

**Metodika pro hodnocení půdních vlastností  
pomocí magnetické susceptibility aplikovatelná  
pro posouzení degradace půd v důsledku  
vodní eroze**

**Certifikovaná metodika**

RNDr. Aleš Kapička, CSc.  
prof. Ing. Radka Kodešová, CSc.  
Ing. Ondřej Jakšík, Ph.D.  
Ing. Aleš Klement, Ph.D.  
RNDr. Eduard Petrovský, CSc.  
Ing. Hana Grison, Ph.D.

Česká zemědělská univerzita v Praze  
Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů  
Katedra pedologie a ochrany půd



**Metodika pro hodnocení půdních vlastností pomocí magnetické  
susceptibility aplikovatelná pro posouzení degradace půd  
v důsledku vodní eroze**

Certifikovaná metodika

RNDr. Aleš Kapička, CSc.  
prof. Ing. Radka Kodešová, CSc.  
Ing. Ondřej Jakšík, Ph.D.  
Ing. Aleš Klement, Ph.D.  
RNDr. Eduard Petrovský, CSc.  
Ing. Hana Grison, Ph.D.

Praha, 2014



## **Adresy autorů:**

*RNDr. Aleš Kapička, CSc., RNDr. Eduard Petrovský, CSc.,  
Ing. Hana Grison, Ph.D.*

Geofyzikální ústav Akademie věd ČR, v.v.i.

Boční II/1401, 141 31 Praha 4 – Záběhlice

[www.ig.cas.cz](http://www.ig.cas.cz)

*prof. Ing. Radka Kodešová, CSc., Ing. Ondřej Jakšík, Ph.D.,  
Ing. Aleš Klement, Ph.D.*

Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta agrobiologie, potravinových  
a přírodních zdrojů, Katedra pedologie a ochrany půd

Kamýcká 129, 165 21 Praha 6 – Suchbátka

[www.czu.cz](http://www.czu.cz)

ISBN: 978-80-213-2532-6

## Abstrakt

Tato metodika vznikla za finanční podpory Ministerstva zemědělství, NAZV a programu „KUS“ PP3 – Podpora politiky agrárního sektoru, v rámci řešení projektu QJ1230319 „Vodní režim půd na svažitém zemědělsky využívaném území“. Řešiteli projektu byli Česká zemědělská univerzita v Praze a Geofyzikální ústav Akademie věd ČR. Obsahem této metodiky je návrh strategie hodnocení degradace půd v důsledku vodní eroze pomocí magnetické susceptibility. V návrhu jsou uvedeny podmínky, které musí být z pohledu půdního typu splněny, aby bylo možné pomocí popsaného postupu stav degradace půdy na vybrané lokalitě hodnotit. Je uvedena doporučená metodika odběru půdních vzorků a metody jejich zpracování. Podrobněji je popsána metoda hodnocení magnetické susceptibility jak v laboratorních, tak terénních podmínkách. Popsaný přístup je založen na předpokladu, že v některých půdách (například v černozemích) existuje úzký vztah mezi obsahem ferimagnetických částic (charakterizovaný hodnotou magnetické susceptibility) a půdní organickou hmotou (tj. obsahem oxidovatelného uhlíku). Obsah oxidovatelného uhlíku je pak využit jako hlavní kritérium při hodnocení degradace půd způsobené vodní erozí.

Metodika má za cíl poskytnutí komplexního, jednotného a standardizovaného souboru metod pro hodnocení změny půdních vlastností na svažitých pozemcích ohrožených vodní erozí pomocí magnetické susceptibility. Aplikace této metodiky umožní sledování změn půdních vlastností v důsledku vodní eroze na různých lokalitách zemědělských pozemků při dosažení stejných výsledků různými pracovišti.

***Klíčová slova:*** prostorová variabilita, objemová magnetická susceptibilita, hmotnostně specifická magnetická susceptibilita, oxidovatelný organický uhlík, degradace půd, vodní eroze

## **Oponenti:**

Ing. Petr Pruner, DrSc., Geologický ústav AV ČR, v.v.i., Praha

Ing. Karel Jacko, Ph.D., Státní pozemkový úřad, Praha

## Obsah

<b>1. Úvod</b> .....	<b>5</b>
<b>2. Cíl metodiky</b> .....	<b>6</b>
<b>3. Vlastní popis metodiky</b> .....	<b>6</b>
3.1. Magnetické vlastnosti půd .....	6
3.2. Magnetická diferenciacce v půdách.....	7
3.3. Magnetická susceptibilita.....	9
3.4. Vytipování zemědělských pozemků ohrožených vodní erozí vhodných pro hodnocení půdních vlastností na základě magnetických měření .....	9
3.5. Vytyčení odběrové sítě pro kalibraci modelu .....	11
3.6. Odběr a příprava půdních vzorků .....	12
3.7. Měření magnetické susceptibility .....	13
3.8. Vytvoření modelu pro hodnocení obsahu oxidovatelného organického uhlíku pomocí hmotnostně specifické ( $\chi$ ) magnetické susceptibility .....	15
3.9. Vyhodnocení vztahu mezi hmotnostně specifickou ( $\chi$ ) magnetickou susceptibilitou a objemovou magnetickou susceptibilitou ( $\kappa$ ).....	17
3.10. Vyhodnocení vertikálního rozdělení objemové magnetické susceptibility ( $\kappa$ ) .....	18
<b>4. Přínos metodiky</b> .....	<b>19</b>
<b>5. Srovnání novosti postupu</b> .....	<b>20</b>
<b>6. Popis uplatnění metodiky</b> .....	<b>20</b>
<b>7. Ekonomické aspekty</b> .....	<b>20</b>
<b>8. Dedikace</b> .....	<b>21</b>
<b>Literatura</b> .....	<b>23</b>

## 1. Úvod

Půda prochází neustálým vývojem, během kterého na ni působí nejrůznější vlivy. Negativní vlivy označujeme jako degradaci půdy, jak přirozenými procesy, tak vlivem lidské činnosti. Intenzivní hospodaření na půdě, často i pěstování nevhodných plodin mnohdy prohlubuje degradaci obdělávaných půd. Degradace půd, spojená především s erozními procesy, se projevuje zvláště výrazně na svažitých, geomorfologicky rozmanitých územích. Techniky pro měření eroze půdy a redistribuci sedimentů v rámci ploch nebo povodí přímým monitorováním jsou doposud velmi omezené. Používané metody poskytují především informace o průměrném množství erodovaného materiálu, ale většinou neposkytují informaci o prostorovém rozložení půdní eroze ve sledované oblasti (Flanagan and Nearing, 1995).

Z těchto důvodů jsou hledány vhodné prostředky a nové postupy, které by usnadnily (případně i zlevnily) průzkum půdních vlastností, nezbytných pro posouzení již nastalé degradace. Budou-li navrženy relativně snadné postupy, degradace půd v ČR může být zmapována a následně mohou být navržena vhodná opatření pro zlepšení stávajícího stavu a to nejen z pohledu státní správy, ale i z pohledu jednotlivých vlastníků půdy.

Aplikace magnetické metody poskytuje nové možnosti při studiu půdních vlastností v zemědělských lokalitách. Obsah ferimagnetických částic v půdě (reprezentovaný měřenou magnetickou susceptibilitou) souvisí s dalšími půdními vlastnostmi (Maher, 1986). Lze proto vyvinout metodu, která na základě měřené půdní magnetické susceptibility a pro danou lokalitu ověřeného vztahu (mezi magnetickou susceptibilitou a vybranou půdní vlastností) umožní půdní vlastnosti zmapovat. Měření magnetické susceptibility půd je vysoce citlivá a relativně rychlá metoda. Novým přínosem metodiky je navržený postup hodnocení a detailnějšího mapování půdních podmínek. Metodika má za cíl pomoci v praxi měřit kvalitu půdy a poskytnout nástroj pro půdní management

(rozvržení plodin, hospodaření s vodou apod.) a bude sloužit k zefektivnění hodnocení půdních vlastností.

## **2. Cíl metodiky**

Cílem je poskytnutí neinvazivní metody založené na magnetických parametrech pro získání informací o půdních vlastnostech v povrchovém horizontu i v půdním profilu. Na základě detailního půdního průzkumu jsou vyhodnoceny regresní vztahy, které mohou sloužit k predikci půdních vlastností z relativně snadněji a ekonomičtěji měřených hodnot půdních magnetických susceptibilit přímo v terénu. Jsou definovány podmínky pro možnost aplikace magnetometrické metody a je stanovena sekvence nezbytných magnetických měření. Předpokládaným přínosem je zlepšení hodnocení rizik spojených s intenzivním využíváním zemědělských půd.

## **3. Vlastní popis metodiky**

### **3.1. Magnetické vlastnosti půd**

Z hlediska magnetomineralogie jsou magnetické vlastnosti půd kontrolovány především koncentrací různých fází Fe oxidů. Významné postavení v půdách mají ferimagnetické minerály jako na příklad magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) nebo maghemit ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ). Současné měřicí aparatury jsou schopny detekovat koncentrace ferimagnetik v půdách v řádu ppm. V případě trvale zamokřených půd sulfidy Fe dominují magnetickým vlastnostem spíše než oxidy (Stanjek et al., 1994). Magnetická susceptibilita půd neobsahujících významné koncentrace ferimagnetik je kontrolována paramagnetickými komponentami jako jsou na příklad jílové Fe minerály a slabě magnetické Fe oxidy (např. ferihydrit).

Procesy postupné autigenese Fe minerálů, jejich transport a rozpouštění při interakci s produkty zvětrávání mají za následek vertikální diferenciaci



magnetických parametrů v půdních profilech, které citlivě reagují na půdotvorné procesy (Maher and Taylor, 1988). Současně jakákoliv redistribuce půd na svazích vlivem eroze a transportních procesů může produkovat významné změny nejen v hloubkových profilech magnetických veličin, ale i v hodnotách povrchových magnetických susceptibilit (de Jong et al., 1998). Propojení mezi různými půdními režimy a pozorovanými jejich magnetickými charakteristikami je základem využití půdní magnetometrie jak v environmentálních studiích, tak při posuzování kvality půd (Singer and Fine, 1989; Thompson and Oldfield, 1986).

### 3.2. Magnetická diference v půdách

Fe oxidy (tab. 1) společně s amorfními fázemi různých Fe komplexů tvoří hlavní formy nesilikátového Fe v půdách. Obecně Fe oxidy jsou slabě magnetické (v měřítku magnetické susceptibility) pouze s významnou výjimkou ferimagnetik. Slabě magnetické oxidy, jako hematit  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ , nebo goethit  $\alpha\text{-FeOOH}$  se vyskytují v půdách v množstvích snadno detekovatelných (~ 5 až 10 %). Naproti tomu ferimagnetické minerály jsou často obsaženy pouze akcesoricky, ale většinou dominují makroskopickým magnetickým parametrům půd.

Tab. 1: Fe oxidy v půdách a jejich magnetické susceptibility.

Minerál	Složení	Magnetický stav	Magnetická susceptibilita ( $10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ )
Goethit	$\alpha\text{-FeOOH}$	antiferomagnetický	70
Lepidocrocit	$\gamma\text{-FeOOH}$	paramagnetický	70
Hematit	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	antiferomagnetický	40
Maghemit	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	ferimagnetický	26 000
Magnetit	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	ferimagnetický	56 500

Fe oxidy v půdách jsou převážně v amorfni formě na povrchu minerálů, lze však identifikovat nezanedbatelné koncentrace sub-mikrometrových krystalických zrn vyskytujících se izolovaně v půdní matrici (Maher, 1986). K magnetickému zvýšení v některých půdních horizontech může dojít několika mechanismy (Schwertman, 2008). Obecně nejdůležitějším je formace mikrokystalického maghemitu, resp. magnetitu ze slabě magnetických Fe oxidů, nebo hydrooxidů při redukčně oxidačních cyklech, za normálních pedogenních podmínek. Důležitými faktory pro kvalitu těchto biochemických reakcí v půdách je především obsah organické hmoty, teplota, vlhkost, redox podmínky, bakteriální aktivita a počáteční koncentrace výchozích komponent v půdách. Formované sekundární ferimagnetické krystaly jsou směsí velmi jemných (SP) a stabilních (SD) částic. Magnetické obohacení ve svrchních půdních horizontech může být také vlivem zahřátí půd (Singer and Fine, 1989) na vyšší teploty (tropické oblasti, lesní požáry). Specifický mechanismus magnetického obohacení je založen na rostoucí koncentraci magnetotaktických bakterií v půdách a nízkoteplotní syntéze magnetitu (Fassbinder et al., 1990). Tyto bakterie vytvářejí řetězce jednodimenzionálních, sub-mikronových SP magnetitových krystalů, a mohou hrát významnou roli v pedogenní formaci ultrajemných ferimagnetik.

Poněvadž pedogenní procesy produkují velmi jemné krystaly, v důsledku povrchové oxidace dochází k přeměně magnetitu na maghemit (Murad and Schwertmann, 1993). Procesy maghemitizace hrají významnou roli pro zachování jemnozrnných ferimagnetik v půdních profilech, protože zabraňují následnému rozpouštění vnitřního magnetitu (Maher and Taylor, 1988). Takováto velmi jemná ferimagnetická zrna vytvořená půdními procesy mohou být velmi dobře identifikována měřením frekvenčně závislé magnetické susceptibility (Kapička and Petrovský, 2003), která je velmi citlivá na přítomnost zrn  $\sim 0,016 - 0,023 \mu\text{m}$ . Při měřících frekvencích 0,47 a 4,7 kHz zrna

mimo SP velikosti nejsou při vyšší frekvenci blokována a jejich koncentrace v půdách může být také kvantifikována (Dearing, 1994).

### 3.3. Magnetická susceptibilita

Magnetická susceptibilita (měřená ve slabém magnetickém poli) je nejvhodnějším magnetickým parametrem pro studium degradace půd (Kapička et al., 2010). Magnetická susceptibilita je koncentračně závislý parametr, jehož velikost je dána množstvím silně magnetických (ferimagnetických) minerálů v půdách. V půdní magnetometrii používáme: 1) objemovou magnetickou susceptibilitu ( $\kappa$ ) [-], 2) hmotnostně specifickou susceptibilitu  $\chi$  [m<sup>3</sup>/kg], 3) frekvenčně závislou susceptibilitu ( $\chi_{FD}$ ) [-], která je určena vztahem:

$$\chi_{FD}[\%] = (\chi_{LF} - \chi_{HF}) / \chi_{LF} * 100 \quad (1)$$

kde *LF* a *HF* značí susceptibilitu měřenou při nízké a vysoké frekvenci.

Velikost frekvenčně závislé susceptibility umožňuje posoudit koncentraci velmi jemných (SP) ferrimagnetických částic v půdách a tím odlišit svrchní půdní horizonty s vysokou koncentrací sekundárních ferimagnetik pedogenního původu. Výhodou objemové susceptibility je, že může být měřena poměrně snadno pomocí speciálních sond přímo v terénu,  $\chi$  a  $\chi_{FD}$  je potřeba měřit v laboratoři na upravených půdních vzorcích.

### 3.4. Vytipování zemědělských pozemků ohrožených vodní erozí vhodných pro hodnocení půdních vlastností na základě magnetických měření

Degradace fyzikálních a chemických vlastností půdy (úbytek půdní organické hmoty, stupeň biologické aktivity, struktura půdy a její eroze) negativně ovlivňuje produkční a mimoprodukční funkce půdy. Důsledkem úbytku organické hmoty v půdě je fyzikální degradace půdy (rozpad půdních

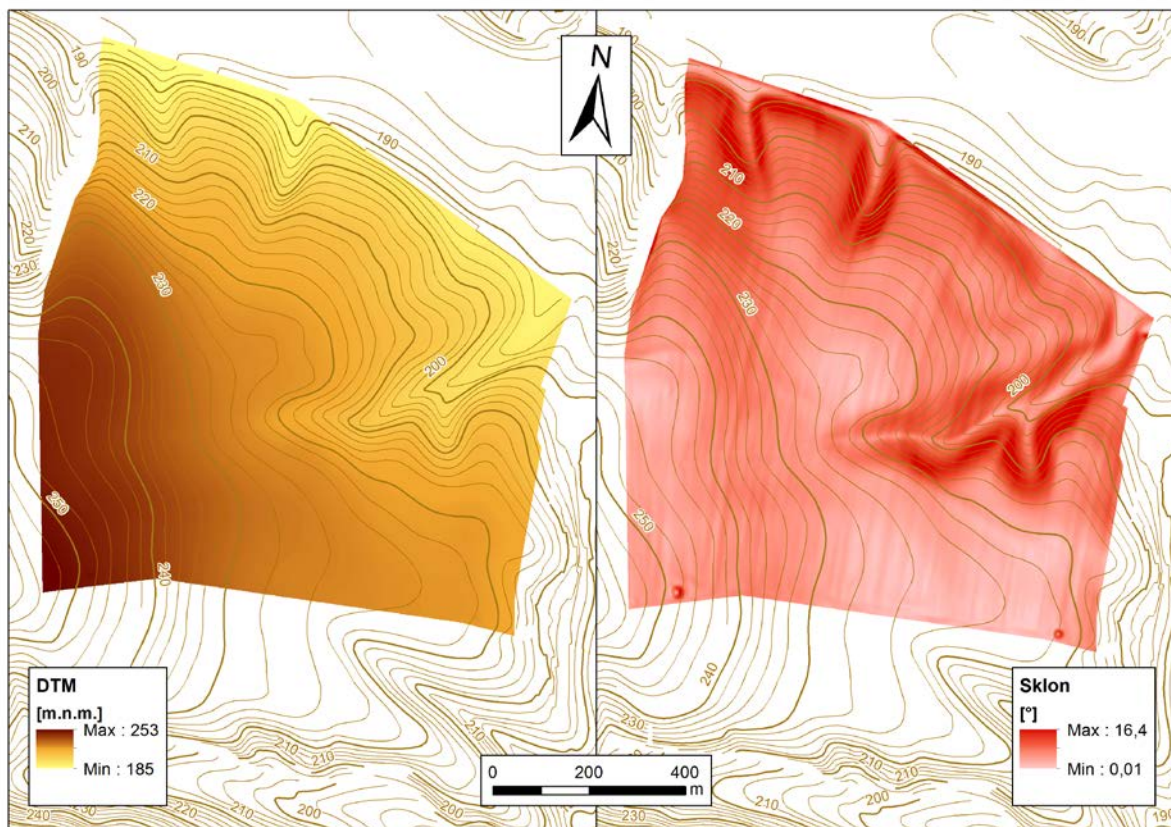
agregátů) způsobující větší náchylnost k erozi a sníženou schopnost odolávat zhutnění a absorbovat vodu (retenční kapacita krajiny).

Předmětem nové neinvazivní metody je ekonomicky nenáročné mapování obsahu organické hmoty, který je často užíván jako jedno z kritérií při posuzování půdní degradace. Stanovení obsahu celkového organického uhlíku, jako jednoho ze základních elementů organické hmoty, včetně časových změn v jeho rozložení je naprosto nezbytné pro charakterizaci dané lokality.

Výběr pozemků vhodných pro mapování půdních vlastností na základě magnetických měření vychází z následujících faktorů: historie a intenzita zemědělského obhospodařování, morfologie dané lokality, půdní substrát a půdní typ. Dlouhodobě a intenzivně obhospodařovaná morfologicky rozmanitá území (tj. území, na kterém se významně mění charakteristiky terénu) splňují předpoklad, že eroze znatelně modifikovala půdní vlastnosti. Jednotný půdní substrát na dané lokalitě pak sníží vlivy (plynoucí z odlišného mineralogického složení) na měřenou magnetickou susceptibilitu. Nejvýznamnější podmínkou je, že v půdním profilu je (v důsledku pedogenních procesů) ve svrchním humusovém půdním horizontu zřetelně zvýšen obsah ferimagnetických částic (reprezentovaný měřenou magnetickou susceptibilitou), který pozitivně koreluje s obsahem organické hmoty (Jakšík et al., 2015; Jordanova et al., 2010). To je typické u černoze a v rámci výzkumného projektu NAZV se podrobným zkoumáním na pěti půdních typech ukázalo, že navržená metodika je především vhodná pro lokality, na kterých původním půdním typem je černoze.

Jako příklad je zde uvedeno území, které se nachází v katastru obce Brumovice, okres Břeclav (obr. 1). Horní část území je relativně plochá (sklon do 3°). V nižší části území se pak nachází několik úpadů. Sklony svahů v okolí těchto úpadů jsou až 16°. V dolní části území pak úpady zpravidla končí náplavovými kužely. S terénními charakteristikami úzce souvisí distribuce půd na daném území. Matečním substrátem je na celém studovaném území spraš. Dominantním půdním typem je černoze, která v erozně exponovaných místech

(tj. v částech s vysokým sklonem) přechází v regozem. V místech sedimentace erodovaného materiálu (úpady, náplavové kužely) vzniká koluvizem.

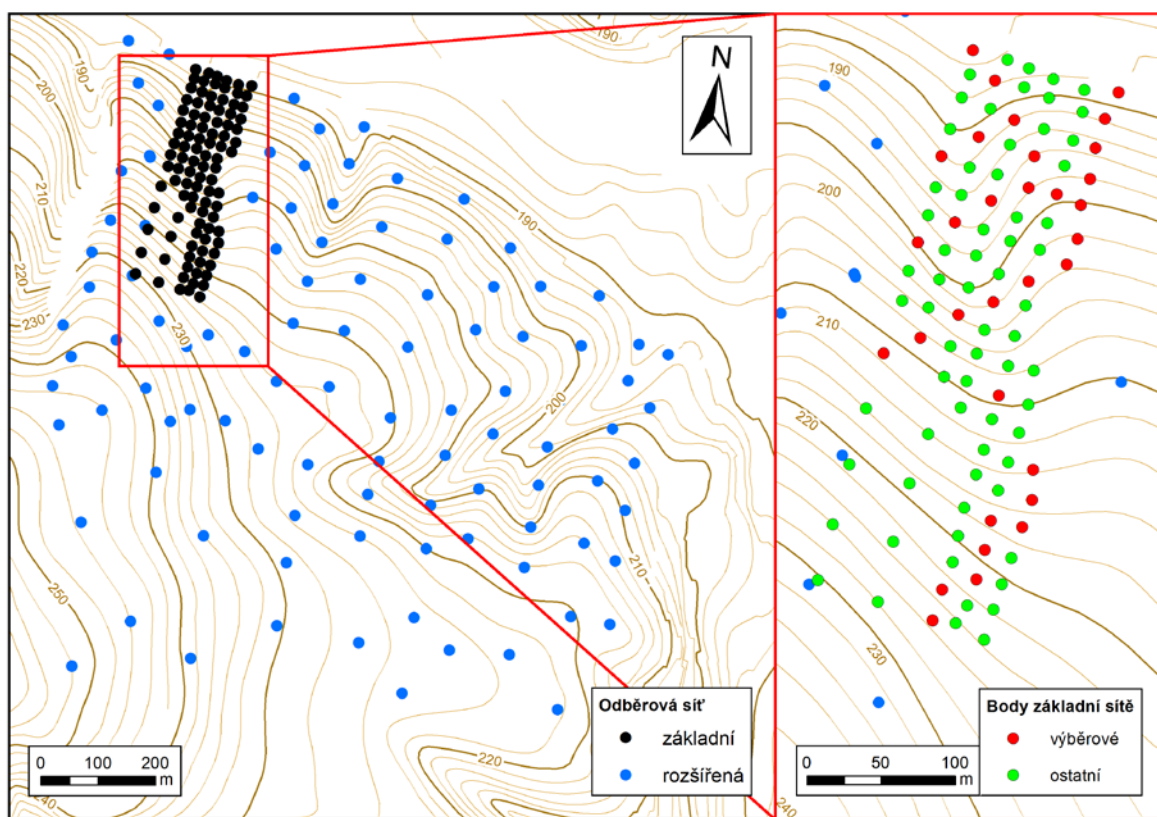


Obr. 1: Charakteristiky terénu (DTM – digitální model terénu, sklonitost).

### 3.5. Vytyčení odběrové sítě pro kalibraci modelu

Na geograficky pravidelných pozemcích (např. čtvercového či obdélníkového tvaru) můžeme s výhodou použít pravidelnou vzorkovací síť (trojúhelníkovou či čtvercovou), která zajistí rovnoměrné pokrytí odběrovými sondami po celé ploše. V místech s předpokládanou zvýšenou variabilitou půdních vlastností může být taková síť zhuštěna, například tak jak je zobrazeno na obr. 2. Celkový počet odebraných vzorků pak většinou závisí na dostupných finančních a lidských zdrojích, přičemž platí pravidlo, že čím více vzorků je použito pro kalibraci, tím přesnější bude následná predikce. V případě, že jsou pro danou lokalitu k dispozici i další doplňkové informace (např. digitální model

terénu, satelitní měření, různé mapy, apod.), které chceme uplatnit při tvorbě modelu a zlepšit tak jeho predikční schopnosti, je vhodné použít vzorkovací strategii, která optimálním způsobem pokryje rozsah všech dodatkových údajů (tyto proměnné mohou být jak spojitě, tak i kategorické). Návrhem odběrové sítě se zabývá například certifikovaná metodika „Metodika optimalizace vzorkovací sítě pomocí využití analýzy reliéfu pro popis prostorové variability půdních vlastností v rámci půdních bloků“ (Penížek et al., 2014).



Obr. 2: Odběrová síť: Základní síť představuje detailní odběrovou síť na území v okolí jednoho z úpadů, která byla dále rozdělena na výběrové (32) a ostatní (67) body. Rozšířená síť (107 bodů) pokrývá zbyvající plochu vymezené oblasti.

### 3.6. Odběr a příprava půdních vzorků

Vzorky půd se odebírají z orníčního horizontu do hloubky 25 cm pomocí plastové lopatky do PE sáčků. Vzorky jsou následně zpracovány standardním



způsobem. Porušené půdní vzorky se usuší při laboratorní teplotě a prosejí přes síto o průměru ok 2 mm. Pro stanovení obsahu oxidovatelného uhlíku (z něhož lze dále vyjádřit obsah organické hmoty) se vzorky dále přesejí přes síto o průměru ok 0,25 mm.

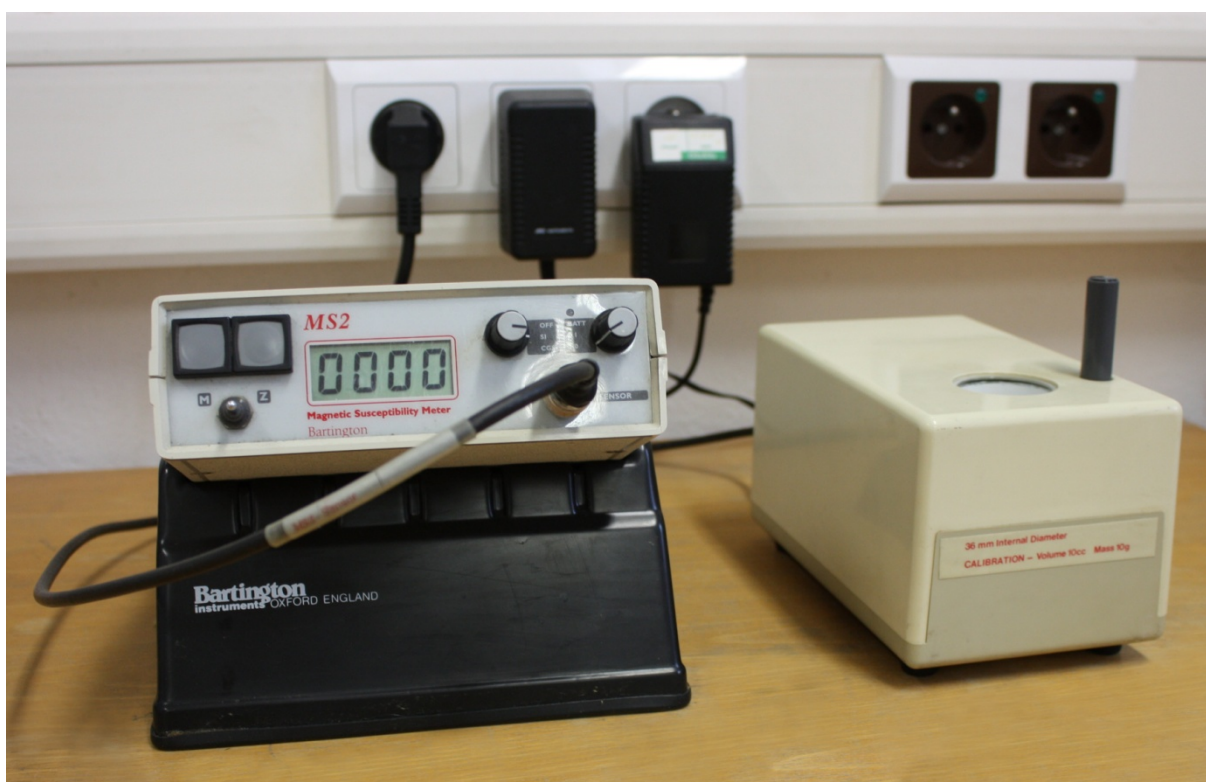
### 3.7. Měření magnetické susceptibility

Základním měřením susceptibility půd je měření in situ (polní sondou). V každém vzorkovacím bodě v oblasti cca 1x1m je zaznamenáno 10 nezávislých měření objemové magnetické susceptibility pro získání reprezentativní průměrné hodnoty, která respektuje přirozenou variabilitu půdy a zároveň vylučuje extrémní hodnoty (Schibler et al., 2002). Měření jsou prováděna kruhovou polní sondou (obr. 3) MS2D (Bartington Instruments, England), s penetrací měřícího magnetického pole do hloubky cca 8 cm a citlivostí  $1 \times 10^{-5}$  SI (Dearing, 1994).



*Obr. 3: Polní sonda Bartington MS2D pro měření povrchové susceptibility půd.*

Na upravených půdních vzorcích odebraných z povrchových půdních horizontů je dále měřena hmotnostně specifická susceptibilita ( $\chi$ ) beroucí v úvahu hmotnost vzorků a frekvenčně závislá susceptibilita ( $\kappa_{FD}$ ), měřená při nízké (0,47kHz) a vysoké (4,7 kHz) frekvenci (Dearing et al., 1996). Měření jsou prováděna na půdních vzorcích v kalibrovaných kontejnerech (10 cm<sup>3</sup>) pomocí duálního senzoru (obr. 4) Bartington MS2B (Bartington Instruments, England).



*Obr. 4: Senzor Bartington MS2B pro měření magnetické susceptibilit půd při dvou frekvencích (0,47 a 4,7 k Hz).*

Na zkoumaných lokalitách jsou s ohledem na jejich morfologii vybrány reprezentativní měřicí body s výrazně odlišnou hodnotou sklonu terénu, kde jsou provedena měření hloubkových profilů (do 40 cm) magnetické susceptibility (obr. 5) pomocí Kappametru SM 400 (ZH Instruments, Brno) (Petrovský et al., 2004).





*Obr. 5: Kappametr SM400 pro měření magnetické susceptibilitě v hloubkových půdních profilech.*

Magnetická susceptibilita odebraných půdních jader je pro kontrolu vždy proměřena v laboratoři sondou Bartington MS2C. U obdělávaných půd, což je předmětem předkládané studie, je pozorován vysoký stupeň „homogenizace“ velikosti susceptibilitě do hloubek cca 20 až 25 cm.

### **3.8. Vytvoření modelu pro hodnocení obsahu oxidovatelného organického uhlíku pomocí hmotnostně specifické ( $\chi$ ) magnetické susceptibilitě**

Model pro hodnocení obsahu organické hmoty ve svrchním půdním horizontu (0 až 20 cm) je založen na jednoduché korelaci mezi měřenými hodnotami obsahu oxidovatelného uhlíku ( $C_{ox}$ ) a hodnotami hmotnostně specifické magnetické susceptibilitě měřené při nízké (0,47 kHz) frekvenci (tab. 2).

Tab. 2: Predikce obsahu oxidovatelného uhlíku (Cox) v povrchovém půdním horizontu z hmotnostně specifické magnetické susceptibility ( $\chi$ ) měřené při nízké (0,47 kHz) frekvenci. Kalibrace pro: 1) Výběrové body základní sítě (predikce pro ostatní body základní sítě, a predikce pro body základní sítě a rozšířené sítě), 2) Body základní sítě (predikce pro body rozšířené sítě).

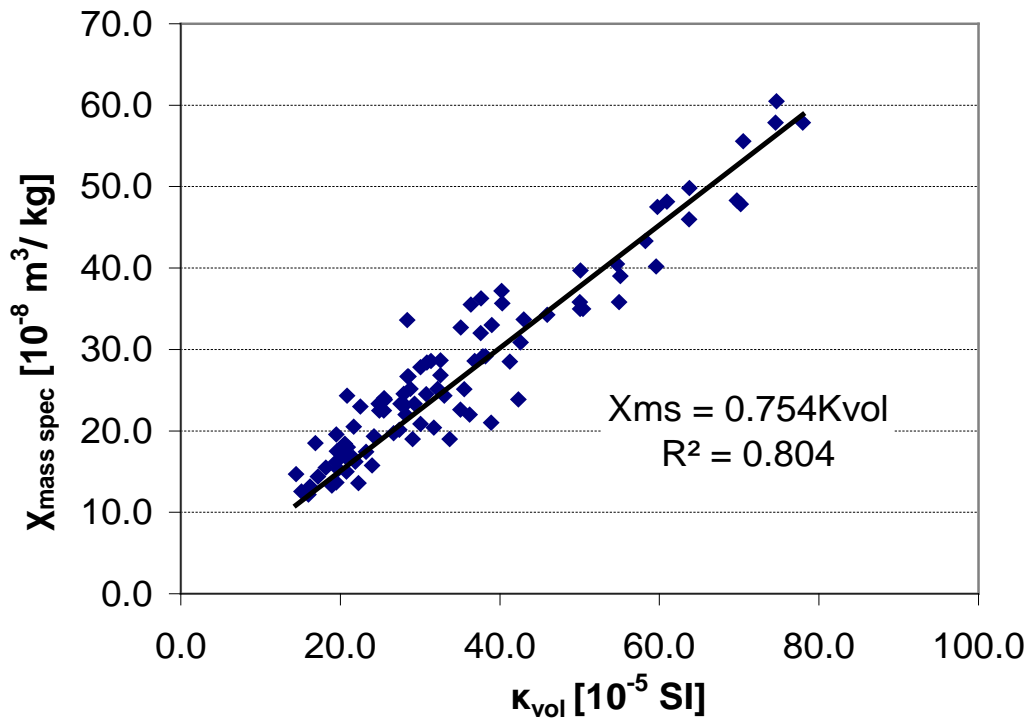
Kalibrace	Vztah Cox a $\chi$	$R^2$ kalibrace	$R^2$ predikce	$R^2$ predikce
		Výběrové body	Ostatní body	Ostatní a rozšířené body
1	$Cox = 0,203\chi + 0,376$	0,969	0,866	0,783
		$R^2$ kalibrace	$R^2$ predikce	
		Body základní sítě	Body rozšířené sítě	
2	$Cox = 0,192\chi + 0,404$	0,902		0,761

Pro predikci obsahu oxidovatelného uhlíku (Cox) byly použity dva kalibrační soubory. První kalibrační soubor (kalibrace 1 v tab. 2) obsahoval 32 výběrových bodů ze základní sítě (obr. 2). Validace predikčního modelu byla ověřena na ostatních 67 bodech základní sítě a na 170 bodech, které byly tvořeny 67 ostatními body základní sítě a 103 body rozšířené sítě. Druhý kalibrační soubor (kalibrace 2 v tab. 2) obsahoval 99 bodů základní sítě a predikční model se ověřoval na 103 bodech rozšířené sítě (obr. 2). Vztahy v tab. 2 potvrzují silnou vazbu mezi obsahem oxidovatelného uhlíku (Cox) a magnetickou susceptibilitou měřenou při nízké frekvenci (0,47 kHz). Je tedy zřejmé, že měřením hmotnostně specifické magnetické susceptibility v laboratoři lze predikovat množství oxidovatelného uhlíku a tedy i mapovat stupeň degradace půd ve sledovaném regionu.

### **3.9. Vyhodnocení vztahu mezi hmotnostně specifickou ( $\chi$ ) magnetickou susceptibilitou a objemovou magnetickou susceptibilitou ( $\kappa$ )**

Vyhodnocení vztahu mezi hmotnostně specifickou magnetickou susceptibilitou ( $\chi$ ) měřenou v terénu a objemovou magnetickou susceptibilitou ( $\kappa$ ) vyhodnocenou v laboratoři je důležité pro zefektivnění hodnocení degradace půd v terénních podmínkách. Hmotnostně specifická magnetická susceptibilita ( $\chi$ ) na rozdíl od objemové susceptibility ( $\kappa$ ) je přesnější magnetickou půdní charakteristikou, poněvadž bere v úvahu i hmotnost vzorků. Z korelace na obr. 6 mezi hmotnostně specifickou a objemovou susceptibilitou (vyhodnocenou pro body základní sítě) je však zřetelně demonstrováno, že terénní měření magnetické susceptibility povrchových půd velmi dobře charakterizuje jejich magnetické vlastnosti včetně koncentrace ferimagnetických minerálů. Je evidentní, že přímým měřením magnetické susceptibility v terénu lze také predikovat množství oxidovatelného uhlíku a tedy i mapovat stupeň degradace půd ve sledovaném regionu. Tím je efektivita navržené metodiky zvýšena, poněvadž umožňuje využít relativně rychlé a ekonomicky nenáročného měření půdní susceptibility pomocí polní sondy. Pomocí polního měření je tak možné hodnotit stav půdy na vytyčeném pozemku v mnohem větším detailu.

Hodnota frekvenčně závislé magnetické susceptibility  $\kappa_{FD}$  byla pro celý soubor odebraných půdních vzorků měřena pomocí duálního senzoru Bartington MS2D. Zjištěné hodnoty v rozmezí 3 až 10 (%), jednoznačně indikují dominantní přítomnost velmi jemných (SP) ferimagnetik v půdách. Tím je potvrzeno, že ferimagnetika pedogenního původu jsou příčinou zjištěných relativně vysokých hodnot magnetické susceptibility svrchních černozemních půd.

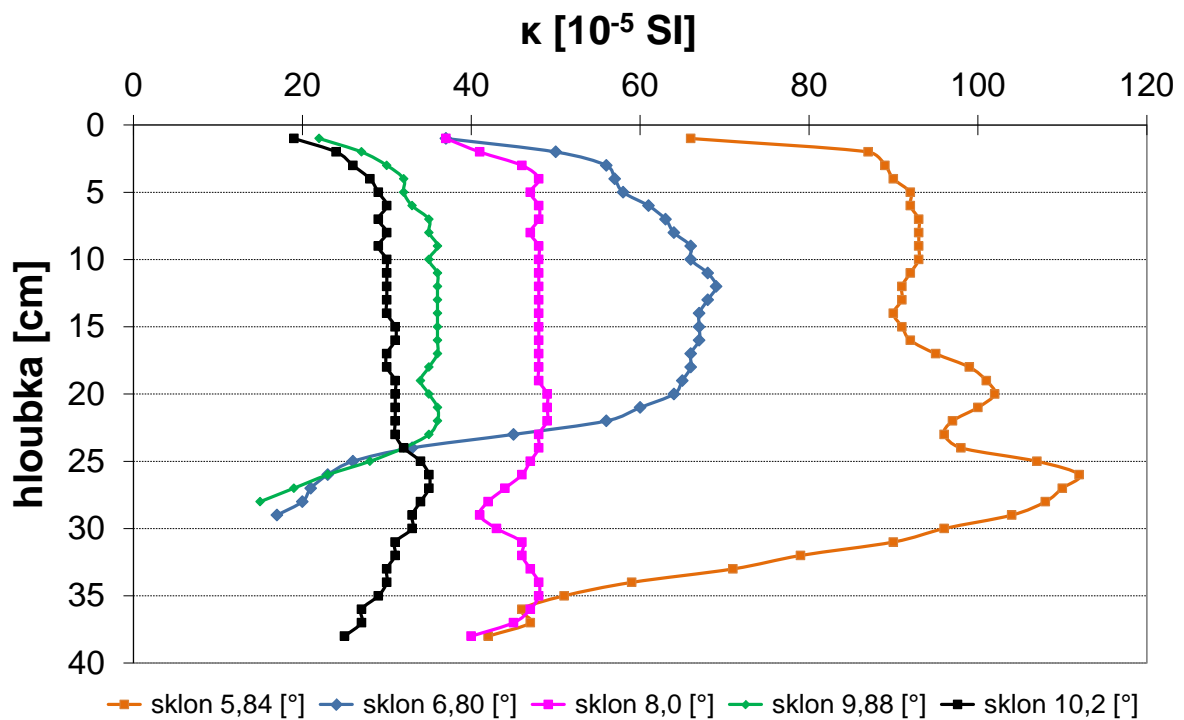


Obr. 6: Korelace hmotnostně specifické ( $\chi$ ) a objemové ( $\kappa$ ) magnetické susceptibility měřené na povrchu půdy.

### 3.10. Vyhodnocení vertikálního rozdělení objemové magnetické susceptibility ( $\kappa$ )

Ve svažitéch územích je degradace půd především důsledkem vodní eroze povrchových půdních vrstev. Tu lze identifikovat pomocí měření hloubkových profilů objemové magnetické susceptibility ( $\kappa$ ) na vybraných lokalitách s odlišnou sklonitostí (obr. 7). Mocnost erodované půdní vrstvy, bohaté na feromagnetika pedogenního původu i organický materiál, je nepřímo úměrná sklonitosti terénu. Jak magnetická susceptibilita, tak i obsah oxidovatelného uhlíku ( $C_{\text{ox}}$ ) na silně skloněných úsecích jsou mnohem menší než v méně erozí zasažených rovinatých polohách. Navíc je z průběhů magnetické susceptibility vidět patrný přechod mezi organominerálním horizontem (A) a minerálním horizontem (Ck).





Obr. 7: Hloubkové profily magnetické susceptibility půd na svažitém terénu.

#### 4. Přínos metodiky

Předkládaná metodika zavádí nový parametr, a to magnetickou susceptibilitu, pro stanovení degradace půd. Výsledky testování ukázaly, že v černozemních lokalitách magnetická měření poskytují spolehlivou, nedestruktivní a dostatečně přesnou metodu pro určení i monitorování obsahu organické hmoty (oxidovatelného uhlíku) v půdách. Hlavní předností metody půdní magnetometrie je relativní snadnost měření magnetické susceptibility polní sondou přímo v terénu. Ve srovnání se standardními chemickými metodami stanovení uhlíku je nepřímá magnetická metoda mnohem ekonomičtější, umožňuje získat mnohem rychleji rozsáhlý soubor dat na zkoumaných lokalitách. Ve svažitých územích pozice na svahu ovlivňuje půdní parametry (magnetickou susceptibilitu i obsah organické hmoty). Zvýšená magnetická susceptibilita ve svrchních půdních horizontech je důsledkem zvýšené koncentrace pedogenních ferimagnetik, ty jsou následně redistribuovány erozními procesy. Metodologie založená na magnetické

susceptibilitě může být využita k monitorování míry eroze půd ve svažitém terénu.

## **5. Srovnání novosti postupu**

Využití magnetických parametrů půd pro účely stanovení jejich degradace je zcela nový přístup. Půdní magnetometrie je nedestruktivní, citlivá a rychlá metoda, která se osvědčila například při zkoumání znečištění půd a dalších environmentálních studiích.

## **6. Popis uplatnění metodiky**

Lokality s potenciálním ohrožením půdní degradací tvoří nezanedbatelné procento z půdního fondu. Metodika mapování obsahu organické hmoty v půdách pomocí půdní magnetometrie byla vytvořena především pro subjekty zabývající se průzkumem půdního prostředí v ohrožených lokalitách a ochrany přírody. Bude využita především výzkumnými pracovišti, rezortními organizacemi a univerzitami. Přináší informace též pro zemědělská pracoviště obhospodařující ohrožené lokality.

## **7. Ekonomické aspekty**

Ekonomické aspekty využití této metodiky jsou nepřímé a vyplývají pro vlastníky zemědělsky využívaných půd v lokalitách ohrožených vysokým stupněm degradace. Cílené mapování povrchové půdní susceptibility poskytne informace o kritických místech a umožní volbu šetrnějšího obhospodařování.

Finanční úspora vychází jednak ze snížení počtu sond, kde je třeba odebírat půdní vzorky a následně na nich stanovovat analýzy a nákladů na měření nově navrhovanými metodami. Počet vzorků je odvozen z požadovaného detailu vymezení půdních vlastností a členitostí terénu.

Ekonomická úspora je pro příklad ilustrována na stanovení obsahu oxidovatelného uhlíku (Cox) pro 1 000 odběrových bodů. Celkové náklady na odběr vzorků a provedení analýzy obsahu Cox pro 1 000 odebraných vzorků jsou (při cenách za odběr 253 Kč, homogenizaci 60 Kč, úpravu vzorků na analytickou jemnost 30 Kč a změření obsahu oxidovatelného uhlíku 110 Kč) **453 000 Kč**. Náklady na kalibraci modelu, který je kalibrován na 1/10 vzorků, (cena za odběr 253 Kč, homogenizaci 60 Kč, úpravu vzorků na analytickou jemnost 30 Kč, změření obsahu oxidovatelného uhlíku 110 Kč a měření magnetické susceptibility 20 Kč) činí **47 300 Kč**. Náklady na měření magnetické susceptibility u zbývajících počtu upravených vzorků a jejich interpretaci jsou **326 700 Kč**. Úspora nákladů je tedy **79 000 Kč**. Další úspory je možno dosáhnout měřením magnetické susceptibility přímo v terénu. Při nákladech na kalibraci modelu **49 300 Kč**, který je kalibrován na 1/10 vzorků, (cena za odběr 253 Kč, homogenizaci 60 Kč, úpravu vzorků na analytickou jemnost 30 Kč, změření obsahu oxidovatelného uhlíku 110 Kč, laboratorní měření magnetické susceptibility 20 Kč a terénní měření magnetické susceptibility 20 Kč) a nákladech na měření zbývajících vzorků Kč (při cenách za observaci 127 Kč, měření magnetické susceptibility v terénu 20 Kč). Pak by celková úspora nákladů činila **271 400 Kč**. Ceny za odběry půdních vzorků a stanovení vycházejí z ceníku VÚMOP (VÚMOP, 2013). Ceny jsou uvedeny bez DPH.

## **8. Dedikace**

Tato metodika vznikla za finanční podpory Ministerstva zemědělství, NAZV a programu „KUS“ PP3 – Podpora politiky agrárního sektoru, v rámci řešení projektu QJ1230319 „Vodní režim půd na svažitém zemědělsky využívaném území“. Pilotní studie, která se zabývala prostorovou distribucí půdních vlastností na geomorfologicky rozmanitém území a sloužila při přípravě návrhu projektu QJ1230319, byla provedena v rámci projektu

GAČR 526/08/0434 „Vliv půdní struktury na charakter proudění vody a transport rozpuštěných látek v půdním prostředí“. Rovněž byla při přípravě projektu QJ1230319 využita data získaná v rámci řešení projektu Grantové agentury AVČR, A300120701 „Dlouhodobé měření a analýza dynamiky magnetických částic atmosférického spadu v půdách“.

## Literatura

### Seznam použité související literatury

- De Jong, E., Nestor, P. A., Pennock, D. J. 1998. The use of magnetic susceptibility to measure long-term soil redistribution. *Catena*, 32: 23-35.
- Dearing, J. 1994. Environmental magnetic susceptibility: using Bartington MS2System. Chi Publishing, Kenilworth, England.
- Dearing, J. A, Hay, K. L., Baban, S. M .J., Huddleston, A. S., Wellington, E. M. H., Loveland, P. J. 1996. Magnetic susceptibility of topsoils: an evaluation of conflicting theories using national data set. *Geophysical Journal International*, 127: 728-734.
- Fassbinder, J. W. E., Stanjek, H., Vali, H. 1990. Occurrence of magnetic bacteria in soils. *Nature*, 343: 161-163.
- Flanagan, D. C., Nearing, M. A. 1995. USDA – Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation. NSERL Report no. 10. USDA–ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana 47097.
- Jakšík, O., Kodešová, R., Kubiš, A., Stehlíková, I., Drábek, O., Kapička, A. 2015. Soil aggregate stability within morphologically diverse areas. *Catena*, 127: 287-299.
- Jordanova, D., Jordanova, N., Petrov, P., Tsacheva, T., 2010. Soil development of three Chernozem-like profiles from North Bulgaria revealed by magnetic studies. *Catena*, 83: 158-169.
- Kapička, A., Petrovský, E. 2003. Magnetic properties of soils - anthropogenic and environmental aspects In: G. Füleký (Ed.): *Soils and Archaeology*, BAR International Series 1163, Archaeopress, Oxford, 1-3.
- Kapička, A., Petrovský, E., Fialová, H., Kodešová, R. 2010. Factors influencing reliability of magnetic pollution mapping - A review. *Advances in Geosciences*, 20: 273-282.

- Maher, B. A. 1986. Characterization of soils by mineral magnetic measurements. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 42: 76-92.
- Maher, B. A., Taylor, R. 1988. Formation of ultrafine-grained magnetite in soils. *Nature*, 336: 368-370.
- Murad, E., Schwertmann, U. 1993. Temporal stability of fine-grained magnetite. *Clays and clay minerals*, 41: 111-113.
- Penížek, V., Zádorová, T., Kodešová, R., Klement, A. (2014): Metodika optimalizace vzorkovací sítě pomocí využití analýzy reliéfu pro popis prostorové variability půdních vlastností v rámci půdních bloků. ČZU v Praze, ISBN: 978-80-213-2533-3.
- Petrovsky, E., Hulka, Z., Kapicka, A. 2004: A new tool for *in situ* measurements of the vertical distribution of magnetic susceptibility in soils as basis for mapping deposited dust. *Environmental Technology*, 25: 1021-1029.
- Schibler, L., Boyko, T., Ferdyn, M., Gajda, B., Holl, S., Jordanova, N., Rosler, W. 2002. Topsoil magnetic susceptibility mapping: Data reproducibility and compatibility, measurement strategy. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 46: 43-57.
- Schwertmann, U. Iron oxides. *Encyclopedia of Soil Science*, Springer 2008.
- Singer, M. J., Fine, P. 1989. Pedogenic factors affecting magnetic susceptibility of Northern California soils. *Soil Science Society of America Journal*, 53: 1119-1127.
- Stanjek, H., Fassbinder, J. W. E., Vali, H., Wagele, H., Graf, W. 1994. Evidence of biogenic greigite (ferrimagnetic  $\text{Fe}_3\text{S}_4$ ) in soil. *European Journal of Soil Science*, 45: 97-103.
- Thompson, R., Oldfield, F. 1986. *Environmental Magnetism*. Allen and Unwin, London.



## Seznam předcházejících publikací autorů

- Jakšík, O., Kodešová, R., Kapička, A., Dlouhá, Š., Bayarsaighan, S. Fér, M., Klement, A., 2013. The possibility of using magnetic susceptibility measurements for evaluating degradation of erosion affected soils. In Čelková, A. (Ed.): The State of the Art of Hydrological Research, Conference Proceedings, Institute of Hydrology Slovak Academy of Sciences and the Slovak Committee for Hydrology, ISBN 978–80–89139–30–9, 92-97.
- Jakšík, O., Kodešová, R., Kubiš, A., Stehlíková, I., Drábek, O., Kapička, A. 2015. Soil aggregate stability within morphologically diverse areas. *Catena*, 127: 287-299.
- Kapicka, A., Dlouha, S., Grison, H., Jaksik, O., Kodesova, R., Petrovsky, E. 2013. Magnetism of soils applied for estimation of erosion at an agricultural land. *Geophysical Research Abstracts Vol. 15, EGU2013 - 4774.*
- Kapicka, A., Dlouha, S., Grison, H., Jaksik, O., Petrovsky, E., Kodesova, R. 2013. Magnetic properties of soils – a basis for erosion study at agricultural land in southern Moravia In: *Water resources, forest, marine and ocean ecosystems. Conf. Proceedings 13<sup>th</sup> SGEM Conference, Albena 16-22 June 2013. pp. 577-584.*
- Kapicka, A., Dlouha, S., Petrovsky, E., Jaksik, O., Grison, H., Kodesova, R. 2014. Soil erosion at agricultural land in Moravia loess region estimated by using magnetic properties. *Geophysical Research Abstracts Vol. 16, EGU2014 - 2840, EGU General Assembly 2014.*
- Lesovaya, S. N., Kapicka, A., Petrovski, E., Aparin, B. F. 2003. Pedogenic and lithogenic features in mineralogical composition of chernozem developed from red/Earth deposits. *Eurasian Soil Science*, 36: 1325-1333.

Penízek, V., Zádorová, T., Kodešová, R., Klement, A. (2014): Metodika optimalizace vzorkovací sítě pomocí využití analýzy reliéfu pro popis prostorové variability půdních vlastností v rámci půdních bloků. ČZU v Praze, ISBN: 978-80-213-2533-3.

Petrovský, E., Hůlka, Z., Kapička, A. 2004. A new tool for *in situ* measurements of the vertical distribution of magnetic susceptibility in soils as basis for mapping deposited dust. *Environmental Technology*, 25: 1021-1029.

## **Normy pro stanovení půdních vlastností**

ISO 11277:2009: Soil quality – Determination of particle size distribution in mineral soil material – Method by sieving and sedimentation

ISO 10694:1995: Soil quality – Determination of organic and total carbon after dry combustion (elementary analysis)

ISO 14235:1998: Soil quality – Determination of organic carbon by sulfochromic oxidation

## Summary

This work has been supported by the Ministry of Agriculture of the Czech Republic (Project No. QJ1230319, “Soil water regime within a sloping agricultural area”). The goal was to propose methodology for using the soil magnetic parameters for accessing soil properties and their spatial distribution within agricultural areas affected by water erosion. Methodology includes: choice of sampling design for target area (regular, space filling, optimized based on other auxiliary data) and soil sampling (topsoil), soil sample processing (drying, grinding, sieving, etc.), method of magnetic susceptibility measurements (using Bartington MS2D, Bartington MS2B and Kappamet SM400) and procedure to calibrate models of predicting soil properties from soil magnetic properties. Prediction of the oxidable organic carbon from the mass specific magnetic susceptibility determined in the laboratory is shown here as an example of practical application of this methodology for soil properties assessment. In addition close correlation between volume magnetic susceptibility measured directly in the field and mass specific magnetic susceptibility obtained in the laboratory documents that the oxidable organic carbon may be estimated directly from the field measurements. Magnetic method, although being indirect is more cost efficient than standard chemical determination of organic carbon. The oxidable organic carbon prediction is shown here due to the fact, that oxidable organic carbon (soil organic matter) is a major indicator of soil degradation caused by water erosion.

**Keywords:** spatial variability, volume magnetic susceptibility, mass specific magnetic susceptibility, oxidable organic carbon, soil degradation, water erosion

Název	Metodika pro hodnocení půdních vlastností pomocí magnetické susceptibility aplikovatelná pro hodnocení degradace půd v důsledku vodní eroze
Autoři	RNDr. Aleš Kapička, CSc., prof. Ing. Radka Kodešová CSc., Ing. Ondřej Jakšík, Ph.D., Ing. Aleš Klement, Ph.D., RNDr. Eduard Petrovský, CSc., Ing. Hana Grison, Ph.D.
Vydavatel	Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů, Katedra pedologie a ochrany půd  Geofyzikální ústav AV ČR, v.v.i.
Vydání	2014
Náklad	50
Počet stran	28
Tiskárna	powerprint s.r.o., Brandejsovo nám. 1219/1, 165 00 Praha 6 – Suchbátka
ISBN	978-80-213-2532-6

