

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

Katedra pedologie a ochrany půd



**Česká zemědělská
univerzita v Praze**

Distribuce a frakcionace fosforu v koluvizemních půdách

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí práce: RNDr. Václav Tejnecký, Ph.D.
Konzultant: doc. RNDr. Tereza Zádorová, Ph.D.
Bakalant: Natálie Zuzana Ondrašíková

© 2024 ČZU v Praze

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Natálie Zuzana Ondrašíková

Územní technická a správní služba v životním prostředí

Název práce

Distribuce a frakcionace fosforu v koluvizemních půdách

Název anglicky

Distribution and fractionation of phosphorus in colluvial soils

Cíle práce

Hypotéza

Množství a frakce fosforu odrážejí environmentální podmínky při vzniku koluvizemních půd a liší se v rámci pedogenetického procesu.

Cíl práce

Stanovit frakce fosforu v koluvizemních půdách za pomoci sekvenční extrakce.

Metodika

Koluvizemní půdy odrážejí vývoj svažitých území a vznikají díky erozi. Sledována bude černozemní oblast Brumovice, kde dochází k intenzivní erozi a vzniku koluvizemních půd po tisíce let.

Stanoveny budou frakce P v 4 m hlubokém půdním profilu koluvizemně. Využita bude pěti kroková sekvenční extrakce, která je určena pro stanovení frakcí P. Získaná data budou dána do spojitosti s dalšími půdními vlastnostmi a diskutována.

Doporučený rozsah práce

40-50 stran

Klíčová slova

černozem, eroze, spraš, pedogeneze,

Doporučené zdroje informací

- Oelmann Y, et al. 2021. Above- and belowground biodiversity jointly tighten the P cycle in agricultural grasslands. *Nature Communications* 12:4431.
- Roberts K, Defforey D, Turner BL, Condon LM, Peek S, Silva S, Kendall C, Paytan A. 2015. Oxygen isotopes of phosphate and soil phosphorus cycling across a 6500year chronosequence under lowland temperate rainforest. *Geoderma* 257-258:14-21.
- Stutter MI, Shand CA, George TS, Blackwell MSA, Dixon L, Bol R, MacKay RL, Richardson AE, Condon LM, Haygarth PM. 2015. Land use and soil factors affecting accumulation of phosphorus species in temperate soils. *Geoderma* 257-258:29-39.
- Tiessen H, Moir JO. 2007. Characterization of available P by sequential extraction in Carter MR, and Gregorich EG, editors. *Soil Sampling and Methods of Analysis*, 2nd ed. CRC Press.
- Weihrauch C, Opp C. 2018. Ecologically relevant phosphorus pools in soils and their dynamics: The story so far. *Geoderma* 325:183-194.
-

Předběžný termín obhajoby

2023/24 LS – FŽP

Vedoucí práce

RNDr. Václav Tejnecký, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra pedologie a ochrany půd

Konzultant

doc. RNDr. Tereza Zádorová, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 2. 11. 2022

prof. Dr. Ing. Luboš Borůvka

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 20. 12. 2022

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 18. 12. 2023

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně, pod vedením RNDr. Václava Tejneckého, Ph.D., a že jsem uvedla veškeré literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpala.

V Praze, dne 5. 1. 2023

Podpis:

Poděkování

Ráda bych poděkovala mému vedoucímu, RNDr. Václavu Tejneckému, Ph.D. za velkou ochotu pomoci při praktické části v laboratoři, za odbornou pomoc a cenné rady, které mi poskytl během psaní a také za vstřícný přístup. Dále bych chtěla vyjádřit své díky paní doc. RNDr. Tereze Zádorové, Ph.D. za pomoc s výběrem tématu, poskytnutí vzorků a informací k nim. Další poděkování patří panu Doc. Ing. Ondřeji Drábkovi Ph.D. za analýzu P ICP-OES a projekt GAČR GA21 – 11879S Pedogeneze koluviálních půd: multidisciplinární přístup v modelování dynamiky vývoje v prostředí půda – krajina.

V Praze, dne 5. 1. 2023

Abstrakt

Na svahovitých terénech, kde dochází k erozi, se často nacházejí koluvizemní půdy, které vznikají vlivem pohybu a ukládání půdních částic. Cílem této bakalářské práce bylo detailně prozkoumat a popsat frakcionaci fosforu v 380 cm hlubokém půdním profilu koluvizemní půdy na jižní Moravě, konkrétně v katastru obce Brumovice. Pro analýzu byla využita pětikroková sekvenční extrakce, která umožňuje rozdělit fosfor do různých frakcí podle použitých extrakčních činidel. První frakce (P1) byla extrahována pomocí vody a zaměřovala se na volný fosfor. Druhá frakce (P2) byla analyzována pomocí 0,5M roztoku hydrogenuhličitanu sodného, což je fosfor dostupný pro rostliny. Frakce (P3) byla následně extrahována 0,1M roztokem hydroxidu sodného za vyššího pH, s cílem získat organický fosfor, který se váže s fázemi železa a hliníku. Čtvrtá frakce (P4) byla získána pomocí 1M kyseliny chlorovodíkové, která rozpouští fáze vápníku a uhličitany. Poslední frakce (P5) je residuální a poskytuje informace o minerálním fosforu obtížně rozpustném v půdě (extrakce koncentrovanou kyselinou chlorovodíkovou za tepla). Výsledky extrakce přinesly zajímavé poznatky ohledně rozdělení fosforu v půdě. Největší množství fosforu v průměru 205 mg kg⁻¹ bylo zjištěno ve frakci (P4), což naznačuje významnou přítomnost fosforu vázaného na uhličitany. Naopak, nejméně fosforu bylo nalezeno ve frakci (P2) s průměrným obsahem 6,96 mg kg⁻¹. Tento nízký obsah fosforu ukazuje nižší dostupnost pro rostliny v této frakci, což může mít vliv na jejich výživu a růst. Omezení hnojení mělo značný vliv na procesy frakcionace fosforu a na dopad životního prostředí. Z výsledků extrakce, lze vyvodit, že nízké množství volného/dostupného fosforu ve svrchní části půdního profilu bude mít vliv na menší úrodnost půdy. Tato skutečnost má důsledky pro růst, vývoj a výnos rostlin, neboť malé množství fosforu může omezovat jejich schopnost využívat živiny a prosperovat. V hloubce (230-360 cm) bylo nalezeno velké množství organického fosforu a napříč celým profilem dominovala frakce (P4).

Klíčová slova:

Eroze, extrakce, fosfor, frakce, frakcionace, koluvizemní půda

Abstract

Colluvial soils are often found on sloping terrains where erosion occurs and are formed by the movement and deposition of soil particles. The aim of this bachelor thesis was to investigate and describe in detail the phosphorus fractionation in a 380 cm deep soil profile of colluvial soils in South Moravia, specifically in the municipality of Brumovice. For the analysis, a five-step sequential extraction was used, which allows phosphorus to be divided into different fractions according to the extraction reagents used. The first fraction (P1) was extracted using water and focused on free phosphorus. The second fraction (P2) was analyzed using 0.5M sodium bicarbonate solution, which is the phosphorus available to plants. The fraction (P3) was then extracted with 0.1M sodium hydroxide solution at a higher pH, in order to obtain organic phosphorus that binds with iron and aluminium phases. The fourth fraction (P4) was obtained using 1M hydrochloric acid which dissolves the Ca and carbonate phases. The last fraction (P5) is residual and provides information on mineral phosphorus that is difficult to dissolve in soil (hot extraction with concentrated hydrochloric acid). The extraction results provided interesting insights into the distribution of phosphorus in soil. The highest amount of phosphorus, averaging 205 mg kg⁻¹, was found in fraction (P4), indicating the significant presence of carbonate-bound phosphorus. Conversely, the least phosphorus was found in fraction (P2) with an average of 6.96 mg kg⁻¹. This low phosphorus content indicates lower availability to plants in this fraction, which may affect their nutrition and growth. Fertiliser limitation has had a significant impact on phosphorus fractionation processes and environmental impact. From the results of the extraction, it can be concluded that low amounts of free/available phosphorus in the top soil profile will result in lower soil fertility. This has implications for plant growth, development and yield, as low phosphorus levels can limit their ability to use nutrients and thrive. A large amount of organic phosphorus was found at depth (230-360 cm) and across the whole profile the (P4) fraction dominated.

Keywords:

Erosion, extraction, phosphorus, fraction, fractionation, colluvial soil

Obsah

1.	ÚVOD.....	9
2.	CÍL PRÁCE A HYPOTÉZA.....	10
3.	LITERÁRNÍ REŠERŠE.....	11
3.1	KOLUVIZEMNÍ PŮDY.....	11
3.1.1	<i>Definice</i>	11
3.1.2	<i>Vznik a klasifikace</i>	11
3.1.3	<i>Materiál, morfologie a tloušťka</i>	12
3.1.4	<i>Obecné typy koluvizemních profilů</i>	13
3.1.5	<i>Procesy probíhající v koluvizemích</i>	15
3.2	FOSFOR.....	15
3.2.1	<i>Fyzikální a chemické vlastnosti</i>	15
3.2.2	<i>Výskyt v životním prostředí</i>	15
3.2.3	<i>Fosfor v půdě</i>	16
3.2.4	<i>Cyklus fosforu v půdě</i>	18
3.2.5	<i>Fosfor a rostliny</i>	20
3.2.6	<i>Fosfor v půdě z hlediska historie</i>	20
3.2.7	<i>Metody studia fosforu v půdě</i>	21
4.	STUDOVANÁ OBLAST.....	23
4.1	VYMEZENÍ OBLASTI.....	23
4.2	POPIS ODBĚRNÉHO MÍSTA.....	24
5.	METODIKA.....	25
5.1	POSTUP SEKVENČNÍ EXTRAKCE (TIESSEN, MOIR 2007):.....	25
5.2	POUŽITÉ PŘÍSTROJOVÉ VYBAVENÍ.....	27
5.3	ÚPRAVA A ZPRACOVÁNÍ DAT.....	27
6.	VÝSLEDKY.....	28
6.1	STATISTICKÉ VLASTNOSTI FRAKČÍ CELKOVÉHO P A P-PO ₄ ³⁻	28
6.2	CELKOVÝ EXTRAHOVANÝ P.....	30
6.3	EXTRAHOVANÝ ORGANICKÝ P.....	32
7.	DISKUZE.....	33
8.	ZÁVĚR.....	36
9.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	37
9.1	LITERATURA.....	37

9.2	INTERNETOVÉ ZDROJE	40
------------	---------------------------------	-----------

1. Úvod

V posledních dvou desetiletích se environmentální a geoarcheologický výzkum stále více zaměřuje na studium koluvizemních půd, avšak pedologické funkce a postavení jako specifických půdních jednotek byly zřídka předmětem diskuse. Tyto typy půd vznikají především v koluviích, což jsou oblasti na úpatí svahů, kam je materiál přenášen erozí z vyšších úrovní svahů.

Koluvizemní půdy jsou výrazné svým vysokým obsahem organické hmoty, což může přispět k jejich specifickým vlastnostem a biodiverzitě. Jejich organická hmota se může vyskytovat velice hluboko (až několika metrů) a může tak utvářet charakteristické půdní profily. Vytváření a ukládání půdní organické hmoty v koluvizemních půdách jsou důležité procesy, které ovlivňují půdní strukturu a výživu rostlin. Zároveň fungují jako archiv (geoarchiv), který zaznamenává změny v krajině a klimatických podmínkách v průběhu času. Studium těchto půd může poskytnout cenné informace o historickém vývoji krajiny, erozních procesech a vlivu lidské činnosti. Jejich role jako geoarchivu umožňuje nahlédnout do minulosti a pochopit dlouhodobé změny v krajině a životním prostředí.

Dostupný fosfor představuje prvek, jehož koncentrace v původních půdách obvykle dosahuje nízkého zastoupení (tato hodnota se pohybuje okolo 100 - 500 mg kg⁻¹), a sloučeniny fosforu v běžných půdách jsou často pro rostliny obtížně dostupné. Během formování koluvizemí dochází k ukládání fosforu, přičemž jeho různé formy odrážejí environmentální podmínky v krajině.

Moje bakalářská práce byla zaměřena na studium frakcionace fosforu pomocí sekvenční extrakční analýzy (Tiessen, Moir 2007). Studium frakcionace fosforu skrze tuto analýzu představuje sofistikovaný přístup k identifikaci a kvantifikaci různých forem fosforu v půdním prostředí. Tato analýza umožňuje rozlišit mezi různými frakcemi fosforu, jako jsou rozpustné formy, organicky vázaný fosfor nebo fosfor vázaný na minerály. Tato podrobná charakterizace fosforových forem může poskytnout cenné poznatky o dynamice fosforu v půdě a jeho dostupnosti pro rostliny a také co se s fosforem dělo v průběhu pedogeneze hlubokých půd.

2. Cíl práce a hypotéza

Cílem a hypotézou této bakalářské práce je ověřit týkající se množství a frakce fosforu jako indikátorů environmentálních podmínek během formování koluvizemních půd v rámci pedogenetického procesu. Bude provedena literární rešerše o koluvizemních půdách a fosforu. Identifikace frakcí fosforu v půdním profilu koluvizemě v hloubce 4 metry bude provedena pomocí pětikrokové sekvenční extrakce v černozemní oblasti Brumovice. Získaná data budou následně dána do spojitosti s dalšími půdními vlastnostmi a diskutována.

3. Literární rešerše

3.1 Koluvizemní půdy

3.1.1 Definice

Ve vědecké literatuře se z obecného hlediska objevují dvě definice koluvizemních půd. První definice charakterizuje tyto půdy jako nedávno vytvořené, nedokonale vyvinuté, vznikající z akumulace materiálu, který tvoří půdní profil. Nejsou zde žádné známky pokročilých post-depozičních půdotvorných procesů (Šwitoniak 2015). Koluvizem může vzniknout na jakémkoliv existujícím starším materiálu nebo na bývalé půdě. O koluvizemních půdách hovoříme pouze v případě, že jsou splněna hlavní kritéria: poskytují prostředí vhodné pro růst rostlin, skládají se z minerálních a organických složek uspořádaných do struktur a zároveň prochází kontinuálním vývojem (Zádorová, Penížek 2018).

Druhá definice se zaměřuje na půdu, která se vyvinula různými post-depozičními procesy z koluvia nebo nevyvinuté koluvizemní půdy. V tomto případě termín „koluvizem“ v názvu půdy odkazuje na charakteristiku matečného materiálu, nikoli na vlastní genezi půdy. Tento typ tedy označujeme jako půdy odvozené od koluvia (Zádorová, Penížek 2018).

3.1.2 Vznik a klasifikace

Obecně ze sedimentologické a geomorfologické studie lze obecně konstatovat, že vznik je připisován gravitačním a masivním erozním procesům, zahrnující soliflukci, sesuvy, suťové proudy, vymílání štěrků či skalních řícení (Millar 2014). Avšak z pedologického a geoarcheologického hlediska je vznik způsoben pomalým svahovým pohybem, převážně půdního materiálu (Fuchs & Lang 2009).

Za klíčový faktor se neuvádí stáří koluvia. Termín „koluvium“ se omezuje na sedimenty usazené pomocí různých druhů půdní eroze (větrné, vodní...) a vývoj je spojován s vlivem člověka na krajinu, ke kterému dochází od neolitu (Šwitoniak 2015).

Pro tyto půdy jsou klíčová dvě kritéria pro jeho vznik. Prvním je umístění na nestabilním svahovém prostředí, na úpatí svahů, za překážkami a v konkávních pozicích. Druhým kritériem je mocnost sedimentárního materiálu, která musí být ≥ 50 cm ve svém profilu (Zádorová, Penížek 2021).

Na základě Taxonomického klasifikačního systému půd České republiky, jak uvádí Němeček et al. (2011) se koluvizemě společně s fluvizeměmi zařazují do jedinečné skupiny, která tvoří referenční třídu fluvisolů a zahrnuje dva specifické půdní typy - koluvizem a fluvizem. Oba tyto půdní typy vznikají periodickou sedimentací, která se vyznačuje stratifikací a nerovnoměrným rozložením organického uhlíku a dalších látek v profilu (Zádorová, Penížek 2018).

3.1.3 Materiál, morfologie a tloušťka

Materiál koluviální vrstvy může vykazovat různé vlastnosti. Může být buď bez struktury nebo vykazovat vrstevnatou skladbu. Kromě toho se může lišit v různých velikostech částic a obsahovat různé množství půdní organické hmoty či forem železa a karbonátů (Poreba et al. 2011). Nicméně nejčastější charakteristika koluviálního materiálu je interpretována jako sypký a heterogenní sediment, jehož zdroj je lokální. To znamená, že proces působí v rámci jednoho svahu a na krátké vzdálenosti. Materiál je tak obtížně tříděný a nevykazuje orientaci, přičemž obsahuje úhlově tvarované částice (Zádorová, Penížek 2018). Složení koluvizemí je ovlivněno primárním zdrojem materiálu a převládajícím procesem. Když nastávají procesy hromadného rozpadu, jako je soliflukce nebo suťové proudy, tak se obvykle utváří sediment složený z horninového a půdního materiálu (Zádorová et al. 2015).

Hlavním kritériem pro identifikaci koluvizemí je existence rozlišitelné vrstvy koluvizemního materiálu v rámci půdního profilu. Přesto nelze s naprostou jistotou stanovit přesné hranice vlastností koluvizemní vrstvy (Zádorová, Penížek 2018).

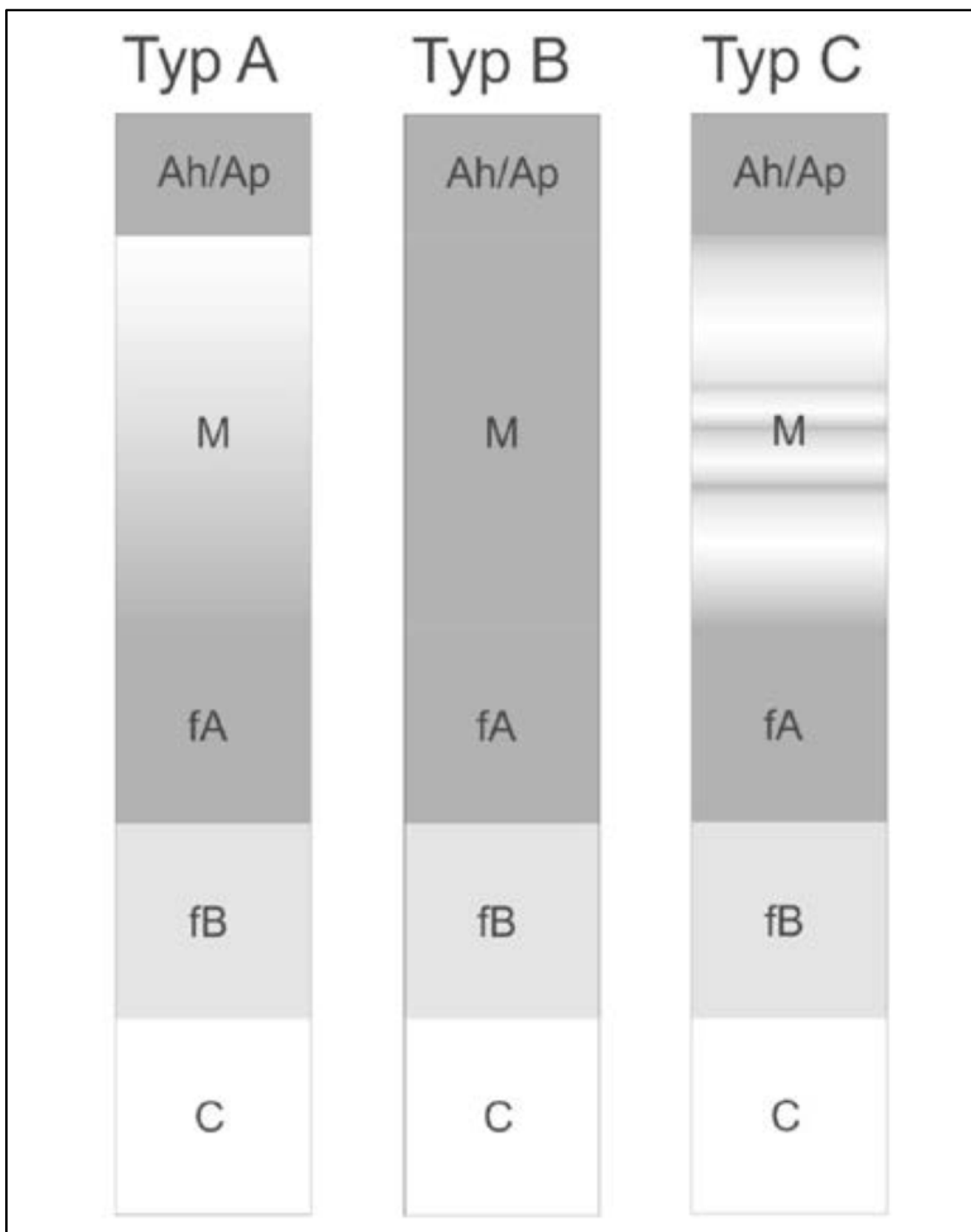
Tloušťky koluvií jsou odlišné, jelikož hodně závisí na různých faktorech (typ zdrojového materiálu, délka a periodičita, vliv člověka, půdní pokryv, typ koluviálního procesu atd.). Může se pohybovat od desítek centimetrů až po několik metrů (extrémní případy) a nemusí nutně souviset s jejím stářím nebo délkou sedimentace (Zádorová et al. 2015). Například v některých oblastech může být hloubka koluvizemních půd v rozsahu několika desítek centimetrů až po jeden metr. V jiných případech však mohou dosahovat hloubky několika metrů. Přesná hodnota bude záviset na konkrétních podmínkách v dané oblasti (Paton et al. 1995).

3.1.4 Obecné typy koluvizemních profilů

Navzdory heterogenitě, kterou lze pozorovat v profilech studovaných koluvizemních půd, se v jejich vývoji projevují společné rysy. Na základě odlišností ve stratigrafii, intenzitě a formě koluvizemí lze tyto půdní profily obecně rozdělit do tří kategorií. Avšak v terénu můžeme najít i další přechodné či kombinované typy koluvizemí. Prvním obecným typem, který rozlišujeme, je typ A (viz obrázek 1), který má stratigrafii profilu charakteristickou pro zralejší koluvizemě a reflektuje tak dlouhodobou erozní historii v dané oblasti (Zádorová, Penížek 2018). Spodní část půdního profilu obvykle představuje původní půdní vrstvu, která se vyvinula půdním procesem na místě. Nad touto vrstvou se rozprostírají vrstvy reflektující ranou sedimentaci humózních vrstev. Blíže k povrchu dochází k převládajícímu ukládání méně humózního až minerálního materiálu z erodovaných horizontů B a C (Němeček et al. 1990). Tento typ půdního profilu se obvykle nachází na půdách s vysokým stupněm eroze, zejména v oblastech s dlouhou historií lidského osídlení a intenzivním zemědělským využíváním (Zádorová, Penížek 2018).

Dalším obecným typem koluvizemí je typ B (viz obrázek 1). Tento druh se vyznačuje tím, že je utvářen přenášeným materiálem z humózních profilů erodovaných půd (Zádorová, Penížek 2021). Přítomnost humózní vrstvy v profilu těchto půd zvyšuje jejich zemědělskou hodnotu. Když se podíváme na mocnost tohoto typu, můžeme konstatovat, že se jedná o půdy s různě mocnými profily, a proto mohou představovat významné zásobárny organického uhlíku (Zádorová et al. 2015). Typ B nalezneme na místech, kde se rozléhá i koluvizemě typu A, akorát s rozdílným typem ukládaného materiálu a v jiných svahových partiích půd (Zádorová, Penížek 2021). Tyto koluvizemní půdy jsou nejčastějším typem, který byl popsán v několika národních systémech klasifikace půd (Němeček et al. 2011).

Koluvizemě typu C (viz obrázek 1) představují profily, kde jsou bývalé půdy pohřbeny silnými vrstvami stratifikovaného nebo nestratifikovaného materiálu chudého na organický uhlík (Świtoniak 2015). Tento typ může vznikat buď intenzivní erozí a soustředěným odtokem, který vede k rychlému navrstvení půdních sedimentů a výrazné stratifikaci půdního profilu. Tyto koluvizemě nalezneme nejčastěji na písčitéch matečných materiálech s nízkým obsahem organického uhlíku nebo v hlubokých stržích. Druhým způsobem vzniku těchto půd je pomalejší a méně intenzivní, kdy dochází k třídění materiálu během transportu (Zádorová, Penížek 2018).



Obr.1: Obecné typy koluvizemních profilů (Zádorová, Penížek 2018).

3.1.5 Procesy probíhající v koluvizemích

V počáteční fázi po usazení dochází k procesu humifikace čerstvé organické hmoty v povrchové části koluviální vrstvy. Depozice koluviálního materiálu může zpomalit mikrobiální rozklad organického uhlíku (Chaoprícha, Marín-Spiotta 2014). To může vést ke stabilizaci v hlubších částech koluvizemních profilů. Stabilita organického uhlíku v půdě je ovlivněna vlastnostmi pohřbené půdy, nadložním usazeným materiálem, klimatem, topografií a časem. Mezi další procesy, které mohou probíhat v koluvizemích, patří například zvětrávání, oxidace nebo redukce. Ve vrstvách těchto půd s příměsí erodovaného vápnatého matečného materiálu může docházet jednak k dekalifikaci nebo také ke vzniku vápnatých horizontů (Leopold, Völkel 2007).

K pedogenezi a tvorbě půdních horizontů dochází převážně v období stability svahů, kdy koluviální vrstva funguje jako matečný materiál. Pedogenní procesy ve vrstvách těchto půd jsou během jejich vývoje ovlivňovány faktory, které souvisí s vlivem člověka a prostředí (Zádorová, Penížek 2018).

3.2 Fosfor

3.2.1 Fyzikální a chemické vlastnosti

Fosfor lze definovat jako nekovový prvek s šesti radioaktivními izotopy a pouze jedním stabilním. Jeho elektronová konfigurace v základním stavu je $[\text{Ne}] 3s^2 3p^3$. Při zkoumání jeho reaktivity lze pozorovat závislost na typu alotropické modifikace. Platí, že reaktivita a rozpustnost klesají s růstem délky řetězce polymerních černých a červených modifikací. Fosfor je schopný reagovat s halogeny a kyslíkem při normální teplotě, avšak s alkalickými kovy a se sírou musí dojít k jeho zahřátí. Samozápalná teplota je okolo 35 °C. Fosfor se všemi prvky utváří binární sloučeniny, výjimkou je antimon, bismut a inertní plyny (Toužín 2008).

3.2.2 Výskyt v životním prostředí

Fosfor, jako nezbytný prvek, zastává klíčovou roli v našem životě. Jeho nepostradatelnost pro primární produktivitu ekosystémů a zemědělskou produkci byla zdůrazněna v práci George et al. (2016). V přírodě ho nalezneme jen ve formě různých

sloučenin, přičemž nejčastěji se setkáváme s orthofosforečnanu. Dále se nachází ve formě fosforečnanu vápenatého v kostech a zubech. Fosfor tvoří základní stavební kámen každé buňky v lidském těle a má klíčový význam jako stavební prvek nukleových kyselin (DNA, RNA). Kromě toho je nezbytným komponentem adenosintrifosfátu (ATP), což je látka, jež distribuuje energii pro mnoho procesů v živých buňkách. (Greenwood, Earnshaw 1993).

Fosfor najdeme i ve vodních ekosystémech, ale pouze v nepatrných koncentracích, jelikož utváří často málo rozpustné sloučeniny s hliníkem, hořčíkem a vápníkem. Koncentrace fosforečnanů se liší v závislosti na typu vodního prostředí a pohybují se od $< 0,4 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ do $> 100 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Nejnižší koncentrace jsou pozorovány v ultraoligotrofních vodách, zatímco ve splaškových vodách nebo ve vodách z rašelinišť můžeme nalézt vyšší hladiny tohoto prvku (Pitter 1999).

3.2.3 Fosfor v půdě

Různé půdy vykazují rozdílný obsah fosforu, což závisí na obsahu organických látek a zrnitosti půdy. Množství fosforu v půdě hraje klíčovou roli v ovlivňování úrodnosti půdy, což je základní faktor pro úspěšný rostlinný růst. Celkový obsah fosforu v půdě se obvykle pohybuje v relativně nízkých hodnotách, konkrétně od 200 kg do 2 000 kg fosforu na 1 hektar v horních 15 cm půdy. Druhým problémem spojeným s fosforem je, že sloučeniny fosforu, které jsou běžné v půdách, jsou často pro rostliny obtížně dostupné, protože vykazují vysokou nerozpustnost. Přidáním rozpustných forem fosforu, například prostřednictvím hnojiv, dochází k fixaci těchto forem (přeměna na nedostupné formy), což v konečném důsledku vytváří vysoce nerozpustné sloučeniny zejména s hliníkem a železem (Brady, Weil 2008).

Fosfor v půdě existuje jak v organických, tak v anorganických formách. Podíl organického fosforu v půdách se pohybuje od 2 % do 75 %, přičemž v lehkých půdách je jeho obsah zpravidla nižší než v půdách středních nebo těžkých. Naopak anorganický fosfor tvoří mezi 25 % a 98 % celkového obsahu fosforu v půdě (Fecenko, Ložek 2000).

Anorganický fosfor je v půdě obsažen ve formě původních minerálů a jejich sloučenin. Nejběžnějším minerálem, který obsahuje anorganický fosfor, je apatit (Čermák et al. 2018). Existuje několik druhů apatitu, např. *chloroapatit* $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$, *hydroxoapatit* $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ nebo *fluoroapatit* $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$. I když jsou naleziště

rozprostřena po celé České republice, výraznější těžba není možná (Toužín 2008). V neutrálních až alkalických půdách jsou za dominantní formy anorganického fosforu označovány skupiny sloučenin fosforečnanu vápenatého. V kyselých půdách jsou naopak významné minerály Strengit ($\text{Fe}^{3+}\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) a Variscit ($\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Tyto minerály jsou málo rozpustné a stabilní. Fosfor v kyselých i alkalických půdách podléhá postupným reakcím, které vedou ke vzniku sloučenin s nižší rozpustností. Čím déle tedy fosfor zůstává v půdě, tím méně rozpustný je a tím méně dostupný pro rostliny (Brady, Weil 2008).

Naopak fosfor v organické formě proniká do půdy pomocí organických hnojiv nebo posklizňovými zbytky a je součástí organické hmoty v půdě. Během procesu mineralizace je uvolňován a stává se tak dostupným pro rostliny (Čermák et al. 2018). Organický fosfor zahrnuje tři hlavní skupiny sloučenin: nukleové kyseliny, inositolfosfáty a fosfolipidy. Právě inositolfosfáty se vyskytují nejhojněji ze známých organických sloučenin fosforu a utváří okolo 10 % až 50 % celkového organického fosforu. Jejich hojnost je pravděpodobně spojena s vysokou stabilitou v různých půdních podmínkách a interakcí se složkou půdního humusu. Mezi běžné inositolfosfáty patří kyselina fytoová. Naopak nukleové kyseliny a fosfolipidy tvoří pouze 1 % až 2 % organického fosforu ve většině půd. (Brady, Weil 2008).

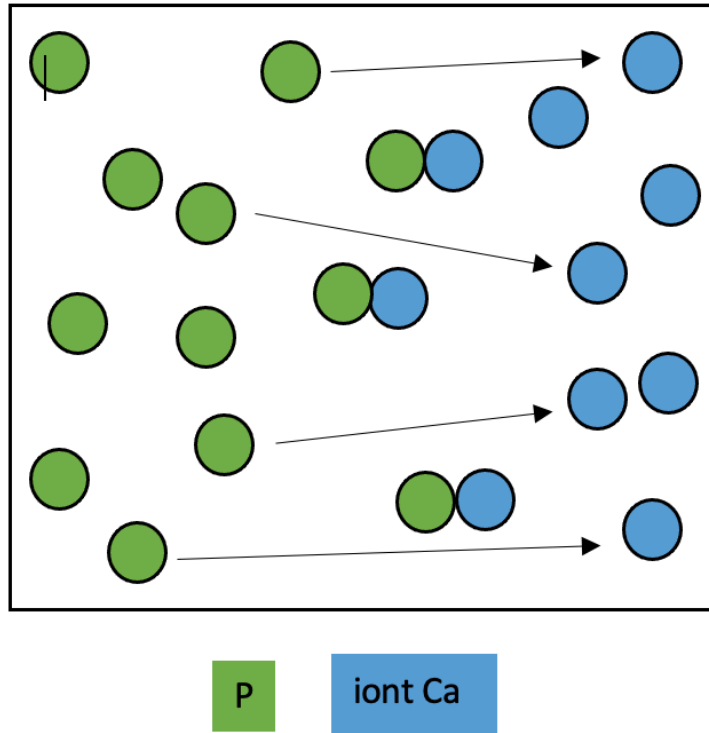
Hlavními způsoby ztráty fosforu z půdy jsou eroze půdních částic obsahujících fosfor, rozpuštěný fosfor ve vodách povrchového odtoku, odstranění rostlin nebo vyluhování do podzemních vod. Naopak vstupy fosforu do půdy jsou omezeny, ačkoliv malá množství mohou pocházet z atmosférických zdrojů, což může téměř vyrovnat ztráty v nenarušených travnatých a lesních ekosystémech. V agroekosystémech jsou hlavním zdrojem fosforu hnojiva (Brady, Weil 2008). Nicméně hlavním zdrojem fosforu je matečná hornina, která obsahuje fosfátové minerály, jako je již zmíněný apatit, strengit nebo variscit. Zvětrávání matečné horniny ovlivňuje množství fosforu uvolněného během tohoto procesu, a to se pohybuje v rozmezí $0,05$ až $1 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ rok}^{-1}$ (Pitter 1999).

3.2.4 Cyklus fosforu v půdě

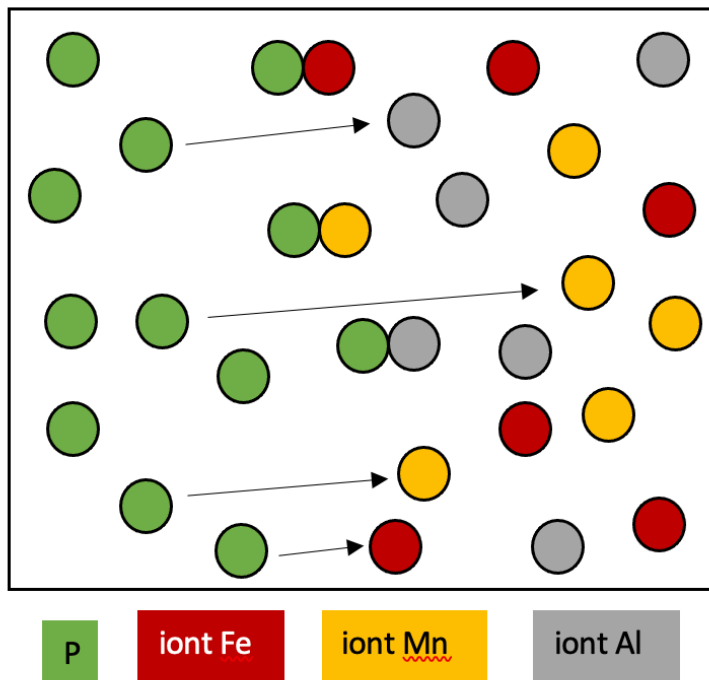
V půdě dochází k různým chemickým (fixace a retence fosforu) a biologickým (mineralizace a imobilizace) procesům, které ovlivňují cyklus fosforu. Tento cyklus je dále ovlivněn složením rostlinného odpadu, chemismem půd (pH půdy, minerální složení, chemické reakce, organická hmota) a mikrobiální aktivitou. Důležitým faktorem je také lidská činnost, zejména těžba fosforečných minerálů a jejich následné využití v hnojivech a dalších průmyslových výrobcích (Walbridge 1991).

Mikroorganismy přímo ovlivňují biologické procesy tím, že podporují rozklad (mineralizaci a dekompozici) organických sloučenin a zároveň se podílejí na imobilizaci fosforu. Mineralizace a imobilizace probíhají souběžně, a to, zda dojde k vázání fosforu do biomasy mikroorganismů nebo k jeho rozkladu, závisí na obsahu fosforu v rozkládajícím se organickém materiálu. Pokud je poměr uhlíku a fosforu větší než 300, dochází k imobilizaci; pokud je menší než 200, pak se jedná o mineralizaci (Stevenson, Cole 1999).

Mezi chemické procesy patří fixace, kdy při vázání fosforu v půdě nedochází k zpětnému uvolňování fosforu do roztoku. Dále se řadí retence, při které může dojít ke zpětnému uvolnění fosforu do půdního roztoku, ale pouze za určitých podmínek. Oba tyto procesy jsou závislé na hodnotách pH. Při vyšších hodnotách pH dochází k vázání na ionty vápníku (viz obrázek 2), zatímco při nižších hodnotách pH probíhá vazba na ionty železa, hliníku nebo manganu (viz obrázek 3) (Brady 1974).



Obr.2: Situace, kdy se při vyšším pH fosfor váže na ionty vápníku



Obr.3: Situace, kdy se při nižším pH fosfor váže na ionty železa, manganu a hliníku

3.2.5 Fosfor a rostliny

Jak již bylo zmíněno v úvodní části bakalářské práce, fosfor je nezbytný prvek, který hraje klíčovou roli v růstu a vývoji rostlin a živočichů. Adekvátní přísun fosforu podporuje základní procesy fotosyntézy, fixaci dusíku, kvetení, plodování a konečně i zrání. Fosfor je také klíčový pro rozvoj kořenového systému, zejména postranních a vláknitých kořínků. Rostliny s nedostatkem tohoto prvku se obvykle projevují jako zakrslé, s tenkými stonky, a jejich listy mohou být tmavé a téměř modrozelené. Tyto rostliny se dále vyznačují opožděnou zralostí, řídkým kvetením a nízkou kvalitou semen (Sharpley 2000).

Kořeny rostlin přijímají fosfor z půdy ve dvou formách půdního roztoku: ionty H_2PO_4^- (které jsou přijímány rychleji) a HPO_4^{2-} (které jsou přijímány pomaleji). Poměr těchto iontů je ovlivněn hodnotou půdního pH (Mengel et al. 2001).

Obecně lze fosfor v půdě rozdělit do dvou skupin. První skupinu tvoří fosfor obsažený v půdním roztoku, který je pro rostliny velmi dobře přístupný. Druhou kategorii tvoří fosfor, který je pro rostliny obtížně dostupný. Jedná se o fosfor vázaný na minerály, jako je apatit, nebo o organický fosfor, který může být vázán v organické hmotě, jako jsou organické sloučeniny nebo biomasa. Celkový příjem fosforu je výrazně ovlivněn zejména půdní reakcí, přičemž optimální pH se pohybuje kolem hodnoty 6,0. Při vyšších nebo nižších hodnotách pH může docházet k vázání fosforu na minerální částice nebo k jeho ztrátě do nedostupných forem (Smatanová, Sušil 2015).

3.2.6 Fosfor v půdě z hlediska historie

Historie fosforu v půdě je pestrá a ovlivněná různými hledisky, z nichž každé má své specifické významy a dopady. Rozvoj zemědělství hrál klíčovou úlohu v historii fosforu, neboť tento prvek byl nezbytný pro úrodu rostlin. V průběhu času se s rozvojem moderních zemědělských metod objevily nové možnosti efektivního využívání fosforu, což vedlo k zvýšení výnosů plodin (Filippelli 2002). Avšak tento pokrok s sebou přinesl i nežádoucí následky. Erozní procesy, často vyvolané intenzivním zemědělským hospodařením, představoval výzvu při snaze udržet fosfor na původních místech. Široké využívání fosforečných hnojiv vyvolávalo obavy ohledně kvality vody a eutrofizace v důsledku nadbytku fosforu v půdě. Tento nadbytek fosforu se dostával do vodních toků

prostřednictvím erozní činnosti, která přenášela fosforové částice ze zemědělských ploch do vodních toků (Withers et al. 2014).

V průběhu historie prošel management půd významným vývojem, začínaje organickými metodami hnojení v tradičním zemědělství. Postupně přešel k masivní aplikaci fosforečných hnojiv během průmyslové revoluce, což mělo značný dopad na strukturu půdy (Tauger 2010). V současné době je klíčovým cílem udržitelného zemědělství efektivní management půdy, zahrnující opatření k omezování eroze a zlepšování retence vody v krajině, což zároveň ovlivňuje i formy fosforu. Vědecký výzkum a inovace v oblasti zemědělství přinášejí nové přístupy, včetně precizního zemědělství a vývoje hnojiv s optimalizovanou dostupností fosforu pro rostliny (Karamesouti, Gasparatos 2017).

3.2.7 Metody studia fosforu v půdě

Ke stanovení obsahu fosforu v půdě lze využít širokou škálu metod, které se klasifikují podle toho, co chceme analyzovat. Jednou z hlavních kategorií jsou extrakční metody, které se liší podle charakteru zkoumané formy fosforu nebo se zaměřují na stanovení celkového množství fosforu v půdě. Tyto metody mohou zahrnovat různé postupy pro extrakci a stanovení fosforu v různých formách (Murphy, Riley 1962). V obecném přístupu existují dvě hlavní varianty extrakčních metod pro stanovení fosforu v půdě. První varianta zahrnuje přidání roztoku o různé síle k půdnímu vzorku, což umožňuje extrahovat specifickou formu nebo frakci fosforu. Následně tuto extrahovanou formu nebo frakci měříme pomocí analytických metod, jako jsou ICP-OES (induktivně vázaná plazma s optickou emisní spektrometrií), IC (iontová chromatografie) nebo UV-Vis. Druhou variantou jsou metody pracující s pevným vzorkem, kde identifikujeme a stanovujeme formy fosforu (specie) v samotném pevném vzorku. Mezi tyto metody patří NMR (nukleární magnetická rezonance), XANES (rentgenová absorpční spektroskopie na blízkém okraji) a další. XRF (rentgenová fluorescenční spektrometrie) rovněž poskytuje informace o celkovém obsahu fosforu v pevném vzorku (Macháček, Kalčík 1995).

Při analýze celkového fosforu je klíčové účinně zpracovat půdu tak, aby byly rozpuštěny organické i minerální sloučeniny fosforu. Jednou z běžně používaných metod je vytvoření směsi kyseliny dusičné a fluorovodíkové. Tato kombinace je účinná

při rozkladu organických a minerálních forem fosforu, což umožňuje jeho následné stanovení (Murphy, Riley 1962).

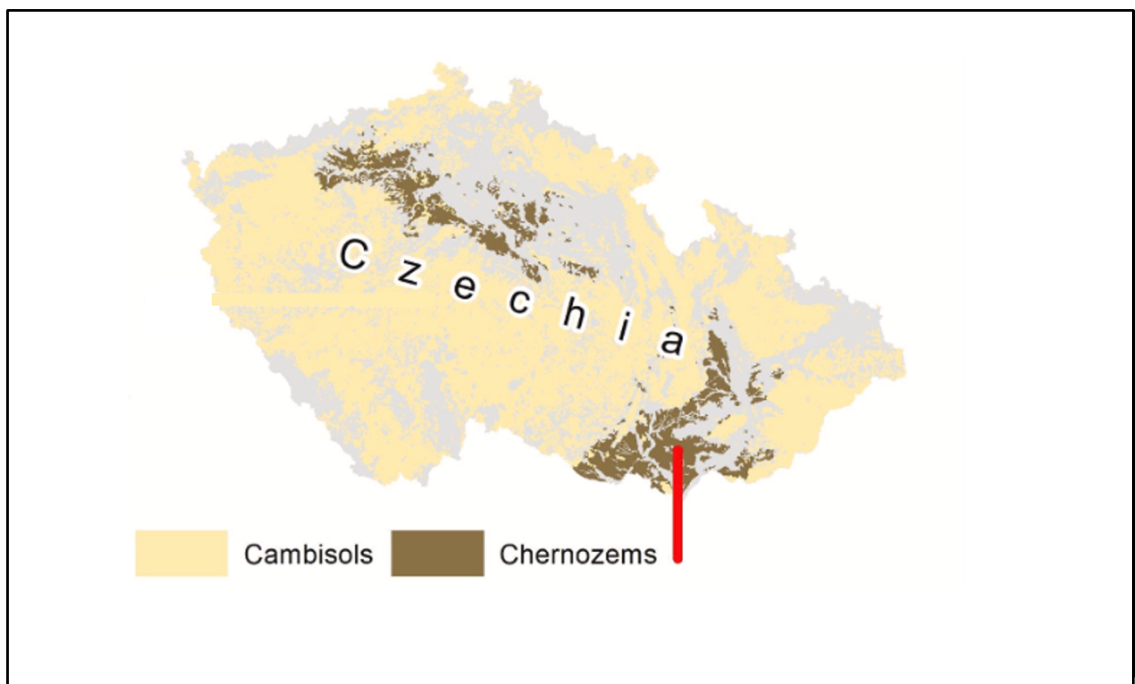
Dále se provádí analýza obsahu celkového organického a minerálního fosforu v půdě. Metodika této analýzy zahrnuje pečlivé stanovení frakcí organických a minerálních forem fosforu v půdě. Pro dosažení této analýzy jsou analytické postupy navrženy s ohledem na efektivní rozpouštění obou forem fosforu, což následně umožňuje kvantifikaci těchto frakcí. Pro identifikaci a izolaci různých minerálních forem fosforu využíváme frakcionační metodu. Tato metoda umožňuje postupné rozpouštění a extrakci klíčových sloučenin fosforu s využitím extrakčních činidel. Tím dochází k odlišení a izolaci různých minerálních forem tohoto prvku, což je klíčové pro hlubší pochopení složení půdy. Nakonec je také možné určit dostupný fosfor v půdě, tyto metody a postupy jsou detailně rozebrány v rámci této práce (Macháček, Kalčík 1995).

4. Studovaná oblast

4.1 Vymezení oblasti

Analyzované vzorky koluvizemních půd byly získány v katastru obce Brumovice, situované v regionu Jihovýchod, který je dělen mezi Jihomoravský kraj a kraj Vysočina. Tento region dále zahrnuje jednotlivé okresy. Brumovice se rozkládají na severu okresu Břeclav v rámci Jihomoravského kraje (ČSÚ 2023).

Pozemek, na kterém proběhl odběr vzorků, se nachází v pahorkatině s nadmořskou výškou 270 m n. m. v oblasti Ždánického lesa. Toto místo je umístěno mimo hlavní centra historického a pravěkého osídlení v daném geografickém regionu. Je vzdáleno od větších dopravních uzlů a průmyslových oblastí a nachází se v běžné zemědělské krajině (Zádorová et al., 2023). Břeclavsko má dlouhou historii zemědělského využívání půdy, sahající až do neolitu (Košťuřík a Unger, 1977).



Obr. 4: Mapa vymezení polohy odběrného místa v katastrálním území Brumovice na jižní Moravě (Zádorová et al., 2023).



Obr.5: Vyobrazení půdní sondy na pozemku v katastrálním území Brumovice (Mapy.cz, 2024)

4.2 Popis odběrného místa

Jedná se o lokalitu s členitým reliéfem, složeným z eocénních molasových facií, včetně konglomerátu, pískovce a slínovce a oligocenního pískovce. Tyto geologické vrstvy jsou pokryty různě mocnými vrstvami spraše z období pleistocénu, konkrétně z jeho staršího oddělení čtvrtohor. Kombinace intenzivního zemědělského hospodaření, členitého reliéfu a matečného materiálu náchylného k erozi přirozeného podkladu činí toto území jedním z nejvíce náchylných k erozi v zemi. Většinu plochy pokrývá mozaika černozemí, zejména na náhorních plošinách. Na svazích se vyskytují regozemě, které podléhají erozi ornice, a v konkávních částech reliéfu se nachází koluvizemě (Zádorová et al. 2023).

Když se zaměříme na klimatický region, zjistíme, že se jedná o jeden z nejteplejších a nejsušších na území České republiky. Průměrný roční úhrn srážek v této oblasti činí 542 mm a průměrná roční teplota je 8,4 °C (Zádorová et al. 2023).

Vlastní odběr vzorků proběhl z jednoho vyhloubeného koluviálního profilu. Při pravidelném odběru byly vzorky odebrány každých 10 cm s cílem pokrýt široké spektrum geochemických a fyzikálních vlastností půdy, včetně základních půdních

charakteristik, rizikových prvků, živin a organických polutantů (Zádorová et al. 2023). Pro sekvenční extrakci byla vždy zohledněna každá druhá vrstva (tzn. po 20 cm) a všechny vzorky byly usušeny a přesány přes síto s průměrem menším než 2 mm.

5. Metodika

5.1 Postup sekvenční extrakce (Tiessen, Moir 2007):

Sekvenční extrakce je běžná analytická metoda používaná k identifikaci prvků spojených s pevnými fázemi v životním prostředí na základě jejich reaktivity se specifickými roztoky (Tessier et al. 1979). Frakce (P1) obsahuje rozpuštěný fosfor ve vodě, což indikuje množství volného fosforu, zatímco frakce (P2) byla analyzována pomocí 0,5M hydrogenuhličitanu sodného a ukazuje fosfor volně dostupný pro rostliny. Frakce (P3) reprezentuje organicky vázaný fosfor, který se váže s fázemi železa a hliníku. Tato frakce byla extrahována 0,1M roztokem hydroxidu sodného (NaOH) za vyššího pH. Frakce (P4) zahrnuje fosforečnany, které jsou často vázány na zejména Ca minerály v půdě a byla získána pomocí 1M kyseliny chlorovodíkové. Residuální (P5) představuje frakci fosforu poskytující informace o pevných, obtížně rozpustných minerálních zásobách fosforu v půdě, který není snadno dostupný pro rostliny. Tato systematická klasifikace umožňuje důkladnější analýzu a porozumění distribuci fosforu v půdě (Tiessen, Moir 2007).

Den 1. Naváženo bylo $0,5 \pm 0,005$ g vysušené a přesáté (< 2 mm) půdy, k takto navážené půdě byly přidány dva proužky aniontových výměnných membrán (AEM) předem aktivovaných v roztoku 0,5M NaHCO_3 .

Poté bylo nadávkováno dávkovačem 30 ml deionizované vody (konduktivita $< 0,055 \mu\text{S cm}^{-1}$). Po nadávkování byly lahvičky v ruce protřepány a naskládány do horizontální třepačky, která byla nastavena na 125 kmitů/min. Vzorky byly ponechány na třepačce do dalšího dne (cca 16 hodin).

Den 2. Z lahviček s deionizovanou vodou byly vyjmuty AEM, a to vždy po důkladném omytí zbytků půdy pomocí stříčky s deionizovanou vodou a následně byly vráceny zpět do příslušné lahvičky. Poté byly přeneseny do nových lahviček, do kterých bylo následně nadávkováno 20 ml 0,5M HCl. Po nadávkování byly lahvičky odstaveny

po dobu jedné hodiny, aby mohlo unikát CO_2 . Vzorky byly umístěny přes noc (16 h) na třepačku.

Lahvičky s půdou byly 10 minut odstředovány. Následně byla vylita H_2O tak, aby tam zůstala veškerá půda. Poté bylo nadávkováno dávkovačem 30 ml 0,5M hydrogen uhličitanu sodného (NaHCO_3), který byl připraven takto: naváženo bylo 84 g NaHCO_3 + 1 g NaOH a rozpuštěno ve 2 l deionizované vody. Vzorky byly ponechány na třepačce do druhého dne.

Den 3. Lahvičky s NaHCO_3 byly umístěny do centrifugy. Roztok byl přelit do nových lahviček a půda byla opět zachována.

Následně bylo provedeno ředění (bylo ředěno 10x) a filtrace roztoků: bylo pipetováno 2 x 100 μl do čisté kádinky, poté bylo dávkovačem nadávkováno 18 ml H_2O . Injekční stříkačkou bylo nabráno 10 ml zředěného roztoku a přefiltrováno přes nylonový membránový filtr o velikosti pórů 0,45 μm do PE zkumavky. Poté dle stejného postupu bylo přefiltrováno 5 ml do chromatografické vialky. Následně byly zředěné roztoky analyzovány pomocí IC a ICP-OES.

Do lahviček s půdou bylo nadávkováno 30 ml hydroxidu sodného (NaOH) a byly vloženy na třepačku do dalšího dne. Na 3. den byl ještě přichystán 0,1M hydroxid sodný (NaOH) takto: byly naváženy 4 g NaOH a poté pomocí stříčky převedeny do 1 l baňky.

Den 4. Lahvičky s NaOH byly rozloženy do centrifugy. Následně bylo uskutečněno ředění (bylo ředěno 10x) a filtrace roztoků, která byla provedena úplně stejným způsobem jako minulý den. Zředěné roztoky byly analyzovány pomocí IC a ICP-OES.

Do lahviček s půdou bylo nadávkováno dávkovačem 30 ml 1M HCl . Příprava byla provedena následovně: v 1 l deionizované vody bylo rozpuštěno 88,5 ml koncentrované kyseliny chlorovodíkové (HCl). Vzorky byly ponechány na třepačce do dalšího dne.

Den 5. Vzorky s 1M HCl byly rozloženy do centrifugy a opět bylo provedeno ředění (bylo ředěno 10x), filtrace a analýza pomocí IC a ICP-OES.

Do lahviček s půdou bylo v digestoři nadávkováno 10 ml koncentrované HCl . Poté byly s povoleným víčkem na 10 minut vloženy do sušárny/vodní lázně. Vzorky

byly ponechány, aby vychladly na pokojovou teplotu a následně byly na 5 minut odstředěny. Roztok byl přelit z lahvíček do 50 ml baněk. Do lahvíček s půdou bylo nadávkováno 10 ml H₂O, poté byly na třepačce a na 5 minut odstředěny. Vzorky byly přelity do baněk a celý postup byl ještě jednou zopakován.

Následně bylo provedeno ředění (bylo ředěno 101x) a filtrace roztoků: přefiltrováno přes nylonový membránový filtr o velikosti pórů 0,45 μm do PE zkumavky.

5.2 Použité přístrojové vybavení

Fosforečnany (PO₄³⁻) byly identifikovány prostřednictvím kapilární iontové výměnné chromatografie s potlačenou vodivostí (kapilární vysokotlaková iontová chromatografie – HPIC). K tomu byl využit systém Dionex ICS 4000 (Thermo Fisher Scientific) s předkolonou a analytickou kolonou Dionex IonPac AS11–HC 4 μm (Thermo Fisher Scientific). Mobilní fáze byla gradientem 6–60 mM KOH během 0–30 minut. Průtok byl udržován na hodnotě 0,012 ml min⁻¹, a potlačovač vodivosti ACES 300 (Thermo Fisher Scientific) byl použit ke snížení vlivu vodivosti. Zařízení Carbonate Removal Device 200 (Thermo Fisher Scientific) bylo využito k eliminaci vlivu rozpuštěného CO₂.

Celkový fosfor v extraktech byl detekován pomocí ICP-OES DUO iCap 7000 (Thermo Fisher Scientific) za standardních analytických podmínek.

5.3 Úprava a zpracování dat

Získaná data byla upravena a analyzována v tabulkovém procesoru Microsoft Excel. Původní stanovené hodnoty v mg L⁻¹ byly systematicky přepočítány na obsah v suché půdě v mg kg⁻¹. Množství fosforečnanů, identifikovaných pomocí iontové chromatografie jako celkové množství fosforu, bylo důkladně vyjádřeno na čistý fosfor. Vytvořila se nová komplexní tabulka, do níž byl začleněn organický fosfor, určený jako rozdíl mezi celkovým fosforem (P_{tot}) a fosforečnanovým fosforem (P_{PO₄³⁻}). Následně byla vyjádřena směrodatná odchylka z P_{tot} a P_{PO₄³⁻} a byla vypočtena suma frakcí jako součet P_{tot}. Došlo také k přepočítání PO₄³⁻ na P-PO₄³⁻. Výsledná data byla názorně zobrazena pomocí grafů.

6. Výsledky

6.1 Statistické vlastnosti frakcí celkového P a P-PO₄³⁻

Z tabulky lze vyvodit, že průměrné množství celkového fosforu je nejvyšší ve frakci (P4), přičemž dosahuje hodnoty 205 mg kg⁻¹. Tento trend se opakuje i pro P-PO₄³⁻, kde průměrná koncentrace činí 252 mg kg⁻¹. Naopak minimální hodnoty P-PO₄³⁻, jsou zaznamenány ve frakci (P3), kde činí pouze 2,15 mg kg⁻¹, zatímco pro fosfor ve frakci (P1) dosahují minimální hodnoty 1,35 mg kg⁻¹. Maximální hodnoty P-PO₄³⁻, a fosforu byly zjištěny ve frakci (P4). Co se týče fosforu, tak bylo naměřeno 339 mg kg⁻¹ a u P-PO₄³⁻, 403 mg kg⁻¹. Obecně lze konstatovat, že nejvyšší hodnoty fosforu jsou pozorovány ve frakci (P4), zatímco nejnižší jsou ve frakci (P2).

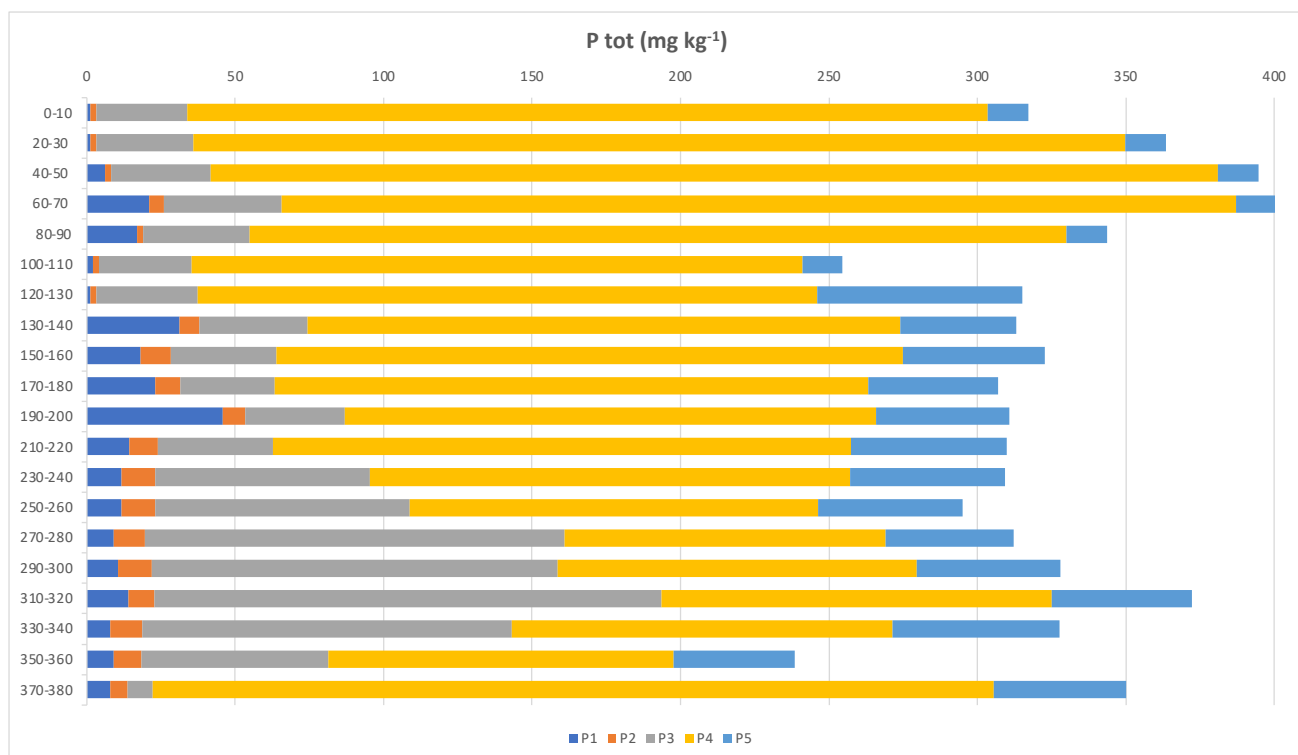
Tabulka 1: Statistické vlastnosti - průměr, medián, minimum, maximum, směrodatná odchylka v 5 frakcích fosforu (P tot, P-PO₄³⁻). Frakce (P1) obsahuje rozpuštěný fosfor ve vodě, který indikuje množství volného fosforu. Frakce (P2) obsahuje fosfor volně dostupný pro rostliny. Frakce (P3) zahrnuje organický fosfor vázaný s fázemi železa a hliníku. Frakce (P4) zahrnuje fosforečnany, často spojené s minerály vápníku v půdě. Residuální frakce (P5) obsahuje pevně vázaný fosfor v půdě, nedostupný pro rostliny.

Statistické vlastnosti P tot a P-PO ₄ ³⁻			
Frakce	Statistické vlastnosti	P-PO ₄ ³⁻ (mg kg ⁻¹)	P tot (mg kg ⁻¹)
1	Průměr	21,1	13,3
	Medián	16,4	11,2
	Min	8,61	1,35
	Max	48,4	45,8
	Směr. Odchylka	11,3	11
	-	-	-
2	Průměr	5,91	6,96
	Medián	4,3	8,07
	Min	2,54	2,02
	Max	17,8	11,5
	Směr. Odchylka	4,46	3,75
	-	-	-
3	Průměr	8,53	60,8
	Medián	7,53	36
	Min	2,15	8,44
	Max	16,8	171
	Směr. odchylka	3,45	46,1
	-	-	-
4	Průměr	252	205
	Medián	249	200
	Min	148	108
	Max	403	339
	Směr. odchylka	77,2	73,1
	-	-	-
5	Průměr	59,8	38,0
	Medián	54,0	44,1
	Min	29,6	13,6
	Max	112	69,1
	Směr. odchylka	23,3	17,5

6.2 Celkový extrahovaný P

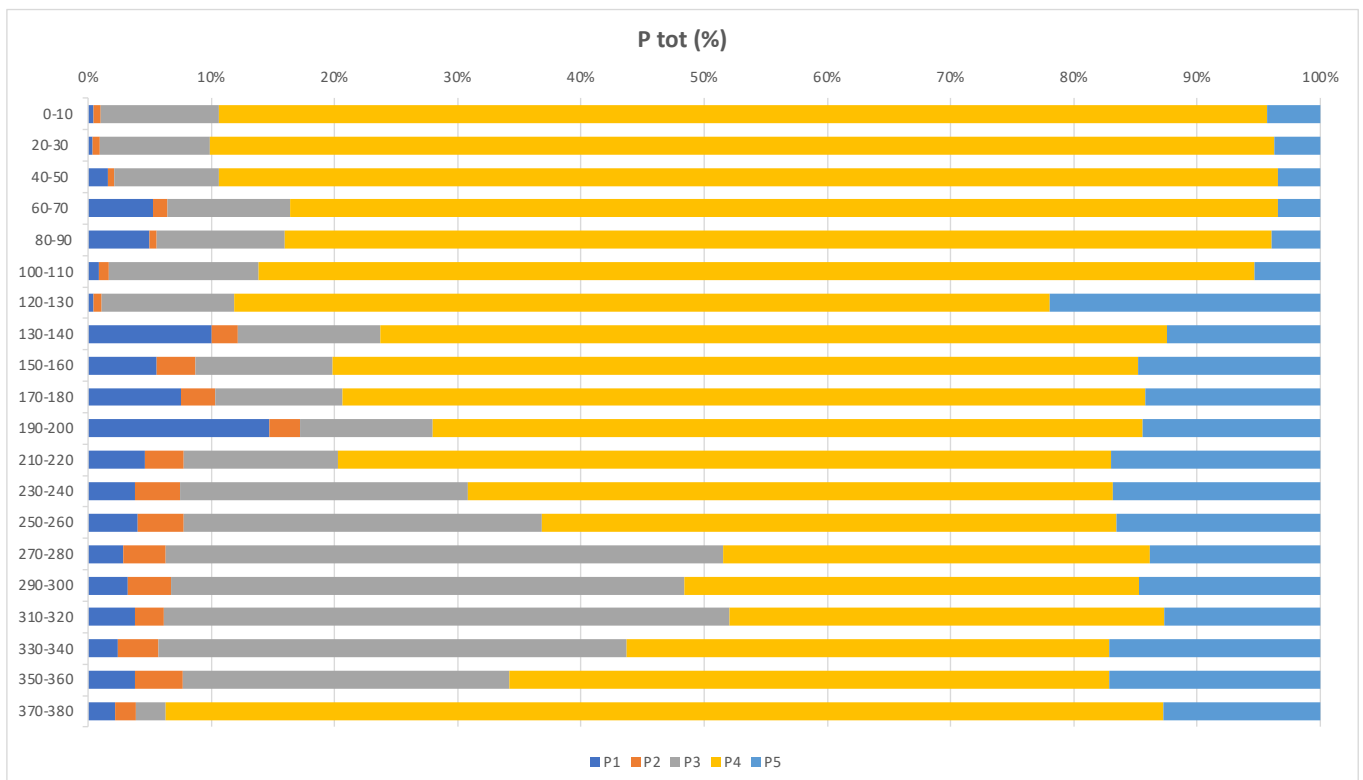
Na základě grafu 1 je patrné, že suma frakcí vykazuje nejvyšší hodnoty zhruba do hloubky 70 cm, kde dosahuje až kolem 400 mg kg⁻¹. Ve střední vrstvě profilu se její koncentrace stabilizuje na hodnotách přibližně 250–300 mg kg⁻¹. Frakce (P4) je nejdominantnější frakcí napříč celým profilem a vykazuje nejvyšší zastoupení. Frakce (P3) prokazuje vzrůstající trend s hloubkou, kde maximální hodnota dosahuje v hloubce 320 cm a přibližuje se hodnotě necelých 200 mg kg⁻¹. Naopak frakce (P1 a P2) vykazují v hloubkách do 50 cm malé množství a projevují vyšší zastoupení ve středních vrstvách profilu. Pro obě tyto frakce platí, že dosahují svého maxima ve hloubce 200 cm, přičemž hodnoty se pohybují kolem 50 mg kg⁻¹.

Graf 1: Celkové množství frakcí fosforu v půdním profilu koluvizemní půdy v katastru obce Brumovice. Frakce (P1) obsahuje rozpuštěný fosfor ve vodě, který indikuje množství volného fosforu. Frakce (P2) obsahuje fosfor volně dostupný pro rostliny. Frakce (P3) zahrnuje organický fosfor vázaný s fázemi železa a hliníku. Frakce (P4) zahrnuje fosforečnany, často spojené s minerály vápníku v půdě. Residuální frakce (P5) obsahuje pevně vázaný fosfor v půdě, nedostupný pro rostliny.



Tento graf 2 ukazuje, že frakce (P4) výrazně dominuje s podílem přesahujícím 80 %, což jí přiděluje klíčovou úlohu v celkovém složení. Suma frakcí (P1-P3) vykazuje vzestupný trend, její podíl se zvyšuje z přibližně 10 % na více než 50 % s postupným sestupem do hloubky půdního profilu. Zastoupení reziduální frakce (P5) začíná na nízké úrovni v povrchových vrstvách a s hloubkou narůstá, ustaluje se na konzistentních hodnotách. Frakce (P1) a (P2) jsou obtížněji interpretovatelné, neboť jejich zastoupení vykazuje výrazné rozdíly v různých hloubkách půdního profilu. Maximum sumy těchto vrstev je tvořeno v hloubce 200 cm okolo 15%.

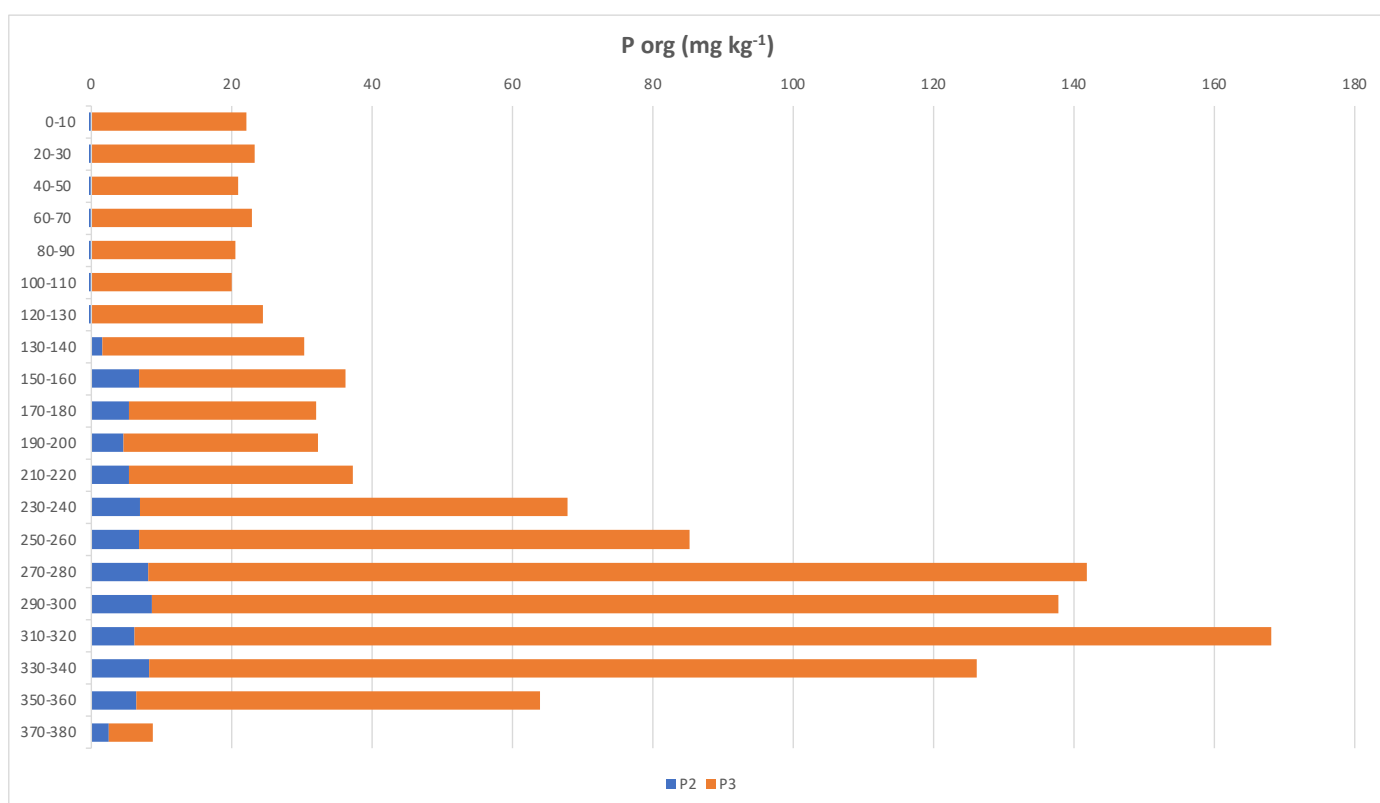
Graf 2: Celkové množství frakcí fosforu v půdním profilu koluvizemní půdy v %. Frakce (P1) obsahuje rozpuštěný fosfor ve vodě, který indikuje množství volného fosforu. Frakce (P2) obsahuje fosfor volně dostupný pro rostliny. Frakce (P3) zahrnuje organický fosfor vázaný s fázemi železa a hliníku. Frakce (P4) zahrnuje fosforečnany, často spojené s minerály vápníku v půdě. Residuální frakce (P5) obsahuje pevně vázaný fosfor v půdě, nedostupný pro rostliny.



6.3 Extrahovaný organický P

Z tohoto grafického znázornění je patrné, že frakce (P3) je bohatá na organický fosfor a tvoří dominantní podíl této frakce. Organický fosfor zde postupně narůstá s hloubkou půdního profilu. Z počátečních hodnot kolem 20 mg kg⁻¹ se jeho koncentrace ve frakci (P3) zvyšuje až na více než 160 mg kg⁻¹ v hloubce 310–320 cm. Frakce (P2) nevykazuje významnou přítomnost organického fosforu v povrchových vrstvách, ale jeho obsah se objevuje ve středních vrstvách od hloubky 130 cm. Koncentrace se zde pohybují přibližně kolem 10 mg kg⁻¹ a tento trend setrvává až do hloubky 360 cm.

Graf 3: Celkové množství frakcí organického P v půdním profilu koluvizemní půdy v katastru obce Brumovice. Frakce (P2) obsahuje fosfor volně dostupný pro rostliny. Frakce (P3) zahrnuje organický fosfor vázaný s fázemi železa a hliníku.



7. Diskuze

První dvě frakce extrakce (P1 a P2) umožňují posoudit obsah rozpuštěného fosforu ve vodě, což může indikovat množství volného fosforu nebo volně dostupného pro rostliny (Tiessen, Moir 2007). Výzkumem bylo zjištěno, že obsah volného fosforu v těchto prvních dvou frakcích je relativně nízký ve vrstvách do hloubky 50 cm. Tento jev může být interpretován několika faktory. Prvním faktorem a také nejpravděpodobnějším je možnost, že se na daném místě nenanesla vrstva z původního sprašového substrátu, která pravděpodobně nebyla hnojená (Zádorová et al. 2023). V posledních letech bylo omezené hnojení, což znamenalo absenci pravidelného doplňování fosforových hnojiv do půdy. To vedlo k vyčerpání zásob fosforu v půdě, zejména v povrchových vrstvách, které jsou přímým zdrojem pro rostliny. To může vést k nedostatečnému zásobování rostlin fosforem, což může ovlivnit jejich růst, vývoj a výtěžek (Štípková et al. 2021). Tato situace nastává tehdy, když obsah přístupného fosforu v půdě klesne pod určitou kritickou úroveň, která se obvykle pohybuje mezi 10 a 20 mg kg⁻¹ půdy (Jones 2012). Dalším aspektem může být změna zemědělských postupů v dané oblasti, která může ovlivnit režim hnojení. Intenzivní obdělávání půdy může mít výrazný dopad na obsah fosforu v půdě a celkově na ekosystém. Jedním z hlavních rizik spojených s tímto postupem je eroze. Časté orání a manipulace s půdou mohou narušit její strukturu a zvýšit náchylnost k erozi, což vede k odplavování půdních částic do okolních vodních toků. S těmito částicemi se odplavuje také vázaný fosfor, což může negativně ovlivnit kvalitu vodního prostředí (Sims et al. 2000). Dále je možné, že dochází k rychlé fixaci volného fosforu na organickou hmotu nebo minerály v povrchových vrstvách, což snižuje jeho koncentraci ve vodném roztoku. Pozorujeme však nárůst obsahu volného fosforu od hloubky 60 cm, až po maximální hodnoty dosahující v hloubce 200 cm, kde dosahují okolo 50 mg kg⁻¹.

Jev, který zde probíhal, nazýváme retrográdní vývoj půdy. To znamená, že půda postupně ztrácí své vlastnosti a degraduje, a to v důsledku různých faktorů, jako je eroze, ztráta půdního substrátu nebo jiné negativní vlivy. Tyto procesy vedou k tomu, že půda se vrací do méně vyspělého stavu, čímž se snižuje její úrodnost a kvalita. Topografická úprava terénu v důsledku retrográdního vývoje půdy může ovlivnit distribuci fosforu v půdním profilu (Alewell et al. 2015).

Z výzkumu plyne, že v hlubších vrstvách půdy (230-360 cm) dochází k výraznému nárůstu humusu, což je způsobeno akumulací erodovaného materiálu z A horizontu černozemí a jeho následným pohřbením. Tento proces naznačuje, že přesun půdního materiálu vlivem eroze může mít významný dopad na organickou složku půdy v hlubších úrovních zkoumaného profilu (Zádorová et al. 2023). Naše analýza ukazuje, že do hloubky 130 cm zůstává obsah organického fosforu relativně stabilní a to kolem 20 mg kg^{-1} , ale nad touto hloubkou dochází k výrazné akumulaci organických látek. Změny v zemědělských praktikách a intenzivní využívání půdy mohou rovněž přispět k tvorbě a hromadění organické hmoty v půdě, což dále podporuje tento proces akumulace organického fosforu. Transportní procesy, jako je pronikání půdní vody, navíc mohou přenášet organickou hmotu a s ní spojený fosfor do hlubších vrstev půdního profilu, kde se následně hromadí (Sims et al. 2000).

Zaměříme-li se na frakci (P4), tak zjistíme, že ve své podstatě představuje fosfor vázaný na minerální složky půdy, což může zahrnovat různé minerály obsahující fosfor, jako jsou fosforečnany vázané na minerály vápníku, hliníku, nebo železa. Na základě pH půdy lze odhadnout jaké formy fosforu budou převažovat. V tomto případě se jedná o vysoký obsah karbonátů v daných vrstvách a vyšší pH. Tato frakce je v analýze fosforu zásadní, neboť představuje zásoby fosforu, které jsou vázány v pevných minerálních formách, a proto jsou méně snadno dostupné pro rostliny v porovnání s jinými frakcemi (Smatanová, Sušil 2015). Dominance frakce (P4) přes celý půdní profil naznačuje, že minerální složky půdy mají klíčovou roli jako nositelé fosforu v daném prostředí. Výskyt nejvyšších koncentrací fosforu v této frakci, dosahující od 350 do 400 mg kg^{-1} , je pozorován zejména v povrchových vrstvách půdy v hloubce od přibližně 20 cm do 70 cm.

Tento jev má významné důsledky pro distribuci fosforu v půdním prostředí a může ovlivnit jeho dostupnost pro rostliny a ekosystémové procesy, zejména v těchto povrchových oblastech. Rozmanité minerální složky půdy mohou mít různé schopnosti uvolňovat fosfor do půdního roztoku, například fosforečnany vázané na minerály železa mohou být uvolňovány do půdního roztoku za určitých podmínek, jako je změna pH, a tím zvyšovat dostupnost fosforu pro rostliny (Smatanová, Sušil 2015). V koluvizemním profilu, který byl zkoumán v rámci výzkumu je pH slabě alkalické (Zádorová et al. 2023). Jsem toho názoru, že pochopení dominance frakce (P4) a její role ve frakcionaci fosforu je klíčové pro celkový fosforový cyklus v půdním prostředí.

Residuální frakce (P5) představuje poslední krok v sekvenční extrakci fosforu a poskytuje informace o minerálním fosforu, který je obtížně rozpustný v půdě (Tiessen, Moir 2007). Zvýšená koncentrace této frakce s hloubkou naznačuje, že fosfor se hromadí v hlubších vrstvách půdy. Tato akumulace může být důsledkem dlouhodobého procesu, při kterém se fosfor postupně ukládá do minerálních forem (Smatanová, Sušil 2015). V hlubších vrstvách půdního profilu jsou podmínky pro ukládání fosforu odlišné od povrchových vrstev. Na základě mého názoru zdejší podmínky mohou zahrnovat rostoucí obsah organické hmoty, vyšší koncentraci minerálů a různé chemické procesy, které mohou přispět k vázání fosforu na minerální formy. Méně dostupný fosfor pro rostliny v této frakci naznačuje, že fosfor v této formě není snadno využitelný pro rostlinný růst a vývoj. To může ovlivnit životní prostředí půdy a možnosti rostlin získávat potřebné živiny (Štípková et al. 2021).

Při zkoumání vývoje krajiny v dané oblasti si lze povšimnout změn v zemědělských metodách, urbanizaci, rozvoji infrastruktury a vývoji samotné půdy v průběhu času. Tyto proměny mohou mít vliv na distribuci fosforu v půdním prostředí. Například intenzivní zemědělství může vést k erozním procesům, což může ovlivnit akumulaci fosforu v půdním profilu (Zádorová et al. 2023). Na zkoumaném pozemku, kde se nachází profil, je patrná vysoká erozní redistribuce, což znamená přesun půdy a půdních částic z jedné oblasti do jiné. Zahrnuje to také přesun půdního materiálu z vyvýšených oblastí do nižších oblastí, které jsou ovlivněny erozí. Tento proces je výsledkem zemědělství, které se v této oblasti praktikuje již od doby bronzové, a má významný dopad na celou škálu půdních vlastností, včetně obsahu fosforu (Zádorová et al. 2023).

Porovnání všech aspektů diskutovaných v předchozích odstavcích nám ukazuje na složité a vzájemně propletené vztahy mezi lidskou činností a životním prostředím, které mají významný vliv na procesy frakcionace fosforu v půdě. Tato interakce mezi člověkem a životním prostředím je zásadní pro pochopení dynamiky v půdním systému a pro navrhování účinných strategií pro ochranu životního prostředí a udržitelné zemědělství.

8. Závěr

Naše výsledky naznačují, že množství fosforu a jeho frakce se mění v závislosti na hloubce. Management v horních vrstvách půdy a omezení hnojení snižuje množství dostupného fosforu v půdě a má významný vliv na jeho distribuci a dostupnost v půdě pro rostliny. Nejzastoupenější frakcí je frakce (P4), která obsahuje v průměru 205 mg kg⁻¹ celkového fosforu, což představuje 63 % z celkového fosforu a dokonce i dosahuje nejvyšší maximální hodnoty ze všech frakcí a to je 339 mg kg⁻¹. Naopak z výsledků vyplývá, že nejméně celkového fosforu (cca 7 mg kg⁻¹) nalezneme ve frakci (P2). V hloubce 380 cm nalezneme první tři frakce v minimálním množství a utváří necelých 10%. S 80% zde dominuje frakce (P4) a zbytek je tvořen residuem, tedy frakcí (P5).

9. Seznam použité literatury

9.1 Literatura

Alewell C., Egli M., Meusburger K., 2015: An attempt to estimate tolerable soil erosion rates by matching soil formation with denudation in Alpine grasslands, *Journal of Soils and Sediments* 15, P. 1383–1399.

Bittman S., Kowalenko C. G., Hunt D. E., Forge T. A., Wu X., 2006: Starter phosphorus and broadcast nutrients on corn with contrasting colonization by mycorrhizae. *Agronomy Journal* 98, P. 394-401.

Brady N. C., 1974: *The Nature and Properties of Soils*. 8th Edition, MacMillan Publishing, New York.

Brady N. C., Weil R. R., 2008: *The Nature and Properties of Soils*, Fourteenth edition. Prentice-Hall, New Jersey.

Čermák P., Mühlbachová G., Káš M., Pechová M., Lošák, T., Hlušek J., Kulhánek, M., Sedlář O., Balík J., 2018: Metodický postup pro optimalizaci hnojení fosforem na zemědělských půdách, včetně půd karbonátových. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha.

Fecenko J., Ložek O., 2000: *Výživa a hnojenie poľných plodín*. SPU, Nitra.

Filippelli G. M., 2002: The Global Phosphorus Cycle. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 48, issue 1, P. 391-425.

Fuchs M., Lang A., 2009: Luminescence dating of hillslope deposits. *Geomorphology* 109, P. 17–26.

George T. S., Hinsinger P., Turner B. L., 2016: Phosphorus in soils and plants – facing phosphorus scarcity. *Plant and Soil* 401, P. 1-6.

Greenwood N. N., Earnshaw A., 1993: *Chemie prvků I*. Informatorium, Praha.

Chaopricha N. T., Marín-Spiotta E., 2014: Soil burial contributes to deep soil organic carbon storage. *Soil Biology & Biochemistry* 69, P. 251–264.

Jones B., 2012: *Plant Nutrition and Soil Fertility Manual* (2 nd ed.). CRC Press, Boca Raton, Florida.

Karameouti M., Gasparatos D., 2017: Sustainable Management of Soil Phosphorus in a Changing World in Adaptive Soil Management: From Theory to Practices. Springer, Singapore.

Koštuřík P., Unger J., 1977: Sídlištní objekt kultury s moravskou malovanou keramikou v trati "Pod Děvínem" u Pavlova, okr. Břeclav. Sborník prací Filozofické fakulty brněnské univerzity, Brno.

Leopold M., Völkel J., 2007: Colluvium: definition, differentiation, and possible suitability for reconstructing Holocene climate data. Quaternary International 162–163, P. 133–140.

Macháček V., Kalčík J., 1995: Metody studia fosforu a dalších elementů (K, Ca, Na, Mg) v půdě: sborník příspěvků ze semináře. AV ČR. Ústav půdní biologie, České Budějovice.

Mengel K., Kirkby E. A., Kosegarten H., Appel T., 2001: Principles of Plant Nutrition. Springer, Netherlands.

Millar S. W. S., 2014: Colluvial deposits. Encyclopedia of Planetary Landforms. Springer, New York.

Murphy J., Riley J. P., 1962: A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Analytica Chimica Acta 27, P. 31–36.

Němeček J., Kutílek M., Smolíková L., 1990: Pedologie a paleopedologie. Academia, Praha.

Němeček J., Mühlhanslová M., Macků J., Vokoun J., Vavříček D., Novák P., 2011: Taxonomický klasifikační systém půd České republiky, 2. upravené vydání. Česká zemědělská univerzita, Praha.

Paton T. R., Humphreys G. S., Mitchell P. B., 1995: Soils: a New Global View. University College London Press, London.

Pitter P., 1999: Hydrochemie. 3. přepr. vyd. VŠCHT, Praha.

Poreba G., Śnieszko Z., Moska P., 2011: Some aspects of age assessment of Holocene loess colluvium: OSL and ¹³⁷Cs dating of sediment from Biała agricultural area, South Poland. Quaternary International 240, P. 44–51.

Sharpley A., 2000: Phosphorus availability. Handbook of Soil Science, CRC Press, New York.

Sims J. T., Simmard R. R., Schoumans O. F., Edwards A. C., 2000: Integrating soil phosphorus testing into environmentally based agricultural management practices. Journal of environmental quality 29, P. 60-71.

Smatanová M., Sušil A., 2015: Výsledky agrochemického zkoušení zemědělských půd za období 2009–2014. ÚKZÚZ, Brno.

Stevenson F. J., Cole M. A., 1999: Cycles of Soils: Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrients. John Wiley & Sons, Hoboken.

Świtoniak M., 2015: Issues relating to classification of colluvial soils in young morainic areas (Chełmno and Brodnica Lake District, northern Poland). Soil Science Annual 66, P. 57–66.

Štípková Z., Tsiftsis S., Kindlmann P., 2021: How did the agricultural policy during the communist period affect the decline in orchid biodiversity in central and eastern Europe? Global Ecology Conservation 26, e01498.

Tauger M. B., 2010: Agriculture in World History (1 st ed.). Routledge, London.

Tessier A., Campbell P. G. C., Bisson M., 1979: Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals. Analytical Chemistry 51, P. 844–850.

Tiessen H., Moir J. O., 2007: Characterization of Available P by Sequential Extraction. Soil Sampling and Methods of Analysis, Boca Raton.

Toužín J., 2008: Stručný přehled chemie prvků. vyd. 1. Tribun EU, Brno.

Walbridge M. R., 1991: Phosphorus Availability in Acid Organic Soils of the Lower North Carolina Coastal Plain. Ecology 72, P. 2083-2100.

Withers P. J. A., Sylvester-Bradley R., Jones D. L., Healey J. R., Talboys P. J., 2014: Feed the crop not the soil: rethinking phosphorus management in the food chain. Environmental Science and Technology 48, P. 6523–30.

Zádorová T., Penížek V., Lisa L., Koubová M., Žížala D., Tejnecký V., Drábek O., Kodešová R., Fér M., Klement A., Nikodem A., Rojas J. R., Vokurková P., Pavlů L., Vaněk A., Moska P., 2023: Formation of Colluvisols in different soil

regions and slope positions (Czechia): Stratification and upbuilding of colluvial profiles. *Catena* 221, P. 1-25.

Zádorová T., Penížek V., Vašát R., Žížala D., Chuman T., Vaněk A., 2015: Colluvial soils as a soil organic carbon pool in different soil regions. *Geoderma* 253–254, P. 122–13.

Zádorová T., Penížek V., 2018: Formation, morphology and classification of colluvial soils: a review. *European Journal of Soil Science* 69, P. 577-591.

Zádorová T., Penížek V., 2021: Classification of Colluvisols in the light of current research. *Pedosphere Research* 1, P. 55-65.

9.2 Internetové zdroje

ČSÚ, 2023: Krajská správa ČSÚ v Brně: Region soudržnosti, online: https://www.czso.cz/csu/xb/region_soudrznosti, cit. 9.2.2023.

Thermo Fisher Scientific, 2006-2023: Chromatography Columns and Cartridges, online: <https://www.thermofisher.com/search/browse/category/us/en/90126197>, cit 14.3.2023.

Mapy.cz, 2024: Brumovice. 1:150 online: <https://mapy.cz/letecka?source=muni&id=5876&ds=1&x=16.8805119&y=48.9676916&z=17>, cit 24.3.2024.