



# Genetické modifikace plodin

- Nárůst lidské populace v podmínkách měnícího se klimatu bude vyžadovat mnohem vyšší produkci na menší ploše. Toho nebude možné dosáhnout využitím klasických šlechtitelských postupů.
- Jedním z možných řešení jsou nové metody šlechtění, které zahrnují i genetické modifikace.
- Genetické modifikace umožňují upravovat DNA rostlin tak, aby byly odolnější proti chorobám a škůdcům, měly lepší nutriční vlastnosti a aby negativní dopady zemědělství na životní prostředí byly co nejnižší.
- Přelomový objev tzv. molekulárních nůžek CRISPR/Cas9 způsobil revoluci v pozměňování genetické informace pro účely šlechtění rostlin. Tato metoda umožňuje provádět změny DNA přesně, rychle a levně.
- Evropské šlechtitelství nemůže být dlouhodobě konkurenceschopné bez metod editování genomu. Současná legislativa EU (směrnice 2001/18/ES) však brzdí zavádění inovací do praxe.
- Odmitání geneticky modifikovaných plodin povede k dlouhodobému zaostávání při budování tohoto klíčového sektoru bioekonomiky, který především v USA zažívá rychlý vývoj i formou množících se start-upů.
- Česká republika, potažmo EU, se tím vystavuje reálnému riziku vyšších cen zemědělských produktů, ztráty konkurenceschopnosti, pracovních pozic a patentů.

Rostliny a potraviny rostlinného původu jsou základem výživy a uplatňují se v celé řadě aspektů našeho života. Kulturní rostliny jsou produktem šlechtění, které bylo založeno na dlouhodobém výběru jedinců s nevhodnější kombinací znaků. V průběhu 20. století vedlo šlechtění spolu s používáním průmyslových hnojiv, pesticidů a agrotechniky k tzv. zelené revoluci, která umožnila razantní navýšení výnosů a nasycení velké části populace rostoucí světové populace. Současné tempo růstu výnosů však přestává stačit a intenzivní způsob obhospodařování vede ke snížení kvality půd a biodiverzity na rozsáhlých plochách. Tento problém dále umocňuje změna klimatu, která se v ČR projevuje oteplením a periodami sucha. Tyto výzvy bude možné zvládnout pouze kombinací opatření, zahrnujících úpravu pěstebních postupů a použití inovativních šlechtitelských metod.

Tento AVex objasňuje metody šlechtění kulturních plodin, představuje nově vyvinuté metody úprav dědičné informace a nastiňuje důsledky jejich odmítání pro ekonomiku ČR a EU.

## HISTORIE ŠLECHTĚNÍ ROSTLIN

První plodiny byly domestikovány přibližně před deseti tisíci lety. Postupný rozvoj primitivního zemědělství vedl k odklonu od lovecko-sběračského způsobu života ke společenským změnám včetně vzniku městských kultur a raných civilizací. Již první zemědělci vybírali rostliny s vhodnými znaky, čímž nevědomky prováděli selekci jedinců nesoucích specifické změny v dědičné informaci.

První pokusy o záměrné šlechtění plodin však byly umožněny až v 18. století zásluhou objevů spojených s oplozením rostlin. Šlechtitelství začalo plně profitovat z vědeckých poznatků teprve po pochopení genetických zákonů J. G. Mendelem (1865) a jeho následovníky. Využití objevů v oblasti genetiky a molekulární biologie v první polovině 20. století se stalo jedním ze základů tzv. „zelené revoluce“, která odvrátila hrozbu světového hladomoru, a to díky vyšlechtění vysoce výnosných odrůd plodin.

Ve druhé polovině 20. století pak došlo k řadě klíčových objevů v oblasti pochopení struktury DNA jako molekuly života, jejího

čtení a úprav. Následně byly popsány metody přenosu cizorodé DNA do rostlinného genomu, které spolu s výzkumem tkáňových kultur položily základ pro tvorbu a účinnou selekci transgenických plodin.

Po roce 2000 začalo moderní šlechtění masově využívat také revoluční metody čtení dědičné informace, které celý proces výrazně urychlily, zefektivnily a zlevnily. I přes vyspělé technologické postupy je šlechtění nových odrůd časově velmi náročný proces s nejistým výsledkem.

## PRVNÍ GENETICKY MODIFIKOVANÉ PLODINY REGULACÍM EU NEPODLÉHAJÍ

V průběhu 20. století došlo k prudkému nárůstu obyvatel z 1,6 miliardy v roce 1900 až na současných 7,7 miliardy. K nasycení tak obrovského množství lidí bylo nutno dosáhnout razantního navýšení výnosů zemědělských plodin, ke kterému skutečně došlo díky rozšíření mechanizace, použití minerálních hnojiv a pesticidů a v neposlední řadě také vyšlechtění odrůd schopných přinášet vyšší výnosy.

Jako novinka bylo tehdy zavedeno mutační šlechtění, které vedlo k ustavení prvních geneticky modifikovaných (GM) plodin. GM odrůdy byly získány působením na části rostlin (obvykle semena) chemickými látkami nebo radiačním zářením způsobujícím stovky až tisíce náhodných mutací v každé rostlině.

Rostliny vzniklé mutagenézí jsou tedy považovány za geneticky modifikované organismy (GMO), avšak v principu nepodléhají

regulacím týkajícím se GMO ve smyslu směrnice Evropského parlamentu a Rady 2001/18/ES z března 2001 „o záměrném uvolňování geneticky modifikovaných organismů do životního prostředí“. Mutagenézí bylo celosvětově vyšlechtěno více než 3000 kultivarů a příklady geneticky modifikovaných plodin vytvořených na území Československa a později ČR zahrnují odrůdy ječmene, kukuřice, fazolu, sóji nebo vojtěšky, které se volně používají v zemědělství.



## KLÍČOVÉ POJMY

- **DNA** – deoxyribonukleová kyselina je nositelka dědičné informace, „písmena“ genetické abecedy jsou A, C, G a T
- **RNA** – ribonukleová kyselina je kopie úseku DNA, která slouží jako návod pro tvorbu proteinu nebo má strukturální či regulační funkci
- **protein** (bílkovina) – skládá se z aminokyselin, v organismu plní různé funkce (stavební, řídicí, katalytickou, strukturální aj.)
- **gen** – funkční jednotka dědičné informace, úsek DNA odpovídající jednomu proteinu
- **genom** – celá dědičná informace organismu
- **mutace** – změna dědičné informace: záměna, vložení nebo odebrání jednoho nebo více písmen, mutace jsou součástí přírodních procesů
- **mutagenéze** – umělé zavádění mutací: v právní terminologii je obvykle chápána v užším smyslu, tj. bez vkládání cizorodé DNA (např. chemickými látkami nebo radiací), v širším odborném pojetí mutagenéze zahrnuje i přenos cizorodé DNA (transgenozi)
- **transgenoze** – přenos dědičné informace mezi nepříbuznými druhy
- **geneticky modifikovaný organismus (GMO)** – organismus získaný mutagenézí nebo transgenozi
- **CRISPR/Cas9** (z angl. *clustered regularly interspaced short palindromic repeats/CRISPR-associated protein 9*) – bakteriální imunitní systém, který stříhá DNA buněčného parazita, např. viru, a brání jeho množení, modifikovaná verze se používá jako „molekulární nůžky“ jak ve výzkumu, tak v biotechnologiích

## TRANSGENNÍ ROSTLINY V ZEMĚDĚLSTVÍ JSOU NYNÍ KONTROVERZNÍ TÉMA

Jako geneticky modifikované (GMO) se v legislativě označují organismy vzniklé transgenozí, tj. přenosem dědičné informace mezi nepříbuznými druhy. GMO podléhají regulacím ve smyslu směrnice Evropského parlamentu a Rady 2001/18/ES ze dne 12. 3. 2001 „o záměrném uvolňování geneticky modifikovaných organismů do životního prostředí“, která se řídí principem předběžné opatrnosti.

Transgenoze u rostlin se přitom v laboratorním výzkumu běžně používá. Cizorodá DNA je vpravována do rostlinných buněk především pomocí infekčního systému půdní bakterie *Agrobacterium tumefaciens*, která je schopna část své genetické informace přenést do rostliny. Tato část může být v laboratoři upravena tak, aby mohl být přenesen jakýkoli vybraný úsek DNA.

Přenos dědičné informace mezi druhy je totiž přirozeně se vyskytující proces, který je součástí komplexních evolučních dějů. Člověk v podstatě jen od přírody převzal technologii, jak tento přenos provádět, a šlechtění mnoha plodin doprovázelo slučování genetické informace dvou nebo i více druhů (např. pšenice setá, řepka olejka).

Koncem 20. století proběhla vlna objevů, která umožnila modifikace DNA sekvencí a jejich vkládání do cílového organismu (transgenoze). Prvním celosvětovým úspěchem použití transgenních organismů byla výroba lidského inzulinu v bakteriích *Escherichia coli* (1982).

Podobným způsobem je dnes připravováno několik set terapeutických proteinů, jako jsou různé lidské hormony či vakcíny. Transgenní organismy se ve stále větší míře používají v biotechnologických a potravinářských postupech, např. při výrobě indiga či vína. V případě produktů s výrazným zdravotním či ekonomickým dopadem vytvářených mikroorganismy je tedy GMO široce přijímanou a využívanou technologií.

### PŘÍKLADY TRANSGENNÍCH ROSTLIN A JEJICH VYUŽITÍ:

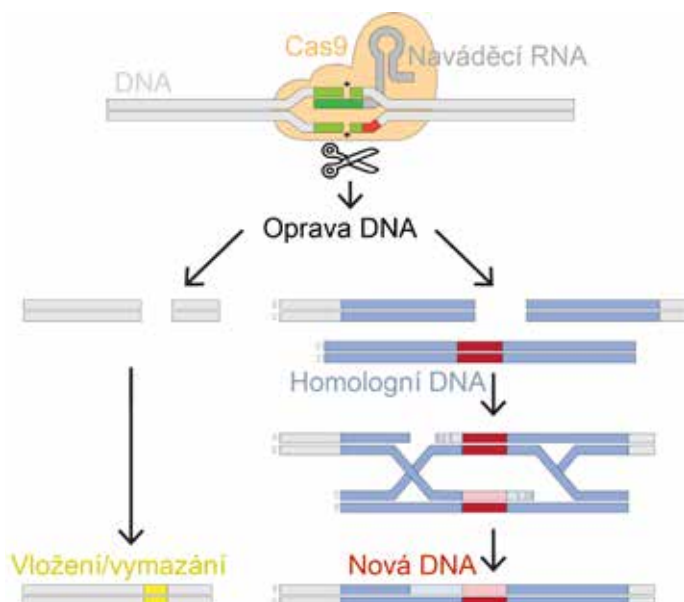
| Rostlina                      | Vlastnosti  |
|-------------------------------|---|
| <b>Bt plodiny</b>             | Vložen gen bakterie <i>Bacillus thuringiensis</i> (Bt), který produkuje toxin účinný proti některým hmyzím škůdcům, u kukuřice působí jako ochrana proti larvám můry zavíječe kukuřičného, dále např. u bavlny a lilku. |
| <b>Roundup Ready® plodiny</b> | Obvykle mutace, které způsobují rezistenci vůči glyfosátu (účinná látka přípravku Roundup), například u sóji či řepky olejky. Cílem je chemické odplevelování.  |
| <b>Fialové karafiáty</b>      | Vloženy geny z muškátů a violek, dávají květům různé odstíny fialové barvy a tím atraktivnější vzhled.  |
| <b>Zlatá rýže</b>             | Využívá se kvůli produkci provitaminu A (karotenu), snižuje negativní důsledky především u dětské populace v jihovýchodní Asii, kde hypovitaminóza A způsobuje šeroslepost, záněty nebo imunitní problémy.              |

## NOVÉ TECHNIKY MUTAGENEZE: MOLEKULÁRNÍ NŮŽKY CRISPR/CAS9

Od 80. let 20. století probíhal vývoj několika systémů, které by umožnily zacílit mutaci na specifický úsek DNA a ten přesně pozměnit (editovat). Jako nejúčinnější se ukázal být tzv. CRISPR/Cas9, systém, který se po svém zavedení v roce 2012 prakticky okamžitě rozšířil do laboratorní praxe.

Tímto přístupem lze vnášet na konkrétní místa v genomu cílené změny. Mutace indukované metodou CRISPR/Cas9 se navíc nedají rozpoznat od těch způsobených klasickou mutagenézí.

Kromě bodových mutací je tento přístup vhodný také k vyvolání přestaveb chromozomů, což umožňuje vytvářet nové kombinace znaků a tím vylepšovat vlastnosti šlechtěných plodin. V neposlední řadě je proces editace genomu mnohem rentabilnější a trvá zlomek času oproti klasické mutagenézi. Mezi znaky pozitivně ovlivněné touto metodou patří např. bezlepková pšenice, sója produkující zdravější olej či potlačení klíčivosti semen v klasech během deštivého počasí u pšenice.



### JAK FUNGUJÍ MOLEKULÁRNÍ NŮŽKY CRISPR/CAS9

Nejprve je vytvořena T-DNA, tzv. transferová DNA, která produkuje Cas9 protein a naváděcí RNA. Tato T-DNA je vložena do genomu cílové rostliny. Cas9 protein pak vytvoří komplex s naváděcí RNA, která zacílí na specifické místo v genomu (zeleně). Cas9-RNA komplex se na toto místo naváže a přestříhne DNA. To vyvolá opravny mechanismus DNA, který se vyznačuje určitou chybovostí, takže často dojde k mutaci a vyřazení funkce genu (žlutě).

Změna cílové sekvence může být vyvolána také dodáním DNA molekuly, která nese modifikovaný úsek (červeně), ohraničený identickou sekvencí (homologní DNA). Tato molekula se do oblasti stříhu vloží procesem tzv. homologní rekombinace a dojde ke vzniku DNA s novými vlastnostmi.

Zdroj obrázku: Wikipedia (upraveno).



## PROČ JSOU TRANSGENNÍ PLODINY VNÍMÁNY PROBLEMATICKY

Problematika použití GM rostlin je široce medializována a toto téma budí u veřejnosti emoce. Existuje řada organizací s cílem zabránit používání GM rostlin pro účely zemědělství. Tato tematika je nepřesně označována jako „anti-GMO“. Fakticky se protestuje především proti transgenním plodinám a několika málo rostlinám vyšlechtěným mutagenézí. Vzhledem k velkému množství plodin získaných klasickou mutagenézí by zákaz všech GM plodin vedl k celosvětovému kolapsu zásobování s potravinami.

Z odborného hlediska je riziko GM zveličováno a část existujících problémů je GM plodinám přisuzována neprávem. Jako u každé nové technologie je však dobré se nad možnými riziky GMO zamyslet a následně volit účinná opatření. Hlavní obavy lze rozdělit do tří okruhů:

### ■ Představují GM plodiny riziko pro životní prostředí a genofond populací volně žijících druhů?

Existují obavy, že křížení GM plodin s divokými druhy povede k šíření mutací do divokých populací a tím např. ke vzniku rezistence vůči herbicidům. Toto riziko se liší druhově a regionálně. Prakticky nehrozí u kukuřice, ale je vysoké u řepky olejky.

Problémem, který je někdy s GM plodinami nesprávně spojován, je nadužívání herbicidů na bázi glyfosátu/glufosinátu v zemědělství a při údržbě sídel. To má negativní zdravotní důsledky pro člověka a může přispívat ke vzniku rezistence u plevelů.

Obecným trendem při produkci GM plodin je omezování agrochemie. Příkladem je tvorba rostlin nesoucích Bt gen, který produkuje toxin účinný vůči specifickým hmyzím škůdcům,

ale je neškodný pro obratlovce. Bt plodiny cílí na nejvážnější škůdce a tím eliminují riziko fatálních ztrát. Vzhledem k tomu, že Bt toxin neúčinkuje proti všem hmyzím škůdcům, i Bt rostliny vyžadují postřiky určitými insekticidy.

### ■ Jsou obavy spojené s konzumací GM plodin odůvodněné?

Obavy spojené se zdravím lidí jsou ve vztahu ke GMO časté. I přes vysokou sledovanost GM potravin a krmiv však není za více než dvacet let znám jediný věrohodný příklad, kdy by GM plodina způsobila konzumentovi vážné zdravotní problémy, či dokonce úmrtí.

### ■ Nebudou mít z GM plodin prospěch pouze velké firmy?

Část odpůrců argumentuje, že na osivu GM plodin a agrochemii pro jejich pěstování profitují především nadnárodní koncerny. V Evropě a řadě dalších oblastí světa je toto pravděpodobně skutečností, která může být způsobena přílišnou regulací trhu. V USA naopak v tomto poli vyrůstá řada „startupových“ firem, které jsou schopny gigantům konkurovat. Odpůrci bohužel odmítají také transgenní plodiny, které byly vyvinuty v akademickém prostředí a jejichž šíření není motivováno komerčními zájmy (např. zlatá rýže).

## GMO JAKO SOUČÁST ŘEŠENÍ SOUČASNÝCH A BUDOUCÍCH VÝZEV ZEMĚDĚLSTVÍ

I přes nesporný úspěch zelené revoluce se ukazuje, že tento přístup vede k velmi intenzivnímu využívání krajiny s výrazně negativním vlivem na kvalitu půdy, vod a biodiverzitu. Transgenozé a editování genomu může být potenciálně použito pro úpravu vlastností kulturních plodin tak, aby negativní dopady intenzivního pěstování byly minimalizovány (např. v důsledku snížení množství používaných pesticidů, které budou nahrazeny genetickou rezistencí).

V současné době roste informovanost spotřebitelů a jejich zájem o to, jak mohou změnou stravy snižovat negativní dopad na životní prostředí. Částečně nahrazení živočišných produktů rostlinnou stravou přímo ovlivní snížení emisí skleníkových plynů. Příkladem může být využití sóji při přípravě umělého masa, kdy je jeden protein potřebný při výrobě rostlinné náhražky masa (leghemoglobin) syntetizován transgenními kvasinkami v biofermentorech. Je tím dosaženo jak snížení emise skleníkových plynů, tak ušetřena půda před intenzivním zemědělstvím.

Editování genomu lze využít i pro zlepšení nutriční hodnoty rostlin. Současné plodiny jsou také často adaptovány na podnebí a půdní podmínky mírného pásu. Úpravou genomu lze tyto plodiny přizpůsobit k pěstování v subtropických či aridních oblastech a zajistit tak dostupnost kvalitních potravin pro obyvatelstvo rozvojových zemí.

Zároveň lze tyto postupy uplatnit při domestikaci rostlin, které jsou zatím pěstovány jen okrajově, protože jejich vlastnosti nevyhovují agrotechnické praxi. Dostupnost takto vzniklých plodin pomůže obohatit jídelníček o prospěšné látky, jako jsou např. vitaminy, antioxidanty, minerály, vláknina apod.

Z dlouhodobého hlediska je v podstatě nevyhnutelné reagovat na globální změny a s tím související problémy se suchem, lokálním nedostatkem potravin a ničením půdy kvůli extenzivnímu hospodaření. I z těchto důvodů bude pravděpodobně nutné změnit pohled na současné zemědělství a s využitím aplikace poznatků genetiky – již je díky J. G. Mendelovi Česko kolébkou – a genetického inženýrství se připravit na novou zelenou revoluci.

## DŮSLEDKY ODMÍTÁNÍ NOVÝCH ŠLECHTITELSKÝCH METOD PRO EKONOMIKU ČR A EU

Evropské šlechtitelství nemůže být dlouhodobě konkurenceschopné bez metod editování genomu. Současné legislativní nastavení odvozené ze směrnice Evropského parlamentu a rady 2001/18/ES a judikatury Soudního dvora Evropské unie, spolu s odmítavou pozicí řady politiků a následně občanů, však vede k tomu, že se tyto inovace velmi obtížně dostávají do praxe.

Výsledkem je prostředí, kde si pouze největší firmy mohou dovolit investice do vývoje GM plodin. I ty však přesouvají tento segment své činnosti do zemí s otevřenějším přístupem (především USA).

V důsledku toho EU rychle ztrácí pozici v tomto novém a dynamicky se rozvíjejícím sektoru bioekonomiky.

Předpokládáme, že toto bude mít negativní důsledky na tvorbu pracovních pozic, duševní vlastnictví a patenty v držení evropských firem a v konečném důsledku i cenu zemědělských produktů. Z tohoto důvodu se řada evropských prestižních vědeckých institucí zapojila do iniciativy, jejímž cílem je vyvolat revizi rozhodnutí Soudního dvora Evropské unie ohledně posuzování plodin vytvořených novými technikami mutagenéze (např. CRISPR/Cas9), tak aby bylo možné jejich snadnější uvádění do praxe.

Přehled použité literatury: [www.avcr.cz/avex](http://www.avcr.cz/avex).

AVex 4/2019: GENETICKÉ MODIFIKACE PLODIN, ZÁŘÍ 2019

AVex je nezávislé a nestranné expertní stanovisko, které Akademie věd České republiky připravuje pro legislativní potřeby zákonodárců Poslanecké sněmovny a Senátu Parlamentu České republiky.

Připravila Akademie věd ČR, odbornými garanty jsou Ústav experimentální botaniky AV ČR a Biofyzikální ústav AV ČR.

Odpovědná redaktorka: Markéta Růžičková, foto: AV ČR, Shutterstock, e-mail: [avex@kav.cas.cz](mailto:avex@kav.cas.cz), [www.avcr.cz/avex](http://www.avcr.cz/avex).

Kontaktní osoby: Mgr. Aleš Pečinka, Ph.D., e-mail: [pecinka@ueb.cas.cz](mailto:pecinka@ueb.cas.cz), RNDr. Roman Hobza, Ph.D., e-mail: [hobza@ibp.cz](mailto:hobza@ibp.cz), a Ing. Vojtěch Hudzieczek, Ph.D., e-mail: [hudzieczek@ibp.cz](mailto:hudzieczek@ibp.cz)