

Kulturně-technické vodní stavitelství (Kulturtechnischer Wasserbau), přednosta Moravské zemědělsko-technické kanceláře v Brně a později profesor Vysoké školy zemědělské ve Vídni Adolf Friedrich, a Josef Kopecký, zakladatel vědeckého československého půdoznalství a posléze ředitel Státního výzkumného ústavu agropedologického a bioklimatologického v Praze.

Ze zcela praktických hledisek je významné, že právě metodami kulturně-technického inženýrství lze v naší krajině (bezobsažně deteriorizované – se zhoršenou kvalitou prostředí využíváním přírodních zdrojů – a simplifikované hospodářsko-technickými úpravami pozemků a projekty souhrnných pozemkových úprav, které provázely jednotlivé etapy kolektivizace zemědělství) uskutečňovat návrh optimálního nejučinnějšího terénního rozmístění všech uvedených hydrologicky účinných objektů, opatření a úprav (tedy hydrologických armatur krajiny) a rovněž je s požadovanou bezpečností dimenzovat.

Hlavní zásadou navrhování těchto strukturálních krajinných opatření přitom musí být jejich realizace ve směru od rozvodnic až do údolních poloh, od pozemků v horních partiích povodí až po dolní profily toků a jejich ústí. V tomto schématu by výstavba retenčních nádrží měla představovat až poslední prvek protipovodňových opatření. Přehradby by neměly být navrhovány jako jediná nebo první možnost, ale v případě potřeby prvek závěrečný – jako výsledek hydrologického dopočtu. Obrazně řečeno, jde tedy o to chovat se podle latinského rčení *Bos cornu capitur* (Býk se chytá za rohy). Znamená to, že musíme řešit problémy od míst, kde vznikají.

Důležité rovněž je, že z pozic krajinného inženýrství lze právě v podmínkách



středoevropské mírně teplé a mírně vlhké podnební oblasti takto zmírnit, nebo i zcela eliminovat řadu nepříznivých důsledků potenciálních globálních klimatických změn. Tyto koncepce se ostatně nesou v duchu někdejších myšlenek silně vlastenecky smýšlejícího biologa a pozoruhodného filozofa přírodních věd Vladimíra Úlehly (1888–1947). Svěho času jsem byl dosti překvapen, když jsem se seznamoval s teorií vodopropustných půdních kontejnerů vyslovenou americkým půdním fyzikem R. J. Hanksem, že s obdobnými kognitivními zásadami „vodních jímek v půdě a vodních vodivých drah“ vystoupil zhruba o 40 let dříve právě V. Úlehla.

Použitá literatura uvedena na webu Živy.

**6** Zvláštním případem historických zemědělských úprav svažitých pozemků jsou selské (agrární) terasy. Skládají se z kaskádovitě uspořádaných terasových svahů a z rovinatých (nebo mírně ukloněných) terasových plošin. V naprosté většině případů vznikaly dlouhodobým jednosměrným naoráváním exponovaných svažitých pozemků (zejména v blízkosti vsí, nebo i na vzdálenějších plochách, které byly určeny pro pěstování speciálních kultur) oradly – používaly se např. háky, percáky, nákolesníky, rádlá či plužice. Snímky Z. Vašků, pokud není uvedeno jinak

Tomáš Středa, Anna Heřmanská

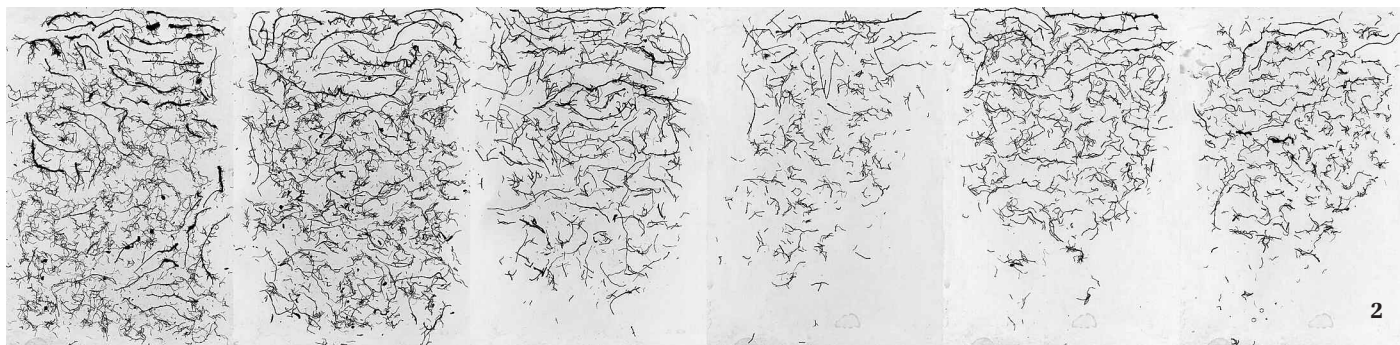
## Šlechtění na větší kořenový systém přináší efektivnější využití vody a živin



Pozitivní účinky závlah, minerálních hnojiv a agrochemikálií na výnosy zemědělských plodin vedly po „zelené revoluci“ (v druhé polovině 20. stol.) k nadužívání těchto intenzifikačních opatření. S ohledem na související ekonomické a environmentální dopady není však další růst intenzifikace dlouhodobě udržitelný. Novým trendem v rostlinné produkci se stalo dosažení „většího výnosu na kapku“ (anglicky *more crop per drop*). Strategie se zavádí zejména v souvislosti se stále cennější a dražší vodou, když i v podmínkách středoevropského klimatu stoupá počet období s výskytem sucha, včetně sucha agronomického (nedostatek vody v půdě pro zemědělské plodiny ovlivněný předchozím nebo déletrvajícím meteorologickým suchem, viz Živa 2014, 1: 2–3). S uvedenými vlivy se musejí vyrovnat nové odrůdy kulturních plodin a jejich šlechtitelé. A to vše v době, kdy na Zemi ročně přibude 77 milionů lidí.

Odolnost rostlinných druhů k suchu je často spjata s odlišným způsobem utváření kořenového systému, jeho kvantitativními i kvalitativními znaky. Mnozí biologové, fyziologové a šlechtitelé zabývající se výzkumem kořenové soustavy rostlin ji považují dokonce za klíč k druhé „zelené revoluci“ (např. J. Lynch v časopise *Nature*, 2010). Kořenový systém většiny polních plodin, někdy také nazývaný skrytou





**1** O nadzemní biomase obilnin (na obr. pšenice setá – *Triticum aestivum*) toho víme poměrně hodně – selekce podle parametrů nadzemní části probíhá již tisíce let. Víme však, co se skrývá pod povrchem půdy? Foto T. Sřfeda

**2** Vzorek kořenového systému ječmene setého (*Hordeum vulgare*) z hloubky (zleva): 0–10 cm, 10–20 cm, 20–30 cm, 30–40 cm, 40–50 cm a 50–60 cm.

Foto J. Klimešová

**3** Jemné struktury kořenové soustavy pšenice seté, včetně kořenových vlásků, nejsou destruktivními metodami hodnotitelné. Blíže v textu. Foto J. Klimešová

polovinou metabolismu rostliny, však nebyl cílem šlechtitelských programů z důvodu absence vhodné metody. Např. pšenice setá (*Triticum aestivum*, obr. 1), domestikovaná přibližně před 10 tisíci lety, se sice systematicky šlechtí asi 200 let, ale hodnocena byla pouze její nadzemní část. To nabízí značný potenciál uplatnění šlechtitelských postupů při zlepšování parametrů kořenového systému. S rostoucí teplotou prostředí a současnou změnou distribuce srážek v průběhu roku, jak předpokládají klimatické modely, poroste význam kořenů jako osvojovacího aparátu vody a živin rozpuštěných v půdním roztoku.

Většina agrotechnických opatření (kultivace půdy, hnojení, závlaha aj.) se u zemědělských plodin realizuje přes kořenový systém. Znalost vlastností kořenové soustavy je nutná zejména k vysvětlení reakcí rostlin na různou úroveň a formu živiny a (ne)přístupnosti vody. Následně lze upravit agrotechniku plodin podle jejich potřeb a otevírá se tak i cesta ke šlechtění nových, k suchu tolerantnějších a výnosnějších odrůd. K záměrnému šlechtění však musíme zajistit vhodné fenotypy nebo i jednotlivé rostliny. Kořenový systém se ale zpravidla používá jako selekční kritérium jen tehdy, je-li sám šlechtitelským cílem, např. u řepy, mrkve nebo u plodin, u kterých se dá lehce uvolnit ze substrátu (např. u rýže). Úspěšná selekce podle velikosti kořenového systému a její využití při šlechtění na vyšší produkci nadzemní biomasy jsou dokumentovány u vojtěšky, v souvislosti s její schopností vázat vzdušný dusík pomocí symbiotických bakterií na kořenech.

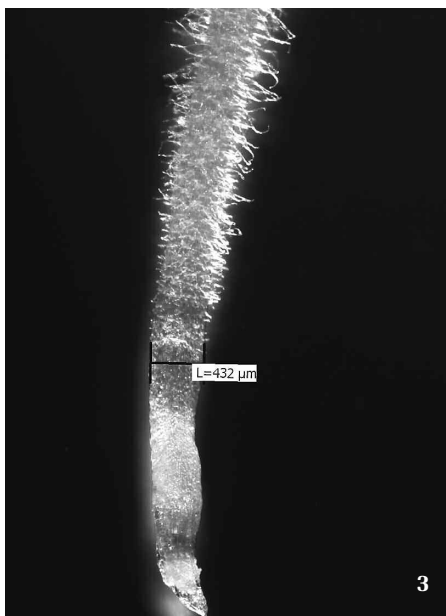
Kořenová soustava přímo ovlivňuje přizpůsobivost celé rostliny a u polních plodin určuje dosažení dobrého výnosu i za nepříznivých podmínek prostředí. Velikost kořenového systému může mít vliv na výnos a kvalitu produkce. A opačně, klíčící rostliny pocházející z kvalitních, vitálních semen uniknou případnému suchu v počátečních fázích vývoje vegetace, vytvoří

rychleji kořenovou biomasu a budou tak suchovzdornější i v dalších fázích vývoje vegetace. Tento jev, kdy rychle se tvoří vitální kořenový systém přispívá k úspěšnému vzejití rostlin v suchých podmínkách, označujeme jako uniknutí suchu (drought escape).

Hodnocení vertikálního rozmístění kořenů v půdě lze zobecnit konstatováním, že se kořenový systém stává hlubším, když se prostředí stává sušším. Mohutnější kořenový systém však nemusí být výhodný ve všech letech. Je-li vody a živin dostatek, znamená pro rostlinu zbytečnou investici. V závislosti na vláhových podmínkách se mění také poměr hmotnosti sušiny kořenového systému k hmotnosti sušiny nadzemní biomasy. S ubývajícím srážkami se tento poměr u bylinných a travních druhů mění ve prospěch kořenů.

Protože rozložení kořenového systému v půdě závisí na přítomnosti vody a živin, lze se domnívat, že kořeny ve svrchních vrstvách slouží převážně k získávání živin, zatímco do hloubky pronikají při hledání zásob vody. Obecně se dá říci, že průměrně napříč biomy a typy vegetace se 30 % kořenové hmoty nachází do 10 cm hloubky půdy, 50 % do 20 cm a 75 % do 40 cm (viz obr. 2).

Výnos u obilnin se spojuje s velkým množstvím jemných kořenů spíše v hlubších vrstvách než při povrchu půdy. Žádoucí je tak fenotypová nebo genotypová selekce na větší (hlubší) kořenovou soustavu. Šlechtění by se tedy mělo zaměřit nejen na velikost kořenového systému, ale také na morfologii i na aktivitu nejmenších struktur.



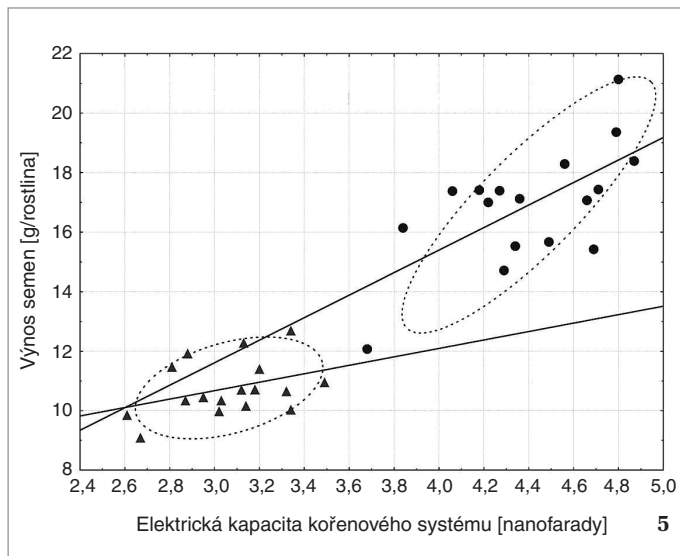
Z pohledu morfologického utváření kořenové soustavy však do procesu vstupuje její plasticita, která umožňuje rostlině optimalizovat náklady na tvorbu a údržbu kořenů. Morfologické parametry tak lze kolísající nabídkou vody nebo heterogenním rozložením živin v půdě jen obtížně předpovědět. Především voda v půdě modeluje strukturu kořenového systému, jeho větvení, hloubku prokořenění i životnost kořenů.

### Metody pro hodnocení vlastností

Pro měření a hodnocení kořenového systému rostlin se používá široké spektrum metod. Ideální metoda pro posouzení jeho velikosti by měla umožňovat rychlé, přesné, opakované měření během celé vegetace a také sklizeň semen měřených rostlin. Metody se vzájemně liší podle prostředí, kde mohou být aplikovány (pole versus laboratoř, půda versus hydroponický roztok), nároky na technické vybavení, zkoumanými ukazateli (dynamika růstu, nebo prostorové rozložení), časovou náročností a pracností. Podstatnou roli hraje cíl výzkumu, který je při výběru přístupu limitující. V současnosti neexistuje univerzální metoda, která by se dala použít pro všechny situace, prostředí a cíle.

Relativně přesné výstupy z pokusů v minirhizotronech (speciálních prosklených boxech určených pro výzkum kořenového systému) ukazují, že kořeny o průměru menším než 0,25 mm představují téměř 95 % z celkové délky kořene (obr. 3). Bezeztrátová izolace neporušených živých kořenových systémů z půdy v polních podmínkách se zatím nepodařila a je pravděpodobně nemožná. Pro stanovení velikosti se nejčastěji používají metody *ex situ*, kdy se pomocí zařízení různých konstrukcí odebírá půdní monolit. Podstatný problém hodnocení jednotlivých parametrů představuje fakt, že při destruktivních metodách odběru kořenové biomasy lze očekávat výrazné ovlivnění výsledků ztrátami v nejjemnější frakci. Pro zemědělský výzkum a šlechtění jsou však zásadní především výsledky metod aplikovaných v polních podmínkách, které se často výrazně liší od laboratorních pokusů.

Nejpoužívanější technikou pro výzkum velikosti a morfologie kořenového systému rostlin je různě modifikovaná tzv. soil core metoda *ex situ*. Její princip spočívá v získání půdního vzorku určitého objemu, jeho rozplavení vodou a v separaci přítomných kořenů. Pro kvantitativní a kvalitativní hodnocení kořenů (hmotnost, délka, průměr, počet kořenových čepiček atd.) se pak zpravidla kořeny po vyplavení skenují a analyzují pomocí softwaru pro digitální analýzu obrazu, která umožní přesné



vyhodnocení jejich vlastností. Metoda ale nemůže dokonale zachytit kořenový systém v přirozené pozici (tedy kvalitativní stránku) a není ani použitelná pro odhad, jak se mění kořeny a jejich životnost v čase. Navíc nelze hodnotit rostliny opakovaně během vegetace a semena vybraných rostlin se nedají využít pro šlechtění.

V současnosti používané *in situ* metody (magnetická rezonance, rentgen apod.) umožňují detailní a relativně přesné stanovení velikosti a architektury kořenového systému. Nejsou zatíženy chybou v podobě kvantitativních ztrát kořenové biomasy, ovšem za cenu vysokých pořizovacích nákladů na měřicí zařízení. Nedovolují však hodnotit vyšší počet rostlin a jejich použití v polních podmínkách není reálné. Pro detailní výzkum a 3D interpretaci kořenového systému je aktuálně populární využití počítačové tomografie (CT, Computer Tomography). Metodu v současnosti intenzivně rozvíjejí v Centre for Plant Integrative Biology na Univerzitě v Nottinghamu.

### Hodnocení velikosti kořenového systému pomocí elektrické kapacity

V r. 1972 brněnský šlechtitel prof. Oldřich Chloupek popsal vztah elektrické kapacity k vlastnostem kořenové soustavy. *In situ* metoda vychází ze známého poznatku, že téměř všechny biologické membrány mají stejnou, tj. specifickou elektrickou kapacitu na jednotku své plochy. Čím je tedy větší plocha biologických membrán v kořenovém systému, tím vzniká větší elektrická kapacita. Vytváří se na styku ploch prostředí voda-půda a povrchu kořenů rostliny.

Jednotlivý kořen lze považovat za podélný symetrický válcový kondenzátor, který vykazuje elektrickou kapacitu. Při měření se zjistilo, že je aditivní, tedy složená z kapacity každého kořenového článku, a může narůstat lineárně se zvyšujícím se počtem článků. Zároveň povrch každého kořene je přímo úměrný velikosti kapacity. Pro měření kapacity se používají dvě elektrody a běžný LCR metr, který indukují střídavý proud nejčastěji o frekvenci 1 kHz. Jedna elektroda (zpravidla kleště) se umístí na bázi stonku rostliny. U obilnin je třeba do kleští zachytit i odnože, protože nebyvají vždy vodivě spojeny. Druhá elektroda se zasune do půdy do hloubky asi 10 cm

zhruba do vzdálenosti 15 cm od rostliny (obr. 4). Procházejícím proudem tvořená elektrická kapacita se měří v nanofaradech. Tímto způsobem zjišťujeme kapacitu kořenového systému, včetně nejjemnějších struktur – kořenových vlásků, ve vztahu k půdě, v níž roste. Nespornou výhodou této metody jsou nízké náklady a možnost změřit až několik tisíc rostlin denně. Měření lze provádět po celou dobu vegetace, rostliny (včetně semen) na konci vegetace sklídit a výnos konfrontovat s velikostí kořenového systému.

Kromě měření elektrické kapacity kořenů *in situ* není známa metoda pro opakované hodnocení stejné rostliny v různých vývojových stádiích a hodnocení mnoha rostlin v naklížených populacích – důležitý předpoklad pro úspěšné a praktické šlechtění. Měření velikosti kořenového systému podle jeho elektrické kapacity je celosvětově používáno, rozvíjeno a modifikováno. Uplatnění nachází zejména pro screening šlechtitelských materiálů v polních podmínkách.

### Praktické aplikace výzkumu

V rámci posuzování meziodrůdových rozdílů velikosti kořenové soustavy a pro selekci na větší nebo menší kořenový systém polních plodin se v Ústavu pěstování, šlechtění rostlin a rostlinolékařství Agromické fakulty Mendelovy univerzity v Brně používá právě měření elektrické kapacity kořenů. Jejich pomocí jsme např. prokázali, že výnos zrna ozimých odrůd pšenice v suchých letech pozitivně koreluje s velikostí kořenového systému (Středa a kol. 2012). Odrůdy, u nichž byl zjištěn největší rozdíl velikosti kořenové soustavy, vykazují v suchých letech rozdíl výnosu až 860 kg.ha<sup>-1</sup>, což přibližně odpovídá dodatečnému využití 15 mm vody (srážek). Otázkou však byla možnost úspěšné selekce na větší kořenový systém a dědivost tohoto znaku. Tu se podařilo ověřit v následném výzkumu. Zjistili jsme, že v suchých podmínkách 1% změně velikosti kořenového systému ječmene odpovídala 2% změna výnosu zrna (Svačina a kol. 2014).

Dále jsme posuzovali možnosti selekce na velikost kořenového systému a vazbu tohoto parametru a výnosu zrna u pšenice (Heřmanská a kol. 2015). Cílem výzkumu

4 Měření velikosti kořenového systému obilnin prostřednictvím jeho elektrické kapacity umožňuje hodnocení i nejjemnějších struktur – kořenových vlásků.

Foto J. Kovárník

5 Vztah mezi velikostí kořenového systému a výnosem semen (generace F<sub>3</sub>, průměr ze tří lokalit; elipsa naznačuje, kde se s 95% pravděpodobností budou vyskytovat naměřené hodnoty). Blíže v textu. Orig. T. Středa (2015)

bylo opakovaně vyhodnotit velikost kořenové soustavy pšenice seté při selekci v polních podmínkách a určit její vliv na výnos zrna. Vzájemně jsme zkřížili 6 odrůd pšenice ozimé a výsledných 18 populací vyseli na pole. U rostlin ve třetí a čtvrté generaci (při šlechtění označováno jako F<sub>3</sub> a F<sub>4</sub>) a jejich rodičů byla hodnocena velikost kořenového systému měřením jeho elektrické kapacity. Ze čtyř opakování u všech populací byly vybrány rostliny s největšími (skupina A) a s nejmenšími (skupina B) kořeny a zrna byla vyseta v následující generaci. Pro F<sub>3</sub> generaci se ukázala jasná korelace mezi velikostí kořenové soustavy a výnosem zrna pouze u selekce A (obr. 5).

Rostliny skupiny A měly populace s velkým kořenovým systémem a vysokým výnosem, umožňující šlechtění na tuto vlastnost. Obdobně potomstvo rostlin selektovaných na malou velikost kořenů mělo v další generaci menší kořenový systém než rodičovské rostliny. Přitom velikost kořenového systému souvisela s výnosem zrna v generaci F<sub>3</sub>.

S rostoucí teplotou prostředí a současnou změnou distribuce srážek v průběhu roku, jak předpokládají klimatické modely, poroste v budoucnu význam kořenů jako osvojovacího aparátu. Naše výsledky ukazují účinnou selekci na velikost kořenového systému a doprovodné účinky na výnos zrna. Seleční metoda tak může být úspěšně použita ke šlechtění obilnin na toleranci k suchu i vyšší efektivitu využití vody a hnojiv.

Použitá literatura uvedena na webu Živy.

Práce vznikla za finanční podpory výzkumného projektu Národní agentury pro zemědělský výzkum č. QJ1510098.