

## Praktické cíle šlechtění

### 1. Fyziologické a morfologické znaky

Výnos, nepoléhavost, zakrsllost, pukavost, ranost, požadavky na fotoperiodu

### 2. Odolnost k chorobám a škůdcům – biotické faktory prostředí

3. Odolnost k abiotickým faktorům prostředí – sucho, chlad, koncentrace solí, vysoké teploty, hliník, oxidativní stres, zaplavení

4. Obsah prospěšných látek – proteiny, mastné kyseliny, bezsemenné plody, zpožděné dozrávání

### 5. Význam biotechnologií ve šlechtění na tyto znaky

---

## 1 Šlechtění na výnos

Výnos a jakost jsou hlavními znaky, které tvoří hospodářskou hodnotu odrůdy. Výnos odrůdy je projevem souboru genetických, morfologických, biologických, biochemických a fyziologických funkcí každého jedince v porostu a jeho ekologického přizpůsobení. Hospodářský výnos je objem příslušného produktu rostliny s požadovanou jakostí. Znak je složitě geneticky založený a může se plně uplatnit jen za určitých podmínek prostředí. Při šlechtění lze dosáhnout pokroku hlavně použitím kombinačního křížení, využitím dalších variant křížení (vzdálené křížení) a polyploidie.

Výběr na výnos se řídí genetickým založením toho znaku, který má vysloveně kvantitativní charakter. Výběrový postup je závislý na působení genů; může jít o aditivitu, dominanci, superdominanci, epistázi, funkci genů modifikátorů, vícefaktorový vliv, kumulativní působení genů a polygenní založení.

Výnosná odrůda je tvořena kombinací genů, zajišťující takovou skladbu genotypu, jež odpovídá podmínkám prostředí. Jistota hospodářského výnosu je proto závislá na individuální homeostázi. Za existence homeostáze se rostlina vyvíjí normálně a optimálně i pod menším negativním vlivem prostředí.

Podle plodiny může jít o výnos listů (čaj, tabák), plodů, stonků, kořenů nebo květů aj. morfologických částí. Může to být také chemický obsah látek jako jsou oleje, cukry nebo latex. U bavlníku jde např. o vlákna. Výše výnosů závisí na dobré fyziologické kondici rostliny, jako je fotosyntetická kapacita, světlo aj.

1. **Biologický výnos** – celkový výnos suché hmoty produkovaný rostlinou na jednotku plochy (biomasa).

2. **Ekonomický výnos** – celková hmotnost specifických produktů rostlin, které mají tržní hodnotu.

Jde o komplex znaků včetně schopnosti rostlin odolávat nepříznivým vlivům prostředí biotických i abiotických.

## 2 Fyziologické a morfologické znaky

Výnos plodiny souvisí se správnými funkcemi procesů jako je fotosyntéza, respirace a transpirace, transport látek. Tyto znaky jsou kvantitativně děděné. Fyziologické znaky můžeme široce definovat podle jejich komponent jako je stupeň fotosyntézy, úhel listů, plocha listů, počet průduchů, vodní režim, fotoperioda, tolerance ke stresům prostředí, minerální výživa. Významné výsledky ve šlechtění byly dosaženy prostřednictvím změn v architektuře rostlin, což je především nízký vzrůst (polozakrsllost) u obilovin (pšenice, rýže) se všemi výhodami, které z takové změny plynou.

## Charakter stébla a nepoléhavost

Existují dva typy poléhavosti, které mohou být způsobeny biotickými a abiotickými faktory prostředí. Poléhavost může být na úrovni kořene nebo stonku. Půdní organismy a hmyzí škůdci mohou poškozovat kořeny, což způsobuje, že rostlina poléhá vlivem poškození kořenů. Napadení škůdci může způsobit i poléhání stonků nebo stébel. Např. zavíječ kukuřičný v Evropě oslabuje stonky a vytváří dispozice pro jejich ohýbání. Silný vítr a jiné faktory počasí i klimatické (kroupy, sníh, led) jsou obvyklými příčinami poléhání.

Určité vlastnosti dělají rostlinu náchylnou pro poléhání – velká výška rostlin, tenké stonky, nadměrný vegetativní růst, šťavnatost. Také hnojení s vysokým obsahem dusíku podporuje intenzivnější vegetativní růst a tím šťavnatost rostlin, což podporuje napadení hmyzem. Stonky napadené hmyzem jsou slabší a náchylné k poléhání. Šlechtění na odolnost k poléhání je důležité z hlediska redukce výnosů při poléhání. U obilovin způsobuje až 30% ztráty na úrodě zrna.

### Genetická podstata

Jde o kvantitativní znak, exprese genů je ovlivňována prostředím. Je těžké hodnocení podle fenotypu, protože faktory podílející se na poléhání se projevují v různých stádiích vývoje a někdy se neprojeví vůbec.

Obecně se šlechtění zaměřuje na nižší vzrůst, tím silnější a robustnější stonky, silnější slupku, pevnější stéblo, silný kořenový systém, odolnost k chorobám kořenů a stonků, hmyzím škůdcům. Ve šlechtění se využívají zdroje genů zakrslosti (rýže, pšenice; viz Zelená revoluce). Dnes je snaha identifikovat DNA markery příslušných genů a ty uplatnit při selekci rostlin na konkrétní znak prostřednictvím kosegregace markeru s daným genem.

Pšenice se šlechtí na tři typy odrůd: polonízské (0,60 až 0,90 m), nízké (0,40 až 0,60 m) a velmi nízké, zakrslé (0,25 až 0,40 m).

Výšku stébla u ječmene určují čtyři faktory. Dědí se intermediálně a v generaci  $F_2$  se objevuje složitě štěpení této vlastnosti. Tvorbu sklerenchymatického pletiva v stéble determinují dva geny, jejich dominantní alely. Konstituce *AABB* má pletivo málo vyvinuté a umístěné na obvodu stébla. Ječmen je náchylný na poléhání. Konstituce *AAbb* má pletivo silnější, i když je umístěno na obvodu stébla. Při konstituci *aaBB* je dobře vyvinuté a je vzdálené od kraje stébla. Nejpevnější stéblo mají rostliny konstituce *aabb*, kde je sklerenchymatické pletivo dobře vyvinuté a vzdálené od obvodu. Dobré zdroje pro nízký vzrůst ječmene jsou některé japonské odrůdy. Mají však hustý klas, malé zrno, mělkou kořenovou soustavu a jsou velmi rané. Zakrslé mutanty mají často určité defekty. Mutant odrůdy Diamant takové defekty nemá.

Krátké stéblo je důležité i u žita. U vysokého žita se spousta asimilátů spotřebuje na tvorbu slámy. Nízké stéblo se připisuje recesivním alelám genů *ct*. Alela *ct* je často ve vazbě s genem pro antokyanové zbarvení oušek listů žita (*R*).

### Zakrslost

Především u obilovin se upřednostňují materiály s nízkou a střední délkou stébla (pšenice, rýže). Zakrslost je spojena s odolností k poléhání, ranost je spojena s redukovanou délkou internodií.

U rostlin byla identifikována řada genů determinujících nízký vzrůst, jedná se o recesivní alely příslušných genů. Recesivní alela *di* u skočce obecného determinuje tvorbu krátkých internodií a způsobuje redukci výšky rostliny o 25 až 50%.

Genů zakrslosti u pšenice *Rht* (*Reduced height*) bylo identifikováno asi 20. Často se ve šlechtění pšenice využívají současně dva geny *Rht*. Např. geny *Rht8* z chromozomu 4A a *Rht2* z chromozomu 4D.

U rýže byly identifikovány geny *d*, které determinují menší velikost zrn a nižší výnos i menší délku internodií, a proto se nevyužívají u komerčního materiálu. Využívá se spontánní i indukovaná mutace *sd1*.

U ovsa se využívají geny *Dw6* a *Dw7*; zakrslost determinují dominantní alely.

U čiroku byly identifikovány čtyři geny zakrslosti *dw1*, *dw2*, *dw3* a *dw4*. Geny determinují zakrslost bez snížení počtu listů, velikosti listů, snížení výnosu, změn v ranosti. *dw3* je vysoce mutantní; dominantní mutantní alela *Dw3* způsobuje vysoký vzrůst rostlin a na poli se objevuje jeden mutant na každých 600 až 1200 rostlin. Odrůdy mají jeden až čtyři geny zakrslosti. V USA jsou nejčastější odrůdy se třemi geny *dw*; ve výnosu jsou lepší než odrůdy se čtyřmi geny.

Rostliny s geny zakrslosti nejsou schopné reagovat na giberelin nebo kyselinu giberelovou, rostlinný hormon, který způsobuje prodlužování stonků. Pomocí transpozonové inzerční mutagenese byl u *Arabidopsis thaliana* klonován gen *GAI*, který je zodpovědný za zakrslost. Na základě znalostí sekvencí tohoto genu a srovnáním *in silico* s jinými druhy bylo zjištěno, že tyto sekvence se objevují i u dalších druhů. Je snaha využít tento gen při genetických modifikacích rostlin a introdukovat jej do dalších druhů.

### **Odolnost proti vypadávání**

Vypadávání zrna jako nežádoucí vlastnost některých odrůd obilovin a je charakterizována jako předčasné uvolňování zrna působením minimálních sil. Časté jsou ztráty vypadáváním zrna (semen) u luskovin, řepky aj. plodin.

U obilovin vypadávání zrna ovlivňuje upevnění květní plevy na vřetení klasu, síla uzávěru květních plev, ale i tvar zrna. Kulaté zrno vypadne dříve, protože víc odtlačuje květní plevy, než zrno protáhlé. Z okrouhlého zrna se vymele více mouky, proto šlechtění pšenice zůstává u tohoto tvaru. Zrno má mít mělkou brázdou s malým kompaktním klíčkem s menším podílem oplodí a osemení. Plevy mají tvar části kruhu a výraznou žilnatinu. Tak jsou lépe připevněné k vřetení klasu a mají silnější uzávěr.

### **Odolnost proti pukavosti**

Pozornost se věnuje nepukavosti lusků u luskovin a šešulí u řepky, protože tato vlastnost není na dostatečné úrovni u hrachu setého, vličího bobu ani u řepky. Šlechtění hrachu se provádí pomocí genotypů, jejichž lusky hůře pukají a zrno méně vypadá. U vličího bobu jsou nepukavost a sladkost semene determinovány recesivními alelami, což je výhodnější. Cílem šlechtění je zvýšit nepukavost i u fazolu, což by mělo za následky menší ztráty na úrodě. Tento problém není u fazolu zahradního, který má pevný uzávěr chlopní lusků. U řepky je ztráta semen v důsledku pukavosti 15 až 20%. U některých odrůd mohou být ztráty až 90%.

Pukavost a ztrátu semen zvyšují fyzikální faktory (kontakt rostlin při sklizni, zvýšený tlak) a faktory prostředí (sucho, slunečno, vítr).

Ke ztrátě zrn dochází i u obilovin (pšenice, rýže). U rýže byly identifikovány vhodné zdroje s nízkou ztrátou zrn; bylo identifikováno alespoň pět genů včetně *sh1*, *sh2* a *sh4*.

### **Odolnost proti porůstání**

Důležitou vlastností obilovin je doba posklizňového dozrávání semen. Ve vlhkých letech může zrno obilovin vyklíčit ještě v klasu. Tak dochází k předčasnému klíčení (porůstání), které negativně ovlivňuje výši úrody a její kvalitu. V zrnech také dochází k řadě chemických změn. Diastatické enzymy přeměňují škrob až na maltózu, která snižuje pekařskou hodnotu mouky. Zrno se často zkrmuje a ztráty na úrodě mohou být až 10%. Porůstání ovlivňují rostlinné hormony a inhibitory. Je to vlastnost determinovaná polygenně a výběry v prvních generacích po křížení jsou málo účinné.

## Šlechtění na ranost

Ranost určuje délka vegetačního období; rostlina v optimálních podmínkách se vyvíjí tak, jak je to pro ni z hlediska dědičnosti typické. Za nepříznivých podmínek se vývoj zpomalí. Délku vegetačního období u některých plodin určuje délka bezmrazového období.

Hospodářské hledisko hodnotí ranost podle rychlosti tvorby orgánů podílejících se na výnosu a podle jejich počtu nebo hmotnosti (zrno, semeno, plody, celková nadzemní hmotnost, listy, květy apod.). Biologickým ukazatelem ranosti je délka vegetačního období. Hodnotíme ji podle počtu dní od výsevu (vzcházení) po zralost (sběr). Je to vlastnost geneticky determinovaná a modifikovaná prostředím.

Při šlechtění na určitý stupeň ranosti se používá metoda křížení s vhodnými genotypy nebo mutační šlechtění. U některých hybridů je generace  $F_1$  z hlediska kvetení a zrání intermediální v porovnání s rodičovskými odrůdami, nebo je stupeň ranosti blíže k některému rodiči. V generaci  $F_2$  je tendence k intermediálnosti, rozptyl je u různých materiálů různý.

## Požadavky na fotoperiodu

Podle požadavků rostlin na délku dne se rozlišují tři kategorie:

- rostliny krátkého dne, pšenice, ječmen, vojtěška, cukrová řepa,
- dlouhého dne, kukuřice, rýže, sója, podzemnice olejná, cukrová třtina,
- neutrální, rajče, bavlník, slunečnice.

Požadavky na fotoperiodu ovlivňují dobu kvetení a fotosyntézu (např. u některých genotypů podzemnice olejně se v podmínkách dlouhého dne látky ukládají místo v semenech v listech). U některých druhů je nezbytná vernalizace, chladové působení, aby rostliny vykvetly.

U sóje byla identifikována řada genů determinujících zralost a kvetení. Gen  $E_3$  – kvetení v podmínkách dlouhého dne. Rostliny  $e_3e_3$  jsou necitlivé k fluorescenčnímu záření za dlouhého dne.

Čirok – geny  $Ma_1, Ma_2, Ma_3, Ma_4$  – ovlivňují zralost, reakce k dlouhému dni. Za dlouhého dne genotyp  $Ma_1Ma_2ma_3Ma_4$  indukuje kvetení v podmínkách 35 h fotoperiody za 44 dny, genotyp  $Ma_1Ma_2Ma_3Ma_4$  za 70 dní.

Šlechtění na ranost se provádí z důvodu brzké sklizně, i když má svoje nevýhody jako je snížený výnos nebo u bavlníku je negativní korelace s délkou vlákna.

Genetická determinace ranosti je různorodá. Uvádějí se jak dominantní alely, tak recesivní alely genů, také modifikátorové geny, i polygeny.

U *Arabidopsis* byl identifikován gen *ppf1*; je to faktor aktivující kvetení. Perspektivně se počítá s jeho využitím při genetické modifikaci jiných druhů pro zvýšení ranosti.

## Morfologie produktů a charakter sběru

Mechanizovaný sběr brambor předpokládá méně rozložené formy trsu, kompaktní hnízdo hlíz pod trsem, hlízy kulovité, okrouhlé, nebo krátce oválné s mělkými očky, vyrovnané velikostí, tvrdou pevnou pokožkou odolnou proti poškození při kombajnového sběru a třídění.

Cukrová řepa a její vhodnost pro mechanizaci začíná již při setí. Výsev na větší vzdálenosti, méně ruční práce při jednocení, vysoká klíčivost, rovnoměrný růst, vzpřímené listy na kratších pevných stopkách. Sběr bulev – jejich vyrovnanost ve velikosti a hmotnosti, uložení hlav ve stejné výšce nad zemí v době sběru, hladká pevná pokožka bulev odolná proti poškození.

## Mechanizace

Cílem je maximální nahrazení ruční práce prací mechanizovanou. Patří sem např. u obilovin střední až krátké a pevné stéblo, morfologická a fyziologická vyrovnanost hlavně z hlediska stejného dozrávání, nevypadavost zrna proti poškození, delší doba posběrového dozrávání aj.

### 3 Šlechtění na odolnost proti biotickým faktorům prostředí

Houby, bakteriální patogenní organismy, viry a škůdci způsobují značné škody na kulturních rostlinách. Prostředky chemické ochrany jsou často nákladné a proti virům neúčinné. Zanechávají rezidua a vedou k přirozenému výběru rezistentních ras škůdců. Šlechtění odolných odrůd je jedním z prvořadých šlechtitelských cílů.

Rostliny jsou zdrojem obživy nejen pro lidskou populaci. Ale již na počátku své evoluce byly zdrojem výživy pro různé organismy – mikroorganismy, jako jsou např. houby, bakterie.

1. Většina těchto organismů jsou **saprofyté**, využívají jako zdroj své výživy metabolity rostlin, které jsou již mrtvé - odumřelé a rozkládají se. Tyto organismy vlastně již nezpůsobují žádnou škodu. Mnoho dalších však napadá živé rostliny.
2. Některé další organismy žijí s rostlinami v **symbióze**, která je **výhodná** pro rostlinu i mikroorganismus – př. rizobia (fixace dusíku, význam v zemědělství),  
– mykorhizní houbové organismy
3. Další skupinou organismů jsou ty, které napadají rostliny, využívají jejich metabolity, rostlinu neusmrtí, ale negativně ovlivňují její metabolismus. Negativní vlivy působení organismu se projeví u rostliny určitými **příznaky**, jako určitá **choroba**. Podle vnějších příznaků odborníci poznají, kterým organismem je rostlina napadena. Choroba má tedy určité fenotypové projevy. **Důsledkem napadení** je většinou zhoršená vitalita rostlin. Pokud jde o kulturní plodiny, vznikají škody v zemědělství. Takové organismy se nazývají **patogenní**, napadená rostlina je **hostitel**. Ne všechny organismy jsou pro určitý druh patogenní. Patogenní organismus napadá hostitele, **nepatogenní** organismus nenapadá rostliny určitého druhu, je pro ně nepatogenní. Jinak řečeno určitý organismus je patogenní pro jeden druh a nepatogenní pro jiný rostlinný druh.

**Houbové patogeny** produkují enzymy, které narušují rostlinné buněčné stěny. Jsou to zejména polygalakturonázy, pektát lyázy a kutinázy. V dalším stadiu se účastní další hydrolázy a esterázy, které rozrušují makromolekulární komponenty rostlinných buněk, jež jsou potom použity pro výstavbu buněčných komponent patogena. Často se podílejí i nízkomolekulární toxiny (fytoalexiny, alkaloidy a další). Geny pro základní enzymy, působící patogenicitu mnoha patogenů, byly klonovány.

Bylo popsáno asi 74 tisíc druhů houbových organismů, z nichž více než 10 tisíc jsou „parazité“, kteří parazitují na živých rostlinách a způsobují různé stupně poškození, tedy choroby rostlin. Tito parazité jsou jednak **biotrofní**, získávají živiny z živých hostitelských buněk a pletiv a snižují tak vitalitu rostlin a její výnosy (u kulturních plodin). **Nekrotrofní** organismy využívají svoje toxiny nebo enzymy, kterými narušují buněčnou stěnu rostlin, usmrcují rostlinné buňky a potom využívají rostlinné metabolity pro svoji výživu. Řada těchto organismů jsou kombinované formy – **hemibiotrofní**. V první fázi po napadení dochází k biotrofní infekci, potom k poškození buněk a jejich smrti a ke sporulaci patogena. Někteří patogeni napadají pouze živé rostliny - obligátní biotrofní patogeni (*Blumeria graminis* – padlí travní), jiní napadají živé rostliny a současně mohou žít saprofytický na odumřelých rostlinách (*Ustilago maydis* – sněť kukuřičná).

Nejčastějšími patogeny u rostlin jsou *Blumeria* (padlí), *Erysiphe* (padlí), *Monilinia* (houbová choroba plodů), *Sclerotinia* (kořenové a stonkové hniloby), *Ustilago* (sněť), *Melampsora*, *Puccinia*, *Uromyces* (původci rzi), *Fusarium* (původce krčkových hnilob).

**Bakteriální patogeny** např. *Pseudomonas*, *Xanthomonas*, *Agrobacterium*, *Erwinia* a další. Podobně jako houby, bakterie degradují pektin a další komponenty rostlinné buněčné stěny.

Bakteriální geny, které působí patogenitu, jsou zmapovány a klonovány lépe než houbové díky značným analytickým možnostem bakteriální genetiky a bakteriálního genového inženýrství. Je poměrně dobře známa degradativní dráha pektinu. U bakterie *Erwinia chrysanthemi* byly izolovány nejen enzymy, které se jí účastní, ale byly detekovány také jednotlivé geny, z nichž většina byla klonována a sekvenována.

Kromě toho mnoho druhů fytopatogenních bakterií produkuje toxiny, které spolupůsobí při vzniku a vývoji choroby. Toxinů může jedním bakteriálním klonem být produkováno větší množství a jen některé z nich jsou známy. Spektrum toxinů, produkováných mikrobiálním patogenem *in vitro*, může být odlišné od spektra toxinů produkováných rostlinou. Každý toxin má svůj jediný typ cílové molekuly - obvykle specifický enzym, který inaktivuje. Například *Pseudomonas syringae* pv. (patovar) *phaseolytica* produkuje fazeolotoxin, který inhibuje specifický enzym ornitinového cyklu, ornitin karbamoyltransferázu (OCTázu). *Pseudomonas syringae* pv. *tabaci* produkuje tabtoxin, jehož  $\beta$ -laktam inhibuje glutamin syntázu, která se účastní při odbourávání amonných iontů.

Genů pro produkci bakteriálních fyto toxinů (nízkomolekulárních difundabilních látek) bývá obvykle několik a bývají společně lokalizovány na velkém bakteriálním plazmidu. Řada těchto genů byla klonována.

Hlavním molekulárně genetickým poznatkem využitelným pro genové manipulace rostlin je, že i bakterie mají enzymy, obdobné těm rostlinným, které jsou cílovými místy působení toxinu. Tyto bakteriální enzymy však jsou k toxinu rezistentní. Klonované geny pro takovéto bakteriální enzymy mohou být po spojení s vhodnými rostlinnými regulačními sekvencemi vneseny do rostlinného genomu a tam podmiňovat rezistenci k bakteriálním toxinům.

Mnoho **virů** infikuje řadu rostlinných druhů, na různých hostitelích způsobují různé symptomy, proto se často stává, že jeden druh má dva názvy. Většina rostlinných virů má genom tvořený jednořetězcovou RNA (*Rhabdoviridae*, *Potyviridae*, *Luteoviridae*). Další rostlinné viry mají dsRNA (*Reoviridae*, *Partitiviridae*), ssDNA (*Geminiviridae*) i dsDNA (*Caulimoviridae*). Šíření virů u rostlin je způsobeno vektory, jako jsou především mšice (sáním), nematody, hmyz (sání, kousání), ale i živočichové, semena nebo pyl. Viry se replikují v rostlinných buňkách, modifikují rostlinný replikační aparát, šíří se plazmodesmaty mezi buňkami nebo cévním systémem.

Rostliny mají vyvinuté různé typy **obraných mechanismů** vůči patogenům:

### **Pasivní**

Kutikula, lignin, fytoanticipiny (antimikrobiální látky, které tvoří chemickou bariéru proti invazi patogenů, detoxifikují enzymy patogenů).

### **Aktivní**

#### **Fytoalexiny** - antibakteriální a antivirové látky

Houbové patogeny uvolňují do buněk hostitele specifické látky (elicitory), které indukují syntézu nízkomolekulárních látek. **Elicitory** jsou aktivní již při extrémně nízkých koncentracích. Typickým elicitem je glukán, který působí v koncentraci  $10^{-9}$ . Obecně elicitory mohou být karbohydráty, ale také polypeptidy. Další elicitory jsou např. chitozan, houbové polysacharidy ale i glykoproteiny, ribonukleázy apod. Elicitory indukují syntézu **fytoalexinů**. Existuje mnoho typů fytoalexinů a každý rostlinný druh syntetizuje většinou jeden fytoalexin. Obecně jsou to nízkomolekulární obranné antibakteriální a protihoubové látky, které jsou chemicky velmi heterogenní, ale převážně se jedná o fenolické sloučeniny.

Fytolaexiny jsou u rostlin druhově specifické (brambory – rišitin, hrách – pisatin, vojtěška – medicarpin, jetel – trifolirhizin, fazol – fazeolin, kukuřice – zeatin). Fytoalexiny jsou toxické i pro rostlinné buňky. Po indukci jejich syntéza tvoří vrchol a pak je blokována. I tak je u některých genotypů příčinou hypersenzitivní reakce.

Elicitory aktivují signalizační drah přenosu signálu, která začíná jejich reakcí s receptory cytoplazmatické membrány. Mohou v některých případech také procházet buněčnou stěnou a cytoplazmatickou membránou do nitra buněk (prostřednictvím pórů, plazmodezmat a kanálků).

Elicitory indukují syntézu fytoalexinů, ale mohou současně také stimulovat syntézu alkaloidů u těch rostlinných druhů, u nichž alkaloidy vznikají i v neinfikovaných rostlinných pletivech, ale také jsou indukovány nebo jejich syntéza je zvýšena po infekci patogenem. Alkaloidy mohou být toxické pro patogena.

### **Antivirové proteiny**

U rostlin se předpokládá existence antivirových proteinů, podobných interferonu. Takovýto protein byl izolován z listů *Nicotiana glutinosa* infikovaných TMV (virus mozaiky tabáku). Některá pletiva vyšších rostlin produkují nízkomolekulární látky - **fytoncidy**, které působí baktericidně, fungicidně nebo insekticidně.

### **Hydrolázy**

Hydrolázy jsou enzymy, které jsou indukovány patogenem a rozkládají komponenty buněčné stěny hub (chitinázy,  $\beta$ -1,3 glukanázy). Částečně se překrývají s PR-proteiny.

### **PR-proteiny**

PR-proteiny (pathogenesis-related) jsou další, zvláště významnou a univerzálně v rostlinách přítomnou skupinou proteinů, které se účastní obranných reakcí rostliny. Jsou to proteiny indukované infekcí viry, viroidy, ale také bakteriálními a houbovými patogeny. Je to skupina většího počtu heterogenních proteinů, které byly studovány především u tabáku, ale také u dalších objektů.

Geny pro různé PR-proteiny byly klonovány a sekvenovány a některé z nich mají chitinázovou nebo D-1,3-glukanázovou aktivitu. PR-proteiny jsou ve velmi nízkých hladinách přítomny i v neinfikovaných pletivech, ale infekci se jejich množství zvyšuje o 2 až 3 řády.

PR-proteiny jsou lokalizovány především v mezibuněčných prostorách a vakuolách. Značné množství se jich hromadí v xylemu. Obranné vlastnosti PR-proteinů jsou z větší části vysvětlitelné jejich enzymovými aktivitami (chitinázy, D-1,3-glukanázy, ale i alkalické deproteinázy). Není však zatím vysvětlitelná jejich antivirová aktivita.

### **Hypersenzitivní reakce, systémová rezistence**

Důležitým aktivním obranným mechanismem u rostlin je hypersenzitivní reakce (HR), která je charakterizována rychlou nekrotizací, tj. místním odumřením živého pletiva v místě napadení patogenem. Tento mechanismus pravděpodobně zahrnuje dvě fáze: zaprvé indukce programované smrti okolních buněk může zamezit šíření patogena a lokalizovat jej od zbytku rostliny a zadruhé existuje široká fyziologicky podmíněná imunita, tzv. systémová rezistence, která je důsledkem hypersenzitivní reakce a aktivace genů spojených s obranným procesem. Dochází k aktivaci transkripce genů kódujících různé komponenty buněčné stěny rostlin (polysacharidy, lignin, suberin, saponin), které mohou být bariérou pro infekci patogena. Infekci mohou zabránit i další rostlinné enzymy (proteiny PR), což jsou různé chitinázy,

glukanázy a proteázy, které rozkládají komponenty buněčné stěny hmyzích škůdců, houbových nebo bakteriálních patogenů.

Bylo zjištěno, že při hypersensitivní reakci se v rostlině zvyšuje koncentrace kyseliny salicylové a že také exogenně aplikovaná kyselina salicylová (SA, popř. její analogy) indukuje stejné geny SAR jako při biologické iniciaci SAR. Toto zjištění vedlo k domněnce, že salicylová kyselina je endogenním signálem pro systémovou rezistenci. Systémová rezistence je výsledkem aktivace genů souvisejících s patogenezí, *PR* (z angl. pathogenesis related) genů.

## **Překrývající se obranné mechanismy**

Rostliny reagují aktivací transkripce a translace genů pro stresové proteiny nejen na patogeny, ale ještě na mnoho dalších stresových faktorů (horko, chlad, sucho, zaplavení, mechanické poškození, paraziti, xenobiotika, atmosférický ozón a pod.). Každá z odpovědí je spojena se syntézou určitého počtu proteinů, ale různé odpovědi mohou mít některé proteiny společné. Toto překrývání odpovědí může mít za následek jejich vzájemné zeslabování. Například rezistence k patogenům může být silně oslabena abiotickým stresem.

Rezistence rostlin se ve značné míře odráží na výnosech určité plodiny, proto je také studium rezistence rostlin k chorobám důležitým a aktuálním tématem. Řada genů determinujících rezistenci k chorobám byla identifikována klasickou genetickou analýzou. U mnoha chorob se na rezistenci podílí několik lokusů (genů). Např. rezistence k padlí travnímu je u ječmene determinována 13 lokusy s 92 alelami. Polygenní charakter rezistence odpovídá předpokladu, že se na genetickém založení rezistenci u ječmene podílejí různé mechanismy.

Podstata rezistence lnu (*L. usitatissimum*) ke rzi travní (*Melampsora lini*) byla objasněna ve 40. a 50. letech 20. století Florem. Do dnešní doby bylo identifikováno celkem 7 lokusů (*K, L, M, A, P, D, Q*) se 34 geny kódujícími rezistenci lnu k tomuto patogenu. V lokusu *L* bylo popsána alelová série alespoň 13 alel. Každá alela má různou specifitu navozené rezistence. Lokus *M* je tvořen multigenní rodinou 15 genů.

## **Vztah gen proti genu**

Rezistenci rostlin k patogenům dělíme na dva základní typy:

### **Horizontální rezistence**

Horizontální rezistence, nebo také rasově (genotypově) nespecifická rezistence, je účinná zpravidla proti širokému spektru patotypů parazita. Tato odolnost má vlastnosti typického polygenně založeného znaku. Projevuje se u ní silná interakce genotypu s prostředím. Je označována jako polní rezistence. Podstatou rezistence je, že rostlina je schopna dokončit svůj životní cyklus dříve, než se patogen dostatečně rozšíří.

### **Vertikální rezistence**

Vertikální rezistence je rezistence rasově specifická. Odolnost tohoto typu je řízena jedním nebo několika málo geny s velkým účinkem (majorgeny) a týká se jediného patogena. Každá alela určitého lokusu odolnosti u hostitele zabezpečuje odolnost pouze vůči jedinému genotypu patogena. Tyto různé genotypy patogena se fenotypově projevují jako tzv. fyziologické rasy, které se označují jako patotypy.

Genotypy patogena, které nejsou potlačeny genem pro rezistenci, se označují jako virulentní k hostitelské rostlině. Mohou ale být blokovány genotypem jiného jedince populace hostitele.



Genotypy patogena, schopné překonat různé geny rezistence hostitele se nazývají fyziologické rasy (u hub) nebo kmeny (u bakterií a virů).

Rezistence k patogenům je tím stabilnější, čím více genů hostitele se jí zúčastní. Jestliže při horizontální rezistenci je jeden gen polygenního systému eliminován mutací nebo je překonán mutací patogena, nebude to mít podstatný vliv na stupeň rezistence. Pravděpodobnost, že při horizontální rezistenci patogen překoná všechny geny pro rezistenci hostitele, je nulová. Jednotlivé geny polygenního systému však nelze ve šlechtitelských programech analyzovat. Šlechtitelé se proto spoléhají především na vertikální rezistenci, přikombinování genů velkého účinku pro rezistenci do genomu. Působení genů velkého účinku lze snadno měřit. Vertikální rezistence však není trvalá. Protože mikroorganismy se množí podstatně rychleji, než rostliny, také rychleji mutují a jediná specifická mutace může překonat rezistenci hostitele.

Mezi bakteriálními **geny avirulence** (označovanými *Avr/avr*) a rostlinnými **geny rezistence** (*R/r*) existuje vztah **gen proti genu**, který charakterizuje interakci mezi patogenem a rostlinou.

**Inkompatibilní vztah** mezi rostlinou a patogenem je výsledkem specifického rozpoznávacího mechanismu mezi genovým produktem rostliny a genovým produktem patogena. V důsledku takového rozpoznání dojde k aktivaci obranného mechanismu, který ohraničí rozšíření patogena. Kompatibilita mezi hostitelem a patogenem je důsledkem selhání aktivity obranného mechanismu, protože jeden nebo oba potřebné genové produkty se buď nevytvářejí, nebo jsou změněny natolik, že nejsou rozpoznány.

Koncepce genů pro avirulenci dobře vysvětluje většinu případů rezistence, podmíněných geny velkého účinku. V nejjednodušším případě jde o dvojici genů, z nichž jeden je dominantní gen pro avirulenci patogena  $A_1$  a ten je komplementován specifickou dominantní alelou genu rostliny  $R_1$ . Produkt genu pro avirulenci je v interakci s produktem genu pro rezistenci za vzniku rezistence. Jestliže některý z obou genů není funkční nebo jeho produkt je podstatně změněn, ke vzniku rezistence nedochází.

Ze vztahu gen proti genu je zřejmé, že rezistence může vznikat v důsledku různých typů interakcí a je podmíněna různými geny. Bakteriální geny pro avirulenci, proti kterým rostlina nemá odpovídající geny pro rezistenci, se ve skutečnosti chovají jako geny pro rezistenci a podmiňují patogenezi i u citlivého hostitele. Tato třída bakteriálních genů pro patogenitu, která je významná pro vývoj symptomů onemocnění u citlivého hostitele a pro indukci mechanismů rezistence u rezistentních rostlin se nazývá *hrp* geny. Druhou třídou, geny *hsv*, tvoří ty geny virulence, které jsou potřebné u některých hostitelů, ale ne u jiných. Neúčastní se iniciace rezistence. Bylo klonováno mnoho genů pro avirulenci z genomů bakterií a některých hub, ale jejich funkce není v některých případech stále jasná. Inkompatibilní reakce vede k rychlé blokádě množení patogena v místě infekce. V důsledku toho vznikají nejprve malá ohraničená chlorotická místa a pak obvykle následují nekrózy odpovídajícího malých sektorů pletiva (lokální léze). Tato hypersenzitivní odpověď je nespecifická a je obecným projevem rezistence, jak proti houbovým a bakteriálním patogenům, tak proti virům. Je to aktivní obranný mechanismus, ke kterému dochází při kombinacích hostitele a patogena, které vedou k rezistenci. Je způsobena koordinovanou indukcí různých metabolických aktivit.

Indukce hypersenzitivní reakce elicitory vede k rychlým metabolickým změnám a řetězci biochemických dějů, které vedou k buněčné smrti. Pokud nekróza následuje několik hodin po infekci a únik patogena je blokován, léze bývají omezeny jen na sektory několika buněk.

Při **kompatibilní interakci patogena a rostliny** dochází k přímému ovlivnění rostliny prostřednictvím produktu genu *Avr* patogena bez příznaků hypersenzitivní reakce. Produktem

genu *Avr* bývá nejčastěji toxin, který je u rezistentní rostliny (genotypu *RR* nebo *Rr*) inaktivován konkrétním enzymem, který je produktem aktivní alely genu *R*. Rostlina je „odolná“ i vůči patogenu, který neprodukuje toxin (nemá aktivní alelu). Citlivost rostliny se projeví pouze tehdy, jestliže rostlina není schopna tvořit enzym (je genotypu *rr*) a je napadena virulentním patogenem, který tvoří toxin.

## **Brambor**

*Solanum tuberosum* ssp. *tuberosum*

Původ tohoto čtvrtého nejvíce pěstovaného kulturního druhu je ve Středních Andách, v Jižní Americe, také s možností nezávislé domestikace v Chile. Brambory byly důležitou potravou Inků, ale ti pravděpodobně nezačali brambory pěstovat. Zbytky brambor byl odhaleny v archeologických nalezištích v Jižní Americe z doby před 5 tisíci lety, což dokazuje starodávny původ brambor.

Španělé a Angličané pravděpodobně přivezli tuto plodinu Nového světa zpět do Evropy koncem 16. st. Zde brambory byly přizpůsobeny růstu a tvorbě hlíz v podmínkách krátkého dne (asi 12 h), v severnějších lokalitách brambory nevytvářely hlízy, protože rostliny na podzim uhynuly mrazem. Výjimkou bylo mírnější klima ve Španělsku, Itálii, jižní Francii a Irsku, kde byly brambory pěstovány v soukromých a botanických zahradách. V průběhu 150 až 200 let se brambory po vynaloženém úsilí člověka začali pěstovat v oblastech s delším dnem a vyšších nadmořských výškách – byly adaptované. To umožnilo rozšíření brambor jako základní potraviny po Evropě a celém světě.

Společně s introdukcí brambor do Evropy se objevili i noví patogeni, kteří se s plodinou společně vyvíjeli. Byly to jednak **viry** – X, Y (PVX, PVY) a virus svítky bramboru (PLRV – potato leafroll virus). Viry se šíří prostřednictvím vektorů – mšic mechanicky kontaktem z infikovaných, a i na potomstvo infikované rostliny. Symptomy infekce viry jsou zakrslost rostlin, chlorózy, nekrózy listů. Viry mohou způsobit snížení výnosů až o 80%. Tyto viry přenáší hlavně mšice broskvoní

Rezistence brambor k virům významně redukuje ztráty na výnosech. Kulturní druh bramboru má více než 200 divokých příbuzných rodu *Solanum*. Byla snaha mezi nimi identifikovat odolné genotypy. V USA jsou genetické zdroje brambor shromažďovány v Mexiku a ve střední a Jižní Americe v Potato Genebank v Sturgeon Bay ve Wisconsinu. Kolekce genových zdrojů byla testována na odolné materiály k chorobám a škůdcům. Mnoho zdrojů bylo identifikováno jako odolné k PVX a PVY, méně již s odolností k PLRV. Ideálně se však měl najít materiál odolný ke všem třem virům. V genové bance bylo 5 634 položek pocházejících od 168 druhů, a jen jeden PI 245939 byl identifikován jako odolný ke všem třem virům. Tento zdroj byl identifikován i jako odolný k mšici broskvové – hlavnímu vektoru virů. Byl to zdroj *S. etuberosum*.

### Využití *S. etuberosum* ke genetickému zlepšení bramboru

Jde o divoký druh endemický v Chile, diploidní  $2n=2x=24$ , nekřížitelný s tetraploidy  $4x=48$  ani dihaploidy  $2x=24$  bramboru. Metodou prostředníka a manipulací s ploidií byli získáni hybridy *etuberosum* x *tuberosum*.

Další metodou překonání bariér křížitelnost byla somatická hybridizace, fúze protoplastů po enzymatickém odstranění buněčných stěn z buněk. R. 1994 byly získáni regeneranti somatických hybridů mezi *S. etuberosum* PI245939 a hybridním klonem ( $2x=24$ ) dihaploidem ssp. *tuberosum* x *S. berthaultii*. Trojnásobný hybrid byl  $4x=48$ , měl nižší schopnost tvorby hlíz a nižší výnosy vlivem genotypu *S. etuberosum*, který hlízy netvoří vůbec. Zpětným křížením s kulturním bramborem se podařilo zlepšit tvorbu hlíz. Fertilita hybridů byla nízká, bylo získáno jen 24 semen z 503 opylení. Bylo získáno 5 rostlin, stále měly 11 až 13 chromozomů *S. etuberosum*. Prováděla se zpětná křížení. Po dvou letech testů byly nalezeny rostliny odolné ke všem třem virům.

Odolnost brambor ke škůdci drátovci

Brouk a jeho larva škodí na hlízách. Larva přežívá v půdě 3 až 4 roky a potom vyžírá hlízy. Ochrana – insekticid, lepší je odolná odrůda – genetická odolnost.

Na univerzitě Idaho testovali získané somatické hybridy na odolnost ke drátovci. Nalezli rostliny, které měly méně děr v hlízách ve srovnání s odolnou kontrolou. U některých rostlin byl zvýšený obsah glykoalkaloidu. Normální povolená hladina je 20 mg/100 g čerstvé hmoty hlízy, rostliny měly více než 47 mg. Přesto se našly rostliny s méně než 13 mg, které byly také odolné. To potvrdilo, že odolnost nezpůsobuje vyšší koncentrace glykoalkaloidu a byly získány rostliny odolné a s povoleným obsahem alkaloidu.

### Jabloň

Jablka jsou čtvrtým nejvíce pěstovaným ovocem na světě (59 mil tun) po citrusech (108 mil tun), banánech (70 mil tun) a hroznech (65 mil tun) (FAO 2004). Pěstují se na celém světě v různých podmínkách půdních i klimatických, od severských zemí Evropy po subtropické oblasti Brazílie nebo Jižní Afriky. Konzumují se čerstvá nebo se zpracovávají. Existuje více než 10 tisíc odrůd, ale jen několik se pěstuje v komerčním rozsahu. Existují čtyři hlavní kategorie:

1) staré a místní odrůdy,

2) odrůdy z náhodně vybraných rostlin v 18. a 19. století. Př. Golden Delicious, Red Delicious, Granny Smith – USA.

Většina odrůd vyšlechtěných ve 20. století. Golden Delicious Jonathan Red Delicious – zlepšení starých odrůd, atraktivita plodů – zbarvení, malé kosmetické vady), velikost plodů, chuť plodů, odolnost vůči transportu, dlouhá skladovatelnost. Odrůdy se množí roubováním ve velkých počtech mnoha milionů rostlin. V takovém rozsahu se objevují spontánně mutace, stabilní pupenové varianty se dále množí. Nebo se mutace i indukují většinou paprsky X a gamma. Mutace ovlivňují dva hlavní znaky – i) tvar a objem stromů, s kompaktními typy, které umožňují vyšší hustotu sadů, ii) zbarvení plodů

Největším problémem odrůd je náchylnost ke strupovitosti jabloní (původce *Venturia inaequalis*) a padlí (původce *Podoshpaera leucotricha*). Během sezóny se musí provádět 15 až 20 různých ošetření vůči těmto patogenům.

Na evropském projektu HiDRAS (High Duality Disease Resistance Apple Project) v letech 2003 až 2006 se podílelo 11 evropských skupin. Hlavním cílem byla identifikace genetických faktorů determinujících kvalitu plodů; založeno na multidisciplinárním přístupu včetně metod molekulární biologie, genetických, bioinformatických. Hlavním novým nástrojem se staly molekulární markery identifikované ve vazbě se znaky kvality a odolnosti k patogenům.

60 let se snaží šlechtitelé vyšlechtit odrůdu jabloní odolnou vůči **strupovitosti**. Ve šlechtitelských programech se využívají hlavně zdroje genu odolnosti  $V_f$ . 80% odolných materiálů má tento gen. Hlavní strategií je křížení se zdrojem odolnosti a série zpětných křížení mezi odolným hybridem a náchylnou odrůdou. V každém cyklu křížení se provádí selekce, odolné hybridy s nejlepší kvalitou plodů se kříží s dalším kultivarem. Avšak r. 1990 byla odolnost způsobená genem  $V_f$  překonána. Změna strategie šlechtitelů, kombinace několika typů odolnosti v jedné odrůdě. Při tom se nezbytně uplatňují DNA markery. Studium genetických základů odolnosti, tvorba genetických map jabloně pro různé materiály. Hlavní gen odolnosti jsou kvantitativní a byly lokalizovány a testovány na trvanlivost proti novým původcům strupovitosti. Nové DNA markery se vyvíjejí pro MAS.

U jabloní je problémem také **padlí**. Využívají se geny  $Pl_2$  z *Malus zumi*,  $Pl_1$  z *M. robusta* a  $Pl_w$  z White Angel – okrasná jabloň ze severu Ameriky.

### 3 Šlechtění na odolnost proti abiotickým faktorům prostředí

Pro vyšší stabilitu výnosů je potřeba šlechtit rostliny na chladuvzdornost, mrazuvzdornost, zimovzdornost, suchovzdornost a odolnost k vyšším teplotám.

#### Chladuvzdornost

Nízkou chladuvzdornost mají především ty teplomilné plodiny, jejichž severní hranice úspěšného pěstování probíhá naším územím. Je to kukuřice, slunečnice, vinná réva, sója, paprika a jiné. Tyto rostliny trpí nedostatkem tepla při klíčení, vzcházení, na začátku, ale i v průběhu vegetace, což nepříznivě ovlivňuje výši výnosů a jejich kvalitu.

Chladuvzdornost je důležitá i pro další plodiny, jako je jarní pšenice, proso, pohanka a jiné. Je to odolnost proti chladu (nízkým teplotám nad nulou) v době klíčení, vzcházení a růstu hlavně v prvních fázích vegetačního období.

U kukuřice byly získány šlechtěním linie, jejichž semena vzcházejí při 5 až 6 °C, ale i několik hodin odolávají mrazu -3 °C.

Na testování chladuvzdornosti se používá tzv. cold test, při kterém se provádějí testy klíčení semen v laboratorních podmínkách při 6 °C po dobu 14 dní, a po přenesení do podmínek zvýšené teploty na 22 °C 6 dní. Materiál, který má při takových podmínkách 95 až 100% klíčivost, se považuje za odolný, s klíčivostí 60% za náchylný k mrazu. Takto vyhodnocený odolný materiál se pak hodnotí i v polních podmínkách, a zjišťuje se, zda se vlastnost přenáší i do hybridů.

#### Mrazuvzdornost

Mrazuvzdornost je odolnost rostlin proti mrazu, což jsou teploty pod nulou. Tento faktor působí samostatně na rostliny na jaře a na podzim. Odolnost proti jarním mrazům má velký význam u některých plodin, např. u předklíčených brambor. Vyšší odolnost umožňuje ranější výsadbu, dřívější sklizeň a vyšší výnos brambor již v polovině června. Dobré zdroje odolnosti proti mrazuvzdornosti brambor je *Solanum acaule*, *S. brevicaulle*, *S. vernei*, *S. phureja* aj. Odolnost se testuje na poli i v laboratoři. Využívají se především hybridy ze vzdáleného křížení.

Další plodinou s požadovanou mrazuvzdorností je jarní pšenice, kdy je nezbytný raný výsev, protože pozdější snižuje výnosy. Jarní mrazíky jsou škodlivé především při kolísání mezi dnem (20 °C) a nocí (-1 a více stupňů °C). testy na odolnost se provádějí v laboratoři při teplotách -3 až -4,5 °C po předcházejícím otužování (3 až 6 dní při 1 °C). zkoušky mrazuvzdornosti se provádějí ve speciálních komorách. Po otužení působíme na rostliny tzv. kritickými teplotami, které jsou pro jednotlivé plodiny následující:

Pšenice	-10 až -22 °C	Hrách	-10 °C
Žito	-15 až -20	Řepa	-5 až -7
Ječmen	-10 až -12	Brambory	-2,5 až -3
Oves	-9 až -12	Řepka	-9
Trávy	-13 až -17	Květiny	-2 až -5
Vojtěška	-11		

Volíme vždy takovou kritickou teplotu, při které vymrzne 50% rostlin známé kontrolní odrůdy. Celý postup má tři fáze: otužování, zmrazování a oživování. Potenciální mrazuvzdornost můžeme zjistit sacharózovým testem, tak že rostliny (obiloviny) na začátku odnožovací fáze umístíme kořeny a odnožovacími uzlinami do roztoku 10 až 20% sacharózy. Po 10 až 14 dnech je vystavíme teplotě -5 °C a postupně teplotám -10 °C, -13 °C, -16 °C, -20 °C, -23 °C a -25 °C. °C

## Zimovzdornost

Zimovzdornost je odolnost rostlin proti všem nepříznivým faktorům, které působí na rostliny během zimy. Zkouší se v polních podmínkách, které mají selektivní účinek jen v některých letech.

Na zvýšení zimovzdornosti pšenice bylo použito vzdálené křížení mezidruhové i mezirodové. Byli získáni hybridi *Triticum aestivum* x *T. spelta*, *T. aestivum* x *T. dicoccoides*, *T. aestivum* x *T. timopheevi*, *Triticum* x *Secale*, *Agropyron glaucum*, *A. elongatum* aj.

## Genetika rezistence rostlin k nízkým teplotám

Některé tropické rostliny jsou silně citlivé na chlad a jsou poškozeny již teplotami pod +10°C. Naopak ozimé rostliny zvyšují svou rezistenci k mrazu, jestliže byly předem vystaveny teplotám těsně pod bodem mrazu. Například neaklimatizované rostliny žita jsou sice poškozovány teplotou -5°C, ale aklimatizované rostliny přežívají teplotu -30°C. Špenát a vojtěška snesou -10°C.

Poškození mrazem má různé formy, od ztráty schopnosti rychlého růstu, přes vadnutí, chlorózu, sterilitu až po uhynutí. Dochází k porušení procesů fotosyntézy, dýchání, zastavení proudění cytoplasmy a ke **změnám permeability membrán**. Existuje hypotéza, podle které primárními citlivými místy jsou především membrány. Ty svým chladovým poškozením rozbíhají kaskádu jevů, které mají za následek různé další typy poškození. Při snížení teploty pod bod mrazu dochází k tvorbě krystalů ledu nejdříve v mezibuněčných prostorech. Bod tuhnutí apoplastických tekutin je vyšší, než bod tuhnutí nitrobuněčné vody. V následující fázi dochází ke vzniku gradientu mezi mrznoucí vodou apoplastu a nemrznoucí cytoplazmatickou vodou a k přemístování nitrobuněčné vody do mezibuněčných prostor. Dochází tím k silné **dehydrataci a kontrakci protoplastů buněk**. Rostliny, zchlazené na -10°C ztrácejí více než 90% aktivní vody. Současně dochází k různým typům **mechanického poškození membrán**. Při tání dochází k opačnému procesu, voda se pohybuje zpět z mezibuněčných prostor do cytoplasmy.

Předpokládá se, že o senzitivě (tím i permeabilitě) buněčných membrán k chladu rozhoduje stupeň nenasycenosti (počet dvojných vazeb) specifického fosfolipidu, fosfatidylglycerolu. To, že stupeň nenasycenosti mastných kyselin ve fosfatidylglycerolu má vliv na stupeň mrazuvzdornosti, bylo experimentálně prokázáno, i když z tohoto důkazu nevyplývá, že by to byl obecný rozhodující faktor mrazuvzdornosti. Tabák, který je citlivý k chladu, byl transformován genem pro glycerol-3-fosfát acetyltransferázu jednak z tykve, která je ještě citlivější k chladu a jednak z *Arabidopsis*, která je mrazuvzdorná. Transgenní rostliny tabáku s genem z tykve měly nižší úroveň nenasycených mastných kyselin ve fosfatidylglycerolu než netransformované tabáky a byly citlivější k chladu. Naproti tomu transgenní rostliny s genem z *A. thaliana* měly vyšší hladinu nenasycených mastných kyselin ve fosfatidylglycerolu než netransformované tabáky a také vyšší stupeň rezistence k nízkým teplotám. Výsledky studia mutací *A. thaliana* však podporují tento závěr jen částečně.

Gen *FAD2* kóduje 18:1 desaturázu. První číslo poměru u mastných kyselin znamená celkový počet atomů uhlíku, druhé počet dvojných vazeb. Mutace v tomto lokusu silně snižuje podíl 18:2 a 18:3 mastných kyselin ve fosfatidylcholinu, což je nejhojnější lipid vyskytující se v pletivech, který není vázán na chloroplasty. Mutace *fad2-2* je skutečně citlivější k nízkým teplotám, ale rozdíl proti nemutovanému typu se projevují až po delší době působení nízké teploty. U *Arabidopsis* je známo ještě 8 dalších nealelních mutací se změněným složením lipidů, které mají méně nenasycených mastných kyselin a 3 z nich mají zvýšenou citlivost k chladu.

Kromě změn membrán dochází při působení nízké teploty ještě k řadě dalších změn. Dochází k indukci nových izoenzymů, zvýšení obsahu cukrů a rozpustných aminokyselin, zvýšení hladin prolinu a organických kyselin (fungují jako **osmoprotektanta**). Některé z těchto změn pravděpodobně mají vliv na stupeň odolnosti k chladu. Kromě toho dochází k syntéze některých rozpustných proteinů, které se při chladu hromadí a rovněž zvyšují odolnost k chladu. Například u špenátu a zelí byl zjištěn protein, který má ochranné vlastnosti k chladu a je při stejné molární koncentraci 10 000x účinnější než sacharóza z hlediska ochrany thylakoidů chloroplastů před poškozením chladem.

Během chladového působení dochází k **oxidativnímu stresu**, tj. porušení metabolismu kyslíku a vzniku jeho aktivních forem. Hlavním zdrojem toxických kyslíkových radikálů u rostliny je transport elektronů ve fotosyntetickém řetězci v důsledku spoluexistence vysoce aktivních elektronů a tvorby kyslíku v jedné organelle, chloroplastech. Tvorba aktivních forem kyslíku v závislosti na světle se nazývá fotooxidativní stres, který je indukovaný i účinkem nízké teploty v normálních světelných podmínkách. Tvorba aktivních forem kyslíku je důsledek transportu elektronů ve fotosyntetickém řetězci v kyslíkovém prostředí. Rostliny si během evoluce vyvinuly systém na odstranění toxických forem kyslíku. Fotoinhibice a fotooxidace se všeobecně vyskytují jen ve stresových podmínkách.

Aktivní formy kyslíku jsou singletový kyslík, superoxidový radikál, hydroxylový radikál, peroxid vodíku. Podobná situace se vyskytne v době sucha, to je uzavírání průduchů s cílem snížení ztrát vody. Detoxikační systémy pro odstranění aktivních forem kyslíku jsou neenzymatické a enzymatické. Neenzymatické antioxidanty jsou malé molekuly jako např. kyselin askorbová, glutathion,  $\alpha$ -tokoferol, karotenoidy, flavonoidy, polyamidy a různé cukry. Detoxikace toxických forem kyslíku enzymatickou cestou je katalyzována různými enzymy jako je superoxidodismutáza, askorbát- a glutathionperoxidáza, monoaskorbátoreduktáza, dehydroaskorbátoreduktáza, glutathionreduktáza a kataláza. Neenzymatické a enzymatické detoxikační mechanismy se aktivují v podmínkách nízké teploty a sucha.

Aktivní formy kyslíku nezpůsobují jen peroxidaci lipidů, ale značně poškozují i proteiny. Oxidace různých funkčních skupin, např. vznik různých disulfidických vazeb v proteinech, je příčinou denaturace proteinů. Denaturace proteinů vyvolává nejen vysoká teplota, ale i nízká teplota. Důkazem je akumulace chaperonů typických pro vysokou teplotu i při nízkých teplotách.

Odolnost k chladu se geneticky hodnotí jako kvantitativní znak. Působení chladem vede k objevení řady typů nových mRNA a nových polypeptidů. Byla sledována spektra proteinů u rostlin při normální teplotě a při chladu. U *A. thaliana* bylo zjištěno v chladu asi 10 až 20 nových proteinů, které přibýly k několika stovkám polypeptidů listů, rozlišitelných dvojrozměrnou gelovou elektroforézou. Současně bylo u tohoto objektu detekováno přes 10 genů, k jejichž expresi dochází v podstatně zvýšené míře při chladovém působení. Všechny geny byly klonovány. Vysoká hladina mRNA těchto genů přetrvává tak dlouho, jak dlouho trvá nízká teplota a pak se vrací k původním nízkým až nulovým hodnotám.

Pozoruhodnou vlastností všech těchto genů, kromě jednoho (genu pro alkoholdehydrogenázu *ADH*, který se vymyká z této skupiny i dalšími charakteristikami), je to, že mohou být aktivovány i při normální teplotě působením ABA. Je známo, že působení ABA zvyšuje toleranci k nízkým teplotám u širokého spektra rostlinných druhů. Současně se u mnoha rostlinných druhů hladina ABA alespoň dočasně zvyšuje po působení nízké teploty. Mutace *A.* s poruchou biosyntézy ABA jsou velmi citlivé k nízké teplotě. Nízké teploty tedy zřejmě podmiňují zvýšenou syntézu ABA a ta způsobuje změny genové exprese, které vedou ke zvýšení chladové tolerance. Promotory některých genů indukovaných chladem mají známé krátké sekvenční úseky, typické pro regulaci prostřednictvím ABA. Předpokládá se, že uvedené geny kódují polypeptidy s kryoprotektivním účinkem. O jednom z nich (genu *A.*

*thaliana*, označeném *KINI*) bylo prokázáno, že kóduje protimrazový protein, podobný těm, které produkují některé arktické ryby a některé druhy hmyzu. Tyto proteiny snižují bod mrznutí roztoku a současně mohou ovlivňovat krystalizaci ledu.

Geny pro proteiny indukované chladem jsou do značné míry druhově specifické (tzv. geny *COR*, *COLD REGULATED*).

Hlavní poškození, které vzniká chladem, je důsledkem narušení funkce chloroplastů. Ustává syntéza některých významných proteinů a obnovuje se po přenesení do laboratorní teploty. Teplota, při které k chladovému šoku dochází, je velice různá v různých rostlinných taxonech a pohybuje se od 0 do +12°C. Ochlazení vede k přerušení syntézy některých proteinů, ale současně k iniciaci syntézy nových typů proteinů, jako proteinů thylakoidů a membrán chloroplastů, které mají ochrannou funkci (protein 35 kD a další).

Nízká teplota je hlavním vnějším faktorem, který omezuje geografickou distribuci rostlin. Rostliny mírného pásma mohou zvyšovat svou toleranci k mrazu, jestliže byly předtím umístěny v prostředí při nízké teplotě nad bodem mrazu. Tento proces, který se nazývá aklimatizace k chladu, zahrnuje změny genové exprese a z toho vyplývající změny enzymových aktivit a hromadění kryoprotektantů.

Proces adaptace znamená aktivaci genů, jejichž produkty zabezpečí metabolismus rostliny v nových podmínkách. V případě nízké teploty se aktivují proteiny s 1. ochrannou funkcí – kryoproteiny, 2. stabilní izoformy jednotlivých proteinů, které nahradí izoformy labilní při nízké teplotě, 3. proteiny, které zabezpečí fluiditu membrán (desaturázy). U odolných rostlin se vlivem nízké teploty mění složení cytoplazmatické membrány, zvyšuje se hladina fosfolipidů a proběhne denaturace nasycených mastných kyselin. Enzymy desaturázy zabudovávají dvojnou vazbu do řetězce mastných kyselin. Dvojitá vazba v dlouhém řetězci vyvolává zlom v prostorové struktuře rovného saturevaného řetězce, což zvyšuje fluiditu membrán. Geny jednotlivých desaturáz jsou silně aktivované při nízkých teplotách u vyšších rostlin, ale i u cyanobakterií.

Při velmi nízkých teplotách pod 0°C hraje v ochraně buněk důležitou úlohu tzv. protimrazové proteiny. Velmi citlivým místem tvorby ledových krystalů u rostliny je apoplast a xylém. U žita se zde při nízkých teplotách akumulují některé proteiny, které inhibují tvorbu ledových krystalů a po osekvenování některých těchto proteinů bylo zjištěno, že mají charakter PR proteinů. Kryoprotektivní účinky mají i některé nízkomolekulární látky, jako je prolin, glycinbetain a různé polyamidy. Tyto látky hrají důležitou roli při osmotické toleranci rostliny, i v toleranci k nízkým teplotám, suchu, protože vysoká koncentrace solí narušuje příjem vody. Největší ochrannou skupinou proteinů jsou LEA (late embryogenesis) proteiny.

## **Suchovzdornost**

Ve světovém měřítku je sucho nejvýznamnější faktor, který omezuje produktivitu rostlin. Očekávané globální oteplování by mohlo vést k dalšímu zesílení těchto vlivů. Nicméně rostliny mají obranné strategie, kterými se jim brání.

Strategie 1: Dokončení citlivých stadií životního cyklu ještě před objevením se sucha jako stresového faktoru. Pokud dojde ke kritickému snížení obsahu vody v půdě během léta, rostliny, které vykvetly a nasadily semena brzy, nejsou suchem postiženy, zatímco u rostlin s pomalejším vývojem je riziko postižení suchem mnohem větší. Krátký životní cyklus je tedy jedna ze strategií ochrany proti suchu.

Strategie 2: Při nedostatku vody rostliny reagují jednak zamezením odpařování z listů a jednak zvýšením příjmu vody kořeny. Protože rostliny mají voskovou kutikulu, výdej vody je

regulován hlavně stupněm otevření průduchů. Jelikož fotosyntéza vyžaduje otevření průduchů, jejich zavření při vodním deficitu brání zvýšení fotosyntézy.

Specifický typ ekonomie hospodaření s vodou mají tučnolisté rostliny. Ten se označuje CAM (crassulacean acid metabolism). Listy jsou přeměněny v trny a lodyhy jsou zduřelé a slouží současně jako fotosyntetické orgány i zásobárna vody. Příjem CO<sub>2</sub> je časově oddělen od fotosyntézy.

Strategie 3: Tolerance k suchu je vyvinuta zvláště u pouštní rostliny *Craterostigma plantaginiferum*, která může úplně vyschnout a zmenšit svou hmotnost na několik procent původní. Po přijetí vody je znovu schopna života a růstu.

Suchovzdornost znamená schopnost odrůdy co nejeфекtivněji využít vodu na tvorbu a stavbu orgánů úrody při vysoké teplotě, nízké relativní vlhkosti vzduchu, nízké vlhkosti půdy a dát relativně vysokou a kvalitní úrodu. Jde o komplexní vlastnost vyvolanou různými dílčími znaky a vlastnostmi biologickými (ranost-pozdnost), fyziologickými (odolnost cytoplazmy k dehydrataci, k vysokým teplotám, koncentracím solí), anatomicko-morfologickými, které ovlivňují transpiraci a pod.

Rozlišujeme půdní, vzdušné a kombinované sucho. Při půdním suchu se postupně vyčerpávají zásoby vody v kořenové vrstvě půdy a rostliny se tomu přizpůsobují zpomaleným růstem, snižováním odpařování a odnožování.

Při atmosférickém suchu obvykle rychle poklesne relativní vlhkost vzduchu na 18 až 20% a teploty vystoupí na 38 až 40 °C. neškodlivější jsou tyto podmínky v době tvorby zrna a dochází k poklesu výnosů. Sucho se může vyskytnout v různém období vegetace; jarní sucho postihne jarní obiloviny obvykle ve fázi odnožování, letní ve fázi stéblování a klasení, ale i nalévání zrna. Vhodné je šlechtění odrůd odolných k suchu ve všech fenofázích.

Suchovzdornost je složitá vlastnost a je geneticky ovlivněna řadou znaků. Je to např. velikost, délka mohutnost kořenového systému, jeho uložení v půdním profilu, schopnost kořenů přijímat vodu, poměr kořenového systému k nadzemní části, rychlost transportu vody z kořenů do nadzemní části, velikost a funkce průduchů, anatomické složení kutikuly, transpirační plocha, schopnost regenerace rostliny po období sucha, odolnost cytoplazmy proti dehydrataci, morfologická stavba rostliny (umožňující zvýšený příjem vody a omezující transpiraci) a fyziologické vlastnosti rostliny (umožňují zvýšený příjem vody a omezující transpiraci bez omezení fotosyntézy, dobrý transport asimilátů, pozdější vadnutí, dobrou a rychlou regeneraci, co nejmenší snížení výkonnosti aj.).

Rostliny se brání škodlivému vlivu such. Pšenice vytváří hlubší kořenový systém, zvyšuje se sací síla kořenů, snižuje se neproduktivní odnožování, tvoří se listy s menším povrchem, listy mají silnější kutikulu na kterou se ukládá ještě korková vrstva. Buňky mají menší rozměry. Při půdním suchu je výhodné, jestliže mají rostliny vysokou sací sílu kořenů spojenou s dobrou regulací výdeje vody biologicky regulovaného a ne mechanickým uzavíráním průduchů, což způsobuje snížení fotosyntézy, protože rostliny se současně uzavírají před přístupem CO<sub>2</sub> ze vzduchu.

Odrůdy často disponují takovými znaky a vlastnostmi, které jim umožní vyhnout se působení sucha. Šlechtěním můžeme vytvořit odrůdy, které ukončí svůj vývoj před nástupem sucha, nebo je sucho zastihne v méně citlivém období. Při šlechtění odrůd pro polosuché oblasti používáme křížení výkonných odrůd s odrůdami s velkou kořenovou soustavou a důkladné testy novošlechtění. Zkoušky odolnosti se provádějí na poli, ve skleníku nebo v laboratoři. Používají se přímé a nepřímé metody. Výsledky zkoušek hodnotíme podle úrodnosti rostlin podle procenta přeživších rostlin. Další ukazatele suchovzdornosti je např. intenzita růstu po suchém období, mohutnost kořenové soustavy, rychlost růstu kořenů, jejich umístění v půdním profilu, jejich sací síla, regenerace po období sucha apod.



Geny, které reagují na vodní deficit mohou být rozděleny do 3 skupin podle citlivosti ke kyselině abscisové (ABA):

1. Neresponzivní k ABA. Exprese těchto genů je regulována vodním deficitem, ale ne dodáním ABA rostlině zvnějšku.
2. Geny responzivní k ABA. Exprese těchto genů je indukována buď vodním deficitem, nebo aplikací ABA.
3. Geny, které ke své expresi vyžadují ABA.

Geny, které reagují na ABA, se částečně překrývají s geny, které reagují na vodní deficit.  
Vliv kyseliny abscisové na vodní režim

Při vadnutí listů se rychle zvyšuje hladina kyseliny abscisové (ABA). Může se zvýšit 10x až 50x v průběhu 20 až 30 minut. ABA podmiňuje uzavírání průduchů. To začíná již tehdy, jestliže se hladiny ABA zvyšují na dvojnásobek. Ve skutečnosti otevírání a zavírání průduchů je důsledkem interakce mezi ABA, hladinou CO<sub>2</sub> a světlem.

#### Vliv osmoticky aktivních látek jako ochrana před dehydratací

V průběhu dehydratace osmoticky aktivní látky poskytují ochranu buněčným komponentám a strukturám buněk. Jedná se především o určité cukry=polysacharidy (manitol, trehalóza, sorbitol, fruktany), které mají schopnost nahrazovat vázané molekuly vody v makromolekulách a na povrchu membrán. To umožňuje zachování plné funkčnosti membrán. Současně ABA indukuje na úrovni mRNA syntézu skupiny proteinů o poměrně nízké molekulové váze, tzv. dehydrinů, které mají podobnou funkci jako osmotika.

Při působení sucha dochází k expresi různých skupin cílových genů s ochrannou funkcí, jsou to především geny *LEA* (*LATE EMBRYOGENESIS*) a genů pro dehydriny,

### **Odolnost k vysokým teplotám**

Růst vyšších rostlin je možný v rozpětí teplot 0 až 60 °C. při pěstování rostlin se využívají teploty v rozpětí 10 až 40 °C. požadavky rostlin na optimální teplotu se mění podle druhu, odrůdy a průběhu ontogenetického vývoje. Kukuřice, pšenice, sója vyžadují podstatně vyšší teploty než např. brambory, hrách, oves aj.

Vysoké teploty zpomalují růst, protože nepříznivě ovlivňuje určité látky. Pokud se rostlin dodají uměle, nepříznivý účinek vysokých teplot se snižuje. U hrachu např. dodáním vitamínu C a biotinu. Vyšší teploty buď brání syntéze nebo urychlují rozpad některého základního metabolitu, negativně ovlivňují stabilitu proteinů (enzymů), dochází ke změně viskozity vody, což může mít vztah k hydratačním obalům bílkovinných makromolekul.

U všech organismů při zvýšených teplotách dochází k syntéze specifických proteinů tepelného šoku, jejichž úkolem je chránit nukleové kyseliny a geneticky významné orgány před nevratnými změnami struktury.

Při zvýšení teploty nad fyziologickou mez (obvykle 40°C, ale podle druhu v rozmezí 35°C až 40°C) ustává transkripce a translace mRNA, která existovala před zvýšením teploty a začíná transkripce a translace typů mRNA pro proteiny tepelného šoku. Původní mRNA se uvolňují z polyzómů, ale současně vznikají polyzómální komplexy s nově transkribovanou mRNA a dochází k syntéze proteinů tepelného šoku. Těchto proteinů je několik desítek a jejich spektrum se mění se stoupající teplotou. Syntéza proteinů tepelného šoku je indukována velice rychle, asi 20 minut po zvýšení teploty.

Po několik hodinách syntéza proteinů tepelného šoku v obou systémech ustává a obnovuje se normální proteosyntéza, ale proteiny tepelného šoku jsou velmi stabilní a chrání významné buněčné struktury i při dalším setkání s vysokou teplotou.

V průběhu tepelného šoku ustává normální proteosyntéza a začínají se syntetizovat proteiny tepelného šoku. Poměr syntézy běžných typů proteinů a proteinů tepelného šoku může být velmi různý a může se lišit i v různých buňkách jednoho organismu. Po několika hodinách však transkripce mRNA genů tepelného šoku ustává a situace se vrací k normálu. Proteiny tepelného šoku však přetrvávají dlouhou dobu a chrání buňky před nepříznivými vlivy dalších tepelných šoků. Předpokládá se, že některé proteiny tepelného šoku jsou v malé míře syntetizovány konstitutivně a stabilizují nově syntetizované proteiny a proteiny na membránách.

## Zasolení půdy

Nadbytek solí v půdě snižuje příjem vody rostlinami v důsledku snížení rozdílu mezi vodním potenciálem v kořenech a v půdě. Dochází ke zvýšení osmotického potenciálu a rostlina se s ním vyrovnává podobně, jako s dehydratací v důsledku sucha.

Rostliny, které jsou schopny růstu v zasolených půdách se nazývají **halofyty**. Některé druhy jsou mírně odolné vyšším koncentracím solí – ječmen, cukrová řepa, pšenice, oves, sója a čirok. Vojtěška, podzemnice olejná, kukuřice a rýže jsou mírně citlivé k zasolení a citlivé jsou jahodníky, brambor, rajče a cibule.

## Toxické látky

Přítomnost **toxických iontů nebo iontů těžkých kovů** v důsledku kontaminace půdy nebo vody porušuje minerální rovnováhu. Tyto ionty také působí na buněčný metabolismus a kapacitu růstu. Překyselení půdy, ke kterému dochází v důsledku kyselých dešťů nebo přílišného hnojení minerálními hnojivy uvolňuje toxické ionty hliníku.

Znečištění vzduchu působí příjem toxických a oxidativních plynů stomaty. V těžké formě vede k viditelnému poškození rostlin, v lehčí formě k urychlení jejich stárnutí. Hlavními polutanty vzduchu jsou kysličníky dusíku a síry, amoniak a ozon. Kysličníky dusíku a síry jsou přijímány stomatální i kutikulární transpirací. Reagují s buněčnou vodou za vzniku kyseliny siřičité, případně kyseliny dusité a dusičné, což jsou procesy, ke kterým dochází i v atmosféře při vzniku kyselého deště.

Anionty kyseliny siřičité v cytoplasmě jsou přijímány chloroplasty a tam jsou redukovány na sulfity nebo elementární síru nebo oxidovány na sulfáty. Sulfity mohou být vylučovány z buněk jako sirovodík. Redukovaná síra může také být využita k biosyntéze aminokyselin které obsahují síru. Současně probíhající oxidace na sírany však vede k překyselení pletiv.

Nitráty, vznikající konverzí kysličníku dusičného z atmosféry obvykle nemají škodlivý vliv, naopak slouží jako další zdroj dusíku. Škodí však především tím, že v důsledku křížových reakcí snižují schopnost současně reagovat na některé jiné stresové faktory. Rezidua dusičnanů v potravinách jsou vážným hygienickým problémem, protože jsou metabolizována na mutagenní nitrozoaminy.

**Těžké kovy** jako železo, mangan, zinek, měď, molybden a kobalt jsou esenciální mikroprvky. Jiné, jako hliník, kadmium, rtuť nejsou potřebné. Oba typy však mohou mít toxický účinek již od poměrně nízkých koncentrací. Rezistence k nim je založena hlavně na toleranci, je pro jednotlivé prvky specifická a je způsobena řadou různých mechanismů. Jedním z nich je preferenční vazba určitého kationtu na pektiny buněčných stěn buněk kořenů. Daleko významnější jsou nitrobuněčné chelátovací systémy, k nimž patří deriváty některých

aminokyselin, kyselina citronová, kyselina jablečná a fytochelatiny (polypeptidy, které váží těžké kovy). K vazbě iontů kovů dochází především prostřednictvím SH-skupin. Syntéza fytochelatinů je indukována nadbytkem těžkých kovů. K jejich syntéze dochází velmi brzy (za 5 až 10 minut) po působení těžkých kovů. Jejich syntéza je podmíněna enzymem fytochelatin syntázou, která je přímo aktivována ionty těžkých kovů. Když bylo syntetizováno dostatečné množství fytochelatinů, jejich syntéza opět ustává. Fytochelatiny působí v cytoplasmě, ale těžké kovy se mohou hromadit ve vakuolách. Předpokládá se, že fytochelatiny by mohly právě zprostředkovávat transport z cytoplasmy do vakuol. Tolerance ke specifickým kovům však nemůže být vysvětlena existencí fytochelatinů.

Byly získány transgenní rostliny, které obsahují živočišné geny pro proteiny, schopné vysoce specificky vázat těžké kovy (metalothioneiny). Tyto proteiny mohou být lokalizovány v kořenech a bránit tak transportu toxických kovů do listů. Mohou ale také být lokalizovány v listech a zásobních orgánech rostliny. Potom by tyto rostliny mohly být po sklizni likvidovány tak, aby se těžké kovy nemohly dostat zpět do prostředí. Takovéto transgenní rostliny by sloužily pro remediaci (ozdravení) půdy. Využití transgenních rostlin k tomuto účelu však dosud neumožňuje legislativa.

Některé rostliny běžně syntetizují proteiny, bohaté na thiolové skupiny, které jsou rovněž schopné vázat těžké kovy, Tyto proteiny jsou příbuzné metalothioneinům u živočichů.

Krátkodobé působení **vysoké koncentrace ozónu** působí akutní poškození, viditelné jako nekróza. Chronické vystavení nízkým koncentracím ozónu způsobuje fyziologické změny, které vedou k redukci růstu, výnosu kulturních rostlin a k redukci reprodukční kapacity bez dalších symptomů.

Ozón působí na permeabilitu membrán. Působí však zevnitř, nejprve tedy musí být přijat se vzduchem stomatální a kutikulární transpirací a rozpuštěn v cytoplasmě. Pak teprve působí změny permeability membrán a působí toxicky na dalších cílových místech. Množství ozónu, které se nakonec dostane na cílová místa jeho toxického působení, závisí na jeho rozpustnosti, schopnosti absorpce, transportu, metabolismu a detoxifikačních procesech. Dává vznik reaktivním kyslíkovým radikálům, jako hydroxylovým radikálům, superoxidovému aniontu, peroxidu vodíku a dalším radikálům v listech. Ochranné mechanismy rostlin spočívají v působení enzymů superoxid dismutázy (SOD), katalázy (CAT), peroxidázy (POD), monoaskorbátreduktáza, glutathionreduktáza. Jejich geny jsou klonovány a využívají se také jako transgeny, se změněnými regulačními sekvencemi, ke zvýšení rezistence. Dalším důležitým mechanismem resistance k ozónu jsou reakce s antioxidanty jako kyselina askorbová (vitamin C) a tokoferol (vitamin E). Poslední působí zejména tím, že chrání membránový systém (především membrán chloroplastů a mitochondrií) před peroxidací lipidů. Peroxidace spočívá ve vzniku volných radikálů nenasycených mastných kyselin, které se uvolňují z membrán za současného dalšího vývoje peroxidů vodíku. Tokoferol tuto reakci inhibuje. K dalším antioxidantům neenzymatické povahy patří karotenoidy, flavonoidy, polyaminy a z cukrů manitol.

Ozón může tedy snižovat rezistenci rostlin k patogenům i k dalším stresovým faktorům. Rostliny jsou citlivější k ozónu než lidé. Západoevropská norma připouští maximální množství ozónu ve vzduchu (0,12 ppm), což je koncentrace neškodná pro člověka, která ale již může škodit senzitivním rostlinám.

**Přesvětlení** těsně souvisí s nadbytkem ozónu. Nadbytek světla vyvolává při fotosyntetických procesech fotooxidaci, která vede ke vzniku kyslíkových radikálů. Současně dochází k fotoinhibici fotosyntézy a k destrukci chlorofylu. Na obranu proti těmto jevům rostliny syntetizují karoteinoidové a antokyanové pigmenty které absorbují část světla a tak chrání chloroplastové membrány.

V přírodních podmínkách je tento faktor spojen s nadbytkem světla. UV způsobuje vznik thyminových dimerů v DNA a tím vznik mutací a ukončení funkce, či chybnou funkci genů. K tomu by mohlo docházet v exponovaných vrstvách buněk epidermis a listového mesofylu a rostlinné buňky mají mechanismy ochrany vůči UV záření, které vedou k jeho pohlcování a tím zabraňují vlivům na DNA. Vysoká intenzita UV-záření ovlivňuje biosyntézu fenyylpropanoidů a flavonoidů a podmiňuje hromadění flavonoidů, které absorbují UV-záření. Klíčový enzym, který se na syntéze těchto látek podílí, je chalkonsyntáza. Její geny byly klonovány a je poměrně dobře známa struktura a regulace jejích promotorů. Gen se využívá k transgenozí protože chalkonsyntáza je také jeden z klíčových enzymů syntézy antokyanů a transgen se uplatňuje také při manipulaci barvy květů a plodů.

## Nedostatek kyslíku

Nadměrné zvlhčení až zaplavení půdy má za následek nedostatek kyslíku, anaerobiózu a metabolismus kořenového systému se v takovýchto případech musí krátkodobě radikálně přeorientovat. Dochází k zastavení Krebsova cyklu a k urychlení alkoholového kvašení za vzniku pyruvátu.

Je známo asi 20 typů proteinů, které jsou syntetizovány při anaerobióze v pletivech kořenů po zaplavení půdy. Nejlépe prostudovaným proteinem této skupiny je alkoholdehydrogenáza, dále sem patří glukosafosfátisomeráza, pyruvátdekarboxyláza a aldoláza. U kukuřice (a jistě i ostatních rostlinných druhů) anaerobióza vede k charakteristickým změnám regulace proteosyntézy. Ustává normální proteosyntéza a je indukována syntéza proteinů, potřebných k překonání nedostatku kyslíku. Původní proteosyntéza se opět obnovuje po několika hodinách. Proces je regulován na úrovni transkripce.

## 4 Šlechtění na kvalitu

Můžeme rozlišit **vnitřní** a **vnější znaky kvality**. Jak vnější znaky kvality – barva, tvar a velikost plodů, zrna), tak i vnitřní znaky (obsah bílkovin, tuků, škrobu, cukrů) jsou podmíněny polygenně a je důležité najít vhodné metody testování a účinné metody výběru již v prvních hybridních generacích. Kvalitu nelze vždy stanovit jako absolutní veličinu a tento pojem má subjektivní charakter.

Vnější znaky kvality není možné ztotožnit pouze s morfologickými znaky, ale jsou podmíněny i fyziologicky.

**Barva** produktu má často vysokou obchodní, tržní nebo i zpracovatelskou hodnotu. Např. mají-li být vyrobeny co nejsvětlejší produkty z mouky, je výhodnější používat pro mletí světlé zrna obilí. Odrůdy lnu se světlým semenem mají vyšší obsah oleje. Selektce na světlozrnnost se může provádět vizuálně nebo pomocí různých měřicích přístrojů. V mnoha zemích se provádí typizace mouky podle barvy. Šlechtitel při výběru na světlost posuzuje nejen zrna, nýbrž i mouku a pečivo. Nebo u syrových a vařených brambor, zvláště při výrobě čipsů, je ztmavnutí nežádoucí vlastností. Příčinou je obsah redukujících cukrů a je v pozitivní korelaci s tmavnutím dužniny.

Za určitých okolností můžeme podle barvy stanovit přítomnost obsahových látek, jako jsou např. karotenoidy. U kukuřice existuje proporcionální vztah mezi počtem genů barvy *Y* a obsahu beta-karotenu v triploidním endospermu. U genotypů *YYY* je možno zjistit 10x více beta-karotenu ve srovnání s bělozrnnými genotypy *yyy*. Znak zbarvení, který je sám o sobě bezvýznamný, se může použít i pro negativní selekci, jako je tomu např. u *Lupinus albus*. Výrazně růžově zbarvená semena jsou vysoce alkaloidní a hořká. Při optickém srovnání s málo alkaloidními semeny, která jsou bílá až krémově zbarvená, je možno je spolehlivě eliminovat.

Znaky, které postihují **tvar** plodů, semen, kořenů, hlíz a jiných orgánů, se při posuzování kvality vysoce hodnotí. Tvar se dědí polygenně. Více nebo méně je rovněž modifikován faktory prostředí. Tvar hlízy se řídí účelem užití. Tvar hlízy umožňuje činit různé závěry o hloubce oček a vhodnosti pro mechanizovanou sklizeň. Selekcí můžeme zlepšit kuželovitost řepných bulev. Důležité je selektovat i na bulvy s mělkými rýhami.

U obilí je tvar zrna ve vztahu ke kvalitě mletí. Hluboká břišní brázda pšenice snižuje podstatně její kvalitu. Dlouhá štíhlá zrna jsou všech obilnin méně hodnotná, protože u nich dochází snáze k poškození. Průmyslový oves vymel mít podélná buclatá zrna. Kulaté tvary semen mají ve srovnání s plochými nebo hranatými semeny luštěnin větší hodnotu kvality.

**Velikost** orgánů (plodů, zrn, hlát apod.) se může označovat jako velká, středně velká a malá. Avšak rozšíření kategorie malá na velmi malá může znamenat určitý pokrok v kvalitě, jako je tomu např. u krmných luštěnin (druhy *Vicia*, lupiny), u nichž jsou velmi malé formy zrn ekonomičtější pro výsev. Podle optického dojmu se může nejdříve provádět na materiálu jednotlivých rostlin předběžná selekce podle velikosti; přitom je třeba si všimnout i počtu zrn na rostlinu, který je v negativní korelaci s velikostí zrn, resp. s jejich hmotností. Objektivní posouzení velikosti zrn se nejlépe dosáhne stanovením **hmotnosti tisíce zrn**. Tento znak má relativně vysokou hodnotu dědivosti, takže bez jakýchkoliv dalších opatření je možno dosáhnout úspěchů při selekci na velkou nebo malou velikost zrn.

**Konzistence** vyznačuje strukturu látky (moučná, sklovitá, vláknitá), pokud jde o souvislost jejích částic. O konzistenci můžeme mluvit jako o pevnosti rostlinného pletiva. Podle konzistence resp. struktury produktu se různě posuzuje tržní, zpracovatelská nebo i nutriční hodnota. Organoleptické zkoušky (prohlížení, ohmat, chuť) jsou pro selekci velmi důležité jako fyzikální testovací postupy. Struktura slupky u plodů a semen je pro hodnocení kvality velmi směrodatná (u rajčat má být pevná, u semene hrachu jemná). Konzistence endospermu obilovin je ve značné míře podmíněna geneticky, takže je možné úspěšně provádět výběr na určité vlastnosti mouky. Šlechtitelský cíl je vždy určován cílem použití. Pro výrobu tvrdých krup jsou nejvhodnější pšenice tvrdé (*Triticum durum*) s plně sklovitým endospermem. U přadných rostlin připadá pevnosti, resp. trhavosti různých vláken (bavlna, len, konopí) velký význam při hodnocení kvality. Ve šlechtění píce je nutné zachytit jako znaky kvality také fyzikální vlastnosti, které jsou důležité nejen při přijímání čerstvých krmiv, ale i suchých, nebo jinak konzervovaných. Strukturální stavba produktu má totiž určitý vliv a může i při vysoké stravitelnosti ovlivnit příjem zvířat.

Vnitřní kvalitativní znaky jsou v těsné vazbě s kvantitativními znaky a s kvalitativním vytvářením rostlinných obsahových látek (bílkovin, tuků, škrobů, cukrů, vitamínů, alkaloidů a pod.).

**Zlepšování kvality bílkovin** (hrubého proteinu) je v popředí zájmu mnoha šlechtitelských programů. Rozdělením bílkovin do jejích frakcí (u obilovin na albuminy, globuliny, prolamin, gluteliny) je možno zachytit genotypové rozdíly, které jdou cenné pro posuzování kvality. Biologická hodnota bílkovin může být zachycena dokonalou separací na aminokyseliny. Podíl přirozených esenciálních aminokyselin je pro hodnocení směrodatný. Izoleucin, lucin, lyzin, methionin, fenylalanin, treonin, tryptofan a valin jsou nezbytné pro dospělého člověka.

U tuků je přikládán stále větší význam složení a podílu esenciálních **mastných kyselin** (např. linolové). Semena bohatá na tuk je možno oddělit od ostatních. Při asi 5% koncentraci cukru vystupují semena *Brassicaceae* na povrch cukerného roztoku. Pro stanovení obsahu mastných kyselin se osvědčila plynová chromatografie (u erukové kyseliny i papírová chromatografie). Celková produkce **rostlinných olejů** ve světě se odhaduje na 100 mil. tun ročně. Hlavní 4 kulturní plodiny pro produkci olejů jsou sója (Kanada a USA), palma olejová, řepka olejná a

slunečnice. Oleje slouží k přímé konzumaci člověkem a zkrmování zvířaty, jednak pro různé průmyslové využití. Rostlinné oleje jsou triglyceridy mastných kyselin. To znamená, že tři mastné kyseliny jsou esterifikovány třemi hydroxylovými zbytky glycerolu. Ve všech případech je podstatné složení mastných kyselin.

Základní výstavba mastných kyselin se děje v chloroplastech, kde dochází ke skládání jednotek obsahujících dva uhlíky do řetězců obsahujících 16 až 18 uhlíků. V jedlých olejích převažují mastné kyseliny, které mají 18 uhlíků a 1 až 3 dvojně vazby. Olejové kyseliny se charakterizují čísly, z nichž první udává počet uhlíků a druhé počet dvojných vazeb. Někdy se také ještě uvádí, ve kterých polohách se nacházejí dvojně vazby. Tento údaj se píše před obě čísla. Mastné kyseliny **bez** dvojných vazeb jsou **nasycené**, s **dvojnými** vazbami **nenasycené**. Zápis tedy vypadá např. takto: 18:1, což označuje kyselinu olejovou s 18 atomy uhlíku a jednou dvojnou vazbou. Z hlediska výživy jsou optimální právě mastné kyseliny s 18uhlíkovým řetězcem a jednou dvojnou vazbou. Cílem šlechtění je zvýšení obsahu kyseliny olejové.

V poslední době se pozornost věnuje i **vícenenasyceným** (n-3, ω-3) **mastným kyselinám s dlouhým řetězcem**, které jsou důležitou součástí lidského metabolismu. Byla doložena jejich funkce při ochraně před kardiovaskulárními chorobami, snižují srážlivost krve, krevní lipidy a krevní tlak, snižují riziko ekzémů a mentálních poruch, protože jsou součástí lidského mozku. Za posledních 30 let přibývá důkazů, že jejich dietetické dodání zlepšuje chronické choroby. Jejich hlavním zdrojem jsou mořské ryby a rybí tuk. Je snaha tento problém řešit genetickou transformací, aby i rostliny byly schopné produkovat tyto typy mastných kyselin prostřednictvím enzymů **desaturáz**.

Zvyšování obsahu **škrobu** ve spojitosti s výtěžností škrobu je specifickým šlechtitelským cílem ve šlechtění brambor.

Obsah **hrubé vlákniny** patří u obilovin a píceňin ke kvalitativním znakům, které určují jejich hodnotu. U trav je výběr zaměřen na nízký obsah vlákniny. Obsah hrubé vlákniny je v negativní korelaci s obsahem hrubého proteinu. V lidské stravě má významnou funkci **rozpustná a nerozpustná vláknina**.

Jako sekundární rostlinné látky označujeme kromě jiných alkaloidy, vitamíny a glykosidy. Také pro selekci brambor chudých na **solanin** byly vyvinuty sériové metody. Jsou zde však složitější poměry než při stanovení alkaloidů v lupinách, protože např. list a hlízy vykazují rozdílné koncentrace a svůj význam mají i různé alkaloidy – glykoalkaloidy. U různých píceňin a některých olejnin hodnotu kvality negativně ovlivňují tzv. glukosinoláty. Jsou to toxické sirnaté sloučeniny. V semenech jednotlivých rostlin *Brassicaceae* (např. řepka) existuje široká proměnlivost v obsahu této látky.

### **Vitamíny a mikroelementy**

Anémie z nedostatku železa a poruchy z nedostatku vitamínu A jsou dvě hlavní formy podvýživy z nedostatku mikroelementů (2 miliardy postižených lidí na světě). Je to hlavní problém v rozvojových zemích, ale i v rozvinutých zemích, jak u žen v produktivním věku i u dětí. Největší riziko znamená rychlý růst a tím zvýšené nároky u dětí, dospívajících a těhotných. Silná anémie u těhotných je důvodem až 40% z půl milionu úmrtí každý rok spojených s porodem. Během dětského věku nedostatek vhodného zdroje železa pro vývoj mozku způsobuje nevratné změny duševního (psychického) a psychomotorického vývoje, podstatně omezuje intelektuální potenciál dospělých. Byly pozorovány duševní abnormality včetně apatie, vznětlivosti, poruchy pozornosti a snížené schopnosti učení jako důsledek anemie v dětství.

Nedostatek vitamínu A se vyskytuje v 26 zemích včetně 15 milionu dětí v rozvojových zemích. Pro první stadia nedostatku vitamínu A jsou charakteristické zhoršená adaptace na

tmu, která se postupně zhoršuje až v noční slepotu a po úplnou slepotu. Odhaduje se, že v jihovýchodní Asii asi čtvrt milionu dětí ročně oslepne v důsledku nedostatku vitamínu A. Další důsledky nedostatku vitamínu A jsou snížená schopnost hojení ran a zvýšené riziko infekce, jako je průjem, respirační onemocnění a dětské nemoci jako jsou spalničky.

### **Zdroje železa a vitamínu A pro lidskou výživu**

Zdroji železa v potravě je železo ve formě hemové a nehemové. Hemové železo je obsaženo v masu a rybách a je vysoce biologicky dostupné, slabě ovlivněné dalšími faktory přítomnými v potravě. Nehemové železo obsahují obiloviny, luštěniny, ovoce a zelenina a je hlavním zdrojem dostupného železa pro lidi v rozvojových zemích. Schopnost vstřebávání nehemového železa je různá, závisí na druhu potraviny a přítomnosti dalších faktorů, které způsobují jeho snížené vstřebávání. Známým inhibitorem vstřebávání železa je kyselina fytová, polyfenolické látky, vápník a určité peptidy z částečně natrávených proteinů. Kyselina fytová a fenolické látky jsou nejvýznamnějšími inhibitory vstřebávání železa z některých potravin a vstřebávání může být extrémně nízké, pokud inhibitory nejsou účinně překonány. Kyselina fytová je široce rozšířena v zrnech obilovin a semenech luskovin, kde je hlavní formou zásobního fosforu nezbytného pro klíčení semen. Obsah fenolických látek je zvláště vysoký v nápojích jako je čaj, káva, bylinné čaje, kakao a červené víno.

**Kyselina askorbová** je nejlépe popsáný a nejlepší aktivátor vstřebávání železa. Obvykle se přidává do komerčně připravovaných potravin pro děti společně se železem, aby vstřebávání bylo optimální. Při dostatečně vysoké koncentraci může kyselina askorbová překonat inhibiční vliv kyseliny fytové v obilovinách a sójových potravinách. Částečně může překonat vliv polyfenolů obsažených v čaji.

U člověka některé **karotenoidy**, zvláště  $\beta$ -karotenoidy, slouží jako prekurzor vitamínu A. karotenoidy jsou červené, žluté nebo oranžové pigmenty. Oranžové, žluté a červené ovoce a zelenina jsou bohatým zdrojem karotenoidů. Tyto pigmenty jsou také v částech rostlin bohatých na chlorofyl, kde je oranžová barva maskovaná, tmavě zelená listová zelenina je také bohatá na karotenoidy. Vitamin A je rozpustný v tucích, a proto pro dostatečné vstřebání vitamínu jsou nezbytné tuky. Jejich nezbytné množství je velmi nízké. Protože tuky se v žaludku vstřebávají pomalu, není nezbytné je konzumovat společně se zdrojem karotenoidů. Vitamin A je teplotně stabilní, během vaření ho zůstává 70 až 90% i při širokém rozmezí teplot. Biologická dostupnost  $\beta$ -karotenu a dalších karotenoidů se zvyšuje při zpracování potravin jako je mechanická homogenizace a tepelné ošetření kvůli narušení membrán, kde jsou karotenoidy lokalizovány.

Zvýšení obsahu těchto látek šlechtěním prostřednictvím vhodných zdrojů a přenosem genů prostřednictvím genetické transformace jsou vhodné a využívané strategie.

Za poslední dekádu byly vytvořeny materiály se zlepšeným obsahem minerálních látek klasickým šlechtěním u rýže, pšenice, kukuřice, bobu a kasavy. Důležitým zdrojem vhodných genů jsou krajové odrůdy a plané příbuzné druhy. Ty je možné využít ve šlechtitelských programech. Např. IRRI (International Rice Research Institute) vyhodnotil genetickou rozmanitost obsahu železa v zrnech rýže. Bylo vyhodnoceno 939 genotypů rýže testovaných v polních podmínkách. Rozsah v obsahu železa byl mezi 7,5 až 24,4 mg  $\cdot$  kg<sup>-1</sup>. Tento téměř čtyřnásobný rozdíl v koncentraci železa naznačil existenci genetické diverzity v obsahu Fe v zrnech a tedy vhodného potenciálu pro šlechtění.

Současně byly u několika hlavních plodin izolovány neletální mutace s nízkým obsahem kyseliny fytové v zrnech. Tyto linie označené *lpa* (low phytic acid) mají podobný obsah fosfátů jako kontrolní linie ale významně redukovanou úroveň fosfátů vázajících kyselinu fytovou. Avšak alely *lpa*, které determinují redukovaný obsah fytátu u kukuřice až o 90%, také snižují klíčivost až o 30% ve srovnání s kontrolou. Podobně redukovaný obsah kyseliny fytové o 75% u sóji je spojen se sníženou klíčivostí. Proto takové materiály jsou nepříjemné pro zemědělství hlavně v suchých oblastech. Přes problémy s klíčivostí jsou mutanti vhodní

z hlediska nutričního. Vstřebávání železa u *lpa* kukuřice je o 50% vyšší ve srovnání s kontrolou.

Obdobné snahy o obohacení kořenových částí rostlin o  $\beta$ -karoten jsou u kasavy. Množství karotenu v kořenech bylo v rozmezí 0,1 až 2,4 mg/100 g. Tyto materiály se využívají ve šlechtitelských programech.

### **Bezsemenné plody**

Klasický přístup šlechtění rostlin s bezsemennými plody zahrnuje tvorbu triploidů. Aplikuje se u melounu cukrového, vinné révy, pomerančů, jahod. Postup je založen na indukcii tetraploidů pomocí kolchicinu a křížení diploidů s tetraploidy za vzniku sterilních triploidů.

### **Zpožděné dozrávání**

Zpožděné dozrávání je nezbytné u rajčat nebo banánů. Při zrání dochází k řadě biochemických změn vedoucích k měknutí plodů a změně barvy plodů. Chlorofyl, škrob a buněčné stěny se degradují. Akumuluje se lykopen (červené barvivo rajčat), cukry, různé organické kyseliny.

Ve zrání rajčat hraje klíčovou roli etylén. Jeho syntéza se skládá ze dvou kroků. S-adenosyl methionin (SAM) se metabolizuje na aminocyklopropan-1 karboxylovou kyselinu (ACC), která se mění na etylén. Znalost biosyntetické dráhy etylénu umožnila vědcům řídit proces dozrávání. Byl klonován gen pro SAM hydrolázu z jednoho bakteriálního viru. Ke kódující sekvenci byl připojen promotor, který aktivuje expresi genu ve zralých zelených plodech.

### **Nízký obsah kyseliny fytové**

Fosfor patří k důležitým prvkům a jeho nedostatek v potravě má pro člověka i zvířata vážné následky. V rostlinách se fosfor nachází především ve formě kyseliny fytové. Tu bez potíží tráví jen přežvýkavci, kterým v tom pomáhají mikroorganismy v bacheru.

Zemědělcům se podařilo vyšlechtit odrůdy kukuřice, ječmene, rýže, pšenice a sóji s obsahem kyseliny fytové sníženým o 50 až 90%. V rostlinách se nacházelo o to víc snáze stravitelných sloučenin fosforu. Při pokusech se ukázalo, že zvířata krmená těmito rostlinami získají z potravy 75% veškerého fosforu. Z obvyklých rostlin s vysokou hladinou kyseliny fytové vytěžila jen 25%. S tímto úspěchem je však spojen jeden zásadní problém. Obsah kyseliny fytové klesl v celé rostlině a to mělo za následek sníženou klíčivost semen, zvýšenou citlivost rostlin ke stresu a nižší výnosy.

Výzkum proto pokračoval dál. Tým společnosti Pioneer Hi-Bred International našel způsob, jak vyblokovat jeden z mnoha genů, s jejichž pomocí rostliny vytvářejí kyselinu fytovou. Vědci dokázali zablokovat gen výhradně v semenech. V zrnu kukuřice tak snížili obsah kyseliny fytové o 75%. Ve zbývajících částech se kyselina fytová tvořila dál a plnila tam všechny své funkce. Klíčivost semen, životaschopnost rostlin i výnosy zůstaly na potřebné výši. Obdobné výsledky získali vědci z Pioneer Hi-Breed International u geneticky modifikované sóji, která měla obsah kyseliny fytové v semenech snížen až o 90%. Výsledky práce amerických expertů zveřejnil prestižní vědecký časopis Nature Biotechnology. Metodami genového inženýrství byla získána sója a kukuřice, jejichž semena mají zvýšený obsah snadno stravitelného fosforu.

Přínos rostlin s nízkým obsahem kyseliny fytové v semenech se zdaleka neomezuje jen na lepší stravitelnost fosforu. Kyselina fytová na sebe váže také ionty železa, manganu, hořčíku, zinku a vápníku. Také tyto prvky jsou ve vazbě na kyselinu fytovou jen těžko stravitelné. Lidé i zvířata mohou trpět jejich nedostatkem, i když se absolutní obsah iontů v potravě zdá dostatečný. V rozvojových zemích, kde ve výživě obyvatelstva převažují pokrmy ze semen kulturních plodin (například rýže), je častým problémem nedostatek železa a zinku vyvolaný vazbou obou prvků na kyselinu fytovou. Při silném nedostatku železa hrozí chudokrevnost



především těhotným ženám a novorozencům. Nedostatek zinku vyvolává kromě jiného závažné poruchy růstu. Rostliny se sníženým obsahem kyseliny fytové v semenech by proto znamenaly pro obyvatele třetího světa obrovský přínos.

Zkrátka nepřijdou ani obyvatelé ekonomicky rozvinutých zemí. Prasata, ryby a drůbež krmené rostlinnou potravou vylučují velké množství nestráveného fosforu s výkaly. Tento prvek často končí v povrchových vodách, kde jej jako jednu ze základních živin využívají četné mikroorganismy. Nadbytek fosforu umožňuje přemnožení řas, sinic a bakterií, a tím ohrožuje životní prostředí. Zvířata krmená semeny rostlin se sníženým obsahem kyseliny fytové měla ve výkalech pětkrát méně fosforu než zvířata krmená tradičními plodinami. Krmiva potraviny z geneticky modifikované kukuřice či sóji jsou díky tomu ekologicky šetrnější než krmiva a potraviny vyrobené z tradičních plodin.

*Ricinus communis* L. – skočec obecný (prýšcovité)

Obsahuje ricin v semenech – toxické účinky, protoplazmatický jed

