčných membrán a dle Ashraf a Iram (2005) je kvůli změnám aktivity enzymů také snížen příjem živin.

Barlow (1988) a Yamance et al. (2003) konstatují, že aby rostlina měla správný vývoj a dosahovala požadované produktivity, musí fixovat oxid uhličitý (CO_2). Ten získávají z atmosféry a pomocí fotosyntézy ho přeměňují na organické sloučeniny. Tento proces je významně ovlivněn suchem. Pokud je mu rostlina vystavena, výrazně klesá její účinnost. Pokles fotosyntetické kapacity je zapříčiněn zmenšováním listové plochy (LAI) a zavíráním průduchů, které je způsobeno vodním deficitem. Tento pokles je dále ovlivněn sníženou tvorbou adenosintrifosfátu (ATP), narušenou aktivitou karboxylačních enzymů a v podstatě celkovým poškozením fotosyntetického aparátu. Všechny tyto reakce jsou znázorněny na obrázku 7. Fotosyntéza je dle Farooq et al. (2012) limitována v podstatě dvěma způsoby. První je stomatální, kdy dochází vlivem sucha k uzavírání průduchů. Zavírání je dle Medrano et al. (2002) a Flexas et al. (2004) způsobeno snížením vodního potenciálu, kdy rostlina zabraňuje výdeji vody přes stomata a tím, že jsou zavírány, je zároveň snížen příjem CO_2 . V závislosti na těchto dějích Farooq et al. (2012) uvádí, že nastává pokles rychlosti transpirace a fotosyntézy. Autoři dále konstatují, že se jedná o prvotní reakci na stres vyvolaný suchem. To prokazuje výzkum Miyashita et al. (2005), kteří pozorovali snížení rychlosti fotosyntézy na základě poklesu stomatální vodivosti. Autoři tento pokus uskutečnili na fazolu obecném. Correia et al. (2006) uvádí, že průduchy nemusí být uzavřeny, pouze pokud je rostlina vystavena dehydrataci. Farooq et al. (2009a) a také Signarbieux a Feller (2011) dodávají, že stomatální limitace představuje zásadní činitel při boji s vodním deficitem, ovšem často nestačí k potlačení vodního stresu. Tím se dostáváme k druhému způsobu, kterým je dle Farooq et al. (2012) nestomatální limitace fotosyntézy. Zde Farooq et al. (2009a) uvádí, že je založena na poklesu syntézy ATP a fotorespiraci. Dále mezi tyto opatření patří omezení aktivity a produkce fotosyntetických pigmentů a enzymů.



Obrázek 7: Mechanismus poklesu fotosyntézy za sucha (Farooq et al. 2012)

Mezi základní enzymy ovlivňující fotosyntézu řadíme dle Reddy et al. (2004) a Farooq et al. (2009a; 2009b) Rubisco, fosfoenolpyruvátkarboxylázu, pyruvátfosfát dikinázu, NADP-malátdehydrogenázu a NADP-malátový enzym. Narušením jejich aktivity nebo tvorby, které je způsobeno metabolickými změnami uvnitř rostlin při působení vodního deficitu, se výrazně snižuje rychlost fotosyntézy. Pokud je rostlina vystavena takovému stresu, je u ní podle Flexas a Medrano (2002) výrazně snížena koncentrace ribuloso-1,5-bisfosfátu (RuBP) a tím i fixace CO_2 , který se na tuto sloučeninu váže pomocí enzymu Rubisca, jež díky sluneční energii zprostředkovává jeho fixaci. Dle výše uvedených autorů s rostoucím vodním deficitem klesá zároveň také schopnost obnovy RuBP a také jeho přeměna na 3 – fosfoglycerát (3 – PGA). Proto na základě poklesu koncentrace, omezení schopnosti regenerace a přeměny na 3 – PGA nastává pokles rychlosti fotosyntézy. Flexas a Medrano (2002) a také Reddy et al. (2004) konstatují, že všechny tyto obranné reakce jsou úzce spojeny s poklesem relativního obsahu vody v listech a zejména omezenou syntézou ATP a NADPH, které dodávají potřebnou energii k vytvoření zásobních látek (škrobu) a dokončení Calvinova cyklu.

Ghannoum (2009) konstatuje, že fotorespirace je dalším klíčovým faktorem, který snižuje rychlost fotosyntézy tím, že snižuje účinnost karboxylace. Během tohoto procesu hraje významnou roli enzym Rubisco. Ten může mít charakter karboxylázy, díky které je umožňována fixace CO_2 nebo oxygenázy. Pokud je rostlina pod vlivem vodního deficitu, tak se v jejím vnitřním prostředí zvyšuje koncentrace O_2 a naopak se snižuje koncentrace CO_2 . V souvislosti s tím začne Rubisco působit jako oxygenáza a na RuBP se začne poutat O_2 na úkor CO_2 . Noctor et al. (2002) uvádí, že to u rostlin způsobuje větší zatížení oxidačním stresem,

protože se v peroxizomech začne nadměrně tvořit peroxid vodíku. Dle Ghannoum (2009) je zvýšení koncentrace O_2 zapříčiněno zavíráním průduchů. Fotorespirace negativně ovlivňuje poutání CO_2 hlavně u C_3 rostlin, kterou je i cukrová řepa. Fotorespirace má za následek i pozitivní účinky pro rostlinu. Flexas a Medrano (2002) uvádí, že prvním je omezení poškození světelným zářením (fotoinhibice). Druhým je podle Noctor et al. (1999) produkce významné aminokyseliny glycinu a třetí pozitivní účinek dle Wingler et al. (2000) spočívá ve vyšším přísunu RuBP do Calvinova cyklu. Podle Li et al. (2019) se zvyšujícím se vodním deficitem klesá fotosyntetická aktivita cukrové řepy.

Fotosyntéza a fixace CO_2 je dále negativně ovlivněna snižováním obsahu fotosyntetických pigmentů. Ty jsou zodpovědné za zachycování sluneční energie, která je nepostradatelnou pro průběh fotosyntézy. Mezi tyto barviva řadíme chlorofyly, karotenoidy a xantofyly (Farooq et al. 2012).

S omezenou fixací CO_2 , která souvisí s uzavřením stomat a nadměrným vystavením slunečnímu svitu dochází dle Flexas a Medrano (2002) uvnitř rostlin k nadprodukcí reaktivních forem kyslíku (ROS), které vyvolávají oxidační stres, čímž ji poškozují, snižují účinnost fotosyntézy a respirační schopnost. Farooq et al. (2009a; 2009b; 2011) zmiňují, že ROS vznikají vždy, je-li rostlina vystavena jakémukoliv abiotickému stresu. Dále podle autora ROS poškozují např. DNA, proteiny a lipidy. Hlavní představitelé patřící mezi reakční formy kyslíku, jsou podle Apel a Hirt (2004) alkoxy radikály, superoxidové radikály, peroxid vodíku a hydroxylové radikály. ROS jsou vysoce reaktivní a způsobují poškození na základě oxidačních procesů (Rout & Shaw 2001). Hlavní místa vzniku těchto reaktivních látek jsou dle Gill a Tuteja (2010) v PSI, PSII a mitochondriích.

3.11 Mechanismy odolnosti vůči vodnímu deficitu

Jak již bylo zmíněno na začátku, rostliny si pro boj s vodním deficitem vytvořily řadu obranných mechanismů na morfologické, fyziologické a molekulární úrovni. Odolnost vůči tomuto stresu je velmi komplikovaná a každá rostlina má na něj jinou toleranci, která nejvíce závisí na schopnosti uzavírání průduchů, šířce kutikuly, velikosti kořenového systému, osmotické adaptaci, hormonální aktivitě a v neposlední řadě antioxidačním obranném systému (Farooq et al. 2012).

3.11.1 Morfologické adaptace

První morfologickou adaptací je tzv. únik stresu. To spočívá podle Levitt (1980) v krátkém životním cyklu rostliny, během kterého stihne veškeré své životní potřeby, aniž by byla vystavena stresu ze sucha. Proto tento cyklus zpravidla končí před zahájením období sucha. Reprodukční fáze, během níž si vytvářejí semena, se odehrává v období dešťů. Meyre et al. (2001) konstatují, že uplatnění těchto krátkodobých rostlin (efemer) a druhových genotypů je nejvhodnější v oblastech trpících pravidelnými obdobími sucha, protože jak už bylo řečeno, rostliny stihnou dokončit svůj vývoj, než takovéto období nastane. Tato vlastnost vyhnutí se suchu je ovšem vykoupena výrazně sníženým výnosem (Turner et al. 2001).

Podle Blum (2005) je druhým morfologickým obranným mechanismem tzv. vyhýbání se suchu. Aby se rostlina takto vyhnula stresu, musí snižovat svůj výdej vody transpirací nebo naopak musí přijímat větší množství vody. Těmito mechanismy si uchovávají vyšší množství

vody v těle a udržují si buněčnou hydrataci. Reakce na stres ze sucha je u rostlin velice odlišná a jednotlivé rostliny ho snášejí jinak. Tato rozdílnost se pohybuje na úrovni mezidruhové ale i vnitrodruhové. Pro docílení minimalizace ztrát a zachování vyššího množství vody uvnitř organismu je prvním opatřením vyhnout se suchu zmenšováním nadzemní biomasy. Jak už bylo uvedeno, tato minimalizace biomasy je u všech rostlin individuální. Míra zmenšení biomasy je dále ovlivněna velikostí poškození rostlinných orgánů (Farooq et al. 2012). Toto tvrzení dokládá výzkum Cui et al. (2021), kteří pozorovali snížení biomasy sóji, jež byla vystavena vodnímu deficitu. Další způsob, jak se rostliny mohou vypořádat se suchem, je jejich schopnost vstřebávat potřebné živiny z půdy. Proto jsou rostlinná společenstva schopna usměřňovat vlastní růst kořenů a tím se přizpůsobovat vnějšímu prostředí (Yamauchi et al. 1996). Rostliny mající hlubší, hustější a celkově větší kořenový systém jsou více odolnější vůči stresu ze sucha. Na základě těchto vlastností je rostlinám umožněno přijímat vyšší množství vody a živin z hlubších vrstev, konstatují Matsui a Singh (2003) a také Wang a Yamauchi (2006). Takto proliferovaný a hluboký kořenový systém je dle Kavar et al. (2007) a Gowda et al. (2011) nezbytnou součástí rostlinných organismů při příjmu vody za sucha. V prostředí, kde se často objevují období sucha, rostliny trpí vodním deficitem, proto je zde důležité pěstovat genotypy tolerantní vůči tomuto stresu. Tyto genotypově odolné rostliny mají oproti normálním lepší růst kořenového systému, i když je také omezený z důvodu působení vodního deficitu. U netolerantních odrůd nastává také pokles syntézy celulózy, hemicelulózy a pektinů, které jsou důležitou složkou buněčné stěny (Piro et al. 2003). Třetím způsobem, jak omezit vodní deficit je podle Sinclair a Muchow (2001) zmenšováním listové plochy (LAI) a počtu listů. Tím docílíme racionálního využívání vody a omezení ztrát vody transpirací. Tento mechanismus obrany má za následek snižování produkční schopnosti a tím i zmenšení výnosu. Uzavíráním průduchů a zvyšováním odolnosti kutikuly a zmiňovaných stomat je dle autora docíleno dalšího snížení transpiračních ztrát. Farooq et al. (2012) uvádí, že rostliny patřící do skupiny xerofyty mají na tento stres adaptované listy, které jsou charakteristické malou velikostí. Lei et al. (2006) konstatují, že na základě většího kořenového systému a zároveň malého počtu listů s redukovanou listovou plochou převládá vyšší příjem vody nad jejími ztrátami.

3.11.2 Fyziologické adaptace

Další mechanismy obrany jsou na úrovni fyziologické, díky kterým jsou schopny udržet aktivitu metabolických procesů i při nedostatku vody.

Prvním opatřením pro omezení vodního deficitu je z této skupiny osmotická úprava. Při ní si rostliny vytvářejí značné množství zásob rozpuštěných anorganických ale také organických látek. Vzhledem ke zvýšení obsahu těchto látek je při tomto procesu snižován vodní potenciál bez nutnosti zmenšení množství vody uvnitř rostlinných těl (Serraj & Sinclair 2002). Podle Blum (2005) se jedná o jeden z nejdůležitějších způsobů ochrany na této úrovni. Díky ní jsou podle Kiani et al. (2007) rostliny schopny udržet svůj turgor a stomatální vodivost, čímž neztrácejí schopnost fixace CO₂ a dále na základě tvrzení Chimenti et al. (2006) je díky osmotické úpravě zvýšen příjem vody kořeny. Blum (2005) dále konstatuje, že vzhledem k těmto dvěma opatřením, osmotické přizpůsobení výrazně snižuje poškození vyvolané stresem ze sucha a zároveň jí ho pomáhá překonat. Rozpuštěné látky použité při tomto procesu ochrany dle Cechin et al. (2006) a Kiani et al. (2007) nejsou pro rostliny nijak toxické a nedochází

k poškození vnitřních struktur ani při vysokých koncentracích. Dále podle těchto autorů nesou tyto látky jednotný název, kterým je kompatibilní rozpuštěné látky, jejichž hlavními zástupci jsou cukerné alkoholy, rozpustné cukry, glycinebetain, prolin, trehalosa a organické kyseliny (Cechin et al. 2006; Kiani et al. 2007; Farooq et al. 2008; Farooq et al. 2009a; Farooq et al. 2009b). Farooq et al. (2009a; 2009b) uvádí, že kompatibilní rozpuštěné látky slouží zároveň také jako ochrana makromolekul a enzymů před reaktivními formami kyslíku. Jak už bylo řečeno, tak jako kompatibilní rozpustná látka je i prolin, která se dle Wang et al. (2019) také v rostlině začne hromadit ve volné formě, jakmile je vystavena různým stresovým faktorům. Autoři dále uvádí, že hladina této látky souvisí s odolností vůči stresu, kdy s vyšší hladinou prolinu je odolnost vyšší. Prolin brání rostliny tím, že stejně jako ostatní látky tohoto typu snižuje vodní potenciál, aniž by rostlina snížila obsah vody, a navíc je ochraňuje před osmotickým stresem (Jalil et al. 2007; Sankar et al. 2007). Nejvíce se dle Perez-Perez et al. (2009) hromadí v mladých listech rostliny. Ali et al. (2020) uvádí, že glycinebetain plní v rostlině ochrannou funkci, která spočívá v ochraně lipidů, jež jsou součástí fotosyntetického aparátu, a navíc ochraňuje rostlinné enzymy, mezi něž patří i Rubisco. Xing a Rajashekar (1999) doplňují, že tato látka je schopna zachovávat proud, který proudí přes thylakoidní membrány.

Růstové rostlinné látky jsou dalším typem ochrany před vodním deficitem řadící se do fyziologických mechanismů ochrany. Tyto látky, které jsou produkovány rostlinami, výrazně regulují jejich vývoj a růst. Jednotně se tyto látky nazývají regulátory růstu (Farooq et al. 2012). Mezi nejzákladnější fytohormony řadíme gibereliny, auxiny, ethylen, cytokininy a v neposlední řadě kyselina abcisová, brassinosteroidy a strigolaktony. Podle Farooq et al. (2009a) pokud je rostlina vystavena stresu ze sucha mění poměr syntézy těchto látek. Koncentrace růstových stimulatorů se vlivem vodního deficitu snižuje ve prospěch růstových inhibitorů, jejichž koncentrace výrazně stoupá. Díky této hormonální změně je pozitivně ovlivňováno její hospodaření s vodou. To lze potvrdit na výzkumu Figueiredo et al. (2008), kteří pozorovali zvýšení koncentrace kyseliny abcisové a zároveň snížení obsahu giberelinů, cytokininů v listech fazolu obecného, který byl vystaven suchu. Zároveň se snížením koncentrace cytokininů se zvýšila koncentrace kyseliny abcisové v jeho výhoncích. Na základě toho se potvrzuje výrok Rivero et al. (2007), kteří zmiňují, že cytokininy řídí fyziologické reakce pomocí signálů, jež směřují z kořenů do výhonků. Jak už bylo řečeno, tak při vodním deficitu se zvyšuje koncentrace rostlinných inhibitorů a na základě toho rostlina provádí příslušná fyziologická opatření za účelem omezení ztrát vody. Např. při vysoké koncentraci kyseliny abcisové v rostlinných orgánech (zejména listech a kořenech), je listům předána informace, aby bylo zamezeno ztrátám vody transpirací tím, že se zavřou průduchy (Davies & Zhang 1991). Kyselina salicylová je další důležitou látkou, kterou je třeba zmínit v souvislosti se stresem ze sucha. Ta ovládá řadu důležitých fyziologických procesů na úrovni signalizace souvisejících s odolností vůči suchu. Nejdůležitější reakcí, kterou usměrňuje, je senescence listů vystavených suchu, při které dochází k rozpadu chloroplastů a tím i k zastavení fotosyntézy. Při tomto procesu rostlina může následně využít uvolňované látky, které zde byly v průběhu života nahromaděné (Abreu & Munne-Bosch 2008; Farooq et al. 2012). Dle Kumar et al. (2006) odrůdy, jež mají vysokou úroveň senescence listů v období sucha při plnění zrna, zachovávají vyšší výnosy.

Antioxidační obranný systém je další fyziologickou adaptací na sucho. Ten spočívá v ochraně rostliny vůči reaktivním formám kyslíku, kdy tlumí jejich negativní vliv pomocí hromadění antioxidačních neenzymatických a enzymatických složek (Li 2008; Simova-Stoilova 2008; Hussain et al. 2008). Jak již bylo řečeno, tyto formy vznikají při omezené fixaci CO₂, která souvisí s uzavřením průduchů, dále je jejich vznik spojen s poškozením fotosyntetického aparátu a omezenou činností enzymů. Mezi hlavní ROS se řadí O₂¹, O₂⁻, OH⁻ a také H₂O₂ (Flexas & Medrano 2002; Lawlor & Cornic 2002). Tyto reaktivní formy kyslíku dle Rout a Shaw (2001) způsobují oxidační poškození DNA, bílkovin, lipidů a dalších makromolekul, čímž výrazně negativně ovlivňují metabolismus rostlin. Nejvýznamnějšími antioxidy potlačující efekty ROS jsou kataláza, superoxididismutáza, glutathionreduktáza, askorbátperoxidáza, peroxidáza z řady enzymatických složek a neenzymatické jsou a-tokoferol, kyselina askorbová, b-karoten, redukovaný glutathion, salicyláty a také prolin, gibereliny, zeaxantin (Scandalios 2005; Li 2008; Ozkur et al. 2009; Farooq et al. 2010b). Farooq et al. (2012) konstatují, že při vodním deficitu se v rostlině zvyšuje koncentrace těchto látek a pomocí nich se poté omezuje poškození rostliny tím, že tlumí oxidační stres, který ji sužuje. Podle Foyer a Fletcher (2001) je O₂⁻ v rostlinách přeměňován na H₂O₂. Ten je pomocí glutathionreduktázy a askorbátperoxidázy dále přeměněn na vodu a tím nedochází k vnitřnímu poškození. Dále Scandalios (2005) zmiňuje, že superoxididismutáza je zodpovědná za přeměnu O₂⁻ na H₂O₂ a ten je zase díky zmiňovaným enzymům výše přeměněn na vodu. Funkčnost tohoto obranného mechanismu deklaruje výzkum Yuan et al. (2010), kteří pozorovali zvýšení koncentrace katalázy, superoxididismutázy a askorbátperoxidázy se společným snížením H₂O₂ v sazenicích rajčat vystavených suchu. Cakmak et al. (1993) konstatují, že z hlediska přeměny H₂O₂ na vodu má askorbát-glutathionový cyklus vyšší účinnost jak kataláza a peroxidáza. Jako příklad z neenzymatických sloučenin omezující oxidační stres si můžeme uvést např. prolin, giberelin a jiné aminokyseliny, které ve zvýšené koncentraci měli za výsledek zvýšení produktivity slunečnice vystavené suchu. Čímž lze prokázat funkčnost těchto neenzymatických antioxidačních složek (Manivannan et al. 2008; Hussain et al. 2008).

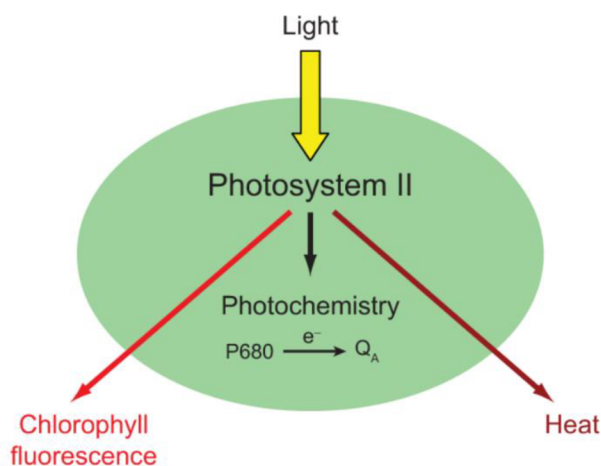
3.11.3 Molekulární adaptace

Jedná se o poslední mechanismus obrany proti vodnímu deficitu. Dle Kavar et al. (2007) se jedná o úpravu vodního režimu, která je prováděna na molekulární úrovni pomocí zvyšování nebo snižování množství stresových proteinů a genových transkriptů (mRNA). To je prokazatelné na základě pokusu Broin et al. (2000), kteří u brambor vystavených suchu sledovali zvýšení koncentrace chloroplastického stresového hormonu (CDSP 32) a mRNA. Dalšími zástupci, které je nezbytné zmínit, jsou akvaporiny. Tyerman et al. (2002) říkají, že zlepšují pasivní výměnu vody přes rostlinné membrány, protože tyto látky zesilují jejich propustnost. Jsou to membránové proteiny, a permeabilitu dokážou zvýšit až dvacetinásobně. V tomto typu obrany rostlin je podle Agarwal et al. (2006) zapojeno velké množství genů, které jsou zapojeny do signalizace na vystavení abiotickým stresorům. Jedním takovým je Cis-akční element a jeho vazebný protein, který reaguje na vodní deficit. Tento systém formuje expresi genů jako reakci na sucho, které nejsou závislé na kyselině abcisové. Mezi ně patří např. proteiny DREP/CBF a jejich podtřída DREB 2, která je zodpovědná za vytváření odolnosti proti stresu (Seki et al. 2003; Farooq et al. 2012). Rostliny jsou dále vybaveny dalšími typy

signalizace, které ovlivňují jejich růst při vystavení vodnímu deficitu. Další taková opatření se nachází na plazmatické membráně kořenových vlásků. Při detekci sucha je aktivován příslušný protein (ATPáza) vodíkové pumpy, pomocí kterého je docíleno zvýšené tvorby osmolytů pro udržení optimální vodní bilance a zabránění snížení relativního obsahu vody. Mezi osmolyty řadíme především gibereliny a prolin (Farooq et al. 2012). Dle Gong et al. (2010) se mezi rostlinami vyskytují značné mezi a vnitrodruhové rozdíly v těchto molekulárních mechanismech zejména v době jejich aktivace. Autoři dále uvádí, že druhy a kultivary s vyšší tolerancí spouští tyto obranné mechanismy dříve než druhy méně tolerantní. V souvislosti se signalizací je důležité zmínit polyaminy s jejich expresními vzory genů kódující enzymy. Bae et al. (2008) konstatují, že se jedná hlavně o S-adenosylmethionin dekarboxylázu, arginin dekarboxylázu a ornitin dekarboxylázu, jejichž exprese je vyvolána vystavením suchu. Tyto látky následně ovlivňují fotosyntézu, stomatální vodivost a v neposlední řadě vodní potenciál listů.

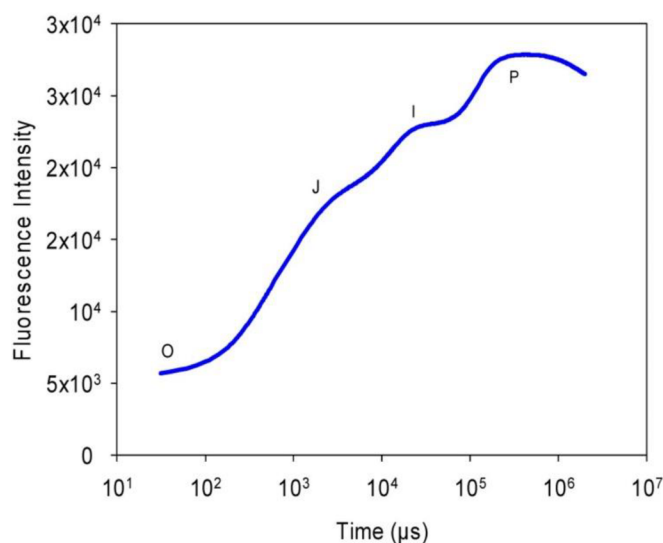
3.12 Fluorescence chlorofylů

Murchie a Lawson (2013) konstatují, že chlorofyl je zelené barvivo, řadící se mezi hlavní fotosyntetické pigmenty. Hraje významnou roli ve světlosběrném komplexu (LHC) a fotosystémech (PS) II a I. Jeho nejvýznamnější funkcí je absorpce světelného kvanta, kdy chlorofyl přechází do excitovaného stavu. Následně je tato energie používána jako zdroj energie pro pohánění fotosyntézy. Přebytečná energie, kterou rostlina nevyužije, je vyzářena (rozptýlena) v podobě tepelné (disipace) nebo světelné (fluorescence) energie. Celý tento proces znázorňuje obrázek 8. Tyto jednotlivé procesy se vzájemně ovlivňují a konkurují si. Jakýkoliv abiotický nebo biotický stresor má na rostlinu negativní vliv. Ten se na ní vždy projevuje sníženou schopností fotosyntézy. To znamená, že když poklesne energie, která je využívána pro fotosyntézu, tak se naopak zvýší množství energie, jež je rostlinou vyzářeno a obráceně. Na základě této spojitosti jsme schopni získat mnoho informací o účinnosti fotosyntézy, zdravotním stavu sledované rostliny a procesech probíhajících v tylakoidních membránách (Roháček 2005; Baker 2008; Murchie & Lawson 2013). De Melo et al. (2022) konstatují, že pokud je cukrová řepa vystavena mírnému vodnímu deficitu, tak se zvyšuje obsah chlorofylů v jejich buňkách. Tato reakce vypovídá o aktivaci ochranného mechanismu rostliny, která se na tento stres adaptuje. Tato skutečnost je využívána pro výběr tolerantních odrůd vůči suchu.



Obrázek 8: Mechanismus fluorescence chlorofylu (Baker 2008)

Jak již bylo řečeno, fluorescence uvádí, kolik světelné energie bylo rostlinou vyzářeno. Toto záření se podle Roháčka (2005) nachází v červeném pásmu světelného spektra, nejvíce je emitováno chlorofylem *a* z PS II a je měřeno pomocí fluorimetrů. Záznam takového měření po určitý čas vytvoří fluorescenční indukční křivku neboli OJIP křivku (viz obrázek 9), která dle Khan et al. (2020) znázorňuje změnu ze stavu, kdy je rostlina adaptována na tmou až po ozáření měřícím světlem fluorimetru, kde O je minimální hodnota fluorescence (F_0) a P je maximální hodnota fluorescence po ozáření (F_m). Trvání této změny je kratší než jedna vteřina. Díky ní lze posoudit použití excitační energie v PS II. Chaerle et al. (2007) konstatují, že pomocí měření fluorescence chlorofylu jsme schopni zjistit, zda je rostlina vystavena stresu ještě dříve, než dojde k poškození buněčných struktur. Dále autor uvádí, že fluorescenční měření je vhodné pro detekci *Cercospora beticola*. Pomocí měření fluorescence jsme schopni vypočítat fluorescenční poměr. Jedná se ukazatel snížení účinnosti PS II. Hodnota tohoto poměru u zdravých rostlin je 0,83 a se snižováním funkcí PS II klesá. Vypočítá se jako podíl variabilní (F_v) k maximální (F_m) fluorescence, kdy variabilní je charakterizována jako rozdíl okamžité (F_m) a základní (F_0) fluorescence (Roháček 2005; Baker 2008; Murchie & Lawson 2013).



Obrázek 9: OJIP křivka (Xia et al. 2019)

4 Metodika

Vliv vodního deficitu byl sledován v zemědělském podniku v Královohradeckém kraji, Farma Kejkliček. Pokus byl koncipován jako polní, kdy sledovanou rostlinou byla řepa cukrová: Adela, Dolerosa a Viola. Všechny porosty byly založeny tradiční metodou pěstování s hlubokou orbou na třech lokalitách. U rostlin byla měřena během vegetace gazometricky rychlost výměny plynů (fotosyntéza, transpirace), obsah fotosynteticky aktivních pigmentů, jejich fluorescence a osmotický potenciál.

4.1 Popis sledovaného materiálu

Adela (Adelka) je diploidní odrůda používaná ke střední až pozdní sklizni. Majitelem a šlechtitelem této odrůdy je firma KWS. Jedná se o genotyp tolerantní k *Cercospora beticola* a rizománii. Adela je také celkově středně tolerantní vůči komplexu listových skvrnitostí a zároveň má toleranci vůči vybíhání do květu. V systému pěstování s fungicidním a bez fungicidního ošetření dosahuje vysokých až velmi vysokých výnosů cukru, polarizačního cukru a kořene. Obsah α -aminodusíku je velmi nízký a obsah popelovin naopak vysoký. Cukernatost této odrůdy je středně vysoká až vysoká. V registračních zkouškách nově registrovaných odrůd cukrové řepy v období 2020 až 2021 dosahoval výnos kořene bez fungicidního ošetření 113,8 % a 110,3 % s fungicidním ošetřením v porovnání s průměrem SSRO (100 %). Výnos polarizačního cukru v těchto zkouškách činil 116,8 % bez fungicidního ošetření a 110,0 % s fungicidním ošetřením v porovnání se SSRO. Cukernatost této odrůdy v registračních zkouškách činila 102,7 % ve variantě s fungicidy a 99,8 % bez fungicidů (Hakaufová 2022).

Dolerosa je také diploidní odrůdou, jejímž šlechtitelem a majitelem je firma KWS. Tento genotyp je tolerantní k rizománii a *Cercospora beticola*. Řadíme jí k pozdním odrůdám. Dolerosa má střední toleranci proti vybíhání do květu, komplexu listových skvrnitostí a navíc je středně odolná vůči hád'átku řepnému. V systému pěstování s fungicidním a bez fungicidního ošetření dosahuje vysokých až velmi vysokých výnosů kořene, polarizačního cukru a bílého cukru. V obou případech má Dolerosa vysokou až velmi vysokou cukernatost. Obsah nežádoucího dusíku je opět velmi nízký. Obsah popelovin dosahuje středně vysokých až nízkých hodnot. V registračních zkouškách nově registrovaných odrůd cukrové řepy v období 2021 až 2022 dosahoval výnos kořene bez fungicidního ošetření 107,1 % a 109,6 % s fungicidním ošetřením v porovnání s průměrem SSRO (100 %). Výnos polarizačního cukru v těchto zkouškách činil 115,9 % bez fungicidního ošetření a 113,6 % s fungicidním ošetřením v porovnání se SSRO. Cukernatost této odrůdy v registračních zkouškách činila 107,9 % ve variantě s fungicidy a 103,9 % bez fungicidů (Brom 2023).

Odrůda Viola je diploidní odrůdou. Majitelem a šlechtitelem je firma KWS. Je tolerantní vůči *Cercospora beticola* a rizománii. Stejně jako Adela se řadí k odrůdám střední až pozdní sklizně. Jako předchozí odrůdy tak i tato je odolná vůči vybíhání do květu a středně imunní k souboru listových skvrnitostí. V systému pěstování s fungicidním a bez fungicidního ošetření dosahuje vysokých až velmi vysokých výnosů cukru, polarizačního cukru a kořene. S fungicidním ošetřením dosahuje cukernatost středně až vysokých výsledků. Oproti tomu ve variantě bez fungicidů je cukernatost nízká až střední. Obsahuje velmi vysoké množství popelovin. Množství α -aminodusíku je nízké. V registračních zkouškách nově registrovaných

odrůd cukrové řepy v období 2020 až 2021 dosahoval výnos kořene bez fungicidního ošetření 117,8 % a 112,8 % s fungicidním ošetřením v porovnání s průměrem SSRO (100 %). Výnos polarizačního cukru v těchto zkouškách činil 119,3 % bez fungicidního ošetření a 109,7 % s fungicidním ošetřením v porovnání se SSRO. Cukernatost této odrůdy v registračních zkouškách činila 101,2 % ve variantě s fungicidy a 97,4 % bez fungicidů (Hakaufová 2022).

4.2 Založení pokusu – pokusné lokality

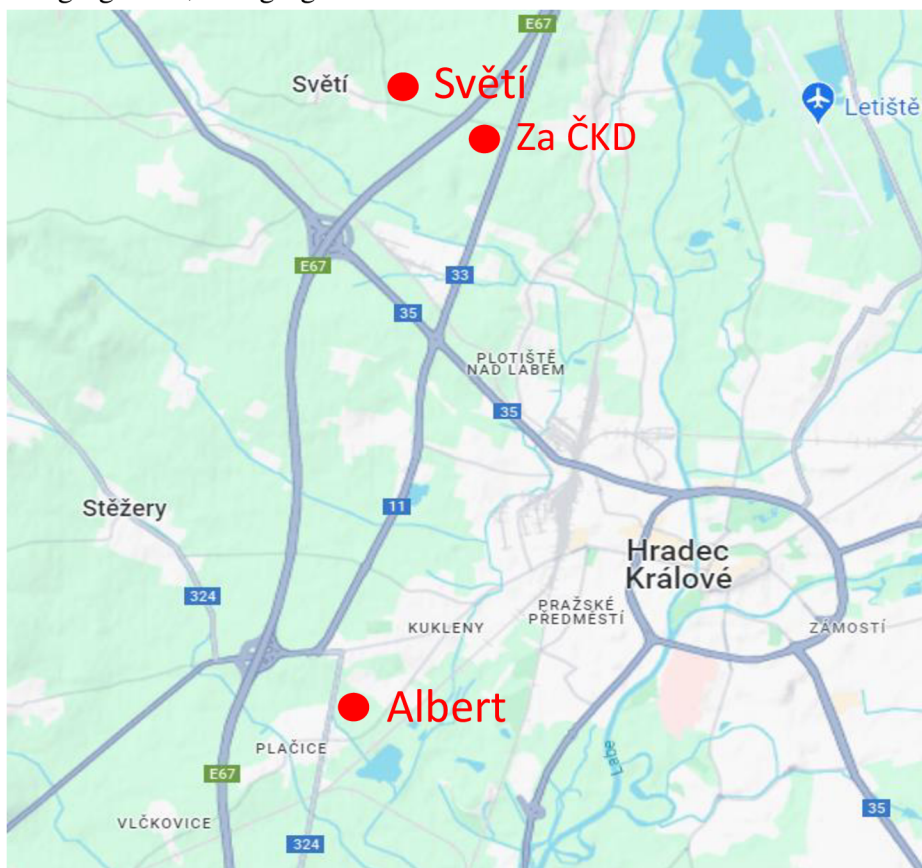
Polní pokus se uskutečnil na třech lokalitách, patřících Farmě Kejkliček. Všechna sledovaná místa se nacházela v Královehradeckém kraji, v okolí Hradce Králové. Všechny pozorované oblasti se řadí do třetího klimatického regionu. Ten je charakteristický pro své teplé a mírně vlhké podnebí. Průměrná roční teplota tohoto regionu se pohybuje v rozmezí 8 až 9 °C a průměrným úhrnem srážek 550 až 650 mm. Suma teplot nad 10 °C zpravidla na těchto místech činí 2500 – 2800 °C. Pravděpodobnost výskytu suchého vegetačního období je 10 až 20 %. Jedná se o pozemky, které nejsou náchylné na zamokření ani k vysychání (Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy 2022).

První lokalitou byl pozemek 640 1040 4302/3, který dostal pracovní označení Albert. Toto místo se nachází v oblasti Kukleny a jeho souřadnice jsou 50°11'49.3"N 15°46'53.2"E (viz obrázek 10). Bonitovaná půdní ekologická jednotka (BPEJ) tohoto místa je 3.13.00. Z BPEJ vyplývá, že genetický půdní představitel, který charakterizuje výsledek půdotvorného procesu, je na tomto místě hnědozem se střední infiltrací vody. Využitelná vodní kapacita dosahuje vyšších středních hodnot a retenční vodní kapacita nižších středních. Půda je zde hluboká hlinitopísčítá až jílovitohlinitá. Zároveň je bezskeletovitá případně s výskytem skeletu do 10 %. Pozemek se nachází na rovině se sklonem 0° až 3° a expozicí na sever, jih, východ a západ. Toto pole je středně ohroženo utužením půdy a také větrnou erozí. Dle BPEJ je bodová výnosnost tohoto pole 75 bodů ze 100. Z čehož vyplývá, že se jedná o produkční pole (Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy 2022). Zde byla pěstována odrůda Viola. Dle rozboru půdy z roku 2022 je na tomto pozemku hodnota pH 5,5. Zásobenost živin v půdě je zde 42 mg/kg P, 167 mg/kg K, 132 mg/kg Mg, 1581 mg/kg Ca, 15 mg/kg S a 0,65 mg/kg B.

Druhé odběrové místo se nachází na souřadnicích 50°15'10.9"N 15°47'57.5"E (viz obrázek 10). Jedná se o díl půdního bloku s číslem 640-1030 3713/15. Stanoviště je označeno Za ČKD a byla zde pěstována odrůda Adela. BPEJ tohoto pozemku je 3.09.00. Jedná se o rovný pozemek se sklonem 0° až 3° a se všesměrnou expozicí. Genetický půdní představitel je šedozem. Půda je zde hlinitopísčítá až jílovitohlinitá se střední infiltrací vody. Pozemek je bezskeletovitý nebo s občasným výskytem skeletu do 10 %. Půda je zde hluboká a má vysoké hodnoty retenční vodní kapacity a také využitelné vodní kapacity. Bodová výnosnost na tomto místě činí dle BPEJ 92 bodů, čímž se jedná o vysoce produkční pozemek. Je zde vysoká ohroženost utužením ale nízká ohroženost větrnou erozí (Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy 2022). Dle rozboru půdy z roku 2021 je na tomto pozemku hodnota pH 7,1. Zásobenost živin v půdě je zde 135 mg/kg P, 226 mg/kg K, 93 mg/kg Mg, 2977 mg/kg Ca, 24 mg/kg S a 1,5 mg/kg B.

Světí je třetím pozemkem nacházející se na souřadnicích 50°15'25.7"N 15°47'08.4"E (viz obrázek 10) nedaleko vesnice Světí. Hodnota BPEJ je shodná s předešlým pozemkem a činí tedy 3.09.00. Jedná se o pole s číslem dílu půdního bloku 640-1030 3601/3. Pozemek

s hlubokou půdou, který je bez skeletu, popřípadě s výskytem skeletu do 10 %. Půda zde má střední rychlost infiltrace a je hlinitopísčité až jílovitohlinité. Využitelná vodní kapacita na tomto místě dosahuje vysoké hodnoty stejně jako retenční vodní kapacita. Genetický půdní představitel je zde také šedozem. Pozemek má všesměrnou expozici a jeho sklonitost činí 0° až 3°. Stejně jako předchozí pozemek je i tento ohrožen utužením půdy a minimálně ohrožen větrnou erozí. Zmiňovaný pozemek je vysoce produkční a má stejnou bodovou výnosnost jako pozemek Za ČKD (Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy 2022). Na tomto místě byla pěstována odrůda Dolorosa. Dle rozboru půdy z roku 2022 je na tomto pozemku hodnota pH 6,9. Zásobenost živin v půdě je zde 143 mg/kg P, 227 mg/kg K, 160 mg/kg Mg, 2567 mg/kg Ca, 24 mg/kg S a 1,25 mg/kg B.



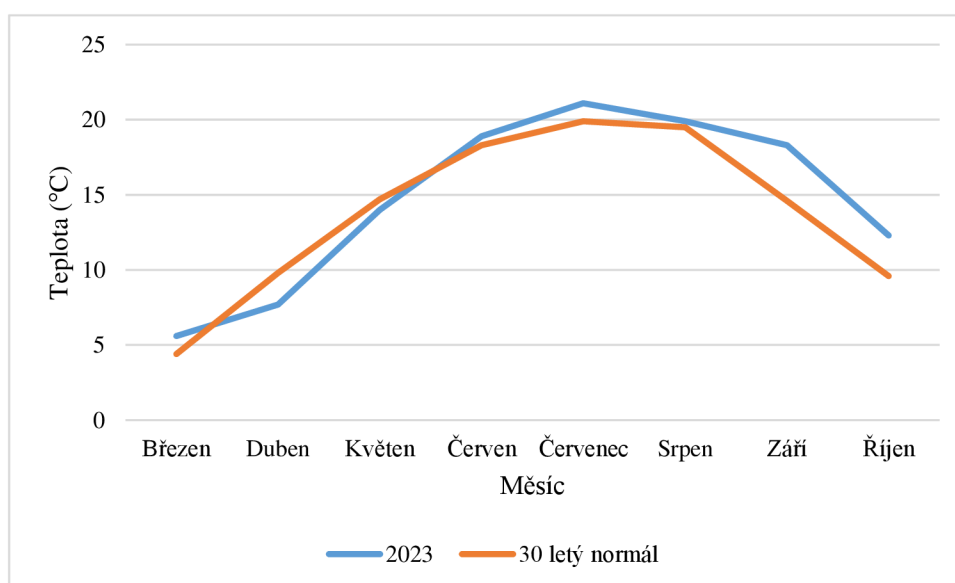
Obrázek 10: Poloha míst odběrů

4.3 Průběh počasí během vegetačního období

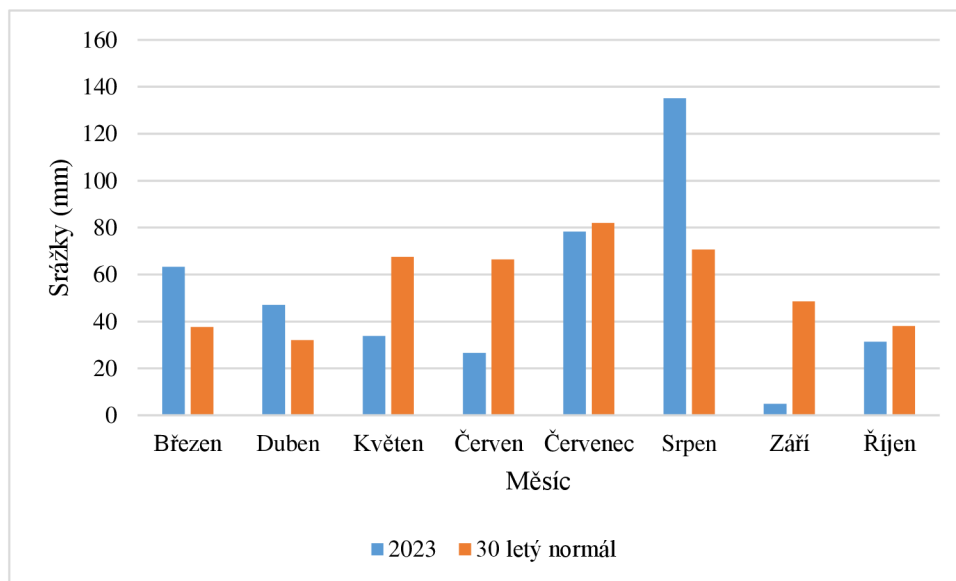
Teplotní záznamy a úhrny srážek byly převzaty z meteorologické stanice Hradec Králové, Nový Hradec Králové. Ta se nachází přímo ve městě a svou činnost započala v roce 1961. Nachází se v nadmořské výšce 278 m. n. m. Průběh teplot a srážek byl sledován od března do října pokusného roku 2023.

Z grafů 2 a 3 vyplývá, že v březnu dosáhla průměrná teplota vzduchu 5,6 °C. To z něj dělá nejchladnější měsíc pozorování. Nejvyšší zaznamenaná teplota byla 13,7 °C a naopak nejnižší teplota dosáhla -0,1 °C. Celkový úhrn srážek tento měsíc činil 63,2 mm. Duben byl oproti březnu teplejší. Byla zaznamenaná shodná maximální teplota jako v březnu, která činila

13,7 °C. Průměrná teplota byla 7,7 °C a nejnižší naměřená teplota -0,4 °C. Srážky během tohoto měsíce dosáhly 47 mm. V květnu bylo zaznamenáno oteplení na průměrnou teplotu 14,0 °C. Maximální teplota naměřená tento měsíc činila 20,1 °C a nejnižší 8,1 °C. Srážky v květnu dosáhly 33,8 mm. Červen byl teplejší než předešlý měsíc, kdy průměrná teplota činila 18,9 °C. Minimální teplota tohoto měsíce byla 13,9 °C a naopak maximální činila 26,7 °C. Celkový úhrn srážek v červnu byl 26,6 mm. Červenec byl nejteplejším zaznamenaným měsícem. Průměrná teplota v červenci dosáhla 21,1 °C. Byla také naměřena nejvyšší maximální teplota, která dosáhla 28,1 °C a nejvyšší minimální teplota s hodnotou 15,8 °C. I když se jednalo o nejteplejší měsíc, tak množství srážek dosáhlo hodnoty 78,3 mm. V srpnu bylo možné pozorovat první mírné ochlazení. Průměrná teplota tohoto měsíce klesla na 19,9 °C. Snížila se také maximální a minimální teplota a to na hodnotu 26,1 °C a 13,7 °C. Tento měsíc byl nejdeštivějším z celého měření, protože celkový úhrn srážek činil 135,1 mm. Září bylo naopak nejsušším měsícem v průběhu pokusu. Srážky dosáhly pouze 4,9 mm. Průměrná teplota klesla na 18,3 °C, stejně tak i nejvyšší naměřená teplota, která se snížila na 22,7 °C. Nejnižší teplota dosáhla hodnoty 11,7 °C. Průměrná teplota vzduchu během října činila 12,3 °C. Nejvyšší naměřená teplota byla 20,0 °C a nejnižší byla 5,0 °C. Srážky během října činili 31,4 mm. Úhrn srážek během měření dosáhl hodnoty 420,3 mm, což představuje 66,7 % z celkového úhrnu srážek tohoto roku. Jeho suma činila 630,4 mm. Průměrná teplota během celého pozorování byla 14,7 °C. Z grafů je také patrné, že vegetační období cukrové řepy v roce 2023 bylo teplotně nadprůměrné a srážkově podprůměrné v porovnání s 30 letým normálem. Průměrná teplota 30 letého normálu činí v tomto období 13,9 °C a srážky 442,8 mm (Český hydrometeorologický ústav 2024).



Graf 2: Průběh průměrných teplot v porovnání s 30 letým normálem (Český hydrometeorologický ústav 2024)



Graf 3: Průběh úhrnu srážek v porovnání s 30 letým normálem (Český hydrometeorologický ústav 2024)

4.4 Měření fyziologických charakteristik

V této části metodiky jsou popsány fyziologické charakteristiky, které byly použity pro vyhodnocení případného vodního deficitu ve všech zkoumaných odrůdách. V rámci pokusu byla na rostlinách pozorována rychlost výměny plynů, obsah fotosynteticky aktivních pigmentů, jejich fluorescence, osmotický potenciál a efektivita využití vody.

4.4.1 Rychlost výměny plynů

Měření těchto charakteristik se uskutečnilo podle pokusů Holá et al. (2010). Rychlost fotosyntézy a transpirace byla stanovována pomocí přístroje LCpro+ v dopoledních hodinách při nastavené teplotě 25 °C a ozáření 650 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Jedná se o nedestruktivní metodu, kdy princip měření tohoto přístroje je založen na infračerveném záření. LCpro+ je mobilní gazometrický přístroj od firmy ADC BioScientific Ltd. skládající se z řídicího boxu s displejem, kde lze nastavit vše potřebné pro měření, a hlavice, do níž je vkládán list, na kterém jsou měřeny fyziologické charakteristiky. Přístroj je také určen k měření stomatární vodivosti, intenzity osvětlení, teploty vzduchu, teploty listu a atmosférického tlaku. Přístroj je vybaven tak, aby mohl kontrolovat a regulovat přesné koncentrace CO_2 a H_2O jež byly nastaveny uživatelem pro měření. Měřicí hlavice má v sobě zabudované červeno-modré LED, díky kterým je možno nastavovat intenzitu ozáření od 0 až 2000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Jeho součástí je také systém pro udržování nastavené teploty během měření. Rychlost fotosyntézy a transpirace je poté stanovena na základě změny koncentrace a rychlosti průtoku sledovaných plynů v oblasti mezi vstupem a výstupem z měřicí komory (ADC BioScientific 2013).

4.4.2 Obsah fotosynteticky aktivních pigmentů

Pro stanovení obsahu fotosynteticky aktivních pigmentů byl odebrán vzorek z listu cukrové řepy o ploše 1 cm^2 . Ten byl následně vložen do 1 ml dimethylformamidu, kde se

24 hodin extrahovaly v temnotě, za chladných podmínek s občasným promícháním tohoto roztoku. Po uplynutí 24 hodin byl vždy vzorek vyhodnocen pomocí přístroje UV-Vis Evolution 2000 na základě spektrofotometrické analýzy. Při měření byly vzorky vystavovány světlu o různých vlnových délkách (710; 663,8; 648,8; 480). Jako slepý vzorek byl použit čistý dimethylformamid. Na základě hodnot absorbance byl stanoven obsah chlorofylu a, chlorofylu b, celkového chlorofylu a karotenoidů.

- Chlorofyl a: $\text{Chl a} = 12,0 * A_{663,8} - 3,11 * A_{646,8}$
- Chlorofyl b: $\text{Chl b} = 20,78 * A_{646,8} - 4,88 * A_{663,8}$
- Celkový chlorofyl: $\text{Chl a+b} = 7,12 * A_{663,8} + 17,67 * A_{646,8}$
- Karotenoidy: $\text{Carx+c} = (1000 * A_{480} - 1,12 * \text{Chl a} - 34,07 * \text{Chl b}) / 245$

Stanovení obsahu fotosynteticky aktivních pigmentů bylo prováděno na základě metodiky Porra et al. (1989).

4.4.3 Fluorescence fotosynteticky aktivních pigmentů

Tento fyziologický parametr byl stejně jako rychlost výměny plynů měřen nedestruktivní metodou, která využívá pulsní amplitudovou modulaci. Byl měřen maximální výtěžek fluorescence, který se vypočítá jako podíl maximálního výtěžku variabilní fluorescence (F_v) k maximální fluorescenci (F_m). Dále byla sledována potenciální účinnost fluorescence, jež je dána podílem maximálního výtěžku variabilní fluorescence (F_v) a minimálního výtěžku fluorescence (F_0). Pro změření příslušných hodnot byl použit mobilní přístroj OS5p+. Ten se skládá ze dvou částí. První je měřicí hlavice, která je schopna vydávat rozdílné typy záření (aktinické, modulované, saturační). Druhou součástí je řídicí konzole vybavená displejem, pomocí něhož se přístroj ovládá a nastavuje (Opti-Sciences 2023).

Roháček a Barták (1999) konstatují, že při přechodu měřeného listu do temna, dojde ve fotosystému II k otevření všech reakčních center, jež je způsobeno jejich reoxidací. Následně je list ozářen slabým modulovaným paprskem, díky čemuž je změřen minimální výtěžek fluorescence (F_0) listu v temnotě. Jedná se o neměnnou hodnotu, která není ovlivněna aktivitou fotosyntézy. Poté je list osvětlen pomocí saturačního paprsku, díky kterému nastane opět uzavření reakčních center ve fotosystému II. Tím je docíleno zvýšení fluorescence chlorofylu, díky čemuž jsme schopni změřit maximální fluorescenci (F_m) listu vystavenému temnotě. Námí zvolená doba zatmění měřených listů byla 20 minut. Na základě změřených údajů jsme schopni stanovit maximální výtěžek variabilní fluorescence, která je dána rozdílem maximální fluorescence (F_m) a jejím minimálním výtěžkem (F_0).

4.4.4 Osmotický potenciál

Ehlers a Goss (2016) konstatují, že na základě vodního potenciálu jsme schopni stanovit rozdíl mezi aktivitou vody v pletivech a aktivitou vody v chemicky čisté formě. Měření osmotického potenciálu se stanovovalo pomocí přístroje WP4C, jehož metoda měření je založena na ochlazovaném zrcátku, na kterém kondenzuje voda. Měřený vzorek je uzavřen v komoře vybavenou potřebným příslušenstvím stanovujícím stupeň kondenzace vody na zmiňovaném zrcátku. V tomto prostoru je vytvářena rovnováha mezi vodním potenciálem

sledovaného vzorku a vodním potenciálem vzduchu vyskytujícím se v měřicí komoře na základě metody headspace. Vodní potenciál vzorku je následně stanoven na základě tlakových hodnot v komoře a nasycených par s vodou (Haghverdi et al. 2020).

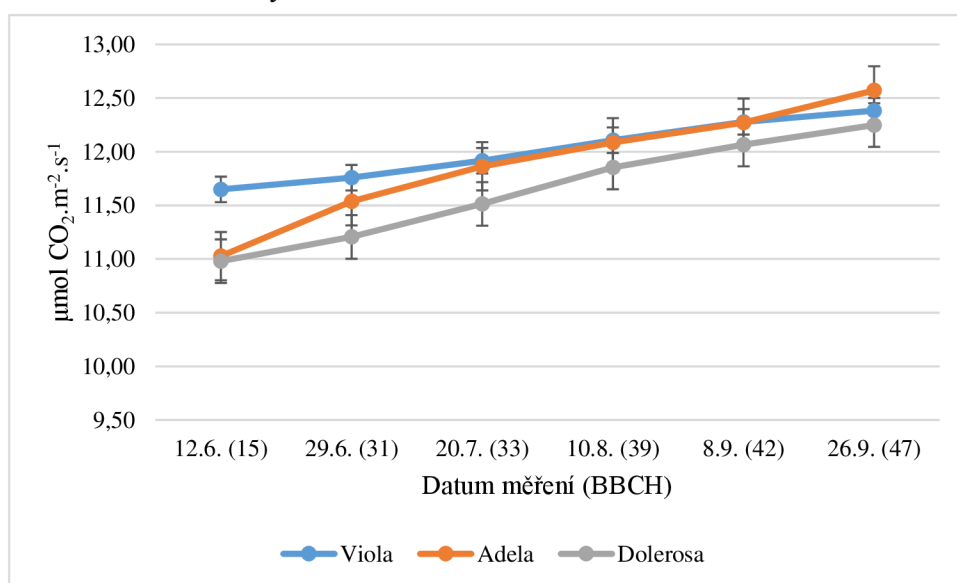
4.4.5 Efektivita využití vody (WUE)

Tato fyziologická veličina je stanovena na základě změřených údajů rychlosti fotosyntézy a rychlosti transpirace. WUE je následně vypočtena jako podíl rychlosti fotosyntézy (A) k rychlosti transpirace (E). Rovnice pro výpočet efektivity využití vody je následující: $WUE = A / E (10^{-3})$ (Larcher 2003).

5 Výsledky

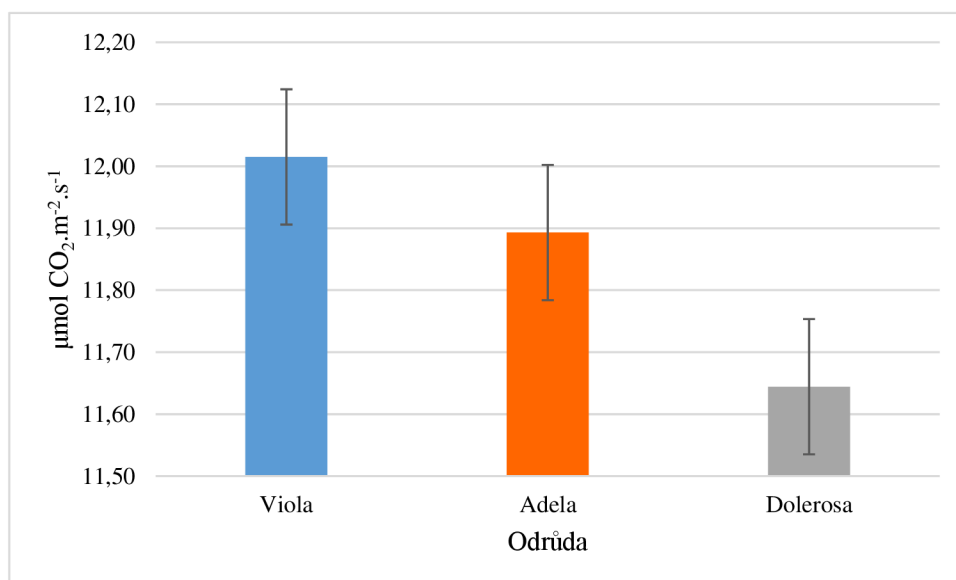
5.1 Rychlost fotosyntézy

Graf 4 znázorňuje změny rychlosti fotosyntézy sledovaných odrůd cukrové řepy během ontogenetického vývoje. Nejnižší hodnoty rychlosti fotosyntézy byly zaznamenány 12. 6., kdy se pohybovaly v intervalu hodnot od 10,98 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (Dolerosa) do 11,65 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (Viola). Tyto hodnoty byly zároveň nejnižší v rámci ontogenetického vývoje rostlin. Nízké hodnoty fotosyntézy jsou dány jednak vývojem rostlin, ale patrně také vodním deficitem (viz graf 3). Z grafu 4 dále vyplývá, že rychlost fotosyntézy se v závislosti na vývoji rostlin zvyšovala, kdy maxima bylo dosaženo v období před sklizní, 26. 9. V této vývojové fázi byla v rámci sledovaných odrůd rychlost fotosyntézy vyrovnaná. Nejvyšší rychlost fotosyntézy v tomto termínu měření byla naměřena u odrůdy Dolerosa (12,25 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) a nejvyšší u odrůdy Adela (12,57 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). Z výsledků je také patrné, že v rozmezí 20. 7. až 10. 8. byl zaznamenán vyšší nárůst rychlosti fotosyntézy zejména u odrůd Dolerosa a Viola. Nárůst této charakteristiky činil u odrůdy Dolerosa 0,34 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ a zvýšil se z 11,51 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (20. 7.) na 11,85 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (10. 8.). U odrůdy Viola se rychlost fotosyntézy v tomto období pohybovala od 11,92 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (20. 7.) do 12,11 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (10. 8.). Zvýšení rychlosti fotosyntézy je dáno nejenom ontogenetickým vývojem, ale také srážkami v měsíci srpnu a teplotou, která byla srovnatelná s 30 letým normálem. V září byla teplota vzduchu výrazně vyšší proti 30 letému normálu (viz graf 2) a zároveň množství úhrnu srážek bylo velmi nízké (viz graf 3), v tomto termínu měření na rostliny působil vodní deficit. Tento vodní deficit se projevil relativně nižším nárůstem rychlosti fotosyntézy v termínech 8. 9. a 26. 9. Tento trend byl zaznamenán u všech sledovaných odrůd.



Graf 4: Změny rychlosti fotosyntézy ($\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) v závislosti na ontogenetickém vývoji sledovaných odrůd řepy

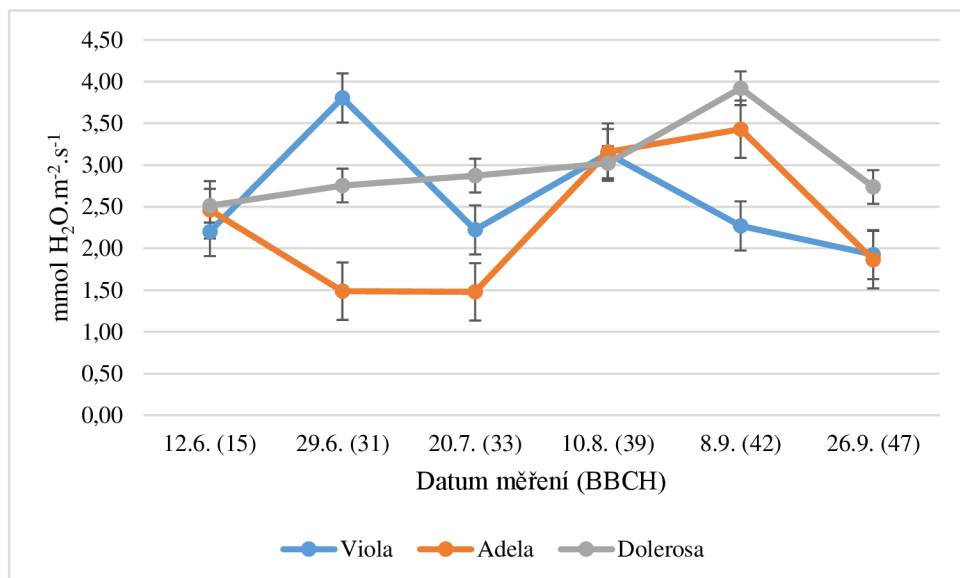
V grafu 5 jsou uvedeny průměrné hodnoty rychlosti fotosyntézy jednotlivých odrůd cukrové řepy. Z něho je zřejmé, že nejvyšší průměrné rychlosti fotosyntézy dosáhla odrůda Viola (12,02 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). Naopak nejnižší rychlost fotosyntézy byla zaznamenána u odrůdy Dolerosa (11,64 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). Rozdíl v průměrné rychlosti fotosyntézy mezi odrůdou Viola a Dolerosa činil 0,38 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Z hlediska této charakteristiky je odrůda Viola nejodolnější vůči vodnímu deficitu a naopak odrůda Dolerosa nejméně. Bylo potvrzeno, že mezi jednotlivými genotypy v rychlosti fotosyntézy existují rozdíly.



Graf 5: Vliv odrůdy na rychlost fotosyntézy ($\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

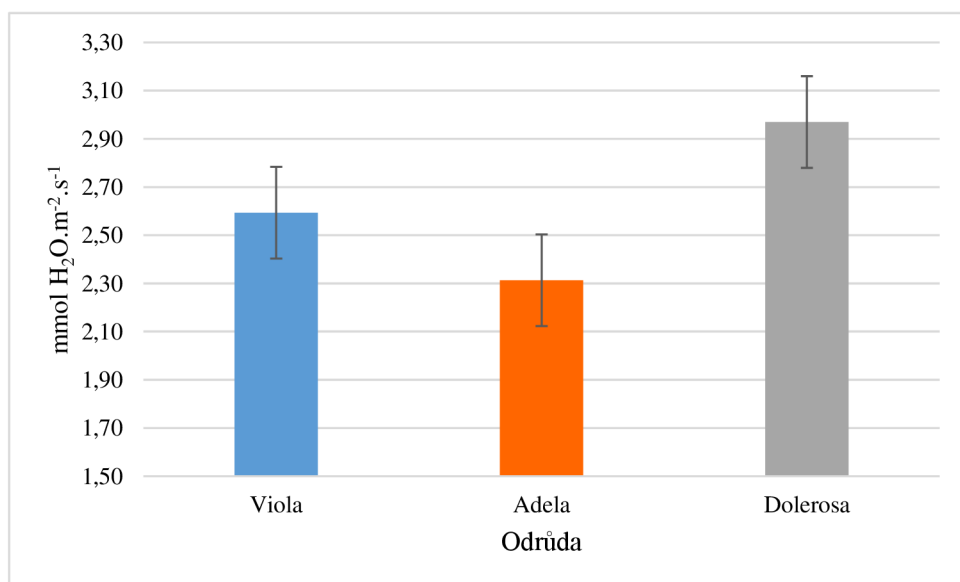
5.2 Rychlost transpirace

Změny rychlosti transpirace jednotlivých odrůd cukrové řepy v závislosti na termínu měření jsou uvedeny v grafu 6. Z uvedeného grafu je patrné, že rychlost transpirace se u odrůdy Viola pohybovala v rozmezí hodnot od 1,93 $\text{mmol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (26. 9.) do 3,80 $\text{mmol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (29. 6.). U této odrůdy se v průběhu ontogenetického vývoje snížila v rámci na sebe navazujících termínů. První snížení bylo zaznamenáno v termínu od 29. 6. do 20. 7., kdy se hodnota rychlosti transpirace snížila z 3,80 $\text{mmol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ na 2,22 $\text{mmol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Druhé snížení bylo zaznamenáno od 10. 8. do konce sledovaného období. Podobný trend lze pozorovat také u odrůdy Adela, kdy se rychlost transpirace pohybovala v rozmezí 1,48 $\text{mmol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (20. 7.) až 3,43 $\text{mmol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (8. 9.). Snížení transpirace u této odrůdy bylo zaznamenáno na počátku sledovaného období, až do 20. 7. (1,48 $\text{mmol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). Druhý pokles byl zaznamenán v zářijových termínech. Poklesy rychlosti transpirace sledovaných odrůd se shodují s termíny nízkých srážek a výskytu vodního deficitu. Zcela odlišný trend byl zjištěn u odrůdy Dolerosa. V případě této odrůdy se rychlost transpirace zvyšovala do 8. 9. (3,92 $\text{mmol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) od počátku sledovaného období (2,51 $\text{mmol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). Obdobně, jako v případě odrůd Viola a Adela, byl také u odrůdy Dolerosa zjištěn pokles transpirace v zářijových termínech měření, kdy se rychlost transpirace snížila z 3,92 $\text{mmol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (8. 9.) na 2,74 $\text{mmol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (26. 9.).



Graf 6: Změny rychlosti transpirace ($\text{mmol H}_2\text{O.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) v závislosti na odrůdě a ontogenetickém vývoji

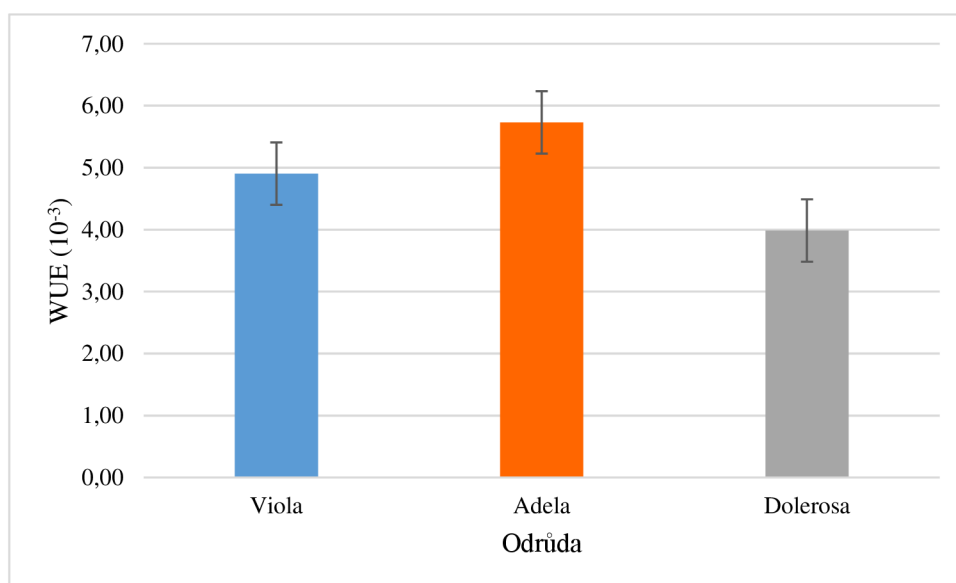
Rozdíly v rychlosti transpirace mezi sledovanými odrůdami demonstruje graf 7. Z naměřených průměrných hodnot transpirace vyplývá, že nejnižší transpiraci vykazuje odrůda Adela ($2,31 \text{ mmol H}_2\text{O.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$). Na straně druhé nejvyšší rychlost transpirace byla zjištěna u odrůdy Dolerosa ($2,97 \text{ mmol H}_2\text{O.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$). Na základě sledování této charakteristiky je odrůda Dolerosa citlivá vůči případnému vodnímu deficitu, neboť i v období vodního deficitu vykazuje vyšší hodnoty transpirace. Avšak odrůda Adela se jeví jako tolerantnější vůči vodnímu deficitu. Bylo potvrzeno, že mezi jednotlivými genotypy v rychlosti transpirace existují rozdíly.



Graf 7: Vliv odrůdy na rychlost transpirace ($\text{mmol H}_2\text{O.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)

5.3 Efektivita využití vody

Hodnota efektivity využití vody v rámci sledovaných odrůd řepy je uvedena v grafu 8. Nejvyšší hodnota WUE byla vypočtena u odrůdy Adela - 5,73 (10^{-3}). Nejnížší efektivita využití vody byla stanovena u odrůdy Dolorosa. U této odrůdy byla hodnota WUE ve výši 3,99 (10^{-3}). Z hlediska této charakteristiky je odrůda Adela nejodolnější vůči vodnímu deficitu a naopak odrůda Dolorosa nejméně. Bylo potvrzeno, že mezi jednotlivými genotypy v efektivitě využití vody existují rozdíly.

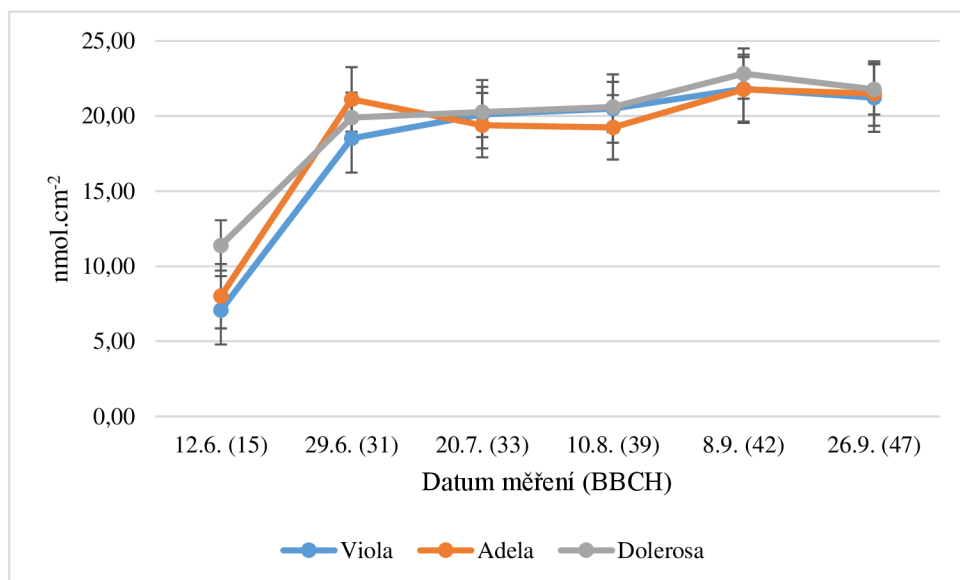


Graf 8: Efektivita využití vody – WUE – (10^{-3}) u sledovaných genotypů řepy

5.4 Obsah fotosynteticky aktivních pigmentů

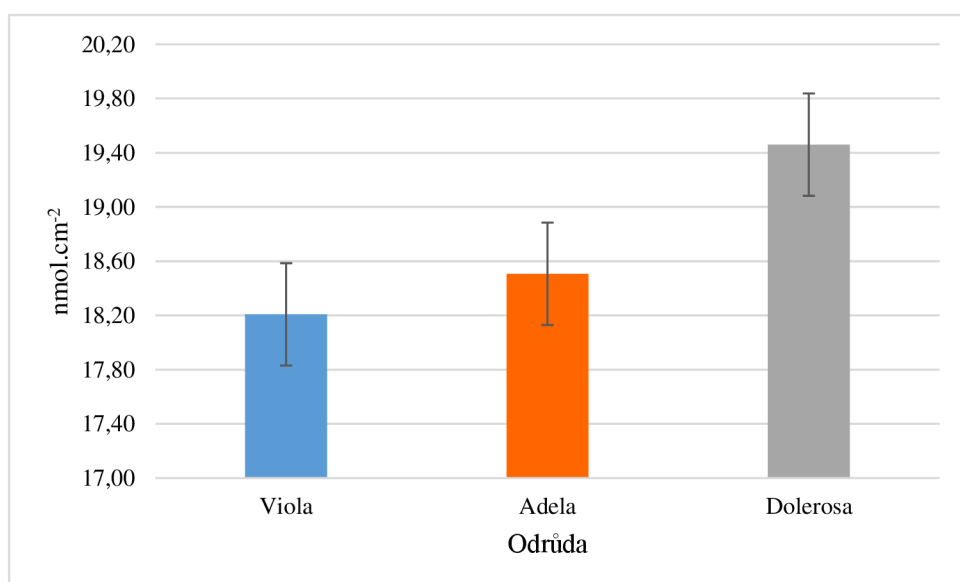
Obsah celkového chlorofylu v průběhu pokusu znázorňuje graf 9. Z něj je patrné, že průběh obsahu chlorofylu byl u sledovaných odrůd obdobný. Obsah chlorofylu u odrůdy Viola se pohyboval v rozmezí $7,07 \text{ nmol.cm}^{-2}$ (12. 6.) až $21,81 \text{ nmol.cm}^{-2}$ (8. 9.). Obsah chlorofylů se u této odrůdy zvyšoval od počátku sledovaného období ($7,07 \text{ nmol.cm}^{-2}$) do 8. 9. ($21,81 \text{ nmol.cm}^{-2}$). V období 12. 6. až 29. 6. je patrný prudký nárůst obsahu chlorofylu ze $7,07 \text{ nmol.cm}^{-2}$ na $18,51 \text{ nmol.cm}^{-2}$. Na konci pokusu se obsah chlorofylů snížil na hodnotu $21,23 \text{ nmol.cm}^{-2}$. Podobný trend byl zjištěn u odrůdy Dolorosa. Obsah celkového chlorofylu se u ní pohyboval v rozmezí $11,39 \text{ nmol.cm}^{-2}$ (12. 6.) až $22,83 \text{ nmol.cm}^{-2}$ (8. 9.). Průkazný nárůst obsahu chlorofylů byl také u této odrůdy zaznamenán do termínu 29. 6. ($19,89 \text{ nmol.cm}^{-2}$). Pokles obsahu chlorofylů byl zjištěn mezi zářijovými termíny měření. V případě odrůdy Adela byl zaznamenán odlišný trend ve změnách obsahu chlorofylů v závislosti na ontogenezi. Shodně s předcházejícími odrůdami je možné konstatovat, že obsah chlorofylů se zvyšoval v rámci termínů měření 12. 6. ($8,01 \text{ nmol.cm}^{-2}$) až 29. 6. ($21,11 \text{ nmol.cm}^{-2}$). V termínu od 29. 6. do 10. 8. se obsah celkového chlorofylu snížil na hodnotu $19,25 \text{ nmol.cm}^{-2}$ z hodnoty $21,11 \text{ nmol.cm}^{-2}$. Dále se obsah chlorofylů průkazně zvýšil. Také u této odrůdy se obsah

chlorofylů snížil v září. Obsah chlorofylů v letním období se snížil patrně vlivem vodního deficitu a vysokých teplot.



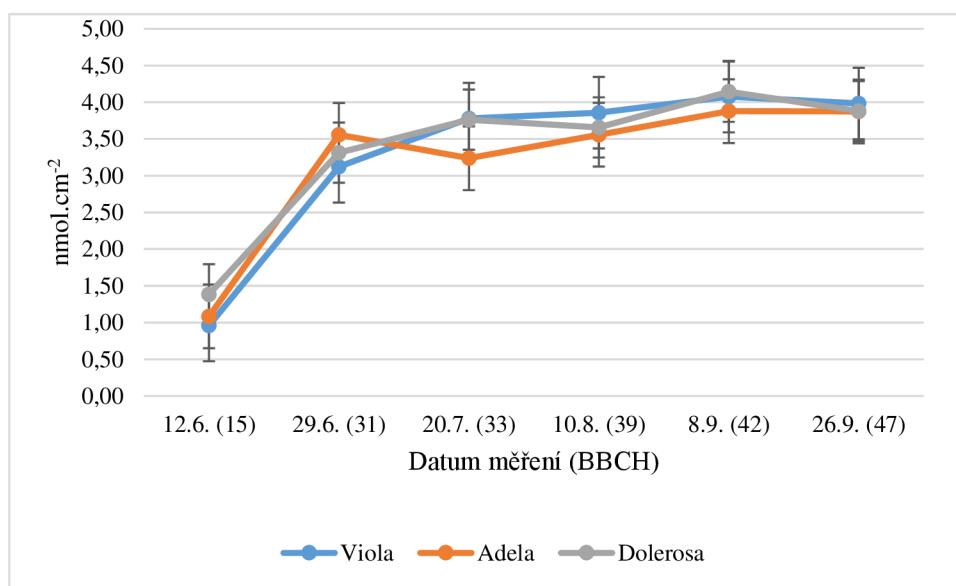
Graf 9: Změny obsahu celkového chlorofylu (nmol.cm⁻²) v závislosti na odrůdě a ontogenetickém vývoji

Průměrné hodnoty celkového chlorofylu jsou uvedeny v grafu 10. Z něj je zřejmé, že nejvyšší průměrný obsah celkového chlorofylu zaznamenala odrůda Dolerosa s hodnotou 19,46 nmol.cm⁻². Na straně druhé nejnižší obsah chlorofylů měla odrůda Viola (18,21 nmol.cm⁻²). Bylo potvrzeno, že mezi jednotlivými genotypy v obsahu celkového chlorofylu existují rozdíly.



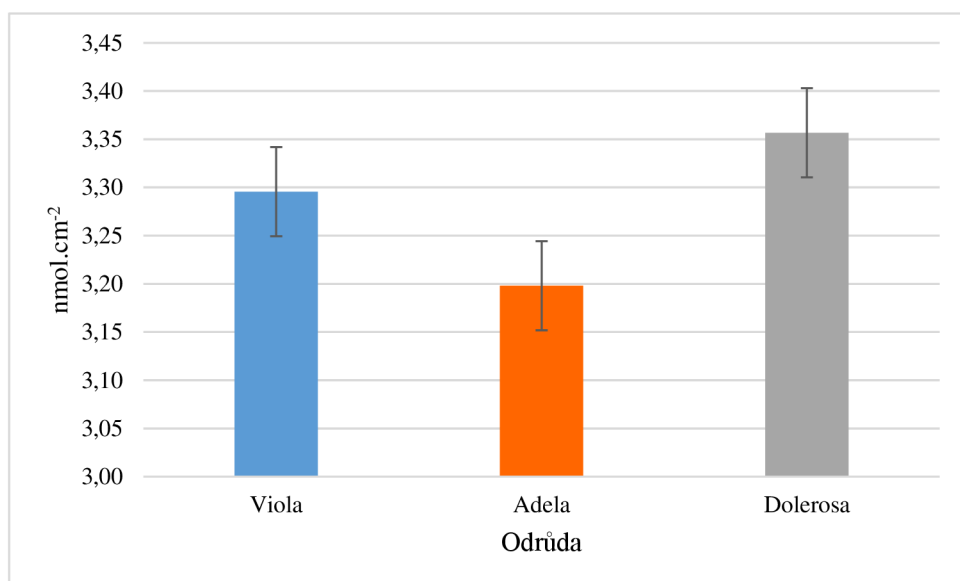
Graf 10: Celkový obsah chlorofylu (nmol.cm⁻²) u sledovaných genotypů řepy

Z grafu 11 je patrný vývoj obsahu karotenoidů u odrůd cukrové řepy v průběhu měření. Z grafu vyplývá, že obsah karotenoidů u sledovaných genotypů má obdobný trend vývoje jako obsah chlorofylu. Obsah karotenoidů se u odrůdy Viola pohyboval v rozmezí hodnot $0,96 \text{ nmol.cm}^{-2}$ (12. 6.) až $4,08 \text{ nmol.cm}^{-2}$ (8. 9.). Průkazný nárůst karotenoidů byl naměřen mezi počátečními termíny měření, kdy 29. 6. byl obsah karotenoidů $3,12 \text{ nmol.cm}^{-2}$. Obsah karotenoidů se zvyšoval do 8. 9. ($4,08 \text{ nmol.cm}^{-2}$). Na konci pokusu, tedy v zářijových termínech, se již obsah karotenoidů snižoval. Na konci pokusu jejich obsah činil $3,98 \text{ nmol.cm}^{-2}$. Shodný trend byl zaznamenán u odrůdy Dolerosa. Obsah karotenoidů se průkazně zvýšil z hodnoty $1,39 \text{ nmol.cm}^{-2}$ (12. 6.) na hodnotu $3,31 \text{ nmol.cm}^{-2}$ (29. 6.). Dále se obsah karotenoidů zvyšoval do 20. 7. ($3,76 \text{ nmol.cm}^{-2}$). V termínu 10. 8. byl zaznamenán pokles o $0,10 \text{ nmol.cm}^{-2}$ na $3,66 \text{ nmol.cm}^{-2}$. Následně vykazovala stoupající trend do 8. 9. ($4,14 \text{ nmol.cm}^{-2}$). Obdobně jako u odrůdy Viola nastal v období 8. 9. až do 26. 9. pokles na $3,88 \text{ nmol.cm}^{-2}$ z původní hodnoty $4,14 \text{ nmol.cm}^{-2}$. Obdobně jako předchozí odrůdy, tak i odrůda Adela vykazovala podobný průběh vývoje obsahu karotenoidů. V termínu od 12. 6. ($1,08 \text{ nmol.cm}^{-2}$) do 29. 6. ($3,56 \text{ nmol.cm}^{-2}$) se obsah karotenoidů zvyšoval. V období 29. 6. až 20. 7. následoval průkazný pokles obsahu karotenoidů. Pokles činil $0,32 \text{ nmol.cm}^{-2}$. Uvedený pokles byl vystřídán nárůstem obsahu karotenoidů na hodnotu $3,88 \text{ nmol.cm}^{-2}$ (8. 9.). Následně se obsah také snížil na hodnotu $3,87 \text{ nmol.cm}^{-2}$ (26. 9.).



Graf 11: Změny obsahu karotenoidů (nmol.cm^{-2}) v závislosti na odrůdě a ontogenetickém vývoji

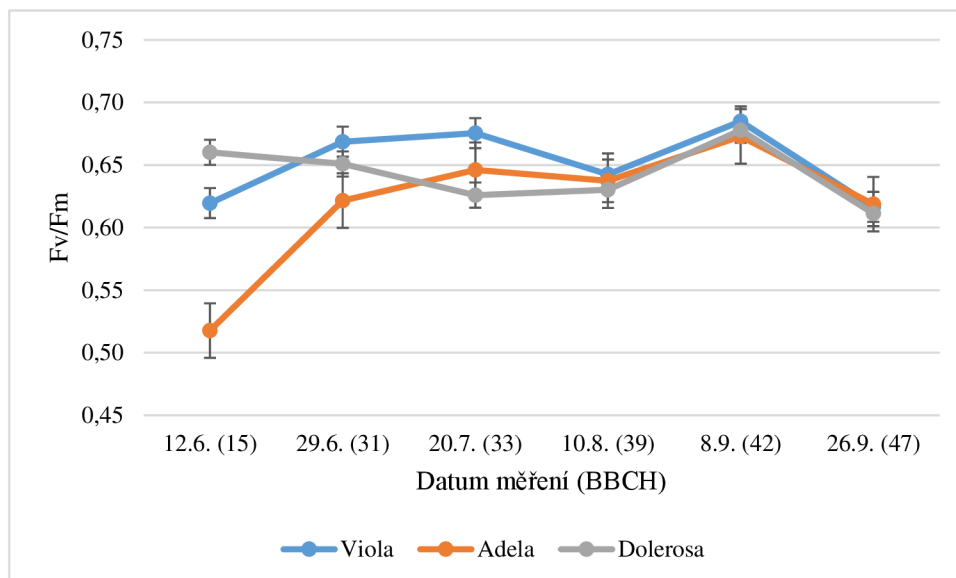
Z níže uvedeného grafu 12 vyplývá, že nejvyšší obsah karotenoidů vykazuje odrůda Dolerosa ($3,36 \text{ nmol.cm}^{-2}$). Nejnižší obsah karotenoidů byl zaznamenán u odrůdy Adela ($3,20 \text{ nmol.cm}^{-2}$). Bylo potvrzeno, že mezi jednotlivými genotypy v obsahu karotenoidů existují rozdíly.



Graf 12: Celkový obsah karotenoidů (nmol.cm⁻²) u sledovaných genotypů řepy

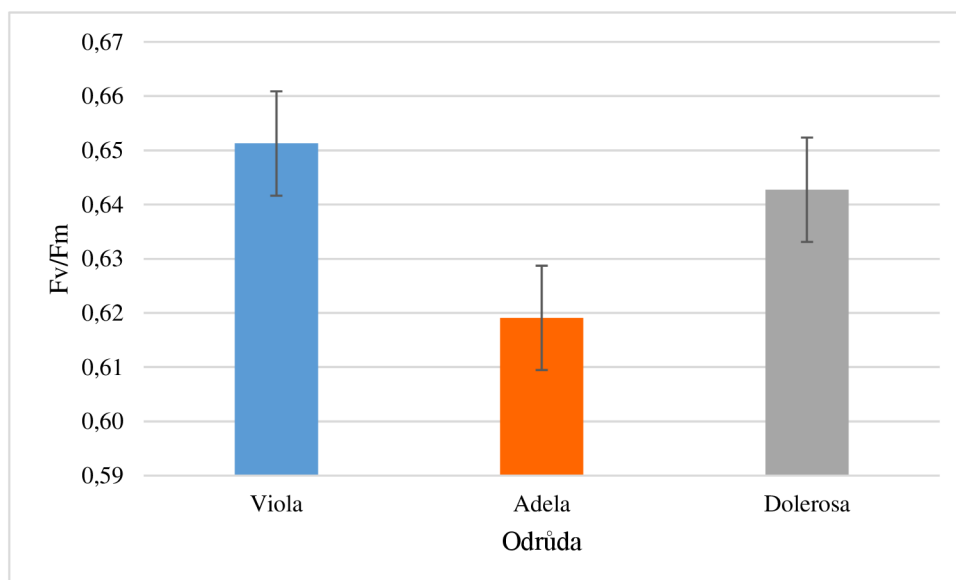
5.5 Fluorescence chlorofylů

Maximální kvantový výtěžek fluorescence znázorňuje graf 13. Hodnoty této charakteristiky se u odrůdy Viola pohybovaly v rozmezí 0,62 (26. 9.) až 0,69 (8. 9.). Fluorescence chlorofylů se zvyšovala do 20. 7. (0,68) a následně vykazovala pokles na 0,64 (10. 8.). V období od 10. 8. do 8. 9. byl zaznamenán průkazný nárůst fluorescence o 0,05 na hodnotu 0,69. Na konci sledovaného období byla hodnota fluorescence 0,62. Odrůda Adela vykazovala podobný trend jako odrůda Viola. Hodnota maximálního kvantového výtěžku fluorescence této odrůdy se pohybovala v rozsahu 0,52 (12. 6.) až 0,67 (8. 9.). Nejvyšší fluorescence u této odrůdy byla naměřena 8. 9., kdy její hodnota činila 0,67. V případě odrůdy Dolerosa se hodnoty fluorescence chlorofylu pohybovaly v rozmezí hodnot 0,61 (26. 9.) až 0,68 (8. 9.). Od počátku sledovaného období do 20. 7. se hodnoty fluorescence snižovaly na hodnotu 0,63. V poslední den měření byl zaznamenán pokles fluorescence o 0,07 na hodnotu 0,61. Nižší počáteční hodnoty a poklesy mezi daty 8. 9. a 26. 9. u každé odrůdy jsou nejpravděpodobněji způsobeny případným vodním deficitem a vyšší průměrnou teplotou vzduchu.



Graf 13: Změny maximálního kvantového výtěžku fluorescence v závislosti na odrůdě a ontogenetickém vývoji

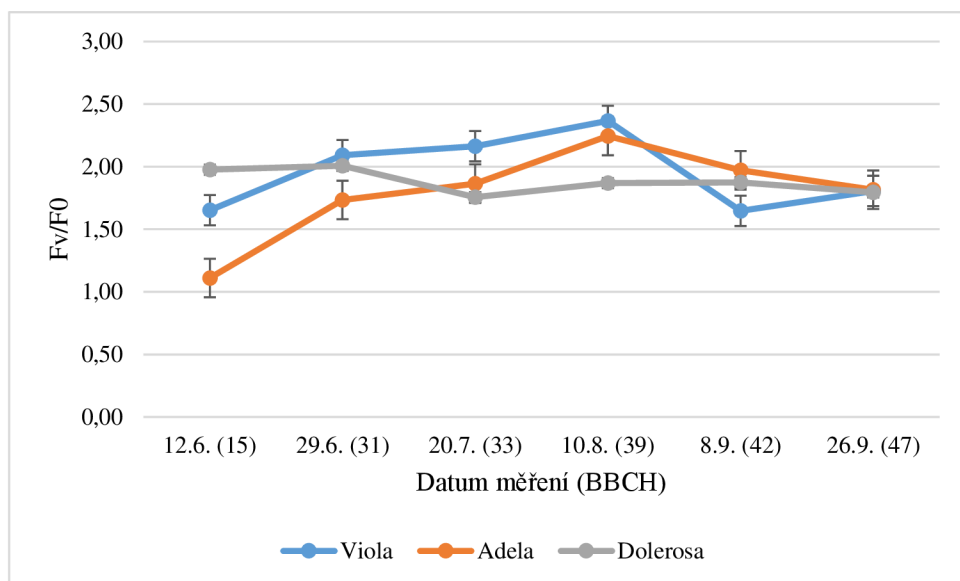
Průměrné hodnoty fluorescence demonstruje graf 14. Z něj je patrné, že nejvyšší průměrné hodnoty dosáhla odrůda Viola s hodnotou 0,65. Nejnižší fluorescence byla zjištěna u odrůdy Adela. Její hodnota této charakteristiky byla o 0,03 nižší a dosáhla hodnoty 0,62. Z grafu 14 je patrné, že existuje významný rozdíl v průměrném maximálním kvantovém výtěžku fluorescence, a to zejména mezi odrůdami Viola a Adela. Z hlediska této charakteristiky je odrůda Viola nejodolnější vůči vodnímu deficitu a naopak odrůda Adela nejméně.



Graf 14: Průměrné hodnoty maximálního kvantového výtěžku fluorescence u sledovaných genotypů řepy

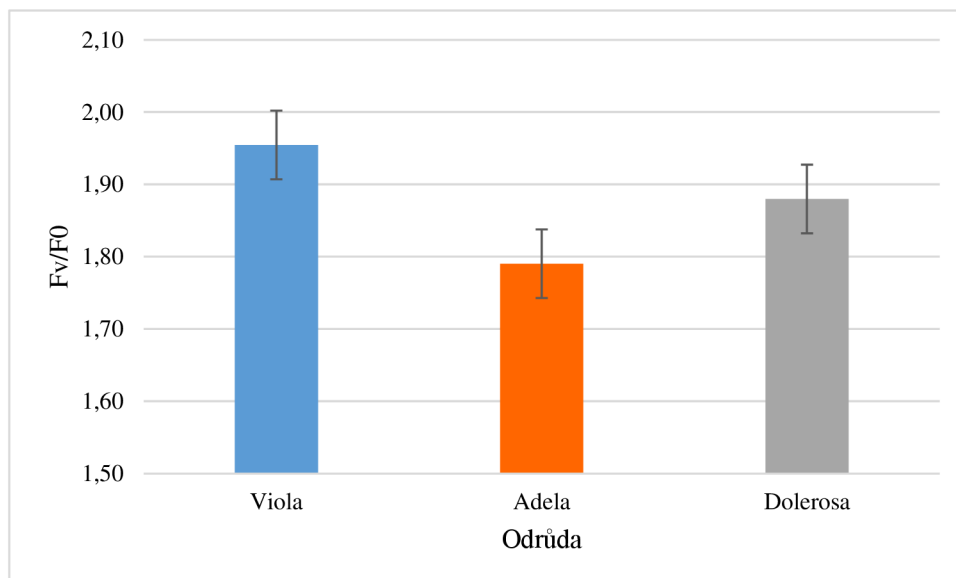
Graf 15 představuje změny potenciální účinnosti fluorescence odrůd cukrové řepy v rámci vegetace. Hodnota této měřené charakteristiky se u odrůdy Viola pohybovala v rozmezí hodnot 1,65 (8. 9.) až 2,37 (10. 8.). U odrůdy Viola se uvedená hodnota v závislosti na ontogenetickém vývoji zvyšovala. V rámci termínů 12. 6. až 29. 6. byl zaznamenán průkazný nárůst potenciální účinnosti fluorescence, kdy se jeho hodnota zvýšila z 1,65 na 2,09. Další

zvýšení bylo zaznamenáno 10. 8. (2,37). Dále následováno snížení potencionální účinnosti fluorescence (1,65). Na konci sledovaného období se tato hodnota fluorescence zvýšila na 1,81. Také u odrůdy Adela se hodnota fluorescence zvýšila z 1,11 (12. 6.) na 2,25 (10. 8.). Mezi daty 12. 6. až 29. 6. byl zaznamenán průkazný nárůst potencionální účinnosti fotosyntézy o 0,62. Na konci sledovaného období vykazovala potencionální účinnost fluorescence pokles na 1,82. V případě odrůdy Dolerosa byla potencionální účinnost fluorescence v intervalu hodnot od 1,76 (20. 7.) do 2,01 (29. 6.). V termínu 12. 6. až 29. 6. byl zaznamenán neprůkazný nárůst této charakteristiky z hodnoty 1,98 na hodnotu 2,01. V rozmezí posledních dvou měření vykazuje tato odrůda stejný trend jako předchozí odrůda. Nastává u ní pokles o 0,08 na hodnotu 1,80.



Graf 15: Změny potencionální účinnosti fluorescence v závislosti na odrůdě a ontogenetickém vývoji

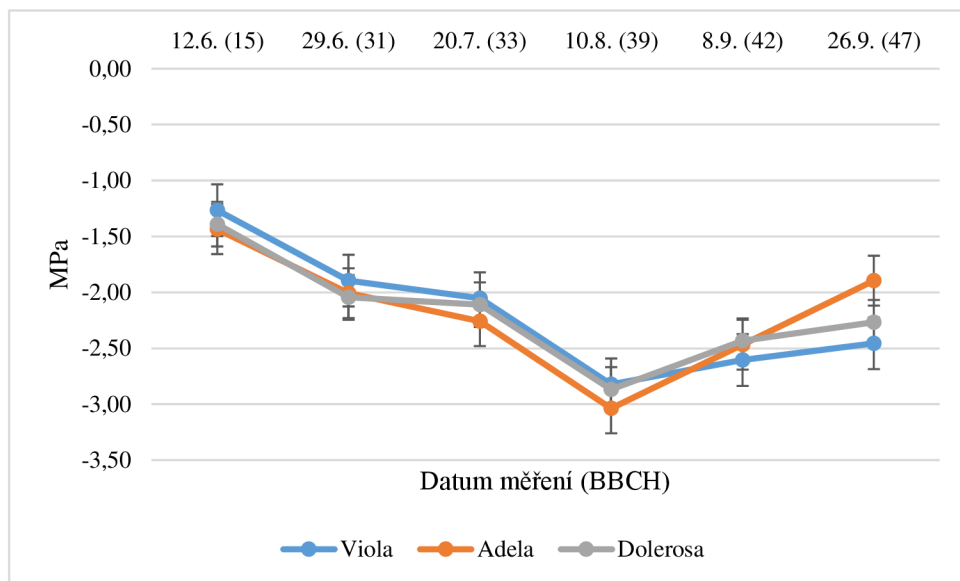
Průměrné hodnoty potencionální účinnosti fluorescence jednotlivých odrůd řepy cukrové znázorňuje graf 16. Nejvyšší hodnotu této charakteristiky vykazovala odrůda Viola (1,96). Nejnižší hodnoty byly naměřeny u odrůdy Adela, kdy dosáhla hodnoty 1,79. Z hlediska této charakteristiky je odrůda Viola nejodolnější vůči vodnímu deficitu a naopak odrůda Adela nejméně. Bylo potvrzeno, že mezi jednotlivými genotypy v potencionální účinnosti fluorescence existují rozdíly.



Graf 16: Průměrné hodnoty potencionální účinnosti fluorescence u sledovaných genotypů řepy

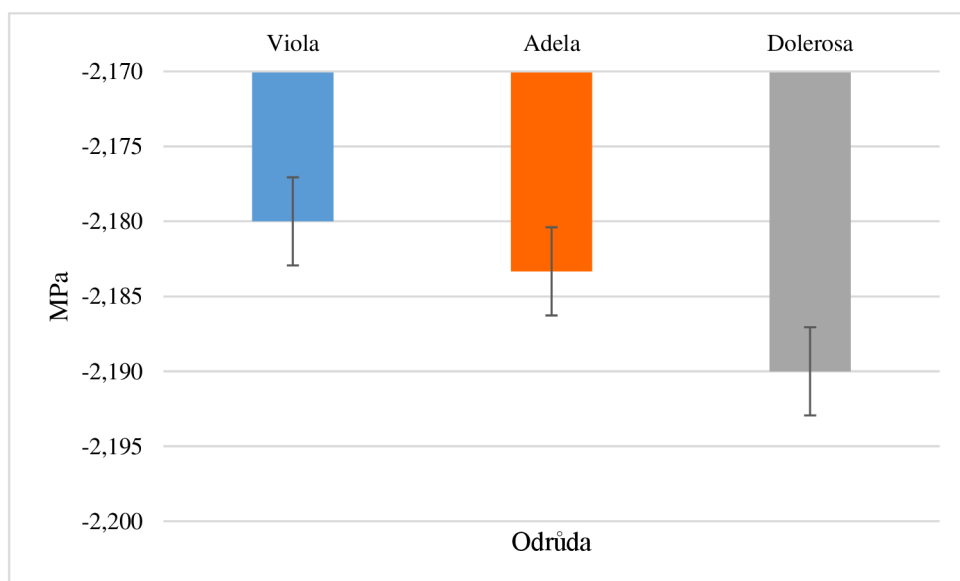
5.6 Osmotický potenciál

Průběh osmotického potenciálu jednotlivých odrůd během měření je uveden v grafu 17. Z něj je patrné, že uvedené genotypy vykazují shodný trend vývoje hodnot osmotického potenciálu v závislosti na ontogenetickém vývoji. Nejvyšší hodnoty vodního potenciálu byly naměřeny na počátku pokusu, kdy se naměřené hodnoty pohybovaly v intervalu hodnot od -1,26 MPa (odrůda Viola) do -1,43 MPa (odrůda Adela). Do 10. 8. se postupně průkazně hodnota vodního potenciálu snižovala v důsledku vodního deficitu a vyšší teplotou vzduchu. Nejnižší vodní potenciál v tomto termínu byl stanoven u odrůdy Adela (-3,04 MPa) a naopak nejvyšší u odrůdy Viola (-2,82 MPa). V následném období, do konce pokusu, se hodnota vodního potenciálu zvyšovala. Toto zvýšení bylo statisticky průkazné. Zvýšení vodního potenciálu nastalo v důsledku srážek v měsíci srpnu. Na srážky nejlépe reagovala odrůda Adela, u které byl zaznamenán nejvyšší nárůst vodního potenciálu, a to o 1,14 MPa na hodnotu -1,90 MPa. Naopak nejnižší zvýšení bylo zjištěno u odrůdy Viola, kdy se zvýšil vodní potenciál z -2,82 MPa na -2,46 MPa.



Graf 17: Změny osmotického potenciálu (MPa) v závislosti na odrůdě a ontogenetickém vývoji

Graf 18 demonstruje průměrnou hodnotu osmotického potenciálu jednotlivých odrůd řepy. Nejnižší průměrnou hodnotu vodního potenciálu měla odrůda Dolerosa (-2,19 MPa) a naopak nejvyšší odrůda Viola (-2,18 MPa). Z hlediska této charakteristiky je odrůda Dolerosa nejodolnější vůči vodnímu deficitu a naopak odrůda Viola nejméně. Bylo potvrzeno, že mezi jednotlivými genotypy v osmotickém potenciálu existují rozdíly.



Graf 18: Průměrné hodnoty osmotického potenciálu (MPa) u sledovaných genotypů řepy

6 Diskuze

6.1 Rychlost fotosyntézy

V bakalářské práci byla měřena rychlost fotosyntézy cukrové řepy na případný vodní deficit. Tento stresor dle Farooq et al. (2012) nastává v případě, je-li u rostliny pozorován vyšší výdej vody než její příjem. Pokud mu je následně rostlina vystavena, dochází dle autorů k poklesu fotosyntézy. Uvedené potvrzuje také Li et al. (2019), kteří konstatují, že pokud je cukrová řepa vystavena vodnímu deficitu, nastává u ní pokles rychlosti fotosyntézy. Obdobné výsledky s fazolem uvádí Mathobo et al. (2017) a u rajčete Ors et al. (2021). Hnilička et al. (2023) pozorovali snížení rychlosti fotosyntézy u pšenice seté vystavené vodnímu deficitu. Z výsledků vyplývá, že se rychlost fotosyntézy u jednotlivých odrůd řepy snižovala vlivem vodního deficitu. Uvedený závěr je také dán poklesem vodního potenciálu rostlin, který se projevil snížením turgoru a uzavřením průduchů.

Vlivem srážek se rychlost fotosyntézy sledovaných odrůd řepy zvyšovala v důsledku postupné rehydratace pletiv. Uvedený trend ve své práci potvrzují např. Hao et al. (2019), kteří pozorovali zvýšení rychlosti fotosyntézy při rehydrataci rostlin rajčat trpících vodním deficitem. Stejný výsledek pozoroval také výzkum Vomáčka a Pospíšilová (2003), Hnilička et al. (2023) u pšenice seté a Singh et al. (1973) u ječmene setého po opětovném zavlažení.

Byly zjištěny průkazné rozdíly mezi sledovanými genotypy řepy, kdy odrůda Doleresa ($11,64 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) vykazovala nejnižší průměrnou hodnotu fotosyntézy, a naopak odrůda Viola ($12,02 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) nejvyšší po působení přísušku. Genotypové rozdíly v rychlosti fotosyntézy ve své práci uvádí Ullah et al. (2021). Ti konstatují, že na vodní deficit reagují genotypy pšenice rozdílně. Např. odrůdy pšenice seté SQU-83 a SQU-81 jsou citlivé a odrůdy SQU-87 a SQU-79 tolerantní. Stejnou genotypovou rozdílnost sledovala studie Hnilička et al. (2023) u pšenice seté, kdy nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u genotypu 29-17 a nejnižší u genotypu Bohemia. Genotypové rozdíly v rychlosti fotosyntézy u pšenice seté pozorovali také Ober et al. (2005). V případě testovaných odrůd řepy je možné konstatovat, že odrůda Viola se jeví jako tolerantní a odrůda Doleresa citlivá.

V průběhu ontogeneze byl zaznamenán nárůst fotosyntézy. Stejný výsledek vyplývá také ze studie Leufen et al. (2016), kdy u kontrolních variant byl patrný nárůst rychlosti fotosyntézy do BBCH 46 u nestresovaných rostlin cukrové řepy. Následně měla klesající trend. Vzrůstající charakter je také patrný z výzkumu Winzeler et al. (1976) u ječmene setého pěstovaného při $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Po 78 dnech nastává u této varianty pokles. Nárůst rychlosti fotosyntézy u ječmene setého do BBCH 45 a následný pokles dokládá také výzkum Janušauskaitė a Auškalnienė (2014). Stejný trend vývoje je patrný také z výzkumu pšenice seté Jiang et al. (2003), kdy rychlost fotosyntézy vykazuje stoupající charakter až do antéze, kdy je zaznamenán první pokles. Následně má rychlost fotosyntézy klesající trend. V případě pokusných rostlin řepy se rychlost fotosyntézy zvyšovala do BBCH 47.

6.2 Rychlost transpirace

Nilsen a Orcutt (1996) konstatují, že při vystavení rostliny vodnímu deficitu u ní dochází k omezení výdeje vody a tím ke snížení rychlosti transpirace. Zamezení těchto ztrát je zajištěno

díky uzavírání průduchů. Z výsledků bakalářské práce vyplývá, že se rychlost transpirace u jednotlivých odrůd řepy snižovala vlivem vodního deficitu. Uvedený závěr je způsoben uzavřením průduchů z důvodu poklesu osmotického potenciálu a tím i také turgoru rostlin. Tyto výsledky jsou tedy v souladu s tvrzením Nilsen a Orcutt (1996). Tento trend také dokazuje výzkum Leufen et al. (2016), kteří zaznamenali výrazné snížení transpirace a fotosyntézy u cukrové řepy stresované suchem. Shodné výsledky také zaznamenali Tatar et al. (2016), kteří sledovali, že při poklesu množství vody v půdě nastává u pšenice pokles rychlosti transpirace. Pokles byl patrný, když množství vody v půdě kleslo pod 50 % oproti normálu. Stejný trend potvrzuje i studie da Silva Martins et al. (2022). Ti sledovali pokles transpirace u sóji vystavené vodnímu deficitu. Se zvyšující se závažností stresu suchem klesala rychlost transpirace u cukrové řepy také v pokusu Bloch et al. (2006). Stejnou reakci pozorovali také Hnilička et al. (2008) na kukuřici seté.

Následný vyšší úhrn srážek v srpnu vedl k nárůstu rychlosti transpirace u jednotlivých sledovaných odrůd z důvodu rehydratace. Stejný trend zaznamenal také výzkum Leufen et al. (2016) a Vomáčka a Pospíšilová (2003) po opětovné rehydrataci cukrové řepy. Vassileva et al. (2011) pozorovali zvýšení rychlosti transpirace u třech genotypů pšenice stresovaných suchem po opětovném zavlažení. Stejnou skutečnost sleduje také výzkum Giorio et al. (2018), kteří sledovali pokles rychlosti výměny plynů na rajčatech, u nichž byl navozen vodní deficit. Po opětovné rehydrataci došlo opět k zotavení a nárůstu sledovaných hodnot.

V rámci rychlosti transpirace byly pozorovány genotypové rozdíly, kdy nejvyšší průměrné rychlosti transpirace dosáhla odrůda Doleresa ($2,97 \text{ mmol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) a nejnižší průměrná hodnota byla pozorována u odrůdy Adela ($2,31 \text{ mmol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). Různé rychlosti fotosyntézy a transpirace u jednotlivých odrůd byly pozorovány také v pokusu Ober et al. (2005), kdy bylo zkoumáno 46 genotypů. Z výsledků této studie je navíc patrné, že existuje korelace mezi nízkými výnosy a nízkou rychlostí transpirace. Dle jejich výzkumu jsou nejvíce k suchu tolerantní genotypy NV12 a Roberta. Naopak nejméně tolerantní jsou Beta4689 a C27. Stejně genotypové rozdíly v rychlosti transpirace dokazuje také studie Sun et al. (2013) na merlíku čilského mezi odrůdami Titicaca a Achachino, kdy se tato odrůda jevila jako odolnější k suchu. I u testovaných odrůd řepy lze pozorovat, že odrůda Doleresa vykazuje známky tolerance, zatímco odrůda Adela se jeví jako citlivá.

Rychlost transpirace měla v průběhu ontogeneze vzrůstající trend. Rostoucí trend v průběhu vývoje cukrové řepy dokazuje výzkum Bodner a Alsalem (2023) u nestresované varianty. Po vystavení stresu se snižovala. Vlivem ontogeneze narůstala rychlost transpirace také ve studii Novák a Vidovič (2003) na kukuřici seté. Po datu 25. 7., je následně patrný prudký pokles, který souvisí s dozráváním rostliny. Stejný vzrůstající trend jako u předešlé studie sledoval výzkum Zhang et al. (1998) na pšenici seté, kdy po 160 dnech po zasetí byl pozorován také pokles. Výzkum Hejnák a Křížková (2004) sleduje také shodný vývoj rychlosti transpirace u jarního ječmene jako předchozí studie.

6.3 Efektivita využití vody

Reddy et al. (2004) konstatují, že se zvyšující se silou sucha rovnoměrně klesá obsah vody uvnitř rostliny a dle Medrano et al. (2015) se zhoršuje efektivita využití vody (WUE). Oproti tomu Gao et al. (2005) konstatují, že s rostoucím vodním deficitem se zvyšuje také

efektivita využití vody. Ta vyjadřuje podíl mezi fotosyntézou a transpirací neboli množství vody, které je využito na tvorbu sušiny (Larcher 2003). Dle Zámečnickové (2000) rostliny, jež mají vyšší efektivitu využití vody, jsou odolnější vůči suchu. Dle Ebmeyer a Hoffmann (2022) cukrová řepa, která má vyšší efektivitu využití vody, může poskytovat vyšší výnosy. Na základě výsledků bakalářské práce měla nejvyšší efektivitu využití vody odrůda Adela ($5,73 \cdot 10^{-3}$). Nejnižší hodnota $3,99 \cdot 10^{-3}$ byla naměřena u odrůdy Doleresa. Z výsledků dále vyplývá, že odrůda Adela byla také nejspíše nejvíce stresována vodním deficitem. To je v souladu s výzkumem Mahmoud et al. (2018) na cukrové řepě. Autoři pozorovali nejvyšší hodnoty WUE u nejvíce stresovaných rostlin. Tento závěr také dokládá výzkum Bloch et al. (2006), kdy cukrová řepa stresovaná suchem měla o 24 % procent vyšší WUE oproti zavlažované kontrole. Stejněho výsledky docílili i Liu et al. (2016) na pšenici seté, která stejně jako u předchozích vykazovala vyšší WUE při vodním deficitu. Navíc při takto vyšší WUE se zvýšil i výnos pšenice. Tyto výsledky jsou v souladu s tvrzením Gao et al. (2005). Ebmeyer a Hoffmann (2022) dále uvádí, že rozdíly v potencionálním výnosu jednotlivých genotypů jsou odvozeny od rozdílnosti genotypů ve WUE. V případě testovaných odrůd řepy lze pozorovat, že odrůda Adela vykazuje známky tolerance, zatímco odrůda Doleresa má trend opačný.

6.4 Obsah fotosynteticky aktivních pigmentů

Obsah celkového chlorofylu vykazoval u všech odrůd podobný vývoj. Z výsledků přesto vyplývá patrný pokles obsahu chlorofylů u jednotlivých odrůd řepy vlivem vodního deficitu. Pokles obsahu chlorofylu v listech má za následek sníženou absorpci fotonů a rychlost fotosyntézy. Snížení obsahu chlorofylu cukrové řepy zaznamenali Ghaffari et al. (2019). Obdobný závěr uvádí také AlKahtani et al. (2021), kteří sledovali pokles koncentrace chlorofylu *a* u stresované varianty o 22,2 % a chlorofylu *b* o 41,7 %. Stejnou reakci na vodní deficit vykazuje i pšenice, což dokládají ve svých pracích Hussein et al. (2022) a Balouchi (2010). Obdobně byly potvrzeny tyto výsledky u rajčat (Sivakumar et al. 2017) a slunečnice (Kiani et al. 2008).

Následně vlivem vyššího úhrnu srážek v srpnu se obsah celkového chlorofylu u všech odrůd zvýšil. Obdobně na rehydrataci reagovaly rostliny merlíku čilského (Manaa et al. 2021), pšenice (Li et al. 2023), šruchy zelné (Jin et al. 2015) a *Artemisia halodendron* (Chen et al. 2019).

Byly zjištěny průkazné rozdíly mezi sledovanými genotypy řepy, kdy odrůda Doleresa ($19,46 \text{ nmol.cm}^{-2}$) vykazovala nejvyšší obsah celkového chlorofylu a naopak odrůda Viola ($18,21 \text{ nmol.cm}^{-2}$) nejnižší. Alaeimoghadam et al. (2019) zaznamenali také genotypové rozdíly v obsahu celkového chlorofylu u cukrové řepy. Tyto odrůdové rozdíly jsou také patrné ze studie Khayatnezhad et al. (2011) na kukuřici seté, kdy tolerantnější odrůda (BC678, BC404) vykazovala vyšší obsah chlorofylu. Z toho vyplývá zjištění, že odrůda Doleresa vykazuje známky tolerance, zatímco odrůda Viola je naopak citlivá.

Během ontogeneze dochází ke zvyšování obsahu chlorofylu, jak také konstatuje studie Beyaz et al. (2013). Uvedení autoři uvádí, že nárůst obsahu chlorofylu u cukrové řepy byl zjištěn mezi 6. a 10. týdnem pokusu. Obdobně reagují odrůdy pšenice do fáze 69 BBCH (konec kvetení), jak ve své práci konstatuje Karele (2001). V případě kukuřice seté byl zaznamenán nárůst obsahu chlorofylů do 12. týdne (Dalil et al. 2010). Nárůst obsahu chlorofylu v průběhu

ontogeneze také potvrzuje výzkum Droppa et al. (1984) u cukrové řepy a Vagusevičienė et al. (2021) u pšenice seté.

Obsah karotenoidů měl obdobný trend jako obsah celkového chlorofylu, tedy spíše narůstající tendenci. S výskytem sucha byl zjištěn pokles obsahu karotenoidů. Snížení obsahu karotenoidů v závislosti na vodní deficit dokládá Islam et al. (2020) na cukrové řepě. Pokles obsahu těchto pigmentů byl pozorován také v pokusu Iqbal et al. (2018) na merlíku čilském a u laskavce (Kabashnikova et al. 2021). Oproti tomu Chakraborty a Pradhan (2012) konstatují, že se obsah karotenoidů zvyšuje, pokud je rostlina vystavena stresu ze sucha, protože tyto pigmenty plní antioxidační a ochrannou funkci před nadbytečnou excitační energií. Zvýšení obsahu karotenoidů souvisí s intenzitou vodního deficitu. Ze studie Ghaffari et al. (2019) vyplývá, že při vystavení cukrové řepy mírnému vodnímu deficitu dochází k nárůstu obsahu karotenoidů, zatímco pokud je vystavena silnému suchu, nastává pokles těchto pigmentů.

Vlivem vyššího množství srážek v srpnu se obsah karotenoidů v důsledku rehydratace zvyšoval. Obdobný závěr uvádí také u světlice barviřské Bortolheiro a Silva (2017). Obdobně reagovala také pšenice (Popova et al. 2023) a *Artemisia selengensis* (Huang et al. 2022).

Byly zjištěny průkazné rozdíly mezi sledovanými genotypy řepy, kdy odrůda Doleresa ($3,36 \text{ nmol.cm}^{-2}$) vykazovala nejvyšší průměrný obsah karotenoidů a naopak odrůda Adela ($3,12 \text{ nmol.cm}^{-2}$) nejnižší. Dle práce Chandrasekar et al. (2000) na pšenici je obsah těchto pigmentů závislý na genotypu a rostliny tolerantnější k vodnímu deficitu dosahují vyšších hodnot obsahu karotenoidů. Islam et al. (2020) zkoumali také genotypové rozdíly v obsahu chlorofylu a karotenoidů, kdy odrůda cukrové řepy BSRI 1 vykazovala nejvyšší toleranci k suchu, protože měla nejvyšší obsah těchto pigmentů. Také v případě testovaných odrůd řepy je možné konstatovat, že odrůda Doleresa se jeví jako tolerantní a odrůda Adela citlivá.

V průběhu ontogeneze docházelo ke zvyšování obsahu karotenoidů. Nárůst této charakteristiky sledovala studie Tranavičienė et al. (2007) na pšenici seté. Stejný výsledek dokládá i výzkum Bashan et al. (2006), kteří sledovali nárůst obsahu karotenoidů u klíčících rostlin pšenice seté po inokulaci bakterií *Azospirillum brasilense*. Stejný trend u cukrovky je patrný z výzkumu Droppa et al. (1984). V této studii docházelo u kontrolní varianty k nárůstu obsahu karotenoidů. Zvýšení obsahu těchto pigmentů v průběhu vývoje dokládá také výzkum Simova-Stoilova et al. (2001) na ječmenu setém a Vagusevičienė et al. (2021) na pšenici seté.

6.5 Fluorescence chlorofylů

Murchie a Lawson (2013) konstatují, že fluorescence chlorofylů je přebytečná energie, kterou rostlina nevyužije pro fotosyntézu, a je vyzářena (rozptýlena) v podobě světelné energie (fluorescence). Dále dle autorů, pokud je rostlina vystavena stresoru, poklesne u ní účinnost fotosyntézy, což se následně projeví na nárůstu fluorescence. Toto záření se podle Roháčka (2005) nachází v červeném pásmu světelného spektra, nejvíce je emitováno chlorofylem *a* z PS II. Chaerle et al. (2007) konstatují, že pomocí měření fluorescence chlorofylu jsme schopni zjistit, zda je rostlina vystavena stresu ještě dříve, než dojde k poškození buněčných struktur. F_v/F_m ukazuje maximální kvantový výtěžek fluorescence, který se s působícím stresem na rostlinu snižuje (Maxwell & Johnson 2000). Doplnujícím měřením je poměr F_v/F_0 , který je citlivější ke zjištění působícího stresu (Roháček 2002). Z výsledků je zřejmé, že nedostatek vody vedl ke snížení maximálního kvantového výtěžku fluorescence (F_v/F_m) chlorofylů a

potencionální účinnosti fluorescence u sledovaných odrůd řepy. Snížení Fv/Fm u cukrové řepy v případě vodního deficitu uvádí Li et al. (2013) a NadeAli et al. (2011). Larouk et al. (2021) pozorovali pokles maximálního kvantového výtěžku fluorescence u pšenice tvrdé pěstované v suchu a dále zjistili, že tato fyziologická charakteristika koreluje s parametrem výnosu zrna. Stejný trend byl zjištěn u kukuřice (Betrán et al. 2003).

Vzhledem k srážkově bohatému měsíci srpnu byla u rostlin řepy zaznamenána rehydratace, která zvýšila maximální kvantový výtěžek fluorescence a potencionální účinnost fluorescence. Tento jev potvrzuje studie Wang et al. (2022) na pšenici, u vojtěšky (Li et al. 2007), u *Lycium ruthenicum* Murr. (Guo et al. 2016) a u hořčice habešské (Husen et al. 2014). Nejvyšší průměrná hodnota Fv/Fm byla zjištěna u odrůdy Viola s hodnotou 0,65 a nejnižší byla sledována u odrůdy Adela (0,62). V rámci Fv/F0 byly výsledky srovnatelné: Viola (1,96) a Adela (1,79). Z těchto výsledků je patrné, že existuje vliv genotypu na fluorescenci cukrové řepy, což je v souladu s pracemi Abbas et al. (2014) a Ghasemi et al. (2022). Uvedení autoři dále konstatují, že existují genotypové rozdíly v reakci odrůd řepy na vodní deficit. Z pokusů bakalářské práce vyplývá, že jako tolerantní se k vodnímu deficitu jeví odrůda Viola a odrůda Adela je naopak citlivou. Rozdílnost fluorescence mezi genotypy merlíku čilského uvádí také García-Parra et al. (2022). Lichtenthaler et al. (2007), konstatují, že optimální rozmezí pro Fv/Fm ve zdravé rostlině by se mělo pohybovat od 0,75 až 0,84 Fv/Fm. Na základě tohoto tvrzení se studované rostliny během celého pokusu potýkaly s vodním deficitem, jelikož průměrné hodnoty se nacházely pod tímto rozmezím.

Maximální kvantový výtěžek fluorescence řepy se na počátku vývoje zvyšoval, jak dokládá také studie Tan et al. (2018) na pšenici seté. Následně v průběhu ontogenetického vývoje vykazuje tento parametr kolísavý trend. Uvedený závěr potvrzuje u rostlin pšenice v závislosti na hnojení dusíkem Janusauskaite et al. (2022).

6.6 Osmotický potenciál

Vodní deficit významně ovlivňuje vodní režim rostlin, protože u nich následně dochází dle Kirkham (2005) k poklesu tlakového a osmotického potenciálu, který podle Shabala a Lew (2002) udává potřebnou energii pro pohyb vody uvnitř rostlin. Nilsen a Orcutt (1996) konstatují, že se stoupajícím vodním deficitem se zvyšuje síla, kterou rostliny do svého těla čerpají vodu. Liang et al. (2002) konstatují, že většina kulturních rostlin má schopnost snížit svůj osmotický potenciál na hodnotu -1 až -2 MPa a pokud rostlina už není schopna tento potenciál snížit, tak dle Larcher (2003) u ní nastává trvalý bod vadnutí. Na základě výsledků této práce je zřejmé, že rostlina snižovala svůj osmotický potenciál z důvodu vodního deficitu, který způsobil pokles turgoru uvnitř rostliny, a to až do 10. 8. To souhlasí s výzkumem Chołuj et al. (2008), kteří pozorovali snížení osmotického potenciálu u cukrové řepy, u pšenice (Siddique et al. 2000). Obdobný trend poklesu hodnot osmotického potenciálu vykazují rostliny pěstované v podmínkách zasolení, jak dokládá výzkum Dasgan et al. (2018) na rajčatech. Změny v hodnotách osmotického potenciálu v listech souvisí také se změnami v příjmu a utilizaci živin, jak dokládá práce Razzaghi et al. (2011).

Nadprůměrné množství srážek v srpnu se pozitivně projevilo u sledovaných odrůd řepy zvýšením vodního potenciálu listů v důsledku rehydratace pletiv. Tento závěr potvrzují práce Wedeking et al. (2016) u řepy, u čiroku (Yadav et al. 2005) a u rajčat (Calcagno et al. 2011).

Nejnižší naměřené hodnoty vodního potenciálu byly zjištěny u odrůdy Viola (-2,18 MPa) a nejvyšší u odrůdy Dolerosa (-2,19 MPa). Na základě těchto výsledků nejsou patrné průkazné rozdíly v osmotickém potenciálu mezi jednotlivými genotypy. Oproti tomu Leufen et al. (2016) konstatují, že existují mezigenotypové rozdíly u řepy. Obdobně byly rozdíly nalezeny mezi odrůdami rajčat (Dasgan et al. 2018).

Z výsledků této práce je patrné, že během ontogenetického vývoje se osmotický potenciál snižoval. Tento závěr je v souladu s tvrzením Jensen et al. (2000) u merlíku čilského, u ječmene (Mogensen 1980). Shodný trend byl nalezen u laskavce (Liu a Stützel 2002). Naměřené hodnoty vodního potenciálu řepy jsou v souladu s hodnotami, které uvádějí pro pšenici tvrdou (Tambussi et al. 2005), pro řepu (Chołuj et al. 2008) a pro pšenici setou (Erickson et al. 1979; Barlow et al. 1980).

7 Závěr

V bakalářské práci byl sledován vliv možného vodního deficitu na tři genotypy cukrové řepy (*Beta vulgaris* ssp. *vulgaris*): Viola, Adela a Dolerosa. U rostlin byly sledovány tyto charakteristiky: rychlost výměny plynů, obsah fotosynteticky aktivních pigmentů, fluorescence, osmotický potenciál a efektivita využití vody. Ze získaných výsledků vyplývají následující závěry:

1. Byl potvrzen cíl práce, že existují rozdíly v rychlosti výměny plynů, obsahu fotosynteticky aktivních pigmentů, jejich fluorescence a efektivitě využití vody mezi jednotlivými genotypy a vývojovou fází.
 - Nejvyšší průměrná rychlost fotosyntézy byla naměřena u odrůdy Viola ($12,02 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). Naopak nejnižší fotosyntézu měla odrůda Dolerosa ($11,64 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$).
 - Nejvyšší rychlost transpirace byla pozorována u odrůdy Dolerosa ($2,97 \text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) a nejnižší u odrůdy Adela ($2,31 \text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$).
 - Celkový obsah chlorofylu a karotenoidů byl nejvyšší u odrůdy Dolerosa ($19,46 \text{nmol} \cdot \text{cm}^{-2}$ a $3,36 \text{nmol} \cdot \text{cm}^{-2}$). U odrůdy Viola byl zjištěn nejnižší obsah chlorofylů, a to ve výši $18,21 \text{nmol} \cdot \text{cm}^{-2}$. V případě karotenoidů byl jejich obsah nejnižší u odrůdy Adela. U této odrůdy byl obsah karotenoidů $3,20 \text{nmol} \cdot \text{cm}^{-2}$.
 - Nejvyšší hodnota maximálního kvantového výtěžku fluorescence a potenciační účinnost fluorescence byla pozorována u odrůdy Viola (0,65 a 1,96). Naopak u odrůdy Adela byly tyto parametry nejnižší (0,62 a 1,79).
 - Nejvyšší efektivitu využití vody měla odrůda Adela ($5,73 (10^{-3})$) a nejnižší odrůda Dolerosa ($3,99 (10^{-3})$).
 - U hodnot osmotického potenciálu nebyly pozorovány statisticky významné rozdíly.
2. Dílčím cílem práce bylo zjistit, jak jsou uvedené charakteristiky ovlivněny případným stresem.
 - V rámci působení vodního deficitu (nedostatek srážek) se snižovala rychlost výměny plynů u všech sledovaných odrůd.
 - Působení vodního deficitu se projevilo snížením obsahu fotosynteticky aktivních pigmentů.
 - Hodnota maximálního kvantového výtěžku fluorescence a potenciační účinnosti fluorescence se při výskytu vodního deficitu snižovala.
 - Osmotický potenciál jednotlivých genotypů cukrové řepy klesal s působícím vodním deficitem.
 - Vodní deficit zvyšoval efektivitu využití vody.
3. Druhým dílčím cílem bakalářské práce bylo zjistit, jak jsou uvedené charakteristiky ovlivněny vývojovou fází.
 - V rámci ontogenetického vývoje rostlin se zvyšovala rychlost výměny plynů. U rychlosti transpirace nebyl zaznamenán průběžný nárůst v rámci ontogeneze rostlin.

- Během ontogenetického vývoje rostlin se obsah fotosynteticky aktivních pigmentů zvyšoval.
 - Z počátku vývoje cukrové řepy docházelo ke zvyšování maximálního kvantového výtěžku fluorescence a potenciaální účinnosti fluorescence.
 - Během ontogenetického vývoje docházelo k poklesu osmotického potenciálu.
4. Byla potvrzena hypotéza, že existují rozdíly v reakci sledovaných genotypů řepy na vodní deficit.
- Jako tolerantní vůči vodnímu deficitu se jeví odrůda Viola.
 - Odrůda Adela reagovala citlivě na vodní deficit.
5. Byla potvrzena hypotéza, že existují rozdíly v rychlosti výměny plynů u sledovaných genotypů.
- Průměrná rychlost fotosyntézy u odrůdy Viola byla $12,02 \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. U odrůdy Adela činila $11,89 \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ a hodnota průměrné rychlosti fotosyntézy byla u odrůdy Dolerosa $11,64 \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.
 - Průměrná rychlost transpirace zjištěná u odrůdy Viola byla $2,59 \text{mmol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. U odrůdy Adela byla $2,31 \text{mmol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ a hodnota průměrné rychlosti transpirace dosáhla u odrůdy Dolerosa $2,97 \text{mmol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.
6. Hypotéza, zda existují rozdíly v obsahu pigmentů a jejich fluorescence u sledovaných genotypů byla také potvrzena.
- Obsah celkového chlorofylu byl u odrůdy Viola $18,21 \text{nmol}\cdot\text{cm}^{-2}$. Hodnota této charakteristiky byla u odrůdy Adela $18,51 \text{nmol}\cdot\text{cm}^{-2}$ a u Dolerosy $19,46 \text{nmol}\cdot\text{cm}^{-2}$.
 - Obsah karotenoidů činil u odrůdy Viola $3,30 \text{nmol}\cdot\text{cm}^{-2}$, u Adely dosáhl $3,20 \text{nmol}\cdot\text{cm}^{-2}$. Odrůda Dolerosa měla hodnotu obsahu karotenoidů $3,36 \text{nmol}\cdot\text{cm}^{-2}$.
 - Hodnota maximálního kvantového výtěžku fluorescence byla u odrůdy Viola $0,65$, u Adely $0,62$ a u Dolerosy $0,64$. Potenciaální účinnost fluorescence činila u Violy $1,96$, u Adely $1,79$ a u Dolerosy měla hodnotu $1,88$.
7. Byla potvrzena hypotéza, že lze uvedené metody využít ve screeningu reakce na stres.
- Na základě zjištěných výsledků lze konstatovat, že použité fyziologické charakteristiky lze použít pro screening případného vodního deficitu. Týká se to zejména fluorescence chlorofylů, rychlosti transpirace, osmotického potenciálu a efektivity využití vody.

8 Seznam použité literatury

- Abbas F, Al-Jbawi E, Ibrahim M. 2014. Growth and chlorophyll fluorescence under salinity stress in sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *International Journal of Environment* **3**:1-9.
- Abreu ME, Munne-Bosch S. 2008. Salicylic acid may be involved in the regulation of drought-induced leaf senescence in perennials: a case study in field-grown *Salvia officinalis* L. plants. *Environmental and Experimental Botany* **64**:105-112.
- ADC BioScientific. 2013. LCPro+. ADC BioScientific Ltd. Available from https://www.adc.co.uk/wp-content/uploads/2013/09/LCProSD_8_Page.pdf (accessed February 2024).
- Agarwal PK, Agarwal P, Reddy MK, Sopory SK. 2006. Role of DREB transcription factors in abiotic and biotic stress tolerance in plants. *Plant cell reports* **25**:1263-1274.
- Agrostis. 2021. Pohyby vody v rostlinném systému. Agrostis Trávníky s.r.o.. Available from <https://www.agrostis.cz/odborne-clanky/pohyb-vody-v-rostlinnem-systemu> (accessed January 2024).
- Ahuja I, de Vos RC, Bones AM, Hall RD. 2010. Plant molecular stress responses face climate change. *Trends in Plant Science* **15**:664–674.
- Alaemoghdam S, Esmaeeli M, Rajabi A, Najafi H. 2019. Effects of water deficit stress on physiological and biochemical traits of sugar beet genotypes (*Beta vulgaris* L.). *Journal of Sugar Beet* **34**:131-146.
- Ali S, Abbas Z, Seleiman MF, Rizwan M, Yavaş İ, Alhammad BA, Shami A, Hasanuzzaman M, Kalderis D. 2020. Glycine betaine accumulation, significance and interests for heavy metal tolerance in plants. *Plants* **9**:1-23.
- AlKahtani MD, Hafez YM, Attia K, Rashwan E, Husnain LA, AlGwaiz HI, Abdelaal KA. 2021. Evaluation of silicon and proline application on the oxidative machinery in drought-stressed sugar beet. *Antioxidants*, **10**:398.
- Amtmann A, Troufflard S, Armengaud P. 2008. The effect of potassium nutrition on pest and disease resistance in plants. *Physiologia Plantarum* **133**:682-691.
- Anjum SA, Xie XY, Wang LC, 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.
- Apel K, Hirt H. 2004. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. *Annu. Rev. Plant Biol.* **55**:373-399.

Ashraf M, Iram A. 2005. Drought stress induced changes in some organic substances in nodules and other plant parts of two potential legumes differing in salt tolerance. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants* **200**:535-546.

Badalíková B, Červinka J. 2008. Různé technologie zpracování půdy k cukrovce a jejich vliv na obsah půdního humusu a výnos plodiny. *Listy cukrovarnické a řepařské č.11* **124**:306-310.

Bae H, Kim S-H, Kim MS, Sicher RC, Lary D, Strem MD, Natarajan S, Bailey BA. 2008. The drought response of *Theobroma cacao* (cacao) and the regulation of genes involved in polyamine biosynthesis by drought and other stresses. *Plant physiology and biochemistry* **46**:174-188.

Baker NR. 2008. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. *Annual Review of Plant Biology* **59**:89-113.

Bale JS, Masters GJ, Hodkinson ID, Awmack C, Bezemer TM, Brown VK, Butterfield J, Buse A, Coulson JC, Farrar J et al. 2002. Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Global Change Biology* **8**:1-16.

Balouchi HR. 2010. Screening wheat parents of mapping population for heat and drought tolerance, detection of wheat genetic variation. *International Journal of Nuclear and Quantum Engineering* **4**:431-441.

Barlow EWK. 1988. *The growth and functioning of leaves*. Cambridge University Press, London.

Barlow EWR, Lee JW, Munns R, Smart MG. 1980. Water relations of the developing wheat grain. *Functional Plant Biology* **7**:519-525.

Bashan Y, Bustillos JJ, Leyva LA, Hernandez JP, Bacilio M. 2006. Increase in auxiliary photoprotective photosynthetic pigments in wheat seedlings induced by *Azospirillum brasilense*. *Biology and Fertility of Soils* **42**:279-285.

Benda V. 2000. *Biologie II: nauka o potravinářských surovinách*. Vysoká škola chemickotechnologická, Praha.

Besaliev IN, Panfilov AL, Karavaytsev YA, Reger NS, Kholodilina TN. 2021. Content of prolin and essential amino acids in spring wheat grain in dry conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* **848**:1-7.

Betrán FJ, Ribaut JM, Beck D, Gonzales de León D. 2003. Genetic diversity, specific combining ability, and heterosis in tropical maize under stress and nonstress environments. *Crop Science* **43**:797-806.

Beyaz R, Alizadeh B, Gürel S, Fatih Özcan S, Yildiz, M. 2013. Sugar beet (*Beta vulgaris* L.) growth at different ploidy levels. *Caryologia* **66**:90-95.

Bílý V. 2023. Cukrovarnická kampaň vrcholí, cukru bude dost. Ministerstvo zemědělství, Praha. Available from <https://eagri.cz/public/web/mze/zemedelstvi/novinky/cukrovarnicka-kampan-vrcholi-cukru-bude.html> (accessed August 2023).

Bittner V. 2012. Poruchy ve výživě cukrovky. Listy cukrovarnické a řepařské č.2 **128**:56-59.

Bittner V. 2013. Škodliví činitelé cukrové řepy – choroby cukrovky: Choroby kořenů cukrovky. Listy cukrovarnické a řepařské č.3 **129**:98-99.

Bittner V. 2013. Škodliví činitelé cukrové řepy – živočišní škůdci: Hád'átko řepné (*Heterodera schachtii* Schmidt). Listy cukrovarnické a řepařské č.7-8 **129**:234-235.

Bláha L, Bocková R, Hnilička F, Hniličková H, Holubec V, Möllerová J, Štolcová J, Zieglerová J. 2003. Rostlina a stres. Výzkumný ústav rostlinné výroby, Praha.

Bloch D, Hoffmann CM, Märlander B. 2006. Impact of water supply on photosynthesis, water use and carbon isotope discrimination of sugar beet genotypes. *European Journal of Agronomy* **24**:218-225.

Blum A. 2005. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential-are they compatible, dissonant, or mutually exclusive?. *Australian Journal of Agricultural Research* **56**:1159-1168.

Bodner G, Alsalem M. 2023. Sugar Beet Rooting Pattern Mediates Stomatal and Transpiration Responses to Progressive Water Stress. *Agronomy* **13**:1-17.

Bortolheiro FP, Silva MA. 2017. Physiological response and productivity of safflower lines under water deficit and rehydration. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* **89**:3051-3066.

Bowyer JR, Leegood RC. 1997. Photosynthesis. Pages 49-110 in Dey PM, Harborne JB, editors. *Plant Biochemistry*. Academic Press, London.

Boyer J S. 1982. Plant productivity and environment. *Science* **218**: 443-448.

Brant V, et al. 2016. Pásové zpracování půdy (strip tillage): klasické, intenzivní a modifikované. Profi Press, Praha.

Brant V. 2021. Základy zpracování půdy (1): Podmítka (I). *Agromanual.cz*. Available from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/technologie/zaklady-zpracovani-pudy-1-podmitka-i> (accessed August 2023).

- Brant V. 2021. Základy zpracování půdy (5): Orba (I). Agromanuak.cz. Available from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/mechanizace/zaklady-zpracovani-pudy-5-orba-i> (accessed August 2023).
- Brar NS, Dhillon BS, Saini KS, Sharma PK. 2015. Agronomy of sugarbeet cultivation - A review. *Agricultural Reviews* **36**:184-197.
- Bray EA. 1997. Plant responses to water deficit. *Trends in plant science* **2**:48-54.
- Bréda NJJ. 2003. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany* **54**:2403-2417.
- Broin M, Cuine S, Peltier G, Rey P. 2000. Involvement of CDSP 32, a drought-induced thioredoxin, in the response to oxidative stress in potato plants. *FEBS letters* **467**:245-248.
- Brom R. 2023. Odrůdy cukrové řepy registrované v roce 2023. *Listy Cukrovarnické a Řepářské* č.3 **139**:92-98.
- Brown KF, Biscoe PV. 1985. Fibrous root growth and water use of sugar beet. *Journal of Agricultural Science* **105**:679-691.
- Brunetti C, Loreto F, Ferrini F, Gori A, Guidi L, Remorini D, Centritto M, Fini A, Tattini, M. 2018. Metabolic plasticity in the hygrophyte *Moringa oleifera* exposed to water stress. *Tree physiology* **38**:1640-1654.
- Buckley TN. 2019. How do stomata respond to water status?. *New Phytologist*, **224**:21-36.
- Cakmak I, Strbac D, Marschner H. 1993. Activities of hydrogen peroxide-scavenging enzymes in germinating wheat seeds. *Journal of experimental botany* **44**:127-132.
- Calcagno AM, Rivas M, Castrillo M. 2011. Structural, Physiological and Metabolic Integrated Responses of Two Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Cultivars During Leaf Rehydration. *Australian Journal of Crop Science* **5**:695-701.
- Cechin I, Rossi SC, Oliveira VC, Fumis TF. 2006. Photosynthetic responses and proline content of mature and young leaves of sunflower plants under water deficit. *Photosynthetica* **44**:143-146.
- Cerkal R. 2011. Habilitační přednáška – Obecná a speciální produkce rostlinná. Available from <https://af.mendelu.cz/veda-a-vyzkum/habilitacni-a-profesorska-rizeni/?psn=1400> (accessed February 2024).
- Ciscar JC. 2012. The impacts of climate change in Europe (the PESETA research project). *Climate Change* **112**:1-6.

Correia MJ, Osorio ML, Osorio J, Barrote I, Martins M, David MM. 2006. Influence of transient shade periods on the effects of drought on photosynthesis, carbohydrate accumulation and lipid peroxidation in sunflower leaves. *Environmental and experimental botany* **58**:75-84.

Cui Y, Ning S, Jin J, Jiang S, Zhou Y, Wu C. 2021. Quantitative lasting effects of drought stress at a growth stage on soybean evapotranspiration and aboveground BIOMASS. *Water* **13**:1-19.

Česká meteorologická společnost. 2017. Elektronický meteorologický slovník (eMS) - Sucho. Available from <http://slovník.cmes.cz/fulltext/sucho> (accessed February 2024).

Český hydrometeorologický ústav. 2016. SUCHO. Český hydrometeorologický ústav. Available from https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ok/SUCHO/Definice_sucha.html (accessed September 2023).

Český hydrometeorologický ústav. 2024. Měsíční a roční data dle zákona 123/1998 Sb. Český hydrometeorologický ústav. Available from <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/mesicni-data/mesicni-data-dle-z.-123-1998-Sb#> (accessed March 2024).

da Silva Martins JT, Pohlmann V, Lago I, Zanon AJ, Tabaldi LA, Machado LC, Costa TC, Goergen PCH, Tagliapietra EL, Wertonge GS. 2022. Physiological and biochemical responses of soybean to drought as represented by the fraction of transpirable soil water. *Semina: Ciências Agrárias*, **43**:2449-2470.

Dalil B, Ghassemi-Golezani K, Moghaddam M, Raey Y. 2010. Effects of seed viability and water supply on leaf chlorophyll content and grain yield of maize (*Zea mays*). *J. Food Agric. Environ* **8**:399-402.

Dasgan HY, Bayram M, Kusvuran S, Coban GA, Akhoundnejad Y. 2018. Screening of tomatoes for their resistance to salinity and drought stress. *Screening* **8**:31-37.

Davies WJ, Zhang J. 1991. Root signals and the regulation of growth and the development of plants in drying soil. *Annual review of plant biology* **42**:55-76.

de Melo Gonçalves AC, de Melo Filho JS, Sousa VFDO, da Silva TI, Dias TJ, das Graças Souza A, de Moura JG. 2022. Chlorophyll index, maximum fluorescence, and water use efficiency in sugar beet under water deficit and ascorbic acid application. *Bioagro* **34**:319-326.

Desclaux D, Roumet P. 1996. Impact of drought stress on the phenology of two soybean (*Glycine max* L. Merr) cultivars. *Field Crops Research* **46**:61-70.

Douds Jr DD, Nagahashi G, Pfeffer PE, Kayser WM, Reider C. 2005. On-farm production and utilization of arbuscular mycorrhizal fungus inoculum. *Canadian Journal of Plant Science* **85**:15-21.

Droppa M, Terry N, Horvath G. 1984. Variation in photosynthetic pigments and plastoquinone contents in sugar beet chloroplasts with changes in leaf copper content. *Plant physiology* **74**:717-720.

Dudek F. 1993. Cukr jako bílé zlato. *Listy cukrovarnické a řepářské č.2* **109**:42-43.

Ebmeyer H, Hoffmann CM. 2022. Water use efficiency of sugar beet genotypes: A relationship between growth rates and water consumption. *Journal of Agronomy and Crop Science* **208**:28-39.

Ehlers W, Goss M. 2016. *Water dynamics in plant production*, 2nd Edition. CABI, Boston.

Erickson PI, Kirkham MB, Stone JF. 1979. Growth, water relations, and yield of wheat planted in four row directions. *Soil Science Society of America Journal* **43**:570-574.

Fahad S, Hussain S, Matloob A, Khan FA, Khaliq A, Saud S, Hassan S, Shan D, Khan F, Ullah N, Faiq M, Khan MR, Tareen AK, Khan A, Ullah A, Ullah N, Huang J. 2015. Phytohormones and plant responses to salinity stress: a review. *Plant growth regulation* **75**:391-404.

FAO. 2023. FAOSTAT: Crops and livestock products. FAO, Rome. Available from <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> (accessed August 2023).

Farooq M, Basra SMA, Wahid A, Ahmad N, Saleem BA. 2009a. Improving the drought tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) by exogenous application of salicylic acid. *J Agron Crop Science* **195**:237-246.

Farooq M, Basra SMA, Wahid A, Cheema ZA, Cheema MA, Khaliq A. 2008. Physiological role of exogenously applied glycinebetaine in improving drought tolerance of fine grain aromatic rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science* **194**:325-333.

Farooq M, Bramley H, Palta JA, Siddique KHM. 2011. Heat stress in wheat during reproductive and grain filling phases. *Critical Reviews in Plant Sciences* **30**:491-507.

Farooq M, Hussain M, Wahid A, Siddique KHM. 2012. Drought Stress in Plants: An Overview. Pages 1-33 in Ricardo Aroca editor. *Plant Responses to Drought Stress From Morphological to Molecular Features*. Springer, New York.

Farooq M, Wahid A, Cheema SA, Lee DJ, Aziz T. 2010b. Comparative time course action of the foliar applied glycinebetaine, salicylic acid, nitrous oxide, brassinosteroids and spermine in improving drought resistance of rice. *Journal of Agronomy Crop Science* **196**:336-345.

Farooq M, Wahid A, Ito O, Lee DJ, Siddique KHM. 2009b. Advances in drought resistance of rice. *Critical Reviews in Plant Sciences* **28**:199-217.

- Ferweez H, Bashandy T. 2021. Screening for drought tolerance and molecular variability among some sugar beet cultivars. *SVU-International Journal of Agricultural Sciences* **3**:20-29.
- Figueiredo MVB, Buritya AH, Martinez CR, Chanway CP. 2008. Alleviation of drought stress in the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) by co-inoculation with *Paenibacillus polymyxa* and *Rhizobium tropici*. *Applied soil ecology* **40**:182-188.
- Flexas J, Bota J, Loreto F, Comic G, Sharkey TD. 2004. Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C3 plants. *Plant biology* **6**:269-279.
- Flexas J, Medrano H. 2002. Energy dissipation in C3 plants under drought. *Functional Plant Biology* **29**:1209-1215.
- Foyer CH, Fletcher JM. 2001. Plant antioxidants: colour me healthy. *Biologist* **48**:115-120.
- Francis S. 2002. Sugar-beet powdery mildew (*Erysiphe betae*). *Molecular Plant Pathology* **3**:119-124.
- Gao X, Zou C, Wang L, Zhang F. 2005. Silicon improves water use efficiency in maize plants. *Journal of plant nutrition* **27**:1457-1470.
- García-Parra M, Roa-Acosta D, Colmenares-Cruz A, Stechauner-Rohringer R, Ramirez JA, Cuellar-Rodríguez LA, Soler-Fonseca D. 2022. Analysis of the Physiological and Yield Performance of Six Quinoa Cultivars in Colombia Under Controlled Conditions. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria* **23**.
- Geerts S, Raes D, Garcia M, Mendoza J, Huanca R. 2008. Crop water use indicators to quantify the flexible phenology of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) in response to drought stress. *Field Crops Research* **108**:150-156.
- Gerhards R, Bezhin K, Santel H. 2017. Sugar beet yield loss predicted by relative weed cover, weed biomass and weed density. *Plant Protection Science* **53**:118-125.
- Ghaffari H, Tadayon MR, Nadeem M, Cheema M, Razmjoo J. 2019. Proline-mediated changes in antioxidant enzymatic activities and the physiology of sugar beet under drought stress. *Acta physiologiae plantarum*, **41**:1-13.
- Ghannoum O. 2009. C4 photosynthesis and water stress. *Annals of botany* **103**:635-644.
- Ghasemi M, Toorchi M, Aharizad S, Khorshid A. 2022. Evaluation of physiological indices of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) genotypes under water deficit stress. *Iranian Journal of Field Crop Science* **53**:77-91.

Gill SS, Tuteja N. 2010. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant physiology and biochemistry* **48**:909-930.

Giorio P, Guida G, Mistretta C, Sellami MH, Oliva M, Punzo P, Iovieno C, Arena C, De Maio A, Grillo S, Albrizio, R. 2018. Physiological, biochemical and molecular responses to water stress and rehydration in Mediterranean adapted tomato landraces. *Plant Biology* **20**:995-1004.

Gong D-S, Xiong Y-C, Ma B-L, Wang T-M, Ge J-P, Qin X-L, Li P-F, Kong H-Y, Li Z-Z, Li F-M. 2010. Early activation of plasma membrane H⁺-ATPase and its relation to drought adaptation in two contrasting oat (*Avena sativa* L.) genotypes. *Environmental and experimental botany* **69**:1-8.

Gowda VRP, Henry A, Yamauchi A, Shashidhar HE, Serraj R. 2011. Root biology and genetic improvement for drought avoidance in rice. *Field crops research* **122**:1-13.

Guo YY, Yu HY, Kong DS, Yan F, Zhang YJ. 2016. Effects of drought stress on growth and chlorophyll fluorescence of *Lycium ruthenicum* Murr. seedlings. *Photosynthetica* **54**:524-531.

Gutierrez-Boem FH, Thomas GW. 1999. Phosphorus nutrition and water deficits in field grown soybeans. *Plant and Soil* **207**:87-96.

Haghverdi A, Najarchi M, Öztürk HS, Durner W. 2020. Studying unimodal, bimodal, PDI and bimodal-PDI variants of multiple soil water retention models: I. direct model fit using the extended evaporation and dewpoint methods. *Water* **12**:1-20.

Hakaufová L. 2022. Odrůdy cukrové řepy registrované v roce 2022. *Listy Cukrovarnické a Řepářské č.3* **138**:101-104.

Hao S, Cao H, Wang H, Pan X. 2019. The physiological responses of tomato to water stress and re-water in different growth periods. *Scientia Horticulturae* **249**:143-154.

Hejtnák V, Křižková J. 2004. The effect of water stress on photosynthesis of spring barley. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* **496**:241-249.

Hnilička F, Hniličková H, Holá D, Kočová M, Rothová O. 2008. Vliv sucha na rychlost fotosyntézy a transpirace juvenilních rostlin kukuřice. *Úroda* **56**:48-49.

Hnilička F, Hniličková H. 2016. Obecná koncepce stresu. Pages 2-27 in Hnilička F, Středa T, editors. *Rostliny v podmínkách stresu – Abiotické stresory*. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.

Hnilička F, Lysytskyi S, Rygl T, Hnilickova H, Pecka J. 2023. Effect of Short-Term Water Deficit on Some Physiological Properties of Wheat (*Triticum aestivum* L.) with Different Spike Morphotypes. *Agronomy* **13**:1-17.

- Holá D, Benešová M, Honnerová J, Hnilička F, Rothová O, Kočová M, Hniličková H. 2010. The evaluation of photosynthetic parameters in maize inbred lines subjected to water deficiency: Can these parameters be used for the prediction of performance of hybrid progeny?. *Photosynthetica* **48**:545-558.
- Holková L, Mikulková, P, Hrstková, P, Prášil IT, Bradáčová M, Chloupek O. 2010. Dehydriny jako stresové proteiny související s tolerancí k mrazu u ječmene. *Kvasný Průmysl* **56**:83-87.
- Hřivna L, Borovička K, Bízik J, Bittner V. 2014. Komplexní výživa cukrovky. Maribo seed, Slavkov.
- Hřivna L, Pechková J, Burešová I. 2014. Vliv aplikace bóru na výnos a technologickou kvalitu cukrové řepy. *Listy Cukrovarnické a Řepářské č.4* **130**:126-130.
- Huang HX, Cao Y, Xin KJ, Liang RH, Chen YT, Qi JJ. 2022. Morphological and physiological changes in *Artemisia selengensis* under drought and after rehydration recovery. *Frontiers in Plant Science* **13**:1-19.
- Husen A, Iqbal M, Aref IM. 2014. Growth, water status, and leaf characteristics of *Brassica carinata* under drought and rehydration conditions. *Brazilian Journal of Botany* **37**:217-227.
- Hussain M, Malik MA, Farooq M, Ashraf MY, Cheema MA. 2008. Improving drought tolerance by exogenous application of glycinebetaine and salicylic acid in sunflower. *Journal of Agronomy and Crop Science* **194**:193-199.
- Hussain M, Malik MA, Farooq M, Khan MB, Akram M, Saleem MF. 2009. Exogenous glycinebetaine and salicylic acid application improves water relations, allometry and quality of hybrid sunflower under water deficit conditions. *Journal Agronomy Crop Science* **195**:98-109.
- Hussein HAA, Alshammari SO, Kenawy SK, Elkady FM, Badawy AA. 2022. Grain-priming with L-arginine improves the growth performance of wheat (*Triticum aestivum* L.) plants under drought stress. *Plants* **11**:1219.
- Chaerle L, Hagenbeek D, De Bruyne E, Van Der Straeten D. 2007. Chlorophyll fluorescence imaging for disease-resistance screening of sugar beet. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture* **91**: 97-106.
- Chakraborty U, Pradhan B. 2012. Drought stress-induced oxidative stress and antioxidative responses in four wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties. *Archives of Agronomy and Soil Science* **58**:617-630.
- Chandrasekar VK, Sairam R, Srivastava GC. 2000. Physiological and Biochemical Responses of Hexaploid and Tetraploid Wheat to Drought Stress. *Journal of Agronomy and Crop Science* **185**:219-227.

Chen J, Zhao X, Zhang Y, Li Y, Luo Y, Ning Z, Wang R, Wang P, Cong, A. 2019. Effects of drought and rehydration on the physiological responses of *Artemisia halodendron*. *Water* **11**:1-13.

Chimenti CA, Marcantonio M, Hall AJ. 2006. Divergent selection for osmotic adjustment results in improved drought tolerance in maize (*Zea mays* L.) in both early growth and flowering phases. *Field Crops Research* **95**:305-315.

Chochola J. 2010. Průvodce pěstováním cukrové řepy. Řepářský institut Semčice, Semčice. Available from <http://www.semce.cz/pruvodce.pdf> (accessed August 2023).

Chołuj D, Karwowska R, Ciszewska A, Jasińska M. 2008. Influence of long-term drought stress on osmolyte accumulation in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) plants. *Acta Physiologiae Plantarum* **30**:679-687.

Iqbal H, Yaning C, Waqas M, Shareef M, Raza ST. 2018. Differential response of quinoa genotypes to drought and foliage-applied H₂O₂ in relation to oxidative damage, osmotic adjustment and antioxidant capacity. *Ecotoxicology and environmental safety* **164**:344-354.

Iqbal N, Umar S, Khan NA, Khan MIR. 2014. A new perspective of phytohormones in salinity tolerance: regulation of proline metabolism. *Environmental and Experimental Botany* **100**:34-42.

Islam MJ, Kim JW, Begum MK, Sohel MAT, Lim YS. 2020. Physiological and biochemical changes in sugar beet seedlings to confer stress adaptability under drought condition. *Plants* **9**:1-27.

Itam M, Mega R, Tadano S, Abdelrahman M, Matsunaga-Toda S, Yamasaki Y, Akashi K, Tsujimoto H. 2020. Metabolic and physiological responses to progressive drought stress in bread wheat. *Scientific Reports* **10**.

Jalil CA, Gopi R, Sankar B, Manivannan P, Kishorkumar A, Sridharan R. 2007. Studies on germination, seedling vigor, lipid peroxidation and proline metabolism in *Catharanthus roseus* seedlings under salt stress. *South African Journal of Botany* **73**:190-195.

Janusauskaite D, Feiziene D, Feiza V. 2022. The effect of tillage, fertilization and residue management on winter wheat and spring wheat physiological performance. *Acta Physiologiae Plantarum* **44**:1-13.

Janušauskaitė D, Auškalnienė O. 2014. Photosynthetic traits of spring barley throughout development stages under field conditions. *Communications in soil science and plant analysis* **45**:284-296.

Jensen CR, Jacobsen SE, Andersen MN, Nunez N, Andersen SD, Rasmussen L, Mogensen VO. 2000. Leaf gas exchange and water relation characteristics of field quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) during soil drying. *European journal of Agronomy* **13**:11-25.

Jiang F, Hartung W. 2008. Long-distance signalling of abscisic acid (ABA): the factors regulating the intensity of the ABA signal. *Journal of experimental botany* **59**:37-43.

Jiang GM, Sun JZ, Liu HQ, Qu CM, Wang KJ, Guo RJ, Bai KZ, Gao LM, Kuang, T. Y. 2003. Changes in the rate of photosynthesis accompanying the yield increase in wheat cultivars released in the past 50 years. *Journal of Plant Research* **116**:347-354.

Jin R, Shi H, Han C, Zhong B, Wang Q, Chan Z. 2015. Physiological changes of purslane (*Portulaca oleracea* L.) after progressive drought stress and rehydration. *Scientia Horticulturae* **194**:215-221.

Jursík M, Andr J, Holec J, Soukup J. 2013. Současné možnosti regulace plevelů v cukrovce a trendy do budoucna. *Listy cukrovarnické a řepářské č.4* **129**:124-132.

Jursík M, Holec J, Hamouz P, Soukup J. 2018. Biologie a regulace plevelů. Kurent, České Budějovice.

Jůzl M, Elzner P. 2014. Pěstování okopanin vyd. 1. Mendelova univerzita v Brně, Brno.

Kabashnikova LF, Domanskaya IN, Pilipovich TS, Pashkevich LV, Martysiuk HV, Motyleva SM, Gins MS, Tetyannikov, N. V. 2021. Photosynthetic pigments content and parameters of oxidative stress in the amaranth species with increasing water deficiency. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Biological Series* **66**:282-294.

Karele I. 2001. Chlorophyll content distribution in leaves, stems, and ears in winter wheat. *Plant Nutrition: Food security and sustainability of agro-ecosystems through basic and applied research* 720-721.

Kavar T, Maras M, Kidric M, Sustar-Vozlic J, Meglic V. 2007. Identification of genes involved in the response of leaves of *Phaseolus vulgaris* to drought stress. *Molecular Breeding* **21**:159-172.

Kazda J, Mikulka J, Prokinová E. 2010. *Encyklopedie ochrany rostlin*. Profi Press, Praha.

Keller I, Müdsam C, Rodrigues CM, Kischka D, Zierer W, Sonnewald U, Harms K, Czarnecki O, Fiedler-Wiechers K, Koch W, Neuhaus HE, Ludewig F, Pommerrenig, B. 2021. Cold-triggered induction of ROS-and raffinose metabolism in freezing-sensitive taproot tissue of sugar beet. *Frontiers in Plant Science* **12**:1-19.

Khan N, Essemine J, Hamdani S, Qu M, Lyu M-JA, Perveen S, Stirbet A, Govindjee G, Zhu X-G. 2020. Natural variation in the fast phase of chlorophyll a fluorescence induction curve (OJIP) in a global rice minicore panel. *Photosynthesis Research* **150**:137-158.

Khayatnezhad M, Gholamin R, Jamaati-e-Somarin S, Zabihi-e-Mahmoodabad R. 2011. The leaf chlorophyll content and stress resistance relationship considering in corn cultivars (*Zea mays*). *Advances in Environmental Biology* **5**:118-122.

Kiani SP, Maury P, Sarrafi A, Grieu P. 2008. QTL analysis of chlorophyll fluorescence parameters in sunflower (*Helianthus annuus* L.) under well-watered and water-stressed conditions. *Plant science* **175**:565-573.

Kiani SP, Talia P, Maury P, Grieu P, Heinz R, Perrault A, Nishinakamasu V, Hopp E, Gentzbittel L, Paniego N, Sarrafi A. 2007. Genetic analysis of plant water status and osmotic adjustment in recombinant inbred lines of sunflower under two water treatments. *Plant Science* **172**:773-787.

Kirkham MB. 2005. Principles of soil and plant water relations. Elsevier Academic Press, Boston.

Kramer PJ, Boyer JS. 1995. Water relations of plants and soils. Academic press, San Diego.

Kůdela V, Ackermann P, Prášil I T, Rod J, Veverka K. 2013. Abiotikózy rostlin: poruchy, poškození a poranění. Academia, Praha.

Kumar R, Sarawgi AK, Ramos C, Amarante ST, Ismail AM, Wade LJ. 2006. Partitioning of dry matter during drought stress in rainfed lowland rice. *Field Crops Research* **96**:455-465.

Kutílek M. 2012. Půda planety Země. Dokořán, Praha.

Lambers H, Chapin FS, Pons TL. 2008. Plant physiological ecology, 2nd edn. Springer, New York.

Larcher W. 1987. Streß bei Pflanzen. *Naturwissenschaften*. **74**:158-167.

Larcher W. 1988. Fyziologická ekologie rostlin. Academia. Praha.

Larcher W. 2003. Physiological plant ecology: ecophysiology and stress physiology of functional groups, 4th Edition. Springer, New York.

Larouk C, Gabon F, Kehel Z, Djekoun A, Nachit M, Amri A. 2021. Chlorophyll fluorescence and drought tolerance in a mapping population of durum wheat. *Contemporary Agriculture* **70**:123-134.

- Lawlor DW, Cornic G. 2002. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. *Plant, cell & environment* **25**:275-294.
- Lei YB, Yin CY, Li CY. 2006. Differences in some morphological, physiological and biochemical responses to drought stress in two contrasting populations of *Populus przewalskii*. *Physiologia Plantarum* **127**:182-191.
- Leufen G, Noga G, Hunsche M. 2016. Drought stress memory in sugar beet: mismatch between biochemical and physiological parameters. *Journal of plant growth regulation* **35**:680-689.
- Levitt J. 1980. *Responses of Plants to Environmental Stresses: water, radiation, salt and other stresses*. Academic Press, London.
- Li GL, Wu HX, Sun YQ, Zhang SY. 2013. Response of chlorophyll fluorescence parameters to drought stress in sugar beet seedlings. *Russian Journal of Plant Physiology* **60**:337-342.
- Li W, Zhang S, Shan L. 2007. Responsibility of non-stomatal limitations for the reduction of photosynthesis-response of photosynthesis and antioxidant enzyme characteristics in alfalfa (*Medicago sativa* L.) seedlings to water stress and rehydration. *Frontiers of Agriculture in China* **1**:255-264.
- Li Y, Liu N, Fan H, Su J, Fei C, Wang K, Ma F, Kisekka I. 2019. Effects of deficit irrigation on photosynthesis, photosynthate allocation, and water use efficiency of sugar beet. *Agricultural Water Management* **223**:1-9.
- Li Y, Ye W, Wang M, Yan X. 2009. Climate change and drought: a risk assessment of crop-yield impacts. *Climate research* **39**:31-46.
- Li Y. 2008. Kinetics of the antioxidant response to salinity in the halophyte *Limonium bicolor*. *Plant Soil Environ* **54**:493-497.
- Liang Z, Zhang F, Shao M, Zhang J. 2002. The relations of stomatal conductance, water consumption, growth rate to leaf water potential during soil drying and rewatering cycle of wheat (*Triticum aestivum*). *Botanical Bulletin of Academia Sinica* **43**:187-192.
- Lichtenthaler HK. 1998. The stress concept in plants: an introduction. *Annals of the New York Academy of sciences* **851**:187-198.
- Lipiec J, Doussan S, Nosalewicz A, Kondracka K. 2013. Effect of drought and heat stresses on plant growth and yield: a review. *International Agrophysics* **27**:436-477.
- Liu EK, Mei XR, Yan CR, Gong DZ, Zhang YQ. 2016. Effects of water stress on photosynthetic characteristics, dry matter translocation and WUE in two winter wheat genotypes. *Agricultural Water Management* **167**:75-85.

- Liu F, Stützel H. 2002. Leaf water relations of vegetable amaranth (*Amaranthus* spp.) in response to soil drying. *European Journal of Agronomy* **16**:137-150.
- Liu H, Wang X, Wang D, Zou Z, Liang Z. 2011. Effect of drought stress on growth and accumulation of active constituents in *Salvia miltiorrhiza* Bunge. *Industrial Crops and Products* **33**:84-88.
- Löw M, Herbinger K, Nunn AJ, Häberle KH, Leuchner M, Heerdt C, Werner H, Wipfler P, Pretzsch H, Tausz M et al. 2006. Extraordinary drought of 2003 overrules ozone impact on adult beech trees (*Fagus sylvatica*). *Trees* **20**:539-548.
- Luck J, Spackman M, Freeman A, Trebicki P, Griffiths W, Finlay K, Chakraborty S. 2011. Climate change and diseases of food crops. *Plant Pathology* **60**:113-121.
- Madhava Rao KV, Raghavendra AS, Janardhan Reddy K. 2006. *Physiology and molecular biology of stress tolerance in plants*. Springer, Dordrecht.
- Mahajan S, Tuteja N. 2005. Cold, salinity and drought stresses: an overview. *Archives of Biochemistry and Biophysics* **444**: 139-158.
- Mahmoud ESA, Hassanin MA, Borham TI, Emara EI. 2018. Tolerance of some sugar beet varieties to water stress. *Agricultural Water Management* **201**:144-151.
- Mahn K, Hoffmann C, Marlander B. 2002. Distribution of quality components in different morphological sections of sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *European Journal of Agronomy* **17**:29-39.
- Manaa A., Goussi R, Derbali W, Cantamessa S, Essemine J, Barbato R. 2021. Photosynthetic performance of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) after exposure to a gradual drought stress followed by a recovery period. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*, **1862**:1-13.
- Manivannan P, Jaleel CA, Somasundaram R, Panneerselvam R. 2008. Osmoregulation and antioxidant metabolism in drought-stressed *Helianthus annuus* under triadimefon drenching. *Comptes Rendus Biologies* **331**:418-425.
- Mathobo R, Marais D, Steyn JM. 2017. The effect of drought stress on yield, leaf gaseous exchange and chlorophyll fluorescence of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agricultural Water Management* **180**:118-125.
- Matsui T, Singh BB. 2003. Root characteristics in cowpea related to drought tolerance at the seedling stage. *Experimental Agriculture* **39**:29-38.

- Maxwell K & Johnson GN. 2000. Chlorophyll fluorescence – a practical guide. *Journal of Experimental Botany* **51**:659-668.
- May MJ. 2003. Economic consequences for uk farmers of growing GM herbicide tolerant sugar beet. *Annals of Applied Biology* **142**:41-48.
- Mazhar T, Ali Q, Rashid MS, Malik A. 2020. Effects of salt and drought stress on growth traits of *Zea mays* seedlings. *Life Science Journal* **17**:48-54.
- McMaster GS, Wilhelm WW. 2003. Phenological responses of wheat and barley to water and temperature: improving simulation models. *The Journal Agricultural Science* **141**:129-147.
- Medrano H, Escalona JM, Bota J, Gulías J, Flexas J. 2002. Regulation of photosynthesis of C3 plants in response to progressive drought: stomatal conductance as a reference parameter. *Annals of botany* **89**:895-905.
- Medrano H, Tomás M, Martorell S, Flexas J, Hernández E, Rosselló J, Pou A, Escalona JM, Bota J. 2015. From leaf to whole-plant water use efficiency (WUE) in complex canopies: Limitations of leaf WUE as a selection target. *The Crop Journal* **3**:220-228.
- Meyre D, Leonardi A, Brisson G, Vartanian N. 2001. Drought-adaptive mechanisms involved in the escape/tolerance strategies of *Arabidopsis Landsberg erecta* and *Columbia* ecotypes and their F1 reciprocal progeny. *Journal of Plant Physiology* **158**:1145-1152.
- Milford GFJ, Houghton BJ. 1999. An analysis of the variation in crown size in sugar-beet (*Beta vulgaris*) grown in England. *Annals of Applied Biology* **134**:225–232.
- Mishra V, Cherkauer KA. 2010. Retrospective droughts in the crop growing season: Implications to corn and soybean yield in the Midwestern United States. *Agricultural and Forest Meteorology* **150**:1030-1045.
- Misra V, Solomon S, Mall AK, Prajapati CP, Hashem A, Abd_Allah EF, Ansari MI. 2020. Morphological assessment of water stressed sugarcane: A comparison of waterlogged and drought affected crop. *Saudi Journal of Biological Sciences* **27**:1228-1236.
- Mittler R. 2006. Abiotic stress, the field environment and stress combination. *Trends in Plant Science* **11**:15-19.
- Miyashita K, Tanakamaru S, Maitani T, Kimura K. 2005. Recovery responses of photosynthesis, transpiration, and stomatal conductance in kidney bean following drought stress. *Environmental and experimental botany* **53**:205-214.
- Mogensen VO. 1980. Drought Sensitivity at Various Growth Stages of Barley in Relation to Relative Evapotranspiration and Water Stress 1. *Agronomy Journal* **72**:1033-1038.

- Munns R, Tester, M. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology* **59**:651-681.
- Munns R. 2002. Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, Cell & Environment* **25**: 239-250.
- Murchie EH, Lawson T. 2013. Chlorophyll fluorescence analysis: a guide to good practice and understanding some new applications. *Journal of Experimental Botany* **64**:3983-3998.
- NadeAli E, PakNejad F, Moradi F, Nasri M, Pazuki A. 2011. Effects of methanol application on sugar beet (*Beta vulgaris*) relative water content, chlorophyll content and chlorophyll fluorescence parameters under drought stress conditions. *Iranian Journal of Field Crop Science* **41**:731-740.
- Narusaka Y, Nakashima K, Shinwari ZK, Sakuma Y, Furihata T, Abe H, Narusaka M, Shinozaki K, Yamaguchi-Shinozaki K. 2003. Interaction between two cis-acting elements, ABRE and DRE, in ABA-dependent expression of Arabidopsis rd29A gene in response to dehydration and high-salinity stresses. *The Plant Journal* **34**:137-148.
- Nelson R, Wiesner-Hanks T, Wisser R, Balint-Kurti P. 2018. Navigating complexity to breed disease-resistant crops. *Nature Reviews Genetics*, **19**:21-33.
- Nilsen ET, Orcutt DM. 1996. *Physiology of plants under stress. Abiotic factors. Physiology of plants under stress. Abiotic factors.* John Wiley and Sons, New York.
- Nilson SE, Assmann SM. 2007. The control of transpiration. Insights from Arabidopsis. *Plant physiology* **143**:19-27.
- Noctor G, Arisi A-CM, Jouanin L, Foyer CH. 1999. Photorespiratory glycine enhances glutathione accumulation in both the chloroplastic and cytosolic compartments. *Journal of Experimental Botany* **50**:1157-1167.
- Noctor G, Veljovic-Javanovic S, Driscoll S, Novitskaya L, Foyer CH. 2002. Drought and oxidative load in the leaves of C3 plants: a predominant role for photorespiration. *Annals of Botany* **89**:841-850.
- Nooden LD. 1988. The phenomena of senescence and aging. Pages 1-50 in Nooden LD, Leopald AC, editors. *Senescence and aging in plants.* Academic press, San Diego.
- Novák V, Vidovič J. 2003. Transpiration and nutrient uptake dynamics in maize (*Zea mays* L.). *Ecological Modelling* **166**:99-107.

- Ober ES, Le Bloa M, Clark CJ, Royal A, Jaggard KW, Pidgeon JD. 2005. Evaluation of physiological traits as indirect selection criteria for drought tolerance in sugar beet. *Field Crops Research*, **91**:231-249.
- Oerke EC. 2006. Crop losses to pests: Centenary review **144**:31-43.
- Ogburn RM, Edwards EJ. 2010. The Ecological Water-Use Strategies of Succulent Plants. Pages 179-225 in Kader JC, Delseny M. *Advances in Botanical Research*. Academic Press, Burlington.
- Opti-Sciences. 2023. OS5p+. Opti-Sciences, Inc. Available from https://www.optisci.com/assets/os5p-_brochure.pdf (accessed February 2024).
- Orcutt DM, Nilsen ET. 2000. *The Physiology of Plants under Stress Soil and Biotic Factors*. John Wiley and Sons, New York.
- Ors S, Ekinci M, Yildirim E, Sahin U, Turan M, Dursun A. 2021. Interactive effects of salinity and drought stress on photosynthetic characteristics and physiology of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) seedlings. *South African Journal of Botany* **137**:335-339.
- Ouvrard O, Cellier F, Ferrare K, Tusch D, Lamaze T, Dupuis JM, Casse-Delbart F. 1996. Identification and expression of water stress and abscisic acid -regulated genes in a droughttolerant sunflower genotype. *Plant molecular biology* **31**:819-829.
- Ozkur O, Ozdemir F, Bor M, Turkan I. 2009. Physiochemical and antioxidant responses of the perennial xerophyte *Capparis ovata* Desf. to drought. *Environmental and experimental botany* **66**:487-492.
- Pallardy SG. 2008. *Physiology of woody plants*. Academic press.
- Peleg Z, Blumwald E. 2011. Hormone balance and abiotic stress tolerance in crop plants. *Current opinion in plant biology* **14**:290-295.
- Perez-Perez JG, Robles JM, Tovar JC, Botia P (2009) Response to drought and salt stress of lemon 'Fino 49' under field conditions: Water relations, osmotic adjustment and gas exchange. *Scientia Horticulturae* **122**:83-90.
- Peterhansel C, Horst I, Niessen M, Blume C, Kebeish R, Kürkcüoglu S, Kreuzaler F. 2010. Photorespiration. *The Arabidopsis Book* **8**:1-24.
- Petříková K, Pokluda R, Koudela M, Hnilička F, Jezdnický A, Jurica M, Vojtíšková J, Kopta T, Martinková J, Nedorost J. 2012. Omezení negativních důsledků vláhového deficitu na hospodářské ukazatele zeleniny. Editační středisko Mendelovy university, Brno.

Piro G, Leucci MR, Waldron K, Dalessandro G. 2003. Exposure to water stress causes changes in the biosynthesis of cell wall polysaccharides in roots of wheat cultivars varying in drought tolerance. *Plant Science* **165**:559-569.

Piterková J, Tománková K, Luhová L, Petřivalský M, Peč P. 2005. Oxidativní stres: Lokalizace tvorby aktivních forem kyslíku a jejich degradace v rostlinném organismu. *Chemické listy* **99**:455-466.

Plaxton WC, Podestá FE. 2006. The functional organization and control of plant respiration. *Critical reviews in plant sciences* **25**:159-198.

Podlešáková K, Tarkovská D, Pěnčík A, Oklešťková J, Turečková V, Floková K, Tarkowski P. 2012. Nové trendy v analýze fytohormonů. *Chemické Listy* **106**:373-379.

Popova AV, Mihailova G, Geneva M, Peeva V, Kirova E, Sichanova M, Dobrikova A, Georgieva K. 2023. Different Responses to Water Deficit of Two Common Winter Wheat Varieties: Physiological and Biochemical Characteristics. *Plants* **12**:1-24.

Porra RJ, Thompson WAA, Kriedemann PE. 1989. Determination of accurate extinction coefficients and simultaneous equations for assaying chlorophylls a and b extracted with four different solvents: verification of the concentration of chlorophyll standards by atomic absorption spectroscopy. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics* **975**:384-394.

Pulkrábek J, et al. 2015. Začlenění podzimního hlubokého kypření půdy a kypření za vegetace do půdoochranné technologie pěstování cukrové řepy. Česká zemědělská univerzita, Praha.

Pulkrábek J, Urban J, Bečková L, Valenta J. 2007. Řepa cukrová - Pěstitelský rádce. Česká zemědělská univerzita, Praha.

Raines CA. 2003. The Calvin cycle revisited. *Photosynthesis research* **75**:1-10.

Razzaghi F, Ahmadi SH, Adolf VI, Jensen CR, Jacobsen SE, Andersen MN. 2011. Water relations and transpiration of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under salinity and soil drying. *Journal of agronomy and crop science* **197**:348-360.

Reddy AR, Chaitanya KV, Vivekanandan M. 2004. Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. *Journal of plant physiology* **161**:1189-1202.

Richter R, Hlušek J, Ryant P, Lošák T. 2002. Organická hnojiva a jejich postavení v zemědělské praxi. *Úroda* **50**:9-12.

Richter R, Škarpa P. 2013. Úprava živinného režimu půd pro cukrovku-předpoklad stabilní a kvalitní produkce. *Listy Cukrovarnické a Řepařské č.7-8* **129**:219-222.

- Rivero RM, Kojima M, Gepstein A, Sakakibara H, Mittler R, Gepstein S, Blumwald E. 2007. Delayed leaf senescence induces extreme drought tolerance in a flowering plant. *Proceeding of the National Academy of Sciences* **104**:19631-19636.
- Roháček K, Barták M. 1999. Technique of the modulated chlorophyll fluorescence: basic concepts, useful parameters, and some applications. *Photosynthetica* **37**:339-363.
- Roháček K. 2002. Chlorophyll Fluorescence Parameters: The Definitions, Photosynthetic Meaning, and Mutual Relationships. *Photosynthetica* **40**:13-29.
- Roháček K. 2005. Fotofyzikální děje během fotosyntetické přeměny zářivé energie na biochemicky využitelnou formu. Pages 133-144 in Dvořáková D, Martinková D editors. *Projekt Otevřená věda, praktický kurz fyzika*. AV ČR, Praha.
- Rout NP, Shaw BP. 2001. Salt tolerance in aquatic macrophytes: possible involvement of the antioxidative enzymes. *Plant Science* **160**:415-423.
- Rybáček V, et al. 1985. *Cukrovka*. Státní zemědělské nakladatelství, Praha.
- Saberi Riseh R, Ebrahimi-Zarandi M, Gholizadeh Vazvani M, Skorik YA. 2021. Reducing drought stress in plants by encapsulating plant growth-promoting bacteria with polysaccharides. *International Journal of Molecular Sciences* **22**:1-17.
- Sankar B, Jaleel CA, Manivannan P, Kishorekumar A, Somasundram R, Panneerselvam R. 2007. Drought-induced biochemical modifications and proline metabolism in *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench. *Acta Botanica Croatica* **66**:43-56.
- Saracin AP, Chirigiu LME, Saracin I, Neamtu J, Saracin IA. 2023. Study of the internal structure of *Amaranthus retroflexus* leaf. *Scientific Papers Series A Agronomy* **66**:835-839.
- Scandalios JG. 2005. Oxidative stress: molecular perception and transduction of signals triggering antioxidant gene defenses. *Brazilian journal of medical and biological research* **38**:995-1014.
- Sekhon HS, Singh G, Sharma P, Bains TS. 2010. Water use efficiency under stress environments. In *Climate change and management of cool season grain legume crops*. Springer Netherlands, Netherlands.
- Seki M, Kameiy A, Yamaguchi-Shinozaki K, Shinozaki K. 2003. Molecular responses to drought, salinity and frost: common and different paths for plant protection. *Current opinion in biotechnology* **14**:194-199.
- Serraj R, Sinclair TR. 2002. Osmolyte accumulation: can it really help increase crop yield under drought conditions? *Plant, cell & environment* **25**:333-341.

- Shabala SN, Lew RR. 2002. Turgor regulation in osmotically stressed *Arabidopsis* epidermal root cells. Direct support for the role of inorganic ion uptake as revealed by concurrent flux and cell turgor measurements. *Plant physiology* **129**:290-299.
- Shao HB, Guo QJ, Chu LY, Zhao XN, Su ZL, Hu YC, Cheng JF. 2007. Understanding of molecular mechanism of higher plant The Science of the Total Environment. *International Journal of Biological Sciences*, plasticity under abiotic stress **54**:37-45.
- Shao HB, Chu LY, Jaleel CA, Zhao CX. 2008. Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. *Comptes rendus biologies* **331**:215-225.
- Schulze ED, Beck E, Müller-Hohenstein K. 2005. *Plant ecology*. Springer-Verlag, New York.
- Schussler JR, Westgate ME. 1995. Assimilate flux determines kernel set at low water potential in maize. *Crop Science* **35**:1074-1080.
- Siddique MRB, Hamid A, Islam MS. 2000. Drought stress effects on water relations of wheat. *Botanical Bulletin of Academia Sinica* **41**:35-39.
- Signarbieux C, Feller U. 2011. Non-stomatal limitations of photosynthesis in grassland species under artificial drought in the field. *Environmental and experimental botany* **71**:192-197.
- Simova-Stoilova L, Demirevska K, Petrova T, Tsenov N, Feller U. 2008. Antioxidative protection in wheat varieties under severe recoverable drought at seedling stage. *Plant Soil Environ* **54**:529-536.
- Simova-Stoilova L, Stoyanova Z, Demirevska-Kepova K. 2001. Ontogenic changes in leaf pigments, total soluble protein and Rubisco in two barley varieties in relation to yield. *Bulg. J. Plant Physiol* **27**:15-24.
- Sinclair TR, Muchow RC. 2001. System analysis of plant traits to increase grain yield on limited water supplies. *Agronomy Journal* **93**:263-270.
- Singh B, Singh G. 2004. Influence of soil water regime on nutrient mobility and uptake by *Dalbergia sissoo* seedlings. *Tropical Ecology* **45**:337-340.
- Singh P, Singh I, Shah K. 2019. Reduced activity of nitrate reductase under heavy metal cadmium stress in rice: an in silico answer. *Frontiers in plant science* **9**:1-11.
- Singh TN, Paleg LG, Aspinall D. 1973. Stress metabolism III. Variations in response to water deficit in the barley plant. *Australian Journal of Biological Sciences* **26**:65-76.

Sivakumar R, Nandhitha G, Nithila S. 2017. Impact of drought on chlorophyll, soluble protein, abscisic acid, yield and quality characters of contrasting genotypes of tomato (*Solanum lycopersicum*). *British Journal of Applied Science & Technology* **21**:1-10.

Stehlík V, Benc S, Havránek A. 1956. *Řepářství*. Státní zemědělské nakladatelství, Praha.

Stevens PF. 2001. Angiosperm Phylogeny Website, version 14. Available from <https://www.mobot.org/MOBOT/research/APWeb/> (accessed September 2023).

Subramanian KS, Santhanakrishnan P, Balasubramanian P. 2006. Responses of field grown tomato plants to arbuscular mycorrhizal fungal colonization under varying intensities of drought stress. *Science horticulture* **107**:245-253.

Sun Y, Liu F, Bendevis M, Shabala S, Jacobsen SE. 2013. Sensitivity of two quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) varieties to progressive drought stress. *Journal of Agronomy and Crop Science* **200**:12-23.

Suzuki N, Rivero RM, Shulaev V, Blumwald E, Mittler R. 2014. Abiotic and biotic stress combinations. *New Phytologist*, **203**:32-43.

Švachula V, Pulkrábek J, Šroller J, Zahradníček J. 2006. Ohlédnutí za 175 lety českého řepářství. Pages 117-120 in Bareš I, Vach M, editors. "Úspěšné plodiny pro velký trh": nový výzkum a komplexní poznatky pro uplatnění v praxi. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.

Tambussi EA, Nogués S, Araus JL. 2005. Ear of durum wheat under water stress: water relations and photosynthetic metabolism. *Planta* **221**:446-458.

Tamoi M, Nagaoka M, Yabuta Y, Shigeoka S. 2005. Carbon metabolism in the Calvin cycle. *Plant biotechnology* **22**:355-360.

Tan CW, Wang DL, Zhou J, Du Y, Luo M, Zhang YJ, Guo WS. 2018. Assessment of Fv/Fm absorbed by wheat canopies employing in-situ hyperspectral vegetation indexes. *Scientific Reports* **8**:1-8.

Tatar Ö, Brück H, Asch F. 2016. Photosynthesis and remobilization of dry matter in wheat as affected by progressive drought stress at stem elongation stage. *Journal of agronomy and crop science* **202**: 292-299.

Tranavičienė T, Šikšnianienė JB, Urbonavičiūtė A, Vagusevičienė I, Samuolienė G, Duchovskis P, Sliesaravičius A. 2007. Effects of nitrogen fertilizers on wheat photosynthetic pigment and carbohydrate contents. *Biologija* **53**:80-84.

Trimble S. 2022. Transpiration in Plants: Its Importance and Applications. CID Bio-Science. Available from <https://cid-inc.com/blog/transpiration-in-plants-its-importance-and-applications/> (accessed February 2024).

Turner NC, Wright GC, Siddique KHM. 2001. Adaptation of grain legumes (pulses) to waterlimited environments. *Advances in Agronomy* **71**:193-271.

Tyerman SD, Niemietz CM, Brameley H. 2002. Plant aquaporins: multifunctional water and solute channels with expanding roles. *Plant, cell & environment* **25**:173-194.

Ullah A, Al-Rajhi RS, Al-Sadi AM, Farooq M. 2021. Wheat genotypes with higher intercellular CO₂ concentration, rate of photosynthesis, and antioxidant potential can better tolerate drought stress. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, **21**:2378-2391.

Vagusevičienė I, Kazlauskaitė S, Pranckietienė I, Sujetovienė G, Kanapickas A, Žebrauskienė, A. 2021. The comparison of photosynthesis parameters of different wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties. Pages 43-47 in Černiauskiene editor. *Rural Development: Proceedings of the International Scientific Conference*.

Van de Sande Bakhuyzen HL. 1949. Growth and production of sugar beets. *Verslagen van Landbouwkundige Onderzoekingen* **55**:1-227.

Vassileva V, Signarbieux C, Anders I, Feller U. 2011. Genotypic variation in drought stress response and subsequent recovery of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Plant Research* **124**:147-154.

Venclová B. 2021. Ve hnojení cukrovky je co zlepšovat. *Úroda*. Available from <https://uroda.cz/ve-hnojeni-cukrovky-je-co-zlepsovat/> (accessed February 2024).

Vile D, Pervent M, Belluau M, Vasseur F, Bresson J, Muller B, Granier C, Simonneau T. 2012. *Arabidopsis* growth under prolonged high temperature and water deficit: independent or interactive effects? *Plant, Cell & Environment* **35**:702-718.

Vítámvás P, Kosová K, Musilová J, Holková L, Mařík P, Smutná P, Klíma M, Prášil, I. T. 2019. Relationship between dehydrin accumulation and winter survival in winter wheat and barley grown in the field. *Frontiers in Plant Science* **10**:1-11.

Vomáčka L, Pospíšilová J. 2003. Rehydration of sugar beet plants after water stress: effect of cytokinins. *Biologia Plantarum* **46**:57-62.

Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy. 2022. eKatalog BPEJ. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i.. Available from <https://bpej.vumop.cz/> (accessed February 2024).

- Wang H, Yamauchi A. 2006. Growth and functions of roots under abiotic stress in soil. Pages: 271-319 in Huang B editor Plant-environment interactions, Third edition. CRC Press, New York.
- Wang J, Zhang X, Han Z, Feng H, Wang Y, Kang J, Han X, Wang L, Wang C, Li H, Ma G. 2022. Analysis of physiological indicators associated with drought tolerance in wheat under drought and re-watering conditions. *Antioxidants* **11**:1-19.
- Wang M, He D, Shen F, Huang J, Zhang R, Liu W, Zhu M, Zhou L, Wang L, Zhou, Q. 2019. Effects of soil compaction on plant growth, nutrient absorption, and root respiration in soybean seedlings. *Environmental Science and Pollution Research*, **26**:22835-22845.
- Wang WX, Vinocur B, Shoseyov O, Altman A. 2001. Biotechnology of plant osmotic stress tolerance physiological and molecular considerations. IV International Symposium on In Vitro Culture and Horticultural Breeding **560**:285-292.
- Wang Y, Stevanato P, Lv C, Li R, Geng G. 2019. Comparative physiological and proteomic analysis of two sugar beet genotypes with contrasting salt tolerance. *Journal of agricultural and food chemistry* **67**:6056-6073.
- Wassan S, Xi C, Jhanjhi NZ, Binte-Imran L. 2021. Effect of frost on plants, leaves, and forecast of frost events using convolutional neural networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks* **17**:1-9.
- Wedeking R, Mahlein AK, Steiner U, Oerke EC, Goldbach HE, Wimmer MA. 2016. Osmotic adjustment of young sugar beets (*Beta vulgaris*) under progressive drought stress and subsequent rewatering assessed by metabolite analysis and infrared thermography. *Functional Plant Biology* **44**:119-133.
- Weiland J, Koch G. 2004. Sugarbeet leaf spot disease (*Cercospora beticola* Sacc.). *Molecular Plant Pathology* **5**:157-166.
- Wi SG, Chung BY, Kim JH, Baek MH, Yang DH, Lee JW, Kim JS. 2005. Ultrastructural changes of cell organelles in *Arabidopsis* stems after gamma irradiation. *Journal of Plant Biology* **48**:195-200.
- Wingler A, Lea PJ, Quick WP, Leegood RC. 2000. Photorespiration: metabolic pathways and their role in stress protection. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* **355**:1517-1529.
- Winzler H, Hunt LA, Mahon JD. 1976. Ontogenetic Changes in Respiration and Photosynthesis in a Uniculm Barley 1. *Crop Science* **16**:786-790.

Wood DW, Scott RK. 1974. Sowing sugar beet in autumn in England. *Journal of Agricultural Science* **84**:97-108.

Xia Q, Tan J, Cheng S, Jiang Y, Guo Y. 2019. Sensing plant physiology and environmental stress by automatically tracking Fj and Fi features in PSII chlorophyll fluorescence induction. *Photochemistry and Photobiology* **95**:1495-1503.

Xing W, Rajashekar CB. 1999. Alleviation of water stress in beans by exogenous glycinebetaine. *Plant Science* **148**:185-195.

Yadav, S. K., Lakshmi, N. J., Maheswari, M., Vanaja, M., & Venkateswarlu, B. 2005. Influence of water deficit at vegetative, anthesis and grain filling stages on water relation and grain yield in sorghum. *Indian Journal of Plant Physiology* **10**:20-24.

Yamaguchi-Shinozaki K, Shinozaki K. 2006. Transcriptional regulatory networks in cellular responses and tolerance to dehydration and cold stresses. *The Annual Review Plant Biology* **57**:781-803.

Yamance K, Hayakawa K, Kawasaki M. 2003. Bundle sheath chloroplasts of rice are more sensitive to drought stress than mesophyll chloroplasts. *Journal of plant physiology* **160**:1319-1327.

Yamane T. 2023. Sugar beet. *Encyclopedia Britannica*. Available from <https://www.britannica.com/plant/sugar-beet> (accessed August 2023).

Yamauchi Y, Pardales JR, Kono Y. 1996. Root system structure and its relation to stress tolerance. Pages 211-233 in Ito O, Katayama K, Johansen C, Kumar Rao JVDK, Adu-Gyamfi JJ, Rego TJ editors. *Roots and Nitrogen in Cropping Systems of the Semi-Arid Tropics*. JIRCAS Publication, Tsukuba.

Yuan G-F, Jia C-G, Li Z, Sun B, Zhang L-P, Liu N, Wang Q-M. 2010. Effect of brassinosteroids on drought resistance and abscisic acid concentration in tomato under water stress. *Scientia Horticulturae* **126**:103-108.

Zaki HE, Radwan KS. 2022. Response of potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars to drought stress under in vitro and field conditions. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture* **9**:1-19.

Zámečníková, B. 2000. Vliv vodního potenciálu, dusíkaté výživy a abiotických stresů na fotosyntézu a transpiraci u rostlin ječmene a pšenice. *Česká zemědělská univerzita, Praha*.

Zhang H, Oweis TY, Garabet S, Pala M. 1998. Water-use efficiency and transpiration efficiency of wheat under rain-fed conditions and supplemental irrigation in a Mediterranean-type environment. *Plant and Soil* **201**:295-305.

Zhao B, Liu Q, Wang B, Yuan F. 2021. Roles of phytohormones and their signaling pathways in leaf development and stress responses. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **69**:3566-3584.

Zhao W, Liu L, Shen Q, Yang J, Han X, Tian F, Wu, J. 2020. Effects of water stress on photosynthesis, yield, and water use efficiency in winter wheat. *Water* **12**:1-19.

Zoschke A, Quadranti M. 2002. Integrated weed management: Quo vadis. *Weed Biology and Management* **2**:1-10.

9 Seznam obrázků

Obrázek 1: Části bulvy (Jůzl & Elzner 2014).....	12
Obrázek 2: Bulva a pravé listy řepy (Rybáček et al. 1985).....	13
Obrázek 3: Denní průběh transpirace (Larcher 1988).....	23
Obrázek 4: Stresová matice (Suzuki et al. 2014).....	28
Obrázek 5: Křivka tolerance (Kůdela et al. 2013).....	29
Obrázek 6: Stresová reakce (Larcher 1987).....	30
Obrázek 7: Mechanismus poklesu fotosyntézy za sucha (Farooq et al. 2012).....	36
Obrázek 8: Mechanismus fluorescence chlorofylu (Baker 2008).....	42
Obrázek 9: OJIP křivka (Xia et al. 2019).....	42
Obrázek 10: Poloha míst odběrů.....	45

10 Seznam tabulek

Tabulka 1: Nejvýznamnější pěstitele cukrové řepy (FAO 2023)	15
Tabulka 2: Řepná kampaň 2018 až 2023 (Bílý 2023)	16
Tabulka 3: Hnojařské zásahy (Pulkrábek et al. 2007)	19
Tabulka 4: Rozdělení stresových faktorů (Cerkal 2011)	27

11 Seznam grafů

Graf 1: Poměr největších pěstitelů cukrové řepy (FAO 2023)	15
Graf 2: Průběh průměrných teplot v porovnání s 30 letým normálem (Český hydrometeorologický ústav 2024)	46
Graf 3: Průběh úhrnu srážek v porovnání s 30 letým normálem (Český hydrometeorologický ústav 2024).....	47
Graf 4: Změny rychlosti fotosyntézy ($\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) v závislosti na ontogenetickém vývoji sledovaných odrůd řepy.....	50
Graf 5: Vliv odrůdy na rychlost fotosyntézy ($\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	51
Graf 6: Změny rychlosti transpirace ($\text{mmol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) v závislosti na odrůdě a ontogenetickém vývoji.....	52
Graf 7: Vliv odrůdy na rychlost transpirace ($\text{mmol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	52
Graf 8: Efektivita využití vody – WUE – (10^{-3}) u sledovaných genotypů řepy	53
Graf 9: Změny obsahu celkového chlorofylu ($\text{nmol}\cdot\text{cm}^{-2}$) v závislosti na odrůdě a ontogenetickém vývoji.....	54
Graf 10: Celkový obsah chlorofylu ($\text{nmol}\cdot\text{cm}^{-2}$) u sledovaných genotypů řepy	54
Graf 11: Změny obsahu karotenoidů ($\text{nmol}\cdot\text{cm}^{-2}$) v závislosti na odrůdě a ontogenetickém vývoji	55
Graf 12: Celkový obsah karotenoidů ($\text{nmol}\cdot\text{cm}^{-2}$) u sledovaných genotypů řepy	56
Graf 13: Změny maximálního kvantového výtěžku fluorescence v závislosti na odrůdě a ontogenetickém vývoji.....	57
Graf 14: Průměrné hodnoty maximálního kvantového výtěžku fluorescence u sledovaných genotypů řepy	57
Graf 15: Změny potenciální účinnosti fluorescence v závislosti na odrůdě a ontogenetickém vývoji	58
Graf 16: Průměrné hodnoty potenciální účinnosti fluorescence u sledovaných genotypů řepy	59
Graf 17: Změny osmotického potenciálu (MPa) v závislosti na odrůdě a ontogenetickém vývoji	60
Graf 18: Průměrné hodnoty osmotického potenciálu (MPa) u sledovaných genotypů řepy	60

