

# Pôdne biologické ukazovatele pre monitorovanie zdravia pôdy

Stefano Mocali, Antonio Bispo, Guénola Pérès, Cristina Aponte, Rajasekaran Murugan, Mickael Hedde, Annamaria Bevivino, Fiona Brennan, Lorenzo D'Avino, Anna Edlinger, Pietro Iavazzo, Carlo Jacomini, Erica Lumini, Marečková Markéta, Marjetka Suhadolc, Marcel van der Heijden, Jack Faber

- Fungovanie pôdy je ohrozené stratou biodiverzity
- Pre monitorovanie pôdnej biodiverzity a zdravia pôdy sú k dispozícii dostatočné skúsenosti
- Zdravie pôdy, vrátane pôdnej biodiverzity, by sa malo hodnotiť pomocou postupného prístupu
- Boli identifikované vhodné biologické ukazovatele pre aplikáciu Vrstvy I v celej EÚ

## ÚVOD

Misia EÚ pre pôdu definovala „zdravie pôdy“ ako „pokračujúcu schopnosť pôdy podporovať ekosystémové služby“. Biodiverzita pôdy podporuje väčšinu týchto služieb, ale procesy degradácie túto schopnosť ohrozujú. Hoci bolo navrhnutých mnoho biologických ukazovateľov na hodnotenie zdravia pôdy, medzinárodný konsenzus o tom, ktoré sú najúčinnnejšie alebo o tom, ako optimalizovať monitorovacie systémy z hľadiska ich relevantnosti pre politiku a vedeckú spoľahlivosť je obmedzený. V posledných dvoch desaťročiach však niekoľko národných a európskych projektov hodnotilo vhodnosť ukazovateľov pre monitorovacie systémy. Dospeli sme k záveru, že v súčasnosti je k dispozícii dostatočná metodika a skúsenosti na začatie implementácie minimálneho súboru biologických ukazovateľov na monitorovanie biodiverzity a zdravia pôdy v celej EÚ.

## OPIS PROBLÉMU

Väčšina zdokumentovaných a predpokladaných zmien v biodiverzite je založená na pozorovaniach organizmov, ktoré nežijú v pôde. Je dôležité zdôrazniť, že takmer 60 % všetkých druhov na Zemi sa nachádza v pôde (Anthony et al. 2023). Táto biodiverzita je čoraz viac ohrozená v dôsledku ohrozenia pôdy, čo zdôrazňuje naliehavú potrebu monitorovania jej stavu a trendov v celej EÚ. Hoci je žiaduce znížiť logistické a nákladové dôsledky začlenenia biologických ukazovateľov do národných monitorovacích programov, komplexnosť pôdnej bioty, ich interakcie a rôzne mierky, v ktorých fungujú, znemožňujú ich úplné zachytenie jediným ukazovateľom.

Hoci je definícia „minimálneho súboru“ ukazovateľov na hodnotenie zdravia pôdy žiaduca, na riešenie funkcií pôdy a ekosystémových služieb relevantných v rôznych environmentálnych a manažérskych kontextoch môže byť vhodnejší flexibilnejší a prispôsobivejší prístup. Tento politický prehľad predstavuje pohľad konzorcia MINOTAUR na biologické ukazovatele najvhodnejšie na hodnotenie zdravia pôdy. Cieľom odporúčania je lepšie integrovať vedecké zistenia o ukazovateľoch zdravia pôdy do politik EÚ s cieľom posilniť udržateľnosť a odolnosť ekosystémov (Di Gregorio et al. 2025) a pomôcť pri prebiehajúcej príprave členských štátov (ČS) na národné monitorovanie zdravia pôdy a biodiverzity do roku 2030 v rámci nového zákona o monitorovaní pôdy (EK, 2023).

## KRITÉRIÁ PRE VÝBER METÓD

V posledných dvoch desaťročiach bolo navrhnutých niekoľko súborov biologických ukazovateľov na monitorovanie na úrovni EÚ. Zoznam kritérií bol definovaný na základe prístupu „logického sita“ (Stone a kol., 2016), ktorý poskytol poradie vhodných ukazovateľov, ktoré sa majú prijať podľa konkrétnych kontextových scenárov. Väčšinu z nich odporúča aj Európska environmentálna agentúra (správa EEA, 2023). Nedávne inventarizácie existujúcich sietí monitorovania pôdy však ukázali, že členské štáty uplatňujú len málo biologických ukazovateľov (Faber a kol., 2022), pričom najčastejšie sa používa dýchanie pôdy, mikrobiálna biomasa a spoločenstvá dážďoviek. Samotné dýchanie pôdy však meria iba celkovú biologickú aktivitu a neposkytuje informácie o typoch organizmov



v pôde, ich rozmanitosti ani o ich funkciách. Dáždovky sú užitočnými ukazovateľmi funkcií pôdy, ale predstavujú len malú časť druhov žijúcich v pôde, čo ponúka obmedzený pohľad na celkovú biodiverzitu. Žiaden jednotlivý ukazovateľ nevytvára celý príbeh.

V projekte MINOTAUR sme teda skombinovali ukazovatele, ktoré zachytávajú zloženie pôdnych spoločenstiev a ich diverzitu (štruktúrna/taxonomická diverzita), ako aj ich funkcie („funkčná diverzita“), pričom sme brali do úvahy myšlienku, že väčšinu pôdnych organizmov možno zaradiť do troch hlavných funkčných skupín podľa ich dominantného príspevku k pôdnym procesom a ekosystémovým službám (El Mujtar a kol., 2019):

**1) Chemickí inžinieri** (mikróby), ktorí rozkladajú a mineralizujú organickú hmotu, pretvárajú zvyšky tkanív na živiny a zohrávajú kľúčovú úlohu v bioremediácii a symbióze rastlín;

**2) Biologickí regulátori** (mikro- a mezofauna), ktorí riadia činnosť chemických inžinierov a tvoria kľúčový článok v potravinovej sieti spásaním, drvením, predáciou alebo parazitizmom, kontrolujú škodcov a choroby prenášané pôdou;

**3) Ekosystémoví inžinieri** (makrofauna), ktorí reštrukturalizujú pôdnu maticu, vytvárajú mikrobioty a rozptyľujú iné pôdne organizmy. Ich bioturbačné aktivity podporujú reguláciu vody, rast koreňov a úrodnosť pôdy.

Treba však mať na zreteli, že táto klasifikácia predstavuje zjednodušenie, pretože druhy z rôznych funkčných skupín môžu prispievať k viacerým pôdnym procesom. Taktiež početnosť každej funkčnej skupiny alebo celková taxonomická diverzita nie vždy priamo súvisí so zdravotným stavom pôdy (napr. vysoká početnosť patogénov). Preto tvrdíme, že na poskytnutie komplexných a spoľahlivých informácií o zdravotnom stave pôdy je potrebné posúdiť druhové zloženie biologických skupín, početnosť populácií ako aj funkcie pôdy, ktoré môžu pôdne organizmy sprostredkovať. Taxonomická a funkčná diverzita by sa preto mala na účely monitorovania posudzovať súčasne, pretože oba aspekty podporujú fungovanie a služby pôdneho ekosystému vrátane potravinovej bezpečnosti a zdravia. Preto navrhujeme, aby sa z navrhovaného zoznamu Tier I (Tabuľka 1) vybrala podmnožina funkčných aj

štruktúrnych ukazovateľov (ideálne reprezentujúcich všetky tri funkčné skupiny organizmov).

### VIACSTUPŇOVÝ PRÍSTUP

Na základe vyššie uvedených zásad a kritérií navrhujeme postupný prístup v súlade s odporúčaniami projektov ENVASSO, EcoFINDERS a EJP Soil-SIREN. Tento prístup zahŕňa počiatočný súbor štruktúrnych a funkčných ukazovateľov, ktoré treba zosúladiť v celej EÚ a ktoré sa dôrazne odporúčajú ako povinné charakteristiky pre všetky členské štáty na počiatočné hodnotenie stavu zdravia pôdy. Vzhľadom na zložité vzťahy medzi biodiverzitou pôdy, fungovaním pôdy a výsledným poskytovaním ekosystémových služieb si monitorovanie zdravia pôdy vyžaduje použitie viacerých biologických ukazovateľov, ktoré ponúkajú doplnkové poznatky. Hoci táto zložitost môže spôsobiť, že monitorovanie na národnej úrovni bude prácne a nákladné, **stupňovanie procesu monitorovania by podstatne zvýšilo nákladovú efektívnosť**. Napríklad prvá vrstva sa môže nastaviť ako skríningový krok, ktorý môže spustiť ďalšie – viac špecifické – vyšetrovanie, ak sa identifikujú potenciálne obavy. Takýto prístup sa už implementuje pri hodnotení environmentálnych rizík kontaminovaných pôd. Pri stupňovitom prístupe je optimálne použiť na prvý všeobecný náhľad jeden alebo dva biologické ukazovatele. Háčik je však v tom, že v súčasnosti žiadny biologický ukazovateľ nemá dobre nastavené cieľové alebo prahové hodnoty na efektívne sledovanie zdravia pôdy, a to ani u najbežnejších kombinácií pôdnych dokonca aj neharmonizované) ukazovatele ktoré si členské štáty môžu dobrovoľne vybrať v jednotlivých prípadoch, napr. v závislosti od typu pôdy, podnebia, využitia pôdy a spôsobov obhospodarovania, podľa vyššie uvedeného prístupu „logického sita“. Všetky odporúčané ukazovatele boli vedecky validované, cenovo výhodné, podporené štandardnými metódami a boli úspešne implementované v dôležitých monitorovacích iniciatívach prebiehajúcich na národnej a medzinárodnej úrovni (napr. programy JRC-LUCAS a SOILBON). Aj pre tie, ktoré ešte nie sú štandardizované (napr. metabarkódovanie DNA), sú k dispozícii dobre zavedené postupy, ktoré by sa dali ľahko štandardizovať.



typov a využívania pôdy. Preto, hoci sa zasadzujeme za viacúrovňový prístup, **odporúčame použiť väčší počet biologických ukazovateľov už na prvom stupni**, aspoň v počiatočnom období, aby sa vytvorila **referenčná databáza („základné hodnoty“)** pre vývoj hodnotiacich kritérií v blízkej budúcnosti.

Pri výbere vhodných biologických ukazovateľov pre monitorovanie na I. stupni na národnej úrovni pozorujeme rozdielne potreby a priority medzi členskými štátmi. Z vedeckého hľadiska je vhodná úplná harmonizácia ukazovateľov aby sa umožnila porovnateľnosť v celej EÚ. Zachovanie neharmonizovaných ukazovateľov však môže byť tiež opodstatnené, najmä ak ide o zachovanie kontinuity existujúceho dlho-dobého monitorovania (chrono-sekvencie). Skupina ukazovateľov na II. Stupni môže byť potom prijatá, keď výsledky na I. stupni hodnotenia preukážu „nezdravé“ podmienky, alebo keď miestne orgány budú potrebovať

dodatočné informácie na identifikáciu špecifických pôdných hrozieb.

II. skupina nebola v programe MINOTAUR definovaná, ale môže zahŕňať ďalšie (a dokonca aj neharmonizované) ukazovatele ktoré si členské štáty môžu dobrovoľne vybrať v jednotlivých prípadoch, napr. v závislosti od typu pôdy, podnebia, využitia pôdy a spôsobov obhospodarovania, podľa vyššie uvedeného prístupu „logického sita“. Všetky odporúčané ukazovatele boli vedecky validované, cenovo výhodné, podporené štandardnými metódami a boli úspešne implementované v dôležitých monitorovacích iniciatívach prebiehajúcich na národnej a medzinárodnej úrovni (napr. programy JRC-LUCAS a SOILBON). Aj pre tie, ktoré ešte nie sú štandardizované (napr. metabarkódovanie DNA), sú k dispozícii dobre zavedené postupy, ktoré by sa dali ľahko štandardizovať.

*Tabuľka 1 Skupina odporúčaných ukazovateľov I. stupňa, stručný opis a dostupné štandardné alebo referenčné metódy, odhady nákladov založené na Bispo a kol. (2024)*

Stupeň	Odporúčané ukazovatele	Krátky popis	Metodika	Cena	
Stupeň I	Funkčné ukazovatele	Mikrobiálna biomasa C	Mikrobiálna biomasa na 1 gram pôdy	ISO 14 240-1/-2 EN ISO 11 063	20 – 30 €/vzorka
		Mikrobiálna respirácia	Produkcia CO <sub>2</sub> na jednotkové množstvo pôdy	ISO 16072:2002	20 – 30 €/vzorka
		Aktivita enzýmov	Merania aktivity hydroláz v pôde	ISO 14 238 ISO/TS 22 939 ISO 23 753-1 ISO 23 753-2	20 – 30 €/každý enzým
	Štruktúrne ukazovatele	Ekosystémoví inžinieri (makrofauna)	Štruktúrna a funkcionálna diverzita (dážďovky)	ISO 23611-1:2008 and Fusaro <i>et al.</i> , 2018	30 – 140 €
		Biologické regulátory (Mezofauna)	Štruktúrna a funkcionálna diverzita	QBS-ar (Parisi <i>et al.</i> , 2005)	75 – 140 €
		Biologické regulátory (Mikrofauna)	Štruktúrna a funkcionálna diverzita (nematódy)	Bongers and Ferris 1999	30 – 140 €
		Chemickí inžinieri (mikrofauna)	Štruktúrna diverzita (baktérie, huby, archaei)	DNA metabarcoding (ISO 11063:2020) and Plassart <i>et al.</i> , 2012	75 – 140 €/každá cieľová skupina

### CITLIVOSŤ A PRAHY

Aby sa otestovala citlivosť ukazovateľov I. stupňa na narušenie pôdy v poľných podmienkach, bola skupina ukazovateľov I. stupňa súčasne testovaná na 9 dlhodobých experimentálnych lokalitách (DEL) v rôznych kombináciách pôdy typov, podnebia a postupov hospodárenia – súhrnne označovaných ako „agrosystémové scenáre“.

Tieto vybrané DEL prevádzkujú partnerské inštitúcie MINOTAUR už viac ako desať rokov v ôsmich krajinách EÚ a zahŕňajú široký gradient pôdno-klimatických podmienok. Všetky experimenty hodnotili účinky minimalizácie narušenia pôdy porovnaním rôznej intenzity hospodárenia (konvenčná orba, minimálna agrotechnika, bezorbové obrábanie pôdy) a/alebo rôznych spôso-



bov hnojenia (minerálne a organické hnojenie). Stručne povedané, výsledky ukázali, že: i) Hodnoty všetkých ukazovateľov boli významne ovplyvnené pôdno-klimatickými podmienkami DETL; ii) Všetky odporúčané ukazovatele boli významne citlivé na rôzne spôsoby hospodárenia a/alebo postupy hnojenia v DEL; iii) Citlivosť odporúčaných ukazovateľov sa líšila v závislosti od typu narušenia (t. j. obrábania pôdy alebo hnojenia); iv) Rôzne ukazovatele (namerané hodnoty a ich štatistická interpretácia) môžu mať za rovnakých podmienok kontrastné trendy (t. j. mikrobiálna diverzita a diverzita mikro/makrofauny pri rôznej intenzite obrábania pôdy), čo potvrdzuje, že použitie jedného ukazovateľa môže viesť k nesprávnemu alebo zavádzajúcemu záveru (Aponte *et al.* 2024). Preto dôrazne odporúčame prijať všetky ukazovatele na I. stupni hodnotenia pre pochopenie stavu/zdravia pôdy. Okrem toho sa definícia „praho-

vej“ hodnoty, nad alebo pod ktorou by sa pôda mohla definovať ako „nezdravá“, odporúča iba vtedy, ak sú k dispozícii primerané údaje v kontexte typu pôdy a využívania pôdy. V skutočnosti pri nedostatku dostatočných referenčných údajov môžu členské štáty iba monitorovať zmeny a trendy (Matson *et al.* 2024). Na záver vítame návrh EÚ na novú smernicu o monitorovaní a odolnosti pôdy (COM(2023) 416) ako kľúčový prostriedok na právnu ochranu pôdy ako základnej súčasti ekosystému a na dosiahnutie cieľov EÚ v rámci Zelenej dohody. Pri implementácii SML však odporúčame, aby členské štáty investovali do biologických ukazovateľov s cieľom vybudovať robustnú referenčnú databázu pre štrukturálne aj funkčné ukazovatele. To uľahčí vývoj hodnotiacich kritérií pre národné agrosystémy (kombinácií pôdneho typu a spôsobu obhospodarovania).

### Kľúčové správy pre tvorcov politik

#### Odporúčanie 1: Viacstupňový prístup

Navrhuje sa „viacstupňový systém“ biologických ukazovateľov:

- (1) Skupina ukazovateľov na I. stupni vrátane prvého súboru ukazovateľov harmonizovaných pre všetky prípady;
- (2) Skupina ukazovateľov na II. stupni (ktorú definuje každý členský štát) vrátane mnohých ďalších dostupných ukazovateľov, ktoré môžu byť vybrané od prípadu k prípadu a uplatňované keď výsledky skupiny na I. stupni vykazujú že pôda „nie je zdravá“, v závislosti od konkrétnych cieľov a podmienok monitorovacieho programu.

#### Odporúčanie 2: Použite všetky ukazovatele skupiny ukazovateľov na I. stupni

Ukazovatele skupiny na I. stupni sú štandardizované, vedecky podložené a nákladovo efektívne. Hoci sa z vedeckého hľadiska všetky používajú spoločne, monitorovacie programy by mali prijať aspoň štrukturálne a funkčné ukazovatele, ak nepoužívajú všetky.

#### Odporúčanie 3: Dôrazne sa odporúča holistická integrácia viacerých ukazovateľov zdravia pôdy (biologických, chemických, fyzikálnych)

Zdravie pôdy by sa malo monitorovať nielen chemicko-fyzikálnymi analýzami, ale aj biologickými ukazovateľmi priamo vyjadrujúcimi biodiverzitu pôdy a poskytovanie ekosystémových služieb. Okrem toho by sa ukazovatele mali hodnotiť v kontexte miestneho prostredia (zrornosť pôdy, podnebie, využitie zeme a spôsob obhospodarovania).

#### Odporúčanie 4: Monitorovanie zmien namiesto uplatňovania prahových hodnôt

Vzhľadom na súčasný nedostatok podkladových údajov odporúčame v krátkodobom horizonte monitorovať iba trendy. Cieľové alebo prahové hodnoty sa môžu vyvinúť, keď bude k dispozícii dostatok údajov.



## LITERATÚRA

1. Aponte et al. (2025). Synthesis of variation and range values of bioindicators and functions in context of management practices, climate and soil. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14280805>
2. Anthony et al. (2023). Enumerating soil biodiversity. *PNAS*, 120(33), e2304663120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2304663120>
3. Bispo et al. (2024). Guidelines for accounting and monitoring agricultural soil carbon, fertility and degradation changes at different scales. *EJP Soil (WP6)*, Deliverable 6.5. [10.5281/zenodo.14651688](https://doi.org/10.5281/zenodo.14651688)
4. EEA (2023). Soil monitoring in Europe – Indicators and thresholds for soil health assessments. *Periodical European Environment Agency EEA Report No. 08/2022*, 181 [doi.org/10.2800/956606](https://doi.org/10.2800/956606)
5. El Mujtar et al. (2019). Role and management of soil biodiversity for food security and nutrition; where do we stand? *Global food security*, 20, 132-144. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.01.007>
6. EU Commission (2023). *Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on Soil Monitoring and Resilience (Soil Monitoring Law)*. COM (2023), 416.
7. Faber et al. (2022). Stocktaking for Agricultural Soil Quality and Ecosystem Services Indicators and their Reference Values (SIREN): *EJP SOIL Internal Project SIREN Deliverable 2*.
8. Matson et al. (2024). Four approaches to setting soil health targets and thresholds in agricultural soils. *J. Environ. Manage*, 371, 123141. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123141>
9. Stone et al. (2016). Selection of biological indicators appropriate for European soil monitoring. *Applied Soil Ecology*, 97, 12-22. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.08.005>
10. Di Gregorio et al. (2025). Getting (ECO) Ready: Does EU Legislation Integrate Up-to-Date Scientific Data for Food Security and Biodiversity Preservation Under Climate Change? *Sustainability*, 16 (23):10749. <https://doi.org/10.3390/su162310749>

