

Kořenový systém plodin pro 21. století – efektivní příjem vody a živin

Crop root system for 21st century – effective uptake of water and nutrients

Jan Haberle¹, Tomáš Středa², Pavel Svoboda¹, Barbora Henzlová¹, Gabriela Kurešová¹

Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.¹; Mendelova univerzita v Brně²

Abstrakt

Hlavní výzvou pro kořenový systém plodin je optimální využití zdrojů půdního prostředí jako předpoklad pro realizaci vysokého výnosového potenciálu současných odrůd. Potřebné vlastnosti kořenů zahrnují, z hlediska silného kolísání dostupnosti vody a zhoršení kvality půdního prostředí, toleranci a plasticitu - schopnost přizpůsobit změnám podmínek, efektivně využít období s dobrou dostupností vody a čerpat dostupnou zásobu vody v době nízkých srážek a nedostatku vody v půdě. U výživy rostlin jde o řadu morfologických a fyziologických znaků, mezi jinými je to hloubka a rozsah kořenového systému, které se podílejí na příjmu a využití živin z půdy za optimálních i méně příznivých podmínek.

Klíčová slova: ideotyp, adaptace, sucho, půda, hloubka kořenů

Abstract

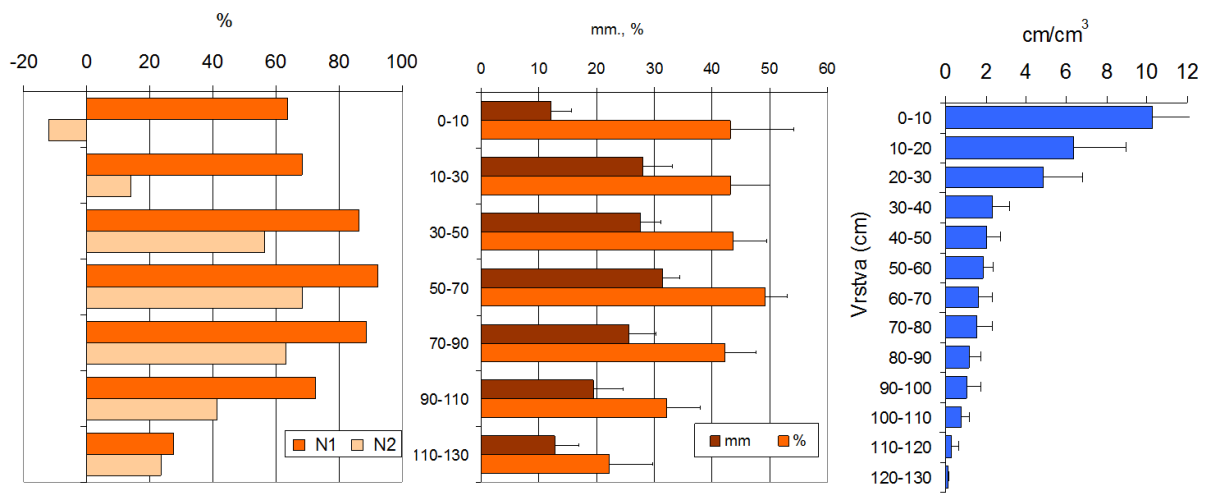
The main challenge for root system of crops is optimal utilization of soil sources as the main precondition for realization of a high yield potential of modern cultivars. The desired root traits comprise, regarding strong fluctuations of water availability and worsened soil qualities, tolerance and adaptability. In the field of plant nutrition many morphological and physiological root traits, among others root depth and size, contribute to effectivity of uptake and utilization of nutrients under both, optimal and less favourable conditions.

Keywords: ideotyp, adaptation, drought, soil, root depth

Úvod

Kořenový systém je považován za klíčový stabilizující prvek produkce plodin, zvláště v méně příznivých podmínkách (Gao et al. 2016, Comas et al. 2013, Wasson et al. 2012, Gewin 2010). Lynch (2007) a Herder et al. (2010) považuje zlepšený kořenový systém za „klíč ke druhé zelené revoluci“. Kořenový systém má řadu úloh, především ukotvení rostlin v půdě, příjem živin a vody. Morfologie a geometrie kořenového systému našich plodin vcelku odpovídá prostorové i časové dostupnosti zdrojů; husté prokořenění ornice a mělkého podorničí (do 40 – 50 cm) umožňuje efektivně přijímat vodu ze srážek a méně pohyblivé

živiny, fosfor a některé mikroprvky. Do větší hloubky postupně pronikají jednotlivé kořeny, zpočátku méně rozvětvené, které dokážou i při menší hustotě využít zásobu vody a některých živin (Haberle, Svoboda 2014, 2015a,b, 2012, Haberle et al. 2015, Kuhlman et al. 1989) (obr. 1). To je umožněno lepší pohyblivostí iontů (vyšší difúzní koeficient), které se posunuly s prosakující vodou z obohacené ornice do hlubších vrstev (nitráty, sírany a chloridy draslíku, vápníku, hořčíku). Hloubka kořenů tak určuje potenciál pro významnou funkci příjmu vody a živin z hlubokých vrstev podorničí (Kautz et al. 2013).



Obr. 1 Průměrné využití vody a minerálního dusíku z ornice a podorničí (v % z celkového obsahu na počátku jarního růstu; u vody je čerpání znázorněno i v mm) a průměrná hustota kořenů ozimé pšenice (Ruzyně).

Kořenový systém má řadu dalších funkcí, často ještě ne plně objasněných; především to jsou metabolické funkce – zpracování živin a jejich transport, regulace a signalizace v rámci vztahů mezi kořeny a nadzemními částmi nebo exudace organických látek a ovlivňování prostředí pro lepší přístupnost živin. Významnou oblastí jsou symbiotické vztahy a působení na nesymbiotickou půdní mikroflóru, včetně fytopatologických interakcí. Mezi další funkce patří oživování půdy, vnášení organické hmoty, zlepšování půdní struktury a tvorba biopórů (víceleté pícniny) umožňujících pronikání kořenů následných plodin.

Podmínky omezující funkce kořenů

Současné zemědělství charakterizují některé přirozené procesy a dopady systému pěstování, které zhoršují růst a funkce kořenů. Lze to formulovat tak, že aktivita a velikost kořenového systému (hloubka, distribuce, hustota) daného druhu/odrůdy indikují kvalitu půdního

prostředí a tyto znaky lze použít například pro porovnání systémů pěstování nebo stanovištních podmínek (Haberle, Svoboda 2011, Gao et al. 2016). Ideotyp kořenového systému pro 21. století tedy musí nutně vykazovat vlastnosti, které umožní plodině překonat nepříznivé podmínky, z části způsobené zemědělcem, současně se znaky pro využití vysoce výkonného prostředí intenzivních systémů pěstování.

Negativně na rozvoj kořenů působí zhoršení půdního prostředí v důsledku utužení půdy a zhoršení její struktury, nadměrná chemizace s dopady na fyzikálně-chemické vlastnosti půd a půdní organismy, nepoměr v hnojení dusíkem a ostatních živin (především P, K, Mg, Ca), ochuzení osevních postupů o víceleté jeteloviny, propad použití (živých) statkových hnojiv a jejich náhrada (neoživenými) produkty z bioplynových stanic. Důsledkem je zhoršená infiltrace a vodní kapacita půd, dochází k povrchovému odtoku; horší růst kořenů (utužení, struktura) snižuje efektivnost odčerpání vody z půdního profilu. Tyto dopady se razantně projeví právě v případě výskytu stresů, především sucha. Kořenový systém ztrácí v takových podmínkách svoji stabilizační funkci vyrovnávání extrémů. Nedostatky jsou maskovány tím, že v případě dostatečných či alespoň průměrných srážek a vysokých (pojišťovacích) dávek N a dalších živin se dopady na výnosy neprojeví tak drasticky. Miliardové škody na produkci v důsledku sucha jsou určitou částí (kterou nelze přesně kvantifikovat) nepochybně důsledkem uvedených problémů. Je vhodné připomenout, že negativně by se projevila zhoršená kvalita půdy a růstu kořenů i v případě nadměrných srážek. Jedním z dopadů, které souvisejí s kořenovým systémem, je stále příliš nízká efektivnost využití dusíku, následné ztráty nevyužitého dusíku (NH_3 , NO_x , NO_3) do prostředí a znečištění vod nitráty.

Genetická podmíněnost znaků kořenů

Jednotlivé znaky kořenů a kořenového systému jsou geneticky založeny, takže existuje možnost cíleného výběru a šlechtění pro specifické podmínky nebo systémy pěstování (např. Kumar et al. 2015, Lynch, Brown 2012). Například pro efektivní příjem, v půdě málo pohyblivého fosforu, je důležitá hustota kořenů a délka kořenových vlásků (Brown et al. 2013). Význam těchto znaků se bude zvyšovat v prostředí méně úrodných půd nebo nedostatku P (ekologické zemědělství), zatímco při vysokých dávkách fosforečných a organických hnojiv se rozdíly mezi genotypy nemusí projevit. Velké množství experimentálních údajů, především z kontrolovaných podmínek, existuje o rozdílech v příjmu živin a jejich zpracování v kořenech. Z hlediska zajištění optimálního růstu a tvorby výnosu jde, spíše než o individuální znaky, o soubor znaků a vlastností kořenů, které podmiňují

adaptaci na aktuální stav půdního prostředí a případné nepříznivé faktory, sucho, špatný fyzikální stav a utužení půdy, vyšší kyselost půdy a obsah hliníku nebo zasolení.

Ideotyp kořenů dané plodiny se liší podle pěstitelského cíle, výrobních a přírodních podmínek. Největší pozornost je v současnosti věnována problematice šlechtění odrůd odolných k suchu. Odlišné požadavky budou na odrůdy do extenzivních podmínek s omezenými zdroji (ekologické zemědělství, tropické půdy s nedostatkem přístupného fosforu a dalších živin) v porovnání s odrůdou pěstovanou při vysokých vstupech živin a vody. Přínosem by bylo šlechtění na více znaků současně, například na schopnost pronikat utuženými vrstvami spolu se zvýšenou hustotou větvení v podorničí a rychlostí příjmu živin. Nedostatečně se zohledňuje geometrie kořenového systému z hlediska využití dostupných zdrojů u širokořádkových a mezidruhových kultur. Lze si představit i genotypy se zvýšeným množstvím exudátů pro podporu půdní mikroflóry a struktury půdy nebo se zvýšeným inputem uhlíku do hlubokých vrstev jako příspěvek k sekvestraci C (Kumar et al. 2006).

Fenotyping kořenů a zvláště celého kořenového systému v polních podmínkách je pracný a časově náročný; určitou alternativu představují nepřímé metody, například měření elektrické kapacity kořenů (Středa et al. 2017, Středa et al. 2018 zde). Převážná většina výzkumu kořenů probíhá z těchto důvodů v kontrolovaných podmínkách. Ne vždy však lze, z důvodu přirozené plasticity kořenů, prokázat vztah mezi určitými znaky nebo reakcí na sucho, zjištěnými v modelových podmínkách, se znaky kořenů nebo projevem daného genotypu v polních podmínkách (Haberle et al. 2017, Rewald et al. 2014). Nabízí se využití plodinových modelů, které umožňují simulovat vliv široké škály podmínek na růst, výnos a kvalitu produkce. Tyto modely však dostatečně nezahrnují funkční vztahy mezi různými znaky kořenů a procesy v průběhu růstu a tvorby výnosu. K tomuto cíli směřuje genetické (gene-based) modelování (např. Hoogenboom et al. 2004, Technow et al. 2015), které však na druhé straně nedostatečně popisuje interakce v kontinuu rostlina-půda-atmosféra.

Současné intenzivní zemědělství vyžaduje dostatek vody a zásobu pohotových živin pro pokrytí potřeby moderních výkonných odrůd. V podmínkách silného kolísání srážek a dostupnosti vody představuje výkonný kořenový systém nezbytnou podmínku stability výnosů. Hluboký kořenový systém umožňuje využít rezervu vody v hlubších vrstvách podorničí a překonat přechodný výpadek srážek. Současně hluboký, aktivní kořenový systém redukuje odčerpáním živin z hlubokých vrstev podorničí ztráty vyplavením

V tomto příspěvku prezentujeme několik výsledků ze sledování rozdílů v distribuci (hustotě) kořenů mezi druhy a odrůdami plodin.

Materiál a metody

V minulých letech jsme se systematicky zabývali sledováním distribuce délky (hustoty) kořenů polních plodin a vybraných zelenin v půdním profilu (Svoboda et al. 2017, 2018). Cílem bylo určit na základě hloubky a distribuce kořenů dostupnou zásobu vody a minerálního dusíku ve vrstvách ornice a podorničí a odhadnut případný nástup vodního stresu v provozních podmínkách zemědělských podniků (Haberle et al. 2015). Kořeny byly sledovány v polních pokusech VÚRV, v.v.i. a v podnicích v různých agroklimatických regionech ČR. Vzorky půdy s kořeny byly odebírány po vrstvách 10 cm, až do hloubky bez výskytu kořenů (10-20 cm pod výskyt nejhlubších kořenů), převážně po kvetení, v období zrání plodiny, kdy kořeny dosahují největší hloubky, u zelenin v době sklizně. Kořeny byly vyplaveny vodou, byla určena jejich celková délka podle Tennant (1975) a vypočtena hustota kořenů (cm/cm^3).

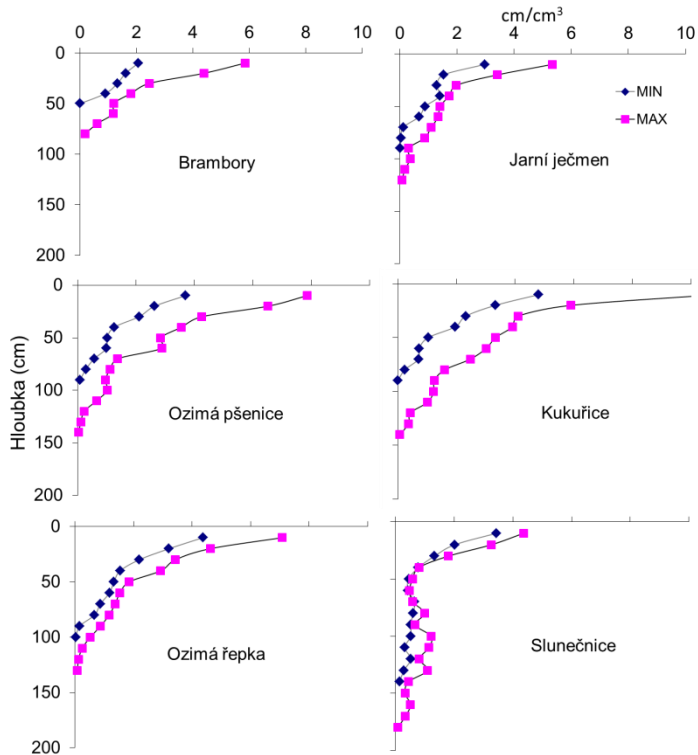
Mj. byl sledován i vliv závlahy a sucha na růst kořenů pšenice (Svoboda et al. 2014) a brambor. V dalším pokusu byl sledován vliv sucha (indukovaný pomocí mobilního krytu) v kontrastu s optimální dodávkou vody (kapková závlaha) a kontrolní variantou závislou jen na srážkách (Haberle et al. 2018).

Ve většině případů byla na počátku růstu, u ozimů v předjaří, ve fázi regenerace, určena zásoba dostupného minerálního dusíku (N_{min}) a vody do hloubky 90 - 130 cm. Ve vybraných případech byl určován obsah N_{min} a vody i v době zralosti, jako ukazatel (bilančního) odběru z vrstev ornice a podorničí (Haberle, Svoboda 2012).

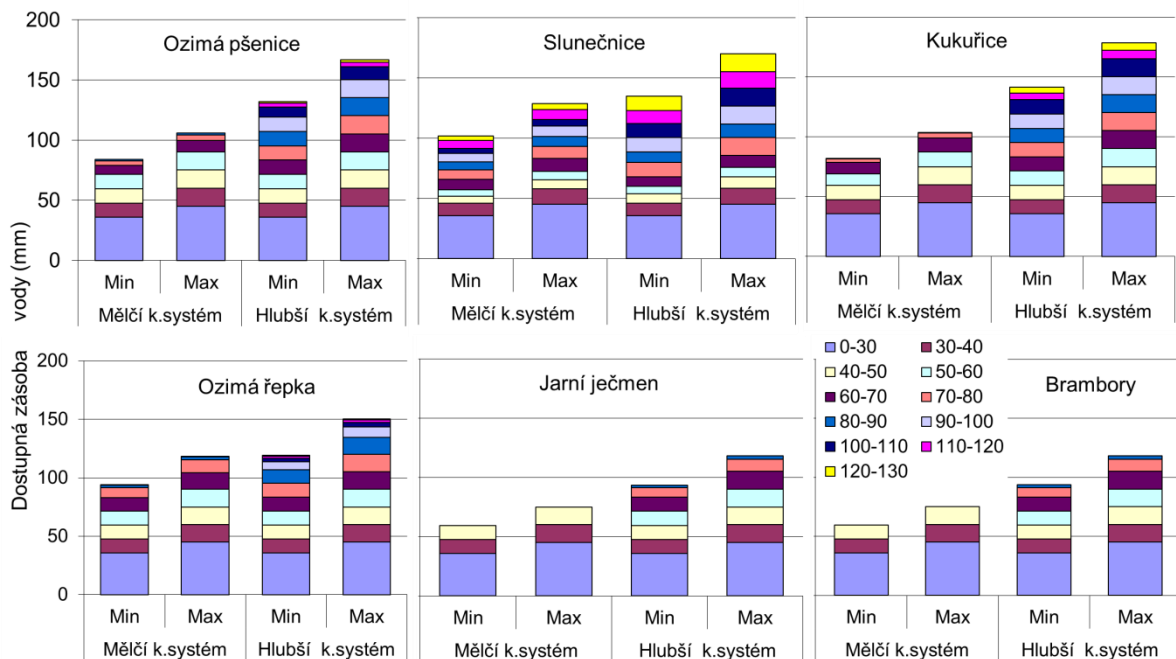
Výsledky

Hloubka kořenů a využití vody a dusíku z půdního profilu

Z hydropedologických údajů vyplývá, že většina našich orných půd (s výjimkou mělkých, kamenitých a písčitých) dokáže pod jedním čtverečním metrem do hloubky 100 cm zadržet 150 - 220 l vody (rozdíl mezi polní vodní kapacitou a bodem vadnutí, PVK-BV), která je potenciálně dostupná plodinám. Ve skutečnosti je tato zásoba o něco menší, hlubší vrstvy mohou obsahovat skelet a vyšší podíl písku, plodiny také dokážou vyčerpat dostupnou vodu až do úrovně bodu vadnutí jen při extrémním nedostatku srážek a odpovídající (efektivní) hustotě kořenů. Na obr. 2 je znázorněna distribuce kořenů vybraných plodin a na obr. 3 množství využitelné množství vody ve vrstvách půdního profilu při nasycení půdy vodou na úroveň PVK u několika druhů plodin s odlišnou hloubkou kořenů.



Obr. 2. Nejmenší a největší pozorovaná hloubka a hustota kořenů hlavních plodin (údaje z různých půdně-klimatických podmínek).



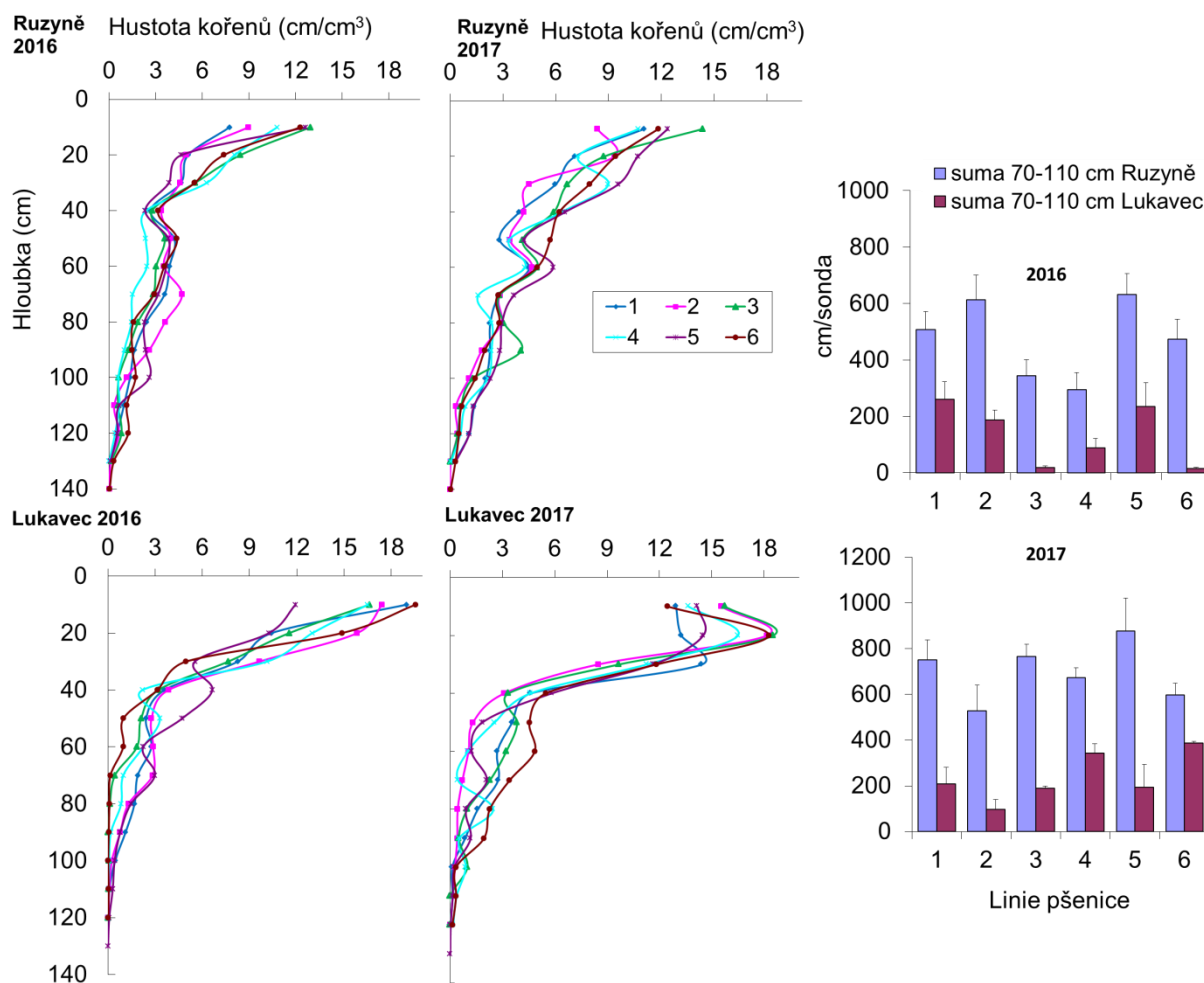
Obr. 3. Dostupná zásoba vody v kořenové zóně vybraných plodin, vypočtená na základě nejmenší (mělký kořenový systém) a největší (hlubší) pozorované hloubky a hustoty kořenů dané plodiny pro nejnižší (Min) a nejvyšší (Max) obsah přístupné vody v předjaří zaznamenané na lokalitě Čáslav (hluboká hlinitá půda s vysokou vodní kapacitou).

V tabulce č. 1 jsou příklady vysokých obsahů N_{min} (z 80-95% tvořeném nitrátovou formou) v půdním profilu po odlišných plodinách a na různých lokalitách před nástupem zimy. V závislosti na nasycení vody na podzim a srážkách v mimovegetační době se menší či větší část tohoto dusíku posune půdním profilem do hlubších vrstev, podpovrchovým tokem a případně meliorační sítí do vodotečí nebo průsakem mimo dosah kořenů, a postupně až do spodních vod. I když by k posunu a vyplavení nedošlo, bude pro značný počet druhů zelenin i některých plodin (hrách, brambory) dusík z hlubokých vrstev podorničí obtížně využitelný nebo zcela mimo dosah (Svoboda et al. 2017, 2018, Kristensen, Thorup - Kristensen 2007).

Tab.1. Modelované množství nitrátového dusíku vyplaveného pod 30 cm, 60 cm a 90 cm pro pozorované obsahy v půdě v zemědělských podnicích na podzim uvedeného roku v závislosti na zimních efektivních srážkách v letech 2010 - 2017 (půdní druhy. jh: jílovito-hlinitá, jv: jílovitá, h: hlinitá, ph: písčito-hlinitá, hp: hlinito-písčítá, p: písčítá).

Lokalita rok	Plodina	Půdní druh ornice/po dorničí	Množství N-NO ₃ na podzim (kg N/ha)			Nejnižší a nejvyšší množství N-NO ₃ vyplaveného pod danou hloubku (kg N/ha)					
			0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
Ivanovice na H. 2015	cukrovka	h, jh	60	47	64	13	0	0	38	34	34
Chrástčany 2016	mák	h, ph, hp	45	71	40	15	11	5	33	64	70
Ruzyně 2015	hrách	h, jh	44	39	28	21	14	5	31	39	30
Uhřetěves 2015	jetel	h, ph	49	41	29	26	25	15	36	50	47
Tuřice 2015	celer	h, ph-jh	48	52	35	24	15	1	34	45	33
Sojovice 2015	cibule	ph, hp, p	31	40	63	16	21	29	22	36	58
Předměřice 2015	brokolice	ph, hp, p	145	125	35	82	70	32	111	146	110
Kochánky 2014	brambory	ph, hp, p	43	71	51	25	42	31	33	73	79
Čechtice 2016	kuřice	p, hp	116	95	44	71	73	43	92	130	112
Lukavec 2014	řepka	ph, p	63	14	5	44	26	16	52	45	36
Lukavec 2016	brambory	ph, p	159	28	14	111	73	49	132	117	100

Na 50% zemědělské půdy (Zranitelné oblasti nitráty) jsou v ČR již 15 let uplatňována opatření pro redukci vyplavení nitrátů, ale přesto se situace ve znečištění vod významně nezlepšuje. Zohlednění odlišné hloubky kořenů plodin a schopnosti odčerpat proplavený dusík z hlubokých vrstev, střídání plodin s mělkým kořenovým systémem (které navíc často vykazující i menší efektivnost příjmu živin a požadavky na vysoký obsah snadno přijatelné vody a živin) a druhů s hlubokými kořeny je jednou z cest ke zlepšení (Thorup-Kristensen, Sorensen 2010).



Obr. 4. Distribuce kořenů šesti odrůd ozimé pšenice (vlevo) na suchém, teplém stanovišti s jílovito-hlinitou půdou na spraši (Ruzyně) a na lokalitě s nižší teplotou, většími srážkami a písčito-hlinitou až hlinito-písčitou půdou (Lukavec u Pacova). Vpravo – délka kořenů v podorničí (pod 70 cm).

Odrůdové rozdíly v hloubce kořenů

V dvouletém pokusu s šesti liniemi ozimé pšenice na dvou lokalitách s odlišnými půdně-klimatickými podmínkami jsme při vizuálně podobném prokořenění (obr. 4) zaznamenali průkazné rozdíly v celkové délce kořenů a podílu kořenů v hlubších vrstvách podorničí (pod 70 cm). Výsledky ale ukazují silnou interakci ročníku a genotypu (obr. 4). Interpretace těchto genotypově založených rozdílů není jednoduchá, nebyl nalezen konzistentní, systematický vztah k výnosu a k redukci výnosu v důsledku (indukovaného) sucha v porovnání s kontrolou nebo zavlažovaným porostem nebo vztah k teplotě porostu a diskriminaci ^{13}C v znu, jako ukazatele hospodaření odrůd s vodou (Haberle et al. 2018). Zřejmě jde o výsledek odlišnosti

odrůd (raná - pozdní, vysoká - nízká, postavení listů atd.) a řady faktorů, které tvorbu výnosu za optimálních i stresových podmínek ovlivňují.

Diskuze

Vzhledem ke skutečnosti, že naprostá většina vody a živin je plodinami přijímána kořeny rostlin, je význam kořenového systému jasný. Zlepšené vlastnosti kořenů jsou jedním z nezbytných předpokladů pro udržitelnost současné úrovně produkce plodin v podmínkách častého výskytu sucha a zhoršeného stavu půd v 21. století. Výnosový potenciál odrůd se zvyšuje a pokrok v genetice dává předpoklad vyšlechtění nových genotypů a dalšího růstu výnosů. To ale bude znamenat vyšší nároky na kořeny, které by měly zajistit dostatek vody a živin v konkrétních fázích vývoje, podle potřeby rostlin pro růst a tvorbu výnosu. Stagnace průměrných výnosů plodin v řadě zemí ukazuje, že schopnost zajistit uvedené potřeby se opoždí za genotypově založeným růstovým potenciálem. Důvodem je obecně zhoršující se stav půdy a povětrnostní výkyvy, zvláště nedostatek vody. To naznačuje, že by se měl zvýšit důraz na šlechtění zaměřené na kořeny, aby drželo krok se šlechtěním na růstové a výnosové znaky.

Výsledky pozorování prakticky ve všech klimatických podmínkách ukazují důležitost hloubky kořenů plodin pro efektivní využití zásoby vody, živin a odčerpání nadbytečného reziduálního nitratového, zvláště z hlubších vrstev podorničí, kde je největší riziko vyplavení z dosahu kořenů. Problémy s vysokým obsahem nitrátů v povrchových i podzemních vodách mají ve všech zemích s intenzivním zemědělstvím. Tyto problémy jsou prakticky bez výjimky spojené s vysokými dávkami N a kladnou bilancí N (do systému se přivádí o desítky kilogramů více dusíku, než se z pole exportuje ve formě výnosu a sklizené biomasy). To souvisí i s malým pokrokem ve šlechtění na vyšší efektivnost příjmu a využití dusíku z půdy. Jak ukazují naše výsledky hloubky kořenů a odběru vody a dusíku z podorničí, určitým řešením by bylo pravidelné zařazování druhů s hlubokými kořeny a vysokým požadavkem na dusík, při současné redukci hnojení, tak aby rostliny byly stimulovány k odčerpání dusíku.

Šlechtění a výběr by se měly zaměřit na mělce kořenicí druhy, u plodin s hlubokými kořeny (pšenice, kukuřice, čirok, slunečnice) jde spíše o optimalizaci jejich morfologie a geometrie spolu s tolerancí či adaptací k utužení půdy a dalším negativním faktorům. Pokroky genetiky zřejmě v budoucnu umožní zvýšení velikosti a hloubky kořenového systému například u brambor a dalších druhů (zeleniny, hrách), které mají relativně mělké kořeny s citlivostí k utužení a s horší osvojovací schopností (vyžadují dostatek pohotových živin a vody).

Šlechtění kořenů zatím příliš nepodpořilo specifické požadavky ekologického zemědělství, kde existuje rozdíly v požadavcích pěstitelů oproti konvenčnímu systému. Podobně lze uvažovat o vhodných znacích kořenového systému z hlediska optimálního rozdělení nik pro meziodrůdové a mezidruhové výsevy nebo agro-silvo-pastorální systémy (agroforestry).

U řady dalších znaků kořenů víme, že více či méně, přímo či nepřímo, ovlivňují příjem a využití živin a vody a další vlastnosti rostlin, které mohou zlepšovat toleranci nebo adaptaci na nepříznivé podmínky. Šlechtění na tyto znaky umožní další pokrok v určení jejich genetické podmíněnosti. Patří sem již zmíněná komunikace mezi kořeny a prýtem a signalizace podmínek v kořenové zóně, dále adaptativní reakce kořenů na střídání suchých a vlhčích období, odolnost kořenů proti vysychání a schopnost rychlé regenerace, zpřístupňování některých živin exudací specifických látek nebo vylučování vody kořeny do suché půdy a široká oblast vlivu kořenů na symbiotickou a nesymbiotickou mikroflóru.

Možnosti šlechtění a výběru na tyto specifické znaky a jejich význam pro cílové výnosové nebo kvalitativní znaky v různých půdně-klimatických podmínkách v interakci s agrotechnikou, jsou zatím málo probádány. Naše výsledky porovnání kořenů odrůd pšenice ukazují, že interpretace pozorovaných rozdílů v růstu kořenů ve vztahu k suchu a hospodaření rostlin s vodou nebude jednoduché.

U hodnocení dopadu nedostatku vody je třeba připomenout, že klíčovým souhrnným ukazatelem je efektivnost využití vody (WUE). Hodnota WUE není ani pro stejnou odrůdu a lokalitu konstantní, naopak se pohybuje podle podmínek dostupnosti vody a počasí, struktury porostu, výživného a zdravotního stavu v překvapivě širokém rozsahu. I když zde existují fyzikální, biochemické a fyziologické zákonitosti, které určují limity minimální spotřeby vody na jednotku vytvořené sušiny, evidentně zde existuje velká rezerva pro úsporu spotřeby vody plodinami. Efektivnost využití vody je většinou největší v případě menší dostupnosti vody, rostlina musí šetřit vodou, ale dochází současně k redukci výnosů. Například v našem pokusu s odrůdami pšenice se spotřeba vody pro tvorbu zrna se v třech letech pohybovala v širokém rozmezí 256-789 litrů vody na 1 kg zrna (WUE 3,91-1,27 g zrna/l vody) (Svoboda et al. 2016). Porost dotovaný závlahou na vytvoření 1 kg zrna spotřeboval od jarní regenerace do zralosti většinou 500 - 600 l/kg zrna, zatímco bez závlahy 250-400 litrů vody. U kontrolní (rain-fed) varianty se spotřeba ve třech letech, u dvou sledovaných odrůd pohybovala od 268 – 542 l/kg zrna. Pokus také ukázal význam optimální výživy - vyšší hnojení N (N₂) zvýšilo výnos zrna o 0,7-4,2 t/ha a tím snížilo spotřebu vody o 90 až 159 l/kg zrna. Extenzita není řešením, naopak výživa a ochrana, spolu s optimální strukturou porostu, jsou zárukou vysoké efektivnosti využití vody.

Závěr

Zlepšené vlastnosti kořenů jsou jedním z nezbytných předpokladů pro udržitelnost současné úrovně produkce plodin v podmínkách častého výskytu sucha a zhoršeného stavu půd ve 21. století. Z hlediska úlohy různých znaků kořenů a kořenového systému v procesu příjmu vody a živin a za stresových podmínek je zřejmé, že zde existuje velký potenciál pro cílené šlechtění. Na významný pokrok v této oblasti, který by naplnil očekávání „další zelené revoluce“, bude ale nutné si ještě počkat.

Literatura

- Brown L. K., George T. S., Dupuy L. X., White P. J. 2013. A conceptual model of root hair ideotypes for future agricultural environments: what combination of traits should be targeted to cope with limited P availability? *Annals of Botany* 112 (2), 317–330.
- Comas L.H., Becker S., Cruz V.V., Byrne P.F., Dierig D.A. 2013. Root traits contributing to plant productivity under drought. *Frontiers in Plant Science* 4, 442.
- Gao W., Hodgkinson L., Jin K., Watts C.W., Ashton R. W, Shen J., Ren T., Dodd I. C., Binley A., Phillips A. L. et al. 2016. Opinion. Deep roots and soil structure. *Plant, Cell and Environment* 39, 1662–1668.
- Gewin V. 2010. Food: An underground revolution. *Nature* 466, 552-553.
- Haberle J., Svoboda P. 2015a. Calculation of available water supply in crop root zone and water balance of crops. *Contributions to Geophy and Geodesy* 45, 285–298.
- Haberle J., Svoboda P. 2015b. Příčiny letošních rozdílných výnosů. *Zemědělec* 23 (38), 29-31.
- Haberle J., Vlček V., Kohut M., Sředa T., Dostál J., Svoboda P. 2015. Bilance a určení dostupné zásoby vody v kořenové zóně plodin. Certifikovaná metodika. VÚRV, v.v.i. a Software: <http://svt.pi.gin.cz/vuzt/koreny.php>
- Haberle J., Svoboda P. 2014. Impacts of use of observed and exponential functions of root distribution in soil on water utilisation and yield of wheat, simulated with a crop model. *Archives of Agronomy and Crop Science* 60, 1533–1542.
- Haberle J., Svoboda P. 2012. Distribuce kořenů pšenice v půdním profilu a využitelná zásoba dusíku a vody. *Úroda* 60 (12), 79-84 (CD).
- Haberle J., Svoboda P. 2011. Rooting depth of crops indicates available supply of water and nitrogen - an important soil value, International Conference „Protection of soil functions – challenges for the future”. IUNG, Pulawy, 15.-18.10.2013, 2013, 4 s.

- Haberle J., Svoboda P. 2011. Observed and simulated depletion of mineral nitrogen by winter wheat from soil profile. In: Soil, Plant and Food Interactions. Mendelova univerzita v Brně, Brno, 2011, 131–135.
- Haberle J., Svoboda P., Neumannová A., Kurešová G. and Raimanová I. 2017. The comparison of impact of water shortage on wheat cultivars in container and field experiments. *Cereal Research Communication* 45 (Suppl.), 81-82.
- Haberle J., Svoboda P., Neumannová A., Kurešová G., Raimanová I. 2018. The impact of water shortage on wheat cultivars traits and canopy temperature in field experiment. In. ESA 2018 XV European Soc. for Agron. Congress, srpen 2018 Ženeva, Švýcarsko.
- Herder den G., Van Isterdael G., Beeckman T., De Smet I. 2010. The roots of a new green revolution. *Trends Plant Science* 15, 600-607.
- Hoogenboom G., White J.W., Messina C.D. 2004. From genome to crop: Integration through simulation modelling. *Field Crop Research* 90, 145-163.
- Kautz T., Amelung W., Ewert F., Gaiser T., Horn R., Jahn R., Javaux M., Kemna A., Kuzyakov Y., Munch J., et al. 2013. Nutrient acquisition from arable subsoils in temperate climates: A review. *Soil Biology and Biochemistry* 57, 1003–1022.
- Kristensen H. L., Thorup-Kristensen K. 2007. Effects of vertical distribution of soil inorganic nitrogen on root growth and subsequent nitrogen uptake by field vegetable crops. *Soil Use and Management* 23, 338–347.
- Kuhlman H., Barraclough P.B., Weir A.H. 1989. Utilization of mineral nitrogen in the subsoil by winter wheat. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 152, 291-295
- Kumar J., Pratap A., Kumar S. (eds.) 2015. *Phenomics in Crop Plants: Trends, Options and Limitations*. Springer.
- Kumar R., Pandey S., Pandey A. 2006. Plant Roots and Carbon Sequestration. *Current Science* 91(7), 885 – 890.
- Lynch J.P. 2007. Roots of the Second Green Revolution. *Turner Review No. 14. Australian Journal of Botany* 55, 493–512.
- Lynch J.P., Brown K.M. 2012. New roots for agriculture: exploiting the root phenome. *Philosophical Transactions of Royal Society B* 367(1595),1598–1604.
- Rewald B., Falik O., Godbold D., Rachmilevitch S. (eds.) 2014. *Ecophysiology of root systems-environment interaction*. *Frontiers in Plant Sciences*. Frontiers E-book. 316 p. ISBN 9782889192854

- Středa T., Haberle J., Klimešová J., Svoboda P., Středová H., Khel T. 2017. Metodika odběru a hodnocení kořenového systému polních plodin. Certifikovaná metodika. Mendelova Univerzita v Brně, VÚRV, v.v.i. Praha, 56 s. ISBN 978-80-7427-261-5
- Svoboda P., Kurešová G., Raimanová I., Haberle J. 2018. Root depth of field crops and vegetables in the czech republic. In: ESA 2018 XV European Soc. for Agron. Congress, srpen 2018 Ženeva, Švýcarsko.
- Svoboda P., Kurešová G., Neumannová A., Haberle J. 2017. Riziko vyplavení nitrátů u zelenin a polních plodin s různou hloubkou kořenů. Úroda 65 (12), 493-496 (CD).
- Svoboda P., Kurešová G., Neumannová A., Haberle J. 2016. Efektivnost využití vody ozimou pšenicí při diferencované dostupnosti vody. In: Vliv abiotických a biotických stresorů na vlastnosti rostlin. Mez. konference 12.-14.6.2016, ÚEL SAV Zvolen, 4 s.
- Svoboda P., Haberle J., Kurešová G., 2014. Root growth and depletion of nitrogen from root zone of winter wheat under drought and ample water supply. In: 13th Alps-Adria Scientific Workshop, 299 – 302.
- Technow F., Messina C.D., Totir L.R., Cooper M. 2015. Integrating crop growth models with whole genome prediction through approximate bayesian computation. PLoS ONE 10(6): e0130855.
- Tennant D. 1975. A test of a modified line intersect method of estimating root length. Journal of Ecology 63, 995-1001.
- Thorup-Kristensen K., Sorensen J.N. 2010. Soil nitrogen depletion by vegetable crops with variable root growth. Acta Agriculturae Scandinavica - Section B 49, 92–97.
- Wasson A.P., Richards R.A., Chatrath R., Misra S.C., Prasad S.V., Rebetzke G.J., Kirkegaard J.A., Christopher J., Watt M. 2012. Traits and selection strategies to improve root systems and water uptake in water-limited wheat crops. Journal of Experimental Botany 63(9), 3485-98.

Poděkování

Příspěvek byl zpracován s podporou projektů MZe ČR č. QJ1510098 a RO0418.

Kontakt: Ing. Jan Haberle, CSc., Výzkumný ústav rostlinné výroby, Drnovská 507, 161 06 Praha 6, +420 233000254, telefon, haberle@vurv.cz