

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra botaniky a fyziologie rostlin



**Česká zemědělská
univerzita v Praze**

**Vliv paracetamolu na primární metabolismus juvenilních
rostlin kukuřice**

Bakalářská práce

Autor práce: Miroslav Jozífek

Obor studia: Rostlinná produkce

Vedoucí práce: Ing. Jiří Kudrna

Konzultant: doc. Ing. František Hnilička, Ph.D.

© 2021 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Vliv paracetamolu na primární metabolismus juvenilních rostlin kukuřice" 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 30. 4. 2021

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval doc. Ing. Františkovi Hniličkovi, Ph.D.
a Ing. Jířímu Kudrnovi za jejich ochotu, pomoc a odborné vedení mé bakalářské práce.

Vliv paracetamolu na primární metabolismus juvenilních rostlin kukuřice

Souhrn

Cílem této bakalářské práce bylo sledovat vliv rozdílných koncentrací paracetamolu (APAP) na primární metabolismus kukuřice seté (*Zea mays* L.). Sledována byla čistá fotosyntéza, efektivita využití vody a parametry fluorescence. Hydroponický pokus byl založen v částečně řízených skleníkových podmínkách. Schéma pokusu zahrnovalo šest variant: kontrolní K (0 mg l⁻¹ APAP), P1 (200 mg l⁻¹ APAP), P2 (400 mg l⁻¹ APAP), P3 (600 mg l⁻¹ APAP), P4 (800 mg l⁻¹ APAP) a P5 (1000 mg l⁻¹ APAP). Rostliny byly na začátku pokusu zalaty stejným množstvím (15 l) destilované vody, stresovaným rostlinám bylo přidáno odpovídající množství léčiva dle varianty. Pokus byl zahájen ve fázi 3 pravých listů (13 BBCH) a uskutečnilo se celkem 6 měření: 0, 1, 3, 7, 10 a 14 dní po zahájení. Rostliny kukuřice byly po 8 dnech od založení přihnojeny Hoaglandovým živným roztokem s přidavkem mikroelementů podle Bensona. Po celou dobu pokusu byla rovněž doplňována chybějící destilovaná voda, způsobená transpirací a evaporací, na původní objem.

Rychlost výměny plynů byla měřena nedestruktivní metodou pomocí infračerveného analyzátoru plynů LCpro+. Z naměřených výsledků vyplývá, že k poklesu čisté fotosyntézy došlo u všech stresovaných variant. Výjimku tvořila varianta P1 (200 mg l⁻¹ APAP), která měla tendenci zvyšování jako kontrolní varianta, ale po 7. dni pokusu došlo ke snížení. Rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší průměrnou naměřenou hodnotou čisté fotosyntézy kukuřice činil 0,9 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹ (8,09 %) a byl naměřen mezi variantami K (0 mg l⁻¹ APAP) a P5 (1000 mg l⁻¹ APAP). U rychlosti transpirace taktéž došlo k poklesu, a to u všech variant. Rozdíl mezi nejvyšší (0,90 mmol H₂O m⁻² s⁻¹) a nejnižší (0,60 mmol H₂O m⁻² s⁻¹) průměrnou rychlostí transpirace činil 33,33 % a byl naměřen mezi variantami K a P5.

Efektivita využití vody (WUE) byla vypočtena z čisté fotosyntézy a transpirace. Všechny pozorované rostliny, ke kterým byl aplikován paracetamol, vykazovaly zvýšení WUE. Největší zvýšení bylo sledováno u varianty P1 (200 mg l⁻¹ APAP), oproti kontrole došlo ke zvýšení o 5,72 (10⁻³), tedy o 31,52 %.

Parametry fluorescence byly měřeny nedestruktivní metodou pomocí fluorometru OS5p+. Z naměřených výsledků je patrné, že maximální kvantový výtěžek fluorescence (F_v/F_m) u všech stresovaných variant vždy klesl a poté se držel na stejné úrovni s menšími výkyvy. Rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším průměrným naměřeným poměrem fluorescence F_v/F_m kukuřice činil 0,037 (4,67 %). Obdobný vývoj hodnot jako u poměru F_v/F_m byl sledován i u poměru fluorescence chlorofylu variabilní k fluorescenci minimální (F_v/F₀). Rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším průměrným naměřeným poměrem fluorescence F_v/F₀ kukuřice činil 0,871 (22,68 %). U obou poměrů byl tento největší rozdíl mezi kontrolní variantou K (0 mg l⁻¹ APAP) a variantou P5 (1000 mg l⁻¹ APAP).

Na základě výsledků tohoto pokusu je patrné, že paracetamol má fyto toxické účinky na kukuřici setou (*Zea mays* L.).

Klíčová slova: kukuřice; xenobiotika; fotosyntéza; transpirace; WUE; fluorescence

The effect of paracetamol on the primary metabolism of juvenile maize plants

Summary

The aim of this bachelor thesis was to observe the effect of different paracetamol concentrations (APAP) on the primary metabolism of maize (*Zea mays* L.). Pure photosynthesis, water efficiency and fluorescence parameters were monitored. The hydroponic experiment was initiated in semi-controlled greenhouse conditions. The experimental scheme included six variants: control K (0 mg l⁻¹ APAP), P1 (200 mg l⁻¹ APAP), P2 (400 mg l⁻¹ APAP), P3 (600 mg l⁻¹ APAP), P4 (800 mg l⁻¹ APAP) and P5 (1000 mg l⁻¹ APAP). At the beginning of the experiment, the plants were watered with the same amount (15 l) of distilled water, the stressed plants were given the corresponding amount of drug according to the variants. The experiment was started in phase 3 true leaves (13 BBCH) and done a total of 6 measurements: 0, 1, 3, 7, 10 and 14 days after the start. Maize plants were fertilized 8 days after establishment with Hoagland's solution with additional microelements according to Benson. The missing distilled water, caused by transpiration and evaporation, was added to the original volume throughout the experiment.

The gas exchange rate was measured by the non-destructive method using an LCpro+ infrared gas analyzer. The measured results show decrease in pure photosynthesis in all stressed variants. The exception was variant P1 (200 mg l⁻¹ APAP), which tended to increase as a control variant, but decreased after 7 days of the experiment. The difference between the highest and lowest average measured value of pure photosynthesis of maize was 0.9 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹ (8.09 %) and was measured between variants K (0 mg l⁻¹ APAP) and P5 (1000 mg l⁻¹ APAP). There was also a decrease in the transpiration rate for all variants. The difference between the highest (0.90 mmol H₂O m⁻² s⁻¹) and the lowest (0.60 mmol H₂O m⁻² s⁻¹) average transpiration rate was 33.33 % and was measured between variants K and P5.

Water use efficiency (WUE) was calculated from pure photosynthesis and transpiration. All observed plants to which paracetamol was applied showed an increase in WUE. The largest increase was observed in variants P1 (200 mg l⁻¹ APAP), compared to control there was an increase of 5.72 (10⁻³), i.e. by 31.52 %.

Fluorescence parameters were measured by the non-destructive method using an OS5p + fluorometer. The measured results show that maximum quantum yield of fluorescence (F_v/F_m) in all stressed variants always decreases and then remained at the same level with smaller fluctuations. The difference between the highest and lowest average measured F_v/F_m maize fluorescence ratio was 0.037 (4.67 %). A similar development of values as for the F_v/F_m ratio was observed for the ratio of chlorophyll fluorescence variable to minimal fluorescence (F_v/F₀). The difference between the highest and lowest average measured F_v/F₀ fluorescence ratio of maize was 0.871 (22.68 %). In both ratios, the largest difference was between control variant K (0 mg l⁻¹ APAP) and variant P5 (1000 mg l⁻¹ APAP).

Based on the results of this experiment, it is apparent that paracetamol has phytotoxic effects on maize (*Zea mays* L.).

Keywords: maize; xenobiotics; photosynthesis; transpiration; WUE; fluorescence

Obsah

1 Úvod	8
2 Cíl a hypotézy práce.....	9
3 Literární rešerše.....	10
3.1 Botanické zařazení	10
3.1.1 Rozdělení	10
3.2 Původ a využití	12
3.2.1 Historie pěstování	12
3.2.2 Využití	14
3.2.3 Pěstební plochy v ČR.....	16
3.2.4 Pěstební plochy ve světě.....	17
3.3 Biologická charakteristika	18
3.3.1 Morfologie	18
3.4 Hybridy	19
3.4.1 GMO kukuřice	21
3.5 Xenobiotika.....	22
3.5.1 Organická xenobiotika v rostlině.....	22
3.6 Léčiva	24
3.6.1 Kontaminace vody léčivy	24
3.7 Stres u rostlin.....	26
3.7.1 Definice rostlinného stresu	26
3.7.2 Stresové faktory	26
3.7.3 Reakce rostlin na stres	28
4 Metodika	30
4.1 Pokusný materiál.....	30
4.2 Založení pokusu.....	30
4.3 Metody měření fyziologických charakteristik.....	31
4.3.1 Parametry fluorescence chlorofylu F_v/F_m a F_v/F_0	31
4.3.2 Rychlost výměny plynů	32
4.3.3 Efektivita využití vody	32
5 Výsledky.....	33
5.1 Fluorescence chlorofylu	33
5.1.1 Maximální kvantový výtěžek fluorescence (F_v/F_m).....	33
5.1.2 Potenciální účinnost fluorescence (F_v/F_0).....	35
5.2 Výkon čisté fotosyntézy (P_n)	37
5.3 Rychlost transpirace (E).....	39
5.4 Efektivita využití vody (WUE).....	41

6	Diskuze	42
6.1	Fluorescence chlorofylu	42
6.1.1	Maximální kvantový výtěžek fluorescence (F_v/F_m).....	42
6.1.2	Potenciální účinnost fluorescence (F_v/F_0).....	43
6.2	Čistá fotosyntéza.....	43
6.3	Rychlost transpirace	44
6.4	Efektivita využití vody (WUE).....	45
7	Závěr.....	46
8	Literatura.....	47
8.1	Internetové zdroje	53
9	Samostatné přílohy	I

1 Úvod

Kukuřice setá (*Zea mays* L.) je celosvětově velmi významná plodina. Jedná se o jednu z nejpěstovanějších plodin na světě. Mezi obilovinami zaujímá první místo s nejobjemnější produkcí zrna.

Díky jejím vlastnostem má obrovský potenciál. Vzhledem ke globálnímu oteplování má mezi ostatními plodinami výhodu. Jedná se o rostlinu s cyklem C4, což ji předurčuje k dobrému hospodaření s vodou a využívání sluneční energie. Proto se z původně nepříliš rozšířené plodiny stala plodina pěstovaná v podstatě na celém světě.

Využití kukuřice seté je všestranné, ať už jako krmivo hospodářských zvířat, přes výrobu potravin, nebo při výrobě biologicky rozložitelných plastů až po její využití jako energetické plodiny v bioplynových stanicích. Výhodou výroby krmiva z kukuřice je její snadná silážovatelnost, díky dostatku vodorozpustných sacharidů a nízkému obsahu dusíkatých látek, a proto se stala nejpoužívanějším objemným krmivem u skotu. Z výše uvedených použití vyplývá, že se opravdu jedná o důležitou rostlinu dnešní doby a jsou na ni kladeny vysoké nároky na výnos. Výnos kukuřice zaleží na mnoho faktorech, například lze uvést vodní režim, živiny v půdě, sluneční záření, tlak chorob a škůdců, agrotechniku, ale i škodlivé látky, mezi které patří například rezidua léčiv.

Léčiva jsou nezbytnou složkou moderní medicíny při léčbě a prevenci různých chorob. Současně však představují širokou skupinu moderních kontaminantů povrchových vod. Jejich spotřeba stále stoupá. Zvýšenou spotřebu můžeme vidět v nárůstu lidské populace, civilizačních nemocí a v současné době je ještě více navýšena s ohledem na pandemii Covid-19.

Valná většina léčiv v podobě reziduí odchází z lidského těla a dostává se do odpadní vody a do čističek odpadních vod (ČOV), ve kterých ve většině případů nejsou odbourány. Z vodních zdrojů pomocí závlahy nebo v podobě kalů z ČOV se pak dostávají na zemědělskou půdu a mohou ohrožovat bezpečnost potravin. Tato rezidua mají schopnost přetrvávat v půdě i po delší dobu, a tak dochází k jejich hromadění. Skutečnost nálezů léčiv a syntetických hormonů v povrchových vodách je daní současné vyspělé společnosti.

Kontaminace pomocí léčiv, ale i ostatních polutantů jako jsou třeba rezidua pesticidů představují riziko nejen pro životní prostředí, ale i pro rostliny a necílové organismy. Vedlejší efekty léčiv na lidský organismus jsou dobře prostudované, ale rostlinám se větší pozornosti dostává až v současnosti. Xenobiotika v životním prostředí působí na rostliny změnou jejich fyziologických procesů a morfologie.

2 Cíl a hypotézy práce

Kontaminace vody a půdy rizikovými látkami, jakými jsou např. léčiva, představuje značné nebezpečí nejenom pro životní prostředí, ale také pro kvalitu a bezpečnost potravin. Ve většině případů rezidua léčiv nejsou odbouratelná v čističkách odpadních vod, a tak se dostávají do vodních zdrojů, které mohou být využitelné pro závlahu.

Cíl práce je:

- a) sledovat vliv rozdílných koncentrací paracetamolu na aktivitu fotosyntetického aparátu juvenilních rostlin kukuřice seté.

Z navrhovaného cíle práce vyplývají následující hypotézy:

- a) existuje negativní vliv paracetamolu na charakteristiky fluorescence chlorofylu,
- b) ovlivňuje koncentrace paracetamolu výměnu plynů,
- c) ovlivňuje koncentrace paracetamolu efektivitu využití vody.

Paracetamol byl vybrán vzhledem k jeho hojnému použití v léčivech proti bolesti a snížení horečky. Jeho působení bylo sledováno na kukuřici seté, jako jedné z nejvýznamnějších plodin současnosti.

3 Literární rešerše

3.1 Botanické zařazení

Kukuřice (*Zea mays* L.) se v botanickém systému řadí do podtřídy jednoděložných (*Monokotyledonae*), řádu lipnicokvětých (*Poales*), čeledi lipnicovitých (*Poaceae*), skupiny kukuřicovitých (*Maydeae*) (Zimolka 2008). Jako jediná z pěti druhů z rodu *Zea* je využívána k hospodářským účelům. Ostatní 4 druhy jsou *Zea diploperennis* ILTIS, DOEBLEY & GUZMAN, *Zea perennis* (HITCHC.) REEVES & MANGELSD, *Zea luxurians* (DURIEU & ASCH.) BIRD a *Zea nicaraguensis* ILTIS & BENZ a řadí se k teosintům, jednoletým až vytrvalým rostlinám, které mají charakter planých trav a jsou považovány za důležité genetické zdroje (Doebley 2003; Orton et al. 2017).

3.1.1 Rozdělení

Pro kukuřici byla vypracována celá řada dělení (Špaldon 1986; Valíček et al. 2002). Pokud vycházíme z rozdělení, založeného na morfologických a ekologických charakteristikách rostliny od Doebley (2003) tak se rod *Zea* dělí do 5 druhů, kde se dále kukuřice setá (*Zea mays* L.) dělí do 4 poddruhů (*Zea mays* L. subsp. *huehuetenangensis* (ILTIS & DOEBLEY) DOEBLEY, *Zea mays* L. subsp. *mexicana* (SCHRADER) ILTIS, *Zea mays* L. subsp. *parviglumis* ILTIS & DOEBLEY a *Zea mays* L. subsp. *mays*). V zemědělství je ale využíván pouze jeden, a to kukuřice setá pravá (*Zea mays* L. subsp. *mays*), která je v dnešní době intenzivně šlechtěna a rozšířena po celém světě. Zbylé 3 poddruhy jsou řazeny taktéž k teosintům a nejsou pěstovány jako polní plodiny (Orton et al. 2017). Toto rozdělení Doebley (2003) vytvořil na základě studií, nejvýznamnějšími jsou Doebley & Iltis (1980), Iltis & Doebley (1980) a Doebley (1990), ve kterých formoval základní taxonomii rodu *Zea*, kde ho rozdělil do 4 druhů a 4 poddruhů. Později autoři Iltis & Benz (2000) označili populaci druhu *Zea luxurians* (DURIEU & ASCH.) BIRD z Nikaragui jako samostatný druh *Zea nicaraguensis* ILTIS & BENZ a rozšířili tím počet druhů na 5. Ale i v současné době můžeme nalézt nové populace teosintů, jako tomu udává práce Sánchez González et al. (2011), kde byly popsány další tři populace. Od ostatních již popsaných teosintů se ale liší pouze v některých znacích.

Nicméně Valíček et al. (2002) a Špaldon (1963) uvádí, že pro rostlinnou výrobu a praxi je nejvhodnější používat více jak století zažité rozdělení podle Sturtevant (1899), který vychází z velikosti, tvaru a kvality obilku. Kukuřici potom rozdělujeme na následující poddruhy:

Kukuřice pukancová (*Zea mays* L. subsp. *everta* STURT.) - má drobnou, ve většině případech i špičatou obilku a dělí se dále na kukuřici rýžovou s obilkou, která je zakončena zahrocenou špičkou a na kukuřici perlovou s obilkou hladkou a okrouhlou. Pěstuje se omezeně, a to především pro potravinářské účely (Valíček et al. 2002). Při zahřívání zrna se oplodí a osemení trhá a endosperm vychází na povrch (Špaldon 1963).

Kukuřice tvrdá (*Zea mays* L. subsp. *indurata* STURT.) - vyznačuje se oblými obilkami (Valíček et al. 2002) s převažujícím sklovitým endospermem. Prostor mezi škrobovými zrny je z velké části nebo zcela vyplněn prolaminem (zeinem). Tento typ zrna se používá u hybridů na siláž. U skotu tvrdý sklovitý endosperm potřebuje delší dobu na změknutí (bobtnání).

Díky tomu se větší část škrobu stráví až ve střevech, a ne v batoru (Loučka et al. 2015). Mimo využití jako krmivo, ji využíváme také v potravinářství (Valíček et al. 2002).

Kukuřice koňský zub (*Zea mays* L. subsp. *identata* STURT.) - oproti ostatním má větší obilku, její endosperm se vyznačuje moučnatým středem a sklovitými boky. Díky nestejněměrnému vysychání u ní můžeme pozorovat typický tvar obilky, kdy je ve středu propadlá (Valíček et al. 2002). Zrnové hybridní druhy této kukuřice oproti ostatním mají tu výhodu, že u nich dochází k rychlejšímu vysychání zrna a tím i nižší spotřebě energie při sušení. U skotu se naopak převažující měkký moučnatý endosperm stráví z velké části v batoru a zbytek ve střevech (Loučka et al. 2015).

Kukuřice cukrová (*Zea mays* L. subsp. *saccharata* STURT.) – jejím poznávacím znakem je sraštělá obilka v době plné zralosti, která má velké množství dextrinu a bílkovin. Využití nachází hlavně jako zelenina, ale díky vysokému obsahu cukru i pro výrobu alkoholických nápojů.

Kukuřice škrobnatá (*Zea mays* L. subsp. *amylacea* STURT.) - má matné obilky se silně moučnatým endospermem. Co se týče velikosti obilky, tak se objevují v široké škále velikostí, ale i odstínů barev. Používá se především k výrobě škrobu.

Kukuřice vosková (*Zea mays* L. subsp. *ceratina* KULESH) - obilka je velmi podobná kukuřici pukancové. Rozlišovacím znakem je její matný povrch. Endosperm se vyznačuje převládajícím obsahem amylopektinu. Její pěstování není tak rozšířené, ale v menších plochách ji můžeme najít například v jižní a východní Asii.

Kukuřice plevnatá (*Zea mays* L. subsp. *tunicata* STURT.) - kukuřice bez velkého hospodářského využití. Její typickým znakem jsou velké plevy a řadí se mezi nejprimitivnější skupinu (Valíček et al. 2002).

Špaldon (1986) a Loučka et al. (2015) potvrzují výše uvedené rozdělení s rozdílem toho, že poddruhy uvádějí jako konvariety. Špaldon (1986) přidávají ještě další konvariety, které vznikly křížením z výše popsaných. Mezi ně patří **kukuřice polozubovitá** (*Zea mays* L. convar. *aorista* GREBENŠČ.) a **kukuřice škrobocukrová** (*Zea mays* L. convar. *amelyo-saccharata* GREBENŠČ.). Mezi nejvýznamnější patří kukuřice koňský zub a kukuřice tvrdá.

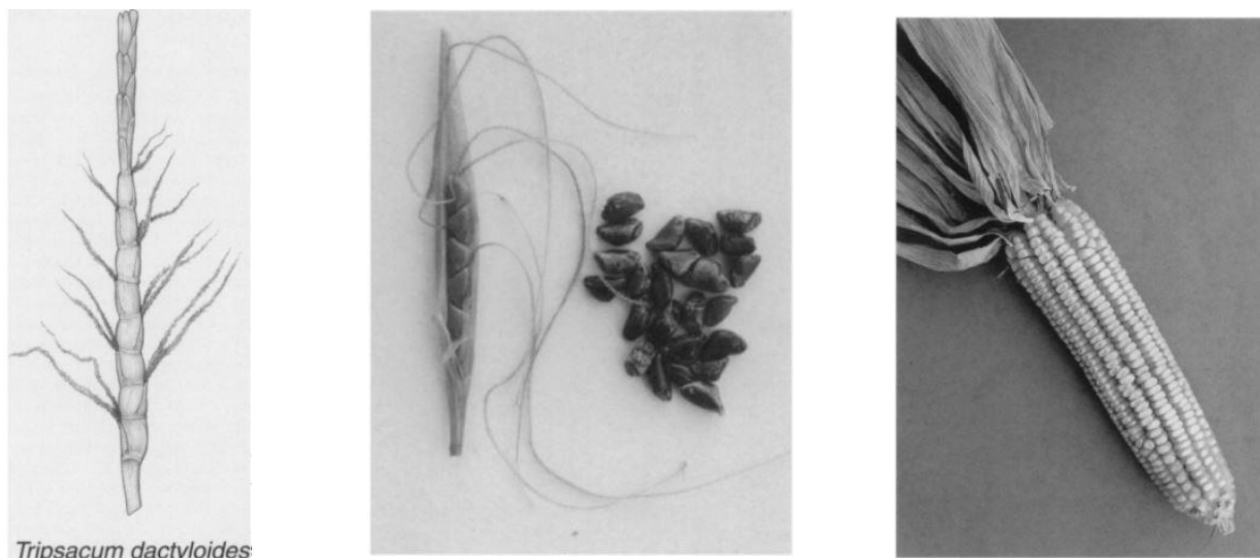
Výše zmíněné rozdělení podle vlastností zrna je v ohledu nižších systematických jednotek variabilní. Někteří autoři používají poddruhy, jiní konvariety a další variety (Špaldon 1986). Nicméně podle nejnovější klasifikace je jediné správné označení jako varieta, tedy zkratkou var. (Turland et al. 2018).

3.2 Původ a využití

3.2.1 Historie pěstování

Kukuřice je řazena mezi jednu z prvních kultivovaných plodin vůbec, kdy se naši předci přesouvali z života lovce a sběrače na život farmáře (Schwanitz 1969; Bruce 2001). K její domestikaci došlo asi před 7000 až 10000 lety (Bruce 2001; Ranum et al. 2014). Této skutečnosti nasvědčují i nálezy z jeskyní v Mexiku. Nalezeny byly pozůstatky kukuřičných vřeten a pylu, které byly podrobeny analýze a zjistilo se, že jsou více jak 6250 let staré (Piperno & Flannery 2001).

Mezi pokusy o objasnění domestikace kukuřice patří například teorie o centru domestikace. Jednou z nich je teorie o 5 centrech domestikace a 4 centrech diverzifikace, kdy se všechna místa nachází v oblastech Mexika a Guatemaly. Druhá z teorií uvádí, že centrum domestikace bylo pouze jedno (De Almeida Silva et al. 2020). Tuto teorii o jednom místě domestikace potvrzuje genetický výzkum, kdy byla nalezena podobnost mikrosatelitů teosinty (*Zea mays* L. subsp. *parviglumis* ILTIS & DOEBLEY) z regionu Balsas River s kukuřicí setou pravou (*Zea mays* L. subsp. *mays*) a stanovují ho jako jejího předka (Matsuoka et al. 2002; Bedoya et al. 2017). Například Eubanks (2001); Ranum et al. (2014) uvádí, že kukuřice vznikla zkřížením a tvorbou hybridu ze dvou planých trav, z teosinty (nejspíše *Zea diploperennis* ILTIS, DOEBLEY & GUZMAN) obrázek 2 a druhu z rodu *Tripsacum* (nejspíše *Tripsacum dactyloides* L.) obrázek 1.



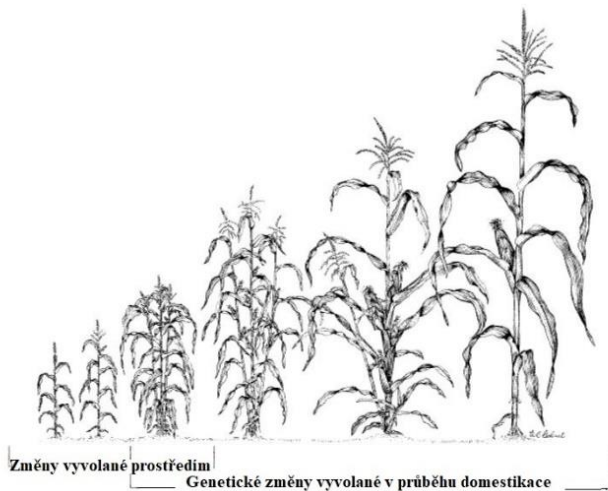
Obrázek 1: zástupce z rodu *Tripsacum* (Eubanks 2001)

Obrázek 2: zástupce teosinty: *Zea diploperennis* (Eubanks 2001)

Obrázek 3: současná podoba kukuřice (Eubanks 2001)

V průběhu více než 1000 let původní obyvatelé Ameriky systematicky sbírali a kultivovali rostliny kukuřice, které by se nejlépe hodily pro lidskou spotřebu. Tímto snažením se jim podařilo vyselektovat kukuřici s většími vřeteny a s více řadami obilek a přetvořili kukuřici do dnešní podoby jakou známe dnes, viz obrázek 4 a 5. Díky této skutečnosti si dokázali vypěstovat dostatek jídla pro celý rok. Nemuseli tak cestovat z místa na místo, ale

mohli zůstat na jednom místě po delší dobu (Ranum et al. 2014). Tyto pozitivní vlastnosti s rostoucími výnosy, změny v morfologii a reprodukci vytvořili z kukuřice druh, který má své velké negativum. Nemůže sama o sobě bez pomoci člověka existovat, jelikož ztratila možnost samovolně rozšiřovat svá semena. Obilky pevně sedí na vřetenu a jsou kryty listeny (Špaldon 1963; Špaldon 1986).



Obrázek 5: zvětšování kukuřice
(upraveno podle Mangelsdorf 1958)



Obrázek 4: Archeologické nálezy
kukuřičných vřeten od nejstarších po
nejmladší (Eubanks 2001)

Ranum et al. (2014) konstatují, že k jejímu rozšíření po celé Střední Americe, Mexiku, Latinské Americe, Karibiku, dnešních spojených státech a Kanadě z centra její domestikace napomohla skutečnost, že z kukuřice se dá vyrobit celá řada pokrmů. Další šíření do celého světa nebylo o nic pomalejší. V 15. století, kdy byla Amerika objevena Evropany, byla kukuřice nalezena na ostrově Kuba. Následně pak dovezena do Evropy při jejich zpáteční cestě. Evropané si z ní z počátku udělali okrasnou rostlinu, nicméně postupem času se z kukuřice i v Evropě stala důležitá hospodářská plodina. Odtud se dále šířila do Itálie, Francie a dalších okolních států. Do Afriky a Asie se dostala pomocí obchodníků, kteří ji tam dovezli při svých cestách.

Historičtí zástupci rodu *Zea* byly nalezeny v různých lokalitách od Severního Mexika přes Střední Ameriku, až k zemím Jižní Ameriky, jako jsou Nikaragua a Guatemala. V těchto oblastech nalezneme širokou škálu klimatických podmínek, průměrná teplota se pohybuje od 15 do 28 °C, průměrný úhrn srážek pak 200 až 2 000 mm, jak uvádí Orton et al. (2017); Hufford et al. (2012). Díky této adaptabilitě může kukuřice růst v různorodých podmínkách a kukuřičná pole můžeme vidět od Ameriky přes Evropu až po Čínu a Indii (Orton et al. 2017).

Kukuřice se k nám dostala nejspíše přes Blízký východ, jmenovitě z Turecka přes Rumunsko a Maďarsko. Nejdříve se začala pěstovat na území Slovenska asi v polovině 18. století, později asi za 50 let se přesunulo pěstování i na jižní Moravu a následně i do Čech. Odtud dále putovala přes Krym až do Ruska (Špaldon 1963; Šašková & Štolfa 1993). Na našem území se ale nevyužívala hned jako polní plodina. Pěstovala se ve sklenicích jako okrasná rostlina. Až teprve okolo roku 1830 se začala pěstovat i na polích. Po první světové válce došlo k velkému nárůstu pěstebních ploch kukuřice, které byly využívány především pro pícninářské

účely. Původ slova kukuřice nejspíše vzniklo ze slova „cucuruza“ rumunského původu. Ale na Moravě je dodnes známa i pod názvem turecká pšenice neboli turkyně (Šašková & Štolfa 1993).

Specifická úprava kukuřice, aby byla její nutriční hodnota využita na plno, se stala její velkou limitací. Nejvýznamnější je niacin a tryptofan. Niacin je obsažen v nedostupné formě pro lidský organismus a prekurzor niacinu tryptofan je zase obsažen v malé míře. Abychom uvolnili niacin z jeho nedostupné formy, tak je potřeba kukuřici vystavit vysokému pH, jak uvádí Ranum et al. (2014). Původní obyvatelé Střední Ameriky proto vymysleli způsob zpracování kukuřice, který se zakládá z namočení a vaření kukuřice ve vodě s přidávkou hydroxidu vápenatého. Takto uvařená kukuřice se vypere v čisté vodě a je připravena na mletí. Tento proces se nazývá „Nixtamalization“ (Caballero-Briones et al. 2000). Důsledkem tohoto snažení je zlepšení výživových hodnot jako je obohacení o vápník, lepší dostupnost vitamínů B, snížení kyseliny fytové, tříslovin a obsahu mykotoxinů. Zároveň dochází ke zlepšení vlastností zrna kukuřice. Kukuřičné zrna se snáze loupe a mele do měkkého a mokrého těsta, které se nazývá masa a vyrábí se z něj například tortilové čipsy (Yaseen et al. 2020). Rajakumar (2000); Ranum et al. (2014) uvádí, že lidé v jiných částech světa tento mezikrok zpracování nepoužívali, proto se v Evropě, Severní a Jižní Americe objevila nemoc zvaná pelagra. Zlom nastal v roce 1941, kdy se v oblastech postižených pelagrou (hlavně na jihovýchodu Spojených států) začal niacin přidávat uměle do potravin vyrobených z kukuřice. V ostatních částech světa nebyla tato nemoc až tak velkou hrozbou, a to nejspíše kvůli lepší vyváženější stravě.

3.2.2 Využití

Kukuřice se společně s rýží a pšenicí řadí mezi nejvýznamnější a nejpěstovanější obiloviny světa (FAO 2020). Mezi její přednosti patří podle Šarapatky et al. (2010) objemná produkce zrna. Pěstování kukuřice na siláž a na zrna patří mezi hlavní dva užitkové směry, jak uvádí Špaldon (1986); Loučka et al. (2015). V současné době pěstování kukuřice na siláž převažuje, nicméně trendem je zvyšovat i pěstební plochy kukuřice na zrna. Mezi další možnosti využití kukuřice patří produkce obnovitelných zdrojů, v potravinářství a v průmyslu (Loučka et al. 2015).

Co se týká kukuřice na zrna, ta je například ve Spojených státech amerických využívána primárně jako přísada do krmných směsí pro hospodářská zvířata, v potravinářství, ale i jako materiál pro výrobu etanolu, jehož výroba se v posledních letech zvyšuje. Vzniklé vedlejší produkty při jeho výrobě jsou zpětně využity jako krmivo (Klopfenstein et al. 2013; Mumm et al. 2014). V potravinářství se využívá buď jako zelenina, kdy se zrna nebo mladé palice kukuřice cukrové sklízí v době mléčné zralosti a následně se zpracovávají uvařením ve slané vodě, nebo se konzervují. Další možností, jak využít celá zrna, je upražení kukuřice pukancové, kterým se získávají pukance pro přímou konzumaci nebo pro následné zpracování (Šašková & Štolfa 1993). Rozemletím zrn získáme kukuřičnou mouku, krupici, klíčky a otruby. Kukuřičnou krupici lze využít jako základ pro výrobu extrudovaných výrobků (Ingr et al. 2001). Z kukuřičné mouky můžeme pak připravit například chléb či kaše (Šašková & Štolfa 1993). U takto vzniklých produktů je výhodou, že mají nízký obsah lepku, a proto se hodí do bezlepkových diet (Loučka et al. 2015). Důležitou roli hraje i klíček, který obsahuje mnoho

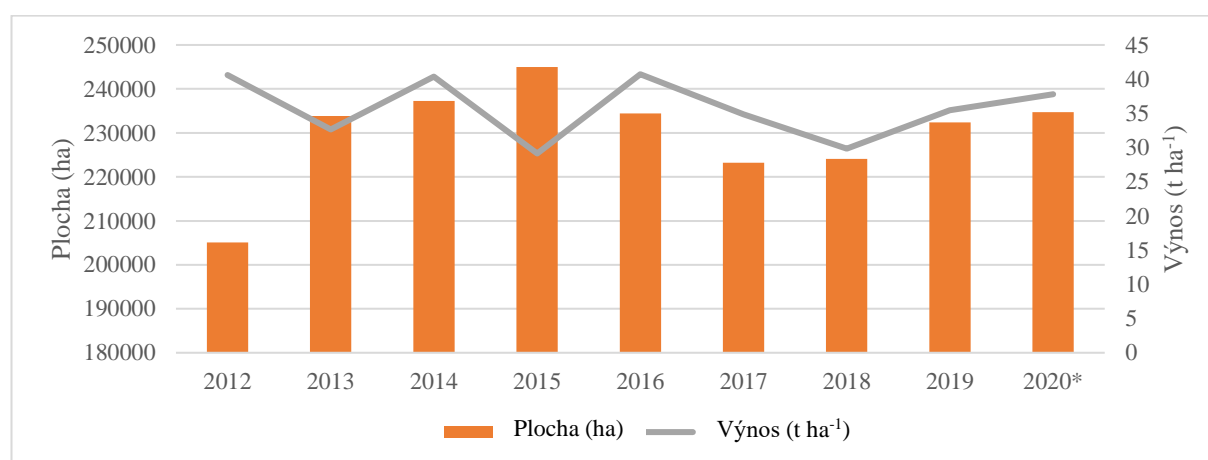
účinných látek. Je ceněný pro jeho obsah tuku (až 35 %), kvůli kterému jsou klíčky využívány pro výrobu oleje. Vzniklé pokrutiny při výrobě potravinářských výrobků jsou využity jako krmivo. Dále je kukuřičné zrnó vhodné i pro výrobu škrobu, kde oproti bramborám má zrnó lepší skladovatelnost (Ingr et al. 2001). Populárním produktem k přímé spotřebě jsou například i kukuřičné lupínky „Corn-flakes“ (Špaldon 1986). Ve farmaceutickém průmyslu je kukuřice využívána jako živné médium při pěstování *Penicillium* sp. Průmyslově se také zpracovává sláma, ze které se vyrábí celulóza a papír. Kukuřičná vřetena jsou pak využita jako výchozí surovina v rámci chemických procesů pro tvorbu umělých vláken (Šašková & Štolfa 1993). Důležitou roli v chemickém průmyslu hraje i kukuřičný škrob s vysokým obsahem amylopektinu, ze kterého se pomocí dalších látek vyrábí obalové materiály. Je snaha nahradit plasty vyrobené z ropy (Qiao et al. 2011). Důsledkem tohoto snažení a vývinu rostlinných plastů jako ekologické alternativy nám potvrzují testy O'Brine & Thompson (2010), kdy bylo prokázáno, že sáček vyrobený z kukuřičného škrobu, rostlinných olejů a kompostovatelných esterů je možné v marinním prostředí rozložit v rámci 40 testovacích týdnů, zatímco klasický sáček vyrobený z ropy by se rozložil minimálně. Kukuřičné zrnó se používá díky vysokému obsahu škrobu také pro výrobu alkoholu a dále pak k výrobě kukuřičné glukózy a sirupu. V neposlední řadě se kukuřičná krupice využívá i pro stavební účely, kdy se smíchá s cementem a sádró (Chloupek et al. 2005). Ve farmacii se klade velký důraz na kukuřičné „vlasy“. Botanicky se jedná o nit'ovité čnělky. Ty mají velkou škálu využití. Používají se jako tradiční lék proti otokům, cystitidě, dně, ledvinovým kamenům a dalším. Má diuretické, antiseptické a antioxidantní účinky (Ebrahimzadeh et al. 2008).

Druhým hlavním užitkovým směrem je pěstování kukuřice na siláž. Ta je výrazným energetickým krmivem pro hospodářská zvířata a patří mezi nejdůležitější krmné plodiny vůbec. Siláž má důležitou stabilizační úlohu v krmných dávkách skotu a řadí se mezi objemné krmivo. Díky moderním způsobům pěstování a volby vhodných hybridů lze dosáhnout velkých výnosů a požadované sušiny (Loučka et al. 2015; Fuksa 2020). Zároveň je řazena také mezi energetické plodiny, které mají dobrou schopnost vytvářet bioplyn (Scarlat et al. 2018; Fuksa 2018), ale i snadnou konzervovatelnost, čímž umožňují nepřerušené využívání hmoty v bioplynových stanicích (Fuksa 2018). Proto je silážní kukuřice v současné době nejvýznamnější cíleně pěstovanou plodinou pro produkci bioplynu v České republice, ale i Evropě (Fuksa 2018; Scarlat et al. 2018).

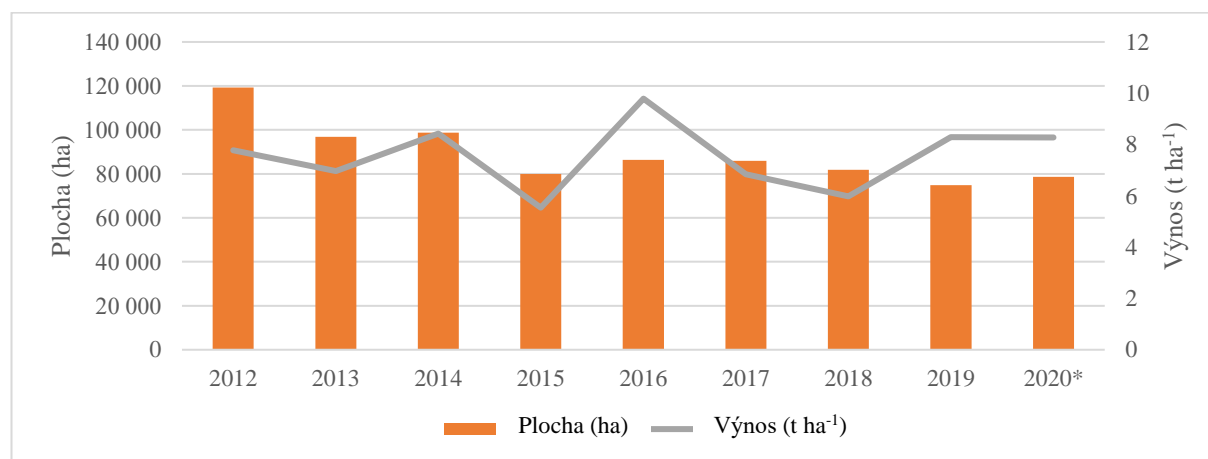
3.2.3 Pěstební plochy v ČR

Dle Českého statistického úřadu (2020a) v roce 2019 byla kukuřice pěstována na celkové osevní ploše 307 219 ha. Z toho kukuřice na zeleno a siláž byla pěstována na 232 392 ha, což je o 8 287 ha více než v roce 2018 a kukuřice na zrno byla pěstována na 74 827 ha, což je o 7 024 ha méně než v roce 2018.

Vývoj osevní plochy a výnosu dokládají níže uvedené grafy (1 a 2). Podle soupisů osevů pro rok 2020 (ČSÚ 2020c) a odhadu sklizně pro rok 2020 (ČSÚ 2020b) lze konstatovat, že kukuřice na zeleno a siláž dosáhne na ploše 234 742 ha při očekávaném hektarovém výnosu 37,81 tun 8 876 tis. tun, což je o 632 tis. tun více než v roce 2019. Kukuřice na zrno byla pěstována na ploše 78 643 ha při odhadovaném hektarovém výnosu 8,28 t by měla dosáhnout výnosu 651 430 t, což je o 31 169 tun více než v loňském roce.



Graf 1: Vývoj produkce kukuřice na zeleno a siláž v ČR 2012–2020 (ČSÚ 2020a; 2020b; 2020c)



Graf 2: Vývoj produkce zrnové kukuřice v ČR 2012–2020 (ČSÚ 2020a; 2020b; 2020c)

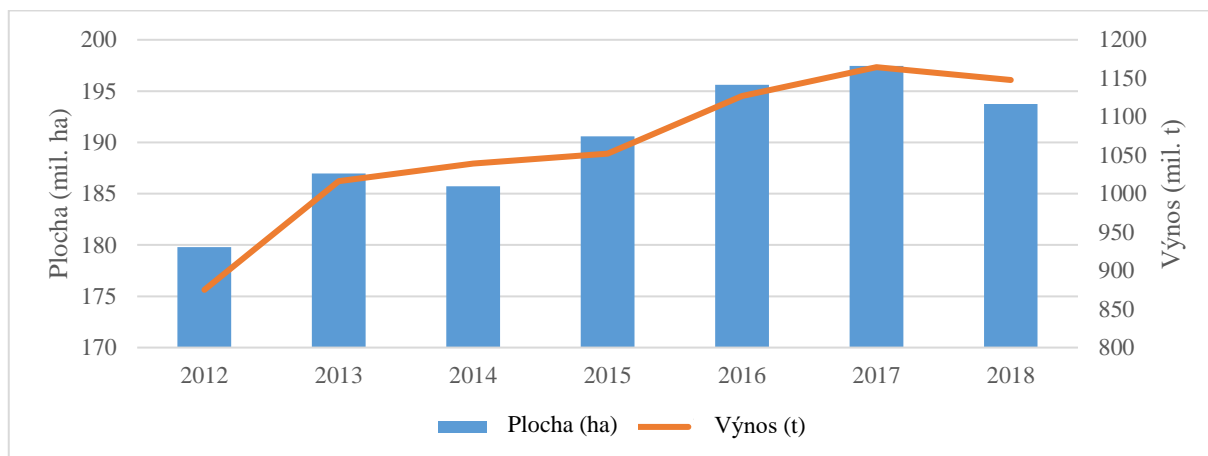
V polovině února roku 2021 vydal ČSÚ konečné údaje pro rok 2020, které upřesňují výše zmíněné odhady. Kukuřice na zeleno a siláž bylo sklizeno 8 832 117 t s průměrným hektarovým výnosem 39,05 t na ploše 226 155 ha. Kukuřice na zrno bylo sklizeno 825 499 t s průměrným hektarovým výnosem 9,46 t na ploše 87 231 ha. Změna oproti odhadu je patrná ve zmenšené ploše silážní kukuřice (ČSÚ 2021). Uvedené rozdíly u definitivních údajů kukuřice oproti

odhadům jsou běžné, zemědělci si často ponechají část kukuřice určené na siláž pro sklizeň na zrno, jak uvádí Kůst & Záruba (2020).

3.2.4 Pěstební plochy ve světě

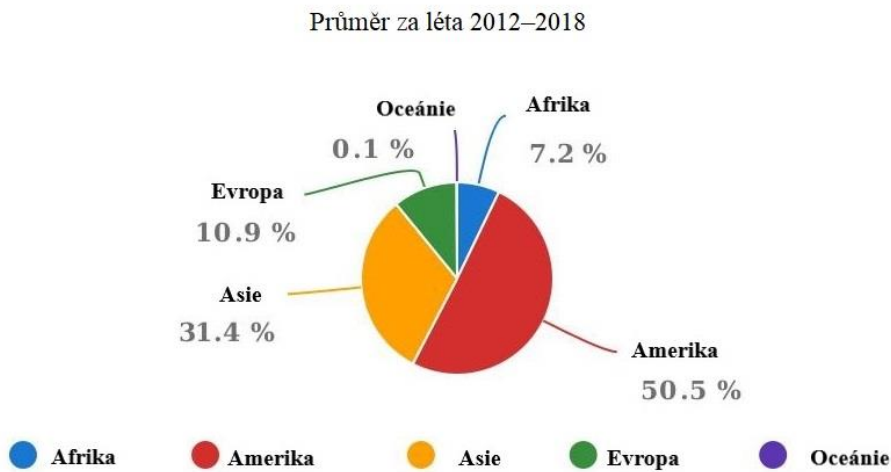
Podle údajů FAO (2020) je kukuřice setá v současné době pěstována téměř po celém světě, začínaje Argentinou na jihu a konče Ruskem na severu. V Grafu 3 je patrný trend zvyšování pěstební plochy a výnosů, i když v roce 2018 se plocha snížila na 193,7 milionů hektarů, což vedlo i ke snížení produkce na 114,8 milionů tun zrna.

Vzhledem ke změně klimatu ve formě globálnímu oteplování mohou pěstební plochy kukuřice stále narůstat (Zimolka 2008).



Graf 3: Vývoj produkce zrnové kukuřice ve světě (FAO 2020)

V Grafu 4 je uveden procentuální podíl jednotlivých světadílů na produkci zrnové kukuřice v letech 2012-2018. Z něho vyplývá že největším producentem je Amerika, která zabírá 50,5 % s průměrnou produkcí 535 milionů tun. Nutno dodat, že značné množství kukuřice je vyprodukováno ve Spojených státech amerických, a to v oblasti kukuřičného pásu (Corn Belt) (Klopfenstein et al. 2013). Za Amerikou na druhém místě je Asie s 31,4% podílem na produkci a po ní další kontinenty jako je Evropa, Afrika a Oceánie.



Graf 4: Podíl na světové produkci kukuřice na zrno (upraveno podle FAO 2020)

3.3 Biologická charakteristika

Kukuřice je teplomilná rostlina původem z tropické a subtropické oblasti Jižní a Střední Ameriky. Proto je náročná na teplotu. Při 8 °C rostlina klíčí a při teplotě 10 °C rostlina vzhází, pro tvorbu generativních orgánů a na kvetení je třeba alespoň 12 °C. Důležité jsou nejen hodnoty teplot, ale i její průběh v období vegetace (Hruška 1962). Podle Špaldon (1986) klíčení můžeme pozorovat i při 5 °C, ale na poli nemůžeme počítat se vzejitím při stupních pod 8 °C. Semeno samo o sobě vydrží mráz až -20 °C. Náchylná je až po vzejití, kdy jí přízemní mrazíky při teplotě -2 °C v rámci několika hodin zahubí. Dlouhotrvající nižší teploty na hranici 10 °C kukuřici škodí. Rostliny zastavují růst a listy žloutnou.

Kukuřice je svým typem fotosyntézy řazena mezi C4 (Skládanka 2006; Loučka et al. 2015; Brant 2020). Nejdříve roste pomalu, ale ke konci vegetace velmi rychle. To jí předurčuje k vyšším výnosům, než mají rostliny typu C3. Kukuřice je typická vysokou rychlostí a účinností fotosyntézy, ale i efektivním využíváním vody (Loučka et al. 2015). Díky těmto vlastnostem je považována za perspektivní plodinu, která se snadno dokáže přizpůsobit podmínkám oteplování evropského klimatu (Brant 2020).

Růst a vývoj rostlin zachycují fenologické fáze. Fenologickou fází (fenofází) se vždy míní konkrétní okamžik ve vývoji rostliny, který jednou nastane a poté pomine (Reitschläger et al. 2014). Fenologická data mají také velký význam v modelování a prognózách výnosu, plánování technologických opatření nebo signalizaci chorob a škůdců (Kožnarová et al. 2012). Výčet fenofází kukuřice je uveden v tabulce I v přílohách.

3.3.1 Morfologie

Kořenová soustava kukuřice proniká do hloubky 1,5 m až 3 m, jejíž převážná část se nachází v orniční vrstvě. Pokud se na stanovišti vyskytuje nízká hladina podzemní vody, tak kukuřice nemá potřebu prokořeňovat tak hluboko a její kořenový systém dosahuje okolo 40 cm (Skládanka 2006). Z nadzemních uzlů stébla se vytvářejí další, tzv. vzdušné kořeny. Slouží rostlině k upevnění (brání proti poléhání) a příjmu vody. Kořeny se nejdříve rozrůstají do hloubky a poté do šířky (Hruška 1962).

Stéblo je plné, válcovité a vzpřímené dosahující délky od 0,6 m až po 6 m. U kukuřice ale obvykle dorůstá 1,5–2,5 m. Počet nadzemních článků stébla je značně variabilní. Pěstované kukuřice mají 8 až 40 článků. Naše pěstované hybridy mají okolo 14–20 článků.

Listy vyrůstají z nadzemních uzlů. Jsou vstřícné s paralelními žilkami. Listová čepel je tenká, mělce zvlněná s vystupující hlavní žilkou (Špaldon 1986). Svrchní část listu je drsná s trichomy, naopak spodní část je hladká (Zimolka 2008). Listová pochva, která obepíná článek nad uzlem, ze kterého vyrůstá a je silná a pevná (Špaldon 1986). Délka čepele je 30-90 cm, šířka je 1,5 až 12 cm. Počet listů je závislý na odrůdě a počtu kolének na stéble.

Kukuřice je jednodomá rostlina s jednopohlavnými květy (Zimolka 2008). Samčí květenství se nazývá lata. Je umístěno na vrcholové části rostliny a ukončují tím vývin stébla.

Samičí květenství se nazývá palice. Jedná se o nerozpadavý klas se ztloustlou hlavní osou (vřetenem), který je obalen listeny (Špaldon 1986). Do podélně uspořádaných jamek vřetena přisedají klásky. Klásky jsou dvoukvěté, z nichž je pouze jeden plodný (Skládanka 2006).

Blizny vycházející z listenů jsou velmi dlouhé (Špaldon 1986). Laty dozrávají dříve než palice a jejich prášení probíhá čtyři až pět dní. Jejich pyl je přenášen větrem (Zimolka 2008).

Plodem je obilka, která je oproti ostatním obilkám obilovin podstatně větší. Počet řad zrn v palici je vždy sudý (Špaldon 1986). Obilka je bez rýhy, tvar a charakter endospermu závisí na varietě. Hmotnost tisíce semen (HTS) je 300–350 g (Skládanka 2006).

3.4 Hybridy

V současné době je ve Státní odrůdové knize zapsáno 362 hybridů kukuřice (ÚKZÚZ 2020). Hybridy můžeme rozdělit podle různých kritérií.

Číslo ranosti je charakterizované tzv. číslem FAO (Food and Agriculture Organization). U nás zkoušené a pěstované hybridy mají číslo FAO v rozmezí 190–400 (Třináctý et al. 2012). Obecně platí, že čím vyšší je toto číslo, tím delší má hybrid vegetační dobu. Rozdíl o deset čísel FAO odpovídá jednomu procentu sušiny, což obvykle znamená posun ve sklizňové zralosti o jeden až dva dny (Loučka et al. 2015). Výpočet hodnoty se zakládá na zjištění středního obsahu sušiny v době zralosti kukuřice a porovnáním s kontrolními, již dříve registrovanými hybridy (Třináctý et al. 2012). Vzhledem k rozdílným vegetačním dobám se hybridy rozdělují do 4 skupin podle čísla ranosti viz tabulka 1.

ÚKZÚZ vyjadřuje číslo ranosti odrůd kukuřice dle metodiky vypracované německým Spolkovým odrůdovým úřadem (BSA). Z té vyplývá, že u zrnových hybridů se číslo FAO určuje ze sušiny palice. U silážních hybridů se odvozuje od sušiny celé rostliny, neboť rychlost dozrávání palice a ostatních částí rostliny může být u různých typů hybridů rozdílná. Hybridy pro kombinované využití mají pak čísla ranosti dvě (Povolný & Vacek 2019). V současnosti je populární využívat rané hybridy, a to jak na siláž, tak na zrno (Fuksa 2020).

Sortiment ranosti	Číslo FAO pro hybridy na zrno	Číslo FAO pro hybridy na siláž
Velmi raný (VR)	do 250	do 220
Raný (R)	250–300	220–260
Středně raný (SR)	300–350	260–300
Středně pozdní (SP)	nad 350	nad 300

Tabulka 1: Zařazení hybridů do sortimentu ranosti (Povolný & Vacek 2019)

Při výběru hybridu musíme zohlednit i délku vegetačního období. Pro tyto účely nám slouží ukazatel sumy efektivních teplot (SET), která se získá součtem denních středních teplot, od kterých je odečtena fyziologická minimální teplota 6 °C. SET je u hybridů geneticky daná. Na základě znalosti teplotního úhrnu pro optimální stadium zralosti je možné sestavit poměrně přesnou prognózu doby sklizně silážní kukuřice pro určitou oblast a stanoviště (Loučka et al. 2015). Podle nároku na SET jsou jednotlivé hybridy rozděleny do několika skupin. Silážní hybridy mají požadavky na SET v rozmezí 1350 °C (nejranější) až 1650 °C (pozdní). Přesněji hodnota SET 1400 °C je potřebná pro silážní zralost hybridů s FAO 200–230 a při 1600 °C dosahují silážní zralosti hybridy s FAO 300–350 (Třináctý et al. 2012).

Hybridy dále můžeme rozdělit podle rychlosti dozrávání rostlin na hybridy typu stay-green a hybridy rychle dozrávající tzv. tradiční. Zde se nelze spoléhat na číslo FAO, neboť mají svá určitá specifika. Stay-green mají dlouhé zelené rostliny až do sklizňové zralosti,

odolnější vůči patogenům rodu *Fusarium*, vyšší výnos zrna a delší časový úsek pro sklizeň. Naopak rychle dozrávající hybridy se vyznačují rychlým nárůstem sušiny, velmi častým zasycháním zbytku rostliny a menší odolností vůči houbovým chorobám. To je důvod, proč jsou doporučovány do chladnějších a vlhčích stanovišť. U tohoto typu hybridu se jedná o dozrávání zbytku rostliny, ne zrna. Rychlé dozrávání zrna, resp. rychlá ztráta vody v zrnu, se označuje jako „Dry-down“ (DD) efekt, což lze pozorovat u zrnových hybridů typu koňský zub. Nicméně v sortimentu můžeme najít i jejich přechodné formy (Loučka et al. 2015).

V současné době převažují dva hlavní typy podle zrna a jejich mezitypy. Rozlišují se podle rozdílného poměru tvrdého (sklovitého) a měkkého (moučnatého) endospermu na Flint a Dent hybridy (Třináctý et al. 2012; Loučka et al. 2015).

Zrna typu flint jsou převážně tvořena sklovitým endospermem. V trávícím ústrojí skotu po požití potřebuje nejprve změkknout a nabobtnat. To má za následek nižší degradovatelnost škrobu v batoru. Zbývající škrob je degradován až ve střevěch (Třináctý et al. 2012; Loučka et al. 2015). Hybridy typu flint jsou doporučovány do chladnějších oblastí, neboť se vyznačují zpravidla nižším číslem FAO (Třináctý et al. 2012). Jejich vyšší podíl prolaminu v zrnu, který je hůře degradovatelný, umožňuje lepší skladovatelnost. Tyto hybridy jsou především pěstované pro silážní účely (Loučka et al. 2015).

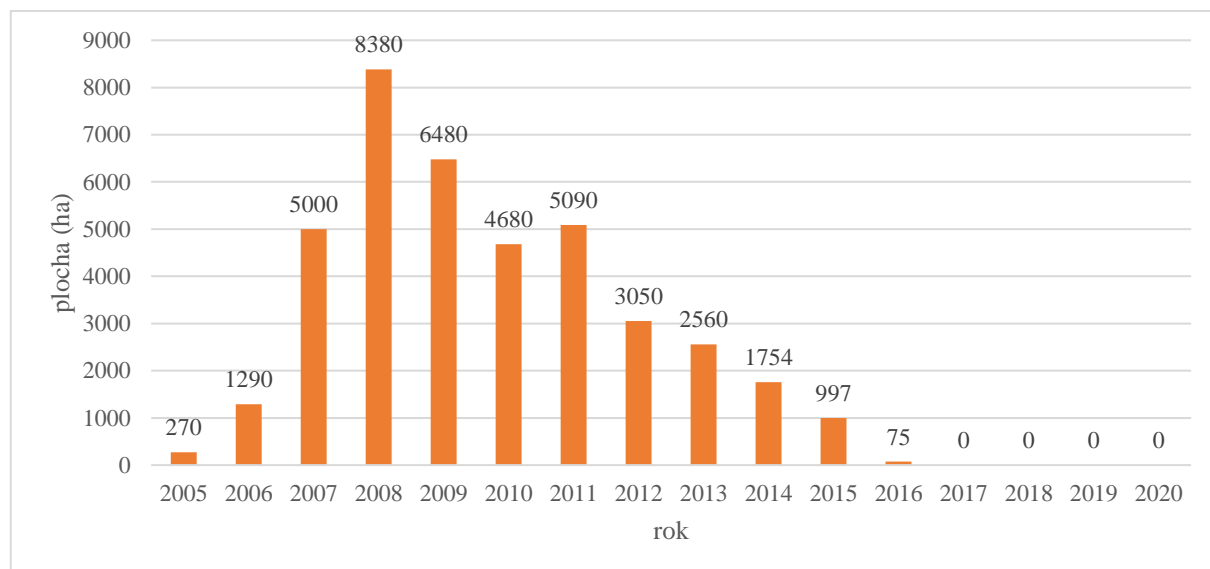
Zrna typu dent (koňský zub) jsou převážně tvořena moučnatým endospermem, který je na rozdíl od předchozího typu lépe degradován v batoru. Vyznačují se vyšším číslem FAO, vyšším výnosovým potenciálem, ale také horší chladuvzdorností (Třináctý et al. 2012). Moučnatý endosperm, který vyplňuje primárně střed zrna až k jeho vrcholu, způsobuje rychlejší vysychání zrna než u typu flint a formuje typickou prohlubeň uprostřed zrna. Díky této vlastnosti potřebují menší energii k dosušení zrna. Rychlejší zrání a vysychání zrna komplikuje sklizeň těchto hybridů pro silážní účely, neboť sklizňové okno s optimálním procentem sušiny trvá pouze krátkou dobu. Uplatňují se tedy především jako hybridy na zrno (Loučka et al. 2015).

Definujeme tři typy hybridů, a to Sc, Dc a Tc hybridy. Dvouliniový Sc hybrid neboli single cross hybrid vzniká křížením dvou imbredních linií (A x B). Vyniká vysokým heterózním efektem, genetickou a fenotypovou vyrovnaností. Jejich další výhodou je snadné šlechtění a tím i levnější osivo oproti ostatním (Ehrenbergerová 2014). Nevýhodou je menší adaptabilita a náchylnost k napadení patogeny. Z hlediska typů hybridů zaujímají největší podíl (Fuksa 2020). Dvojitý Dc hybrid neboli double cross vzniká křížením dvou dvouliniových hybridů (A x B) x (C x D) (Ehrenbergerová 2014). Tyto hybridy jsou méně vyrovnané a mají nižší heterozní efekt, ale jejich výhodou je vysoká adaptabilita a stabilita v produkci (Loučka et al. 2015). Poslední je tříliniový Tc hybrid neboli triple cross, který vzniká křížením dvouliniového hybridu s jednou linií (A x B) x C) (Ehrenbergerová 2014). Tyto hybridy jsou fenotypově méně vyrovnané než Sc hybridy. Dále rozlišujeme tzv. modifikované hybridy, kdy se ke křížení používají linie odvozené od stejného původu, tzv. sesterské (MSc, MTc) (Loučka et al. 2015). Obecně platí, že čím jsou rodičovské genotypy vzdálenější, tím je vyšší stupeň heterozygotnosti u výsledného hybridu, který tak poskytuje vyšší výnos. Mimo jiné je v hybridech možné kombinovat i vyšší rezistenci k chorobám, a tak dosáhnout komplexnější rezistence než u linií (Ehrenbergerová 2014).

3.4.1 GMO kukuřice

Ze 362 registrovaných odrůd ve Státní odrůdové knize je 6 geneticky modifikovaných odrůd (GM) (ÚKZÚZ 2020). U nás všechny registrované GM hybridy mají odolnost vůči zavíječi kukuřičnému (Bt-kukuřice, geneticky modifikovaná odrůda MON-00810-6). Je prokázán pozitivní vliv na snížení mykotoxinů v kukuřičné siláži či zrna, pokud larvy nepoškozují rostlinu, neboť mechanickým poškozením umožňují houbovým chorobám snazší napadení rostlin kukuřice (Fuksa 2020).

Co se týká historie pěstování GM kukuřice na našem území viz graf 5, tak největší výměra (8 380 ha) a počet pěstitelů (167) v ČR byl v roce 2008. V následujících letech docházelo ke snižování ploch, kdy v roce 2016 bylo oseto GMO kukuřicí pouze 75 ha. Po roce 2016 se přestala pěstovat úplně. Je to dáno v důsledku přísných administrativních a organizačních povinností, negativní medializace GMO plodin, včetně negativního přístupu k GMO v mléku. V období, kdy byla GM kukuřice pěstována, byla většina produkce využívána jako krmivo pro hospodářská zvířata a menší část jako surovina pro výrobu bioethanolu nebo bioplynu a nesloužila pro přímé potravinářské účely (Kůst & Záruba 2020; Fuksa 2020).



Graf 5: Plochy GMO kukuřice na území ČR (MŽP 2020)

3.5 Xenobiotika

Podle Sakaji et al. (2004) považujeme za xenobiotika cizí látky, které mají vliv na zdraví. Důležitou skupinou jsou syntetické kontaminanty, do které řadíme mimo jiné i kontaminanty vzniklé ve farmaceutickém průmyslu jako jsou léčiva a hormony. Autoři Singh et al. (2016) definují xenobiotika jako jakoukoliv chemickou nebo jinou látku, kterou rostliny nemohou využít v procesech získávání energie a běžně se v ekosystémech nenachází. Orcutt et al. (2000) uvádí, že mezi základní zdroje potenciálních fytotoxických elementů řadíme přírodní, zemědělské, průmyslové a komunální zdroje. Do přírodního prostředí je vypouštěno tisíce polutantů. Kromě léčiv mezi zdroje tohoto znečištění řadíme spalování fosilních paliv, pesticidy, koksové pece, elektrotekutiny, chlorované parafíny používané v chemickém průmyslu a při výrobě plastů, detergenty, barviva a mnoho dalších. Opomenout se nedají také rizikové látky, které mají na rostliny prokázané negativní účinky.

3.5.1 Organická xenobiotika v rostlině

Organická xenobiotika mohou do rostliny proniknout pomocí jejího kořenového systému, stonku, listy, průduchy (stomaty), ale i přes plody, semena nebo kůru. Do symplastu se dostávají nejčastěji difuzí nebo aktivním transportem. V rostlinném těle jsou pak transportovány v xylému nebo floému (Orcutt et al. 2000). Intenzita procesu absorpce kontaminantů je z velké části dána charakterem xenobiotické látky (Orcutt et al. 2000; Kvesitadze 2013), závisí na rozpustnosti kontaminantu, molekulové hmotnosti, koncentraci, polaritě, pH, teplotě nebo vlhkosti půdy (Kvesitadze & Kvesitadze 2011).

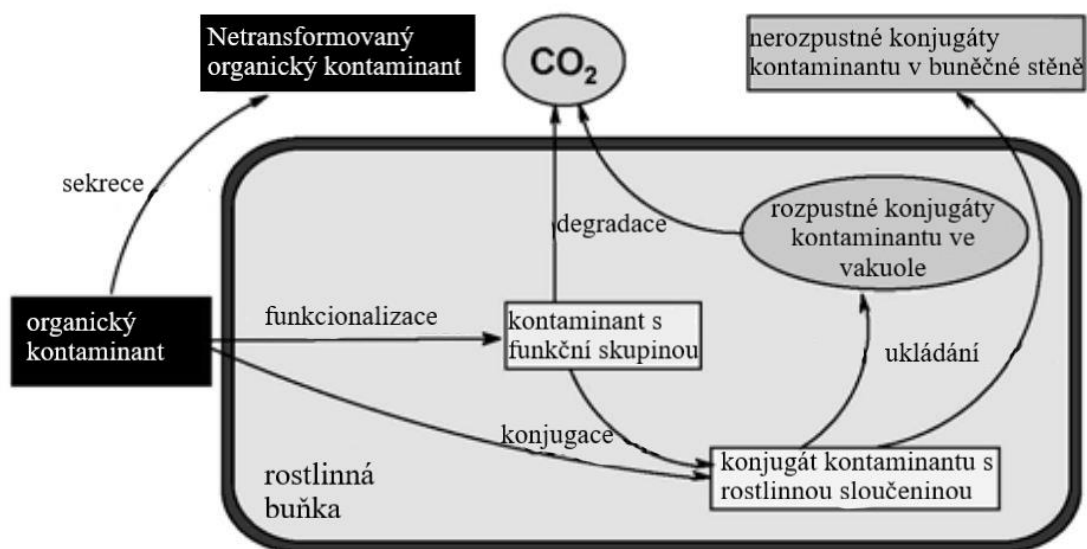
Průnik přes list je uskutečněn přes průduchy nebo pokožku listu (epidermis). Pomocí průduchů se do listů dostávají plyny a kapaliny. Propustnost pro plyny závisí na stupni otevření průduchů a pro kapaliny prostupnost závisí na zvlhčení povrchu listu, povrchovém napětí kapaliny a morfologii průduchů (Kvesitadze & Kvesitadze 2011). Díky struktuře samotného listu je pronikání přes jeho pokožku komplikovanější. Polutant musí nejprve překonat hydrofóbní voskovou vrstvu (kutikulu), dále pak pektinovou vrstvu, buněčnou stěnu a nakonec samotnou cytoplazmatickou membránu buňky (Orcutt et al. 2000). Většina toxických sloučenin proniká do listu jako roztoky (pesticidy, kapalné aerosoly atd.) (Kvesitadze & Kvesitadze 2011).

Pronikání přes kořeny se podstatně liší (Orcutt et al. 2000; Kvesitadze & Kvesitadze 2011). Kontaminanty procházejí pouze přes nesuberizované buněčné stěny bez kutikuly. Kořeny proto absorbují látky mnohem méně selektivně než listy. Samotná absorpce probíhá ve dvou fázích. Nejprve se polutanty pomocí difúze dostávají z okolního prostřední do kořene a poté se postupně distribuují a hromadí v pletivech (Kvesitadze & Kvesitadze 2011).

Proti toxickým vlivům proniklého organického kontaminantu rostlina vyvinula specifický mechanismus. Řadí se sem sekrece, degradace nebo konjugace a zabudování xenobiotika do rostlinné biomasy. Sekrece xenobiotika skrz apoplast bez jakékoli transformace je ojedinělá a nastává pouze v případech dobré pohyblivosti kontaminantu a při jeho vysoké koncentraci. Nejčastěji je kontaminant přijat a zařazen do vlastního průběhu metabolismu rostliny a detoxifikován (Kvesitadze 2013).

System metabolismu a detoxikace (obrázek 6) se značně podobá systému živočichů a je podle Sandermann (1994) dělen do tří fází. První fází je funkcionalizace, která se skládá z oxidace, redukce a hydrolytických reakcí, jednotlivé reakce záleží na charakteru a chemickém složení proniklého kontaminantu. Při této fázi hydrofobická molekula organického xenobiotika získává hydrofilní funkční skupinu (hydroxylovou, karboxylovou, amino a další). Díky této skupině se kontaminantu zvyšuje afinita k enzymům katalyzující další přeměnu látek. Druhá fáze, fáze konjugace, ve které nastává navázání kontaminantu s funkční skupinou na makromolekuly buňce vlastní (sacharidy, aminokyseliny, organické kyseliny, lignin atd.). Tato fáze je využívána v procesech fytořemediace. Fáze ukládání (rozdělovací) je poslední ze tří fází. V této fázi jsou konjugáty (metabolity) vzniklé v předchozích fázích uloženy do buňky. Místo uložení se liší podle charakteru metabolitu (Orcutt et al. 2000; Kvesitadze 2013). Rozpustné konjugáty toxických xenobiotik jsou uloženy uvnitř buňky, a to primárně ve vakuole. Zatímco nerozpustné konjugáty jsou akumulovány do buněčné stěny. U rozpustných látek se jedná o metabolity navázané na peptidy, cukry nebo aminokyseliny. U nerozpustných je to lignin, škrob, pektin, celulóza nebo xylan (Kvesitadze 2013).

Kvesitadze (2013) uvádí, že po průniku toxických molekul do rostliny, je značná část okamžitě konjugována a pouze malá část (0,1–5 %) je ihned plně degradována. Výrazná degradace kontaminantů je totiž vícestupňová. Jedná se především o oxidativní enzymatickou degradaci, neboť přímá degradace se týká pouze malého množství toxických látek. Většina konjugovaných kontaminantů (80 %) se v podobě endogenních metabolitů, zmiňovaných výše, hromadí ve vakuolách a apoplastu. Jejich následná degradace nastupuje se zpožděním.



Obrázek 6: Hlavní pochody transformace organického kontaminantu v rostlinných buňkách (upraveno podle Kvesitadze 2013)

3.6 Léčiva

V posledních letech se výskyt léčiv v životním prostředí považuje za celosvětový problém (Alkimin et al. 2019; Streit et al. 2021). Do léčiv, která jsou považována za kontaminanty, řadíme nesteroidní protizánětlivé léky, antibiotika, pohlavní hormony, antiepileptika, antidepresiva, hypolipidemika, beta-blokátory, antineoplastika a kontrastní látky (Santos et al. 2010). Jedny z nejvíce používaných léčiv jsou podle Alkimin et al. (2019) diclofenac a kyselina salicylová. Prescott (2010) uvádí, že mezi velice rozšířená analgetická léčiva se také považuje paracetamol (acetaminophen), který se stal první volbou proti bolesti u řady pacientů. Vliv léčiv na životní prostředí a na lidské zdraví není dobře prozkoumaný, a proto budí velkou pozornost (Streit et al. 2021).

Léčiva mají prokázaný vliv na fyziologické a biochemické procesy v rostlině. Toto dokazují například Zezulka et al. (2019) ve svých experimentech, kde léčiva (diclofenac a paracetamol) mají vliv na všechna vývojová stadia rostliny. Nejvíce byly rostliny negativně ovlivněné ve fázi klíčení, tvorby kořenů a růstu mladých rostlin kukuřice. Pino et al. (2016) pozorovali negativní vliv na kořenovou soustavu a hypokotyl lociky seté a fotosyntetický aparát řas. V jejich experimentu bylo použito 15 nejběžnějších léčiv včetně paracetamolu. Kummerová et al. (2016) ve svých pokusech na okřehku menším prokázali zvýšenou produkci reaktivních forem kyslíku (ROS), reaktivního dusíku (RNS) a snížení fotosynteticky aktivních pigmentů při aplikaci paracetamolu a diclofenacu.

3.6.1 Kontaminace vody léčivy

Léčiva jakožto představitelé široké skupiny moderních kontaminantů povrchových vod se do toků dostávají zejména z lidských sídel a nemocnic. V povrchových vodách České republiky můžeme najít širokou škálu farmak z různých funkčních skupin, např.: antiflogistika, antirevmatika (ibuprofen, diclofenac), antiepileptika, psychofarmaka (carbamazepine, cafeine), rentgenkontrastní radiodiagnostické látky (iopromide, iopamidol), sulfonamidová chemoterapeutika (sulfamethoxazol), antibiotika (erythromycin, peniciline G), antihypertenziva, diuretika, betablokátory (hydrochlorthiazid, metoprolol tartrate, furosemid). Pozitivní nálezy léčiv a syntetických hormonů v povrchových vodách jsou cenou, kterou platíme za současnou vyspělou společnost. Maximální koncentrace některých účinných látek se ve vyčištěné odpadní vodě pohybují v jednotkách či desítkách $\mu\text{g l}^{-1}$ (Liška et al. 2014).

Jak již bylo výše uvedeno, tak nejvýznamnějším zdrojem kontaminace léčiv je komunální odpadní voda. Mnoho farmak není lidským a zvířecím organismem úplně stráveno a metabolizováno. To má za následek zvýšený obsah léčiv a jejich metabolitů v odpadních vodách, do kterých se dostávají močí (Zhang et al. 2008; Li et al. 2014).

Čističky odpadních vod (ČOV) většinu farmak nedokáží plně odbourat. Jednou z možností pro cílené odbourání některých farmak je použití bioreaktoru, do kterého jsou aplikovány mikroorganismy schopné léčiva odbourat. Podle typu léčiva může být rozloženo na přijatelné formy nebo až na oxid uhličitý a vodu (Zhang et al. 2008). Dalším způsobem, jak rozložit a zabránit úniku léčiv do životního prostředí je fytoremediace. Ta je založena na vystavění kořenových čističek, do kterých přitéká znečištěná voda a na druhém konci odtéká voda čistá. Rostliny a mikroorganismy v tomto prostředí pomáhají odbourávat nebo

zabudovávat xenobiotika do svého těla. V poslední době se jedná o celkem populární způsob, neboť je finančně a technologicky přijatelný (Vaněk et al. 2010; Li et al. 2014). Vaněk et al. (2010) dále uvádí, že tímto způsobem lze odstranit i paracetamol. Jako vhodné plodiny Vaněk et al. (2010) uvádí lupinu bílou, která během dvou dní naakumulovala/degradovala všechny paracetamol o koncentraci 30 mg na jeden litr vody.

Kontaminace vody léčivý má značný význam v suchých aridních podmínkách, kde je velká část vody z čističek odpadních vod využívána jako závlaha (Sato et al. 2013; Margenat et al. 2017). Mezi země s největším využitím odpadní vody na závlahu patří jednoznačně Izrael, kde je využíváno až 70 % odpadní vody pro tyto účely (Sato et al. 2013). Jak dokazují Hammad et al. (2018), tak kukuřice zalévaná takto kontaminovanou vodou ukládá léčiva do svého těla a následně i do zrna, které může být využito ve výživě zvířat a lidí. Jedná se tedy o jednu z možných cest vystavení nežádoucího působení reziduí farmak na zvířata a lidskou populaci.

3.7 Stres u rostlin

3.7.1 Definice rostlinného stresu

Levitt (1980) odvodil pojem biologický stres na základě fyzikálního pojmu stresu z mechaniky. Podobnost těchto dvou termínů vychází z faktu, že pokud se aplikuje určitá síla na elastický materiál, tak účinky síly budou vratné, ale pokud ji použijeme na plastický materiál, tak to bude mít za následek poškození. Obdobně to funguje u rostlin. Je-li rostlina vystavena na krátkou dobu nepříznivým podmínkám, jako je například vysoká teplota, nedostatek vody, tak poškození bude mít minimální následky, nebo budou vratné obdobně jako u plastického materiálu. Na druhou stranu, pokud rostlinu vystavíme vysokým dávkám nepříznivých podmínek, tak to bude mít za následek trvalé následky nebo až odumření (Kranner et al. 2010).

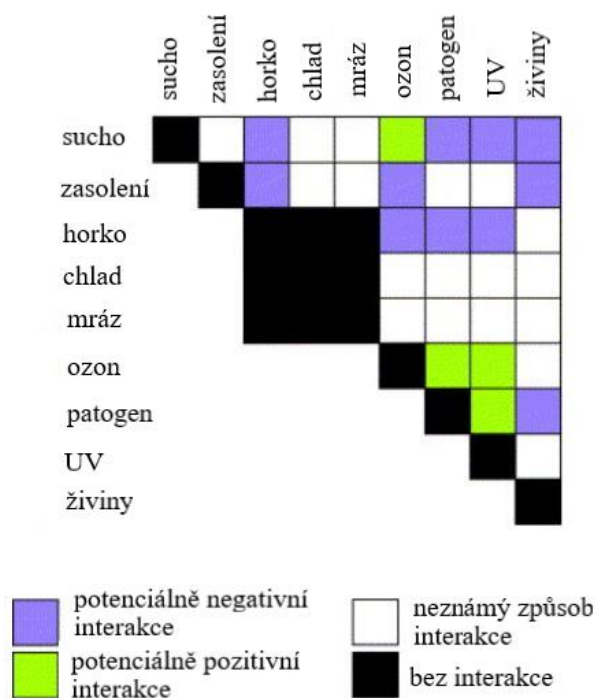
Larcher (1987) definuje rostlinný stres jako stav, kdy jsou na rostlinu kladené zvýšené nároky, které z počátku vedou k destabilizaci její funkcí, následované vyrovnáním a ukončením zlepšením rezistence.

Mosa et al. (2017) shodně s Larcher (1987) uvádí, že stres rostlin je stav, kdy rostlina roste v neideálních podmínkách se zvýšenými nároky na ni. Účinky těchto stresů mohou vést k nedostatkům v růstu, výnosu plodin, trvalému poškození nebo smrti, pokud stres překročí limity tolerance rostlin.

Hnilička & Hniličková (2016) rozumí pod pojmem rostlinný stres funkční stav živého organismu, který je vystaven mimořádným podmínkám vnějšího prostředí (stresorům). Na takovéto podmínky rostlina reaguje obrannými stresovými reakcemi za účelem zachování homeostázy a zabránění poškození nebo smrti organismu.

3.7.2 Stresové faktory

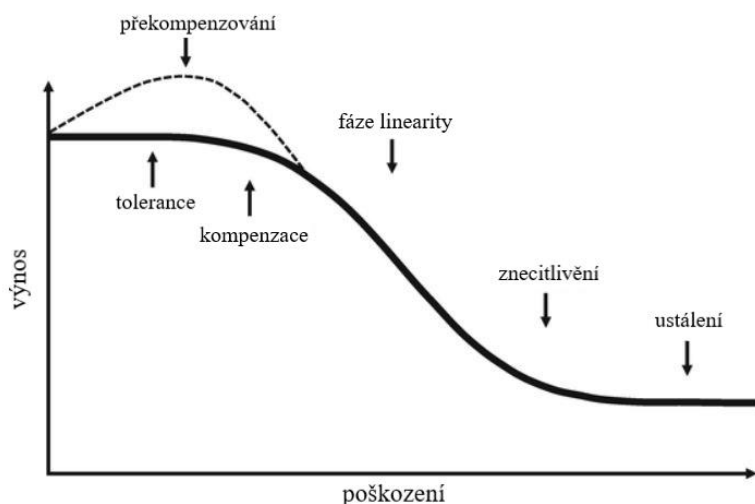
Stresové faktory (stresory) se podle Cerkal (2011) rozdělují na dvě hlavní skupiny, abiotické a biotické stresory. Lichtenthaler (1998) rozděluje stresory ještě podle jejich původu na přirozené a antropogenní. Stresová fyziologie rostlin je mnohem komplikovanější než stresová fyziologie živočišná. Nehledě na podmínky ekosystému, ve kterém se daná rostlina vyskytuje (přirozené nebo umělé), musíme brát v úvahu skutečnost, že na rostliny nepůsobí jednotlivé stresory odděleně, ale vždy v kombinaci (Mittler 2006; Hnilička & Hniličková 2016; Lamers et al. 2020). Vliv jednotlivých stresových faktorů a jejich možné kombinace biotických a abiotických zemědělsky významných stresových faktorů jsou uvedeny v obrázku 7. Vyplývá potenciální interakce v podobně barevných změn. Například pokud je rostlina vystavena delšímu období sucha, bude oslabená, a proto náchylnější na napadení patogeny. Efekt vzájemných kombinací stresorů závisí na jejich relativní hodnotě (silný versus slabý), na rostlinném druhu, stáří rostliny, na vývoji patogenů a hostitele (Mittler 2006). Další komplikace nastává při působení stresorů, které mnohdy nepůsobí na celou rostlinu, ale pouze na její část (Hnilička & Hniličková 2016).



Obrázek 7: Mittlerova matice (upraveno podle Mittler 2006)

Abiotické stresory rozdělujeme na teplotu (vysokou a nízkou), vodu (nadbytek a nedostatek), záření (světelné, UV a ionizující), chemickou (soli, pH, toxické látky) a mechanickou zátěž (vítr, částice, tlak). Poslední kategorií stresorů jsou ostatní stresory (elektromagnetické a elektrické pole) (Cerkal 2011). Tyto faktory ovlivňují rostlinu po celou dobu jejího růstu (Mosa et al. 2017). Při poškození stresem dochází k uvolnění specifických signálních molekul. Patří mezi ně Ca^{2+} , ROS (reaktivní formy kyslíku) a mitogenem aktivované proteinové kinázy (MAPK), stejně jako fytohormony auxin, ABA, gibbereliny, etylen a brassinosteroidy. Rostliny jsou schopné používat tyto signální složky k vyvolání transkripčních a fyziologických reakcí specifických pro daný typ stresoru (Lamers et al. 2020). Signalizace stresu pomocí vápníku (Ca^{2+}) hraje v abiotickém stresu důležitou roli, neboť signalizuje reakci na teplo, chlad, dotek, sůl, přemokření, hypoxii, osmotický stres a sucho (Kudla et al. 2018).

Mikroorganismy, hmyz, plevely nebo jiné kultivované plodiny mohou způsobit rostlině různá poškození, která vedou ke snížení výnosu a kvality viz obrázek 8. Vývoj křivky můžeme rozdělit na šest částí, jako je tolerance (nedochází ke snížení výnosu při poškození), překompenzování (dochází k navýšení výnosů), kompenzace (začíná snižování výnosů), fáze linearity (prudké snižování výnosů), znecitlivění (pomalejší snižování výnosů) a fáze ustálení (trvalé snížení výnosů oproti výnosům bez stresů) (Peterson & Higley 2000). Biotický stres způsobený mikroorganismy je převážně ve formě chorob nebo parazitismu. Hmyz a zvířata působí fyzické poškození, které může vést k úplné destrukci rostliny. Rostliny si způsobují stres pomocí kompetičního boje nebo fytoparazitismu (Mosa et al. 2017).

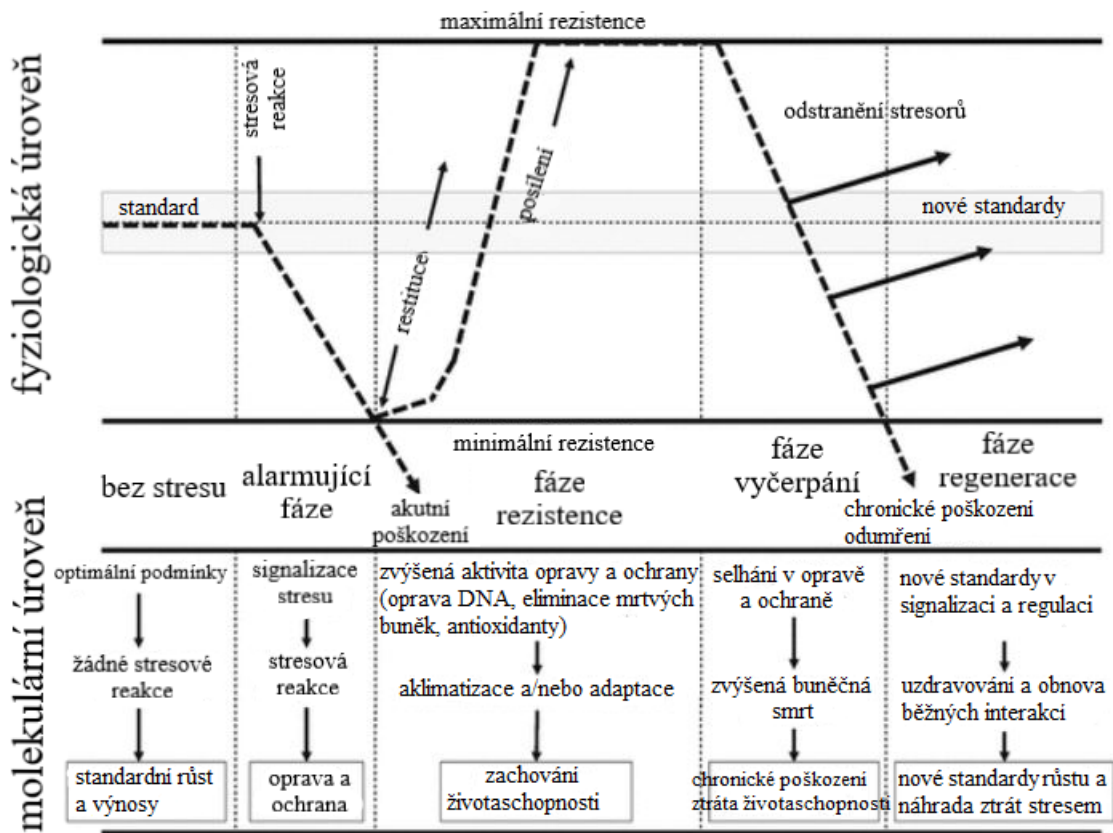


Obrázek 8: Křivka popisující vztah poškození (stresu) a výnosu (upraveno podle Peterson & Higley 2000)

3.7.3 Reakce rostlin na stres

Mosa et al. (2017) vycházející primárně z publikací Lichtenthaler (1996) a Kranner et al. (2010) uvádí, že obecně lze reakci rostlin na stres rozdělit do 4 hlavních fází, které jsou založeny na trvání a intenzitě stresoru, jak je patrné z obrázku 9. První z nich je poplachová (alarmující) fáze. Ta nastává okamžitě po začátku působení stresoru, který rostlině změní optimální podmínky růstu. Další je fáze rezistence někdy označována jako restituční fáze, ve které se rostlina adaptuje, léčí a posiluje kvůli stálému působení stresoru. To ve finále vede k přizpůsobení fyziologických standardů rostliny, které jsou optimální pro stresové podmínky růstu. Nutno dodat, že každá rostlina má svoje rezistentní maximum, které se nedá nijak překonat. Pokud stresor působí na rostlinu příliš dlouho, nebo ve vysokých dávkách, než rostlina zvládne snést, tak se přesouvá do další fáze. Třetí fází je tzv. fáze vyčerpání, někdy označována jako finální fáze, kdy rostlina ztrácí vitalitu. Nezlepšení podmínek růstu vede k závažnému poškození rostliny a následnému odumření. Míra poškození závisí na druhu, orgánu, času a dávce. Pokud je stresor odstraněn před úplným úhynem rostliny, tak rostlina může regenerovat a obnovit svoje fyziologické standardy. Tímto se dostává do poslední fáze, a to fáze regenerační. Trvalá poškození vzniklá v předchozí fázi nemohou být už navrácena. Nové fyziologické standardy také už nebudou stejné. Budou se nacházet někde mezi rezistenčním minimem a maximem. Kde přesně budou se odvíjí od předchozí fáze a časem působení stresoru.

Tyto fáze můžeme pozorovat i na molekulární úrovni, kdy v bezstresových optimálních podmínkách nejsou pozorovány žádné abnormality v růstu ani ve výnosech. V alarmující fázi dochází k signalizaci stresu a vyvolání odpovídající stresové reakci, která stimuluje rostlinu k opravě a ochraně. Pokud nedojde k úhynu rostliny hned v počátcích působení stresu, tak rostlina vstupuje do fáze rezistence. Zde na molekulární úrovni probíhá např. oprava DNA, eliminace odumřelých buněk nebo produkce antioxidantů, což vede rostlinu k zachování životaschopnosti. Pokud dojde k selhání v ochraně a opravě, tak rostlina vstupuje do fáze vyčerpání, která má za následek chronické poškození, zvýšenou buněčnou smrt, a nakonec i ztrátu životaschopnosti. Při odstranění stresoru se rostlina dostává do fáze regenerace, ve které vznikají nové standardy v signalizaci stresu a stresových reakcí, dochází k regeneraci a navrácení běžných interakcí v rostlině.



Obrázek 9: Fáze rostlinného stresu (upraveno podle Mosa et al. 2017)

4 Metodika

Ve skleníkovém hydroponickém pokusu, jak je patrné z fotografie 1, byl sledován vliv různých koncentrací paracetamolu v živném roztoku na rostliny kukuřice seté. V juvenilních fázích vývoje rostlin byly měřeny parametry fluorescence, výkon čisté fotosyntézy, rychlost transpirace a vypočtena efektivita využití vody.



Fotografie 1: Pokusné rostliny v 1. den měření (autor 2020)

4.1 Pokusný materiál

Jako pokusný materiál byla zvolena kukuřice setá odrůda RGT Sixxtus od společnosti VP Agro. Jedná se o raný dvouliniový hybrid s číslem FAO 270 registrovaný v roce 2011. Typ zrna je uveden jako mezityp až koňský zub s rovnoměrným dozráváním. Používá se jak pro pěstování na siláž, tak na pěstování na zrno. Má vysokou odolnost vůči poléhání a dobré uvolňování vody ze zrna. V kategorii rané zrno ÚKZÚZ mezi lety 2011–2017 dosáhl hektarového výnosu 13,2 t = 103 % kontroly (VP AGRO 2020).

4.2 Založení pokusu

Pokus byl založen v částečně řízených podmínkách skleníku KBFR FAPPZ, při teplotě 25 °C ve dne a 19 °C v noci, relativní vlhkosti od 65 % až 85 % a při přirozeném světelném režimu (14 hodiny světlo, 10 hodin tma). Pokusné rostliny byly pěstovány hydroponicky. Objem každé pěstební vany činil 15 l. Pokusné rostliny byly pěstovány v rockwoolových kostičkách, kdy do každé pěstební kostky bylo vloženo jedno semeno kukuřice.

Pokus zahrnoval 6 variant: kontrolní a 5 stresovaných. Kontrolní varianta (K) byla v průběhu celého pokusu pěstována v destilované vodě s přídavkem Hoaglandova živného roztoku doplněného o mikroelementy podle Bensona (viz příloha II), u stresovaných rostlin byl objem vody a hnojiva totožný, lišil se pouze v koncentracích paracetamolu (APAP): P1 (200 mg l⁻¹), P2 (400 mg l⁻¹), P3 (600 mg l⁻¹), P4 (800 mg l⁻¹) a P5 (1000 mg l⁻¹). Léčivo bylo

získáno od firmy Sigma-Aldrich spol. s r.o. a jeho roztok byl připraven dle pokusů Zezulka et al. (2019).

Rostliny kukuřice byly po 8 dnech od založení jednorázově přihnojeny Hoaglandovým živným roztokem doplněného o mikroelementy podle Bensona, aby se zabránilo stresu způsobeným nedostatkem živin. Po celou dobu pokusu byla rovněž doplňována destilovaná voda, způsobená transpirací a evaporací, na původní objem.

Pokus byl zahájen ve fázi 3 pravých listů (BBCH 13) a uskutečnilo se celkem 6 měření: 0, 1, 3, 7, 10 a 14 dní po zahájení pokusu.

4.3 Metody měření fyziologických charakteristik

4.3.1 Parametry fluorescence chlorofylu F_v/F_m a F_v/F_0

Parametry fluorescence chlorofylu F_v/F_m a F_v/F_0 byly měřeny nedestruktivní metodou pomocí fluorometru OS5p+ a to vždy po předchozím zatemnění místa měření. Doba zatemnění pomocí plastových klipsů byla stanovena na 20 minut. Přístroj OS5p+ je přenosný fluorometr založený na pulsní amplitudové modulaci. Skládá se z programovatelné konzole s LCD displejem a měřicího přístroje schopného vyvolávat různé druhy záření jako je slabé modulované, saturační nebo aktinické záření (Opti-Sciences 2021).

Podle Roháček & Barták (1999) a Roháček (2002) dojde po uplynutí doby zatemnění listů k reoxidaci (otevření) všech reakčních center fotosystému II (PSII) a poté ozáření listů slabým modulovaným zářením za změřeni minimálního výtěžku fluorescence v temnotně adaptovaném stavu F_0 . Tato hodnota je konstantní, nezávislá na fotosyntetické aktivitě. Následným ozáření listů krátkým saturačním světlem dojde k opětovné redukci elektronových akceptorů (uzavření) PSII, vzrůstu fluorescence chlorofylu a změřeni maximální fluorescence v temnotně adaptovaném stavu F_m . Rozdíl mezi F_m a F_0 je označován jako maximální výtěžek variabilní fluorescence chlorofylu v temnotně adaptovaném stavu (F_v). S využitím naměřených hodnot F_m , F_0 a vypočítaného F_v lze vypočítat poměry:

F_v/F_m nazývaný jako maximální kvantový výtěžek fluorescence

F_v/F_0 nazývaný jako potenciální účinnost fluorescence

Parametry fluorescence byly měřeny na 5 rostlinách v rámci varianty, kdy na jedné rostlině bylo umístěno 5 klipsen.

4.3.2 Rychlost výměny plynů

Rychlost výměny plynů byla měřena nedestruktivní metodou pomocí infračerveného analyzátoru plynů LCpro+ (ADC Bioscientific Ltd.). LCpro+ je gazometrický přenosný přístroj používaný k měření výkonu čisté fotosyntézy, transpirace a stomatální vodivosti. Dále přístroj umožňuje měřit teplotu vzduchu, listu, atmosférický tlak a intenzitu osvětlení. Přístroj se skládá z měřicí hlavičky a hlavní programovatelné konzoly s LCD displejem. V měřicí hlavičce s listovou komorou je možnost nastavení PAR světla v rozsahu 0–2000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ a možností regulovat teplotu s možností ± 14 °C od teploty okolí. Rozsah měření CO_2 je 0–3000 ppm, pro H_2O 0–75 mbar. Rychlost transpirace a fotosyntézy se vypočítá z průtoku a změny koncentrace plynů mezi výstupem a vstupem z komory (ADC BioScientific 2013). Rychlost výměny plynů byla měřena v dopoledních hodinách při hustotě ozáření 650 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ a teplotě 25 °C. Hodnoty byly pomocí přístroje automaticky ukládány v intervalech 1 minuty. Rychlost výměny plynů byla sledována na základě pokusů Holá et al. (2010).

4.3.3 Efektivita využití vody

Efektivita využití vody z anglického „water-use efficiency“ (WUE) byla vypočítána pomocí naměřených dat výměny plynů. Podle Šantrůček (2010) se efektivita využití vody rostlinou definuje jako množství uhlíku zabudovaného do těla rostliny na jednotkové množství (molekula, gram, kilogram atd.) rostlinou spotřebované vody. WUE lze měřit několika metodami zahrnujícími přímá i nepřímá měření. Jednou z nich je měření okamžité WUE, která se vypočítá jako poměr výkonu čisté fotosyntézy a transpirace (A/E) a znázorňuje, kolik uhlíku rostlina získala na jednotkové množství vydané vody, viz práce Holá et al. (2010).

$$\text{WUE} = \frac{A}{E} (10^{-3}), \text{ kde}$$

A je výkon čisté fotosyntézy [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]

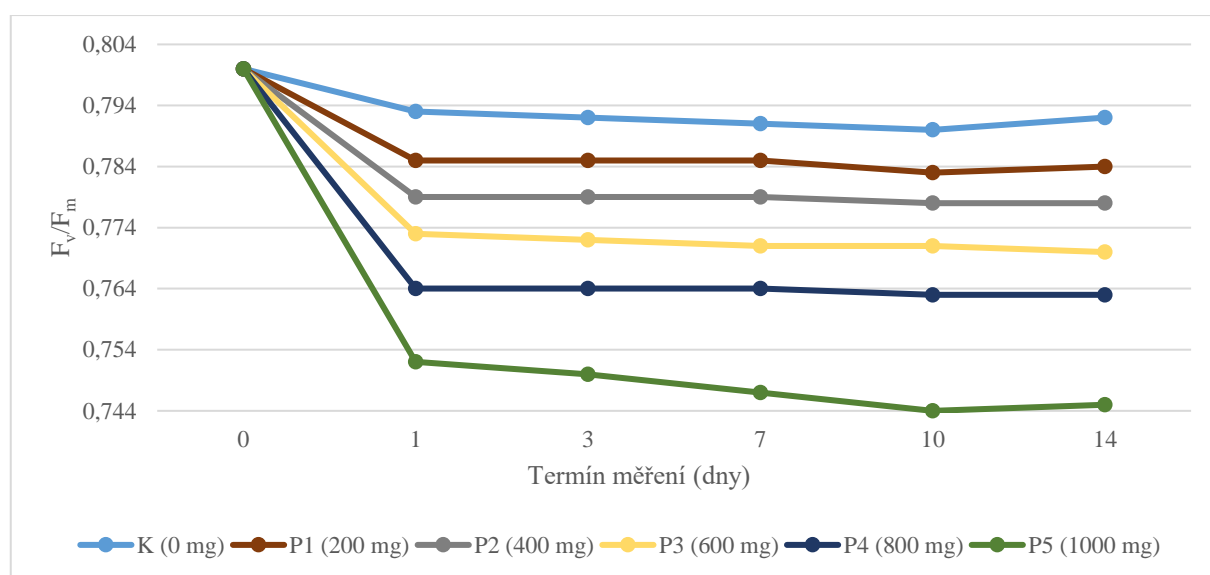
E je intenzita transpirace [$\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]

5 Výsledky

5.1 Fluorescence chlorofylu

5.1.1 Maximální kvantový výtěžek fluorescence (F_v/F_m)

Poměr fluorescence chlorofylu F_v/F_m rostlin kukuřice seté v závislosti na působení stresu paracetamolem (APAP) je uveden v grafech 6 a 7. V grafu 6 jsou uvedeny změny F_v/F_m v závislosti na čase a dávce paracetamolu. Z něho vyplývá, že nejvyšší poměr (0,800) byl naměřen na začátku pokusu. Naopak nejnižší (0,744) byl naměřen po 10 dnech u varianty P5 s nejvyšší dávkou paracetamolu (1000 mg l^{-1}). Rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším naměřeným poměrem F_v/F_m kukuřice činil 0,056, tedy 7 %.



Graf 6: Poměr fluorescence chlorofylu F_v/F_m v rámci ontogeneze a působení času

Poměr F_v/F_m se u kontrolních rostlin snížil již 1. den po zahájení pokusu z 0,800 na 0,793. Uvedené snížení trvalo až do 10. dne, kdy byl naměřen nejnižší poměr 0,790. V posledním termínu měření pokusu (14. den) se zvýšil o 0,02 na konečný poměr 0,792.

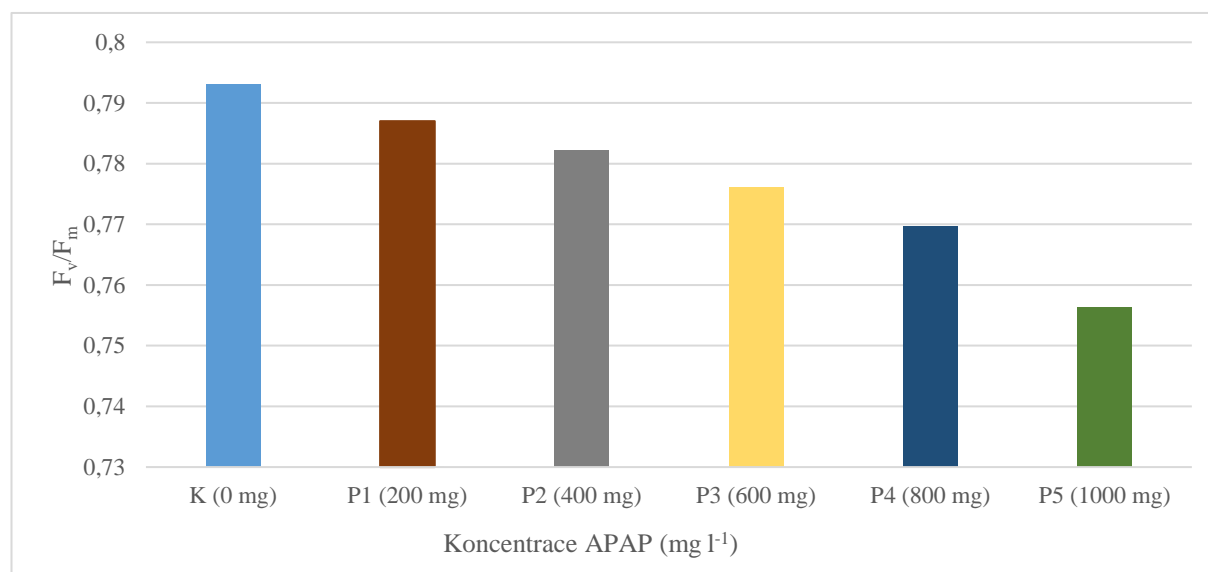
Poměr F_v/F_m u varianty P1 (200 mg APAP) se jako u kontrolní varianty snížil 1. den pokusu na hodnotu 0,785. Následující 2 termíny měření (3. a 7. den) zůstal tento poměr shodný na hodnotě poměru 0,785. Snížil se až 10. den pokusu, kdy byl stanoven na 0,783. Ke konci pokusu (14. den) se poměr neprůkazně zvýšil a dosáhl hodnoty 0,784.

Z grafu 8 je také patrný obdobný trend v hodnotách poměru F_v/F_m u varianty P2 a změny poměru fluorescence F_v/F_m jako u varianty P1. Naměřený poměr 0,779 zůstal shodný od 1. dne měření až do 7. dne. Snížení bylo zaznamenáno až 10. den, kdy výsledný poměr F_v/F_m byl 0,778, který byl zachován až do konce pokusu.

Rostliny varianty P3 (600 mg APAP) vykazovaly pozvolné snižování poměru F_v/F_m již 1. den od zahájení pokusu, kdy uvedený poměr F_v/F_m činil 0,773 z původní hodnoty 0,800 (0. den). Následující termíny měření (3. a 7. den) se poměr fluorescence snižoval o 0,001 na hodnoty 0,772 (3. den) a 0,771 (7. den). Nejnižší poměr byl opět zjištěn na konci pokusu - 0,770.

V grafu 6 je patrný obdobný průběh pokusu varianty P4 jako u variant P1 a P2, kdy se poměr fluorescence F_v/F_m s hodnotou 0,764 neměnil až do 7. dnu. Snížení bylo zjištěno 10. den, kdy uvedený poměr činil 0,763 a zůstal nezměněný až do konce pokusu.

Nejvíce stresovaná varianta P5 (1000 mg APAP) měla nejnižší poměr fluorescence F_v/F_m ze všech variant. Hodnoty fluorescence byly v rozmezí hodnot mezi 0,800 (0. den) a 0,744 (10. den). Po dni od zahájení pokusu klesl poměr varianty na hodnotu 0,752 a postupně se působením paracetamolu snižoval až na nejnižší naměřený poměr 0,744 v 10. den pokusu. Poslední termín měření (14. den pokusu) se uvedený poměr neprůkazně zvýšil na konečnou hodnotu 0,745.

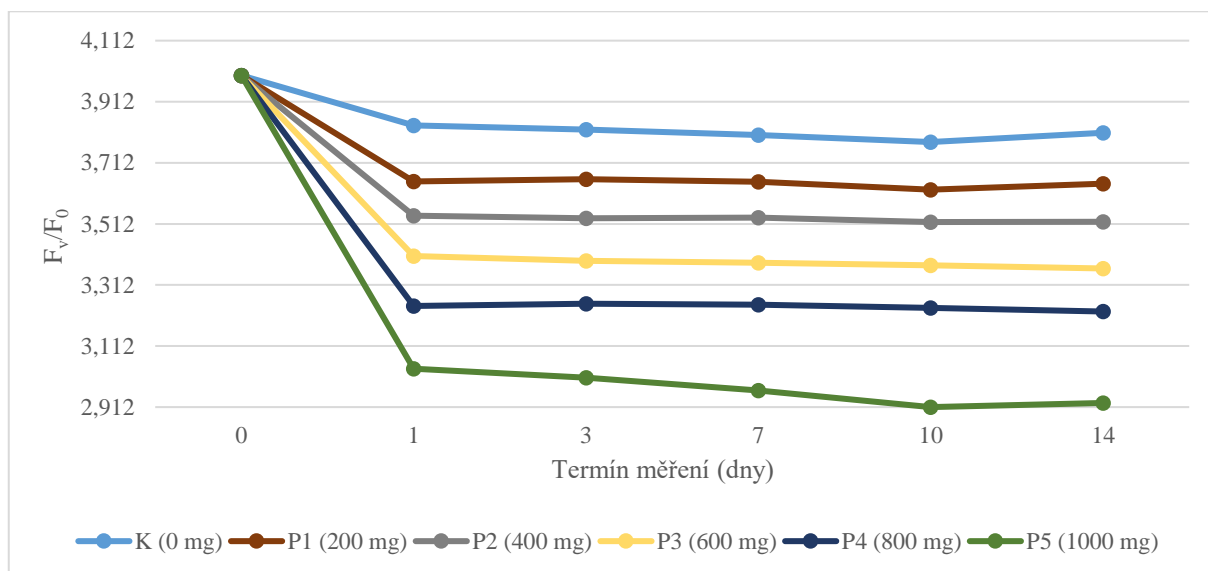


Graf 7: Průměrný poměr fluorescence chlorofylu F_v/F_m variant

Průměrný poměr fluorescence chlorofylu F_v/F_m v závislosti na variantě pokusu je uveden v grafu 7. Z grafu je patrná nepřímá úměra se zvyšující se dávkou paracetamolu a snižováním fluorescenčního poměru rostlin kukuřice. Kontrolní rostliny vykazovaly nejvyšší průměrný poměr fluorescence F_v/F_m s hodnotou 0,793. Nejnižší odchylka oproti kontrolním rostlinám (K) byla zaznamenána u stresované varianty P1, kdy byla naměřena hodnota 0,787. U dalších variant docházelo k postupnému snižování poměru fluorescence. Varianta P2 měla hodnotu fluorescence 0,782. U rostlin variant P3 dosáhl průměr poměru fluorescence F_v/F_m 0,776. Variantě P4 byl naměřen poměr 0,769. Rostliny s nejvyšší dávkou paracetamolu (P5) byly nejvíce ovlivněny tímto léčivem. Jejich poměr fluorescence F_v/F_m za celý pokus byl 0,756 a jejich rozdíl oproti kontrolní variantě činil 0,037 (4,67 %).

5.1.2 Potenciální účinnost fluorescence (F_v/F_0)

V grafu 8 a 9 je uveden poměr fluorescence variabilní (F_v) k fluorescenci minimální (F_0) juvenilních rostlin kukuřice seté v závislosti na působení stresu paracetamolem (APAP). V grafu 8 je uveden poměr F_v/F_0 v závislosti na čase a dávce paracetamolu. Z něho vyplývá, že nejvyšší poměr (3,998) byl naměřena u všech rostlin na počátku pokusu. Naopak nejnižší (2,912) po 10 dnech u varianty P5 s nejvyšší dávkou paracetamolu (1000 mg l⁻¹). Rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším naměřeným poměrem fluorescence F_v/F_0 kukuřice činil 27,16 %.



Graf 8: Poměr fluorescence chlorofylu F_v/F_0 v rámci ontogeneze a působení času

Poměr fluorescence F_v/F_0 se u kontrolních rostlin snížil již 1. den po zahájení pokusu z 3,998 na 3,834. Toto snížení bylo zaznamenáno až do 10. dne, kde byl naměřen nejnižší poměr 3,78. V posledním termínu měření pokusu (14. den) se zvýšil na konečný poměr 3,81.

Poměr F_v/F_0 u rostlin z varianty P1 se pohyboval v intervalu hodnot od 3,624 (10. den) do 3,998 (0. den). Po aplikaci paracetamolu bylo zaznamenáno postupné snižování poměru fluorescence, výjimkou jsou 2 termíny měření (3. a 14. den), kdy se naopak hodnoty uvedené charakteristiky neprůkazně zvýšily oproti předcházejícímu měření. Rozdíl mezi 1. dnem a 3. dnem činil 0,007 a rozdíl mezi 10. a 14. dnem byl 0,02. Na konci pokusu byla hodnota uvedeného poměru 3,644, viz graf 8.

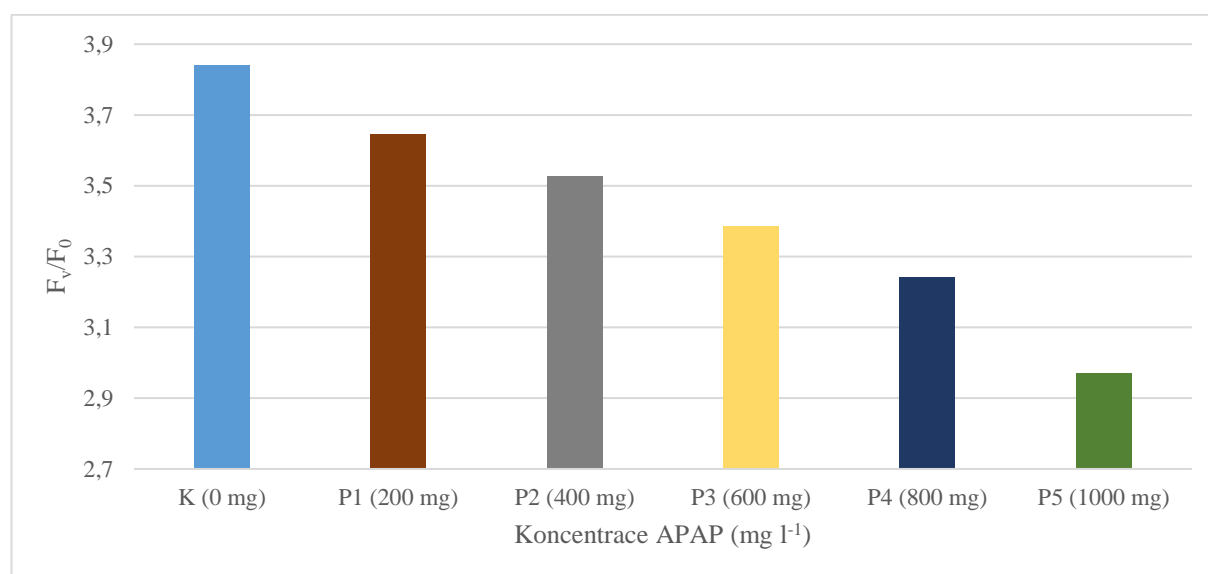
Stresovaná varianta P2 (400 mg APAP) vykazovala podobný trend jako varianta P1. Snížení poměru fluorescence F_v/F_0 bylo zaznamenáno 1. den po aplikaci paracetamolu a trvalo do 3. dne (3,530). V následujícím termínu měření se uvedený poměr neprůkazně zvýšil na hodnotu 3,532. Uvedené zvýšení bylo vystřídáno poklesem s konečným výsledkem 3,519.

Poměr fluorescence F_v/F_0 varianty P3 (600 mg APAP) se s postupem času konstantně snižoval. Z původní hodnoty poměru 3,998 (0. den) se této variantě snížil poměr na hodnotu 3,366 (14. den).

U rostlin kukuřice varianty P4 (800 mg APAP) docházelo k postupnému snižování poměru fluorescence F_v/F_0 obdobně jako u varianty P3. Výjimku tvořil 3. den po aplikaci paracetamolu, kdy se uvedený poměr oproti předchozímu měření zvýšil z hodnoty 3,243

na hodnotu 3,250. Uvedené zvýšení bylo vystřídáno postupným poklesem poměru F_v/F_0 do konce sledovaného období (3,225).

Nejvíce stresovaná varianta P5 (1000 mg APAP) měla nejnižší poměr fluorescence F_v/F_0 ze všech variant. Po dni od zahájení pokusu se snížil poměr varianty na hodnotu 3,038 a postupně se působením paracetamolu snižoval až na nejnižší naměřený poměr 2,912 v 10. den pokusu. Poslední termín měření (14. den pokusu) bylo zjištěno mírné zvýšení poměru na konečnou naměřenou hodnotu 2,926, jak dokládá graf 8.

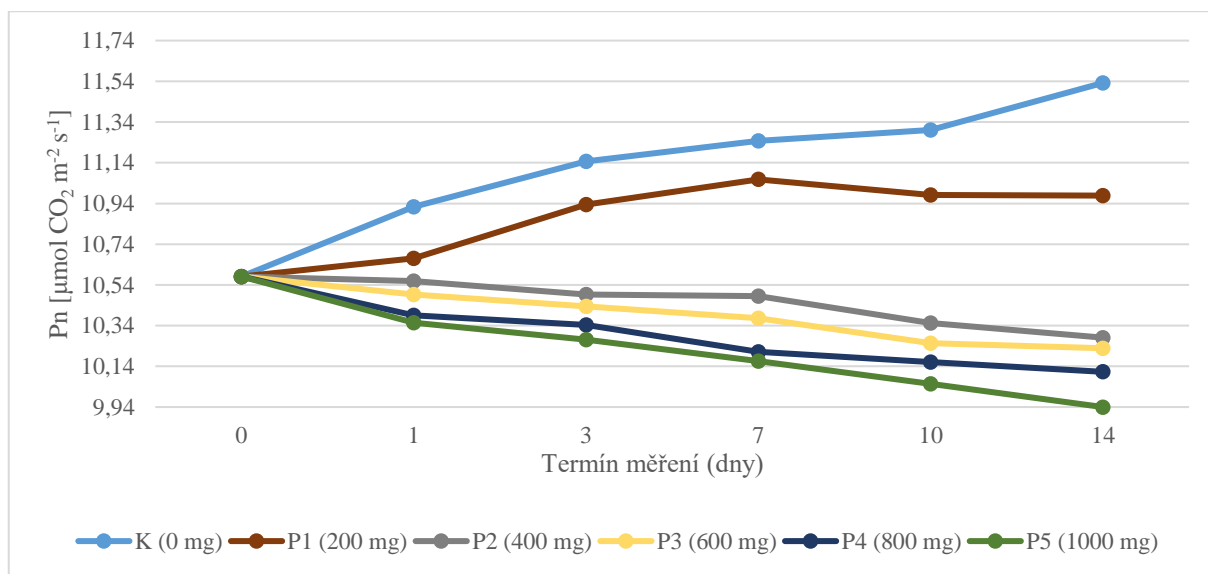


Graf 9: Průměrný poměr fluorescence chlorofylu F_v/F_0 variant

V grafu 9 je zaznamenán průměrný poměr fluorescence chlorofylu F_v/F_0 všech variant. Graf znázorňuje negativní vliv paracetamolu na juvenilní rostliny kukuřice seté. Jako u poměru fluorescence F_v/F_0 kontrolní rostliny vykazovaly nejvyšší průměrný poměr fluorescence F_v/F_0 - 3,841. S navyšujícím se obsahem farmaka se poměr snižoval. U stresované varianty P1 byla zaznamenána nejnižší odchylka oproti kontrolním rostlinám, kdy naměřená hodnota byla 3,645. U varianty P2 byla naměřená hodnota 3,528. U rostlin variant P3 dosáhl průměr poměru fluorescence F_v/F_0 (3,385). U rostlin z varianty P4 měly průměrnou hodnotu poměru F_v/F_0 ve výši 3,240. Nejvyšší ovlivnění bylo pozorováno u rostlin varianty P5, která obsahovala 1000 mg l⁻¹ paracetamolu ve svém hydroponickém roztoku. Naměřena hodnota byla 2,970, kde rozdíl oproti kontrolní variantě činil 22,68 %.

5.2 Výkon čisté fotosyntézy (Pn)

V grafu 10 a 11 je uveden výkon čisté fotosyntézy juvenilních rostlin kukuřice seté v závislosti na působení stresu paracetamolem (APAP). Z grafu 10 vyplývá, že nejvyšší výkon čisté fotosyntézy ($11,54 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) byl naměřen u kontrolních rostlin ve 14. dnu pokusu. Naopak nejnižší hodnota ($9,94 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) byla naměřena po 14 dnech u varianty P5 s nejvyšší dávkou paracetamolu (1000 mg l^{-1}). Rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším naměřeným výkonem čisté fotosyntézy kukuřice činil 13,87 %.



Graf 10: Výkon čisté fotosyntézy [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$] v rámci ontogeneze a působení času

Kontrolní rostliny vykazovaly v průběhu měření téměř lineární zvýšení výkonu čisté fotosyntézy, a to z důvodu jejich ontogenetického vývoje. U těchto rostlin byla fotosyntéza v rozpětí hodnot od $10,59 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (0. den) do $11,54 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (14. den).

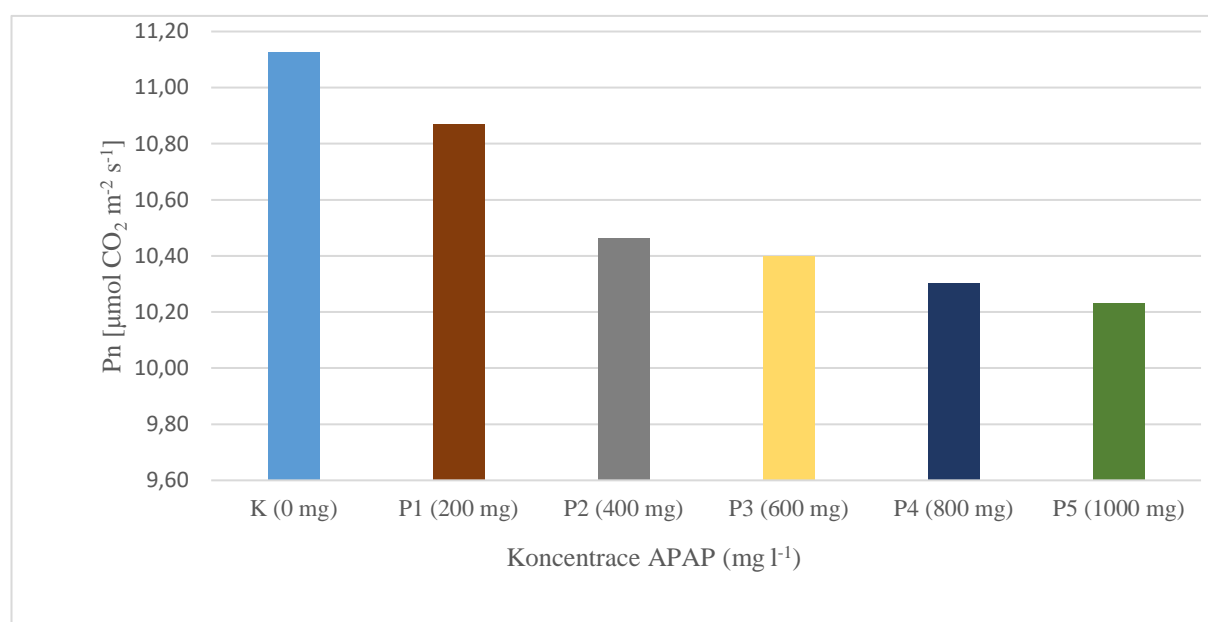
Obdobný trend byl zaznamenán také u rostlin pěstovaných v podmínkách nejnižší koncentrace paracetamolu v živném roztoku (varianta P1). Hodnota fotosyntézy se zvýšila z $10,59 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (0. den pokusu) na $11,06 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ v 7. dnu od začátku pokusu. Poté byl zaznamenán pokles fotosyntézy do konce pokusu, kdy naměřená hodnota fotosyntézy byla $10,98 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. U ostatních stresových variant se snižoval výkon čisté fotosyntézy vlivem působení paracetamolu bezprostředně po zahájení pokusu.

U varianty P2 (400 mg APAP) byl naměřený výkon čisté fotosyntézy snížen již 1. den pokusu na $10,56 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ z hodnoty $10,59 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Na konci pokusu byl u těchto rostlin výkon čisté fotosyntézy ve výši $10,29 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Fotosyntéza varianty P3 (600 mg APAP) byla obdobně ovlivněna jako rostliny u předchozí varianty. Snížení fotosyntézy bylo zaznamenáno 1. den po zahájení pokusu s naměřenou hodnotou $10,50 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Toto snížení činilo 0,85 % v porovnání s rostlinami před zahájením pokusu. Snížení fotosyntézy bylo v souladu s ontogenetickým vývojem, neboť na konci pokusu byla nejnižší - $10,23 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Z grafu 10 je dále patrné, že výkon čisté fotosyntézy u varianty P4 (800 mg APAP) se pohyboval v intervalu hodnot od 10,12 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (14. den) do 10,59 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (0. den). Tato varianta vykazovala obdobné snižování čisté fotosyntézy jako varianta P5 až do 7. dne pokusu.

Stresovaná varianta P5 (1000 mg APAP) dosahovala nejnižších hodnot ze všech měřených variant. Z počáteční hodnoty 10,59 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ se snížila na hodnotu 10,36 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (1. den). Rozdíl mezi těmito hodnotami činil 0,23 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ a byl nejnižší ze všech stresovaných variant. V následujících termínech měření se výkon čisté fotosyntézy dále snižoval působením zvýšené koncentrace paracetamolu a byl nejnižší ve 14. dnu pokusu (9,94 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

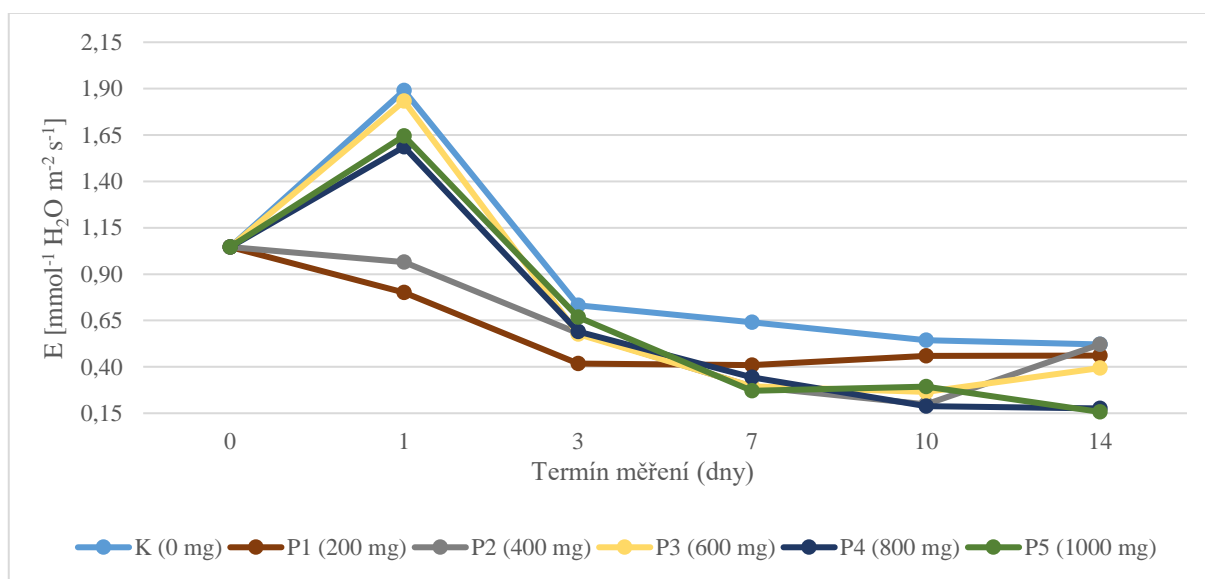


Graf 11: Průměrný výkon čisté fotosyntézy variant [μmol CO₂ m⁻² s⁻¹]

V grafu 11 je uveden průměrný výkon čisté fotosyntézy v závislosti na variantě pokusu. Z tohoto grafu je patrný negativní vliv paracetamolu na fotosyntézu juvenilních rostlin kukuřice seté. Kontrolní rostliny vykazovaly nejvyšší hodnoty fotosyntézy, kdy průměr fotosyntézy činil 11,13 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Všechny stresované varianty měly nižší výkon čisté fotosyntézy v porovnání s kontrolními rostlinami. U stresované varianty P1 bylo zjištěno nejnižší snížení fotosyntézy - 10,87 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (2,34 %). Průkazné rozdíly v rychlosti fotosyntézy nebyly zaznamenány mezi variantami P2–P5. U varianty P2 byla naměřená hodnota 10,46 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. U rostlin variant P3 dosáhl průměr čisté fotosyntézy 10,40 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Varianta P4 měla hodnotu fotosyntézy ve výši 10,30 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Průměrná hodnota výkonu čisté fotosyntézy rostlin varianty P5 za celý pokus byla 10,23 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Rozdíl oproti kontrolní variantě činil 8,09 %.

5.3 Rychlost transpirace (E)

Působení různých dávek paracetamolu (APAP) na rychlost transpirace u juvenilních rostlin kukuřice seté je uveden v grafu 12 a 13. Graf 12 znázorňuje závislost rychlosti transpirace na délce působení stresoru. Z tohoto grafu je patrné postupné snižování hodnot u všech variant. Výjimku tvořily varianty K (0 mg APAP), P3 (600 mg APAP), P4 (800 mg APAP) a P5 (1000 mg APAP). U rostlin rostoucích v těchto koncentracích se transpirace zvýšila 1. den pokusu. Nejvyšší transpirace vykazovaly kontrolní rostliny s naměřenou hodnotou $1,89 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (1. den pokusu). Nejnižších hodnot pak dosahovala varianta P5 (1000 mg APAP) s $0,16 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (14. den pokusu).



Graf 12: Transpirace variant $[\text{mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}]$ v rámci ontogeneze a působení času

Rychlost transpirace se u kontrolních rostlin zvýšila 1. den po zahájení pokusu z $1,05$ na $1,89 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Následná měření pak už vykazovala snižování transpirace až na hodnotu $0,52 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (14. den), tedy $50,48\%$ snížení oproti původní hodnotě (0. den).

U varianty P1 (200 mg APAP) se transpirace pohybovala v rozmezí hodnot od $1,05$ do $0,41 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Z původní hodnoty $1,05 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (0. den) se bezprostředně 1. den po aplikaci APAP snížila na hodnotu $0,80 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ s rozdílem $23,81 \%$. Trend snižování byl zaznamenán až do 7. dne, kdy byla naměřena transpirace $0,41 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. V následujícím termínu se transpirace zvýšila na hodnotu $0,46 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

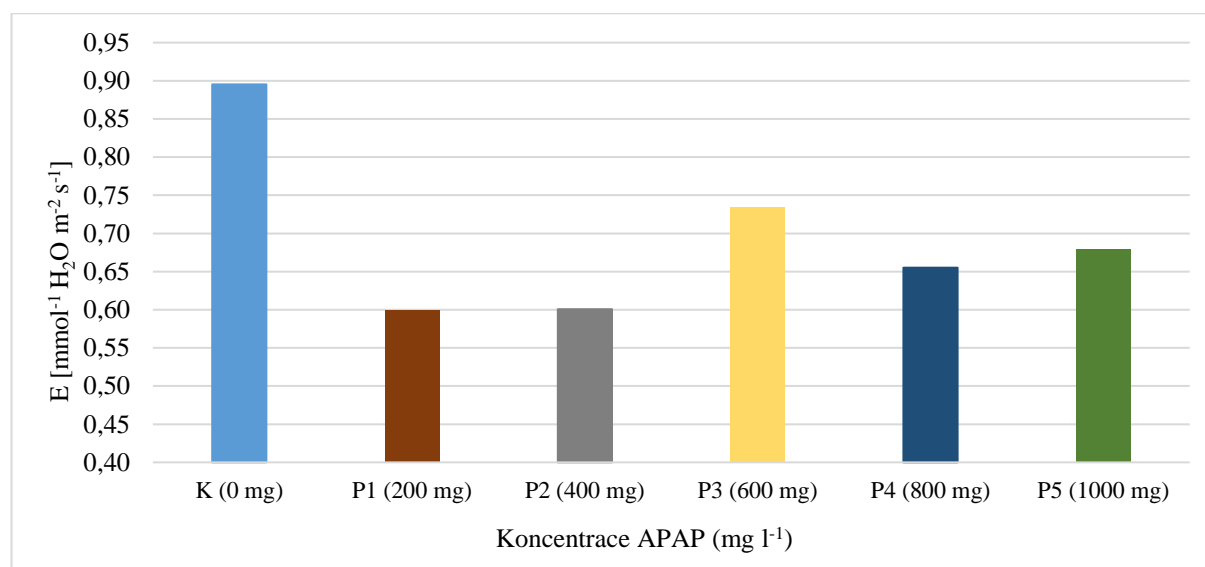
Z grafu 12 je patrný obdobný trend vývoje transpirace varianty P2 (400 mg APAP) jako u varianty P1. Opět byl zaznamenán pokles transpirace již 1. den pokusu na hodnotu $0,96 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ a pokles pokračoval až do 10. dne ($0,20 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). V poslední den pokusu (14. den) se transpirace zvýšila o $0,32 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Rostliny varianty P3 (600 mg APAP) vykazovaly shodně s kontrolní variantou zvýšení rychlosti transpirace v 1. dni od zahájení pokusu, kdy se jednalo o $42,62\%$ zvýšení ($0,78 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Následně se transpirace snižovala až do 10. dne, kdy hodnota

transpirace byla $0,27 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Obdobně jako u varianty P2 se ke konci pokusu (14. den) její rychlost transpirace zvýšila ($0,36 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

Rychlost transpirace varianty P4 (800 mg APAP) se shodně s variantou K a P3 zvýšila 1. den pokusu na hodnotu $1,59 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Další měření vykazovaly trend snižování až do konce pokusu. Nejnižší rychlost transpirace - $0,18 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ byla naměřena 14. den pokusu.

V grafu 12 je také patrný průběh rychlosti transpirace nejvíce stresované varianty P5 (1000 mg APAP). Jako u předešlých dvou variant (P3 a P4) se nejprve transpirace zvýšila na hodnotu $1,65 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (1. den pokusu). Po zvýšení transpirace se poté transpirace snižovala do 7. dne ($0,27 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Následující den měření (10. den) se transpirace neprůkazně zvýšila o $0,02 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Na konci pokusu se transpirace snížila až na nejnižší hodnotu pokusu - $0,16 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. V porovnání s kontrolními rostlinami se jednalo o 84,76% snížení.



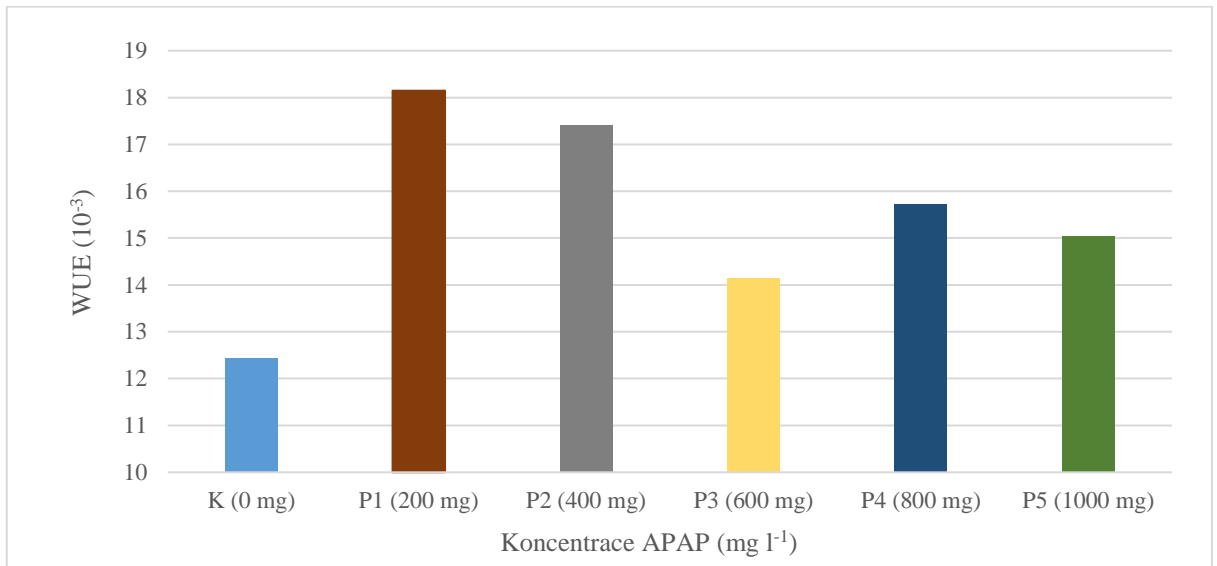
Graf 13: Průměrná hodnota transpirace variant [mmol⁻¹ H₂O m⁻² s⁻¹]

Rozdíl mezi nejvyšší ($0,90 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) a nejnižší ($0,60 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) průměrnou naměřenou rychlostí transpirace kukuřice činil 33,33 % a byl zjištěn mezi kontrolní variantou K (0 mg APAP) a variantami P1 (200 mg APAP) a P2 (400 mg APAP). Z grafu 14, kde je uvedena průměrná rychlost transpirace jednotlivých variant, je patrný pokles transpirace u všech stresovaných variant. Nejnižších hodnot transpirace měly rostliny u variant P1 a P2 ($0,60 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), následně varianta P4 ($0,66 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), poté varianta P5 ($0,68 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) a varianta P3 ($0,73 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

5.4 Efektivita využití vody (WUE)

V grafu 14 je uvedena efektivita využití vody (WUE) juvenilních rostlin kukuřice seté v závislosti na jednotlivých variantách stresu způsobené aplikací paracetamolu. Z grafu je patrné, že nejvyšší efektivitu využití vody dosahovala varianta P1 s hodnotou $18,15 (10^{-3})$. Naopak nejnižší hodnoty vykazovaly kontrolní rostliny (K) s hodnotou $12,43 (10^{-3})$. Rozdíl mezi těmito dvěma variantami K a P1 činil $5,72 (10^{-3})$, tedy 31,52 %.

Ostatní hodnoty variant P2–P5 se pohybovaly v rozmezí hodnot 14,15 až $17,42 (10^{-3})$. Všechny stresované varianty měly vyšší hodnoty WUE.



Graf 14: Průměrná hodnota WUE variant

6 Diskuze

U juvenilních rostlin kukuřice seté (*Zea mays* L.) byl během jejich ontogenetického vývoje sledován vliv paracetamolu na fluorescenci chlorofylu, rychlost výměny plynů a následně byla z hodnot čisté fotosyntézy a transpirace vypočtena efektivita využití vody (WUE).

6.1 Fluorescence chlorofylu

Parametry fluorescence chlorofylu jsou velice vhodný nástroj k detekci a analýze fotosyntetické výkonnosti rostlin pod vlivem abiotických a biotických stresorů (Melo et al. 2017).

6.1.1 Maximální kvantový výtěžek fluorescence (F_v/F_m)

Podle Maxwell & Johnson (2000) lze z poměru F_v/F_m nazývaného maximální kvantový výtěžek fluorescence zjistit působení stresu na rostlinu. Optimální rozmezí je podle těchto autorů od 0,79 do 0,84, kdy se zvyšujícím se stresem se tento poměr snižuje.

Výsledné hodnoty poměru F_v/F_m , odpovídají závěrům výše zmíněných autorů. Kontrolní rostliny (K) vykazovaly průměrný poměr F_v/F_m 0,793. Následnou aplikací paracetamolu jako stresoru byl zaznamenán pokles hodnot fluorescence chlorofylu, kdy se s vyšší dávkou způsobený stres zvyšoval. Nejvíce poškozené byly rostliny varianty P5 (1000 mg l⁻¹), kde vypočtený průměrný poměr byl 0,756 s rozdílem 4,67 % oproti kontrole. Uvedené hodnoty jsou v souladu s prací Zezulka et al. (2019), která sledovala vliv farmak (paracetamol a diclofenac) na hrách setý (*Pisum sativum* L.) a kukuřici setou (*Zea mays* L.). Negativní vliv působení farmak na poměr F_v/F_m potvrzují i Kudrna et al. (2020) s paracetamolem na locice seté (*Lactuca sativa* L.) nebo Iori et al. (2013) na vrbě bílé (*Salix alba* L.) po aplikaci ibuprofenu. Autoři Iori et al. (2013) konstatují, že snížení poměru F_v/F_m je způsobeno snížením maximální kvantové výkonnosti otevřených center fotosystému II (PSII), kdy se nevyužitá energie mění na teplo a indikuje tak poškození fotosyntetického aparátu. V našich pokusech bylo potvrzeno snížení F_m , jak uvádí výše uvedení autoři. Při současném snížení F_m bylo zaznamenáno také zvýšení hodnot F_0 , to je v souladu s prací Kudrna et al. (2020). Snížení poměru F_v/F_m u rostlin trav *Spartina argentinensis* (TRIN.) MERR. po aplikaci rizikového prvku (Cr⁶⁺) potvrzuje i Redondo-Gómez et al. (2011).

Pozitivní i negativní vliv farmak v podobě antibiotika chloramfenikolu na poměr F_v/F_m kukuřice seté (*Zea mays* L.) popsali autoři Zhu et al. (2011). Při středních dávkách farmaka (50 a 100 mg l⁻¹) poměr F_v/F_m se zvýšil, zatímco při vyšší dávce (250 mg l⁻¹) poměr začal klesat. Obdobně jako Iori et al. (2013) vidí autoři Zhu et al. (2011) snížení poměru F_v/F_m v poklesu hodnoty F_m , což patrně souvisí se zvýšením počtu zavřených center PSII, které se nepodílely na transportu elektronů. Pozitivní vliv nízkých dávek farmak (0,005, 0,01, 0,1 a 1,0 mg l⁻¹) dokazuje i Al-Muwayhi (2018), kdy paracetamol v malých dávkách měl pozitivní účinek na poměr F_v/F_m u rostlin vigny zlaté (*Vigna radiata* (L.) WILCZEK). Pozitivní efekt farmak nebyl zjištěn, neboť v našem pokusu byly koncentrace paracetamolu vysoké a neměly tedy stimulační účinky.

6.1.2 Potenciální účinnost fluorescence (F_v/F_0)

Citlivějším poměrem na detekci potenciálního rostlinného stresu je poměr F_v/F_0 . Je vhodné používat k poměru F_v/F_m , neboť lépe znázorňuje malé rozdíly detekované v tomto poměru (Roháček 2002; Melo et al. 2017).

Obdobně jako poměr F_v/F_m se poměr F_v/F_0 snižoval se zvyšující se dávkou paracetamolu. Nejvyšší rozdíl průměrného F_v/F_0 (22,68 %) byl mezi kontrolní variantou (K) a variantou P5 s nejvyšší koncentrací (1000 mg l⁻¹). Výsledné hodnoty jsou v souladu s prací Kudrna et al. (2020), kde byl použit paracetamol v různých dávkách a času působení (jednorázová a chronická aplikace) na lociku setou (*Lactuca sativa* L.). Snížení poměru F_v/F_0 za působením abiotických faktorů včetně těžkých kovů (olovo a kadmium) na ječmen setý (*Hordeum vulgare* L.) dokazují ve své práci Kalaji et al. (2018). Jak uvádí Zhang et al. (2014) xenobiotikum ve formě pesticidu fenoxaprop-P-ethylu způsobilo snížení poměru F_v/F_0 u rostlin perily křovité (*Perilla frutescens* (L.) BRITT.). Kudrna et al. (2020) konstatují, že snížení tohoto poměru patrně souvisí se zvýšením parametru F_0 , které je nejspíše spojeno s účinkem paracetamolu na rekční centra PSII, nebo redukcí přenosu energie ve světlosběrných pigmentech.

6.2 Čistá fotosyntéza

Naměřené hodnoty čisté fotosyntézy vykazují nárůst během průběhu pokusu. Nejvíce byl tento jev zaznamenán u kontrolní varianty (10,59–11,54 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Nárůst těchto hodnot je způsoben ontogenetickým vývojem rostlin. Uvedený výsledek je v souladu s prací Kudrna et al. (2020), kdy se autoři zabývali fyziologickými charakteristikami juvenilních rostlin lociky seté (*Lactuca sativa* L.) po aplikaci paracetamolu.

U ostatních variant bylo zaznamenáno snížení čisté fotosyntézy. Varianta P1 (200 mg l⁻¹) na počátku pokusu vykazovala zvýšení čisté fotosyntézy, které mohlo být způsobeno stimulačním vlivem této koncentrace, ale vlivem dlouhodobějšího působení je možné také u této varianty zaznamenat pokles fotosyntézy. Zvýšení rychlosti fotosyntézy po aplikaci nižších dávek paracetamolu bylo zaznamenáno u rostlin vigny zlaté (*Vigna radiata* (L.) WILCZEK), jak uvádí Al-Muwayhi (2018) ve svém pokusu. Obdobný efekt byl pozorován také po aplikaci kyseliny salicylové na listy kukuřice seté (*Zea mays* L.) a sóji luštinaté (*Glycine max* (L.) MERRILL.), jak dokládá práce Khan et al. (2003).

Nejvyšší snížení fotosyntézy v porovnání s kontrolní variantou (K) bylo zaznamenáno u varianty P5 (1000 mg l⁻¹), kde průměrný rozdíl byl 8,09 %. Snížení čisté fotosyntézy po aplikaci farmak dokazují také pokusy Tășchină et al. (2017) u rostlin fazolu obecného (*Phaseolus vulgaris* L.), u lociky seté (*Lactuca sativa* L.) po aplikaci paracetamolu, jak dokládá práce Kudrna et al. (2020), Iori et al. (2013) za použití ibuprofenu na vrbu bílou (*Salix alba* L.), Opiř et al. (2013) při aplikaci antibiotik na pšenici setou (*Triticum aestivum* L.), Pancheva et al. (1996) na ječmen setý (*Hordeum vulgare* L.) při použití kyseliny salicylové, nebo po aplikaci diclofenacu u fazolu obecném (*Phaseolus vulgaris* L.), jak uvádí Copolovici et al. (2017).

Důvod snížení čisté fotosyntézy patrně souvisí s fytotoxicitou paracetamolu a jeho delším časem působení na rostliny kukuřice. Po jeho aplikaci nejspíše došlo k ovlivnění struktury

chloroplastů, snížení aktivity reakčních center PSII a transportu fotosyntetických elektronů, zhoršení stomatální vodivosti, absorpce světelné energie a k narušení enzymatické aktivity Calvinova cyklu. Tyto poznatky jsou v souladu s prací Zhang et al. (2020), kde byly tyto jevy pozorovány u rizikových látek, kadmia a zinku. Obdobné závěry uvádí také Kudrna et al. (2020), kde tito autoři rovněž konstatují, že účinky paracetamolu na fotosyntetickou aktivitu se můžou u různých rostlinných druhů lišit.

6.3 Rychlost transpirace

U všech pokusných variant, včetně kontrolní varianty K (0 mg l⁻¹ APAP), byl zaznamenán pokles rychlosti transpirace. Toto snížení je patrné v průměrných hodnotách, kdy rozdíl mezi nejvyšší (0,90 mmol⁻¹ H₂O m⁻² s⁻¹) a nejnižší (0,60 mmol⁻¹ H₂O m⁻² s⁻¹) průměrnou naměřenou rychlostí transpirace kukuřice činil 33,33 % a byl naměřen mezi kontrolní variantou K (0 mg APAP) a variantami P1 (200 mg APAP) a P2 (400 mg APAP). Dosažené výsledky jsou v souladu s prací Iori et al. (2013) po aplikaci ibuprofenu na klony vrby bílé (*Salix alba* L.), s Larqué-Saavedra (1978) u fazolu obecného (*Phaseolus vulgaris* L.) a kyseliny acetylsalicylové nebo u autorů Pancheva et al. (1996) na ječmenu setém (*Hordeum vulgare* L.) a Shaheen et al. (2019) na lilku rajčeti (*Solanum lycopersicum* L.) při aplikaci kyseliny salicylové. Všichni zmínění autoři prokázali snížení rychlosti transpirace po aplikaci farmak.

Nicméně po aplikaci farmak je patrné i zvýšení transpirace, jak uvádí Kumar et al. (2000) při aplikaci 362 μM kyseliny salicylové na sóje (*Glycine max* L. MERRILL). Mírné zvýšení s neprůkaznými výsledky dokazují i Khan et al. (2003) na kukuřici setou (*Zea mays* L.) a sóje luštinaté (*Glycine max* L. MERRILL) při aplikaci 10⁻³ a 10⁻⁵ M l⁻¹ kyseliny salicylové. Oba kolektivy autorů aplikovaly kyselinu salicylou foliárně a v nízké koncentraci.

Důvodem snížení rychlosti transpirace je patrně dlouhodobý účinek paracetamolu s vysokou koncentrací na rostliny kukuřice, neboť při krátkodobém ošetření v rámci několika hodin nemá koncentrace paracetamolu zásadní vliv, jak uvádí Pancheva et al. (1996). U stresovaných rostlin patrně docházelo k uzavírání stomat a zhoršení schopností fixovat CO₂. Toto potvrzují například i Larqué-Saavedra (1978), Pancheva et al. (1996) nebo Zhang et al. (2020). Snížení stomatální vodivosti, a tedy i následné výměny plynů, dále uvádí i Khan et al. (2003) na rostlinách sóji luštinaté (*Glycine max* L. MERRILL) a kukuřice seté (*Zea mays* L.) nebo Copolovici et al. (2017) u fazolu obecném (*Phaseolus vulgaris* L.).

6.4 Efektivita využití vody (WUE)

Vypočtené hodnoty efektivity využití vody jsou v souladu s prací Shaheen et al. (2019). V souladu s touto prací byla zaznamenána zvýšená hodnota WUE u variant s aplikací farmaka (14,15 až 18,15 (10^{-3})) oproti kontrolní variantě (K) 12,43 (10^{-3}). V případě výše zmiňovaných autorů se jednalo o kyselinu salicylovou, která byla aplikována na lilek rajče (*Solanum lycopersicum* L.) v dávkách 0,5, 1, 1,5 a 2 mM. Stejný efekt byl sledován u paracetamolu v dávkách (0,005, 0,01, 0,1 a 1,0 mg l⁻¹) u vigny zlaté (*Vigna radiata* (L.) WILCZEK), jak uvádí Al-Muwayhi (2018). Při aplikaci nízkých dávek farmak bylo zaznamenáno zvýšení fotosyntézy, a tím v přepočtu i ke zvýšení WUE, jak konstatují Al-Muwayhi (2018), Shaheen et al. (2019). Zvýšené hodnoty WUE potvrzují také Kumar et al. (2000) ve svém pokusu s kyselinou salicylovou na sóje luštinaté (*Glycine max* L. MERRILL).

Naopak aplikace xenobiotika ve formě chromu (Cr⁶⁺) výrazně snížilo fotosyntézu a tím i hodnoty WUE u rostlin trav *Spartina argentinensis* (TRIN.) MERR., jak uvádí Redondo-Gómez et al. (2011).

Důvodem zvýšení WUE v našem pokusu může být poškození kořenového systému a tím následné zhoršení příjmu vody, které vedlo k uzavírání průduchů a k šetření s vodou spojenou s nízkou hodnotou transpirace.

7 Závěr

V bakalářské práci byl hodnocen vliv paracetamolu na výměnu plynů, parametry fluorescence a efektivitu využití vody juvenilních rostlin kukuřice seté (*Zea mays* L.) s různými dávkami paracetamolu.

- Bylo potvrzeno, že existuje negativní vliv paracetamolu na primární metabolismus rostlin kukuřice.
- Aplikace paracetamolu ovlivnila všechny sledované charakteristiky.
- Byla potvrzena hypotéza, že existuje negativní vliv na charakteristiky fluorescence chlorofylu.
- Maximální kvantový výtěžek fluorescence (F_v/F_m) u všech variant, kromě kontrolní, se průkazně snížil.
- Nejvyšší snížení tohoto poměru vykazovala varianta P5, kdy v porovnání s kontrolními rostlinami se průměrný poměr F_v/F_m rostlin snížil o 4,67 %.
- Potenciální účinnost fluorescence (F_v/F_0) se také snížila. Rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší průměrnou hodnotou tohoto poměru činil 0,871 (22,68 %). Uvedený rozdíl byl sledován mezi variantami K a P5.
- Nejnižší průměrná naměřená hodnota čisté fotosyntézy byla $10,23 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ u varianty P5 (1000 mg l^{-1} APAP). Rozdíl oproti kontrole (K) činil $0,9 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (8,09 %).
- Rozdíl mezi nejvyšší ($0,90 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) a nejnižší ($0,60 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) průměrnou rychlostí transpirace činil 33,33 % a byl naměřen mezi variantami K a P5.
- Byla potvrzena hypotéza o vlivu paracetamolu na výměnu plynů.
- Byla prokázána hypotéza o vlivu paracetamolu na hodnotu efektivity využití vody - WUE.
- Po aplikaci paracetamolu bylo zaznamenáno zvýšení WUE.
- Nejvyšší zvýšení efektivity využití vody bylo zjištěno u varianty P1 (200 mg l^{-1} APAP) - $5,72 (10^{-3})$, kdy v porovnání s kontrolními rostlinami se tento parametr zvýšil o 31,52 %.

8 Literatura

- Alkimin GD, Daniel D, Dionísio R, Soares AMVM, Barata C, Nunes B. 2019. Effects of diclofenac and salicylic acid exposure on *Lemna minor*: Is time a factor? Environmental research (e108609) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108609>.
- Al-Muwayhi MAR. 2018. Paracetamol mediated changes modifies the photosynthetic efficiency of *Vigna radiata*. Legume Research-An International Journal **41**:842–845.
- Bedoya CA, Dreisigacker S, Hearne S, Franco J, Mir C, Prasanna BM, Taba S, Charcosset A, Warburton ML. 2017. Genetic diversity and population structure of native maize populations in Latin America and the Caribbean. PLoS ONE 12 (e0173488) DOI: 10.1371/journal.pone.0173488.
- Benson JH, Geary B, Miller JS, Jolley VD, Hopkins BG, Stevens MR. 2009. *Phytophthora erythroseptica* (Pink Rot) Development in Russet Norkotah Potato Grown in Buffered Hydroponic Solutions I. Calcium Nutrition Effects. American Journal of Potato Research **86**:466–471.
- Brant V. 2020. Kukuřice setá v zemědělském systému. Pages 10–11 in Brant V, editor. Efektivní hospodaření s vodou a eliminace degradace půdy v pěstebních systémech kukuřice seté. Agrární komora České republiky, Praha.
- Bruce DM. 2001. Documenting Plant Domestication: The Consilience of Biological and Archaeological Approaches. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America **98**:1324–1326.
- Caballero-Briones F, Iribarren A, Castro-Rodríguez R, Oliva AI. 2000. Recent advances on the understanding of the nixtamalization process. Superficies y Vacío **10**:20–24.
- Copolovici L, Timis D, Taschina M, Copolovici D, Cioca G, Bungau S. 2017. Diclofenac influence on photosynthetic parameters and volatile organic compounds emission from *Phaseolus vulgaris* L. plants. Revista de Chimie **68**:2076–2078.
- De Almeida Silva NC, Vidal R, Bernardi Ogliari J, Costich DE, Chen J. 2020. Relationships among American popcorn and their links with landraces conserved in a microcenter of diversity. Genetic Resources and Crop Evolution: An International Journal **67**:1733–1753
- Doebley J. 1990. Molecular systematics of *Zea* (*Gramineae*). Maydica **35**:143–150.
- Doebley JF & Iltis HH. 1980. Taxonomy of *Zea* (*Gramineae*). I. A subgeneric classification with key to taxa. American Journal of Botany **67**:982–993.
- Ebrahimzadeh MA, Pourmorad F, Hafe S. 2008. Antioxidant activities of iranian corn silk. Turkish Journal of Biology **32**:43–49.
- Ehrenbergerová J. 2014. Odrůdy, Osivo a Sadba. Mendelova univerzita v Brně, Brno.
- Eubanks MW. 2001. The Mysterious Origin of Maize. Economic Botany **55**:492–514.
- Fuksa P. 2018. Vliv organizace porostu silážní kukuřice na produkci bioplynu. Agromanuál **13**:99–103.

- Fuksa P. 2020. Regulace plevelů v porostech kukuřice seté. Pages 12–20 in Brant V, editor. Efektivní hospodaření s vodou a eliminace degradace půdy v pěstebních systémech kukuřice seté. Agrární komora České republiky, Praha.
- Hammad HM, Zia F, Bakhat HF, Fahad S, Ashraf MR, Wilkerson CJ, Shah GM, Nasim W, Khosa I, Shahid M. 2018. Uptake and toxicological effects of pharmaceutical active compounds on maize. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **258**:143–148.
- Hoagland DR & Arnon DI. 1950. The water-culture method for growing plants without soil. California Experiment Station Circular 347, The Collage of Agriculture, University of California, Berkeley.
- 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.
- Hruška J (Ed.). 1962. Monografie o kukuřici. Statní zemědělské Nakladatelství, Praha.
- Hufford MB, Bilinski P, Pyhäjärvi T, Ross-ibarra J. 2012. Teosinte as a model system for population and ecological genomics. *Trends in Genetics* **28**:606–615.
- Chloupek O, Procházková B, Hrudová E. 2005. Pěstování a kvalita rostlin. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, Brno.
- Iltis HH & Benz BF. 2000. *Zea Nicaraguensis (Poaceae)*, a New Teosinte from Pacific Coastal Nicaragua. *Novon* **10**:382–390.
- Iltis HH & Doebley JF. 1980. Taxonomy of *Zea (Gramineae)*. II. Subspecific categories in the *Zea mays* complex and a generic synopsis. *American Journal of Botany* **67**:994–1004.
- Ingr I, Pelikán M, Gajdůšek S, Dudáš F. 2001. Zpracování zemědělských produktů. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, Brno.
- Iori V, Zacchini M, Pietrini F. 2013. Growth, physiological response and phytoremoval capability of two willow clones exposed to ibuprofen under hydroponic culture. *Journal of Hazardous Materials* **262**:796–804.
- Kalaji HM. 2018. Prompt chlorophyll fluorescence as a tool for crop phenotyping: an example of barley landraces exposed to various abiotic stress factors. *Photosynthetica* **56**:953–961.
- Khan W, Prithviraj B, Smith DL. 2003. Photosynthetic responses of corn and soybean to foliar application of salicylates. *Journal of Plant Physiology* **160**:485–492.
- Klopfenstein TJ, Erickson GE, Berger LL. 2013. Maize is a critically important source of food, feed, energy and forage in the USA. *Field Crops Research* **153**:5–11.
- Kožnarová V, Sulovská S, Hájková L, Richterová D, Nekovář J. 2012. Historie a současnost fenologie v České republice. Pages 13–39 in Bláha L, Šerá B, editors. Vybrané kapitoly z fyziologie rostlin a zemědělského výzkumu. Výzkumný ústav rostlinné výroby v.v.i., Praha.

- Kranner I, Minibayeva FV, Beckett RP, Seal CE. 2010. What is stress? Concepts, definitions and applications in seed science. *New Phytologist* **188**:655–673.
- Kudla J, Becker D, Grill E, Hedrich R, Hippler M, Kummer U, Parniske M, Romeis T, Schumacher K. 2018. Advances and current challenges in calcium signaling. *New Phytol* **218**:414–431.
- Kudrna J, Hnilicka F, Kubes J, Vachova P, Hnilickova H, Kuklova M. 2020. Effect of Acetaminophen (APAP) on Physiological Indicators in *Lactuca sativa*. *Life* **10**:1–14.
- Kumar P, Lakshmi N, Mani V. 2000. Interactive effects of salicylic acid and phytohormones on photosynthesis and grain yield of soybean (*Glycine max* L. MERRILL). *Physiology and Molecular Biology of Plants* **6**:179–186.
- Kummerová M, Zezulka Š, Babula P, Tříška J. 2016. Possible ecological risk of two pharmaceuticals diclofenac and paracetamol demonstrated on a model plant *Lemna minor*. *Journal of hazardous materials* **302**:351–361.
- Kůst F & Záruba J. 2020. Situační a výhledová zpráva - Obiloviny 2019. Ministerstvo zemědělství, Praha.
- Kvesitadze EG & Kvesitadze GI. 2011. Ecological potential of plants. *Annals of Agrarian Science* **9**:89–96.
- Kvesitadze G. 2013. Degradation of anthropogenic contaminants by higher plants. *Biotechnologia Acta* **6**:132–144.
- Lamers J, Meer TVD, Testerink CH. 2020. How Plants Sense and Respond to Stressful Environments. *Plant Physiology* **182**:1624–1635.
- Larcher W. 1987. Stress bei Pflanzen. *Naturwissenschaften* **74**:158–167.
- Larqué-Saavedra A. 1978. The antitranspirant effect of acetylsalicylic acid on *Phaseolus vulgaris* L. *Physiologia Plantarum* **43**:126–128.
- Levitt J. 1980. Response of plants to environmental stress. Academic press, New York.
- Li Y, Zhu G, Ng WJ, Tan SK. 2014. A review on removing pharmaceutical contaminants from wastewater by constructed wetlands: Design, performance and mechanism. *Science of The Total Environment* **468**:908–932.
- Lichtenthaler HK. 1998. The Stress Concept in Plants: An Introduction. *Annals of the New York Academy of Sciences* **851**:187–197.
- Liška M, Soukupová K, Koželuh M, Tajč V. 2014. Organické mikrokontaminanty v povrchových vodách pocházející z plošných a bodových zdrojů, nejen v povodích vodárenských zdrojů. Pages 57–70 in Dolejš P, editor. Sborník konference Pitná voda 2014. W&ET Team, Č. Budějovice.
- Loučka R, Lang J, Jambor V, Tyrolová Y, Nedělník J, Trínáctý J, Kučera J. 2015. Kritéria pro výběr hybridů kukuřice na siláž. *Zemědělský výzkum spol. s r.o., Troubsko*.
- Mangelsdorf PC. 1958. Reconstructing the Ancestor of Corn. *Proceedings of the American Philosophical Society* **102**:454–463.

- Margenat A, Matamoros V, Diez S, Cañameras N, Comas J, Bayona JM. 2017. Occurrence of chemical contaminants in peri-urban agricultural irrigation waters and assessment of their phytotoxicity and crop productivity. *Science of The Total Environment* **599**:1140–1148.
- Matsuoka Y, Vigouroux Y, Goodman MM, Sanchez GJ, Buckler E, Doebley JF. 2002. A single domestication for maize shown by multilocus microsatellite genotyping. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **99**:6080–6084.
- Maxwell K & Johnson GN. 2000. Chlorophyll fluorescence - a practical guide. *Journal of Experimental Botany* **51**:659–668.
- Meier U. 2018. Growth stages of mono- and dicotyledonous plants BBCH Monograph. Julius Kühn-Institut, Quedlinburg.
- Melo HFD, Souza ERD, Cunha JC. 2017. Fluorescence of chlorophyll a and photosynthetic pigments in *Atriplex nummularia* under abiotic stresses. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* **21**:232–237.
- Mittler R. 2006. Abiotic stress, the field environment and stress combination. *Trends in Plant Science* **11**:15–19.
- Mosa KA, Ismail A, Helmy M. 2017. *Plant Stress Tolerance An Integrated Omics Approach*. Springer, Cham.
- Mumm RH, Goldsmith PD, Rausch KD, Stein HH. 2014. Land usage attributed to corn ethanol production in the United States: sensitivity to technological advances in corn grain yield, ethanol conversion, and co-product utilization. *Biotechnology for Biofuels* **7**:1–30.
- O'Brine T & Thompson RC. 2010. Degradation of plastic carrier bags in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin* **60**:2279–2283.
- Oprîş O, Copaciu F, Soran ML, Ristoiu D, Niinemets Ü, Copolovici L. 2013. Influence of nine antibiotics on key secondary metabolites and physiological characteristics *Triticum aestivum*: leaf volatiles as a promising tool to assess toxicity. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **87**:70–79.
- Orcutt DM, Nilsen ET, Lei TT, Lipp C, Semones S. 2000. *Physiology of Plants Under Stress: Soil and Biotic Factors*. John Wiley & Sons, New York.
- Orton LM, Burke SV, Wysocki WP, Duvall RM. 2017. Plastid phylogenomic study of species within the genus *Zea*: rates and patterns of three classes of microstructural changes. *Current Genetics: Microorganisms and Organelles* **63**:311–323.
- Pancheva TV, Popova LP, Uzunova AN. 1996. Effects of salicylic acid on growth and photosynthesis in barley plants. *Journal of plant physiology* **149**:57–63.
- Peterson RKD, Higley LG. 2000. Illuminating the Black Box: The Relationship Between Injury and Yield. Pages 11–22 in Peterson RKD, Higley LG, editors. *Biotic Stress and Yield Loss*. CRC Press, Boca Raton.

- Pino MR, Muñiz S, Val J, Navarro E. 2016. Phytotoxicity of 15 common pharmaceuticals on the germination of *Lactuca sativa* and photosynthesis of *Chlamydomonas reinhardtii*. *Environmental Science and Pollution Research* **23**:22530–22541.
- Piperno DR & Flannery KN. 2001. The earliest archaeological maize (*Zea mays* L.) from highland Mexico: new accelerator mass spectrometry dates and their implications. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **98**:2101–2103.
- Povolný M & Vacek E. 2019. Přehled odrůd kukuřice. Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský, Brno.
- Prescott LF. 2010. Paracetamol: past, present, and future. *American Journal of Therapeutics* **7**:143–147.
- Qiao X, Tang Z, Sun K. 2011. Plasticization of corn starch by polyol mixtures. *Carbohydrate Polymers* **83**:659–664.
- Rajakumar K. 2000. Pellagra in the United States: a historical perspective. *Southern Medical Journal* **93**: 272–277.
- Ranum P, Peña-Rosas JP, Garcia-Casal MN. 2014. Global maize production, utilization, and consumption. *Annals of the New York Academy of Sciences* **1312**:105–112.
- Redondo-Gómez S, Mateos-Naranjo E, Vecino-Bueno I, Feldman SROV. 2011. Accumulation and tolerance characteristics of chromium in a cordgrass Cr-hyperaccumulator, *Spartina argentinensis*. *Journal of Hazardous Materials* **185**:862–869.
- Reitschläger JD, Šerá B, Hájková L. 2014. Fenologické fáze zemědělských plodin ve vztahu k vědecko-výzkumné činnosti. Pages 63–69 in Bláha L, Šerá B, editors. Příspěvky k problematice zemědělského pokusnictví. Powerprint, Praha.
- 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.
- Sakaji RH, Book S, Hultquist R, Haberman R. 2004. Xenobiotics: What Are They and Why Are We So Concerned About Them?. *Journal (American Water Works Association)* **96**:58–66.
- Sandermann HJ. 1994. Higher plant metabolism of xenobiotics: the “green liver“ concept. *Pharmacogenetics* **4**:225–241.
- Sánchez González JJ, et al. 2011. Three new teosintes (*Zea* spp., *Poaceae*) from México. *American Journal of Botany* **98**:1537–1548.
- Santos L, Araújo AN, Fachini A, Pena A, Delerue-Matos C, Montenegro M. 2010. Ecotoxicological aspects related to the presence of pharmaceuticals in the aquatic environment. *Journals of Hazardous Materials* **175**:45–95.

- Sato T, Qadir M, Yamamoto S, Endo T, Zahoor A. 2013. Global, regional, and country level need for data on wastewater generation, treatment, and use. *Agriculture Water Management* **130**:1–13.
- Scarlat N, Dallemand J, Fahl F. 2018. Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy* **129**:457–472.
- Shaheen MR, Ayyub CM, Hussain R, Manan A, Mustafa Z, Sarwar M, Ahsan M, Sarwar N, Imran M. 2019. Salicylic acid improved the heat tolerance by enhancing growth, gas exchange attributes and chlorophyll contents of tomato. *Acta Horticulturae* **1257**:161–168.
- Schwanitz F. 1969. Vývoj kulturních rostlin. Státní zemědělské nakladatelství, Praha.
- Singh S, Bashri G, Singh A, Prasad SM. 2016. Regulation of Xenobiotics in Higher Plants: Signalling and Detoxification. Pages 39–56 in Singh A, Prasad S, Singh R, editors. *Plant Responses to Xenobiotics*. Springer, Singapore.
- Streit AFM, Collazzo CG, Druzian SP, Verdi RS, Foletto EL, Oliveira LFS, Dotto GL. 2021. Adsorption of ibuprofen, ketoprofen, and paracetamol onto activated carbon prepared from effluent treatment plant sludge of the beverage industry. *Chemosphere* (e128322) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128322>.
- Sturtevant EL. 1899. Varieties of Corn. U.S. Department of Agriculture, Office of Experiment Stations, Washington D. C.
- Šantrůček J. 2010. Nové možnosti šlechtění na vyšší účinnost využití vody. Pages 139–149 in Bláha L, Hnilička F, Martinková J, editors. *Současní možnosti fyziologie a zemědělského výzkumu příspěv k produkci rostlin (vybrané kapitoly)*. VÚRV, v.v.i. Ruzyně, Praha.
- Šarapatka B, et al. 2010. Agroekologie: východiska pro udržitelné zemědělské hospodaření. Bioinstitut o.p.s., Olomouc.
- Šašková D & Štolfa V. 1993. Trávy a obilí. Artia a.s. a Granit spol s r.o., Praha.
- Špaldon E (Ed.). 1963. Rostlinná výroba 1. Státní zemědělské nakladatelství, Praha.
- Špaldon E (Ed.). 1986. Rostlinná výroba. Státní zemědělské nakladatelství, Praha.
- Tășchină M, Copolovici DM, Bungău S, Lupitu AI, Copolovici L, Iovan C. 2017. The influence of residual acetaminophen on *Phaseolus vulgaris* L. secondary metabolites. *Farmacia* **65**:709–713.
- Třináctý J, Matoušková H, Vychodilová D. 2012. Výběr vhodných hybridů kukuřice podle čísla FAO. *Krmivářství* **16**:27–30.
- Turland NJ, et al. 2018. International Code of Nomenclature for algae, fungi, and plants (Shenzhen Code). Koeltz Botanical Books, Glashütten.
- ÚKZÚZ. 2020. Seznam odrůd zapsaných ve Státní odrůdové knize ke dni 15. června 2020 Věstník Ústředního kontrolního a zkušebního ústavu zemědělského, ročník XIX, řada Národní odrůdový úřad. ÚKZÚZ, Brno.
- Valíček P, et al. 2002. Užitkové rostliny tropů a subtropů. Academia, Praha.

- Vaněk T, Podlipná R, Fialová Z, Petrová S, Soudek P. 2010. Uptake of xenobiotics from polluted waters by plants. Pages 431–444 in Fatta-Kassinos D, Kümmerer K, Bester K, editors. *Xenobiotics in the Urban Water Cycle*. Springer, Dordrecht.
- Yaseen AA, Hussein AM, Esmail RM, Mohammad AA. 2020. Quality characteristics of snacks produced from nixtamalized corn flours of new drought-tolerant yellow corn hybrids. *Foods and Raw Materials* **8**:392–401.
- Zezulka Š, Kummerová M, Babula P, Hájková M, Oravec M. 2019. Sensitivity of physiological and biochemical endpoints in early ontogenetic stages of crops under diclofenac and paracetamol treatments. *Environmental Science and Pollution Research* **26**:3965–3979.
- Zhang H, Xu Z, Guo K, Huo Y, He G, Sun H, Guan Y, Xu N, Yang W, Guangyu S. 2020. Toxic effects of heavy metal Cd and Zn on chlorophyll, carotenoid metabolism and photosynthetic function in tobacco leaves revealed by physiological and proteomics analysis. *Ecotoxicology and Environmental Safety* (e110856) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110856>.
- Zhang JH, Guo SJ, Guo PY, Wang X. 2014. The interacting effect of urea and fenoxaprop-P-ethyl on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in *Perilla frutescens*. *Photosynthetica* **52**:456–463.
- Zhang Y, Geißen S, Gal C. 2008. Carbamazepine and diclofenac: Removal in wastewater treatment plants and occurrence in water bodies. *Chemosphere* **73**:1151–1161.
- Zhu H, Chen X, Pan X, Zhang D. 2011. Effects of chloramphenicol on pigmentation, proline accumulation and chlorophyll fluorescence of maize (*Zea mays*) seedlings. *International Journal of Agriculture & Biology* **13**:677–682.
- Zimolka J (Ed.). 2008. *Kukuřice hlavní a alternativní užitkové směry*. Profi Press s.r.o., Praha.

8.1 Internetové zdroje

- ADC BioScientific. 2013. LCPro+. ADC BioScientific Ltd. Available from https://www.adc.co.uk/wp-content/uploads/2013/09/LCProSD_8_Page.pdf (accessed March 2021).
- Cerkal R. 2011. *Stresy a produkční výkonnost polních plodin - Habilitační přednáška*. Mendelova universita v Brně. Available from http://web2.mendelu.cz/af_291_sklad/habilitacni_prednasky/habilitacni_prednaska_cerkal.pdf (accessed November 2020).
- ČSÚ. 2020a. *Definitivní údaje o sklizni zemědělských plodin - 2019*. ČSÚ, Praha. Available from <https://www.czso.cz/csu/czso/definitivni-udaje-o-sklizni-zemedelskych-plodin-2019> (accessed November 2020).
- ČSÚ. 2020b. *Odhady sklizně - operativní zpráva - k 15. 9. 2020*. ČSÚ, Praha. Available from <https://www.czso.cz/csu/czso/odhady-sklizne-operativni-zprava-k-15-9-2020> (accessed November 2020).

- ČSÚ. 2020c. Soupis ploch osevů - k 31. 5. 2020. ČSÚ, Praha. Available from <https://www.czso.cz/csu/czso/soupis-ploch-osevu-k-31-5-2020> (accessed November 2020).
- ČSÚ. 2021. Definitivní údaje o sklizni zemědělských plodin - 2020. ČSÚ, Praha. Available from <https://www.czso.cz/csu/czso/definitivni-udaje-o-sklizni-zemedelskych-plodin-2020> (accessed March 2021).
- Doebly JF. 2003. The taxonomy of *Zea*. University of Wisconsin-Madison. Available from <https://teosinte.wisc.edu/taxonomy.html> (accessed November 2020).
- FAO. 2020. FAOSTAT: Crops - Area harvested, yield and production quantity. FAO, Rome. Available from <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> (accessed November 2020).
- MŽP. 2020. Plochy oseté kukuřicí MON 810 v ČR od roku 2005. MŽP, Praha. Available from [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/aktualni_informace/\\$FILE/OERES-plocha_MON810-20200708.002.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/aktualni_informace/$FILE/OERES-plocha_MON810-20200708.002.pdf) (accessed November 2020).
- Opti-Sciences. 2021. OS5p+. Opti-Sciences, Inc. Available from https://www.optisci.com/assets/os5p-_brochure.pdf (accessed March 2021).
- Skládanka J. 2006. Kukuřice setá. Ústav výživy a pícninářství MZLU v Brně, Brno. Available from https://web2.mendelu.cz/af_222_multitext/picniny/sklady.php?odkaz=kukurice.html (accessed November 2020).
- VP AGRO. 2020. Katalog kukuřice RTG Sixxtus. VP AGRO spol. s r.o. Available from https://www.vpagro.cz/images/plants/1/1-VPagro-katalog-kukurice-20-09-19_Sixxtus1571748470.pdf (accessed March 2021).

9 Samostatné přílohy

Fáze	BBCH	Popis	
0 Klíčení	0	suchá obilka	
	01–03	bobtnání	
	05–07	růst radikuly a koleoptile	
	9	koleoptile nad povrchem půdy	
1 Růst listů	11	první plně rozvinutý list	
	19	9 a více listů rozvinutých	
3 Prodlužovací fáze /sloupkování	30	začátek prodlužování	
	31	první viditelné kolénko	
	39	9 a více kolének	
5 Metání lat	51	lata v pochvě dobře znatelná	
	53	vrcholek laty viditelný	
	55	střední metání (lata úplně viditelná), střední větve laty se rozvíjejí	
	59	konec metání lat (dolní větve laty plně rozvinuté)	
6 Kvetení	61	samčí květenství: prašníky ve středu laty viditelné samičí květenství: objevují se špičky palic v listových pochvách	
	63	samčí květenství: začátek prášení prašníků samičí květenství: vrcholek blizen viditelný	
	67	samčí květenství: květ ukončen samičí květenství: blizny zasychají	
	69	konec květu	
	7 Tvorba obilky	71	počátek tvorby plodu: zrna jsou zjistitelná: obsah vodnatý: cca 16 % sušiny
		73	raná mléčná zralost
75		mléčná zralost, obilky ve středu palice jsou žlutobílé, obsah mléčný, cca 40 % sušiny zrna	
79		konečná velikost obilek	
8 Zrání	83	raná vosková zralost, měkké obilky, cca 45 % sušiny	
	85	vosková zralost, žluté obilky, cca 55 % sušiny	
	87	fyziologická zralost, černá skvrna/vrstva na bázi obilek, cca 60 % sušiny	
	89	plná zralost, obilky jsou tvrdé a lesklé, cca 65 % sušiny	
9 Stárnutí	97	rostlina umírá a zasychá	
	99	sklizený produkt	

Tabulka I: BBCH fáze kukuřice (upraveno podle Meier 2018)

Látka	složení živného roztoku (g l ⁻¹)
Ca(NO ₃) ₂	0,821
KNO ₃	0,506
KH ₂ PO ₄	0,136
MgSO ₄	0,120
citrát Fe	1 ml
NH ₄ NO ₃	0
KCl	0
CaCl ₂	0
Mikroelementy dle Bersona	1 ml

Tabulka II: Hoaglandův živný roztok (Hoagland & Aron 1950) s mikroelementy (Benson et al. 2009)