

UDRŽATEĽNÉ POĽNOHOSPODÁRSTVO NA SLOVENSKU

Zdravie pôdy a ukazovatele zdravia pôdy



INŠTITÚT
CIRKULÁRNEJ
EKONOMIKY



ZHRNUTIE

Pôda je kľúčovým prvkom ekosystémov, a teda prináša benefity nielen pre poľnohospodárov, ale aj pre občanov. Zdravie pôdy je z toho dôvodu potrebné udržiavať na vysokej úrovni, resp. ho zvyšovať, ak ide o degradovanú pôdu. Medzi časté dôvody degradácie pôdy patria neudržateľné poľnohospodárske postupy. Ćirkulárna ekonomika môže byť v tomto kontexte dôležitým nástrojom, pretože poľnohospodárom poskytuje riešenia smerujúce k efektívnejšiemu využívaniu zdrojov, k minimalizácii odpadu a strát a k zhodnocovaniu odpadu. Poľnohospodári však čelia viacerým výzvam súvisiacim s implementáciou nových postupov, ktoré si vyžadujú čas, značné úsilie a nové investície. Tento report sa pozerá hlbšie do problematiky zdravia pôdy a jej sledovania, pričom naše zistenia by sa dali zhrnúť do týchto bodov:

- Kvantifikovať zdravie pôdy pomocou konkrétnych ukazovateľov zdravia pôdy je kľúčové.
- Zlepšovanie a udržiavanie zdravia slovenskej pôdy je téma, ktorá si vyžaduje zapojenie všetkých relevantných stakeholderov.
- Efektívne pouniverzitné vzdelávanie poľnohospodárov je dôležité pre rozšírenie vnímania dôležitosti témy zdravia pôdy, prezentáciu benefitov zdravej pôdy a pomoc s implementáciou postupov, ktoré zvyšujú zdravie pôdy.

Degradácia pôdy je jedným z najpálčivejších problémov súčasného poľnohospodárstva, a preto je nevyhnutné venovať zlepšovaniu a udržiavaniu zdravia slovenskej pôdy náležitú pozornosť. Vyššie uvedené odporúčania smerujú ku kompletnému systému práce so zdravím pôdy s jasnou víziou a stratégiou, jasne rozdelenými rolami a jasne definovanými merateľnými cieľmi. Prišiel čas na to, aby sme zdravie pôdy začali brať vážne a tému uchopili komplexne – iba tak sa efektívne dostaneme k dlhodobo udržateľným výsledkom, z ktorých budú profitovať všetci občania Slovenskej republiky, poľnohospodári aj životné prostredie.



1. ÚVOD

V najbližších desaťročiach očakávame pokračovanie zvyšovania teploty na Zemi, predlžovanie teplých ročných období, zmeny v typických vzorcoch úhrnu zrážok (bude pršať inak, niekde menej, niekde viac, niekde častejšie, niekde nárazovejšie), viac lesných požiarov, viac súch a teplotných vln, silnejšie a intenzívnejšie hurikány, zvýšenie hladiny morí o 0,3 až 2,5 metra do roku 2100 a úplnú stratu ľadu v Severnom ľadovom oceáne ešte pred rokom 2050 (Wuebbles et al., 2017). Medzi rokom 1970 a rokom 2016 sa zmenšili veľkosti populácií sledovaných cicavcov, vtákov, rýb, plazov a obojživelníkov po celom svete o 68 % (WWF, 2020) a aktuálne hrozí v krátkom čase vyhynutie viac ako štvrtiny živočíchov, rastlín a húb sledovaných na tzv. Červenom zozname (IUCN, 2023).

To sú dôsledky globálnej klimatickej zmeny a straty biodiverzity. Obe tieto veľké environmentálne krízy súčasnosti spôsobilo ľudstvo a svojou činnosťou pokračuje v ich zhoršovaní, pričom jednou z ľudských činností, ktorá do značnej miery prispieva k prehĺbovaniu oboch kríz, je zabezpečovanie jedla. Výroba potravín, spracovanie potravín, transport potravín, príprava potravín, potravinový odpad a všetky súvisiace aktivity produkujú podľa aktuálnych výpočtov približne štvrtinu (Poore & Nemecek, 2018) až tretinu (Crippa et al., 2021) všetkých ľudských emisií skleníkových plynov. Pri strate biodiverzity je to ešte výraznejšie – cca dve tretiny organizmov, ktoré Red List Index klasifikuje ako „ohrozené“ a „blízko ohrozenia“, poľnohospodárstvo približuje k úplnému vyhynutiu (Maxwell et al., 2016). Aktuálny **potravinový systém**, ako súhrnne nazývame všetky procesy a infraštruktúru, ktoré zabezpečujú potravu pre našu populáciu, teda nepochybne do veľkej miery škodí životnému prostrediu.

Potravinový systém zároveň patrí medzi najcitlivejšie oblasti ľudskej činnosti, pretože sa ho významne dotýkajú akékoľvek zmeny v životnom prostredí. Zmeny súvisiace s klímou (zmeny teplôt či netradičné vzorce úhrnov zrážok), ale aj zmeny súvisiace s biodiverzitou (napr. strata opelovačov) majú naň vysoko negatívny vplyv, čo ohrozuje jednak pre život ľudí nevyhnutné ekosystémy, ale aj potravinovú bezpečnosť ako takú. Pozornosť expertov a výskumníkov sa preto v poslednom čase sústreďuje na pôdu. Jej zdravie a odolnosť môže byť kľúčom nielen k adaptácii na

klimatickú zmenu, ale aj k mitigácii klimatickej zmeny či k zastaveniu straty až možnému zvyšovaniu biodiverzity v poľnohospodárskych oblastiach. Princípy cirkulárnej ekonomiky a cirkulárneho poľnohospodárstva ako napríklad efektívne využívanie zdrojov či vracanie organického odpadu do pôdy, predstavujú jeden z nástrojov, ako zdravie pôdy zvyšovať a udržiavať.

1.1 Cieľ a cieľová skupina reportu

V tomto reporte sumarizujeme základné informácie o témach zdravia pôdy a kvantifikovaní zdravia pôdy. Kladieme si za cieľ predstaviť dôležitosť sledovania nielen ukazovateľov, ktoré priamo súvisia s produktivitou rastlín, ale aj ukazovateľov ďalších funkcií pôdy, ktoré sú nevyhnutné pre fungovanie ekosystémov. Sledovanie širšieho spektra ukazovateľov zdravia pôdy môže do významnej miery prispieť k porozumeniu vzťahu poľnohospodárstva so životným prostredím a následnému zefektívneniu poľnohospodárskej výroby a ochrane životného prostredia.

Cieľovou skupinou tohto reportu sú:

- **poľnohospodári a experti v poľnohospodárstve**, ktorí môžu získať informácie o koncepte zdravia pôdy, o ukazovateľoch, ktoré môžu sledovať pri analýze zdravia (vlastnej) pôdy, o indikátore pôdna organická hmota, na ktorom môžu byť založené dotačné schémy, či nepriamo o indikátore pôdny organický uhlík, na ktorom môžu byť založené uhlíkové kompenzácie,
- **environmentálne a ochranárske organizácie**, ktoré môžu využiť informácie a zistenia tohto reportu pri tvorbe svojich stratégií, pri pripomienkovaní zmien v nových právnych predpisoch alebo pri návrhoch nových právnych predpisov.
- **verejná správa**, ktorá môže získať prehľad o koncepte zdravia pôdy, ukazovateľoch, ktoré je možné pri analýze zdravia pôdy sledovať, a o limitáciách indikátora pôdna organická hmota (najmä v kontexte jeho využitia v záväzných nariadeniach).

1.2 Štruktúra a metodológia reportu

Po prvej úvodnej kapitole, v ktorej uvádzame tému, nasleduje druhá kapitola o predstavení konceptu „zdravia pôdy“. V tretej kapitole predstavujeme všetky dnes najčastejšie používané indikátory zdravia pôdy a popisujeme, ktoré indikátory sledujú slovenské inštitúcie v rámci pravidelných celoslovenských monitoringov. V poslednej štvrtej kapitole detailne analyzujeme indikátor pôdnej organickej hmoty, ktorý je široko používaný akademickou obcou aj poľnohospodármi na hodnotenie zdravia pôdy.

Pri príprave tohto reportu sme využili sekundárne zdroje, medzi inými akademické publikácie (učebnice, zborníky, publikácie v odborných časopisoch a i.), prípadové štúdie či analýzy slovenských a európskych inštitúcií. Informácie sme zbierali aj priamo od slovenských pôdozncov, zahraničných expertov na zdravie pôdy a slovenských poľnohospodárov.

2. ZDRAVÁ A ODOLNÁ PÔDA



Čo je to zdravá pôda? A kedy je pôda nezdravá? Vhodnou analógiou je ľudské zdravie. V medicíne používame určité ukazovatele ľudského zdravia, ako je index telesnej hmotnosti (BMI), percento tuku, kostí či svalov, rozloženie tuku, krvný tlak, cholesterol v krvi a mnohé ďalšie. Pre všetky z nich lekári a výskumníci našli „normálne“ úrovne, kedy sme považovaní za **nie chorých**. Ale ocitnime sa mimo týchto intervalov a existuje veľká pravdepodobnosť, že niečo nie je v poriadku. Samozrejme, možno sme len jednoducho vybehli po schodoch a náš krvný tlak sa dočasne zvýšil, alebo sme sa ľahko porezali a došlo k dočasnej zmene niektorých zdravotných ukazovateľov, no ide iba o krátkodobý efekt a neovplyvnilo to naše celkové zdravie. Preto pri hodnotení zdravia hľadáme určitú dlhodobú odolnosť, „základné“ zdravie a „normálnu“ činnosť životných funkcií. Podobne ako u zdravých ľudí, **zdravá pôda je pôda, ktorá nie je chorá, t. j. jej úroveň produktivity rastlín a poskytovania ekosystémových služieb sa v dlhodobom horizonte nepohybujú mimo optimálnych intervalov**. Alebo zjednodušene povedané, pôda je zdravá vtedy, keď dosiahne agroekologické ekvilibrium a je zároveň produktívna a plní ostatné funkcie pre životné prostredie na dostatočnej úrovni (Cardoso et al., 2013).

Úrodnosť pôdy, kvalita pôdy, zdravie pôdy či menej známa tzv. „pôdna bezpečnosť“ – všetky tieto pojmy predstavujú odlišný pohľad na to, čo pôda poskytuje vlastníkom pôdy, životnému prostrediu a spoločnosti. Prirodzene, definície týchto pojmov sa prekrývajú, ale vo všeobecnosti na jednej strane existuje najužší a najlokálnejší pohľad, ktorý sa väčšinou zameriava na produktivitu pôdy (úrodnosť), alebo aký veľký výnos môžeme dosiahnuť na pozemku, a na druhej strane existuje najširší a najglobálnejší pohľad, ktorý sa zameriava na regionálne/globálne funkcie pôdy od filtrácie vody cez ochranu biotopov, sekvestráciu uhlíka až po potravinovú bezpečnosť (Lehmann et al., 2020). Stručne povedané, čím širší pojem používame, tým viac funkcií pôde priradujeme. Začíname produktivitou (úrodnosťou pôdy), pridávame ekosystémové služby (zdravie pôdy) a nakoniec pridávame sociálne funkcie, ako je sekvestrácia dodatočného uhlíka (pôda ako úložisko uhlíka) alebo poskytovanie potravinovej bezpečnosti (pôdna bezpečnosť).

Verejná diskusia a verejné politiky sa čoraz viac presúvajú od úrodnosti pôdy a kvality pôdy ku konceptu zdravia pôdy. Od oznámenia Európskej komisie (n.d.-a) o vytvorení návrhu nového zákona o zdraví pôdy v druhom kvartáli roku 2023 až po nedávne oznámenia na konferencii COP 27, kde napr. 20 ministrov poľnohospodárstva odštartovalo iniciatívu **Food and Agriculture for Sustainable Transformation** (Potraviny a poľnohospodárstvo za udržateľnú transformáciu), ktorej cieľom je podporiť prechod k udržateľnejším potravinovým systémom (UNFCCC, 2022), alebo kde sa USA, Európska komisia, Nórsko, Nemecko a Holandsko zaviazali poskytnúť 135 miliónov dolárov na financovanie programov na zvýšenie účinnosti hnojív a zlepšenie zdravia pôdy (U.S. Department of State, 2022). V rovnakom duchu pripravuje aj Ministerstvo pôdohospodárstva a rozvoja vidieka Slovenskej republiky tzv. Uhlíkovú a vodnú banku, ktorá má poľnohospodárom poskytnúť financie na zvyšovanie vodozadržnej kapacity pôdy, zvyšovanie organického materiálu v pôde, využívanie krycích plodín či znižovanie erózie pôdy (Barát, 2022), pričom platby majú byť poskytované jednak na konkrétne adaptačné opatrenia, ale aj na plochu za udržiavanie a obnovu ekosystémových služieb pôdy (Kováč, 2022).

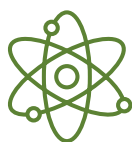
Cieľom týchto a ďalších podobných iniciatív je riešiť jeden z najpálčivejších problémov súčasného poľnohospodárstva, degradáciu pôdy. Degradácia pôdy predstavuje zníženie kvality pôdy na fyzikálnej, chemickej a/alebo biologickej úrovni, čím stráca schopnosť udržiavať svoje ekologické a ekonomické funkcie. Podľa správy FAO (2021) **The state of the world's land and water resources for food and agriculture** (Stav svetovej pôdy a vodných zdrojov pre potraviny a poľnohospodárstvo) degradáciu pôdy spôsobenú človekom pozorujeme na 35 % poľnohospodárskej pôdy na celom svete. Pozitívne nie sú ani predpovede budúceho vývoja. IPBES (2018, s. XX) vo svojej hodnotiacej správe o degradácii a obnove pôdy (**Assessment report on land degradation and restoration**) hovorí, že „do roku 2050 sa predpokladá, že degradácia pôdy a zmena klímy spolu znížia výnosy plodín v priemere o 10 percent na celom svete a až o 50 percent v určitých regiónoch“. Zníženie výnosov je však len časťou problému. Pôda poskytuje aj mnoho ďalších ekologických funkcií, tzv. ekosystémových služieb. Patria medzi ne napríklad recyklácia a ukladanie živín, regulácia zásob vody, filtrácia vody, funkcia nárazníkovej zóny v prípade veľkých zrážok, biotop pre organizmy a mnohé ďalšie. Zjednodušene povedané, degradovaná pôda má nižšie výnosy a poskytuje menej ekosystémových služieb, zatiaľ čo zdravá pôda poskytuje všetky tieto ekosystémové služby a zároveň umožňuje farmárom konštantne dosahovať dobré výnosy.

3. UKAZOVATELE ZDRAVIA PÔDY

Ukazovatele zdravia pôdy sa najčastejšie delia do troch kategórií:



chemické



fyzikálne



biologické

Aby sme si však lepšie predstavili vzťah medzi rôznymi indikátormi a tým, čo nám hovoria o zdraví pôdy, pre účely tohto reportu ukazovatele rozdelíme podľa dvoch funkcií pôdy, ktorých fungovanie popisujú produktivita rastlín a ekosystémové služby [súhrnná funkcia, do ktorej pre účely tohto reportu zahrňame vodozadržnú a filtračnú schopnosť, ochranu biodiverzity a zachytávanie uhlíka – založené na štúdiách Lehmann et al. (2020) a He et al. (2021)]. Pri každej následne uvedieme a v krátkosti popíšeme bežne používané indikátory na hodnotenie danej funkcie. Stručný prehľad ukazovateľov zdravia pôdy je v Tabuľke 1.

FUNKCIA ZDRAVEJ PÔDY	INDIKÁTOR	KRÁTKY POPIS
Produktivita rastlín	Celkový obsah [živiny, napr. dusíka]	Zásoby živín dôležitých pre rastliny: N, P, K, Ca, Mg, P, S, ale aj Cl, Fe, Mn, Zn, B, Cu či Mo
	Rastlinám prístupný [živina, napr. dusík]	Zásoby ľahko dostupných živín, často N, P, K
	Potenciálne mineralizovateľný [živina, napr. dusík]	Potenciálne dostupné živiny v krátkodobom až strednodobom horizonte, často N, P, K
	Pôdna mikrobiálna biomasa	Celková hmotnosť mikroorganizmov v pôde
	Počet dažďoviek	Nepriamy ukazovateľ pôdných podmienok
	Enzymatická aktivita	Množstvo mikroorganizmov, ktoré produkujú enzýmy
	Pôdne mikrobiálne dýchanie	Meranie pôdnej organickej hmoty, jej rozkladu a mikrobiálneho zastúpenia v pôde
	Elektrická vodivosť	Salinita/sodicita
	Obsah výmenného sodíka [%]	Salinita/sodicita
	Sodíkový absorpčný pomer	Salinita/sodicita
	pH	Kyslosť/zásaditosť
	Celkové/biologicky dostupné ťažké kovy	Najčastejšie sa meria Pb, Cd, Zn
	Využitelná vodná kapacita pôdy / Pôdna voda prístupná pre rastliny	Koľko vody má pôdny život potenciálne k dispozícii
	Hydraulická vodivosť	Ako ľahko sa môže voda pohybovať v pôde
	Rýchlosť infiltrácie	Rýchlosť infiltrácie vody z povrchu pôdy
	Vlhkosť	Množstvo vody, ktoré sa v danom momente nachádza v pôde
	Objemová hmotnosť	Úroveň zhutnenia pôdy
	Stabilita agregátov	Odolnosť pôdných agregátov voči stresovým podmienkam
	Penetračný odpor	Aké ľahké/ťažké je preniknúť do pôdy
	Miera erózie	Množstvo pôdy, ktoré sa stratí v dôsledku erózie za určité obdobie
Katiónová výmenná kapacita	Schopnosť pôdy uchovávať konkrétnu skupinu živín (katióny)	
Pôdna organická hmota	Množstvo organickej hmoty v pôde (často percento)	
Ekosystémové služby	Vodozadržná kapacita	Maximálna schopnosť pôdy zadržiavať vodu
	Mikrobiálna rozmanitosť	Ukazovateľ, ktorý zastrešuje viacero ďalších; popisuje rozmanitosť pôdných organizmov pomocou rôznych metód
	Celkový pôdny uhlík	Celkové množstvo uhlíka v pôde, organického aj minerálneho

Tabuľka 1. Zoznam indikátorov zdravia pôdy rozdelených do dvoch kategórií: indikátory súvisiace s produktivitou rastlín a indikátory týkajúce sa ekosystémových služieb.



3.1 Ukazovatele produktivity rastlín

Aby boli rastliny produktívne, potrebujú živiny, vodu, pôdne organizmy, primeranú štruktúru pôdy a primerané počasie (teplotu, slnečné žiarenie atď.). Okrem počasia súvisia všetky ostatné faktory s pôdou a väčšinu z nich dokážu poľnohospodári ovplyvňovať. Aby sme zmerali, či je v pôde dostatok živín a vody prístupných pre rastliny, dostatok pôdnych mikroorganizmov, ktoré umožňujú či zlepšujú dostatok živín pre rastliny, a či má pôda dostatočne dobrú štruktúru, aby mali rastliny dostatočnú fyzickú podporu a aby sa živiny, voda a pôdna biota mohli v pôde presúvať, používame široké spektrum ukazovateľov.

Na posúdenie výživy rastlín často meriame obsah makro- (N, P, K, Ca, Mg, S) a mikronutrientov (Cl, Fe, Mn, Zn, B, Cu, Mo) v pôdach. Toto rozdelenie je založené výlučne na množstvách týchto živín potrebných na pestovanie plodín. Nehovorí o tom, že makronutrienty sú pre rastliny dôležitejšie ako mikronutrienty (čo často naznačuje literatúra, ako napríklad Peoples et al., 2014) – hoci sú mikroživiny potrebné vo veľmi malých množstvách, ich nedostatok môže vážne narušiť produkciu plodín (Umesh et al., 2008). Na meranie zásob týchto živín v pôde môžeme merať buď ich **celkové množstvá**, alebo sa môžeme zamerať na takzvané množstvá „prístupné pre rastliny“, najmä z dôvodu, že v určitom čase sú k dispozícii iba časti celkových zásob, zatiaľ čo zvyšok je v pôde viac-menej pevne viazaný. V prípade dusíka často meriame **rastlinám prístupný dusík** vo formách NH_4 a NO_3 , ktoré sú pre rastliny ľahko prístupné (Alvarez-Campos & Evanylo, 2019). Podobne môžeme merať alebo vypočítať rastlinám prístupné množstvá iných živín.

Veľká časť živín je však viazaná v pôde a nie sú ľahko prístupné pre rastliny. V tomto prípade hrá veľkú úlohu pôdny mikrobióm, ktorý postupne „oslobodzuje“ pôdou viazané živiny a sprístupňuje ich rastlinám. Z tohto dôvodu poľnohospodári a výskumníci prišli s ukazovateľom **potenciálne mineralizovateľný dusík**, ktorý nám v podstate hovorí, aké množstvo organického dusíka očakávame, že bude k dispozícii na príjem rastlinami počas vegetačného obdobia (Collier & Ruark, 2020). Tento ukazovateľ je užitočný napríklad pre poľnohospodárov, ktorí hnoja organickými hnojivami a chcú pochopiť, koľko dusíka sa stane prístupným v priebehu sezóny (a koľko budú prípadne potrebovať pridať

vo forme minerálnych hnojív, aby boli rastliny dostatočne vyživené). Taktiež môže byť tento ukazovateľ užitočný, keď pôdne mikróby dočasne imobilizujú niektoré živiny, keď sa nimi živia – pomocou tohto ukazovateľa môžeme v takom prípade odhadnúť, aké množstvo dusíka by sa mohlo stať pre rastliny opäť prístupné počas vegetačného obdobia.

Okrem toho, že pôdne organizmy mineralizujú živiny (sprístupňujú ich rastlinám), je pôdna biota dôležitá aj v mnohých ďalších pôdnych procesoch – nie nadarmo sa hovorí, že pôda bez biológie je len geológia. Pôdne organizmy sú tiež dôležité pre tvorbu pôdnych agregátov (Saleem et al., 2019), čo následne zlepšuje odolnosť pôdy proti erózii, sekvestráciu živín a transport vody (Bronick & Lal, 2005). V pôdach sa nachádzajú aj mikroorganizmy, ktoré priamo zlepšujú výživu rastlín minerálmi (Jacoby et al., 2017) alebo môžu ovplyvniť hormonálnu rovnováhu rastlín, a tým meniť fyziológiu rastlín a alokáciu zdrojov v rámci nich (Ravanbakhsh et al., 2017). Pre toto všetko, spolu s potláčaním patogénov, potláčaním škodcov, so znižovaním vplyvu environmentálnych stresov, vzájomne prospešnými symbiotickými vzťahmi s rastlinami (Saleem et al., 2019) a mnohými ďalšími funkciami, ktoré sme ešte neodhalili, hrá pôdny mikrobióm oveľa väčšiu úlohu v zdraví pôdy a všeobecne v poľnohospodárstve, ako mu často pripisujeme. V tomto momente používame na kvantifikáciu dopadu biológie v pôde len veľmi „surové“ ukazovatele, z ktorých nevieme veľa vyčítať. Jedným z nich je pôdna mikrobiálna biomasa, čiže celková hmotnosť organizmov v pôde, ktorá sa často používa na odhad reakcie pôdnej bioty na environmentálne podmienky či poľnohospodárske postupy (DeLuca et al., 2019). Ďalším často používaným ukazovateľom je **počet dážďoviek**, keďže prítomnosť (alebo hojnosť) dážďoviek v pôdach je sama osebe indikátorom dostatočne vlhkej pôdy, dostatočne výživnej pôdy a vyvinutého pôdneho mikrobiómu (keďže dážďovky požírajú nematódy, prvoky, vírniky, baktérie alebo pôdne huby). Metaanalýza van Groenigen et al. (2014) napríklad ukázala, že keď sú v agroekosystémoch prítomné dážďovky, dochádza v priemere k 25 % zvýšeniu výnosov plodín a 23 % zvýšeniu nadzemnej biomasy. V kontexte pôdnej bioty sa používa aj indikátor **enzymatická aktivita (alebo enzýmová aktivita)**, ktorý nám nepriamo poskytuje obraz o mikroorganizmoch produkujúcich enzýmy v pôde meraním toho, aké množstvo špecifických enzýmov je vo vzorke pôdy (Attademo et al., 2021). Ďalším indikátorom súvisiacim s biologickou aktivitou je pôdne mikrobiálne dýchanie, ktoré meria, koľko pôdneho organického uhlíka sa v danom období prirodzene premenilo na CO₂, čo naznačuje úroveň mikrobiálnej aktivity, spolu s obsahom a rozkladom pôdnej organickej hmoty (Zhao et al., 2016). Existuje mnoho ďalších metód a iných ukazovateľov, ktoré sa pokúšajú poskytnúť obraz o šírke, rozmanitosti, aktivite či fungovaní mikroorganizmov v pôde, ale sú buď príliš drahé na analýzu, a teda prakticky nepoužiteľné (ukazovatele na báze DNA), alebo nie sú dostatočne špecifické, citlivé, príp. sú príliš chybové (Schloter et al., 2018).

Ďalšia skupina ukazovateľov súvisiacich s produktivitou rastlín sa zameriava na to, či sú v pôde žiaduce chemické podmienky pre život mikroorganizmov a rastlín. Často v tomto kontexte sledujeme salinitu/sodicitu, kyslosť/zásaditosť alebo polutanty v pôde. Pre zistenie úrovne salinity alebo sodicity používame ukazovatele ako **elektrická vodivosť**, **Obsah výmenného sodíka (%)** alebo **sodíkový absorpčný pomer**, ktoré nám naznačujú, či existuje hrozba degradácie pôdy v dôsledku zasolenia pôdy (Daliakopoulos et al., 2016). Na zisťovanie miery kyslosti alebo zásaditosti pôd používame ukazovateľ **pH**, pričom úroveň tohto ukazovateľa nám hovorí veľa o mnohých fyzikálnych, chemických a biologických vlastnostiach pôdy (napr. o prístupnosti živín, teda raste rastlín, ale aj množstve a aktivite mikroorganizmov) (Hartemink & Barrow, 2023). Pôda môže obsahovať aj polutanty, ako sú niektoré ťažké kovy, ktoré môžu negatívne ovplyvňovať rast rastlín a viesť k zníženiu prospešných pôdnych mikroorganizmov (Asati et al., 2016) – na meranie tohto stavu používame ukazovatele ako napr. **celková koncentrácia ťažkých kovov** (Pb, Cd, Zn) v pôde (Xie et al., 2016) alebo najnovšie aj **koncentrácia biodostupných ťažkých kovov**, keďže tento ukazovateľ môže byť presnejší pre hodnotenie reálneho rizika prijatia ťažkých kovov rastlinami (Olaniran et al., 2013).

Ďalším významným faktorom ovplyvňujúcim zdravie pôdy je voda. Bez vody by neexistoval život v pôde, rastliny by nerástli a nevedeli by sme tak hovoriť o zdravej pôde. Voda sa podieľa na všetkých hlavných pôdnych procesoch, vrá-

tane tvorby pôdy, zvetrávania, sprostredkovania pohybu plynov, rozpustených látok a častíc v pôde, vyrovnávania teploty pôdy a umožňovania metabolizmu pôdných organizmov, a teda aj rastu rastlín (Duckworth et al., 2014). Na meranie toho, či je v pôde dostatočné množstvo vody na uskutočnenie všetkých týchto procesov, môžeme použiť viacero indikátorov. Často používané sú **využitelná vodná kapacita pôdy** alebo pôdna voda prístupná pre rastliny, čo sú ukazovatele toho, koľko vody je možné uložiť na poli a zároveň udržiavať život (vypočítané ako rozdiel medzi kapacitou poľa a permanentného bodu vädnutia pôdy) (Kirkham, 2005). Ďalším ukazovateľom popisujúcim vodné podmienky v pôde je **hydraulická vodivosť**, ktorý v jednoduchosti popisuje, ako ľahko voda v póroch uniká zo zhrutnených pórových priestorov v pôde (Aird, 2019) – táto kvalita ovplyvňuje napríklad pohyb vody v pôde, infiltráciu zrážok alebo odtok vody z pôdy (DongYu et al., 2019). Na meranie rýchlosti vstupu vody z povrchu pôdy dovnútra pôdy používame ukazovateľ **rýchlosť infiltrácie** (často sa počíta ako počet minút, za ktoré sa určité množstvo vody infiltruje do pôdy). Vysoké úrovne infiltrácie sú zvyčajne výhodnejšie, pretože pôdy so zníženou infiltráciou často spôsobujú nadmerný odtok vody (nad zemou), ale v niektorých prípadoch môže byť aj vysoká úroveň infiltrácie problematická – napr. keď voda preteká pôdnym profilom príliš rýchlo a berie so sebou živiny (USDA, 1998). Ďalším často používaným ukazovateľom je **vlhkosť pôdy**, ktorá hovorí o tom, koľko vody je prítomnej v pôde v danom okamihu (v laboratórnych podmienkach, zvyčajne vypočítané ako hmotnosť vzorky pôdy mínus hmotnosť vysušenej vzorky pôdy; Walker et al., 2004). Existuje množstvo ďalších ukazovateľov, ktoré merajú schopnosť pôdy zadržiavať vodu, napr. Retenčná vodná kapacita alebo Vodozadržná kapacita, ale často sa buď používajú zameniteľne s vyššie uvedenými, alebo majú mierne zmeny v procese merania alebo logike, ale v každom prípade rozprávajú ten istý príbeh.

Aby sme porozumeli tomu, v akom prostredí rastliny rastú, musíme mať prehľad aj o stave pôdy a jej štruktúre. Jedným z najčastejšie používaných ukazovateľov štruktúry pôdy je **objemová hmotnosť**, ktorý predstavuje hmotnosť určitého množstva (objemu) pôdy. Zhrutnená pôda má tendenciu obmedzovať rast rastlín, aktivitu mikroorganizmov a vlhkosť pôdy (Indoria et al., 2020), preto je tento jednoduchý ukazovateľ medzi poľnohospodármi obľúbený. Vyššie v tejto kapitole sme hovorili o úlohe pôdných mikroorganizmov pri agregácii pôdy. Na meranie toho, ako dobre je pôda agregovaná (a teda či facilituje odolnosť voči erózii, sekvestráciu živín či transport vody a živín), používame ukazovateľ **stabilita agregátov**. Tento ukazovateľ, jednoducho povedané, hovorí o tom, do akej miery sú pôdne agregáty odolné voči fyzikálnym stresom (určuje napr. potenciálnu úroveň erózie), do akej miery umožňuje zakorenenie rastlín alebo do akej miery je pôda schopná fyzicky „chrániť“ organickú hmotu (vrátane pôdneho uhlíka) (Abiven et al., 2009). Stabilitu agregátov môžeme otestovať napríklad testom, počas ktorého ponárame väčšie, vzduchom vysušené agregáty do vody a sledujeme, či sa rozpadajú (a po akom čase) alebo držia pokope. Ďalším často používaným ukazovateľom je **penetračný odpor**, ktorý sa dá jednoducho zmerať penetrometrami a stanovuje mieru zhrutnenia pôdy (Benevenuto et al., 2020). Nepriamo môžeme pôdne podmienky analyzovať aj pomocou ukazovateľa **miera erózie**, ktorý hovorí o množstve pôdy stratenej počas určitého obdobia. A nakoniec, veľmi dobrým ukazovateľom úrodnosti pôdy je **katiónová výmenná kapacita**, ktorá určuje, ako dobre pôda drží, resp. vymieňa katióny – a spolu s nimi aj kladne nabité živiny ako Ca, Mg, K alebo NH_4 . Podľa Hazeltonovej a Murphyho (2016, s. 80) je táto schopnosť „hlavným kontrolným činiteľom stability pôdnej štruktúry, prístupnosti živín pre rast rastlín, pH pôdy a reakcie pôdy na hnojivá a iné pôdne amelioranty“.

Avšak ukazovateľ, ktorý poskytuje jeden z najlepších obrazov o celkovom stave pôdy, je **pôdna organická hmota**, pretože hrá dôležitú úlohu pri udržiavaní žiaducej štruktúry pôdy, schopnosti zadržiavať vodu a kolobehu živín, ale taktiež stimuluje mikrobiálnu aktivitu (Cotrufo & Lavallee, 2022). Produktivitu rastlín ovplyvňuje iba nepriamo, ale napriek tomu poskytuje dobrý prehľad o zdraví pôdy a tvrdí sa, že je jedným z najdôležitejších ukazovateľov zdravia pôdy – obzvlášť, ak si máte vybrať iba jeden, ktorý budete sledovať (Obalum et al., 2017). Preto sme tomuto indikátoru venovali celú kapitolu (pozri kapitolu 4. Pôdna organická hmota) s informáciami o jeho význame, o význame zmien v ňom a o jeho meraní.



3.2 Ukazovatele ekosystémových služieb

Ekosystémové služby sú akékoľvek benefity, ktoré ľudia získavajú zo životného prostredia, resp. z ekosystémov (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Mnohé z vyššie uvedených ukazovateľov sa často používajú aj ako ukazovatele ekosystémových služieb. Napríklad pokiaľ ide o funkciu uchovávaní vody a filtrácie pôdy, často používame polnú vodnú kapacitu, **vodozadržnú kapacitu** alebo permanentný bod vädnutia pôdy, aby sme zistili, koľko vody môže pole zadržať. Táto schopnosť je pre pôdu, ale aj ekosystém kľúčová, pretože predurčuje, aké závažné budú dôsledky extrémneho počasia (napr. intenzívnych zrážok) – či už ide o závažnosť erózie, odtoku živín alebo záplav. Pokiaľ ide o filtráciu alebo čistenie vody, náš prehľad nenašiel žiadne bežne používané ukazovatele pre túto funkciu pôdy, ale experimenty, ktoré merajú absorpciu alebo akumuláciu kontaminantov v pôde z vody (Tedoldi et al., 2016), možno považovať za prvý krok pre vytvorenie takýchto ukazovateľov v budúcnosti. V tomto kontexte by mohol slúžiť ako nepriamy indikátor schopnosti pôdy uvoľňovať čistú vodu do životného prostredia napríklad aj odtok živín (napr. odtok dusíka z pôdy).

Schopnosť pôdy poskytovať životné prostredie pre organizmy je jednou z jej hlavných funkcií. Táto schopnosť nie je dôležitá len z dôvodu globálnej straty biodiverzity a nášho cieľa zachovať biodiverzitu, ale aj preto, že tieto organizmy zohrávajú dôležitú úlohu vo viacerých ekosystémových službách pôdy vrátane lokálneho a globálneho kolobehu živín, manažmentu vody alebo regulácie klímy (Bach et al., 2020). Ekologickí poľnohospodári často používajú vetu „Vyživujem v prvom rade pôdne organizmy, nie rastliny“, čím zdôrazňujú dôležitosť života v pôde. Konvenčnými (ale aj ekologickými) poľnohospodárskymi postupmi nevyhnutne ovplyvňujeme pôdnu biotu a naším cieľom by preto malo byť porozumieť tomu, ako to robíme a aké sú dôsledky našich činov. Na meranie rozmanitosti pôdnych organizmov môžeme použiť buď už spomínané „surové“ ukazovatele ako mikrobiálna biomasa, mikrobiálne dýchanie či enzymatická aktivita, alebo môžeme použiť taktiež modernejší ukazovateľ **mikrobiálna rozmanitosť**. Existuje viacero metód merania mikrobiálnej rozmanitosti a každá z nich prináša výsledky s rôznou špecifitou, senzitivitou

a chybovosťou. Medzi tieto metódy patria napríklad PCR/qPCR, ktorou získavame informácie o určitých druhoch a spoločenstvách organizmov, metóda „mikrobiálnych odtlačkov prstov“ DGGE/TGGE, ktorou zisťujeme štruktúru určitej mikrobioty v komunite a jej funkčné gény, príp. analýza fosfolipidových mastných kyselín (PFLA), ktorou získavame informácie o mikrobiálnych skupinách (Schloter et al., 2017). Samozrejme, v kontexte analýzy bioty v pôde môžeme zisťovať aj počty väčších organizmov v pôde, ktoré sú vyššie v potravinovom reťazci, ako sú nematódy, mikro- a makročlánkonožce alebo dážďovky, keďže tie tiež nepriamo naznačujú úroveň pôdnej biodiverzity



Ilustrácia 1. Obsah pôdy – organická hmota vo forme mikroorganizmov, väčších organizmov či zvyškov rastlín a živočíchov, oxid uhličitý (CO₂), voda, vzduch, dôležité pôdne živiny ako dusík (N), draslík (K) a fosfor (P). Zdroj: Európska únia, 2021

„Pôda je nasledujúcou metou pri odstraňovaní uhlíka z atmosféry“ bol jeden zo sloganov Joea Bidena v predvolebnej kampani pred americkými prezidentskými voľbami v roku 2020 (Turow-Paul, 2019). V decembri 2021 Európska komisia (n.d.-b) zverejnila iniciatívu „Udržateľné uhlíkové cykly“, ktorej cieľom je okrem iného podporovať rozširovanie poľnohospodárskych postupov vedúcich k sekvestracii uhlíka. Je zrejmé, že popredné svetové inštitúcie sú presvedčené, že pôda má potenciál sekvestrovať časť uhlíka z atmosféry, a tak sa pôde čoraz častejšie pripisuje nová funkcia – sekvestrácia uhlíka. Otváranie trhov s uhlíkovými kompenzáciami farmárom je jasným odkazom pre poľnohospodárov: „Produkcia nie je odteraz vašou jedinou prioritou.“ Sekvestrácia uhlíka sa stáva novým zdrojom príjmov pre farmárov a ich pohľad na zdravie pôdy sa postupne mení – zdravá pôda sa stáva pôdou, ktorá môže produkovať rastliny, ale aj uchovávať uhlík. Ukladanie uhlíka v pôde je najlepšie a najjednoduchšie merať zisťovaním množstva uhlíka v pôde. Dnes často meriame Pôdny organický uhlík, ale tento ukazovateľ nemusí predstavovať celkové množstvo uhlíka v pôde. Pôdny anorganický uhlík je tiež prítomný v mnohých typoch pôdy, a tak je neoddeliteľnou súčasťou celkovej zásoby uhlíka v pôde (Lal, 2019; Santi et al., 2006). Preto aby sme získali úplný obraz o uhlíku v pôde, najlepším ukazovateľom je **celkový pôdny uhlík**. Jednou z najbežnejších a najjednoduchších metód merania celkového pôdneho uhlíka je spaľovanie pôdy a následné meranie emisií CO₂ z procesu.



3.3 Zbieranie dát o ukazovateľoch zdravia pôdy na Slovensku

Na Slovensku zbierame dáta o niektorých z vyššie uvedených indikátorov v rámci tzv. Agrochemického skúšania pôdy a Čiastkového monitorovacieho systému – PÔDA. Agrochemické skúšanie pôdy upravuje zákon č. 136/2000 Z. z. – zákon o hnojivách, v znení neskorších predpisov, ktorý ukladá podnikateľom v poľnohospodárstve povinnosť po vyzvaní a podľa pokynov Ústredného kontrolného a skúšobného ústavu poľnohospodárskeho v Bratislave (ÚKSÚP) vykonať alebo zabezpečiť odber pôdnych vzoriek. Toto skúšanie sa opakuje približne v päť- až šesťročných cykloch. Posledná predkladaná správa o tomto skúšaní (XIII. cyklus) spracovala výsledky analýz dokopy 190 755 pôdnych vzoriek z odberových rokov 2012 – 2018, ktoré reprezentovali výmeru 1 643 326 ha poľnohospodárskej pôdy (Maggi- oni Brázová, n.d.). V rámci tohto cyklu ASP boli na poľnohospodárskych pôdach sledované nasledovné ukazovatele:

- pH,
- prístupný fosfor,
- prístupný draslík,
- prístupný horčík,
- prístupný vápnik (pri trvalých kultúrach ako ovocné sady, vinice a chmelnice).

Čiastkový monitorovací systém – PÔDA (ČMS-P), ktorý je súčasťou Monitoringu životného prostredia Slovenska, zbiera ďalšie dáta o niektorých indikátoroch uvedených v tejto kapitole. Podľa Výskumného ústavu pôdoznalectva a ochrany pôdy (VÚPOP, n.d.) v rámci Národného poľnohospodárskeho a potravinárskeho centra, ktorý tento monitoring aj zabezpečuje a je zaň zodpovedný, „hlavným cieľom pôdneho monitoringu je dočasný zápis zmien pôdnych vlastností dôležitých z pohľadu životného prostredia“, pričom „významnou súčasťou z ČMS-P je monitoring rizikových prvkov v pôdach a možnosti ich vstupu do potravinového reťazca“. Merania v rámci tohto monitoringu prebiehajú na 318 monitorovacích poľnohospodárskych plochách na Slovensku. Zber dát prebieha spravidla každých 5 rokov,

pričom na 21 (tzv. kľúčových monitorovacích lokalitách) z celkových 318 lokalít prebieha každoročne. ČMS-P sleduje nasledujúce:

- pH/KCl, pH/CaCl₂, pH/H₂O v rôznych hĺbkach odberu,
- výmenné katióny a sorpčný komplex (Ca²⁺ výmenný, Mg²⁺ výmenný, K⁺ výmenný, Na²⁺ výmenný),
- objemová hmotnosť v rôznych hĺbkach,
- minimálna vzdušná kapacita v rôznych hĺbkach,
- minimálna kapilárna kapacita v rôznych hĺbkach,
- celková pórovitosť v rôznych hĺbkach,
- retenčná vodná kapacita v rôznych hĺbkach,
- obsah Cox (organický uhlík) v rôznych hĺbkach,
- obsah humusu v rôznych hĺbkach,
- CHK : CFK (pomer obsahu humínových kyselín a fulvokyselín),
- C : N,
- Obsah prístupného fosforu (Mehlich III.),
- Obsah prístupného draslíka (Mehlich III.),
- Obsah prístupného horčíka (Mehlich III.),
- Obsah medi vo výluhu DTPA,
- Obsah zinku vo výluhu DTPA,
- Obsah mangánu vo výluhu DTPA,
- Rizikové prvky vo výluhu lúčavky kráľovskej a AMA v rôznych hĺbkach
 - Totálny obsah arzénu v lúčavke kráľovskej,
 - Totálny obsah kadmia v lúčavke kráľovskej,
 - Totálny obsah kobaltu v lúčavke kráľovskej,
 - Totálny obsah chrómu v lúčavke kráľovskej,
 - Totálny obsah medi v lúčavke kráľovskej,
 - Totálny obsah niklu v lúčavke kráľovskej,
 - Totálny obsah olova v lúčavke kráľovskej,
 - Totálny obsah zinku v lúčavke kráľovskej.

Sledovanie ukazovateľov zdravia pôdy vo všeobecnosti v súčasnosti naberá na dôležitosti. V tomto kontexte je odporúčané sledovať prípravu zákona EÚ o zdraví pôdy, na základe ktorého sa očakáva, že bude povinnosť sledovať viaceré indikátory kvality pôdy nielen z hľadiska produkcie, ale aj (udržateľného) životného prostredia. K júnu 2023, keď bol tento report publikovaný, prebiehajú konzultácie o indikátoroch na úrovni členských štátov EÚ.

4. MERANIE ZDRAVIA PÔDY DNES – PÔDNA ORGANICKÁ HMOTA

Ukazovateľom, o ktorom sa najčastejšie hovorí, že poskytuje najkomplexnejší obraz o zdraví pôdy, je **pôdna organická hmota** (POH). Tento ukazovateľ je často významnou súčasťou metodík pri zbere dát o zdraví pôdy, a preto sme sa rozhodli detailnejšie rozobrať, čo hovorí, kde sú jeho limity a ako ho optimálne používať.

Vo všeobecnosti má pôda 4 zložky:

- minerálne látky,
- vodu,
- vzduch,
- iné plyny a organickú hmotu.

Pôdna organická hmota pozostáva zo všetkých živých rastlín, živočíchov a mikróbov v pôde a zo všetkého materiálu z mŕtvych organizmov, ktorý sa rozkladá. Ako indikátor POH zvyčajne predstavuje percento organického materiálu (živého alebo v rôznom štádiu rozkladu) v celej pôdnej hmote. Niekedy sa POH používa zameniteľne s pôdnym organickým uhlíkom (POU), ktorý sa často definuje ako stanovené percento (58 %) POH.



4.1 Význam POH

Aj keď je POH pomerne zjednodušený indikátor, môže nám pomôcť pri hodnotení stavu pôdy na viacerých úrovniach:

- *Fyzická úroveň*: štruktúra pôdy, úroveň erózie pôdy, infiltrácia vody a schopnosť zadržiavať vodu,
- *Chemická úroveň*: schopnosť pôdy uchovávať a sprístupňovať základné živiny, schopnosť viazať toxické látky, schopnosť vyrovnávať sa so zmenami kyslosti, rýchlosť rozkladu pôdnych minerálov, úroveň ukladania uhlíka (ako indikátor mitigácie klimatickej zmeny),
- *Biologická úroveň*: či majú pôdne organizmy dostatok potravy (aktivita mikroorganizmov), miera biodiverzity (Wander, 2004).

Je dôležité poznamenať, že POH sa líši v rôznych klimatických podmienkach, líši sa v závislosti od typu pôdy, dokonca sa môže líšiť v rôznych častiach toho istého poľa. Väčšinou je to spôsobené rýchlosťou rozkladu a následnej oxidácie organickej hmoty. Akákoľvek poľnohospodárske postupy alebo prírodné podmienky, ktoré vedú k „odhaleniu“ predtým chránenej organickej hmoty a následnému prevzdušneniu pôdy, budú mať za následok stratu POH (Gasch & DeJong-Hughes, 2019). Z rovnakého dôvodu pôda, ktorá má viac vlhkosti a menší prístup ku kyslíku, bude mať prirodzene vyššie hladiny POH ako pôda, ktorá je lepšie prevzdušnená (zjednodušene, POH sa akumuluje vo vlhkejšej pôde). Rozdiely je možné vidieť aj v menšom meradle, na jedinom poli – jedna časť poľa, ktorá je vlhkejšia, môže mať vyššie úrovne POH ako iná, suchšia časť toho istého poľa. Podobne ak organizmy v pôde majú dobré podmienky na rozklad organickej hmoty (napr. vyššia teplota), POH je často nižšie, pretože ju rozkladajú oveľa rýchlejšie ako za menej priaznivých podmienok.

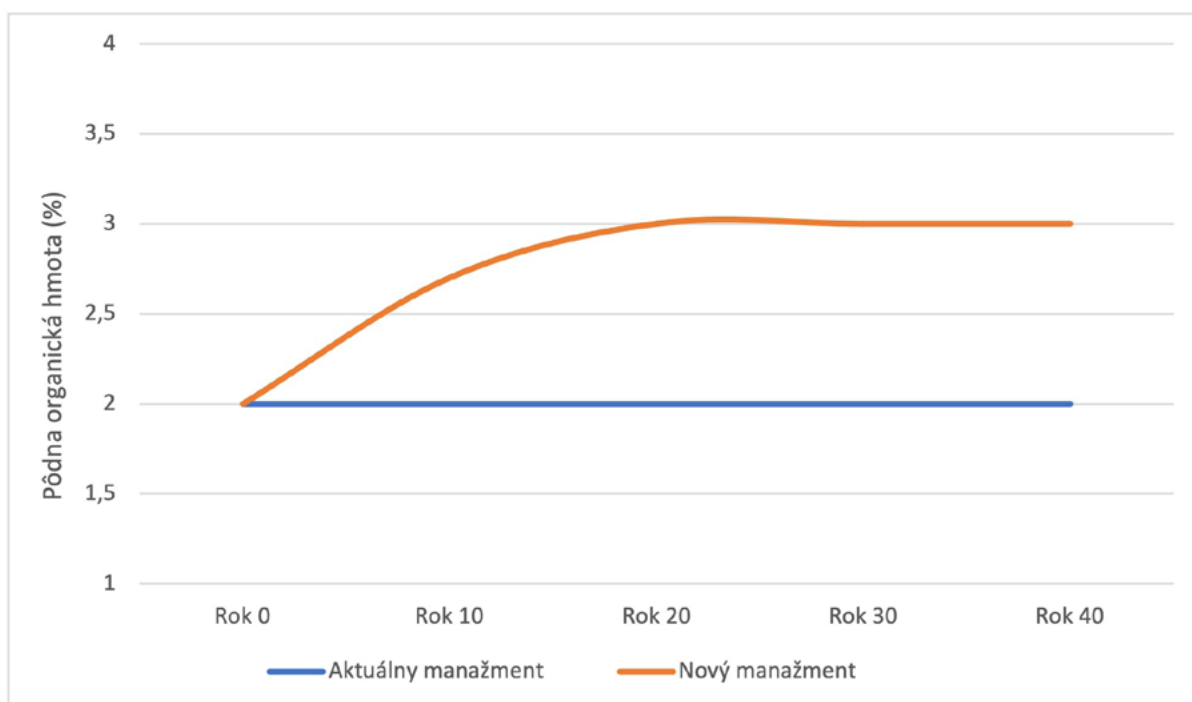
Ako percento nám POH jednoducho poskytuje odhad toho, do akej miery vzorka pôdy pozostáva z organickej hmoty. Preto je hodnota POH sama osebe slabým ukazovateľom zdravia pôdy. Avšak v spojení s ďalšími metrikami a porozu-

mením kontextu, v ktorom určitá hodnota POH existuje, môže byť veľmi cenným ukazovateľom zdravia pôdy. Ak by sme napríklad hodnotili POH ako indikátor degradácie pôdy, podľa Obalum et al. (2017) môže byť vhodnejšie použiť zložky POH, ako sú jej mikrobiálne alebo labilné frakcie, pretože sa menia rýchlejšie ako POH a môžu poskytnúť poľnohospodárovi informáciu o degradácii rýchlejšie, ešte v jej skorých fázach. Obalum et al. (2017) ďalej tvrdia, že ak by farmár mal použiť iba jeden indikátor degradácie pôdy, POH je najlepší, ale namiesto používania absolútnej hodnoty odporúčajú použiť zmenu POH v čase a potenciálne POH (saturáciu, resp. maximálne dosiahnuteľné POH).



4.2 Zmeny v POH

POH sa stráca (odchádza z pôdy) buď vo forme plynu, keď oxiduje alebo prchá (Roper et al., 2019), alebo v pevnej forme, keď napríklad voda alebo vzduch erodujú pôdu. Na druhej strane, zdrojom novej organickej hmoty v pôdach je väčšinou fotosyntéza nadzemných rastlín či autotrofných baktérií (Tate, 1987), ale taktiež pridávanie organického materiálu do pôdy samotnými poľnohospodármi. Zpracovanie nového organického materiálu (napr. vo forme organických hnojív) do pôdy rýchlo zvýši hladiny POH (krátkodobo), ale zatiaľ nie je úplne jasné, ako takéto praktiky ovplyvňujú dlhodobé hladiny POH (Šimon & Czakó, 2014). Veľa záleží na pridávanom organickom materiáli a spôsobe jeho aplikácie. Je to z dôvodu, že pôdny mikrobióm časom rozloží pridaný organický materiál a POH sa nakoniec vráti do svojho ekvilibria. Ak by sme však pravidelne pridávali nový organický materiál a/alebo zmenili pôdny manažment (napríklad by sme prestali obrábať pôdu), zmenilo by sa aj ekvilibrium – a s ním aj naše dlhodobé POH (pozri Obrázok 1 pre vysvetlenie konceptu).



Graf 1. Ilustratívny príklad očakávanej zmeny organickej hmoty v pôde v čase, ktorá je výsledkom zmeny poľnohospodárskych postupov zameraných na zvýšenie POH. Pri aktuálnom manažmente poľnohospodár pokračuje v pôvodných poľnohospodárskych postupoch. V rámci nového manažmentu poľnohospodár implementuje postupy zvyšujúce POH v roku 0 a pokračuje na dobu neurčitú. Počas prvých 30 rokov nový manažment pomaly zvyšuje úroveň POH, po čom dosahuje nové ekvilibrium. Po 30. roku nemá nový manažment badateľný pozitívny vplyv na POH.

Okrem konceptu ekvilibria POH ilustrovaného Grafom 1 existuje aj koncept saturácie pôdneho organického uhlíka, resp. maximálneho potenciálu pôdy akumulovať uhlík. Z hľadiska POH by to znamenalo, že (i) keď zvyšujeme POH v pôde, postupom času sa stáva ťažšie a ťažšie ho dodatočne zvyšovať a (ii) že v určitom bode dosiahneme plnú saturáciu pôdy uhlíkom a POH už nebude možné efektívne zvýšiť. Stewart et al. (2008) zistili, že niektoré časti POH vykazovali známky toho, že neprichádza k ich saturácii, zatiaľ čo iné (napr. fyzicky, chemicky a biologicky chránené časti) vykazovali známky saturácie. Je preto možné, že niektoré časti POH nepodliehajú saturácii.



4.3 Meranie POH

Keď sa na organickú hmotu v pôde pozrieme detailnejšie, skladá sa z uhlíka, vodíka, kyslíka, dusíka, fosforu a ďalších živín. Na meranie POH v pôdach sa väčšinou používajú dve rôzne metódy; (i) odhadnutie špecifickej frakcie (napr. uhlíkovej frakcie) a jej vynásobenie konverzným pomerom na zistenie úrovne POH a (ii) použitím takzvanej metódy „straty žiháním“, počas ktorej meriame stratu hmotnosti suchej pôdy pri teplotách, ktoré očakávame, že zbavia pôdu POH (a iba POH).

Metódy založené na frakciách najčastejšie zahŕňajú postup Walkley-Black, postup automatizovaného suchého spaľovania alebo kolorimetriu humínových látok. Postup Walkley-Black meria špecifickú časť pôdneho organického uhlíka, rekalcitrantný uhlík, pomocou chemického oxidantu (Roper et al., 2019). Bežnejšie dnes odhadujeme pôdny organický uhlík pomocou automatizovaného suchého spaľovania, pri ktorom zohrievame a prevzdušňujeme pôdu, až kým sa všetka organická hmota nerozpadne a uhlík sa uvoľní vo forme CO_2 . Pri prevzdušňovanom suchom spaľovaní meriame uvoľnený CO_2 a toto číslo prevádzame na pôdny organický uhlík, ktorý bol prítomný vo vzorke. Nakoniec, kolorimetria humínových látok meria špecifickú frakciu POH, humínové kyseliny, extrahuje ich a potom extrapoluje výsledky na odhad úrovne POH. Problémom všetkých týchto metód je extrapolačná časť, resp. používanie „všeobecne akceptovaných“ konverzných koeficientov na získanie POH zo špecifickej frakcie POH, či už ide o pôdny organický uhlík alebo humínové látky. Pôdy sú dynamické systémy, takže sa mení aj ich obsah spolu s obsahom organickej hmoty. Vo všeobecnosti napríklad pri prevode pôdneho organického uhlíka na POH používame konverzný koeficient 1,724, čo znamená, že vychádzame z predpokladu, že POH obsahuje 58 % pôdneho organického uhlíka (Gasch & DeJong-Hughes, 2019). Výskum však ukazuje, že obsah pôdneho organického uhlíka v POH sa pohybuje od 50 do 66 % POH (Roper et al., 2019). Podobne aj obsah humínových kyselín, ktoré meriame pomocou metódy kolorimetrie humínových látok, sa bude líšiť v rôznych typoch pôd, podnebia a pod.

Aby sa predišlo akejkoľvek konverzii, bola vyvinutá metóda **strata žíhaním**. Strata žíhaním odhaduje POH priamo tepelným rozkladom POH a porovnaním hmotnosti vzorky pôdy pred žíhaním a po ňom. Táto metóda je veľmi rozšírená a všeobecne akceptovaná, pretože, ako tvrdia Bensharada et al. (2022), je lacná a jednoduchá. Na druhej strane je aj časovo náročná, poskytuje len informácie pre konkrétne teploty, vyžaduje si veľkú vzorku a je deštruktívna (Bensharada et al., 2022). Najväčšou kritikou tejto metódy je však to, že nemá celosvetový štandardný protokol (Hoogsteen et al., 2018), a tak výsledky z rôznych meraní nemusia byť porovnateľné. Je to preto, že keď zvýšime teplotu pôdy, a spolu s ňou aj organickej hmoty, môžeme stratiť napríklad aj anorganický uhlík alebo tzv. „štruktúralnu vodu“ (ktoré nie sú súčasťou POH) – a ak nepoužívame rovnaký štandardizovaný protokol, môžeme ľahko skončiť s neporovnateľnými výsledkami. V ich analýze metódy straty žíhaním Salehi et al. (2011) odporúčajú túto metódu najmä v prípadoch, keď potrebujeme skôr lacný a hrubý odhad POH ako presné výsledky. Pre nedostatky tejto metódy Bensharada et al. (2022, s. 191) navrhujú radšej použiť takzvanú termogravimetrickú analýzu, pretože je „menej časovo náročná, zahŕňa automatizovanú manipuláciu so vzorkami (minimalizuje chyby operátora) a môže poskytnúť spoľahlivé údaje aj o vzorkách oveľa menších, ako sú potrebné pre metódu straty žíhaním“.

5. DISKUSIA



Je zrejmé, že zdravá pôda prináša benefity nielen pre poľnohospodárov, ale aj pre spoločnosť, a preto treba zdraviu pôdy venovať náležitú pozornosť. Existuje niekoľko všeobecne odporúčaných agronomických postupov, ktorých cieľom je udržiavať a/alebo zlepšovať zdravie pôdy. Medzi tie, ktoré sa pravidelne spomínajú, patrí redukcia orby, zvyšovanie vstupov organickej hmoty, používanie krycích plodín, striedanie plodín, znižovanie používania pesticídov či „smart“ manažment živín. Avšak poľnohospodári majú vybudované vlastné know-how, optimalizovali svoje procesy na maximalizáciu výnosov a tvrdo pracujú na ich udržaní. Navyše, implementovať nový spôsob farmárčenia si vyžaduje veľa úsilia, času a peňazí. Na prekonanie týchto bariér je potrebné prísť s konkrétnym plánom, ako zamerať pozornosť poľnohospodárov na zdravie pôdy a podporiť ich v akýchkoľvek opatreniach, ktoré ho zlepšujú, resp. udržiavajú na vysokej úrovni. Týmto reportom si kladieme za cieľ prispieť do diskusie na tému zvyšovania a udržiavania zdravia poľnohospodárskej pôdy na Slovensku. Naše zistenia by sa dali zhrnúť do štyroch bodov.

1. Kvantifikovať zdravie pôdy pomocou konkrétnych ukazovateľov zdravia pôdy je kľúčové.

Meraním a správnym interpretovaním určitých parametrov pôdy vieme s relatívnou istotou povedať, či poľnohospodár degraduje pôdu, udržiava stav pôdy na rovnakej úrovni alebo stav pôdy zlepšuje. Iba po analýze kvantifikovateľných ukazovateľov vie poľnohospodár vyvodiť relevantné závery napríklad o vhodnosti jeho postupov v kontexte zdravia pôdy. Rovnako, iba po analýze kvantifikovateľných ukazovateľov vedia ďalší stakeholderi (napr. štát) spravodlivo odmeňovať poľnohospodárov za prípadné zlepšovanie zdravia pôdy či udržiavanie vysokého zdravia pôdy. Existuje veľké množstvo ukazovateľov, ktoré sa na takéto analýzy dá použiť (pozri Kapitulu 3). Aby sme vedeli odhadnúť stav poskytovania všetkých ekosystémových služieb pôdou, nielen produkcie, potrebujeme rozšíriť množstvo sledovaných ukazovateľov – aktuálne totiž sledujeme výrazne viac ukazovateľov produktivity rastlín ako ukazovateľov ekosystémových služieb. Správna kombinácia sledovaných indikátorov je kľúčová pre minimalizáciu nákladov a maximalizáciu získaných informácií o stave jednak produkčnej funkcie pôdy, ale aj ďalších funkcií pôdy (zadržiavanie a purifikovanie vody, sekvestrácia uhlíka, ochrana pred eróziou a ďalšie).

V kontexte používania rozšíreného ukazovateľa pôdna organická hmota (POH) pri hodnotení zdravia pôdy je dôležité brať do úvahy všetky jeho výhody a limitácie. Tento ukazovateľ je spojený s mnohými funkciami pôdy a môže nám poskytnúť celkový, široký obraz o stave pôdy. Zvyšovanie POH zvyčajne v dlhodobom horizonte zlepšuje produktivitu pôdy a zvyšuje výnosy, čo z neho robí cenný ukazovateľ, ktorý je výhodné sledovať. Z našej analýzy vyplýva, že POH je významne ovplyvnené klímou, typom pôdy a prírodnými podmienkami. Značnou limitáciou POH ako ukazovateľa zdravia pôdy je, že v súčasnosti neexistuje bežne použiteľná metóda merania, ktorá by ho dokázala presne zmerať. Z toho dôvodu odporúčame používať POH ako výkonnostný ukazovateľ zlepšenia alebo zhoršenia zdravia pôdy, napr. pri dlhodobej analýze rôznych poľnohospodárskych postupov. Taktiež odporúčame vnímať indikátor POH v kontexte maximálneho potenciálneho POH (saturácie), pretože v mnohých prípadoch existuje bod nasýtenia POH, po ktorom je zvyšovanie ekvilibria POH príliš náročné.

2. Zlepšovanie a udržiavanie zdravia slovenskej pôdy je téma, ktorá si vyžaduje zapojenie všetkých relevantných stakeholderov.

Zdravie pôdy nie je iba témou pedológov, nie je to iba téma agronómov, nie je to iba teoretická téma univerzitných profesorov a nie je to iba téma ekologicky zameraných neziskových organizácií. Rovnako to nie je iba téma Ministerstva pôdohospodárstva a rozvoja vidieka SR, ale napríklad aj Ministerstva životného prostredia SR, Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu SR, príp. aj Ministerstva zdravotníctva SR či Ministerstva investícií, regionálneho rozvoja a informatizácie SR. Téma zdravia pôdy je multidisciplinárna a v kontexte štátu medzirezortná, preto akékoľvek aktivity, ktoré majú zvýšiť zdravie slovenskej pôdy, musia zahŕňať všetkých relevantných stakeholderov. Od návrhu vízie, cesty, ako sa k tejto vízii dostaneme, až po realizáciu jednotlivých krokov k spoločnej vízii.

Významnou časťou tejto vízie musí byť aj výskum zdravia pôdy. Aktuálne porozumenie pôde je limitované – aby sme preto prehľbovali naše porozumenie pôde, je potrebný ďalší výskum pôdných procesov, prepojení a interakcií medzi jednotlivými zložkami pôdy a taktiež vplyvu rôznych poľnohospodárskych postupov na zdravie pôdy. V tomto kontexte je nevyhnutné investovať do slovenského výskumu pôdy a pôdných procesov a spolupracovať so zahraničnými univerzitami a inštitúciami. Neoddeliteľnou súčasťou tohto výskumu musia byť aj poľnohospodári. Na slovenských farmách je k dispozícii obrovské množstvo dát a informácií, ktoré nie sú analyzované a majú veľký potenciál zlepšiť poľnohospodárstvo na Slovensku.

3. Efektívne pouniverzitné vzdelávanie poľnohospodárov je dôležité pre rozšírenie vnímania dôležitosti témy zdravia pôdy, prezentáciu benefitov zdravej pôdy a pomoc s implementáciou postupov, ktoré zvyšujú zdravie pôdy.

Pôda je extrémne dôležitým prvkom prírodných ekosystémov a zásadne ovplyvňuje život bežných ľudí, pričom poľnohospodári sú jej hlavnými správcami. Efektívne dlhodobé vzdelávanie poľnohospodárov počas ich produktívneho veku je nevyhnutné, aby boli schopní maximalizovať všetky funkcie, ktoré pôda ľuďom poskytuje, nielen tú produktívnu. Toto vzdelávanie by malo zahŕňať široké spektrum tém vrátane pôdnej biológie, chémie, agroekológie, špecifických pôdných procesov a ich interakcií. Rovnako je dôležité poskytnúť poľnohospodárom nástroje a vedomosti potrebné na interpretáciu a využitie dát získaných z meraní ukazovateľov zdravia pôdy. Vzdelávacie programy a materiály by mali byť prispôbené konkrétnym potrebám a situácii poľnohospodárov, a to vrátane prístupu k financovaniu a technickému vybaveniu. Tieto vzdelávacie iniciatívy by mali byť koordinované s výskumnými inštitúciami a organizáciami zaoberajúcimi sa ochranou pôdy, aby sa zabezpečila ich vedecká presnosť a relevancia. Za najefektívnejšiu formu vzdelávania považujeme výmenu skúseností a osvedčených postupov navzájom medzi poľnohospodármi.

Degradácia pôdy je jedným z najpálčivejších problémov súčasného poľnohospodárstva, a preto je nevyhnutné venovať zlepšovaniu a udržiavaniu zdravia slovenskej pôdy náležitú pozornosť. Vyššie uvedené odporúčania smerujú ku kompletnému systému práce so zdravím pôdy s jasnou víziou a stratégiou, jasne rozdelenými rolami a jasne definovanými merateľnými cieľmi. Prišiel čas na to, aby sme zdravie pôdy začali brať vážne a tému uchopili komplexne – iba tak sa efektívne dostaneme k dlhodobo udržateľným výsledkom, z ktorých budú profitovať všetci občania Slovenskej republiky, poľnohospodári aj životné prostredie.

REFERENCIE

- Abiven, S., Menasseri, S., & Chenu, C. (2009). The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability – A literature analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, **41**(1), pp. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.09.015>
- Aird, P. (2019). Chapter 3 - Deepwater Pressure Management. *Deepwater Drilling*, pp. 69-109. Gulf Professional Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102282-5.00003-X>
- Alvarez-Campos, D., & Evanylo, G. K. (2019). Plant Available Nitrogen Estimation Tools for a Biosolids-Amended, Clayey Urban Soil. *Soil Science Society of America Journal*, **83**, 808-816. <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.11.0441>
- Asati, A., Pichhode, M., & Nikhil, K. (2016). Effect of heavy metals on plants: An overview. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management*, **5**(3), pp. 56-66. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27583.87204>
- Attademo, A. M., Sanchez-Hernandez, J. C., Lajmanovich, R. C., Repetti, M. R., & Peltzer, P. M. (2021). Enzyme Activities as Indicators of Soil Quality: Response to Intensive Soybean and Rice Crops. *Water, Air, & Soil Pollution*, **232**, 295. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05211-2>
- Bach, E. M., Ramirez, K. S., Fraser, T. D., & Wall, D. H. (2020). Soil Biodiversity Integrates Solutions for a Sustainable Future. *Sustainability*, **12**(7), 2662. <https://doi.org/10.3390/su12072662>
- Barát, A. (2022). Podari sa ozdraviť najsilnejšiu banku? Pôdu? In: *Pravda*, 23. september. [cit. 2023-06-06], Dostupné z: <https://zurnal.pravda.sk/rozhovory/clanok/640109-podari-sa-ozdravit-najsilnejšiu-banku-podu/>
- Benevenuto, P. A. N., de Moraes, E. G., Souza, A. A., Vasques, I. C. F., Cardoso, D. P., Sales, F. R., Severiano, E. C., Homem, B. G. C., Casagrande, D. R., & Silva, B. M. (2020). Penetration resistance: An effective indicator for monitoring soil compaction in pastures. *Ecological Indicators*, **117**, 106647. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106647>
- Bensharada, M., Telford, R., Stern, B. & Gaffney, V. (2022). Loss on ignition vs. thermogravimetric analysis: a comparative study to determine organic matter and carbonate content in sediments. *Journal of Paleolimnology*, **67**, 191-197. <https://doi.org/10.1007/s10933-021-00209-6>
- Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma*, **124**(1-2), pp. 3-22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>
- Cardoso, E., Vasconcelos, R., Bini, D., Miyauchi, M., Alcantara, C., Alves, P., de Paula, A., Nakatani, A., Pereira, J., & Nogueira, M. (2013). Soil health: Looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health?. *Scientia Agricola*, **70**, pp. 219-303. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000400009>
- Collier, S. M., & Ruark, M. D. (2020). Pre-incubation Soil Handling Can Influence Comparability of Potentially Mineralizable Nitrogen Results. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **52**(10), 1121-1131. <https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1872607>
- Crippa, M., Solazzo, E., Guizzardi, D., Monforti-Ferrario, F., Tubiello, F. N., Leip, A. (2021). Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nature Food*, **2**, 198-209. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00225-9>
- Daliakopoulos, I. N., Tsanis, I. K., Koutroulis, A., Kourgialas, N. N., Varouchakis, A. E., Karatzas, G.P., & Ritsema, C. J. (2016). The threat of soil salinity: A European scale review. *Science of The Total Environment*, **573**, pp. 727-739. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.177>
- DeLuca, T. H., Pingree, M. R. A., & Gao, S. (2019). Chapter 16 – Assessing soil biological health in forest soils. *Developments in Soil Science*, **36**, pp. 397-326. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63998-1.00016-1>
- DongYu, J., Jun, W., Xin, W., & ZuoLiang, W. (2019). Soil hydraulic conductivity and its influence on soil moisture simulations in the source region of the Yellow River. *Science in Cold and Arid Regions*, **11**(5), pp. 360-370. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1226.2019.00360>
- Duckworth, O. W., Heitman, J. L. & Polizzotto, M. L. (2014) Soil Water: From Molecular Structure to Behavior. *Nature Education Knowledge* **5**(8):1. [cit. 2022-12-29], Dostupné z: <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/soil-water-from-molecular-structure-to-behavior-122155909/>
- Európska komisia. (n.d.-a). **Soil health – protecting, sustainably managing and restoring EU soils**. [cit. 2022-12-02], Dostupné z: https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13350-Soil-health-protecting-sustainably-managing-and-restoring-EU-soils_en
- Európska komisia. (n.d.-b). **Carbon Farming**. [cit. 2022-12-26], Dostupné z: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/sustainable-carbon-cycles/carbon-farming_en
- Európska únia. (2021). **Soil health: Reaping the benefits of healthy soils, for food, people, nature and the climate**. [cit. 2023-06-06], Dostupné z: <https://cordis.europa.eu/article/id/429351-soil-health-reaping-the-benefits-of-healthy-soils-for-food-people-nature-and-the-climate>
- FAO. (2021). The state of the world's land and water resources for food and agriculture – Systems at breaking point. *Synthesis report 2021*. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb7654en>
- Gasch, C., & DeJong-Hughes, J. (2019). **Soil Organic Matter Does Matter**. [cit. 2022-12-08], Dostupné z: <https://extension.umn.edu/soil-management-and-health/soil-organic-matter-cropping-systems>
- Hartemink, A.E., & Barrow, N.J. (2023). Soil pH - nutrient relationships: the diagram. *Plant and Soil*, **486**, pp. 209-215. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05861-z>
- Hazelton, P. A., & Murphy, B. (2016). Cation Exchange Capacity. In: *Interpreting Soil Test Results: What do all the numbers mean?* (3rd edition). CSIRO Publishing.

- He, M., Xiong, X., Wang, L., Hou, D., Bolan, N. S., Ok, Y. S., Rinklebe, J., & Tsang, D. C. W. (2021). A critical review on performance indicators for evaluating soil biota and soil health of biochar-amended soils. *Journal of Hazardous Materials*, **414**, 125378. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125378>
- Hoogsteen, M. J. J., Lantinga, E. A., Bakker, E. J., & Titttonell, P. A. (2018). An Evaluation of the Loss-on-Ignition Method for Determining the Soil Organic Matter Content of Calcareous Soils, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **49**:13, 1541-1552, DOI: 10.1080/00103624.2018.1474475
- Indoria, A. K., Sharma, K. L., & Reddy, K. S. (2020). Chapter 18 - Hydraulic properties of soil under warming climate. *Climate Change and Soil Interactions*, pp. 473-508. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818032-7.00018-7>
- IPBES. (2018). The IPBES assessment report on land degradation and restoration. Montanarella, L., Scholes, R., & Brainich, A. (eds.). Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn, Germany. 744 pages. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3237392>
- IUCN. (2023). *The IUCN Red List of Threatened Species*. [cit. 2023-05-25], Dostupné z <https://www.iucnredlist.org>
- Jacoby, R., Peukert, M., Succurro, A., Koprivova, A., & Kopriva, S. (2017). The Role of Soil Microorganisms in Plant Mineral Nutrition—Current Knowledge and Future Directions. *Front. Plant Science*, **8**, 1617. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01617>
- Kirkham, M. B. (2005). 8 - Field Capacity, Wilting Point, Available Water, and the Non-Limiting Water Range. *Principles of Soil and Plant Water Relations*, pp. 101-115. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012409751-3/50008-6>
- Kováč, M. (2022). *PÔDA - UHLÍKOVÁ A VODNÁ BANKA KRAJINY, Konceptia oceňovania a financovania ekosystémových služieb pôdy a krajiny v pôsobnosti MPRV SR a budovania pôdohospodárskej znalostnej bázy NEXUS*. [cit. 2023-06-09], Dostupné z: <https://web.vucke.sk/files/sk/kompetencie/regionalny-rozvoj/program-obnovy-krajiny/poda-uhlikova-vodna-banka-krajiny.pdf>
- Lal, R. (2019). Carbon Cycling in Global Drylands. *Curr Clim Change Rep*, **5**, 221-232. <https://doi.org/10.1007/s40641-019-00132-z>
- Lehmann, J., Bossio, D. A., Kögel-Knabner, I., & Rillig, M. C. (2020). The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*. *Nat Rev Earth Environ* **1**, 544-553. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>
- Maggioni Brázová, I. (n.d.). *VÝSLEDKY AGROCHEMICKÉHO SKÚŠANIA PÔD NA SLOVENSKU V ROKOCH 2012 – 2018 XIII. cyklus ASP*. [cit. 2023-06-02], Dostupné z: <https://www.uksup.sk/ophoze-informacie-referatu-asp>
- Maxwell, S., Fuller, R., Brooks, T. et al. (2016). Biodiversity: The ravages of guns, nets and bulldozers. *Nature*, **536**, 143-145. DOI: <https://doi.org/10.1038/536143a>
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press. [cit. 2023-06-03], Dostupné z: <http://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>
- Obalum, S. E., Chibuike, G. U., Peth, S., & Ouyang, Y. (2017). Soil organic matter as sole indicator of soil degradation. *Environmental monitoring and assessment*, **189**(4), 176. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5881-y>
- Olaniran, A. O., Balgobind, A., & Pillay, B. (2013). Bioavailability of heavy metals in soil: impact on microbial biodegradation of organic compounds and possible improvement strategies. *International journal of molecular sciences*, **14**(5), 10197-10228. <https://doi.org/10.3390/ijms140510197>
- Peoples, M. B., Richardson, A. E., Simpson, R. J., & Fillery, I. R. P. (2014). Soil: Nutrient Cycling. In: N. K. van Alfen (Eds.) *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems* (pp. 197-210). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00094-2>
- Poore, J., & Nemecek, T. (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. In: *Science*, **360**, 987-992. <https://doi.org/10.1126/science.aag0216>
- Ravanbakhsh, M., Sasidharan, R., Voesenek, L. A. C. J., Kowalchuk, G. A., & Jousset, A. (2017). ACC deaminase-producing rhizosphere bacteria modulate plant responses to flooding. *Journal of Ecology*, **105**(4), 979-986. <http://www.jstor.org/stable/45028606>
- Roper, W. R., Robarge, W. P., Osmond, D. L., & Heitman, J. L. (2019). Comparing Four Methods of Measuring Soil Organic Matter in North Carolina Soils. *Soil Science Society of America Journal*, **83**: 466-474. <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.03.0105>
- Saleem, M., Hu, J., & Jousset, A. (2019). More than the sum of its parts: Microbiome biodiversity as a driver of plant growth and soil health. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, **50**(1), pp. 145-168. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110617-062605>
- Santi, C., Certini, G., & D'Acqui, L. P. (2006). Direct Determination of Organic Carbon by Dry Combustion in Soils with Carbonates. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **37**(1-2), 155-162. <https://doi.org/10.1080/00103620500403531>
- Salehi, M. H., Hashemi Beni, O., Beigi Harchegani, H., Esfandiarpour Borujeni, I., & Motaghian, H. R. (2011). Refining soil organic matter determination by loss-on-ignition. *Pedosphere*, **21**(4): 473-482. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(11\)60149-5](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(11)60149-5)
- Schloter, M., Nannipieri, P., Sørensen, S.J., van Elsland, J. D. (2018). Microbial indicators for soil quality. *Biology and Fertility of Soils*, **54**, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s00374-017-1248-3>
- Šimon T., & Czaková A. (2014). Influence of long-term application of organic and inorganic fertilizers on soil properties. *Plant Soil Environ.*, **60**(7):314-319. <https://doi.org/10.17221/264/2014-PSE>
- Stewart, C.E., Plante, A.F., Paustian, K., Conant, R.T., & Six, J. (2008). Soil Carbon Saturation: Linking Concept and Measurable Carbon Pools. *Soil Science Society of America Journal*, **72**: 379-392. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0104>
- Tate, R. L. (1987). *Soil Organic Matter – Biological and Ecological Effects*. John Wiley and Sons, New York.
- Tedoldi, D., Chebbo, G., Pierlot, D., Kovacs, Y., & Gromaire, M. (2016). Impact of runoff infiltration on contaminant accumulation and transport in the soil/filter media of Sustainable Urban Drainage Systems: A literature review. *Science of The Total Environment*, **569-570**, pp. 904-

926. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.215>

- Turow-Paul, E. (2019). Pete Buttigieg's Favorite Ice Cream Flavor Is So Millennial And Why That Matters. In: **Forbes**, 31. júl. [cit. 2022-12-28], Dostupné z: <https://www.forbes.com/sites/eveturowpaul/2019/07/31/what-mayor-petes-favorite-ice-cream-flavor-is-and-why-it-matters/?sh=25af498a2f4a>
- Umesh, C. G., Kening, W. U., & Siyuan, L. (2008). Micronutrients in soils, crops, and livestock. **Earth Science Frontiers**, 15(5), pp. 110-125. [https://doi.org/10.1016/S1872-5791\(09\)60003-8](https://doi.org/10.1016/S1872-5791(09)60003-8)
- UNFCCC. (2022, December 5). **Governments Step Up Action on Agriculture and Food Security at COP27**. [cit. 2022-12-06], Dostupné z: <https://unfccc.int/news/governments-step-up-action-on-agriculture-and-food-security-at-cop27>
- USDA. (1998). **Soil Quality Indicators: Infiltration**. [cit. 2022-12-10], Dostupné z: <https://www.envirothonpa.org/documents/Infiltration.pdf>
- U.S. Department of State. (2022, November 12). **Global Fertilizer Challenge Raises \$135 million for Fertilizer Efficiency and Soil Health Measures to Combat Food Insecurity**. [cit. 2022-11-30], Dostupné z: <https://www.state.gov/global-fertilizer-challenge-raises-135-million-for-fertilizer-efficiency-and-soil-health-measures-to-combat-food-insecurity/>
- van Groenigen, J. W., Lubbers, I. M., Vos, H. M. J., Brown, G. G., De Deyn, G. B., & van Groenigen, K. J. (2014). Earthworms increase plant production: a meta-analysis. **Scientific Reports**, 4, 6365. <https://doi.org/10.1038/srep06365>
- VÚPOP. (n.d.). Čiastkový monitorovací systém - PÔDA [CMSP databáza]. [cit. 2023-05-31], Dostupné z: http://www.podnemapy.sk/portal/prave_menu/cms_p/cms_p.aspx
- Walker, J. P., Willgoose, G. R., & Kalma, J. D. (2004). In situ measurement of soil moisture: a comparison of techniques. **Journal of Hydrology**, 293(1-4), pp. 85-99. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.01.008>
- Wander, M. (2004). **Soil Organic Matter Fractions and Their Relevance to Soil Function**. [cit. 2022-12-10], Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/242450025_3_Soil_Organic_Matter_Fractions_and_Their_Relevance_to_Soil_Function
- Wuebbles, D. J., Fahey, D. W., Hibbard, K. A., DeAngelo, B., Doherty, S., Hayhoe, K., Horton, R., Kossin, J. P., Taylor, P. C., Waple, A. M. & Weaver, C. P. (2017). Executive summary. In: **Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I** [Wuebbles, D. J., Fahey, D. W., Hibbard, K. A., Dokken, D. J., Stewart, B. C., & Maycock, T. K. (eds.)]. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, p. 12-34. <http://doi.org/10.7930/J0D5CTG>
- WWF. (2020). **Living Planet Report 2020 - Bending the curve of biodiversity loss**. Almond, R. E. A., Grooten M. & Petersen, T. (Eds). WWF, Gland, Switzerland., [cit. 2023-05-25], Dostupné z: <https://f.hubspotusercontent20.net/hubfs/4783129/LPR/PDFs/ENGLISH-FULL.pdf>
- Xie, Y., Fan, J., Zhu, W., Amombo, E., Lou, Y., Chen, L., & Fu, J. (2016). Effect of Heavy Metals Pollution on Soil Microbial Diversity and Bermuda-grass Genetic Variation. **Frontiers in Plant Science**, 7, 755. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00755>
- Zhao, C., Miao, Y., Yu, C., Zhu, L., Wang, F., Jiang, L., Hui, D., & Wan, S. (2016). Soil microbial community composition and respiration along an experimental precipitation gradient in a semiarid steppe. **Scientific Reports**, 6, 24317. <https://doi.org/10.1038/srep24317>

Autor: Michael Matis (INCIEN SK)

Fotografie: Archív Inštitútu cirkulárnej ekonomiky

Jazyková korektúra: Jana Vicenová

Grafická úprava: Alexandra Pecníková

Obsah tohto dokumentu je výhradnou zodpovednosťou členov tímu, ktorí ho vytvorili.

2023

Kopírovanie je povolené pod podmienkou uvedenia zdroja.

**Táto publikácia vznikla vďaka podpore Nadačného fondu Metro pri Nadácii Pontis
v rámci projektu Zelené dilemy www.zelenedilemy.sk.**

