

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra genetiky a šlechtění



**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

**Současné trendy ve šlechtění pšenice obecné na kvalitu
v souvislosti se změnami klimatu**

Bakalářská práce

Tereza Kubecová

Kvalita potravin a zpracování zemědělských produktů

Ing. Petr Sedlák, Ph.D.

© 2022 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci „Současné trendy ve šlechtění pšenice obecné na kvalitu v souvislosti se změnami klimatu“ jsem vypracovala 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 autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 22. 4. 2022

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Petru Sedlákovi, Ph.D. za všechny jeho hodnotné rady, připomínky, cenné zkušenosti, doporučení, a především za jeho nesmírně ochotný přístup. Dále bych ráda vyjádřila velké díky mé rodině a přátelům, již mě při komponování práce podporovali. Nakonec bych chtěla poděkovat paní magistře Evě Blahnové za celkový vhled do biologie, protože nebýt jí, nikdy bych se nedostala až sem.

Současné trendy ve šlechtění pšenice obecné na kvalitu v souvislosti se změnami klimatu

Souhrn

Pšenice setá (*Triticum aestivum* L.) je zemědělskou plodinou světového významu. V poslední době je její pěstování ohroženo stresovými faktory, které s působením klimatických změn získávají na významu. Záměrem této práce bylo analyzovat aktuální trendy ve šlechtění pšenice seté s cílem eliminovat degradaci kvality pšenice a její produkce, jež je ohrožena rizikovými faktory klimatické změny. Dále popsat vliv konkrétních enviromentálních faktorů na kvalitu produkce pšenice a zhodnotit dostupnost genetických zdrojů.

Aktuální trendy ve šlechtění pšenice jsou ve snaze zlepšit kvalitu pšenice při abiotických a biotických stresech zaměřeny na suchovzdornost a odolnost vůči houbovým chorobám. Současně probíhá šlechtění pro zvyšování kvality pekárenské pšenice s důrazem na hlavní glutenové proteiny gliadiny a gluteniny. V návaznosti na tyto trendy se šlechtitelé snaží dosáhnout co největší genetické variability, protože je základem pro šlechtění nových odrůd s potřebnými geny odolnosti a rezistence k současným stresům.

Byly definovány konkrétní enviromentální faktory, které významně ovlivňují kvalitu pšenice, jako je salinita a stres ze sucha a horka. Salinita je abiotický stres vyvolaný klimatickou změnou a člověkem. Bylo zjištěno, že salinita je nejcitelnější v semiaridních a aridních oblastech, kde se půda jejím vlivem stává částečně nebo zcela pěstebně nepoužitelnou. Salinita u pšenice způsobuje narušením iontové a vodní homeostázy snížení růstu a výnosu rostlin. Rovněž negativně ovlivňuje metabolismus a syntézu všech základních živin v rostlině, což má za následek degradaci pšeničného zrna. Vliv stresu ze sucha a horka na kvalitu pšenice závisí na době jeho působení. Teplota a srážky nepřímo působí na kvalitu ovlivněním frekvence výskytu a druhového spektra houbových chorob postihujících pšenici.

Genetické zdroje pro všechny pěstované rostliny jsou zdokumentovány a uloženy ve sbírkách a genových bankách po celém světě. V České republice tento systém zřizuje Výzkumný ústav rostlinné výroby (VÚRV) a genová banka jím spravovaná. V otázce dostupnosti genetických zdrojů je důležitá interakce mezi jednotlivými genovými bankami, čemuž napomáhá informační systém GRIN Czech (Germplasm Resources Information Network in the Czech Republic). GRIN Czech je spravován VÚRV a slouží k vyhledávání informací o genetických zdrojích rostlin v něm zaznamenaných. Tento systém mohou pro získání genetického základu využívat šlechtitelé, experimentální pracovníci, pěstitelé i laická veřejnost. Díky databázi GRIN Czech a intenzivní práci výzkumného týmu genové banky VÚRV a dalších institucí je dostupnost genetických zdrojů aktuálně uspokojivá a má dobré výhledy do budoucna.

Klíčová slova: parametry kvality pšenice, tolerance k suchu, rezistence k houbovým chorobám, tolerance k zasolení

Current trends in breeding on quality of common wheat in the relation to the change of climate

Summary

Wheat (*Triticum aestivum* L.) is an agricultural crop of world importance. Recently, its cultivation has been threatened by stress factors, which have become more important due to the effects of climate change. The aim of this work was to analyse current trends in wheat breeding in order to eliminate the degradation of the quality of wheat and its production, which is threatened by risk factors of climate change. Further, to describe the influence of specific environmental factors on the quality of wheat production and to evaluate the availability of genetic resources.

Current trends in wheat breeding, in an effort to improve the quality of wheat under abiotic and biotic stresses, focus on drought resistance and resistance to fungal diseases. At the same time, breeding is carried out to improve the quality of bakery wheat with an emphasis on the main gluten proteins gliadines and glutenins. Following these trends, breeders aim to achieve the greatest possible genetic variability as it is the basis for breeding new varieties with the necessary genes for resistance and resistance to current stresses.

Specific environmental factors have been defined that significantly affect the quality of wheat, such as salinity and stress from drought and heat. Salinity is abiotic stress induced by climate change and man. Salinity has been found to be most sensitive in semiarid and arid regions, where it makes the soil partially or completely unusable for cultivation. Salinity in wheat causes a reduction in plant growth and yield by disrupting ion of ion and water homeostasis. Furthermore, it negatively affects the metabolism and synthesis of all essential nutrients in the plant, resulting in degradation of the wheat grain. The influence of stress from drought and heat on the quality of wheat depends on its duration of action. Temperature and precipitation indirectly affect the quality of wheat by influencing the frequency and species spectrum of fungal diseases affecting wheat.

Genetic resources for all cultivated plants are documented and stored in collections and gene banks around the world. The Research Institute of Plant Production (VÚRV) and the gene bank managed by it establishes this system in the Czech Republic. In the question of availability of genetic resources, the interaction between individual gene banks is important, which is aided by the GRIN Czech (Germplasm Resources Information Network in the Czech Republic) information system. GRIN Czech is managed by VÚRV and serves to search for information on plant genetic resources recorded in it. This system can be used for obtaining genetic basis by breeders, experimental workers, growers and the general public. Thanks to the GRIN Czech database and intensive work of the research team of the VÚRV gene bank and other institutions, the availability of genetic resources is currently satisfactory and with good prospects.

Keywords: wheat quality parameters, tolerance to drought, resistance to fungal diseases, tolerance to salinisation

Obsah

1	Úvod	8
2	Cíl práce	9
3	Literární rešerše	10
3.1	Biologická charakteristika pšenice seté	10
3.1.1	Taxonomie a nejznámější druhy	10
3.1.2	Morfologie a anatomie	10
3.2	Původ, vývoj a historie pěstování pšenice seté	11
3.2.1	Původ a vývoj pšenice seté	11
3.3	Význam pšenice	12
3.4	Kvalita pšenice	12
3.4.1	Kvalitativní parametry	12
3.4.2	Kvalitativní faktory	13
3.5	Význam šlechtění pšenice	13
3.5.1	Proč šlechtíme	13
3.5.2	Jak probíhá šlechtění	13
3.5.2.1	Křížení	14
3.5.2.2	Mutageneze	14
3.5.2.3	Polyploidizace	14
3.5.2.4	Biotechnologické postupy	16
3.6	Aktuální trendy ve šlechtění pšenice seté na kvalitu	16
3.6.1	Pekařská kvalita	16
3.6.1.1	Gladieny a gluteniny jako markery pro zjišťování vhodných pekárenských odrůd	17
3.6.2	Zvýšení odrůdové a druhové diverzity	18
3.6.3	Kvalita pšenice při abiotických a biotických stresech	18
3.6.3.1	Suchovzdornost	18
3.6.3.2	Fusarióza	19
3.6.3.3	Rzi	21
3.7	Změny klimatu a jejich dopad na pěstování pšenice	25
3.7.1	Definice klimatu a klimatické změny	25
3.7.2	Původci změny klimatu	25
3.7.3	Dopady klimatických změn na zemědělskou produkci	26
3.7.3.1	Dopad klimatických změn na fyziologii a kvalitu pšenice	26
3.7.3.2	Predikce působení klimatických změn na pšenici	26
3.7.4	Konkrétní enviromentální faktory ovlivňující kvalitu pšenice	27

3.7.4.1	Stres ze sucha a horka	27
3.7.4.2	Salinita.....	29
3.8	Genetické zdroje.....	31
3.8.1	Význam a využití biodiverzity	31
3.8.2	Genové banky a jejich funkce.....	31
3.8.3	Získávání a hodnocení genetických zdrojů.....	32
3.8.4	Příklady genetických zdrojů	33
3.8.4.1	Annie.....	33
3.8.4.2	Bohemia	34
3.8.4.3	Turandot	34
3.8.4.4	Illusion.....	34
3.8.4.5	Julie	34
3.8.5	Hodnocení dostupnosti genetických zdrojů.....	34
3.9	Závěr.....	36
3.10	Literatura.....	37

1 Úvod

Pšenice setá (*Triticum aestivum L.*) je jednou z nejdůležitějších plodin pro zajištění potravin a potravinové bezpečnosti na naší planetě. Je klíčovou surovinou nejen k výrobě mlýnských výrobků a z nich připravovaných potravin, jako pečiva nebo těstovin, ale také pro výrobu krmiv hospodářských zvířat. Významu pšenice odpovídá i množství ploch, na kterých se pěstuje, a to po celém světě. Jejimi největšími producenty jsou státy Evropské unie, Čína, Rusko a Spojené státy americké. V posledních desetiletích se však vlivem klimatických změn a působením činnosti člověka potýká lidstvo se snížením výnosů této plodiny ve většině zmiňovaných oblastech.

Změna klimatu zapříčiňuje postupné zvyšování teplot a výskyty sucha. Podobnou měrou zatěžuje pěstování pšenice vysoké zasolení půd či houbové choroby. Tyto skutečnosti mají negativní vliv nejen na výnos pšenice, ale i na kvalitu produkce. Vědci a šlechtiteli je tato problematika intenzivně řešena, protože potřeba pšenice a poptávka po ní kvůli zvětšující se populaci neustále roste.

V této práci jsou shrnuty aktuální studie a možná šlechtitelská řešení problémů pěstování pšenice s ohledem na vliv klimatických změn a komplikací, které přináší.

2 Cíl práce

Cílem práce je analyzovat a popsat aktuální šlechtitelské trendy v pěstování pšenice seté zaměřené na kvalitu produkce pšenice, jež je v současnosti výrazně ovlivňována klimatickými změnami. Dále budou specifikovány konkrétní enviromentální faktory, které mají na kvalitu produkce pšenice největší vliv, jako je stres ze sucha a horka, zasolení půd a houbové choroby. Následovat bude popis genetických zdrojů a vyhodnocení jejich dostupnosti.

3 Literární rešerše

3.1 Biologická charakteristika pšenice seté

3.1.1 Taxonomie a nejznámější druhy

Taxonomické zařazení pšenice seté je problematické stejně jako u většiny pěstovaných plodin (Goncharov 2011; Goriewa-Duba et al. 2018).

V současnosti se za správné taxonomické označení považuje pšenice setá (*Triticum aestivum*), jež se řadí mezi jednoděložné krytosemenné rostliny. Patří do čeledi lipnicovitých (*Poaceae*) a rodu *Triticum* (Plaidas 2022).

Do rodu *Triticum* spadají zhruba dvě desítky druhů. Rozdělení se určuje na základě počtu chromozomů a pluchatosti obilek (Zimolka et al. 2005). Nejznámější z druhů s pluchatou obilkou jsou například pšenice jednozrnka (*Triticum monococcum* L.) s počtem chromozomů $2n = 14$ (Amagai et al. 2014), pšenice dvouzrnka (*Triticum turgidum dicoccon* Schrank) s počtem chromozomů $2n = 28$ (Desiderio et al. 2014) nebo pšenice špalda (*Triticum spelta* L.) s počtem chromozomů $2n = 42$ (Blatter et al. 2004). Mezi nejznámější druhy s nahou obilkou patří pšenice tvrdá (*Triticum durum* DESF.) s počtem chromozomů $2n = 28$ (Elfatih et al. 2013) a pšenice setá (*T. aestivum*) s počtem chromozomů $2n = 42$ (Goriewa-Duba et al. 2018). Pšenice setá se následně taxonomicky rozděluje na variety a odrůdy. Variety má čtyři: *lutescens*, *milturum*, *ferrugineum*, *erythrospermum*. V těchto varietách rozeznáváme dvě formy pšenice – pšenici ozimou a jarní. Dále se variety dělí primárně dle barvy klasu a osinatosti klasu. V České republice zaujímají nejvýznamější roli ozimé odrůdy patřící do variety *lutescens* (Zimolka et al. 2005).

3.1.2 Morfologie a anatomie

Plod pšenice seté, stejně jako u ostatních obilnin, nazýváme obilka. Obilka se skládá ze tří hlavních dílů: zárodku, endospermu a obalových vrstev. Obalové vrstvy obilky jsou tvořeny oplodím a osemením, které k sobě úzce přiléhají. Pod osemením se nachází aleuronová vrstva, jež přiléhá na endosperm. Uvnitř buněk endospermu je škrob v podobě škrobových zrn. Ta mají obvykle čočkovitý tvar, ale jejich velikost může být rozmanitá. U vrchní strany obilky se nachází zárodek, ten štítkem přiléhá k endospermu a je obalen oplodím a osemením. Na apikální straně se nachází vzrostný vrchol (plumula) s prvotními listy, pokrytý kleoptile. Na opačné, bazální straně je uložen hypokotyl a základy prvotních kořenů. V zárodku je obvykle 3–5 kořínků. Uprostřed se nachází radícula pokryta koleorhizou, která dává během klíčení základ pro primární kořen. Na špičce radicyly je kořenová čepička calyptra, zabraňující poškození buněk meristému během prorůstání kořene oplodím (perikarpem) (Zimolka et al. 2005).

3.2 Původ, vývoj a historie pěstování pšenice seté

3.2.1 Původ a vývoj pšenice seté

Původ a to, kde se začal odehrávat příběh pšenice seté je otázkou, která je aktivně a dlouhodobě řešena (Goriewa-Duba et al. 2018; Matsuoka & Mori 2020). Aktuálně se předpokládá, že vše nejspíše začalo zhruba před 0,82 miliony lety (Svacina et al. 2020) v oblasti jižního pobřeží Kaspického moře (Matsuoka & Mori 2020). Došlo k samovolné hybridizaci dvou diploidních druhů *Triticum urartu* Thum. ex Gandil, jež vnesl genom AA (Goriewa-Duba et al. 2018) a *Aegilops speltoides* Tausch ze sekce *Sitopsis*, nebo jeho blízkce příbuzného. *A. speltoides* byl donorem genomu BB (Svacina et al. 2020). Z tohoto zkřížení vzešel tetraploidní emmer *Triticum turgidum* L. ssp. *dicocoides* s genomem BBAA a o počtu chromozomů $2n = 28$. Vlivem mutace vzniklého tetraploidu došlo ke genezi dalšího typu tetraploida *Triticum turgidum dicoccon* Schrank ex. Schübl (Goriewa-Duba et al. 2018), který je považován za mateřského původce *Triticum aestivum* (Matsuoka & Mori 2020) s genomem BBAADD a počtem chromozomů $2n = 42$ (Svacina et al. 2020). Nasvědčuje tomu fakt, že žádná divoká forma *T. aestivum* nebyla dosud nalezena. *T. turgidum dicoccon* má mnoho kultivarů, avšak v přírodě můžeme sledovat i její divokou formu. Otcovským původcem a donorem genomu DD má být *Aegilops tauschii* Coss., resp. jedna z jeho intraspecifických linií.

Intraspecifické linie jsou linie vzniklé mezidruhovým křížením a k jejich identifikaci dochází pomocí genotypů celogenomových molekulárních markerů (Matsuoka et al. 2013; Mizuno et al. 2010b). *A. tauschii* má tři intraspecifické linie, dvě ústřední linie TauL1 a TauL2 a jednu vedlejší linii TauL3. D genomu pšenice seté jsou dle rozborů příbuznější linie TauL2 a TauL3. Zeměpisné rozložení těchto linií je v druhovém spektru rozdílné. Linií TauL2 najdeme výhradně v západní oblasti druhového spektra, zatímco TauL1 se vyskytuje ve všech jeho zónách. Linie TauL3 prospívá jen na území Gruzie. *A. tauschii* a všechny jeho linie se vyskytují pouze v divoké formě. Střetnutí *T. turgidum dicoccon* a *A. tauschii* se uskutečnilo díky postupnému zvyšování počtu obdělávaných ploch a rozvoji zemědělství, které šlo ruku v ruce s osídlováním planety (Matsuoka & Mori 2020).

Vědci předpokládají, že v minulosti docházelo ke křížení *Aegilops tauschii* a *Triticum turgidum dicoccon* velmi frekventovaně (Matsuoka & Takumi 2017). Jedním z důvodů může být polymorfni charakter *A. tauschii* (Matsuoka et al. 2007). Objevují se tedy teorie nastiňující možnost některých genotypů *A. tauschii* podílet se na vývoji pšenice seté větší měrou než genotypy jiné. Později provedené studie navíc označily potomky linie TauL2 z jihokaspické oblasti jako ty s výraznou tendencí k samovolné hybridizaci s *T. turgidum dicoccon* (Matsuoka & Takumi 2017). Polymorfismus mohl tedy mít na křížení *A. tauschii* a *T. turgidum dicoccon* značný dopad (Matsuoka et al. 2013).

Kromě polymorfismu otcovského původce má na vývoj pšenice vliv i její alopolyploidní charakter (Svacina et al. 2020; Wang et al. 2018; Matsuoka & Mori 2020). U alopolyploidních organismů může dojít k fúzi neredukovaných gamet v hybriděch F1 a existenci hybridizační bariéry (Ramsey & Schemske 1998). Existence hybridizačních neboli reprodukčních bariér může být důvodem neexistence alopolyploidů, protože jsou schopny omezovat vznik a vitalitu hybridů F1 generace. U potomků *Triticum turgidum dicoccon* a *Aegilops tauschii* jsou známy

různé typy těchto bariér, jako například možnost křížení mezi parentálními druhy nebo úmrtnost hybridů F1 generace (Matsuoka & Takumi 2017; Mizuno et al. 2010a).

Fúze neredukovaných gamet funguje naopak. Zdvojením genomu hybridu F1 spouští alopolyploidní speciaci a tím přirozeně i genezi alopolyploidů. Hybridi F1 generace *Triticum turgidum dicoccon* a *Aegilops tauschii* jsou trihaploidní, po procesu genomového zdvojení tedy vytvářejí semena alohexaploidu F2. Nad četností zdvojování genomu mají kontrolu parentální genotypy.

Fúze neredukovaných gamet a hybridizačních bariér u alopolyploidů mají opačný efekt. Alopolyploidní charakter pšenice seté tedy může mít na její vývoj příznivý i negativní vliv (Matsuoka & Mori 2020).

3.3 Význam pšenice

Před 12 000 až 5 000 lety se v oblasti úrodného půlměsíce vyskytovaly různé planě rostoucí rostliny. Z některých postupně vznikly obilniny, jako například pšenice dvouzrnka (*Triticum turgidum dicoccon*) a později i pšenice jednozrnka (*Triticum monococcum*) (Beranová 2015). Tyto a další obilniny byly od pravěku až po novověk základní surovinou pro výrobu nejrůznějších pokrmů. Jednalo se o chleba, různé nekvašené placky, kaše, sladké pečivo a později i těstoviny (Beranová 2015).

Dnes je pšenice setá pěstována napříč celým světem, a to především z důvodu jejích dobrých vlastností a předpokladů pro výrobu potravin. Hraje neopominutelnou roli v lidské výživě, a tudíž je i nezastupitelnou komoditou v problematice zajištění potravinové bezpečnosti (Igrejas & Branlard 2020).

3.4 Kvalita pšenice

3.4.1 Kvalitativní parametry

Celková kvalita pšeničného zrna je z velké části ovlivňována genomem D (Chloupek 2008) a určuje ji mnoho kvalitativních parametrů. Výběr hodnocených kvalitativních parametrů pšenice se odvíjí od jejího budoucího využití (Hernandez-Espinosa et al. 2018).

Například v pekárenství, kde je důležitá především kvalita kynutého těsta, se hodnotí výsledky Rapid Mix Testu, sedimentačního testu, obsah hrubých bílkovin, číslo poklesu (Chloupek 2008), index lepku nebo doba vývoje těsta (Rakszegi et al. 2016). Rapid Mix Test určuje velikost objemu vyprodukovaného pečiva. Pomocí sedimentačního testu je stanoven objem sedimentu ze suspenze mouky a dalších látek, dle typu sedimentačního testu.

U pšenice určené k výrobě krekrů, sušenek apod. z nekynutého těsta může být obsah bílkovin nebo tvrdost zrna nižší. Ve škrobárenství a lihovarnictví je důležitý vysoký obsah škrobu v zrně, neboť jej využívají kvasinky alkoholového kvašení pro produkci alkoholu. Krmiva pro hospodářská zvířata by měla obsahovat větší množství bílkovin. Důležité jsou hlavně ve vodě rozpustné albuminy a globuliny, protože ty mohou monogastrikárná zvířata strávit a využít (Chloupek 2018).

3.4.2 Kvalitativní faktory

Faktory, jež ovlivňují kvalitu pšenice jsou především genotypové, environmentální, anebo kombinované (genotyp \times prostředí). Předpokládá se, že největší vliv na celkovou kvalitu pšenice má genotyp dané odrůdy. Další názory potvrzují významný vliv genotypu, avšak zdůrazňují i vliv environmentálního (Dvořáček et al. 2013) a kombinovaného charakteru, například ve vztahu k některým vlastnostem těst (Hernandez-Espinosa et al. 2018).

3.5 Význam šlechtění pšenice

3.5.1 Proč šlechtíme

Šlechtění je cílevědomá a kreativní lidská činnost, která si klade za cíl tvořit nové odrůdy i druhy. Šlechtění lze přirovnat k řízené evoluci – člověk na základě svých potřeb a znalostí vědomě vytváří nové kultivary. Princip šlechtění spočívá v dostatku rozdílných genotypů – tzv. genetické variability. Pokud je tato variabilita dostatečně obsáhlá, umožňuje selektovat genotypy, jež mají šlechtitelem požadované atributy. Rostliny nesoucí tyto genotypy se namnoží za použití různých metodik, které budou blíže specifikovány v následující kapitole. Hlavním cílem těchto metodik je udržet kvalitu vybraných znaků i v následujících generacích, a to v ideálním případě na stejné úrovni, jako v generaci první (Chloupek 2008).

U pšenice jsou vybírány znaky, které zajistí zvýšení odolnosti pšenice a její dobrý výnos i mimo obvyklé oblasti pěstování. Pozornost je věnována šlechtění na odolnost vůči stresu ze sucha, chladu a různým druhům škůdců a chorob. Šlechtěním odolných kultivarů jsou výrazně pozitivně ovlivňovány velikosti pěstebních ploch a tím i výše získaných výnosů. Dalším benefitem šlechtění je lepší kvalita pšeničného zrna, která se dále odráží v dalších odvětvích průmyslu, například v potravinářství. Progres v těchto oblastech šlechtění pšenice napomáhá uspokojit potravinové potřeby neustále se zvětšující populace (Chloupek 2008), což je jedním z klíčových úkolů dnešního šlechtění.

3.5.2 Jak probíhá šlechtění

Pro šlechtění jakékoli odrůdy pšenice je zapotřebí výchozí šlechtitelský materiál, jež je základem pro vytvoření dostatečně rozsáhlé genetické variability. Takový materiál najdeme kromě šlechtitelských stanic i ve výzkumných ústavech a genetických bankách. Výchozí materiál se dělí do dvou základních skupin na adaptované odrůdy a neadaptovaný výchozí materiál (Chloupek 2008).

Adaptované odrůdy jsou přivyklé pěstitelským a klimatickým podmínkám, pro které má být nový kultivar vyšlechtěn. Jejich adaptací je zajištěn odpovídající výnos a kvalita zrna. Jako příklad lze uvést situaci, kdy je v zájmu šlechtitele vyšlechtit odrůdu odolnou vůči stresu ze sucha a horka. Pro výchozí šlechtitelský materiál je tedy vhodné zvolit adaptovanou odrůdu vypěstovanou v suché oblasti s teplým podnebím. Pokud se šlechtitel rozhodne využít perspektivy pouze adaptovaných odrůd, cílem je obvykle sdružovat znaky parentálních odrůd nebo další zvyšování objemu výnosu (Chloupek 2008).

Neadaptovaný materiál se využívá pro dosažení nějakého nového znaku u šlechtěné odrůdy. Obvykle se jedná o různé typy rezistencí, jako například rezistence vůči suchu, chladu,

chorobám nebo škůdcům. Neadaptovaným materiálem mohou být pšenici podpodobné volně žijící plané druhy. Využívají se zejména kvůli jejich toleranci k abiotickým i biotickým stresům (Chloupek 2008). Tyto druhy jsou velice hodnotným genetickým základem pro šlechtění nové odrůdy s potřebnými vlastnostmi (Goriewa-Duba et al. 2018).

Za neadaptovaný výchozí materiál lze považovat i krajové odrůdy, tj. odrůdy přizpůsobené podnebným podmínkám, ale nikoli podmínkám, v nichž plánuje šlechtitel novou odrůdu pěstovat (Chloupek 2008). Pro zvýšení genetické variability jsou odrůdy tohoto typu nesmírně důležité. Potvrzuje to studie Leisova-Svobodova et al. (2020), která zdůrazňuje potenciál krajových odrůd jakožto přínos pro současné šlechtění a doporučuje jejich zařazení do šlechtitelských programů.

Získaný výchozí materiál obvykle neposkytuje šlechtiteli dostatečné množství genetické variability. Pro její dosažení se využívá několika různých postupů, a to především křížení, mutagenese, polyploidizace, biotechnologických metod atd. (Chloupek 2008).

3.5.2.1 Křížení

Metoda křížení, jež je mezi šlechtiteli rozšířená, je metoda, při níž se u vybrané mateřské rostliny odstraní tyčinky, resp. prašníky. Dojde tak ke kastraci samčího pohlavního orgánu. Samičí pohlavní orgány, které v mateřské rostlině zůstaly, se opylí pylem z prašníků vybrané otcovské rostliny. Oba tyto kroky se provádí ručně pomocí malé pinzety. Neprodleně po opylení se klasy takto upravených mateřských rostlin vloží do ochranných sáčků (izolátorů), aby nedošlo k opylení jinými rostlinami. Proces je vzhledem k nutnosti ruční práce poměrně náročný, jak časově, tak i personálně (Balounová et al. 2010).

Pšenice setá je samosprašným druhem. Šlechtitel tedy vhodné rostliny začíná selektovat až v druhé filiální generaci F₂, kdy dochází ke štěpení. Cílem křížení je získat prostřednictvím křížení rodičů potomky vykazující heterózní efekt, tj. fenotyp vykazuje u potomků lepší vlastnosti než u rodičů (Chloupek 2008).

3.5.2.2 Mutagenese

Mutagenese je proces vyvolávající mutaci, tedy nepředvídanou změnu genetické informace. Mutagenese se využívá v případech, kdy ani po křížení nebo selekci nebylo dosaženo potřebné vlastnosti kultivarů. Není mnoho kultivarů vzniklých mutagenesí, přesto má ve šlechtění pšenice svůj podíl (Chloupek 2008). Například ve studii autora Zhang et al. (2018) se pomocí analýzy aditivních mutantů podařilo objasnit některé důležité funkce genu TaGW2 ve výnosových, ale i kvalitativních vlastnostech pšeničného zrna. Mutagenesí lze částečně řešit i rezistence vůči plísňovým chorobám v pšenici. Příkladem je studie autora Zhang et al. (2017), kde byla pro vytvoření této rezistence použita genomová editace.

3.5.2.3 Polyploidizace

Polyploidizace je typem mutace, jejímž cílem je zdvojení genomu (Chloupek 2008). Druhy vzniklé polyploidizací se nazývají polyploidi a jejich genetická informace nese tři či více chromozomových sad (Svacina et al. 2020). Na vytvoření dostatečné genetické variability prostřednictvím polyploidizace je známo několik metod. První z nich spočívá v duplikaci

chromozomů nerozdělením dělicího vřeténka při mitóze. Tato metoda se běžně provádí pomocí chemických sloučenin aplikovaných na meristémy. V přirozených podmínkách tato situace nastává zřídka. Další možnou cestou je geneze neredukovaných gamet. Jejich tvorba se zvyšuje po vystavení rostliny stresu, který může představovat sucho, náhlé chladné nebo horké počasí či fyzické poranění. Toto zjištění by mohlo znamenat, že při nečekaných nepříznivých podmínkách a náhlých zvratech v počasí, by bylo možné očekávat nárůst počtu polyploidních rostlin. Ke vzniku polyploidní rostliny může prostřednictvím neredukovaných gamet dojít třemi způsoby, viz Obrázek 1.

Obrázek 1: Možnosti vzniku polyploidní rostliny (Svacina et al. 2020)

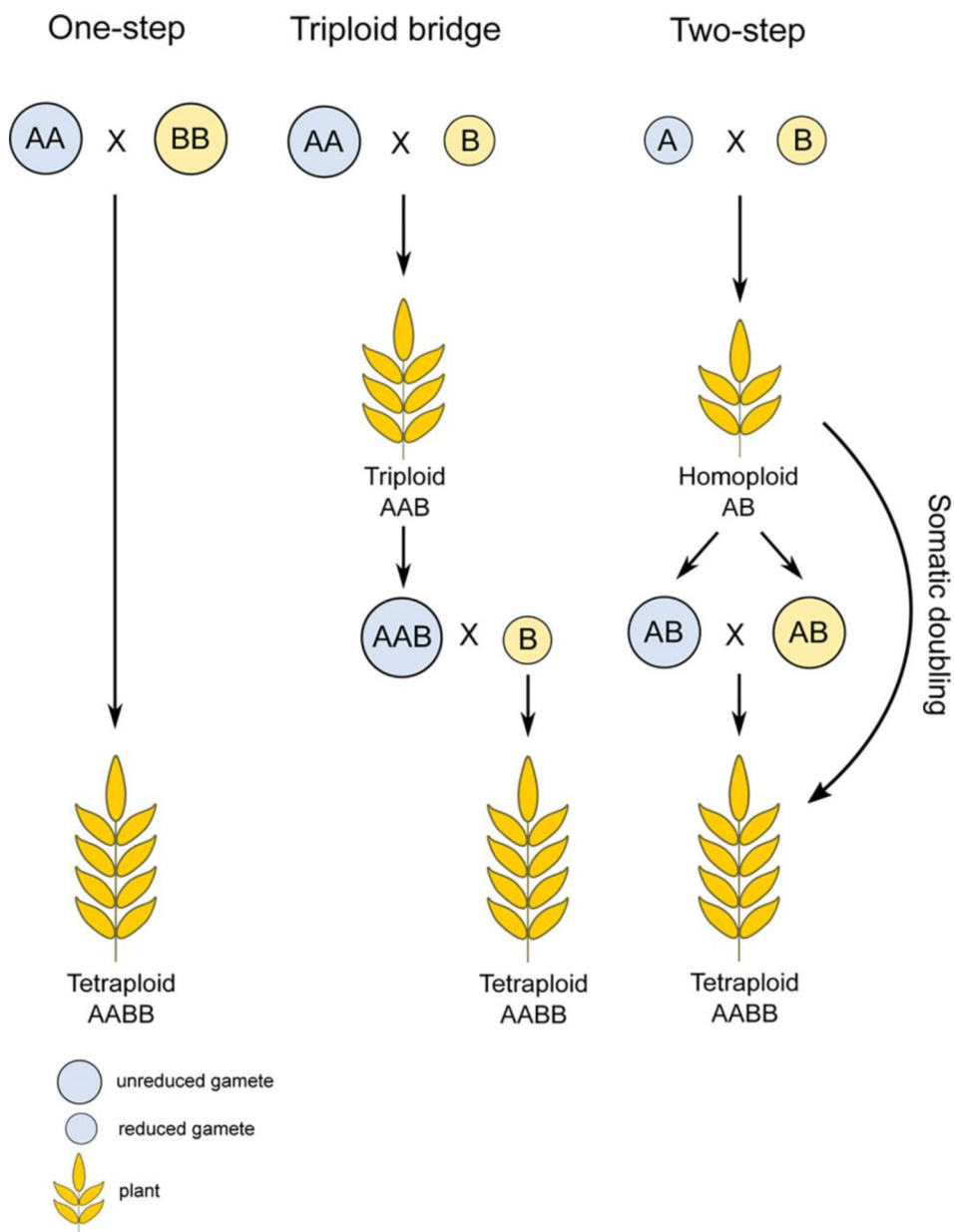


Schéma ukazuje, že první možností je tzv. jednokrokový způsob (one-step), kdy dochází ke splnutí dvou neredukovaných gamet. Druhou možností je triploidní most. Z neredukované a redukované gamety vzniká triploid a následně tetraploid (polyploid). Předpokládá se, že jednokrokový způsob nebude v přirozeném prostředí tak obvyklý, jako cesta triploidního

mostu. Důvodem je malá pravděpodobnost geneze dvou neredukovaných gamet. Poslední možností je dvoukroková metoda (two-step), kde vzniká ze dvou gamet homoploidní kříženec. Aby došlo ke genezi polyploida, muselo by dojít k somatickému zdvojení nebo by musela nastat jedna ze dvou předchozích možností (splynutí dvou neredukovaných gamet, triploidní most) (Svacina et al. 2020). I přesto je tato možnost považována za nejběžnější.

3.5.2.4 Biotechnologické postupy

Biotechnologické postupy pro vytvoření potřebné genetické variability pšenice jsou například fúze parentálních buněk nebo selekce v buněčných kulturách. Fúze parentálních buněk, resp. protoplastů se provádí prostřednictvím chemických sloučenin nebo elektrického proudu. Po dokončení fúze se generují různé typy protoplastů. Potřební kříženci pšenice se vyvíjejí z těch, jež vznikly splynutím mateřského a otcovského protoplastu. Identifikují se aplikací fluoreskujících barev nebo absencí zeleného zbarvení z důvodu slabé produkce chlorofylu, kterou protoplasty tohoto původu leckdy trpí. Další možností je použití antibiotik nebo analogů aminokyselin, kde se využívá dvojitá rezistence hybridů k virulentním látkám. V případě rezistence každého z rodičů na jednu látku musí být kříženec odolný vůči oběma těmto látkám (Chloupek 2008).

Při selekci v buněčných kulturách se využívají protoplasty, buněčné suspenze a kalusové kultury (kultura útvarů z nediferenciovaných buněk). V laboratorních podmínkách se kalusová selekce provádí po použití mutagenů nebo patogenů. Mutageny se využívají pro vyvolání mutagenese v protoplastech, která může způsobit genezi mutanta. Patogeny jsou užitečné šlechtiteli hledajícímu materiál pro odrůdu s určitou rezistencí. Při použití patogenů je náročné skloubit potřeby kalusové kultury a patogenu, proto je perspektivnější aplikovat pouze patogenní látky. Touto metodou bylo dosaženo rezistence pšenice vůči helminthosporiázám (Chloupek 2008).

3.6 Aktuální trendy ve šlechtění pšenice seté na kvalitu

Trendy ve šlechtění pšenice na kvalitu jsou v posledních letech zaměřeny na odrůdy poskytující vyšší obsah a výnos výživově hodnotných látek a snížení obsahu látek, které výživovou hodnotu degradují. V souvislosti s tím se cílí na získávání rozsáhlejší druhové i odrůdové diverzity, aby byla možnost výběru odrůd pro tyto znaky co největší. Dále je sledován trend šlechtění pro udržení a progres kvality pšenice za rozmanitých enviromentálních podmínek a dalších stresů (Chloupek 2008).

3.6.1 Pekařská kvalita

S trendem zvýšení obsahu a výnosu nutričně přínosných látek souvisí pekařská kvalita pšenice seté. Při hodnocení pšeničného zrna je zde sledován především obsah proteinů. Kultivary pšenice určené pro pekárenské využití se rozdělují dle úrovně kvality do pěti kategorií: E – velmi kvalitní, jež je prvotřídní s nejméně 12,6 % bílkovin, A – vyhovující, jež je použitelná bez příměsí jiných odrůd s nejméně 11,8 % bílkovin, B – dodatečně přidávaná do směsi na výrobu chleba s nejméně 11,1 % bílkovin, C – nepříliš dostačující až nedostačující, vhodná k výrobě krekrů a sušenek (Chloupek 2008).

Kvalitní pekárenská pšenice je například středně raná ozimá odrůda Annie. Tato odrůda byla vyšlechtěna rodokmenovou metodou ve šlechtitelské stanici ve Stupicích (Horcicka et al. 2014). Užití této metody dopomohlo odrůdě Annie k vynikající pekařské kvalitě kategorie E. Dále vykazuje rezistenci k většině chorob a výbornou odolnost vůči mrazu. Navíc ve srovnání s kontrolní odrůdou Akteur dosáhla lepšího výnosu. Odrůda Annie byla oficiálně registrována v roce 2014 (Horcicka et al. 2014).

Rodokmenová metoda se používá pro tvorbu homozygotní linie. Průběh je následující. Šlechtitel nejprve vybere rodičovské rostliny podle znaků, na které cílí. Po zkřížení v parentální generaci vznikne uniformní filiální generace F1. Z ní vzejde F2 generace kmenových matek, jejichž potomstva (F3) se vysévají do řádků, což usnadňuje následnou fenotypovou selekci. Z nejlépe hodnocených řádků se pak selektují nejvhodnější jedinci. Tento postup je šlechtitelem prováděn, dokud se nedosáhne potřebné míry homozygotnosti. Poté se provádí testy výnosnosti, kvality a dalších parametrů, pro které je odrůda šlechtěna. Testuje se v průběhu několika let a na několika odlišných místech. Při šlechtění rodokmenovou metodou je nutné pěstovat a selektovat rostliny v místě, kde bude pěstována i vzniklá odrůda. Zaznamenáváním rodokmenu se zdokonaluje účinnost fenotypového výběru. Potřeba je větší peněžní kapitál a dostatečná edukace a praxe šlechtitele. Výhodou je možnost odstranění nevyhovujících jedinců hned v začátku fenotypového výběru (Chloupek 2008).

3.6.1.1 Gliadiny a gluteniny jako markery pro zjišťování vhodných pekárenských odrůd

Pšeničný lepek je složen ze dvou hlavních proteinů, gliadinu a gluteninu (Weiser 2007). Ve vodných alkoholech rozpustné gliadiny jsou proteiny povětšinou monomerní povahy. Kategorizují se dle podobnosti jejich relativních molekulových hmotností a kodónů aminokyselin do ω 5-, ω 1,2-, α - a γ -gliadinů (Weiser 2007; Schopf et al. 2021). Polymerní gluteniny za normálních podmínek ve vodném alkoholu rozpustné nejsou. Dělí se na vysokomolekulární gluteninové podjednotky (HMWGS) a nízkomolekulární gluteninové podjednotky (LMWGS) podle stejných kritérií jako gliadiny (Schopf et al. 2021; Weiser 2007; Chloupek 2008). Gluteniny jsou schopny formovat lepkovou síť, čímž dochází k nárůstu elasticity těsta a pevnosti lepku. Gliadiny mají opačný efekt a těsta se v jejich nadbytku stávají viskóznějšími (Schopf et al. 2021). Pro dosažení optimálních vlastností pekařského výrobku je zapotřebí vyváženého poměru v množství gliadinu a gluteninu a existence nekovalentních vazeb mezi těmito dvěma proteiny (Schopf et al. 2021; Weiser 2007).

Gliadiny, HMWGS a LMWGS se využívají jako genetické markery při výběru odrůd vhodných pro pekárenské využití. Jejich využití je velmi efektivní a mezi šlechtiteli oblíbené. Využívány jsou i další – například DNA markery nebo jiné molekulární metody založené na MAS (selekce pomocí markerů) (Dvoracek et al. 2013).

Markerování pomocí proteinů využil ve své studii Dvoracek et al. (2013). Studie rozebírala vliv alelického složení biotypů (genotypově totožní jedinci) na kvalitu pšeničného zrna. Na základě sledování gliadinových alel, HMWGS a LMWGS podjednotek bylo identifikováno 22 heterogenních biotypů u 10 kultivarů ozimé pšenice registrovaných v České republice. Výsledky studie poukázaly na objevení minimálně jednoho případu markantního rozdílu v kvalitativních parametrech pšeničného zrna ve zkoumaném materiálu. Práce dále demonstruje důležitost podílu biotypů s nepříznivými výsledky v jistých kvalitativních

parametrech zrna pšenice, kdy při významné převaze těchto biotypů může nastat pokles predikované technologické kvality.

3.6.2 Zvýšení odrůdové a druhové diverzity

Zvýšení odrůdové a druhové diverzity je pro rozšíření spektra nutričně uspokojivých odrůd zásadní. Velká většina současných kultivarů si je svými genetickými základy velmi podobná, což není žádoucí. Z tohoto důvodu je potřeba využívat nové genetické zdroje, aby byla diverzita obnovena.

Krajové odrůdy se zdají být dobrými kandidáty, neb k jejich genezi došlo spojením přirozeného výběru a selekce prováděné pěstiteli. Většina z nich může poskytnout obsáhlejší spektrum genů a díky tomu i některé šlechtitelsky významné vlastnosti. Krajové odrůdy se využívají zejména pro uspokojivou odolnost vůči různým typům stresů nebo lepší kvalitu zrna (Dotlacil et al. 2010). Vysokou hodnotu krajových odrůd potvrzuje Lopes et al. (2015). Potenciál krajových odrůd dává do souvislosti se změnou klimatu, jež má na produkci pšenice velký vliv. Pěstování těchto odrůd v extrémních podmínkách zajistilo zachování znaků odolnosti a adaptace. Krajové odrůdy by tedy mohly být vhodné pro vytvoření nebo upevnění odolnosti současných odrůd pšenice vůči těmto vlivům. Lopes et al. (2015) tedy doporučuje, aby byly vybrané krajové odrůdy využity pro zkvalitňování pšeničného zrna a výnosu pšenice. Konkrétním příkladem potenciálu krajových odrůd je rozšíření polotrpasličích genů *Rht-B1b*, *Rht-D1d* a *Rht8c* během zelené revoluce. Gen *Rht8c* se nachází v japonské krajové odrůdě Aka Komugi a byl použit italským šlechtitelem Nazarenem Strampellim ke zlepšení svých odrůd. Tento gen neovlivňuje velikost koleoptilů, což je zásadní při seti pšenice v oblastech se suchým podnebím nebo v oblastech s variabilním systémem výsadby na chudých záhonech. Odrůda Aka Komugi obsahuje také gen fotoperiodické necitlivosti *Ppd-D1*, který se současně projevuje na výšce rostliny prostřednictvím zkrácení jejího životního cyklu. *Ppd-D1* je často používán v regionech, kde je potřeba dosáhnout adaptace pro krátké dny, jako je například Itálie. Naopak v severnějších oblastech se *Ppd-D1* nepoužívá, protože necitlivost na dlouhý den je zde na překážku (Lopes et al. 2015).

3.6.3 Kvalita pšenice při abiotických a biotických stresech

3.6.3.1 Suchovzdornost

Stres ze sucha má na pšenici setou velký vliv. V zájmu šlechtitelů je tedy zlepšení odolnosti pšenice vůči tomuto stresu tak, aby její porosty prosperovaly i při dlouhodobějším nedostatku vody. Tolerance k suchu je však složitá vlastnost regulovaná mnoha geny. K pochopení vlivu sucha je potřeba vynikající znalost fyziologie pšenice, jež bývá suchem vážně poškozena. Pokrok ovlivňuje i interakce mezi genotypem rostliny a prostředím, která má následně dopad na selekci. Současný pokrok v porozumění suchovzdornosti je výsledkem zlepšení ve fyziologii, šlechtění a genetickém výzkumu. Cílem je najít a popsat genotypy obsahující co největší množství genů tolerantních vůči suchu. Většina z těchto genů nemá velký genetický přínos, ale i tak jsou nezastupitelné v otázce tolerance sucha u pšenice (Sallam et al. 2019).

Šlechtění pšenice k odolnosti vůči suchu mohou pomoci nedávná zjištění v genomice, sekvenovat celý genom pšenice je dnes už totiž možné. Nejpoužívanější metodou je genotypizace podle sekvenování (GBS). Ta produkuje vysoký počet markerů jednonukleotidového polymorfismu (SNP) pšenice (Hussain et al. 2017). Výhodou je i existence referenčních sekvencí genomů. Pomocí GBS je možné určit přesnou lokaci na chromozomu pro každý SNP. Získané SNP se využívají k asociačnímu studiu celého genomu a k mapování QTL. To vše umožňuje pomocí genomické selekce podrobně rozebrat genomy a geny jako možné nositele požadovaných znaků, například odolnost vůči suchu (Sallam et al. 2019).

V současnosti se šlechtitelé snaží zlepšit výkonost pšenice souběžně s odolností vůči suchu. Nejprve se vybere potenciaálně kvalitní linie s dobrými předpoklady pro odolnost vůči suchu. Dle oblasti a cílů studie šlechtitel stanoví, v jaké fázi (fázích) růstu bude linii testovat. Následně jsou sledované znaky bodově ohodnoceny. Dále probíhá selekce na toleranci k suchu a množství výnosu. Nejlépe hodnocené genotypy jsou ve šlechtitelském programu vybrány pro křížení jako parentální donoři (Sallam et al. 2019).

3.6.3.2 Fusarióza

Fusarióza (FHB = fusarium head blight) je houbové onemocnění, jež postihuje drobnozrnné obiloviny, viz Obrázek 2. Pro pšenici setou představuje celosvětově jednu z nejzávažnějších a nejničivějších onemocnění, protože způsobuje degradaci kvality zrna a snížení výnosnosti. Choroba je nejčastěji vyvolána zástupci *Fusarium graminearum sensu lato Schwabe*. V oblastech s nižšími teplotami jsou nacházeny ale i další zástupci, a to *Fusarium culmorum* (WG Smith) Saccardo a *Fusarium avenaceum* (Fr.) Sacc (Steiner et al. 2017). Častý výskyt je ve střední Evropě zaznamenán také u *Fusarium poae* (Peck) (Chrpová 2021). Jedním z největších problémů zástupců rodu *Fusarium* je jejich schopnost vytvářet a uvolňovat mykotoxiny (Pestka 2010). Nejčastěji se vyskytují trichothefeny typu B jako dioxynivalenol, nivalenol nebo resorcylická kyselina lakton zearalenon. Mykotoxiny mají schopnost akumulovat se v zrnech a tím představují problém pro potravinovou bezpečnost (Steiner et al. 2017).

Obrázek 2: klasy pšenice postižené fusariózou (VÚRV 2020)



Výskyt fusariózy se v posledních několika letech zvýšil ve všech významných pěstitelských oblastech pšenice. Šlechtitelé proto hledají kultivary s rezistencí vůči fusariózám (Steiner et al. 2017), což je v boji proti této nemoci spolu s ošetřením fungicidy (Chrprová 2021) nejúčinnějším řešením. Důvodem nárůstu epidemií fusarióz je nejspíše částečný nebo úplný odklon od obdělávání půdy a frekventovanější užívání kukuřice při střídání plodin. K redukci epidemií nepřispívají ani vysoká vlhkost a teplé počasí během období kvetení pšenice (Steiner et al. 2017).

V České republice se výskyt fusarióz na pšenici více projevil v roce 2020. Souhrnná míra zamoření dioxynivalenolem a zearalenonem ve sklizni z tohoto ročníku ukazovala znatelně vyšší hodnoty než v předešlých pěti ročnících. Hodnoty překračující povolenou hygienickou hranici byly nalezeny u vzorků z okolí Chebu, Chrudimi, Karviné, Pardubic, Příbrami, Prostějova a Rychnova nad Kněžnou. Chrprová (2021) se dále domnívá, že fusariózy zasáhnou pšenici i ve sklizni ročníku 2021, a to kvůli častým dešťovým srážkám a frekventovanějšímu poléhání pšenice. Prvotní známky napadení byly už sledovány na Benešovsku, Chrudimsku, Liberecku, Jindřichohradecku, Karvinsku, Opavsku, Písecku, Prostějovsku, Strakonicku a Orlickoústecku.

Kultivary plně odolné vůči fusariózám se šlechtitelům prozatím získat nepodařilo. Byly však zaznamenány odrůdy, které se znatelně odlišovaly v reakcích na chorobu. Rozdíly byly zjištěny v projevech nemoci i v míře shromažďování dioxynivalenolu. Z českých odrůd se v současné době jeví jako nejlepší kultivar Dagmar. Jako nevhodné se z důvodu nízké rezistence zdají být odrůdy Askaban, Collector, Floki, Frisky, Futurum, Gordian, Johnson,

KWS Elementary, KWS Silverstone, LG Keramik, LG Orlice, RTG Cesario a Sheriff (Chrpová 2021).

Ze zahraničních odrůd jsou významnými donory rezistence odrůdy asijského původu. Příkladem je jarní odrůda pšenice Sumai-3 a její QTL *Fhb1*, *Fhb2* a *Qfhs.ifa-5A*. Dále také QLT *Fhb4* a *Fhb5* přítomné v odrůdě Wangshiubai nebo *Qfhs.nau-2DL* nalezené v šlechtitelské linii CJ9306. V návaznosti na charakteristiku fusarióz bylo definováno několik druhů rezistence. Hlavními druhy jsou rezistence k počáteční infekci a rezistence k šíření plísní v napadených klasech. Tyto druhy se účastní především tzv. polní rezistence a byly frekventovaně sledovány v mapovacích studiích QLT. *Fhb1* a *Qfhs.nau-2DL* jsou QLT poskytující výbornou rezistenci vůči šíření mycelia a hromadění mykotoxinů. *Fhb1* navíc podporuje transformaci dioxynivalenolu na méně toxický dioxynivalenol-3-glukosid. *Fhb1* by tak mohl působit v procesu detoxikace. K rezistenci vůči počáteční infekci napomáhá *Qfhs.ifa-5A*, funkci má ale i v zajištění nízkého hromadění mykotoxinů (Steiner et al. 2017).

3.6.3.3 Rzi

Mezi další choroby postihující pšenici patří rzi. Nejčastěji se vyskytuje rez pšeničná (*Puccinia triticina* Eriks), rez travní (*Puccinia graminis f.sp. tritici* Eriks & E. Henn) a rez plevová (*Puccinia striiformis* Westend). Výskyt pšeničné rzi je na našem území registrován pravidelně. Významný výskyt travní a plevové rzi není tak častý. Záleží na podnebí v dané oblasti, míře rezistence odrůdy, a především na množství inokul (spor rzi).

Problémem při šlechtění odrůd odolných vůči rzi je postupné snižování, až vymizení jejich rezistence. Děje se tak z důvodu vzniku nových patogenních ras rzi. Jedinou možností obrany se zdá být nepřetržité šlechtění rezistentních odrůd v návaznosti na změny v rozmanitosti typů rzi, jež musí být monitorovány (Hanzalová 2021a).

3.6.3.3.1 Rez pšeničná

Rez pšeničná parazituje na listech pšenice (Bhardwaj et al. 2016). Napadení lze rozpoznat podle tmavě hnědých, až rezavých hrbolků, které listy ve velkém množství posévají, viz Obrázek 3. Tyto hrbolky produkují nepohlavní spóry, kterými se rez vzduchem přenáší do okolí a infikuje další rostliny (Hanzalová 2021a). Pšeničná rez se také pravidelně vyvíjí v nové fyziologické formy, což její kontrolu v porostu ještě ztěžuje. Problém výskytu pšeničné rzi řeší šlechtitelé a pěstitelé po celém světě. Prozatím nejúčinnějším řešením se zdá být kombinace identifikace patotypů, šlechtění, vyhodnocení odolnosti vůči rzi a používání odolných kultivarů. V současné době je šlechtitelům k dispozici více než 210 genů rezistence vůči chorobě a souvisejících markerů pro mnohé z těchto genů. Část z rezistentních genů ale během let pozbyla účinnosti, resp. byly překonány novými rasami pšeničné rzi. Takovým typem je například Ug 99 jehož existence ohrožovala pěstování pšenice na 40 % světové rozlohy (Bhardwaj et al. 2016).

V České republice v důsledku epidemií pšeničné rzi dochází každoročně k nemalým výnosovým ztrátám, a to až 40 %. Nejfrekventovanější je výskyt v teplých částech, zejména na Moravě (Hanzalová 2021a). Rez pšeničná má vliv i na kvalitativní znaky pšenice. Dle studie Fleitas et al. (2018) tento druh rzi negativně ovlivňuje obsah bílkovin v zrnech, jejich složení, obsah lepku, jeho vlastnosti a tím i konečnou kvalitu výrobků. Snižováním obsahu lepku dochází

k degradaci tažnosti, pružnosti a schopnosti bobtnat. Výsledkem jsou těsta s menší silou lepku a zmenšeným objemem bochníku, což je pro konečné užití nežádoucí.

Simon et al. (2020) tvrdí, že v této oblasti je dostupná literatura o účincích rzi pšeničné v mnohém nejasná a nedostačující. Doporučuje další podrobný výzkum genotypů a vlivu pšeničné rzi na gliadiny a gluteniny.

Pro získání odolné odrůdy mohou mít význam některé geny *Lr*. Geny *Lr* jsou obecně známé svou odolností k pšeničné rzi, bezmála polovina z nich je však cizího původu. Pro vliv na kvalitativní parametry pšenice byl zkoumán gen *Lr47*. Introgresí *Lr47* se snížil celkový výnos o 3,8 %, tato hodnota se však markantně lišila napříč genotypy a prostředími. Obsah bílkovin v pšeničném zrně i mouce byly zvýšeny, avšak výnos mouky naopak snížen. Množství popelovin mouky se zvýšilo. Tyto poznatky pomáhají šlechtitelům v pochopení vlivu genu *Lr47* na kvalitu pšenice. Výsledky však musí být přezkoumány, aby bylo objasněno, zda má na některé kvalitativní parametry negativní vliv gen *Lr47*, nebo je zapříčiněn propojením genů (Brevis et al. 2008).

Obrázek 3: Projevy rzi pšeničné (Hanzalová 2018)



3.6.3.3.2 Rez plevová

Rez plevová postihuje pšenici v oblasti listů, listových obalů, osin a pluch (Feodorova-Fedotova & Bankina 2018). Na listech je rozpoznatelná dle pruhů utvořených souběžně s žilnatinou, které vznikají produkcí výrazně žlutých urediospór seskupených v podobě malých hrudek. Nejničivěji se plevová rez projevuje při napadení praporcového listu (Hanzalová 2021a), viz Obrázek 4.

Obrázek 4: Napadení praporcového listu plevovou rzí (Víchová 2022)



V *Puccinia striiformis* rozeznáváme čtyři linie: *Puccinia striiformis sensu stricto*, *Puccinia pseudostriformis*, *Puccinia striiformoides* a *Puccinia gansensis*. V těchto liniích existuje mnoho různých ras rzi plevové. Na přelomu tohoto tisíciletí byly identifikovány tři nové agresivní rasy *Warrior*, *Kranich* a *Triticale aggressive*. Rasy jsou specifické kratší latentní periodou, prodlouženým klíčením spor a odolností k vyšším teplotám oproti rasám známým před rokem 2000 (Feodorova-Fedotova & Bankina 2018).

V Evropě došlo k epidemiologickému výskytu těchto ras v letech 2013–2016. Ke znatelnějšímu rozšíření choroby docházelo především v oblastech na Moravě, které již byly v minulosti plevovou rzí napadeny a jejich podmínky mohou podpořit její vývoj. Postupně se rozšíření choroby na našem území i v Evropě zmírnilo. Značný podíl v boji proti plevové rzi

měli šlechtitelé a jejich důsledná volba rezistentních kultivarů, jež budou registrovány. Dále pomohla pečlivost pěstitelů při ošetření fungicidy a výběr vhodných odrůd (Hanzalová 2021a).

3.6.3.3.3 Rez travní

Rez travní atakuje listy, klasy a stébla rostliny (Zelba et al. 2022), viz Obrázek 5. Nejzávažnější je projev choroby na stéblech, protože v souvislosti s ním dochází k narušení přepravy vody a živin v rostlině.

Obrázek 5: Příznaky travní rzi na stéblech a klasech (Hanzalová 2021b)



Jelikož se rez travní v České republice nevyskytuje pravidelně, odolné odrůdy nebyly pro registraci preferovány. V posledních několik letech se však výskyt rzi travní zvýšil napříč evropskými státy, Českou republiku nevyjímaje. Došlo k rozšíření nových ras Digalu a Clade V.–IV., což nejspíše povede ke škodám v příštích obdobích a získání pozornosti šlechtitelů (Hanzalová 2021a).

Při výběru odrůdy je vhodné volit kultivary s tzv. „triple rust resistance“, tedy kultivary odolné vůči všem třem rzím. V roce 2020 byly provedeny polní pokusy, kde byly pro „triple rust resistance“ vyhodnoceny ozimé kultivary Cecilius, RGT Sacramento, Askaban, Fakir, Skif, Sheriff a LG Dita a jarní kultivary Toccata, Pexeso, Eponia a linie (SG-S1483-16) (Hanzalová 2021a).

Do problematiky rezistence přispívá svou studií Zelba et al. (2022). Studie byla provedena na 58 odrůdách pšenice, které reprezentují více než 85 % pěstebních ploch v České republice. V testovaných kultivarech bylo molekulárními markery detekováno osm genů rezistence vůči rzi travní. Nejfrekventovaněji se objevoval gen *Sr38*, celkem v 63,79 %. U odrůd s tímto genem se v terénní studii nespécifikovaných ras rzi projevovала menší míra infekce. V roce 2020 se však většina z nich chovala virulentně. Dalšími detekovanými geny byly *Sr31*, přítomen v 10,34 %, a *Sr24*, přítomen v 13,79 %. Výsledky studie ukazují, že žádná z ras travní rzi nebyla virulentní ke genům *Sr31* a *Sr24*, což napovídá tomu, že rasy ze známé nebezpečné linie *Ug 99* se aktuálně na území České republiky nenacházejí. Rezistence českých odrůd pšenice je tedy podmíněna pouze jedním genem, který je chorobou úspěšně zdoláván. Dva další rezistentní geny jsou dosud funkční, ale v českých kultivarech pšenice se vyskytují pouze ojediněle.

3.7 Změny klimatu a jejich dopad na pěstování pšenice

3.7.1 Definice klimatu a klimatické změny

Definovat pojem klimatická změna není jednoduché. Werndl (2016) se ve své studii touto problematikou zabývá a shrnuje v ní pět definic. Jedna z nich popisuje změnu klimatu jako konečnou distribuci v čase, jež se vyvíjí v systému měnících se vnějších podmínek. O tomto tématu se však stále vedou diskuze jak ve veřejném, tak vědeckém sektoru a není zcela jasné, co tento pojem přesně znamená.

Jinak na problematiku definování klimatu a jeho změny nahlíží průzkum Koutsoyiannis (2021). Zpochybňuje definování klimatu jako konstantního stavu, který se nemění, pokud není ovlivněn vnějšími faktory. Tvrdí, že je tato definice nepřesná vlivem odlišného vnímání klimatu v minulosti. Získaná data ukazují rozsáhlou klimatickou variabilitu a pojem „změna klimatu“ tím ztrácí na významu. Tato skutečnost je podložena faktem, že v minulosti byl tento výraz vyslovován v politických debatách, nikoli těch vědeckých.

3.7.2 Původci změny klimatu

Změny klimatu jsou za normálních podmínek viditelné v rozmezí několika tisíc let. Vlivem člověka je však tento proces výrazně urychlen (Salehi et al. 2019). Změnu klimatu nejvíce ovlivňuje koncentrace skleníkových plynů v atmosféře, zejména pak oxidu uhličitého (CO_2). Obsah tohoto skleníkového plynu se v posledním milionu let pohyboval mezi 180–280 ppm. V dnešní době je jeho zastoupení v atmosféře více než 400 ppm. Pokud nedojde ke změně tohoto trendu, hodnota se do roku 2100 může až zdvojnásobit (Woodward 2019).

Původci jsou zřejmí. Člověk změnil svoje návyky a přístup k hospodaření a využívání půdy. Katalyzátorem klimatické změny je i přílišné užívání fosilních paliv. Právě to vede ke vzniku skleníkových plynů a způsobuje nezadržitelně stoupající oteplování naší planety. V současnosti je teplota spodní atmosféry průměrně o 1 °C vyšší, než byla v době před velkým rozvojem průmyslu (Woodward 2019).

3.7.3 Dopady klimatických změn na zemědělskou produkci

Klimatická změna je celosvětově vnímána jako jeden z největších problémů pro naši populaci ve smyslu udržení normálního chodu života, rozvoje a také potravinové bezpečnosti. V předešlých dvou dekadách se razantně navýšil počet ohlášených přírodních katastrof, přičemž za nejohrožující je považováno meteorologické a hydrologické nebezpečí. Tyto přírodní události berou nejen životy lidí, ale mají i markantní vliv na zemědělství, ve kterém byly například v roce 2017 způsobeny škody ve výši 314 miliard amerických dolarů (Salehi et al. 2019).

Změny klimatu působí přímo nebo nepřímo na plodiny, jejich škůdce i patogeny. Dopad změn klimatu na zemědělskou produkci je zkoumán již více než dvacet let, avšak většina studií se zaměřovala výhradně na plodiny, škůdce nebo patogeny. Literatura o všech třech pojmech a interakcích mezi nimi není příliš bohatá (Wang et al. 2022). Z dosavadních studií vyplývá, že změna klimatu může zemědělství nepříznivě ovlivnit přímo i nepřímo. Přímo působí na množství výnosů plodin (Zhao et al. 2017; Wang et al. 2020) a nepřímo na produktivitu plodin prostřednictvím účinků na škůdce, patogeny, plevel a další biotické faktory, jako jsou například přirození nepřátelé zemědělských škůdců. Stejně tak jako rostliny mohou být na změnu klimatu citliví i škůdci a patogeny, které výnosnost plodin ovlivňují (Wang et al. 2022).

3.7.3.1 Dopad klimatických změn na fyziologii a kvalitu pšenice

Po prozkoumání mechanismů redukce výnosů a degradace kvality pšenice bylo zjištěno, že zvýšená koncentrace CO₂ není pro pšenici tak velkým problémem, jak se předpokládalo. Zvýšení obsahu CO₂ v atmosféře může mít pozitivní dopad na základní fyziologické procesy probíhající v pšenici. Může dojít ke zrychlení fotosyntézy, podpory růstu a tím může být ovlivněno množství výnosů (Smith et al. 2014).

Větším problémem je zvýšená teplota. Působení vyšších teplot má schopnost způsobit stres z tepla a tím i negativně ovlivnit průběh fyziologických procesů v pšenici. Pšenici během růstu a vývoje nejvíce vyhovuje mírné podnebí s teplotou mezi 10 a 24 °C. Vhodné rozpětí teplot se ale mění podle jednotlivých vývojových fází od počátku klíčení, přes vznik semenáčku až po kvetení pšenice. Pokud jsou vhodné teploty pro jednotlivé fáze zvýšeny nad úměrnou mez, rostlina může pozastavit nebo úplně zastavit svůj růst a vývoj (Wang et al. 2022).

Pšenice je dle svých vlastností zařazena do kategorie rostlin C3. C3 rostliny jsou specifické schopností upravit fotosyntetickou aktivitu tak, aby se dokázaly adaptovat na zvýšení teploty (Cai et al. 2020). I přesto ale vysoké teploty a stres z nich redukuje růst i vývoj rostlin pšenice prostřednictvím změn v metabolických procesech. Kvalita pšenice je vlivem klimatických změn ovlivněna zejména zvyšující se teplotou a obsahem CO₂ v atmosféře. Gradující množství CO₂ má za následek snížení obsahu bílkovin v pšeničném znu. Teplotní stres nepříznivě ovlivňuje výtěžnost zrna, hmotnost zrna, výnosnost bílkovin, obsah globulinu a škrobu (Wang et al. 2022).

3.7.3.2 Predikce působení klimatických změn na pšenici

Dle nedávných studií bylo zjištěno, že zvýšení teploty vinou klimatické změny bude mít nepříznivý vliv na výnosnost pšenice, a to v celosvětovém měřítku (Zhao et al. 2017; Wang et

al. 2020). Nepříznivé účinky na výnos pšenice se liší dle oblastí či regionu. I tak se ale předpokládá, že zvýšení průměrné teploty na Zemi o 1 °C by znamenalo pokles celosvětových výnosů pšenice o 6 %. Odborná veřejnost predikuje také rozšiřování obdělávatelných ploch na území severní Evropy a Asie. K úbytku obdělávatelných ploch má dojít v mnoha rozvojových zemích nacházejících se v nižších zeměpisných šířkách (Wang et al. 2022). Předpokládá se, že účinkem globálního oteplování se zvýší i riziko sekundárního zasolování (Penov et al. 2011).

3.7.4 Konkrétní enviromentální faktory ovlivňující kvalitu pšenice

3.7.4.1 Stres ze sucha a horka

Stres ze sucha je nedostatek vody, který v rostlině zapříčiňuje mnoho závažných změn morfologického, biochemického, fyziologického a molekulárního charakteru. Vzniklé transformace vedou k redukci růstu rostliny, její produkce a kvality. Pšenice je pro lidstvo významnou plodinou a pěstuje se proto v mnoha zemědělských a klimatických prostředích. Vlivem změny klimatu se ve většině těchto prostředí stal stres ze sucha zásadním problémem. Celkově bylo stresem ze sucha v roce 2013 postiženo zhruba 65 milionů hektarů pšenice. Vzhledem k aktuálním predikcím bude oblastí zasažených stresem ze sucha přibývat, což výrazně ovlivní kvalitu produkce pšenice (Sallam et al. 2019).

3.7.4.1.1 Výběr suchovzdorných genotypů

Sucho je nevyzpytatelné v tom, že může rostlinu zasáhnout kdykoli – v jakémkoli růstovém stádiu. Dopad se odvíjí od podmínek místního prostředí. Při zkouškách odolnosti odrůd tedy může dojít k hodnocení reakce genotypu pouze v určitém stádiu růstu. Genotyp může být hodnocen pozitivně pro dobrou reakci na sucho ve fázi klíčení nebo ve fázi tvoření semenáčku. V dalších fázích ale odolný být nemusí. Tento proces může fungovat i naopak. Z těchto důvodů je u každého kultivaru nutné stanovit znak odolný vůči suchu. Poté bude dobře diferencovat odolné genotypy od těch náchylných a šlechtitel se podle něj bude moct orientovat (Sallam et al. 2019).

Při výběru odrůd do šlechtitelských programů jsou zohledňovány hlavně jejich fyziologické a morfologické vlastnosti. Sleduje se schopnost adaptace ke klimatickým scénářům, jež jsou v posledních letech predikovány. Genotypy s fyziologickými vlastnostmi vhodnými pro boj vůči suchu se identifikují pomocí genů, jež tyto vlastnosti řídí. Výzkum zaměřený na intenzivní hledání těchto genů by mohl urychlit progres ve šlechtění na toleranci k stresu ze sucha (Sallam et al. 2019).

3.7.4.1.2 Obranné mechanismy

Při nástupu stresu ze sucha dojde k fyziologickým změnám, které pomáhají rostlině stresovou situaci zvládnout. Dochází k redukci ztrát vody, udržení membránové stability a fotosyntetické aktivity. Kromě toho je snaha o shromažďování rozpustných cukrů, prolinu, aminokyselin, chlorofylu a enzymatické i neenzymatické antioxidační aktivity (Sallam et al. 2019).

3.7.4.1.3 Vliv sucha a tepla na kvalitu pšenice a výskyt chorob

Kvalita pšeničného zrna je tepelným stresem ovlivněna v závislosti na délce jeho působení a na míře odolnosti odrůdy. Potvrzuje to studie provedená Labuschagne et al. (2016). Studie zjišťovala dopad tepelného a suchého stresu na kvalitu bílkovin dvou pekárenských odrůd pšenice, Duži a Karieze. Výsledky studie poukazují na rozdíly v působení tepelného stresu a stresu ze sucha na testované odrůdy. Po vystavení odrůd tepelnému stresu došlo u obou z nich k přírůstku bílkovin. Stres ze sucha měl však tento vliv pouze na kultivar Duži. Obsah gliadinu se v důsledku tepelného stresu zvýšil u obou odrůd. Zvýšený obsah gluteninu byl zaznamenán pouze u odrůdy Karieze, a to vlivem obou stresů. Dle výsledků působil na kvalitu i kvantitu pšeničného zrna těchto dvou odrůd nejvíce účinek tepelného stresu.

Teplota a množství srážek má pravděpodobně vliv i na výskyt houbových chorob. Souvislostmi mezi těmito faktory se zabývala studie Hysek et al. (2017), která probíhala na dvou lokalitách s odlišnými průměrnými teplotami a srážkami. V prvním sledovaném roce (2009), který byl shledán nejteplejším, se nejvíce vyskytovala *Alternaria triticina* Prasad & Prabhu. Následující rok (2010) byl charakteristický minimálními výkyvy ve srovnání s průměrem za jednotlivé roky. V tomto roce převažovala *Septoria tritici* Blotch. Rok 2011 ovládla *Puccinia triticina*, rok 2012 byl specifický výskytem rodu *Drechslera* a v roce 2013 dominovala *S. tritici* a *Drechslera tritici repentis* (Died.) Shoem. Pro rozvoj *P. triticina* hrála velkou roli teplota a množství srážek v jarních měsících – březnu, dubnu a květnu. Bylo také zjištěno, že výkyv teploty pouze o 1 °C měl spolu se srážkami během roku znatelný dopad na změny ve škále druhů houbových chorob. Míra výskytu jednotlivých chorob byla ovlivněna různorodě také rokem a lokalitou. Z výsledků se dá jednoznačně vyčíst, že teplota a srážky mají vliv na výskyt a rozmanitost houbových chorob pšenice.

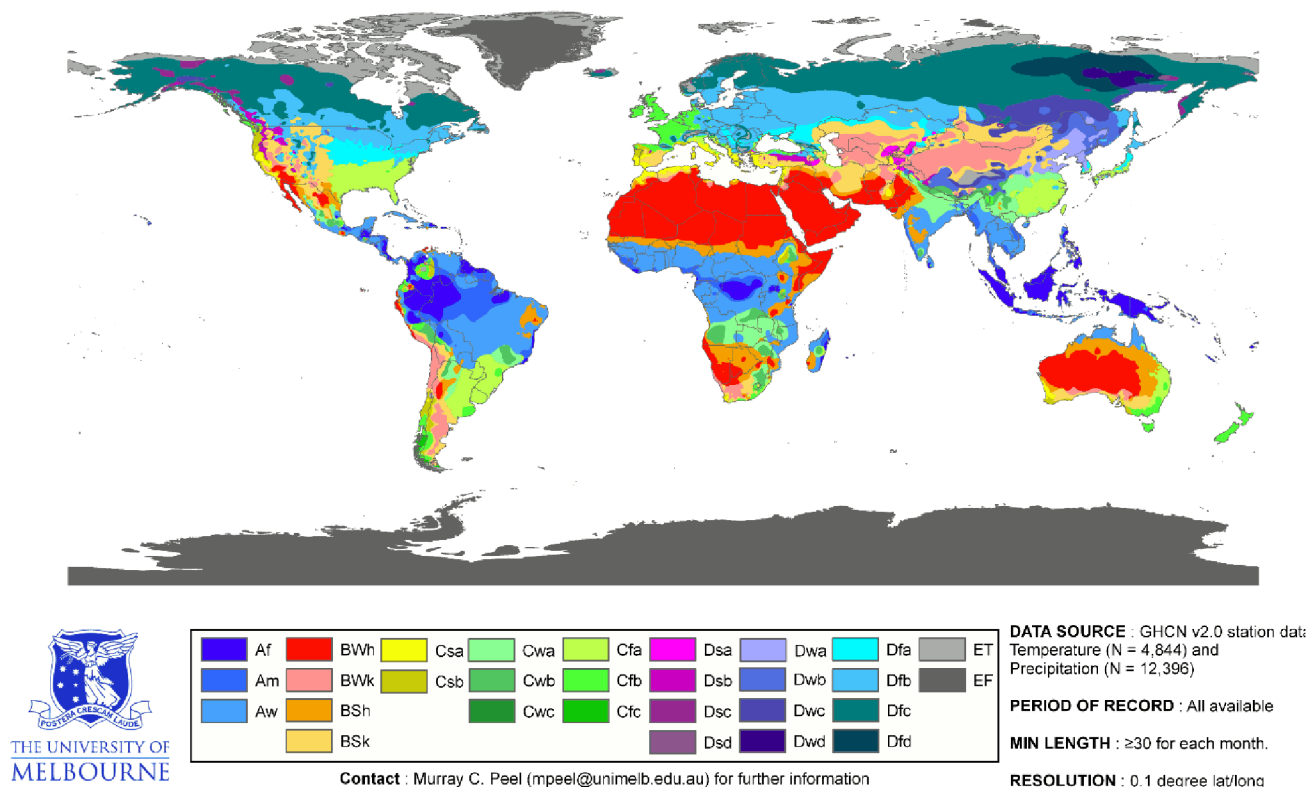
Vliv klimatických podmínek na spektrum houbových chorob pšenice potvrzuje ve své studii i Andrei-Mihai et al. (2019). V letech 2015–2019 se zkoumalo jedenáct odrůd ozimé pšenice. Bylo zjištěno, že klimatické podmínky v těchto letech podpořily výskyt všech tří patogenů, jež produkuje *Puccinia triticina*. V oblasti, kde byl výzkum prováděn, se ale běžně vyskytuje pouze *P. triticina*.

Konkrétnější výzkum v této oblasti provedl El-Orabey et al. (2020). Ve své studii testoval padesát monogenních linií pšenice s pěti patotypy *Puccinia triticina* (BJPPQ, LQFDS, PHFPG, PTPDN, TRFDJ). Teplota byla stabilně udržována při 30 °C, 25 °C, 20 °C a 15 °C. Ukázalo se, že linie *Lr 16*, *Lr 17* a *Lr 23* vykazovaly odolnost při 25 °C, ale v ostatních teplotách byly k patogenům citlivé. Linie *Lr 11*, *Lr 12*, *Lr 13*, *Lr 14a*, *Lr 18*, *Lr 47*, *Lr 50*, a *Lr 68* byly ke všem rasám *P. triticina* náchylné při 25 °C a 30 °C, avšak naprosto rezistentní při teplotách 15 °C a 20 °C. Další linie, jako například *Lr 1*, *Lr 2a*, *Lr 2b*, *Lr 2c*, *Lr 3* a *Lr 9* vykazovaly mírnou rezistenci k některým rasám při všech teplotách, ale byly náchylné na přítomnost jiných ras. Ostatní monogenní linie byly citlivé při všech teplotách a za přítomnosti všech ras. Závěry této studie mohou výrazně pomoci při výběru vhodných genů pro odrůdy odolné vůči rzi pšeničné ve šlechtitelských programech.

3.7.4.2 Salinita

Salinita je jedním z hlavních abiotických stresů (Shavrukov et al. 2011), protože zasolování půdy je stále závažnější formou degradace půdy (Shi et al. 2007). Zasolováním půdy dochází k její alkalizaci a vznikají halomorfní půdy (Grujic et al. 2021). Děje se tak především v důsledku klimatických změn a činností člověka, který narušuje semiaridní a podobné oblasti (Shi et al. 2007). Semiaridní oblasti jsou místa, kde se vyskytuje nízké množství dešťových srážek. Pro aridní oblasti je typický velký nedostatek dešťových srážek. Aridní oblasti vznikají, když je vypařování vyšší než množství srážek, které na území dopadají (Petránek 2007). Semiaridní a aridní oblasti jsou vyznačeny na Obrázku 6, přičemž aridní oblasti jsou dle legendy obrázku označeny jako „BWh“ a „BWk“ a semiaridní oblasti jako „BSh“ a „BSk“.

Obrázek 6: Aridní a semiaridní oblasti (Peel et al. 2007)



3.7.4.2.1 Vliv salinity na kvalitu a fyziologii pšenice

Zasolení půdy v semiaridních a aridních oblastech omezuje růst rostlin, nebo mu dokonce zabránuje. Půda se v těchto oblastech stala částečně nebo zcela nepoužitelnou kvůli vysoké koncentraci solí ve vodě a nevhodným zavlažovacím postupům (Shavrukov et al. 2011).

Rostlinu salinita ovlivňuje prostřednictvím osmotického efektu nebo specifického iontového efektu. Vlivem osmotického efektu dochází k narušení osmotického potenciálu, kde se různé ionty stanou toxickými působením specifického iontového efektu. Vzniklé nadměrné obsahy solí porušují iontovou homeostázu a generují reaktivní typy kyslíku. Tyto interakce probíhají jak na buněčné úrovni, tak i v celé rostlině (Shavrukov et al. 2011).

Porušení iontové a vodní homeostázy může způsobit poškození na molekulární úrovni, redukování růstu nebo úplné uhynutí rostliny. Bylo vyzorováno, že při vyšším obsahu sodíkových kationů je koncentrace draselných kationů snížena. To naznačuje, že poměr draselných a sodíkových kationů významně působí na růst a vitalitu rostlin v zasolených půdách (Shavrukov et al. 2011).

Vliv zasolení na kvalitu pšenice zkoumala studie Abbas et al. (2013). Působením salinity došlo k významnému snížení výšky rostlin, výnosu zrna i výnosových složek. U některých rostlin byl výrazně snížen počet odnoží, pravděpodobně přílišným vstřebáváním soli. Nadměrné vstřebávání dále nepřímo ovlivnilo růst rostliny snížením množství fotosyntátů, vody a dalších látek s růstovým faktorem. V listech byl pozorován vyšší obsah solí, který nepříznivě ovlivnil průběh fotosyntézy, syntézu bílkovin, a tím i konečnou hmotnost zrna, která poklesla. Bylo zjištěno, že při vysokém obsahu sodíkových kationů v půdě dochází u pšenice k problémům s absorpcí dusíku, což má na obsah bílkovin v zrnu také negativní dopad. Kleslo i množství tuků a vlákniny v zrnu. Celkově má salinita na pšeničné porosty velmi nepříznivý vliv. Kromě snížení růstu a výnosu vyvolává nevyrovnanost v obsahu nutričně důležitých látek a degraduje kvalitu zrna. Salinita u pšenice negativně ovlivňuje všechny důležité pochody, jako je fotosyntéza, syntéza bílkovin, energetický metabolismus a metabolismus lipidů.

3.7.4.2.2 Mechanismy adaptace

Rostliny si vytvořily několik možností, jak se na vyšší koncentrace soli adaptovat. Soli ze svých buněk odstraňují nebo je přeskupují do vakuol. Dále dokáží vybírat a následně vychytávat draselné kationy místo sodných. Rostliny, jež v solných půdách prosperují, se přizpůsobily právě pomocí udržování hladiny draselných kationů ve svých buňkách na vyšší úrovni ve srovnání s ionty sodnými. Rostlina potřebné rovnováhy docílí prostřednictvím regulace aktivity přenašečů pro draselné a sodíkové kationy (Shavrukov et al. 2011).

3.7.4.2.3 Tolerance salinity pšenici

Jsou známy tři základní předpoklady určující toleranci salinity – osmotická tolerance, schopnost vyloučení Na^+ a tolerance salinity tkáněmi. Tyto předpoklady určují toleranci salinity pšenice různou měrou, ale všechny z nich jsou velmi důležité. Pro pochopení salinity je žádoucí prozkoumat slibné linie a geny a ty nejvhodnější dále křížit. Geny se obvykle hledají pomocí populačního mapování a analýzy QTL. Tento dvoufázový postup se nazývá „Forward Genetics“ a využívá se v něm běžně používaných metod screeningu, genetické analýzy a molekulárního mapování (Shavrukov et al. 2011).

Volně žijící skupiny z rodu *Triticum* nabývají oproti pěstovaným výrazně vyšší genetické variability pro vyloučení sodíkových kationů a salinity. V současné době je tedy problém v nedostatečně obsáhlé variabilitě pěstované pšenice seté. To je důsledkem zúžení využití genofondu během vývoje pšenice. Toto zúžení se nachází na dvou místech. První je mezi dvěma diploidními druhy, které stály na prvopočátku vzniku pšenice seté. Druhé zúžení představuje tetraploidní původce (Shavrukov et al. 2011) *Triticum turgidum dicoccon* (Goriewa-Duba et al. 2018) a diploidní *Aegilops tauschii* (Svacina et al. 2020). Další příčinou narušení genetické

rozmanitosti pšenice je její domestikování člověkem. Novodobé zemědělské postupy a šlechtění způsobily prohloubení úbytku genetické variability pšenice (Shavrukov et al. 2011).

Salinita je velmi sofistikovaný abiotický stres, který je vědci zkoumán už dlouho. Mapování, genetické inovace a identifikace slibných genů ale nevedly k žádným významným závěrům. Prozatím jsou známy například geny *Kna1*, *Nax1* a *Nax2*. *Kna1* byl nalezen na chromozomu 4D a má schopnost regulovat akumulaci sodíkových a draselných kationů ve výhonicích pšenice. Geny *Nax1* a *Nax2* byly objeveny poměrně nedávno a vykazují schopnost vyloučení sodíkových kationů. Oba tyto geny jsou původem z *Triticum monococcum*, kde byly identifikovány na chromozomu 2A a 5A (Shavrukov et al. 2011).

3.8 Genetické zdroje

3.8.1 Význam a využití biodiverzity

Genetické zdroje jsou kromě půdy, vody a vzduchu čtvrtým základním zdrojem a předpokladem pro vznik a rozvoj života na Zemi. Tyto zdroje jsou schopné seberozmnožování, vlastního vývoje a dědění vlastností. Soubor organismů, jež z těchto zdrojů vznikly, se označuje pojmem biodiverzita. Biodiverzitou rozumíme všechny organismy žijící na planetě Zemi. Předpokládá se, že na naší planetě existuje zhruba 6–10 milionů druhů živých organismů. Ve velkém měřítku je dnes pěstováno jen 150 rostlinných druhů. Dvanáct z nich zabezpečuje cca 75 % potravy a čtyři z těchto dvanácti rostlin poskytují více než polovinu všech potravin, které populace konzumuje (Dotlacil et al. 2008).

I přesto, že jde o nepatrnou část současné biodiverzity, rozmanitost genů v oblasti pěstování rostlin je velmi významná. Přírozený vývoj a časem i šlechtění dalo vzniknout gigantické genetické variabilitě. Genetická rozmanitost pro každou pěstovanou plodinu je sdružována do sbírek. Sbírkové obsahují vyšlechtěné registrované odrůdy, krajové, původní a primitivní odrůdy, ale i plodinám blízké či příbuzné druhy žijící volně v přírodě. Sbírkové shromažďují i experimentální linie, jež nesou potřebné geny. Shromažděné geny a jejich soubory jsou šlechtiteli využívány ke zlepšování vlastností nových odrůd, jejich adaptace a odolnosti vůči různým vlivům. Jedná se například o šlechtění na vyšší výnosnost plodiny, lepší kvalitu konečných produktů nebo zlepšení odolnosti vůči biotickým či abiotickým stresům (Dotlacil et al. 2008).

3.8.2 Genové banky a jejich funkce

V průběhu 20. století byla pochopena důležitost chránit a shromažďovat genetické zdroje, proto se založily mezinárodní genové banky v Mezinárodních zemědělských výzkumných centrech (IARC). Po celém světě je dnes rozmístěno zhruba 1 500 genových bank nebo zárodečných sbírek s přibližně 6 miliony přírůstků. Z celkového počtu se na území Evropy nachází zhruba 500 genových bank a zárodečných sbírek, které obsahují cca 2 miliony přírůstků (Dotlacil et al. 2008).

Základním úkolem genových bank obecně je uchovávání genofondu rostlin, jež mají zásadní uplatnění v zemědělství a výživě. Genové banky se zabývají výzkumem rostlinného genetického materiálu. Výsledky výzkumů a získané informace jsou genovými bankami zpřístupněny pro odbornou i laickou veřejnost. Preference genových bank jsou obvykle

zaměřeny na místní rostlinný materiál, krajové kultivary a kultivary domácího šlechtění. Důležité jsou ale i výnosově kvalitní kultivary a dárci hodnotných šlechtitelských znaků, pocházejících z různých částí světa, které se hodí pro místní šlechtění (VÚRV 2020).

V České republice je studiu a ochraně genetických zdrojů věnována pozornost již několik desítek let (Dotlacil et al. 2008). V rámci Výzkumného ústavu rostlinné výroby (VÚRV) funguje i genová banka VÚRV, jež je institucí soudržnou s Národním programem konzervace a využívání genetických zdrojů rostlin a agrobiodiverzity (NPGZR). Spolu s tím funguje i jako centrální genová banka, jejímž úkolem je udržitelně skladovat generativně množené druhy, které se uplatňují v zemědělství. Genová banka má svůj specializovaný tým, jehož úkolem je za pomoci různých typů výzkumu podat co nejvíce informací o genetických zdrojích rostlin, jež jsou v genové bance uloženy. Všechny získané informace o jednotlivých genetických zdrojích jsou pak vloženy do informačního systému GRIN Czech (VÚRV 2020).

GRIN Czech (Germplasm Resources Information Network in the Czech Republic) je spravován týmem genové banky VÚRV. Tento systém byl vytvořen kooperací s USDA/ARS Beltsville, Bioversity International a Global Crop Diversity Trust. GRIN Czech slouží zejména k vyhledávání informací o rostlinných genetických zdrojích. Systém zprostředkovává i možnost nákupu semen uložených ve sbírce genové banky, a to jak pro pěstební praktické využití, tak pro pokusné účely a šlechtitelské programy (VÚRV 2020).

Na celém území České republiky dále působí celkem dvanáct podniků spravujících více než 50 000 genetických zdrojů. Výzkumný ústav rostlinné výroby disponuje více než polovinou všech genetických zdrojů nacházejících se v českých sbírkách. Dále spravuje národní informační systém o studiu a ochraně genetických zdrojů. Pro co nejjednodušší využití genetických zdrojů v zemědělství a šlechtění je prováděno jejich důsledné popisování a zařazování. Všechny genetické zdroje nacházející se v českých sbírkách jsou opatřeny svým národním evidenčním číslem. Díky Národním klasifikátorům existují pro 65 % genetických zdrojů také vyhodnocovací datové soubory pro lepší orientaci (Dotlacil et al. 2008).

Pro další fungování budoucích generací je důležité zachování genetických zdrojů, avšak neméně důležité je uspořádat tyto zdroje pro účinné využití ve šlechtitelských programech. Při rychlosti růstu populace je zásadní zavést udržitelný průběh zemědělství, který bude lépe využívat současný genofond. Odrůdy, které zemědělci pěstují by měly kromě vysokých a ustálených výnosů vykazovat také uspokojivou odolnost vůči abiotickým i biotickým stresům. To vše by se mělo pojit s uspokojivou kvalitou zrna a konečných výrobků, a také s dobrou reakcí i na nižší dávky hnojiv. Stejnou měrou je potřeba dbát na rozvoj odrůdové rozmanitosti, aby stál světový agroekosystém na pevných základech a pěstitelé měli dostatečně rozsáhlé spektrum vhodných odrůd pro pěstování (Dotlacil et al. 2008).

3.8.3 Získávání a hodnocení genetických zdrojů

Značné množství krajových odrůd pšenice bylo získáno prostřednictvím tzv. sběrných misí. V případě malých vzorků, jež byly obvykle získány a dodány sběrateli, je nutné provést množení, aby bylo k dispozici dostatečné množství osiva pro polní zkoušky. Krajové odrůdy z menšinových pšeničných druhů jsou hodnoceny pomocí polních zkoušek a různých laboratorních testů. Toto hodnocení je realizováno dle popisného seznamu pro rod *Triticum*, kde je hodnoceno a evidováno taxonomické zařazení genetických zdrojů a jejich morfologické

vlastnosti, vývojové a růstové fáze v počtu dní, hodnocení odolnosti vůči chorobám, jako jsou padlí, rez pšeničná nebo rez travní. Dále se hodnotí výnosnost, počet klasů a zrn v nich, hmotnost tisíce zrn a další. Z kvalitativních parametrů se obvykle vyhodnocuje obsah celkových bílkovin, obsah lepku, index lepku, Zelenyho sedimentační test a číslo poklesu (Stehno et al. 2010).

3.8.4 Příklady genetických zdrojů

Sbírka genetických zdrojů pšenice je uložena zejména ve Výzkumném ústavu rostlinné výroby v Praze v Ruzyni. Sbírkou tvoří 29 druhů pšenice a mnoho jejich odrůd a linií. Celkově sbírka obsahuje 10 523 odrůd a linií, jak uvádí Tabulka 1. Z toho je 697 krajových odrůd a zastaralých odrůd. Značný počet krajových odrůd spadá do *Triticum aestivum*, avšak tvoří pouze 4,2 % odrůd tohoto druhu. Značně vyšší podíl krajových odrůd je v menšinových druzích pšenice, jako například u *Triticum dicoccon* ze 77,6 % nebo u *Triticum monococcum* z 80 % (Stehno et al. 2010).

Tabulka 1: Počet genetických zdrojů pšenice VÚRV (Stehno et al. 2010)

Odrůda pšenice	Počet genetických zdrojů
<i>Triticum aestivum</i> L.	9 081
<i>T. araraticum</i> Jakubz.	44
<i>T. boeoticum</i> Boiss.	47
<i>T. carthlicum</i> Nevski	14
<i>T. compactum</i> Host	44
<i>T. dicoccoides</i> (Koern. Ex Aschers. Et. Graeb.) Schweinf.	26
<i>T. dicoccon</i> (Schrank)	116
<i>T. durum</i> Desf.	912
<i>T. monococcum</i> L.	55
<i>T. polonicum</i> L.	14
<i>T. spelta</i> L.	78
<i>T. turgidum</i> L.	45
<i>T. urartu</i> Thum. ex Gandil	11
Ostatní (méně než 10 položek na druh)	36
Celkem	10 523

Příkladem genetických zdrojů pšenice jsou například odrůdy Annie, Bohemia, Turandot, Illusion nebo Julie. Tyto odrůdy byly jako příklady vybrány, protože byly vyšlechtěny místními šlechtiteli v šlechtitelské stanici Selgen s. r. o., ve Stupicích a zároveň jsou evidovány systémem GRIN Czech.

3.8.4.1 Annie

Odrůda Annie je středně raná odrůda s jakostí kategorie E. Ve spektru českých ozimých odrůd zaujímá v jakosti první místo (selgen.cz, online). Vyznačuje se vysokou mrazuvzdorností i odolností k poléhání. Je vysoce rezistentní ke rzi travní. Rezistence vůči padlí je střední až

vysoká. Annie má velký počet zrn v klase a vysokou hmotnost tisíce zrn (grinczech.vuvr.cz, online). Nese gen *Pch1*, jež zvyšuje odolnost vůči stéblolamu (selgen.cz, online). V GRIN Czech je dostupná pod národním evidenčním číslem 01C0107609 (grinczech.vuvr.cz, online).

3.8.4.2 Bohemia

Odrůda Bohemia je poloraná odrůda s ustálenou jakostí kategorie A (selgen.cz, online). Obsahuje střední až vysoký obsah hrubých proteinů (14 %), má velmi vysoký index lepku a hodnoty Zelenyho sedimentačního testu jsou také velmi dobré. I přes delší klas vykazuje velmi dobrou odolnost vůči poléhání. Vyznačuje se vysokou mírou mrazuvzdornosti. Dále vyniká v odolnosti vůči základním chorobám postihujícím pšenici, jako je padlí, rez pšeničná a rez plevová. V GRIN Czech je dostupná pod národním evidenčním číslem 01C0106924 (grinczech.vuvr.cz, online).

3.8.4.3 Turandot

Vysokou tolerancí ke klasové fuzarióze se vyznačuje odrůda Turandot. Tato poloraná odrůda (selgen.cz, online) je vysoce odolná vůči mrazu a poléhání a spadá do jakostní kategorie A. Hodnoty Zelenyho sedimentačního testu odrůdy jsou na střední úrovni, index lepku je však velmi vysoký. V GRIN Czech je k nalezení pod národním evidenčním číslem 01C0107284 (grinczech.vuvr.cz, online).

3.8.4.4 Illusion

Odrůda Illusion je odrůda s vysokou mrazuvzdorností. Dále je vysoce odolná k poléhání, padlí, rzi travní, pšeničné i plevové. Obsahem hrubých bílkovin je na střední úrovni stejně jako hodnotou hmotnosti tisíce zrn (grinczech.vuvr.cz, online). Odrůda Illusion je poloraná (selgen.cz, online) kvalitativní kategorie A. V GRIN Czech je dostupná pod národním evidenčním číslem 01C0108260 (grinczech.vuvr.cz, online).

3.8.4.5 Julie

Odrůda Julie je výjimečná vysokým indexem lepku a PSI (grinczech.vuvr.cz, online). V jakostní kategorii E je stabilní (selgen.cz, online). Rovněž vykazuje vysoké hodnoty v měření hmotnosti tisíce zrn a je vysoce odolná vůči mrazu i poléhání. Julie je vysoce odolná i k padlí, pšeničné, travní i plevové rzi. V GRIN Czech je dostupná pod národním evidenčním číslem 01C0107608 (grinczech.vuvr.cz, online).

3.8.5 Hodnocení dostupnosti genetických zdrojů

V současnosti se vývoj rozmanitosti a dostupnosti genetických zdrojů ubírá slibným směrem. Velký vliv na současnou situaci mají především genové banky rozmístěné po celém světě (Dotlacil et al. 2008) a jejich vzájemná spolupráce. Dlouhodobá a aktivní činnost specializovaného týmu genové banky VÚRV přináší dobrou budoucnost pro rozmanitost a dostupnost genetických zdrojů na našem území. Díky informačnímu systému GRIN Czech

mohou být výsledky výzkumů genetických zdrojů sdíleny i mezi genovými bankami, což je pro dostupnost genetických zdrojů rostlin klíčové (VÚRV 2020).

4 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo nashromáždit literární prameny o současných možnostech šlechtění pšenice seté (*Triticum aestivum L.*) na kvalitu s přihlédnutím k rizikovým faktorům klimatické změny.

Jelikož jsou kvalita a výnos pšenice v současné době ohrožovány abiotickými a biotickými stresy, šlechtitelské programy se zaměřují na šlechtění pšenice zejména pro odolnost a rezistenci vůči těmto rizikovým faktorům a stresům. Mezi významné abiotické stresy patří salinita a stres ze sucha a horka. Bylo zjištěno, že salinita vlivem nabourání fotosyntetického systému a syntézy bílkovin zásadně přispívá k degradaci kvality pšeničného zrna a jeho hmotnosti. Výzkum v oblasti tolerance pšenice k salinitě je problematický z důvodu jejího velmi komplexního charakteru.

Pšenice setá je plodinou mírného podnebí, takže stres ze sucha a horka má na její kvalitu a produkci obecně negativní vliv. Vznik stresu ze sucha a horka je zapříčiněn klimatickou změnou a může způsobit rozvoj některých houbových onemocnění, kterým teplejší podnebí vyhovuje, a tím degradovat kvalitu pšenice. Byly však zaznamenány případy, kdy tepelný stres i stres ze sucha vyvolaly zvýšení koncentrace proteinů v pšeničném zrně. Ne vždy tedy musí stres ze sucha a horka na pšenici působit nepříznivě. Vliv tohoto stresu na kvalitu pšenice je tedy ovlivněn délkou a mírou jeho působení a odolností odrůdy.

Vzhledem k negativním predikcím vývoje klimatické změny je brán zřetel také na vytvoření dostatečně rozmanité genetické diverzity, ve které se skrývají odolné genotypy a geny, které v budoucnu pomohou zajistit potravinovou bezpečnost na naší planetě. Všechny genetické zdroje pěstovaných rostlin jsou uloženy v genových bankách po celém světě. Dostupnost genetických zdrojů pšenice je velmi důležitá a v současnosti uspokojivá.

Tato práce kombinuje a propojuje poznatky ze dvou v zemědělství velmi sledovaných témat, a to kvality pšenice a klimatické změny. Práce poskytuje vhled do problematiky hlavních rizikových faktorů, jež pšenici aktuálně ohrožují a podává souhrn a popis aktuálních trendů ve šlechtění pšenice na kvalitu.

5 Literatura

Abbas G, Saqib M, Rafique Q, Rahman MAU, Akhtar J, ul Haq MA, Nasim M. 2013. Effect of salinity on grain yield and grain quality of wheat (*Triticum aestivum* L.). *PAKISTAN JOURNAL OF AGRICULTURAL SCIENCES* **50**:185-189.

Agrobiologie. Obilniny I. skupiny. Available from:
https://agrobiologie.cz/SMEP3/Pestovani_rostlin_cviceni_Obilninny/etext.czu.cz/php/skripta/kapitola3185.html?titul_key=81&idkapitola=2 (accessed March 2022).

Amagai Y, Martinek P, Watanabe N, Kuboyama T. 2014. Microsatellite mapping of genes for branched spike and soft glumes in *Triticum monococcum* L. *GENETIC RESOURCES AND CROP EVOLUTION* **61**:465-471.

Andrei-Mihai G, Andreea-Mihaela F, Florin-Daniel L, Eugen U. 2019. Wheat Rusts: The Effect of Climatic Conditions Variability on Wheat Rust Pathogens. Pages 493–498 in Miron LD, editors. *PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONGRESS – LIFE SCIENCES, A CHALLENGE FOR THE FUTURE*. FILODIRITTO PUBLISHER, ITALY.

Balounová M, Vaculová K, Ehrenbergerová J, Hrstková P. 2010. Metodika křížení – ječmen, pšenice. *Agrotest fyto*, Kroměříž.

Beranová M. 2015. *Jídlo a pití v pravěku a středověku*. Academia, Praha.

Bhardwaj SC, Prasad P, Gangwar OP, Khan H, Kumar S. 2016. Wheat rust research-then and now. *INDIAN JOURNAL OF AGRICULTURAL SCIENCES* **86**:1231-1244.

Blatter RHE, Jacomet S, Schlumbaum A. 2004. About the origin of European spelt (*Triticum spelta* L.): allelic differentiation of the HMW Glutenin B1-1 and A1-2 subunit genes. *THEORETICAL AND APPLIED GENETICS* **108**:360-367.

Brevis JC, Chicaiza O, Khan IA, Jackson L, Morris CF, Dubcovsky J. 2008. Agronomic and quality evaluation of common wheat near-isogenic lines carrying the leaf rust resistance gene Lr47. *CROP SCIENCE* **48**:1441-1451.

Cai C, et al. 2020. The acclimation of leaf photosynthesis of wheat and rice to seasonal temperature changes in T-FACE environments. *GLOBAL CHANGE BIOLOGY* **26**:539-556.

Desiderio F, Guerra D, Rubiales D, Piarulli L, Pasquini M, Mastrangelo AM, Simeone R, Blanco A, Cattivelli L, Vale' G. 2014. Identification and mapping of quantitative trait loci for leaf rust resistance derived from a tetraploid wheat *Triticum dicoccum* accession. *MOLECULAR BREEDING* **34**:1659-1675.

Dotlacil L, Faberova I, Stehno Z. 2008. Plant Genetic Resources in the Czech Republic. *CZECH JOURNAL OF GENETICS AND PLANT BREEDING* **44**:129-139.

Dotlacil L, Hermuth J, Stehno Z, Dvoracek V, Bradova J, Leisova L. 2010. How Can Wheat Landraces Contribute to Present Breeding. *CZECH JOURNAL OF GENETICS AND PLANT BREEDING* **46**:S70-S74.

Dvoracek V, Bradova J, Capouchova I, Prohaskova A, Papouskova L. 2013. Intra-Varietal Polymorphism of Gliadins and Glutenins within Wheat Varieties Grown in the Czech Republic and its Impact on Grain Quality. *CZECH JOURNAL OF GENETICS AND PLANT BREEDING* **49**:140-148.

Elfatih SE, Peng Y, Ma J, Peng J, Sun D, Ma W. 2013. High Frequency of Unusual High Molecular Weight Glutenin Alleles in 232 Tetraploid Durum Wheat Accessions (*Triticum turgidum* L. ssp *durum* Desf). *CEREAL RESEARCH COMMUNICATIONS* **41**:583-592.

El-Orabey W, Shaheen D, Mabrouk O, Elkot A, Esmail S. 2020. Effect of Temperature on Monogenic Lines of Wheat Leaf Rust Caused by *Puccinia triticina*. *EGYPTIAN JOURNAL OF AGRONOMY* **42**:263-277.

Feodorova-Fedotova L, Bankina B. 2018. Characterization of yellow rust (*Puccinia Striiformis* Westend.): Review. Pages 69–76 in Treija A, Skujeniece S, editors. Research for Rural Development. *LATVIA UNIV LIFE SCIENCES & TECHNOLOGIES, LATVIA*.

Fleitas MC, Schierenbeck M, Gerard GS, Dietz JI, Golik SI, Campos PE, Simon MR. 2018. How leaf rust disease and its control with fungicides affect dough properties, gluten quality and loaf volume under different N rates in wheat. *JOURNAL OF CEREAL SCIENCE* **80**:119-127.

Goncharov NP. 2011. Genus *Triticum* L. taxonomy: the present and the future. *PLANT SYSTEMATICS AND EVOLUTION* **295**:1-11.

Goriewa-Duba K, Duba A, Wachowska U, Wiwart M. 2018. The Never-Ending Story of the Phylogeny and Taxonomy of Genus *Triticum* L. *RUSSIAN JOURNAL OF GENETICS* **54**:1429-1437.

GRIN Czech. Available from: <https://grinczech.vurv.cz/gringlobal/search.aspx> (accessed April 2022).

Grujic G, Vasin J, Belic M. 2021. Soil salinisation in Vojvodina – the Republic of Serbia. *CURRENT OPINION IN ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY* **50**:149-158.

Hanzalová A. 2018. Výskyt rží na pšenici a prognóza jejich rozšíření. Available from: <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/ochrana-rostlin-a-pestovani/choroby/vyskyt-rzi-na-psenici-a-prognoza-jejich-rozsireni> (accessed March 2022).

Hanzalová A. 2021a. Rzi na pšenici v ČR – výskyt a volba odolných odrůd. VÚRV. Available from: <https://www.vurv.cz/2021/01/05/rzi-na-psenici-v-cr-vyskyt-a-volba-odolnych-odrud/> (accessed March 2022).

Hanzalová A. 2021a. Rzi na pšenici v ČR – výskyt a volba odolných odrůd. VÚRV. Available from: <https://www.vurv.cz/2021/01/05/rzi-na-psenici-v-cr-vyskyt-a-volba-odolnych-odrud/> (accessed March 2022).

- Hernandez-Espinosa N, Mondal S, Autrique E, Gonzalez-Santoyo H, Crossa J, Huerta-Espino J, Singh RP, Guzman C. 2018. Milling, processing and end-use quality traits of CIMMYT spring bread wheat germplasm under drought and heat stress. *FIELD CROPS RESEARCH* **215**:104-112.
- Horcicka P, Veskrna O, Sedlacek T, Matyk J, Chrpova J, Hanzalova A, Dixon L. 2014. Development of High Baking Quality Winter Wheat Annie. *CZECH JOURNAL OF GENETICS AND PLANT BREEDING* **50**:293-295.
- Hussain W, Baenziger PS, Belamkar V, Guttieri MJ, Venegas JP, Easterly A, Sallam A, Poland J. 2017. Genotyping-by-Sequencing Derived High-Density Linkage Map and its Application to QTL Mapping of Flag Leaf Traits in Bread Wheat. *SCIENTIFIC REPORTS* **7** (16394) DOI: 10.1038/s41598-017-16006-z.
- Hysek J, Vavera R, Ruzek P. 2017. Influence of temperature, precipitation, and cultivar characteristics on changes in the spectrum of pathogenic fungi in winter wheat. *INTERNATIONAL JOURNAL OF BIOMETEOROLOGY* **61**:967-975.
- Chloupek O. 2008. Genetická diverzita, šlechtění a semenářství. Academia, Praha.
- Chrpová J. 2021. Fuzariózy klasu u pšenice – aktuální informace k 30. 7. 2021. VÚRV. Available from: <https://www.vurv.cz/2021/07/30/fuzariozy-klasu-u-psenice-aktualni-informace-k-30-7-2021/> (accessed March 2022).
- Igrejas G, Branlard G. 2020. The Importance of Wheat. Pages 1–7 in Igrejas G, Ikeda T, Guzmán C, editors. *Wheat Quality For Improving Processing And Human Health*. Springer.
- Koutsoyiannis D. 2021. Rethinking Climate, Climate Change, and Their Relationship with Water. *WATER* **13** (849) DOI: 10.3390/w13060849.
- Labuschagne MT, Moloi J, van Biljon A. 2016. Abiotic stress induced changes in protein quality and quantity of two bread wheat cultivars. *JOURNAL OF CEREAL SCIENCE* **69**:259-263.
- Leisova-Svobodova L, Chrpova J, Hermuth J, Dotlacil L. 2020. Quo vadis wheat breeding: a case study in Central Europe. *EUPHYTICA* **216** (141) DOI: 10.1007/s10681-020-02670-2.
- Lopes MS, et al. 2015. Exploiting genetic diversity from landraces in wheat breeding for adaptation to climate change. *JOURNAL OF EXPERIMENTAL BOTANY* **66**:3477-3486.
- Matsuoka Y, Mori N. 2020. Reproductive and genetic roles of the maternal progenitor in the origin of common wheat (*Triticum aestivum* L.). *ECOLOGY AND EVOLUTION* **10**:13926-13937.
- Matsuoka Y, Nasuda S, Ashida Y, Nitta M, Tsujimoto H, Takumi S, Kawahara T. 2013. Genetic Basis for Spontaneous Hybrid Genome Doubling during Allopolyploid Speciation of Common Wheat Shown by Natural Variation Analyses of the Paternal Species. *PLOS ONE* **8** (e68310) DOI: 10.1371/journal.pone.0068310.

Matsuoka Y, Takumi S, Kawahara T. 2007. Natural variation for fertile triploid F-1 hybrid formation in allohexaploid wheat speciation. *THEORETICAL AND APPLIED GENETICS* **115**:509-518.

Matsuoka Y, Takumi S. 2017. The role of reproductive isolation in allopolyploid speciation patterns: empirical insights from the progenitors of common wheat. *SCIENTIFIC REPORTS* **7** (16004) DOI: 10.1038/s41598-017-15919-z.

Mizuno N, Hosogi N, Park P, Takumi S. 2010a. Hypersensitive Response-Like Reaction Is Associated with Hybrid Necrosis in Interspecific Crosses between Tetraploid Wheat and *Aegilops tauschii* Coss. *PLOS ONE* **5** (e11326) DOI: 10.1371/journal.pone.0011326.

Mizuno N, Yamasaki M, Matsuoka Y, Kawahara T, Takumi S. 2010b. Population structure of wild wheat D-genome progenitor *Aegilops tauschii* Coss.: implications for intraspecific lineage diversification and evolution of common wheat. *MOLECULAR ECOLOGY* **19**:999-1013.

Peel MC, Finlayson BL, McMahon TA. 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *HYDROLOGY AND EARTH SYSTEM SCIENCES* **11**:1633-1644.

Penov I, Manolov I, Alexiev A, Kavardziev Y. 2011. Salinisation in Bulgaria: Institutional settings for soil conservation (a case study of Belozem village). *LAND DEGRADATION & DEVELOPMENT* **22**:134-143.

Petránek J. 2007. Online Geologická encyklopedie. Available from: <http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?aridni#> (accessed march 2022).

Pladias – databáze české flóry a vegetace. 2014–2022. *Triticum aestivum* – pšenice setá. Available from: <https://pladias.cz/taxon/overview/Triticum%20aestivum> (accessed March 2022).

Rakszegi M, et al. 2016. Comparison of quality parameters of wheat varieties with different breeding origin under organic and low-input conventional conditions. *JOURNAL OF CEREAL SCIENCE* **69**:297-305.

Ramsey J, Schemske DW. 1998. Pathways, mechanisms, and rates of polyploid formation in flowering plants. *ANNUAL REVIEW OF ECOLOGY AND SYSTEMATICS* **29**:467-501.

Salehi S, Ardalan A, Ostadtaghizadeh A, Garmaroudi G, Zareiyan A, Rahimiforoushani A. 2019. Conceptual definition and framework of climate change and dust storm adaptation: a qualitative study. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL HEALTH SCIENCE AND ENGINEERING* **17**:797-810.

- Sallam A, Alqudah AM, Dawood MFA, Baenziger PS, Borner A. 2019. Drought Stress Tolerance in Wheat and Barley: Advances in Physiology, Breeding and Genetics Research. *INTERNATIONAL JOURNAL OF MOLECULAR SCIENCES* **20** (3137) DOI: 10.3390/ijms20133137.
- Selgen a.s. 2022. Pšenice ozimá. Available from: <https://selgen.cz/psenice-ozima/> (accessed April 2022).
- Shavrukov Y, Shamaya N, Baho M, Edwards J, Ramsey C, Nevo E, Langridge P, Tester M. 2011. Salinity Tolerance and Na⁺ Exclusion in Wheat: Variability, Genetics, Mapping Populations and QLT Analysis. *CZECH JOURNAL OF GENETICS AND PLANT BREEDING* **47**:S85-S93.
- Shi XX, Chen YH, Yue JW, Li J, Peng C. 2007. Simulating and forecasting soil-salinisation evolution: a case study on Changling County, Jilin province, China. *NEW ZEALAND JOURNAL OF AGRICULTURAL RESEARCH* **50**:975-981.
- Schopf M, Wehrli MC, Becker T, Jekle M, Scherf KA. 2021. Fundamental characterization of wheat gluten. *EUROPEAN FOOD RESEARCH AND TECHNOLOGY* **247**:985-997.
- Simon MR, Fleitas MC, Castro AC, Schierenbeck M. 2020. How Foliar Fungal Diseases Affect Nitrogen Dynamics, Milling, and End-Use Quality of Wheat. *FRONTIERS IN PLANT SCIENCE* **11** (569401) DOI: 10.3389/fpls.2020.569401.
- Smith SD, Charlet TN, Zitzer SF, Abella SR, Vanier CH, Huxman TE. 2014. Long-term response of a Mojave Desert winter annual plant community to a whole-ecosystem atmospheric CO₂ manipulation (FACE). *GLOBAL CHANGE BIOLOGY* **20**:879-892.
- Stehno Z, Bradova J, Dotlacil L, Konvalina P. 2010. Landraces and Obsolete Cultivars of Minor Wheat Species in the Czech Collection of Wheat Genetic Resources. *CZECH JOURNAL OF GENETICS AND PLANT BREEDING* **46**:S100-S105.
- Steiner B, Buerstmayr M, Michel S, Schweiger W, Lemmens M, Buerstmayr H. 2017. Breeding strategies and advances in line selection for Fusarium head blight resistance in wheat. *TROPICAL PLANT PATHOLOGY* **42**:165-174.
- Svacina R, Sourdille P, Kopecky D, Bartos J. 2020. Chromosome Pairing in Polyploid Grasses. *FRONTIERS IN PLANT SCIENCE* **11** (1056) DOI: 10.3389/fpls.2020.01056.
- Univerzita Palackého v Olomouci. 2011–2022. Endosperm. Available from: <http://botany.upol.cz/atlas/anatomie/anatomieCR48.pdf> (accessed March 2022).
- Víchová J. 2022. Choroby obilnin a luskovin. Available from: https://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/files/93/8489.jpg (accessed March 2022).

- VÚRV. 2020. Výzkumný tým 09: Genová banka. Available from: <https://www.vurv.cz/vyzkum/odbor-genetiky-a-slechtenu-rostlin/genova-banka/> (accessed April 2022).
- VÚRV. 2021. Monitoring výskytu růžovění klasu pšenice (*Fusarium* sp.) v ČR v roce 2020. Available from: <https://www.vurv.cz/2021/05/21/monitoring-vyskytu-ruzoveni-klasu-psenice-fusarium-sp-v-cr-v-roce-2020/> (accessed March 2022).
- Wang BX, Hof AR, Ma CS. 2022. Impact of climate change on crop production, pests and pathogens of wheat and rice. *FRONTIERS OF AGRICULTURAL SCIENCE AND ENGINEERING* **9**:4-18.
- Wang HF, et al. 2018. Three genomes differentially contribute to the seedling lateral root number in allohexaploid wheat: evidence from phenotype evolution and gene expression. *PLANT JOURNAL* **95**:976-987.
- Wang XH, et al. 2020. Emergent constraint on crop yield response to warmer temperature from field experiments. *NATURE SUSTAINABILITY* **3**:908-916.
- Werndl Ch. 2016. On Defining Climate and Climate Change. *THE BRITISH JOURNAL FOR THE PHILOSOPHY OF SCIENCE* **67**:337-364.
- Wieser H. 2007. Chemistry of gluten proteins. *FOOD MICROBIOLOGY* **24**:115-119.
- Woodward A. 2019. Climate change and the surgeon: what is the problem? Why is it so hard? What can be done?. *ANZ JOURNAL OF SURGERY* **89**:1358-1363.
- Zelba O, Hanzalova A, Dumalasova V, Viehmannova I. 2022. Analyzing wheat cultivars grown in Czech Republic for eight stem rust resistance genes. *EUROPEAN JOURNAL OF PLANT PATHOLOGY* **162**:221-230.
- Zhang Y, et al. 2018. Analysis of the functions of TaGW2 homoeologs in wheat grain weight and protein content traits. *PLANT JOURNAL* **94**:857-866.
- Zhang YW, Bai Y, Wu GH, Zou SH, Chen YF, Gao CX, Tang DZ. 2017. Simultaneous modification of three homoeologs of TaEDR1 by genome editing enhances powdery mildew resistance in wheat. *PLANT JOURNAL* **91**:714-724.
- Zhao C, et al. 2017. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE UNITED STATES OF AMERICA* **114**:9326-9331.

Zimolka J, Edler S, Hřivna L, Jánský J, Kraus P, Mareček J, Novotný F, Richter R, Říha K, Tichý F. 2005. Pšenice: pěstování, hodnocení a užití zrna. Profi Press, Praha.