

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů**

**Katedra pedologie a ochrany půd**



**Fakulta agrobiologie,  
potravinových a přírodních zdrojů**

**Dlouhodobá změna sorpčních vlastností u zemědělských  
půd**

**Bakalářská práce**

**Barbora Frýdová**

**Ochrana krajiny a využívání přírodních zdrojů**

**doc. RNDr. Tereza Zádorová, Ph.D.**

**© 2023 ČZU v Praze**



### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Dlouhodobá změna sorpčních vlastností u zemědělských půd" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 21. 4. 2023

---

## **Poděkování**

Ráda bych touto cestou poděkovala paní docentce Zádorové, za její trpělivost, čas a energii, kterou vynaložila k vedení a zdokonalení mé práce. Následně také všem autorům použité literatury, dat a výzkumů.



# Dlouhodobá změna sorpčních vlastností u zemědělských půd

## Souhrn

Tato bakalářská práce se zaměřuje na analýzu dlouhodobého vývoje a vlivu land use na sorpční vlastnosti půdy v části okresu České Budějovice, jehož půdy byly v minulosti intenzivně odvodňovány. Literární rešerše seznamuje čtenáře s problematikou sorpce a sorpčních vlastností, zejména kationtovou výměnnou kapacitou a nasyceností sorpčního komplexu bazickými ionty. Dále se zabývá možným ovlivněním sorpčního komplexu dalšími půdními vlastnostmi a zemědělským managementem. Práce hodnotí analyzované vlastnosti ve dvou časových obdobích (60. léta 20. století a současnost). Historická data byla čerpána z rozsáhlé databáze Komplexního průzkumu půd. Současná data byla získána z projektu Národní agentury pro zemědělský výzkum, jehož cílem bylo vytvoření nových detailních map půdních vlastností a jehož terénní odběry byly uskutečněny v místech výběrových sond Komplexního průzkumu půd (KPP). Pro zpracování dat byla použita metoda virtuálního horizontu. Provedeným výzkumem bylo zjištěno, že při celkovém pohledu na data bez rozlišení land use neexistuje statisticky významný rozdíl mezi daty z KPP a novými daty, ačkoliv u obou parametrů došlo ke snížení hodnot. V rámci porovnávání různých využití (orná půda a trvalý travní porost) se v rámci sledovaného období průměrné hodnoty kationtové výměnné kapacity zvýšily u lokalit se změnou orné půdy na trvalé travní porosty. V případě pozemků využívaných dlouhodobě jako orná půda a pozemků, které byly na ornou půdu převedeny, došlo ke snížení kationtové výměnné kapacity. V případě nasycenosti sorpčního komplexu bazickými ionty nedošlo v žádné ze sledovaných kombinací ke statisticky významné změně. Zaznamenány také byly změny a korelace s ostatními půdními vlastnostmi, jako je obsah organického uhlíku, jílu a pH. Tato práce poukazuje na to, že dlouhodobé využívání orné půdy má pomalý, ale negativní dopad na sorpční vlastnosti v půdě. Vzhledem k velkému využívání zemědělské půdy pro produkci je důležité rozvinout tuto problematiku a diskutovat o následcích spojených s intenzivním využíváním půdy.

**Klíčová slova:** sorpční vlastnosti, kationtová výměnná kapacita, nasycenost sorpčního komplexu bazickými ionty, land use, zemědělská půda

# Long-term change in sorption properties in agricultural soils

## Summary

This bachelor thesis focuses on the analysis of the long-term development and influence of land use on soil sorption properties in a part of the České Budějovice district whose soils were intensively drained in the past. The literature research introduces the reader to the issues of sorption and sorption properties, especially cation exchange capacity and base saturation. It also discusses the possible influence of other soil properties and agricultural management on the sorption complex. The paper evaluates the analysed properties in two time periods (1960s and present). Historical data were drawn from the extensive database of the Systematic Soil Survey (SSS), and contemporary data were drawn from a project of the National Agency for Agricultural Research, whose aim was to create new detailed maps of soil properties, and whose field sampling was carried out at SSS probe sites. The virtual horizon method was used for data processing. The research conducted found that when looking at the data as a whole without distinguishing land use, there was no statistically significant difference between the SSS data and the new data, although there was a decrease in values for both parameters. When comparing the different land uses (arable land and permanent grassland), the mean cation exchange capacity values increased for sites with a change from arable land to permanent grassland over the study period. There was a decrease in the cation exchange capacity for sites with long-term arable land use and sites converted to arable land. In the case of the base saturation, there was no statistically significant change in any of the combinations studied. Changes and correlations with other soil properties such as soil organic carbon content, clay content and pH were also observed. This work indicates that long-term use of arable land has a slow but negative impact on sorption properties in soil. Given the large use of agricultural land for production, it is important to develop this issue and discuss the consequences associated with intensive land use.

**Keywords:** sorption properties, cation exchange capacity, base saturation, land use, agricultural soil

# Obsah

<b>1 Úvod</b> .....	<b>5</b>
<b>2 Cíl práce</b> .....	<b>6</b>
<b>3 Literární rešerše</b> .....	<b>7</b>
<b>3.1 Sorpční komplex</b> .....	<b>7</b>
3.1.1 Půdní koloidy.....	7
3.1.2 Typy půdních koloidů.....	8
3.1.3 Sorpce kationtů a aniontů.....	10
<b>3.2 Sorpční vlastnosti</b> .....	<b>10</b>
3.2.1 Hodnoty sorpčních vlastností půdy.....	10
<b>3.3 Vztah sorpčních vlastností s dalšími půdními charakteristikami</b> .....	<b>11</b>
<b>3.4 Vliv managementu na sorpční vlastnosti</b> .....	<b>14</b>
<b>4 Metodika</b> .....	<b>18</b>
<b>4.1 Popis zájmového území</b> .....	<b>18</b>
4.1.1 Základní charakteristika.....	18
4.1.2 Geologická a geomorfologická charakteristika.....	19
4.1.3 Hydrologické a klimatické poměry.....	20
4.1.4 Půdní poměry.....	20
<b>4.2 Datové podklady</b> .....	<b>21</b>
4.2.1 Komplexní průzkum půd (KPP).....	21
4.2.2 Terénní průzkum a odběr nových půdních vzorků.....	21
4.2.3 Analýza nových vzorků.....	22
<b>4.3 Zpracování dat</b> .....	<b>23</b>
<b>5 Výsledky</b> .....	<b>25</b>
<b>5.1 Změna celkových hodnot sorpčních vlastností</b> .....	<b>25</b>
<b>5.2 Vliv využívání půdy na sorpční vlastnosti</b> .....	<b>27</b>
<b>5.3 Vztah s ostatními vlastnostmi</b> .....	<b>33</b>
<b>6 Diskuze</b> .....	<b>37</b>
<b>7 Závěr</b> .....	<b>39</b>
<b>8 Literatura</b> .....	<b>40</b>

## Seznam použitých zkratk a symbolů

KVK/ CEC	Kationtová výměnná kapacita
BS	Nasycenost sorpčního komplexu bazickými kationty
TTP	Trvale travní porost
KPP	Komplexní průzkum půd
COX	Obsah organického uhlíku

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Schéma koloidní micely (Šarapatka, 2014) .....	7
Obrázek 2 - Struktura jílových minerálů (Hiller, 2008) .....	8
Obrázek 3 - Kationtová výměnná kapacita (při pH 7) některých půd a jílových minerálů. (upraveno podle: Brady & Weil, 1999, in: Šimek, 2003).....	12
Obrázek 4 - Průměrný přívod živin do půdy v ČR hnojením na 1 ha využívané zemědělské půdy (podle ČSÚ: 3,5mil. ha v kalendářním roce 2016) .....	16
Obrázek 5 - Výměnná půdní reakce (pH) na plochách BMP v jednotlivých odběrových cyklech (podle kategorií půdní reakce) (Poláková et al., 2017) .....	16
Obrázek 6 - Topografická mapa zájmového území .....	18
Obrázek 7- Mapa znázorňující půdotvorný substrát zájmového území. Zdroj: KPP (Němeček et al., 1967) .....	19
Obrázek 8- Mapa půdních typů zájmového území dle Komplexního průzkumu půd (Němeček et al., 1967) .....	20
Obrázek 9 - Schematické znázornění postupu při tvorbě virtuálního horizontu. (Žížala et al., 2019) .....	23
Obrázek 10 - Histogramy rozložení dat BS v době KPP a nového průzkumu .....	26
Obrázek 11 - Histogramy rozložení dat KVK v době KPP a nového průzkumu .....	26
Obrázek 12 - Změna land use v zájmovém území; zdroj: Němeček et al. 1967 .....	28
Obrázek 13 - Krabicové diagramy průměru BS pro data KPP a nová data .....	31
Obrázek 14 - Krabicové diagramy průměru KVK pro data KPP a nová data .....	31
Obrázek 15 - Krabicový diagram rozdílů BS dle skupin .....	32
Obrázek 16 - Krabicový diagram rozdílů KVK dle skupin .....	33
Obrázek 17- Krabicový diagram pro ostatních půdních vlastností z hlediska průměrů .....	35

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Základní hodnoty vybraných půdních vlastností sledovaných na orné půdě a TTP v průběhu let 1995-2005 (Šimek, 2019) .....	15
Tabulka 2 - Základní statistické parametry hodnot kationtové výměnné kapacity a nasycenosti sorpčního komplexu bazickými kationty z dat KPP a nového průzkumu .....	25
Tabulka 3 - Soubor výsledků Kruskal Wallisovy ANOVY pro BS a KVK .....	27
Tabulka 4 - Změna land use na sledovaném území .....	27
Tabulka 5 - Souhrnná popisná statistika kationtové výměnné kapacity (mg/kg) a nasycenosti sorpčního komplexu bazickými kationty (%) z dat KPP a nového průzkumu pro různé typy land use .....	29
Tabulka 6 - Soubor výsledků Kruskal-Wallisovy ANOVY pro všechny sady dat BS a KVK dle typu land use .....	30

Tabulka 7 - Soubor výsledků Kruskal-Wallisovy ANOVY pro hodnoty BS v závislosti na změně land use .....	32
Tabulka 8 - Soubor výsledků Kruskal-Wallisovy ANOVY pro všechny sady dat KVK.....	33
Tabulka 9 - Popisná statistika ostatních půdních vlastností: obsah organického uhlíku (Cox %), výměnné půdní reakce (pH) a obsah jílu (%).....	34
Tabulka 10 - Spearmanovy korelace pro data z doby KPP a nová data .....	36



# 1 Úvod

Zemědělské půdy jsou zásadním zdrojem produkce potravin a také podstatným prvkem současné krajiny. V dnešní době jsou však tyto půdy často vystaveny intenzivnímu obhospodařování, včetně zásahů ovlivňujících řadu půdních vlastností a režimů. Jedním z důležitých parametrů kvality půdy jsou i charakteristiky sorpčního komplexu. Sorpční vlastnosti jsou v přímém vztahu s řadou dalších půdních vlastností, jako je množství humusu v půdě, půdní reakce či zrnitost, které mohou být výrazně ovlivněny typem půdního managementu. Zde se uplatňují například změny v typu využívání půdy, hnojení či odvodnění půd.

Sorpce je jedním z důležitých faktorů udržení kvality půdy a zajištění udržitelného zemědělství, protože umožňuje vázat a uvolňovat vodu a udržuje v půdě živiny potřebné pro růst a vývoj rostlin (např. dusík, fosfor a draslík či půdní báze). Proto je důležité provádět systematické studie sorpčních vlastností půd, které mohou přispět k lepšímu porozumění charakteristik půdy a tím i k efektivnějšímu hospodaření s vodou a živinami. Tyto kroky mohou zahrnovat změny v použití hnojiv, úprav pH a další, které mohou pomoci obnovit sorpční vlastnosti půdy a tím zlepšit výnosy plodin.

Předkládaná práce se zabývá problematikou dlouhodobých změn sorpčních vlastností zemědělských půd v oblasti Českobudějovicka, jejíž půdní kryt s dominantními hydromorfními půdami je silně ovlivněný intenzivním odvodněním. Ukazatele pro hodnocení sorpčních vlastností je kationtová výměnná kapacita a nasycenost sorpčního komplexu bazickými kationty. Hlavním cílem této práce je analyzovat tyto hodnoty v průběhu let a posoudit faktory, které je mohly ovlivnit. Důraz byl kladen na změnu využívání půdy ve sledovaném období. Kromě sorpčních vlastností byly hodnoceny i další půdní parametry, které by potenciálně mohly ovlivnit sorpční komplex. V dnešní době lze často pozorovat snižování hodnot těchto vlastností v zemědělských půdách z důvodu intenzivního hospodaření a dalších antropogenních aktivit.

Změnu půdních vlastností, a tedy trendy, které se mění v průběhu let v půdách, lze sledovat díky porovnávání hodnot z historických a současných půdních průzkumů. V České republice je významným zdrojem historických dat Komplexní průzkum zemědělských půd. Jedná se o unikátní dílo, a to jak svým rozsahem, tak precizností zpracování. Tato data byla srovnávána s nově získanými hodnotami ze shodných lokalit, navštívených v rámci aktuálního půdního průzkumu, realizovaného s cílem vytvoření podrobných map půdních vlastností.

## 2 Cíl práce

Cílem práce je analyzovat změny v sorpčních vlastnostech, tedy hodnoty kationtové výměnné kapacity a nasycení sorpčního komplexu bazickými kationty na základě srovnání historických a aktuálních dat v oblasti Českobudějovicka.

Hypotézy práce:

1. Hodnoty sorpčních vlastností se budou ve sledovaných obdobích významně lišit.
2. Míra změny kationtové výměnné kapacity a nasycení sorpčního komplexu bazickými kationty je rozdílná v závislosti na typu využití půdy.



### 3 Literární rešerše

#### 3.1 Sorpční komplex

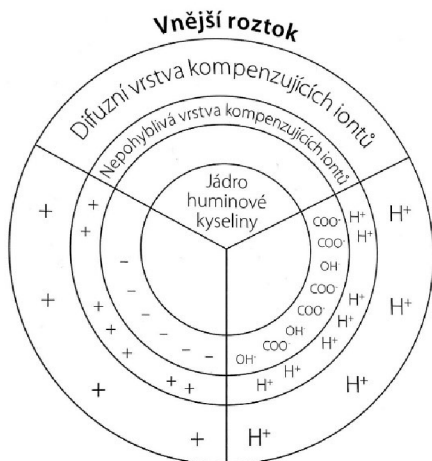
Sorpční komplex můžeme vnímat jako soubor půdních částic, které se účastní sorpce, tedy poutání iontů na koloidy (sorbody) (Šarapatka, 2014).

Sorbody jsou vysoce reaktivní materiály s elektricky nabitým povrchem. Díky svému tvaru dávají půdě velké množství reaktivního povrchu. Každá drobná koloidní částice nese kladně i záporně nabitě ionty (kationty a anionty), které jsou přitahovány elektrostatickými náboji na jejím povrchu (Weil & Brady, 2017).

##### 3.1.1 Půdní koloidy

Jako koloid označujeme stav látky, který je charakterizován velikostí jednotlivých částic a jejich nehomogenitou. Může se jednat o látky plynné, kapalné či pevné povahy (např. půdní koloidy). Dispergované částice mají velmi malou velikost (5 nm-2  $\mu\text{m}$ ), ale vzhledem ke svému objemu mají velký měrný povrch (Šimek, 2019). Ačkoliv jejich velikost nepřesahuje 2  $\mu\text{m}$ , jejich vnější povrch může dosahovat až 10  $\text{m}^2$  na gram jílu. V případě, že bychom počítali i s vnitřním povrchem koloidů, hodnota stoupá až na 800  $\text{m}^2$  na gram jílových částic (Šarapatka, 2014).

Koloidy existují ve formě sol a gel. Koloid vykazující vlastnosti tuhých látek se nazývá gel. Gely se rozdělují na dva typy, a to na gely pravé, vznikající koagulací (nabalováním menších částí na větší lyofilních koloidů, a koaguláty, vznikající z lyofobních koloidů. Stavem sol jsou označovány koloidní roztoky, jinak nazývané lyosoly. V případě že se nachází v disperzním prostředí voda, nazývají se hydrosoly. Vznik koloidů probíhá buď koagulací, nebo dispergací (Šimek, 2019).



Obrázek 1 - Schéma koloidní micely (Šarapatka, 2014)

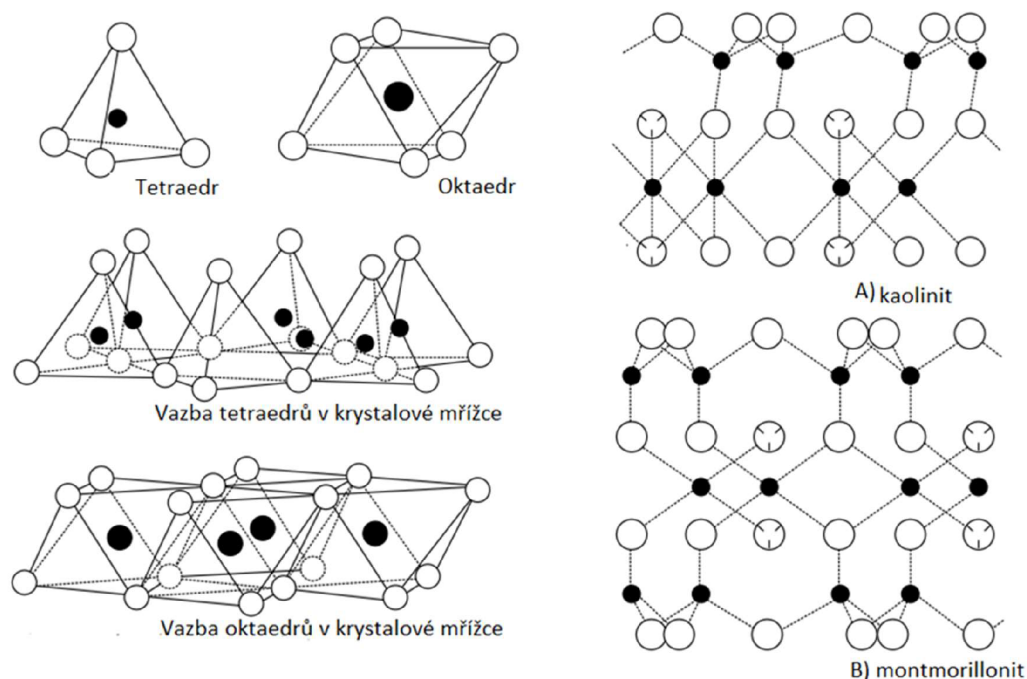
Micely jsou základní strukturální jednotkou koloidů, které se skládají z pevného jádra a elektrické dvojvrstvy. Tato dvojvrstva se skládá z nábojové a kompenzační (difuzní) vrstvy (obrázek 1). Koloidní micela je v podstatě elektroneutrální jednotka, která může ztratit část

iontů obsažených v difuzní vrstvě a pak má náboj, který odpovídá povaze nábojové vrstvy. Acidoidy (např. jílové minerály a huminové kyseliny) mají záporný náboj, zatímco bazidoidy mají náboj kladný (např. hydratované oxidy). Ve většině půd mírného pásu převládá záporný náboj koloidů. Existence elektrických nábojů a jejich velikostí má za následek významnou schopnost koloidů poutat ionty s opačným nábojem (Hazelton & Murphy, 2007).

### 3.1.2 Typy půdních koloidů

Vlastnosti koloidů v půdě vykazují sekundární jílové minerály, hydratované oxidy železa a hliníku, alofan a amorfni jíly a organická hmota neboli humus (Šarapatka, 2014).

Sekundární jílové minerály (alumosilikáty) jsou nejdůležitější anorganické složky půdního sorpčního komplexu ve většině půd. Vznikají při zvětrávání půdy přeměnou z primárních (horninových) minerálů či z již vzniklých sekundárních minerálů. Jsou nejjemnější složkou půdy (velikost menší než několik  $\mu\text{m}$ ). Jílové minerály jsou tvořeny vrstevnatými částicemi, formovanými vrstvami křemíkových tetraedrů a hliníkových a hořčíkových oktaedrů (obrázek 2). Dle typů střídání jednotlivých vrstev rozlišujeme dvouvrstvé (1:1) a třívrstvé (2:1) typy jílových minerálů. S velikostí a uspořádáním mezivrstevních prostorů a velikostí náboje souvisí schopnost sorpce jednotlivých minerálů. Z hlediska technických vlastností znamená vyšší koncentrace jílu silnější vazbu, soudržnost a přilnavost půdy a nepropustnost pro vodu a vzduch. Tyto půdy jsou náročné na zpracování (Vlček et al., 2020).



Obrázek 2 - Struktura jílových minerálů (Hiller, 2008)

Nejběžnější jílový minerál typu 1:1 je kaolinit (na obrázku označen jako A), tvořený dvojrstvami křemíkových tetraedrů a hliníkových oktaedrů. Vzdálenost mezi vrstvami je neměnná, a to v důsledku vzniku vodíkových můstků mezi vrcholovými atomy kyslíku a OH skupinami těmito vrstvami. Minerály tohoto typu nejsou bobtnavé a mají rovněž výrazně nižší sorpční schopnost než trojvrstvé jílové minerály (Weil & Brady, 2017).

V případě jílových minerálů 2:1 (trojvrstva z křemíkových tetraedrů a hliníkových oktaedrů) nedochází na rozdíl od dvojrstvých minerálů ke vzniku vodíkových můstků. Mezi jednotlivé vrstvy tedy může pronikat voda a dochází rovněž k sorpci různých látek. Dále je lze dělit podle míry roztažitelnosti (bobtnavosti) minerální mřížky (Šarapatka, 2014).

Nejvíce bobtnavou mřížku mají montmorillonity (na obrázku označen jako B), beidellity a saponity. Sorpční kapacity se pohybují od 800 do 1500 mmol.kg<sup>-1</sup> a voda se váže hlavně na vnitřní povrch, čímž se zvětšuje vzdálenost mezi vrstvami a dochází k bobtnání. Množství vody vázané molekulárními silami je značné. Povrchová plocha s měrnou hmotností může teoreticky dosáhnout až 800 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup> v závislosti na povaze výměnných kationtů (Vlček et al., 2020).

V případě dalších trojvrstvých minerálů, jako jsou illit či vermikulit dochází v mezivrstevních prostorech k poutání draslíku, resp. hořčíku, a tím i k omezení roztažitelnosti minerální mřížky. Měrný povrch dosahuje u těchto minerálů 50-90 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup> a sorpční kapacita 100-400 mmol.kg<sup>-1</sup>, tedy výrazně méně než v případě bobtnavých minerálů (Weil & Brady, 2017).

Hydratované oxidy železa a hliníku se povětšinou nejvíce vyskytují ve zvětralých půdách v tropickém a subtropickém pásu, ale mohou být přítomny i v mírných oblastech. Mívají vlastnosti amfolytoidů, což znamená, že při vysokém pH jsou slabě negativně nabitě a přitahují kationty. V kyselých půdách mohou být nabity kladně a přitahovat anionty (Šarapatka, 2014).

Alofan je nekystalický jílový minerál, který vzniká zvětráváním alumosilikátového skla, sopečného popela nebo krystalizací ze solí křemíku a hliníku. Má vysokou kationtovou výměnnou kapacitu (1350 mmol.kg<sup>-1</sup>) a také sorpční kapacitu aniontů (až 300 mmol.kg<sup>-1</sup>). Alofan silně váže humusové kyseliny, fixuje fosforečnanové anionty a adsorbuje a inaktivuje enzymy (Vlček et al., 2020).

Organické koloidy jsou přítomné prakticky ve všech půdách, zejména ve svrchní části půdního profilu. Humusové koloidy nemají ani minerální, ani krystalické vlastnosti. Místo toho jsou tvořeny širokou škálou částečně rozpadlých buněčných stěn a biomolekul pocházejících převážně z mikrobů a složek tkání produkovaných především z rostlin. Mnoho atomů uhlíku v této látce je vázáno na vodík, kyslík a dusík ve složitých řetězcích. Humusové částice mají velkou schopnost absorbovat vodu, ale malou pružnost nebo lepivost. Humus obsahuje vysokou koncentraci záporného i kladného náboje na jednotku hmotnosti, i když čistý náboj je vždy záporný a mění se s pH půdy. V neutrálních až zásaditých půdách má humus velmi silný záporný náboj, při nízkém pH naopak pouze slabý záporný náboj (Weil & Brady, 2017).

Půdní sorpční komplex je významný v mnoha ohledech, protože podstatně ovlivňuje dynamiku dalších půdních vlastností, fyzikální stav půdy a má také zásadní význam pro výživu rostlin. Půdní koloidy ovlivňují koncentraci koloidů, pH půdy, účastní se půdotvorných procesů (např. illimerizace, podzolizace), mají vliv na řadu agronomických vlastností půd a přirozenou

úrodnost půdy (struktura půdy, vodní a teplotní režim, kapilární jevy, zpracovatelnost půdy), prostřednictvím vázání iontů ovlivňují výživu rostlin i půdních mikroorganismů (Šimek, 2019; Vlček et al., 2020).

### 3.1.3 Sorpce kationtů a aniontů

Půdní sorpční komplex je vytvářen souborem půdních koloidů, které se podílejí na výměnných reakcích. V půdním sorpčním komplexu jsou vázány jednotlivé kationty různou silou v pořadí:  $\text{Na}^+ - \text{K}^+ - \text{NH}_4^+ - \text{H}^+ - \text{Mg}^{2+} - \text{Ca}^{2+} - \text{Al}^{3+} - \text{Fe}^{3+}$ , přičemž sodík je vázán na sorpční komplex nejslaběji a železo nejsilněji (Šarapatka, 2014).

K poutání látek může vést několik různých mechanismů. Nejdůležitějším typem sorpce je adsorpce, kdy dochází k hromadění látek v zóně mezi povrchem pevné částice a roztokem, který ji obklopuje. Dalším typem sorpce, který obvykle vykazuje silnější vazbu a menší reverzibilitu, je povrchová precipitace a polymerace (tvorba dimerů a trimerů anorganických sloučenin na povrchu). Absorpce znamená, že vázaná látka (sorbát) proniká do struktury adsorbentu (pevných částic půdy). Jev sorpce a desorpce iontů je jedním z nejdůležitějších fyzikálně-chemických procesů v půdě, dochází k němu zejména v důsledku koloidních povrchových nábojů. Převaha záporných nábojů ve většině půdních koloidů znamená, že se sorbují převážně kationty. Kromě jednoduchých minerálních kationtů a aniontů se adsorbují také různé organické sloučeniny a organo-minerální komplexy. K výměně iontů dochází v důsledku existence rovnováhy mezi adsorbovanými ionty a ionty v půdním roztoku (adsorpce-desorpce) (Šimek, 2019).

## 3.2 Sorpční vlastnosti

Sorpce závisí na řadě půdních vlastností jako je například velikost, množství a typ koloidů, půdní zrnitost, půdní reakce nebo vlhkost (Weil & Brady, 2017). Díky sorpčnímu komplexu a pohybu iontů můžeme koloidy nazvat jakousi bankou živin pro rostliny, protože díky pohybu látek mezi koloidy a půdním roztokem nedochází ke ztrátám živin (Šarapatka, 2014).

Sorpční komplex můžeme charakterizovat několika analytickými vlastnostmi, které kvantifikují schopnost půdy poutat různé látky i skutečnou sumu sorbovaných iontů.

### 3.2.1 Hodnoty sorpčních vlastností půdy

KVK – kationtová výměnná kapacita (T; CEC/ Cation Exchange Capacity) je schopnost půdy uchovávat a vyměňovat kationty při pH 7 a její vyjádření je v mmol/100g zeminy (Sáňka et al., 2018). Zároveň působí jako nárazník proti změnám pH, obsahu vápníku, struktury půdy nebo také změnám v množství přístupnosti živin. Významně ovlivňuje stabilitu půdy, dostupnost živin pro růst rostlin, pH půdy a reakci půdy na hnojiva a další meliorační látky. Pokud je KVK nízké, je půda méně odolná vůči změnám v půdním chemismu vyvolávanými změnami ve využívání půdy (Hazelton & Murphy, 2007).

Velikost KVK závisí na množství a typu (kvalitě) koloidů v půdě, především na množství organické hmoty a množství a typu jílových minerálů (Šimek, 2008). Obecně platí,

že KVK vzrůstá se vzrůstajícím množstvím organické hmoty a jílových částic v půdě, zásadní je potom typ jílových minerálů.

Během měření této hodnoty jsou výměnné kationty (sodík, vápník, hořčík a draslík) obvykle nahrazeny jiným silně adsorbovaným kationtem. Mezi činidla patří chlorid amonný, octan amonný, thiomocovina stříbrná, chlorid barnatý a chlorid draselný, kteří poskytují silně adsorbovaný kationt a KVK se pak vypočítává měřením, kolik silně adsorbovaného kationtu je zadrženo v půdě. (Hazelton & Murphy, 2007). Alternativní metoda KVK používá nepufrované roztoky, které umožňují výměnu kationtů při pH půdy. Přístupy za použití pufrů hodnotí potenciální nebo maximální kationtovou výměnnou kapacitu půdy. Metody bez pufru měří pouze efektivní kationtovou výměnnou kapacitu, která může uchovávat výměnné kationty při pH měřené půdy.

S – suma bazických kationtů v sorpčním komplexu. Tato hodnota značí množství bazických kationtů (vápník, hořčík, draslík, sodík) v 1 kg půdy (Sáňka a Materna, 2004). Hodnota se mění v průběhu roku, a to podle změn vlhkosti půdy nebo hnojením. Každý půdní typ má ustálenou hodnotu poměru mezi kationty (Pokorný et al., 2007).

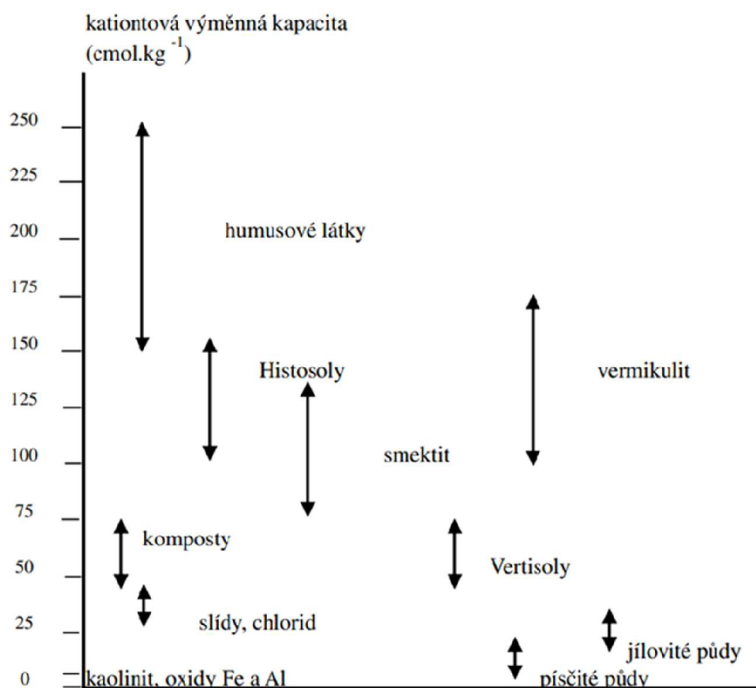
V – nasycenost sorpčního komplexu bazickými kationty (BS – Base Saturation). Podle této hodnoty zjistíme podíl výměnných bazických kationtů v % z celkové sorpční kapacity  $V = (S/T) * 100$  (Sáňka et al. 2018). Tato hodnota je charakteristickou hodnotou pro jednotlivé půdní typy (Pokorný et al., 2007).

Hodnota je závislá na pH. V alkalickém prostředí s dostatkem bazických kationtů se nachází plně nasycený sorpční komplex (V odpovídá až 100 %). V kyselých půdách se snižuje podíl bazických kationtů a roste podíl kyselých kationtů ( $H^+$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$  atd.). Potom hovoříme o nenasyčeném až extrémně nenasyčeném sorpčním komplexu (V je pod 30 %) (Šimek, 2019).

### 3.3 Vztah sorpčních vlastností s dalšími půdními charakteristikami

Sorpční vlastnosti zejména kationtová výměnná kapacita jsou určovány množstvím a druhem přítomných koloidů, jílových minerálů a organických látek. Odráží také celkový počet míst pro výměnu záporných nábojů na půdních koloidech a roste úměrně s pH, koncentrací jílu a obsahem organických látek (Follett, 2001).

Zrmitost půdy je jedním z nejstálějších znaků a dobrým dalších faktorů, které ovlivňují zemědělský potenciál půdy. Půdní matrice se skládá převážně z minerálních a organických částic různé velikosti. Půdní zrmitost (textura) je pak určována zastoupením jednotlivých zrmitostních frakcí (jíl, prach, písek). Zrmitost a její změny v jednotlivých částech profilu ovlivňují řadu dalších půdních vlastností, především strukturu půdy, vodní režim půd (míra infiltrace vody, vododržnost), provzdušnění, záhřevnost, snadnost obdělávání či náchylnost k erozi. Písčité půdy jsou porézní, mají vysokou míru infiltrace a zadržují málo vody, zatímco jílovité půdy jsou obecně vododržné a mají tendenci k hydromorfnímu vývoji (Nath et al., 2014).



Obrázek 3 - Kationtová výměnná kapacita (při pH 7) některých půd a jílových minerálů. (upraveno podle: Brady & Weil, 1999, in: Šimek, 2003)

Vliv velikosti zrn na sorpční kapacitu půdy je velmi významný. Různá velikost částic v půdách různých druhů způsobuje rozdíly ve schopnosti půd sorbovat (vázat, zadržovat) rozpustné složky půdního roztoku, ionty, molekuly a peptizované koloidy. Jílové minerály jsou hlavní anorganickou složkou sorpčního komplexu, navíc s permanentním záporným nábojem s nižší závislostí na pH než v případě organické hmoty. V půdách s nižším pH tak tvoří převážnou část sorpční kapacity půdy (Šimek, 2019).

Z obrázku 3 vyplývá, že každá koloidní látka má jinou KVK, sorpční kapacita tedy závisí i na složení jílových minerálů a zastoupení jednotlivých vrstev (illitických, smektitických, chloritických). Jílovité půdy, které obsahují četné jílové částice s velkým specifickým povrchem, mají tedy vyšší sorpční kapacitu než písčité půdy. Pomalejší promývání živin, iontů a látek rozpuštěných v půdním roztoku v případě zrnitostně těžších půd také vede k obecně vyšší koncentraci kationtů v půdě a jejich vazbu v sorpčním komplexu. Jílovité a hlinité půdy tak mají i obecně vyšší nasycení sorpčního komplexu než půdy písčité s rychlým vyluhováním látek do spodních částí profilu. Středně těžké a těžké půdy jsou tedy vhodnější pro dodávání sorbovaných živin rostlinám (Šarapatka, 2014; Vlček et al., 2020).

Humus má tendenci zabarvovat povrchové horizonty od tmavě hnědé až po černé barvy. Granulaci a stabilitu agregátů podporují zejména bakterie, polysacharidy a fungální glomalinasociované glykoproteiny produkované během rozkladu. Humus dále pomáhá snižovat plasticitu, soudržnost a lepidlost jílovitých půd, čímž způsobuje snazší manipulaci (Weil & Brady, 2017).



Půdní organická hmota, která je půdním materiálem, pocházející přímo z rostlin a živočichů, zásadně ovlivňuje sorpci. Udržuje nejdůležitější půdní mikrofaunu a mikroflóru. Díky svému rozkladu a interakci s ostatními půdními prvky je významně zodpovědná za velkou část fyzikální a chemické úrodnosti půdy (Hazelton & Murphy, 2007).

Předpokládá se, že objem a obsah organické hmoty v půdě má přímý vliv na vlastnosti půdní vody. Vyšší koncentrace půdní organické hmoty má za následek vyšší obsah vody v půdě. Tento vztah však není jednoznačný a závisí na výchozích půdních podmínkách. Prvním parametrem je textura půdy: obsah půdní vody v písčitéch půdách reaguje na zvýšení obsahu organické hmoty v půdě rychleji než obsah půdní vody v půdách s jemnou texturou (Védère et al., 2022).

Stejně jako jíly, i humusové koloidy s vysokou povrchovou plochou zadržují živné kationty (draslík, vápník, hořčík atd.) ve snadno proměnlivé formě, v níž mohou být využity rostlinami, ale nejsou příliš snadno vyplavovány z profilu prosakujícími vodami. Organická hmota díky své kationtové výměnné kapacitě a kyselým a zásaditým funkčním skupinám také zajišťuje velkou část pufrovací kapacity pH v půdě. Kromě toho jsou dusík, fosfor, síra a mikroživiny uloženy jako složky půdní organické hmoty, z níž se pomalu uvolňují mineralizací. Organické kyseliny také napadají půdní minerály a urychlují jejich rozklad, čímž uvolňují základní živiny ve formě výměnných kationtů. Organické kyseliny s malou molekulovou hmotností, stejně jako polysacharidy a některé polární biomolekuly jsou obzvláště účinné při přitahování kationtů, jako jsou kationty prvků Fe, Cu, Zn a Mn, z okrajů minerálních struktur a jejich chelataci nebo vázání do stabilních organominerálních komplexů. Některé z těchto kovů jsou pro rostliny lépe dostupné jako mikroživiny, protože jsou udržovány v rozpustné, chelátované formě. Ve velmi kyselých půdách zmírňuje organická hmota toxicitu hliníku tím, že váže ionty hliníku do netoxických komplexů. Půdní organická hmota – zejména detritová frakce – poskytuje většinu potravy pro společenstva heterotrofních půdních organismů. Bylo prokázáno, že kvalita půdní organické hmoty výrazně ovlivňuje počáteční rychlost rozkladu. Typ a rozmanitost organických zbytků přidaných do půdy může ovlivnit typ a rozmanitost organismů, které tvoří půdní společenstvo (Weil & Brady, 2017).

Půdní pH je měřítkem kyselosti nebo zásaditosti, které udává aktivitu vodíkových iontu ( $H^+$ ) a hydroxylových iontů ( $OH^-$ ) ve vodném roztoku. Oba tyto ionty mají vysokou úroveň chemické aktivity. Když se roztok nebo půda blíží k neutrální hodnotě (pH 7) je jejich chemická aktivita nejnižší. Hodnota pH půdy charakterizuje její chemické prostředí a lze ji použít k určení vhodnosti půdy pro různé druhy využití půdy.

Testování pH půdy se obvykle provádí ve vodě nebo v 0,01M roztoku chloridu draselného v poměru hmotnosti půdy k pěti dílům vody. Protože tyto dva postupy mohou poskytovat zcela odlišné výsledky, musí být v protokolech o měření pH uvedeno, zda bylo měření provedeno ve vodě nebo v 0,01M roztoku chloridu draselného, aby bylo platné (Hazelton & Murphy, 2007).

Koloidní náboj je také ovlivněn pH prostředí a je pak nazýván jako proměnný náboj závisící na pH. Tyto náboje jsou často spojeny s hydroxylovými skupinami OH. Tyto skupiny se vážou na železo v anorganických koloidech anebo na hliník a CO skupiny v organických (huminových) koloidech. V mírně kyselém prostředí mají tyto molekuly malý nebo žádný náboj. Se zvyšujícím se pH se  $H^+$  odděluje od koloidních OH skupin a nabývá záporného

náboje. Tato reakce je reverzibilní v závislosti na pH prostředí. Dalším zdrojem záporného náboje je blokování kladně nabitých komplexů Al (např.  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ ). V kyselém prostředí blokuje záporný náboj jílových minerálů. Se zvyšujícím se pH reaguje  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$  s  $\text{OH}^-$  za vzniku  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , čímž se uvolňují záporně nabitá místa. V kyselém prostředí však mohou hydratované oxidy vyvolat kladný náboj. Při okyselení půdy se  $\text{H}^+$  může vázat na  $\text{OH}^-$  skupiny sloučenin. V tomto případě to vede ke vzniku kladného náboje. V podmínkách zásaditého prostředí může na stejném místě vzniknout záporný náboj (viz výše). Je zřejmé, že ve směsi humusu a různých anorganických koloidních částic jsou přítomny jak záporné, tak kladné náboje. Ve většině půd mírného pásma však převažují záporné náboje. Například v kyselých tropických půdách bohatých na hydratované oxidy Fe a Al mohou převažovat kladné náboje (Šarapatka, 2014).

Půdy s vysokou KVK mohou vázat více kationtů na výměnná místa na povrchu částic jílu a organických látek. Půda s vysokou KVK má také vyšší pufrací kapacitu, což zvyšuje odolnost půdy vůči výkyvům pH. Půdy bohaté na jíl nebo organickou hmotu mají často vyšší KVK a pufrovací schopnost než půdy hlinité nebo písčité. Protože  $\text{H}^+$  je kationt, který soutěží o výměnná místa s jinými kationty, když je pH půdy vysoké (tj. zásaditější, s nízkou koncentrací  $\text{H}^+$ ), je na výměnných místech částic přítomno více bazických kationtů, takže jsou méně citlivé na vyplavování. Když je pH půdy nižší (tj. méně zásadité, s vyšší koncentrací  $\text{H}^+$ ), je k dispozici více iontů  $\text{H}^+$ , které "vyměňují" bazické kationty, odstraňují je z výměnných míst a uvolňují je do půdního roztoku (půdní vody). V důsledku toho buď rostlina vyměněné živiny absorbuje, nebo se ztratí vyplavením nebo erozí (McCauley et al., 2009).

### 3.4 Vliv managementu na sorpční vlastnosti

Na sorpční vlastnosti může mít vliv různý způsob obhospodařování půd, jako je například orba, hnojení, změna land use nebo odvodnění půdy. Například dlouhodobě nevhodné využívání půdy a systém hospodaření vede ke ztrátě humusu či erozi půdy, a tedy i snižování produktivity. Všechny vnitřní a vzájemně propojené vlastnosti půdy (biologické, chemické a fyzikální) jsou významně ovlivněny (Thomas et al., 2007).

Využívání půdy silně ovlivňuje její vlastnosti a nevhodné postupy vedou ke zhoršení kvality půdy a životního prostředí. Weil & Brady (2017) uvádí, že KVK a BS jsou obecně vyšší u trvalých travních porostů ve srovnání s půdami obdělávanými. To je způsobeno přítomností dobře vyvinutého kořenového systému v trvalých travních porostech (TTP), který pomáhá zlepšovat strukturu půdy a infiltraci vody a často také produkuje značné množství organické hmoty, která je zásadní součástí sorpčního komplexu. Naproti tomu kulturní půdy mají často zhutnělou strukturu v důsledku obdělávání a dalším způsobu hospodaření, a to může mít za následek nižší KVK a BS (Weil & Brady, 2017). Tabulka 1 uvádí základní hodnoty vybraných parametrů půd dle typu land use, hodnocených v průběhu let 1995-2015 (Šimek, 2019), patrná je vyšší hodnota KVK v případě TTP, vázaná zejména na vyšší hodnoty Cox.



Tabulka 1 - Základní hodnoty vybraných půdních vlastností sledovaných na orné půdě a TTP v průběhu let 1995-2005 (Šimek, 2019)

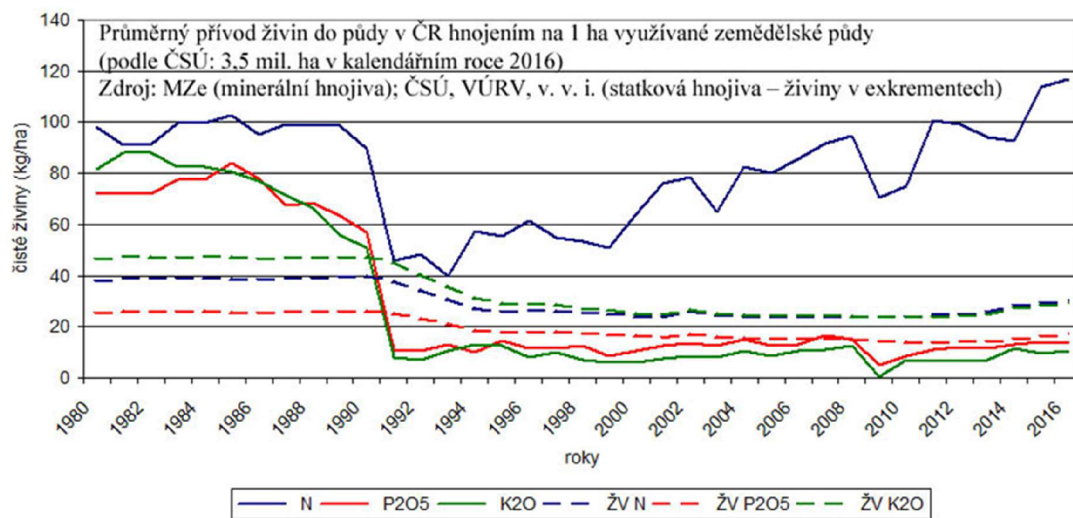
Parametr	Jednotka	Využití půdy	Min	Max	Medián
pH (1 M KCl)		orná	4,1	7,5	5,7
		TTP	3,7	7,0	5,1
C <sub>ox</sub>	hmot. %	orná	0,90	3,61	1,68
		TTP	1,79	5,18	2,88
C <sub>ext</sub>	µg.g <sup>-1</sup>	orná	17,2	86,6	35,3
		TTP	35,5	187	65,6
CEC	mmol chem.ekv.kg <sup>-1</sup>	orná	80	526	192
		TTP	125	480	233
jíl	hmot. %	orná	6,4	59,9	21,2
		TTP	6,5	25,0	10,0

Zpracování půdy dále vede k degradaci půdních agregátů a rovněž zvyšuje mikrobiální aktivitu v půdě tím, že jí provzdušňuje, což způsobuje rychlejší využívání půdní organické hmoty. Intenzivní orba tedy může vést k rychlejší mineralizaci organické hmoty, a tedy snížení KVK (Bhadha et al., 2017).

Dalším způsobem ovlivnění sorpčních vlastností je půdní eroze, a to jak vodní, tak eroze orbou. Při erozním smyvu dochází k selektivnímu odnosu nejjemnějších půdních částic, mezi které patří i organické látky a jílové částice a rovněž na ně vázané ionty. V silně erodovaných částech svahu lze tedy předpokládat i snížení KVK a BS, právě v důsledku odosu částic tvořících sorpční komplex (Papiernik et al., 2007; Heckrath et al., 2005). Naopak depoziční části svahu mohou být o tyto částice obohaceny, což vede i k vyšší sorpční kapacitě i nasycení (Zádorová et al., 2014). Ztráta iontů může být v případě silně erodovaných ploch kompenzována uvolňováním látek ze substrátu, totéž platí i o zvýšení pH v případě např. karbonátového podloží (Zádorová et al., 2018).

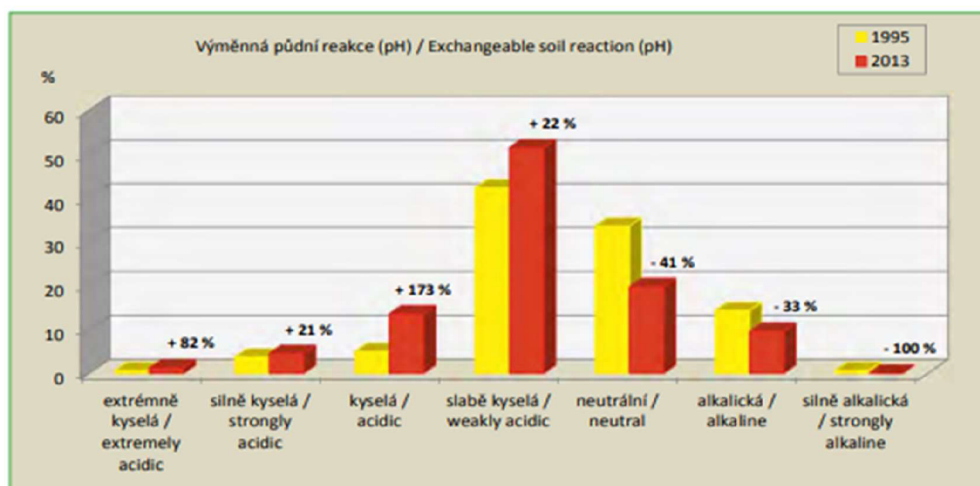
V případě dlouhodobého a intenzivního hospodaření jsou KVK a půdní pH silně ovlivněny hnojením. Konvenční zemědělství využívá především kombinaci organických a minerálních hnojiv. Minerální hnojiva výrazně narušují kationtovou bilanci a ovlivňují výměnné kationty a tím i KVK (Goladi a Agbenin 1997). Nejvýraznější změny v chemismu půd byly pozorovány v případě dlouhodobého používání vysokých dávek amonných hnojiv. V tomto případě dochází při nitrifikaci amonných iontů k uvolnění H<sup>+</sup> iontů, okyselujících půdní prostředí (Šimek, 2019). Ke snižování pH přispívají i fosforečná hnojiva. Hydrolyzou fosforečnanů vzniká kyselina fosforečná, která následně disociuje a uvolněné ionty H<sup>+</sup> opět snižují pH půdy. Naopak meliorace půd prostřednictvím vápnění udržuje či zvyšuje hladinu pH a některých živin. Obrázek 4 ukazuje vývoj využití organických a minerálních hnojiv od r. 1980. Výrazný pokles ve využívání především minerálních hnojiv byl zaznamenán po roce 1989. Zatímco hladina využívání fosforečných a draselných hnojiv zůstává i nadále na nízké úrovni, hnojení dusíkatými hnojivy se postupně zvyšuje (MZe, 2018). Využití organických hnojiv je z hlediska sorpce příznivější. Používání organických hnojiv vede ke zvýšení podílu organické hmoty v půdě a ke zlepšení struktury půdy, kationtové výměnné kapacity a obecně ke zlepšení koloběhu živin (Saha et al., 2008). V případě, že bychom chtěli porovnat vliv různých hnojiv mezi sebou, mají půdy s organickým hnojením vyšší KVK než půdy s minerálním hnojením. Organické hnojivo prokazatelně zvyšuje KVK, ale po delší době

od aplikace. Lze proto předpokládat, že s dobou hnojení budou rozdíly mezi minerálním hnojením a organickým větší (Vašák et al., 2014).



Obrázek 4 - Průměrný přívod živin do půdy v ČR hnojením na 1 ha využívané zemědělské půdy (podle ČSÚ: 3,5mil. ha v kalendářním roce 2016)

Ke změně chemismu přispívá i atmosférická depozice (mokrá i suchá) okyselujících látek ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$ ). Na tom se podílí především průmyslová činnost, doprava i zemědělství (spalování fosilních paliv, živočišná výroba, hnojení). V Evropě byly zaznamenány nejvyšší hodnoty emisí  $\text{SO}_2$  na přelomu sedmdesátých a osmdesátých let, maximální hodnoty emisí  $\text{NO}_x$  a  $\text{NH}_3$  na konci osmdesátých let 20. století. Vypouštěné látky se v atmosféře mění do formy kyselin, které snižují pH srážek pod přirozenou hodnotu (Šimek, 2019). Obrázek 5 ukazuje změnu jednotlivých kategorií pH, zjištěných v rámci tzv. Bazálního monitoringu půd mezi lety 1995 a 2013 (Poláková et al., 2017). Výrazně se zvyšuje především podíl kyselých půd a slabě kyselých půd.



Obrázek 5 - Výměnná půdní reakce (pH) na plochách BMP v jednotlivých odběrových cyklech (podle kategorií půdní reakce) (Poláková et al., 2017)

V případě zájmového území je třeba jako jeden z faktorů ovlivnění sorpčních vlastností uvažovat i masivní odvodnění půd, které bylo realizováno na většině zemědělsky využívaných ploch v regionu (Němeček et al., 1967). Lze předpokládat, že hlavní vliv odvodňovacích zásahů bude spočívat ve změně obsahu organických látek v půdě, který dále ovlivňuje sorpční vlastnosti. Vlhčí, případně zamokřené půdy obecně produkují vyšší množství humusu než anhydromorfnní půdy, a to v důsledku pomalejšího rozkladu a mineralizace organických látek (Šimek, 2019).

## 4 Metodika

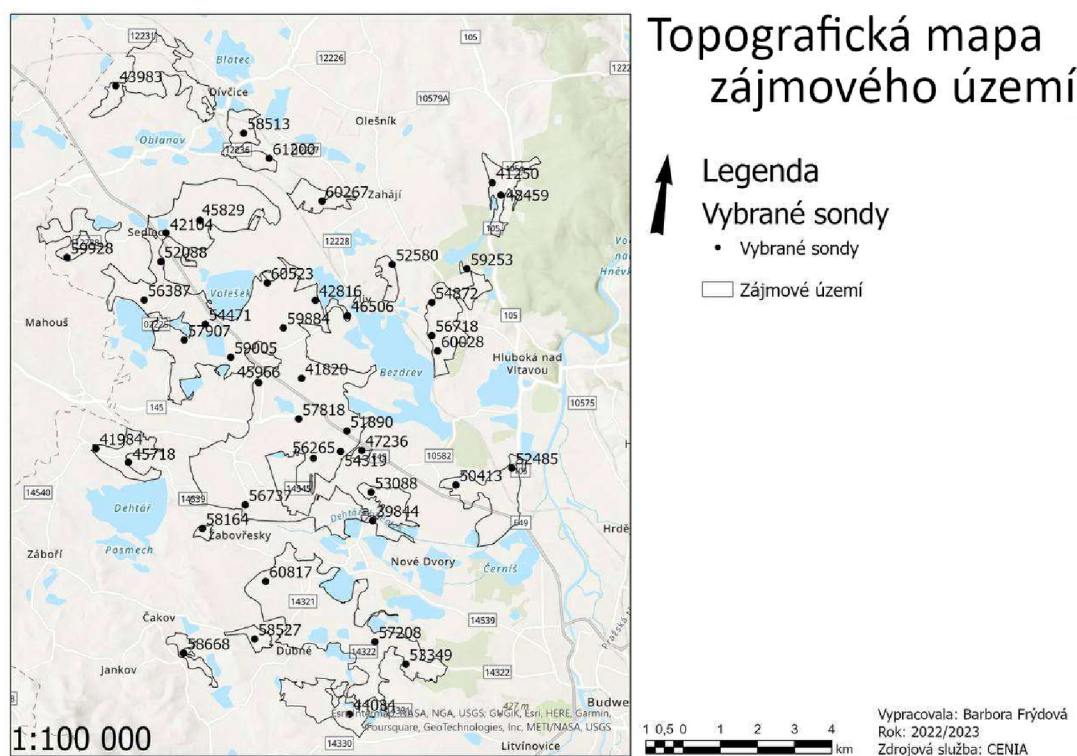
### 4.1 Popis zájmového území

#### 4.1.1 Základní charakteristika

V této práci je zpracováno 44 sond, realizovaných v okrese České Budějovice (obrázek 6). Okres České Budějovice se nachází ve střední a jihovýchodní části Jihočeského kraje a rozkládá se na ploše 1 638,30 km<sup>2</sup>. Počet obyvatel byl v roce 2022 necelých 200 tisíc.

Českobudějovická pánev je geomorfologický celek, který se nachází v severozápadní části jihočeských pánví. Z části je odvodňována Vltavou, Otavou a přítokem Blanice. Nachází se zde i mnoho rybníků, například Bezdrev, Dehtář nebo Volešek.

Zájmové území zaujímá cca 160 km<sup>2</sup> a rozkládá se v hranicích několika bývalých jednotných zemědělských družstev a státních statků (Dívčice, Čejkovice, Radošovice, Pištín, Haklovy Dvory, Chrástřany, Dubné, Žabovřesky, Sedlec a Zliv). Výběr oblasti byl založen především na předpokladu, že vlivem masivního odvodnění hydromorfních půd a změnami ve využívání půd došlo k významným změnám u řady půdních vlastností.



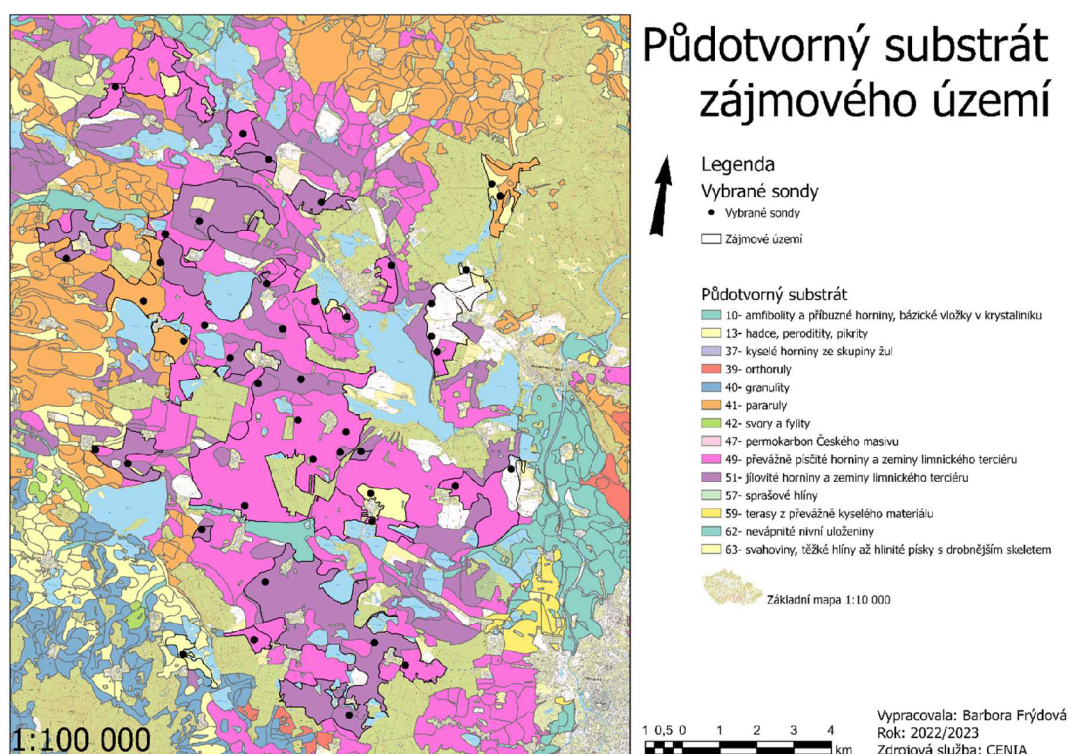
Obrázek 6 - Topografická mapa zájmového území



#### 4.1.2 Geologická a geomorfologická charakteristika

Českobudějovická pánev se nachází na jihozápadním okraji Česko-moravské soustavy a je umístěná mezi jihozápadem Šumavského podhůří a severovýchodem Táborské pahorkatiny. Na jihu sousedí s Novohradským podhůřím a na východě s Lišovským prahem. Pánev je protáhlého tvaru. Její délka je asi 60 km a šíře jen 15 km. Nejhlubší část pánve je ohraničena vrchy Klukem (741 m n. m.), Babou (583 m n.m.) a Račicí (508 m n. m.) (Czudek, 1972).

Je tvořena převážně svrchnokřídovými a třetihorními vrstvami (obrázek 7). Podloží krystalinických moldanubických hornin vystupuje na povrch při okrajích na východě a severozápadě střední části pánve. Tato tektonická sníženina je ohraničená místy výraznými zlomovými svahy a vyplněná mírně zvlňným až plochým povrchem v nadmořské výšce 380-410 m n. m., který je výsledkem erozních a denudačních procesů. Podloží pánve tvoří horniny moldanubika, které na jejím okraji vystupují na povrch. Jedná se o metamorfity a granitoidy. Vznik pánve je výsledkem druhohorních pohybů zemské kůry. Sedimenty se skládají z křídových sedimentů (různě zbarvené pískovce, slepence, jílovce, prachovce, jíly, písky), třetihorních sypkých sedimentů (různě zbarvené a různě zrnité jíly, písky) a čtvrtohorních sedimentů (říční štěrk a písek). Holocenní sedimenty představují nejmladší vrstvy fluviálních štěrků a písků, nivních a svahových hlín, usazeniny vodních nádrží, kyselá slatiny a oligotrofní rašeliny (Penížek, 2019).



Obrázek 7- Mapa znázorňující půdotvorný substrát zájmového území. Zdroj: KPP (Němeček et al., 1967)

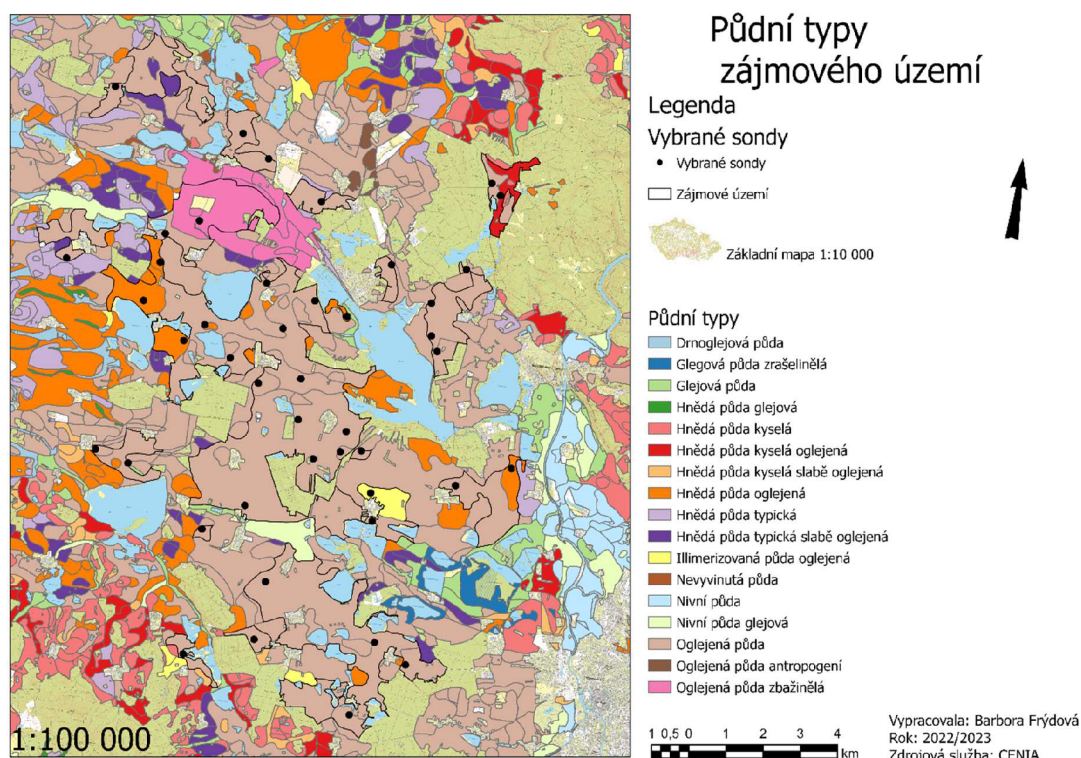
### 4.1.3 Hydrologické a klimatické poměry

V Českých Budějovicích převládá chladnější podnebí a průměrná roční teplota se pohybuje okolo 7-8 °C. Roční úhrn srážek v roce 2022 byl 806,8 mm. Většina úhrnu srážek (40 %) pak připadá na léto. Oblast se nachází v klimatickém pásu B, který je mírně teplý. Klimatické podmínky zde tedy jsou mírně kontinentální s teplými léty a chladnými zimami (Němeček et al., 1967; ČSÚ, 2020).

Jedním z hlavních znaků okresu je velké množství vodních ploch. Hlavním z toků nacházejících v tomto okrese je řeka Vltava, která přitéká z jižní strany a směřuje k severu. Jejími hlavními přítoky jsou řeka Malše a řeka Lužnice. Na řece Malši se nachází vodní dílo, které zásobuje značnou část jižních Čech pitnou vodou. Českobudějovicko se vyznačuje velkým množstvím vodních ploch, především rybníků a vodních nádrží, mezi které můžeme zařadit vodní nádrž Římov, vodní nádrž Humenice, rybník Dvořiště, Bošilecký rybník, rybník Bezdrev nebo rybník Dehtář (Němeček et al., 1967; ČSÚ, 2020).

### 4.1.4 Půdní poměry

V této oblasti převažují hydromorfní půdy. Půdní kryt je zastoupen převážně pseudogleji, gleji a oglejenými subtypy dalších půdních jednotek, především kambizemí či luvizemí. Pseudoglej glejový s dalšími hydromorfními půdami a fluvizeměmi se nachází přímo u koryt Vltavy a Malše (Němeček et al. 1967; Penížek 2019).



Obrázek 8- Mapa půdních typů zájmového území dle Komplexního průzkumu půd (Němeček et al., 1967)

Oglejené půdy, které zde mají jedno z největších zastoupení, byly dříve nejčastěji odvodňovány. Z důvodu stagnace povrchové vody v terénních depresích je hlavním půdotvorným procesem oglejení; stagnací vody je narušena i schopnost půdy transformovat organické látky v humus. Z důvodu střídání oxidace a redukce v půdách jsou pak znatelné barevné rozdíly v půdním horizontu (mramorování). U silně přemokřených půd, především glejů, nacházíme rašelinné horizonty. Půdy mají převážně nízké pH (3,6-5,5).

## **4.2 Datové podklady**

Pro zjištění změn vybraných půdních vlastností ve sledovaném období byly využity dva hlavní datové zdroje. Základem byly výběrové půdní sondy, realizované v zájmovém území v rámci rozsáhlého projektu Komplexního průzkumu zemědělských půd Československa (dále KPP; Nemeček et al., 1967). Vybrané sondy pak byly znovu navštíveny, vzorkovány a analyzovány v rámci projektu Národní agentury pro zemědělský výzkum (Žižala et al., 2020).

### **4.2.1 Komplexní průzkum půd (KPP)**

Komplexní průzkum půd z 60. let minulého století je základem dat o půdách v Česku, dříve v Československu (Nemeček et al., 1967). Průzkum proběhl na základě usnesení vlády ČSSR. Tato akce byla za účelem zjištění kvalitních informací o půdním pokryvu, a následném řešení problematiky výživy rostlin nebo potřeby systematického zvyšování půdní úrodnosti (Nemeček et al., 1967).

Celkem bylo vykopáno více než 700 000 půdních sond (z toho přibližně 390 tis. na území České republiky). Půdní sondy byly klasifikovány jako základní (vykopané do hloubky 120 cm), výběrové a speciální (vykopané do hloubky 150 cm). U každé sondy byla sledována stratigrafie půdního profilu a byly identifikovány půdní horizonty a specifické přechody mezi nimi. Zjišťovala se zrnitost, barva, struktura a konzistence půdy, přítomnost novotvarů nebo jiných specifických znaků, vlhkost a pórovitost. Bylo zjišťováno množství skeletu, prokořenění, biologická aktivita a přítomnost rozpustných solí (Nemeček et al., 1967).

Analyzované vzorky byly v případě základních sond odebírány z ornice a podomíči, v případě výběrových a speciálních sond ze všech horizontů. U výběrových sond byla zjišťována řada chemických a fyzikálních vlastností (zrnitost, obsah organického uhlíku, sorpční vlastnosti, půdní reakce či obsah některých živin).

Výsledkem KPP bylo množství textových (průvodní zprávy k jednotlivým zemědělským družstvům a okresům) a mapových výstupů (půdní mapy a kartogramy v měřítkách 1:10 000, resp. 1:50 000), které sloužily jak pro praxi (zlepšení produkční schopnosti půdy, agronomická kategorizace a regionalizace území), tak i jako základní a přírodovědné údaje.

### **4.2.2 Terénní průzkum a odběr nových půdních vzorků**

Sběr vzorků, dále zpracovávaných v této práci, proběhl v rámci projektu „Vytvoření podrobných aktuálních map půdních vlastností ČR na základě Komplexního průzkumu půd

a metod digitálního mapování půd“, řešeného pod záštitou Národní agentury pro zemědělský výzkum. V několika oblastech ČR s různým stupněm potenciální dlouhodobé změny půdních byly v rámci terénního průzkumu navštíveny, znovu otevřeny, popsány a vzorkovány profily v místech výběrových sond KPP (Žížala et al., 2019).

Půdní průzkum byl v zájmové lokalitě uskutečněn v měsících září až listopad 2019, podle stavu plodin a klimatických podmínek. Na základě digitalizace map KPP 1:10 000 byla místa sond KPP vyhledávána pomocí GPS. Vzhledem k tomu, že původní sondy byly do map lokalizovány pouze na základě vyhodnocení terénní situace, bylo zpětné vyhledání sond zatíženo možnou chybou. Každá sonda byla kopána k hraničním půdotvorného substrátu. Po úplném popisu morfologických znaků horizontů byly odebrány vzorky z jednotlivých horizontů (4-6 vzorků na každou sondu). Další čtyři vzorky byly odebrány sondovací tyčí směrem na každou světovou stranu od místa sondy, ve vzdálenosti 20 m. Dále se sondy i okolí dokumentovalo fotograficky (Žížala et al., 2019).

#### 4.2.3 Analýza nových vzorků

Porovnávání vzorků z různých období může ovlivnit použití jiných metod pro stanovení hodnot. Používané metody se mohou lišit v přípravě vzorků, v analytických činidlech nebo v přístrojích. Z důvodu co největší shody s historickými vzorky byly nové vzorky analyzovány stejnými metodami stanovení jednotlivých vlastností jako při laboratorních pracích během KPP (Sirový et al., 1967).

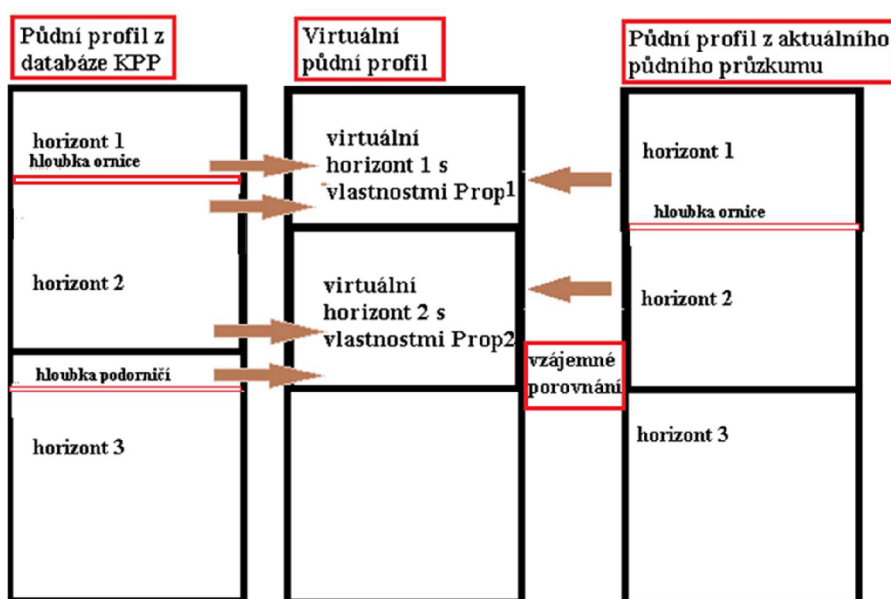
S odebranými vzorky bylo dále pracováno v laboratoři. Nejprve byly vysušeny při laboratorní teplotě, nadrceny a nasítovány na 2 mm sítích, tím byly připraveny k analytickému stanovení v laboratořích Výzkumného ústavu meliorací a ochrany půdy a Katedry pedologie a ochrany půd ČZU. Stanovovaly se stejné vlastnosti jako při původních laboratorních pracích během KPP. V této práci jsou zpracovány analýzy sorpčního komplexu, dále obsah organického uhlíku, půdní reakce a zmitost.

- **Kationtová výměnná kapacita** – Pro stanovení KVK se použila metoda indexového iontu za použití vytěsňovacího roztoku  $\text{BaCl}_2$  při pH 8,2. Z části roztoku bylo stanoveno titrací HCl i výměnný vodík.
- **Nasycení sorpčního komplexu** – Tato hodnota byla vypočítána z celkové hodnoty KVK včetně výměnného vodíku, který se následně odečetl.
- **Stanovení organického uhlíku** – Nejprve bylo provedeno mokré spalování při teplotě 125 °C za přítomnosti chrom sírové směsi. Následovala titrace Mohrovou solí.
- **Stanovení zrnitosti** – U této hodnoty se jednalo o pipetovací metodu. Vzorky, které byly rozpuštěny podle typu půdy různým činidlem (hexametrafosforečnan sodný, HCl, NaOH), byly následně pipetovány.
- **Půdní reakce** – Výměnná půdní reakce byla stanovována v 0,2 molárním roztoku KCl v poměru půda: extrakt 1:2,5.



### 4.3 Zpracování dat

Data, která jsou porovnávána v této práci, jsou pouze pro orniční horizont Ap, kde jsme předpokládali největší intenzitu změn jednotlivých vlastností. Hlavním problémem, který nastal při zpracování dat, je změna mocnosti horizontů v průběhu sledovaného období. Důvodem, proč k tomu došlo, může být prohloubení orby nebo změna agrotechniky, která s postupujícími roky prohlubuje orniční horizont. Řešením tohoto rozdílu v mocnostech horizontů je výpočet tzv. virtuálního horizontu (obrázek 9). Princip spočívá v transformaci dat z vrstev původních půdních profilů KPP do dvou vrstev virtuálních horizontů. Hodnoty těchto dvou vrstev byly vypočteny podle rovnice vyznačené pod schématem vyjadřujícím postup vytváření virtuálního profilu (Žížala et al., 2020).



Obrázek 9 - Schematické znázornění postupu při tvorbě virtuálního horizontu. (Žížala et al., 2019)

$$Prop_{a=\sum_{i=1}^n \frac{MassA}{MassB}} \times PartVal_i$$

$Prop_a$ - značí směšnou hodnotu pro porovnání s horizontem z nového terénního průzkumu

$MassA$ - značí mocnost horizontu z databáze KPP v hloubce, ve které byl popsán horizont z nového terénního průzkumu

$MassB$ - značí mocnost horizontu z nového terénního průzkumu

$PartVal_i$ - značí hodnotu vlastnosti horizontu z databáze KPP

Součástí metodiky bylo i zpracování map vyjadřujících různé aspekty přírodního prostředí zájmového území. Mapy byly vytvářeny v programu ArcGIS na základě digitalizovaných vrstev map KPP a volně dostupných dat ze serverů několika státních institucí

(CENIA, Geologická služba, Český úřad zeměměřičský a katastrální). Statistické analýzy datového souboru byly zpracovány v programu Statistica. Jednalo se především základní popisné statistiky, analýzy rozptylu a korelační analýzy, dále grafické znázornění pomocí histogramů a krabicových grafů.

## 5 Výsledky

### 5.1 Změna celkových hodnot sorpčních vlastností

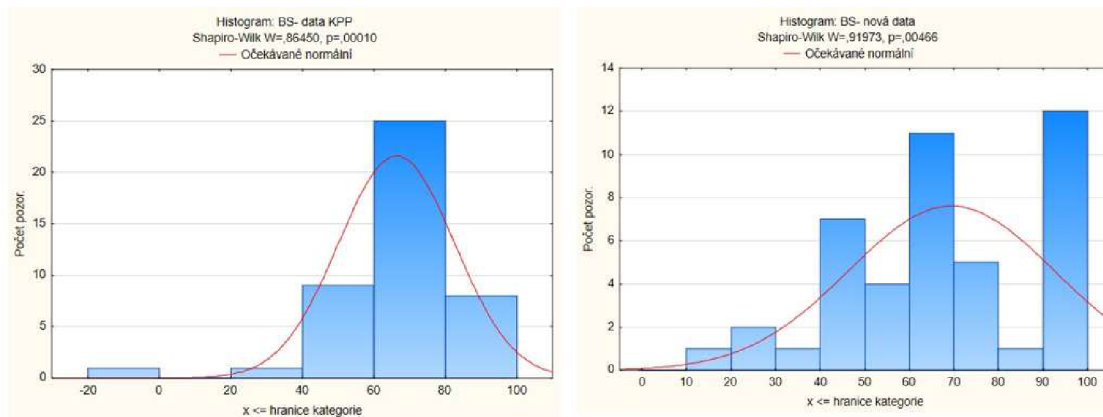
Změny v hodnotách sorpčních vlastností, konkrétně kationtové výměnné kapacity a nasycení sorpčního komplexu, byly sledovány na souboru 44 virtuálních svrchních horizontů (nižší počet N u některých hodnot značí vyřazení horizontu z důvodu potenciálně chybných stanovení) z profilů realizovaných v rámci průzkumu KPP (1961-1970) a projektu NAZV (2018-2021). Tabulka 2 ukazuje základní statistické parametry porovnávaných souborů.

Tabulka 2 - Základní statistické parametry hodnot kationtové výměnné kapacity a nasycenosti sorpčního komplexu bazickými kationty z dat KPP a nového průzkumu

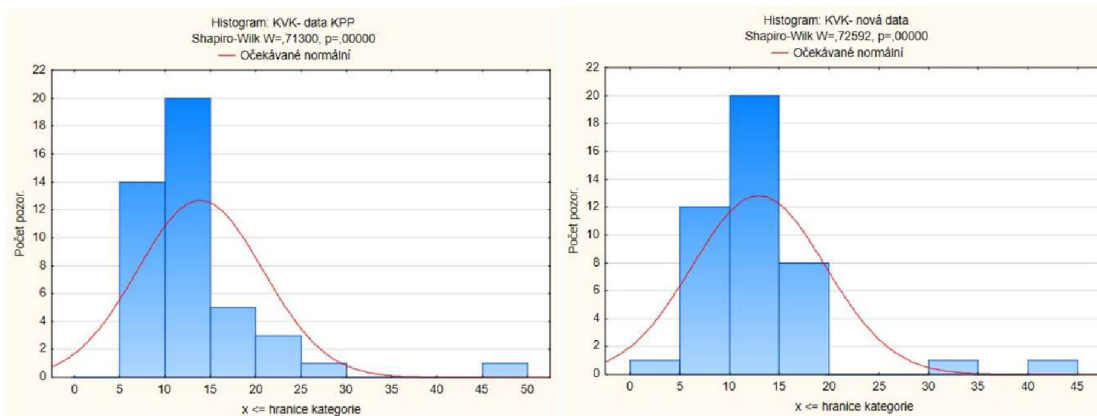
	N platných	Průměr	Maximum	Minimum	Medián	Rozptyl	SM.odch.	Var. koef.
KVK (mg/kg) - KPP	44	14,48	47,6	6,91	12,64	67,139	8,194	0,566
BS (%) - KPP	43	68,2	91,48	32,92	68,1	168,438	12,978	0,19
KVK (mg/kg) - nová data	43	13,56	43,03	4,86	11,62	63,572	7,973	0,588
BS (%) - nová data	44	69,78	100	17	67	528,114	22,981	0,329

Průměrné hodnoty i další statistické parametry (minimum, maximum) u sledovaných půdních vlastností se měnily spíše nevýrazně. Průměrná hodnota KVK v době KPP byla 14,48 mg/kg a klesla o necelý 1 mg/kg na 13,56 mg/kg. Průměrná hodnota BS stoupla z 68,2 % na 69,78 %. V obou obdobích byla zjištěna vysoká variabilita (variační koeficient větší než 0,5) v případě KVK a zvyšující se variabilita v případě BS (nárůst z 0,19 na 0,33).

Pro soubory dat byly provedeny analýzy normality rozložení jednotlivých hodnot (Shapiro-Wilkův test), které jsou vyjádřeny pomocí histogramů s výsledky testu v záhlaví (obrázky 10 a 11).



Obrázek 10 - Histogramy rozložení dat BS v době KPP a nového průzkumu



Obrázek 11 - Histogramy rozložení dat KVK v době KPP a nového průzkumu

Ze hodnot  $p$  Shapiro-Wilkova testu vyplývá, že hodnoty KVK a BS nemají ani v jednom případě normální rozložení ( $p$  hodnoty nižší než 0,05). Pro analýzu rozptylu, vyjadřující významnost rozdílu mezi průměrnými hodnotami souborů, byla tedy využita neparametrická Kruskal-wallisova ANOVA (tabulka 3).

Tabulka 3 - Soubor výsledků Kruskal Wallisovy ANOVY pro BS a KVK

Závislá: BS	Kruskal- Wallisova ANOVA založ. na poř.; BS Nezávislá (grupovací) proměnná: doba průzkumu Kruskal- Wallisův test: $H(1, N=87) = 0,0740519$ $p = ,7855$			
	Kód	Počet platných	Součet pořadí	Prům. pořadí
data KPP	1	43	1860,000	43,256
Nová data	2	44	1968,000	44,72727

Závislá: KVK	Kruskal- Wallisova ANOVA založ. na poř.; KVK Nezávislá (grupovací) proměnná: doba průzkumu Kruskal- Wallisův test: $H(1, N=87) = 1,117193$ $p = ,2905$			
	Kód	Počet platných	Součet pořadí	Prům. pořadí
data KPP	1	44	2060,500	46,830
Nová data	2	43	1767,500	41,105

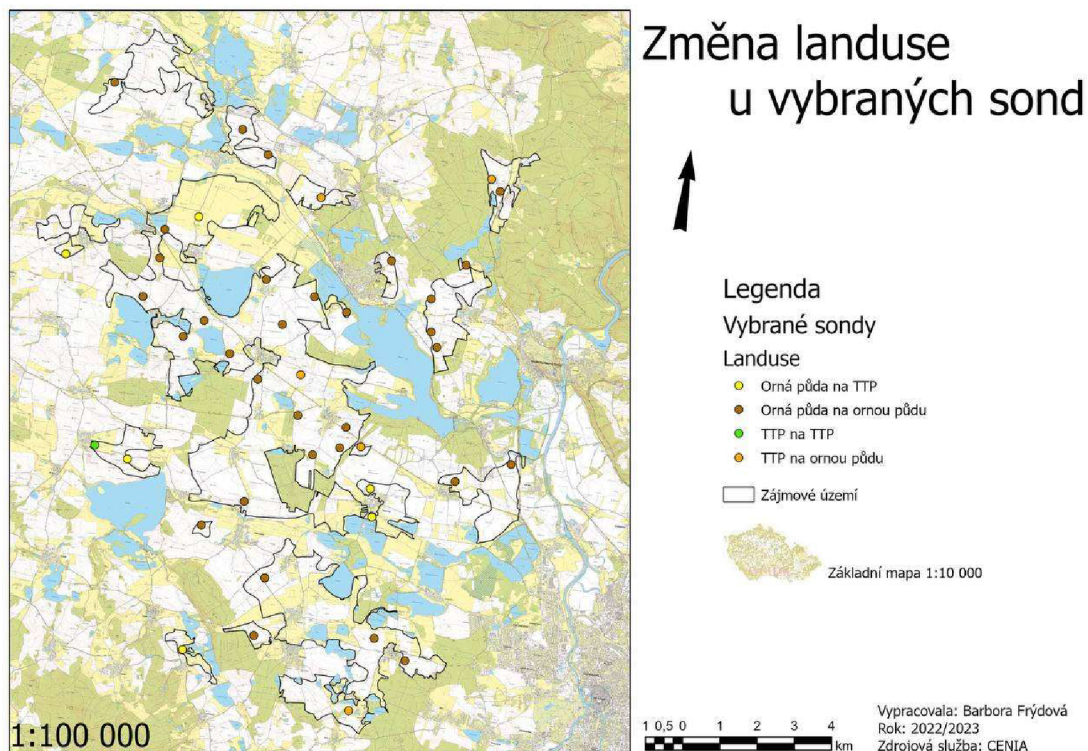
Z výsledků tabulky 3 vyplývá, že pro obě hodnoty je p-hodnota vyšší než 0,05, díky tomu nezamítáme nulovou hypotézu. Tím potvrzujeme, že mezi daty z obou sledovaných období neexistuje statisticky významný rozdíl.

## 5.2 Vliv využívání půdy na sorpční vlastnosti

Tabulka 4 a obrázek 12 ukazují změny land use u sledovaných sond. V průběhu let, mezi původními sondami a aktuálními, došlo k řadě změn ve využití, například 6 lokalit, kde dříve byla orná půda, je aktuálně trvale travní porost, naopak 32 lokalit zůstalo ornou půdou i nadále. Pět lokalit je z dříve trvalého travního porostu aktuálně ornou půdou, a pouze jedna lokalita zůstala pod trvalým travním porostem.

Tabulka 4 - Změna land use na sledovaném území

Typ	Počet	Počet v %
orná -ttp	6	13,60 %
orná-orná	32	72,70 %
ttp- orná	5	11,40 %
ttp-ttp	1	2,30 %
Celkem	44	100,00 %



Obrázek 12 - Změna land use v zájmovém území; zdroj: Němeček et al. 1967

V rámci průměrných hodnot klesly hodnoty KVK pro ornou půdu, ostatní data v průměru vzrostla (tabulka 5). Maximální hodnoty stouply skoro pro všechny proměnné kromě KVK orné půdy. Minimální hodnota s časem stoupla jen v případě kationtové výměnné kapacity pro ornou půdu. Medián stoupl u KVK a BS jen u trvalých travních porostů a u orné půdy s dobou klesl. Směrodatná odchylka stoupla ve všech případech kromě KVK orné půdy. Variační koeficient přesáhl 50 % pouze v případě KVK pro ornou půdu z dob KPP, a vyjadřuje rozptýlení hodnot v souboru. Ostatní hodnoty mají nižší variabilitu.

Tabulka 5 - Souhrnná popisná statistika kationtové výměnné kapacity (mg/kg) a nasycenosti sorpčního komplexu bazickými kationty (%) z dat KPP a nového průzkumu pro různé typy land use

Proměnná	N platných	Průměr	Maximum	Minimum	Medián	Rozptyl	SM.odch.	var. koef.
KVK pro OP - data KPP	38	13,31	47,6	6,91	11,91	48,653	6,975	0,524
KVK pro TTP- data KPP	6	16,68	22,78	12,68	14,95	14,85	3,854	0,231
BS pro OP - data KPP	38	70,17	91,48	32,92	70,34	148,628	12,191	0,174
BS pro TTP - data KPP	5	56,44	75,26	41,15	56,25	182,512	13,51	0,239
KVK pro OP - nová data	36	10,92	16,06	4,86	11,04	8,566	2,927	0,268
KVK pro TTP- nová data	7	22,19	43,03	12,99	16,43	111,975	10,582	0,477
BS pro OP - nová data	37	70,75	100	17	67	509,165	22,565	0,319
BS pro TTP- nová data	7	70,84	100	30	77,86	605,553	24,608	0,347

Soubory dat z KPP a nových dat byly nejdříve vnitřně porovnávány Kruskal-Wallisovou ANOVOU pro zjištění rozdílu mezi hodnotami lokalit využívaných jako orná půda a TTP (tabulka 6).

Tabulka 6 - Soubor výsledků Kruskal-Wallisovy ANOVY pro všechny sady dat BS a KVK dle typu land use

Závislá- BS- data KPP	Kruskal- Wallisova ANOVA založ. Na poř.; BS- data z KPP Nezávislá proměnná land use KPP Kruskal- Wallisův test H (1, N=43) =3,733493 <b>p= ,0533</b>			
	Kód	Počet platných	Součet pořadí	prům. pořadí
orná	1	38	887	23,342
TTP	2	5	59	11,8

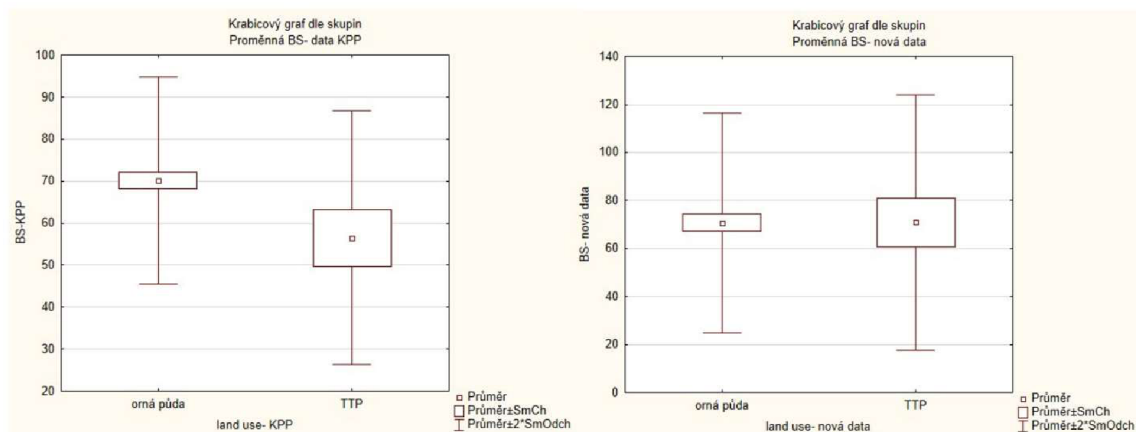
Závislá BS - nová data	Kruskal- Wallisova ANOVA založ. Na poř.; BS- nová data; Nezávislá proměnná land use nová data Kruskal- Wallisův test H (1, N=44) =,0129484 <b>p= ,9094</b>			
	Kód	Počet platných	Součet pořadí	prům. pořadí
orná	1	37	829	22,405
TTP	2	7	161	23

Závislá KVK - KPP	Kruskal- Wallisova ANOVA založ. Na poř.; KVK- data z KPP; Nezávislá proměnná land use KPP Kruskal- Wallisův test H (1, N=44) =4642760 <b>p= ,0312</b>			
	Kód	Počet platných	Součet pořadí	prům. pořadí
orná	1	38	792	20,842
TTP	2	6	198	33

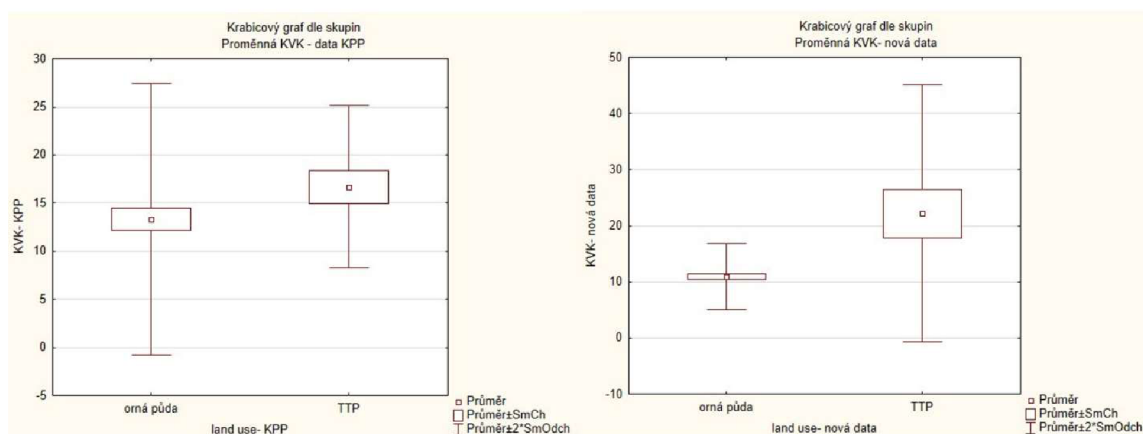
Závislá KVK - nová data	Kruskal- Wallisova ANOVA založ. Na poř.; KVK- nová data; Nezávislá proměnná land use nová data Kruskal- Wallisův test H (1, N=43) =13,33442 <b>p= ,0003</b>			
	Kód	Počet platných	Součet pořadí	prům. pořadí
orná	1	36	681	18,917
TTP	2	7	265	37,857

Z výsledků vyplývá, že signifikantní rozdíl v hodnotách sledovaných vlastností mezi různými typy využití půd byl pozorován pouze v případě KVK, a to v obou sledovaných obdobích. Naopak rozdíly v BS byly vyhodnoceny jako statisticky neprůkazné. Z přiložených krabicových grafů (obrázky 13 a 14) jsou patrné nižší hodnoty nasycení sorpčního komplexu v TTP u dat z KPP, naopak v případě nových dat jsou hodnoty téměř shodné. V případě KVK jsou hodnoty v obou případech vyšší u TTP.





Obrázek 13 - Krabicové diagramy průměrů BS pro data KPP a nová data

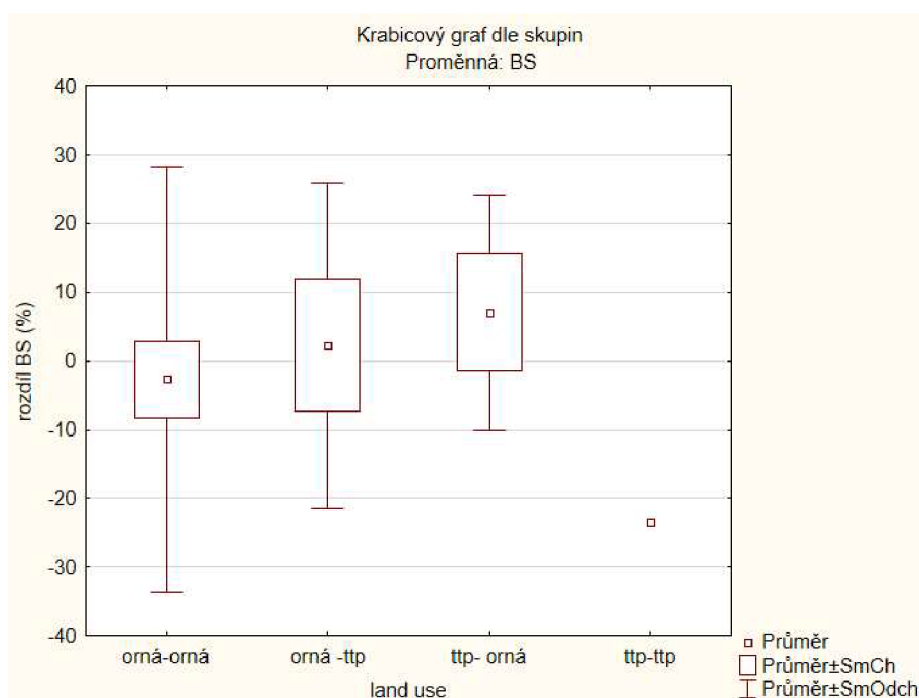


Obrázek 14 - Krabicové diagramy průměrů KVK pro data KPP a nová data

Dále byl sledován vliv změny land use na hodnoty vybraných vlastností. Tabulka 7 ukazuje výsledky Kruskal-Wallisovy ANOVY pro rozdíly hodnot BS pro jednotlivé typy změn land use. Z výsledků vyplývá, že rozdíly nejsou v žádném z případů statisticky významné. Krabicový graf (obrázek 15) ukazuje, že v lokalitách se stálou ornou půdou hodnoty BS mírně poklesly, naopak u lokality se změnou land use vykazují nárůst. Skupina TTP-TTP obsahuje pouze jednu hodnotu, kterou do výčtu zahrnujeme, ale není signifikantní, z důvodu malého počtu proměnných.

Tabulka 7 - Soubor výsledků Kruskal-Wallisovy ANOVY pro hodnoty BS v závislosti na změně land use

Závislá BS - rozdíl dat	Kruskal- Wallisova ANOVA založ. Na poř.; BS- rozdíl; Nezávislá proměnná land use Kruskal- Wallisův test H (3, N=44) =3,218169 <b>p= ,3592</b>			
	Kód	Počet platných	Součet pořadí	prům. pořadí
orná- orná	1	32	743	23,219
orná- TTP	2	6	130	21,667
TTP- orná	3	5	78	15,6
TTP- TTP	4	1	39	39

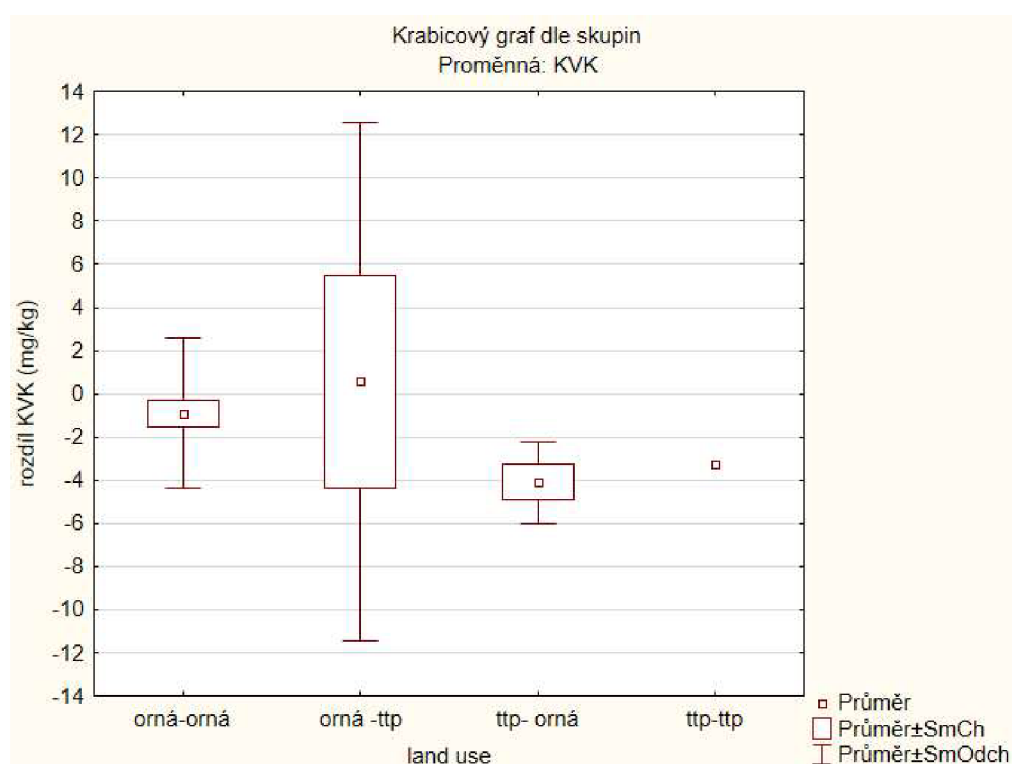


Obrázek 15 - Krabicový diagram rozdílů BS dle skupin

V případě změn v hodnotách KVK v závislosti na změně land use se opět neprokázal signifikantní rozdíl mezi jednotlivými skupinami (tabulka 8). V případě skupin, kde nedošlo ke změně ve využívání (orná- orná), byl zjištěn nevýznamný pokles hodnot (obrázek 16). Ten je výraznější v případě, kdy byl TTP přetvořen na ornou půdu. Naopak v případě změny orné půdy na TTP byl zaznamenán mírný růst hodnot.

Tabulka 8 - Soubor výsledků Kruskal-Wallisovy ANOVY pro všechny sady dat KVK

Závislá KVK - rozdíl dat	Kruskal- Wallisova ANOVA založ. Na poř.; KVK- rozdíl; Nezávislá proměnná land use Kruskal- Wallisův test H (3, N=43) =3,962614 $p= ,2655$			
	Kód	Počet platných	Součet pořadí	prům. pořadí
orná- orná	1	32	681	21,281
orná- TTP	2	6	117	19,5
TTP- orná	3	5	163	32,6
TTP- TTP	4	1	29	29



Obrázek 16 - Krabicový diagram rozdílů KVK dle skupin

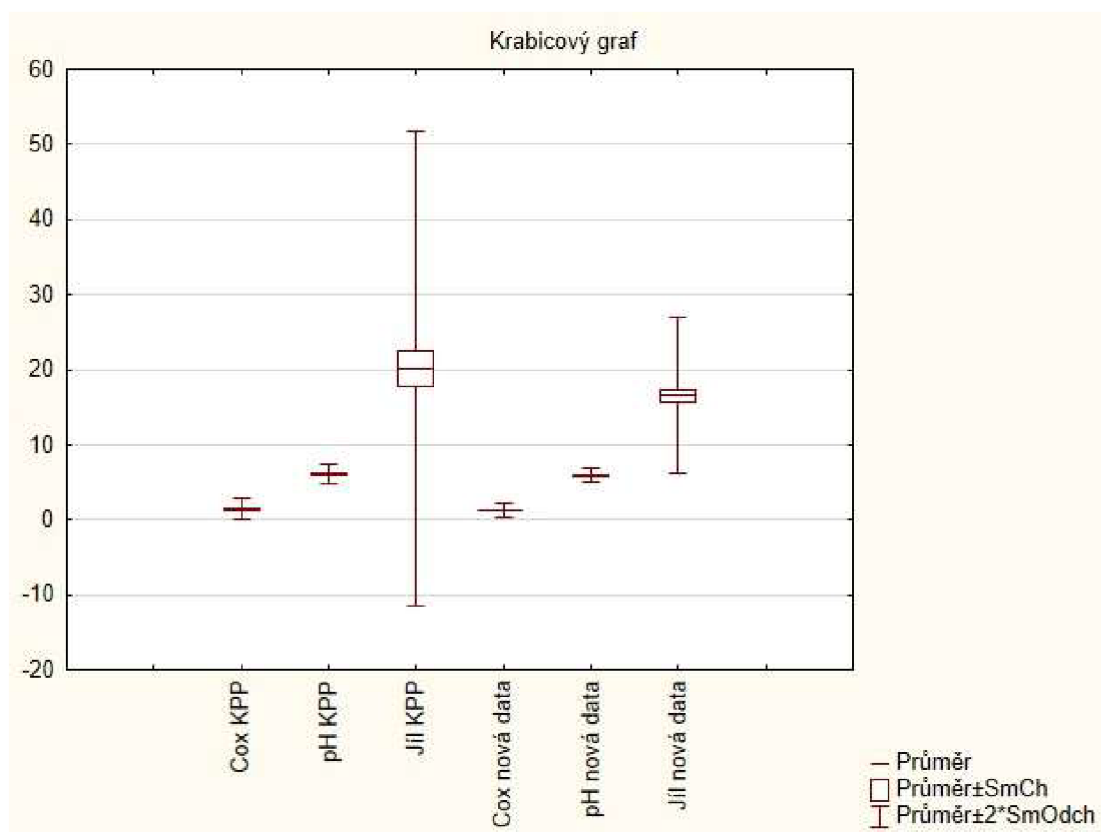
### 5.3 Vztah s ostatními vlastnostmi

V rámci výzkumu byly sledovány i jiné vlastnosti vzorků půdy než KVK a BS. Byl to obsah půdního organického uhlíku (C<sub>org</sub>), výměnné půdní reakce a obsahu jílu. V následující tabulce se nacházejí jejich popisné statistiky.

Tabulka 9 - Popisná statistika ostatních půdních vlastností: obsah organického uhlíku (Cox %), výměnné půdní reakce (pH) a obsah jílu (%).

	N platných	Průměr	Medián	Minimum	Maximum	Rozptyl	SM.odch.	var. koef.
Cox- KPP	44	1,48	1,26	0,55	3,63	0,46	0,68	0,46
pH- KPP	44	6,11	6,3	4,7	7,6	0,49	0,7	0,11
Jíl - KPP	44	20,77	14,6	1,4	56,2	262,92	16,21	0,78
Cox- nová data	44	1,28	1,14	0,74	3,33	0,18	0,43	0,33
pH- nová data	23	5,9	5,99	4,94	6,59	0,23	0,48	0,08
Jíl - nová data	44	16,61	15,65	8,9	35,4	26,3	5,13	0,31

Při porovnávání dat je patrné, že během nového průzkumu proběhlo skoro o polovinu méně měření v rámci pH (pouze 23). V průměru došlo ke snížení všech pozorovaných hodnot, ale minimální hodnoty jsou ve všech případech vyšší u nového měření. Maximální hodnoty byly větší u dat z dat KPP. Variační koeficient u všech hodnot kromě jílu z dat KPP nepřesahuje 50 %, data tedy mají menší variabilitu. Průměry jednotlivých vlastností jsou graficky znázorněny v krabicových diagramech (obrázek 17).



Obrázek 17- Krabicový diagram pro ostatních půdních vlastností z hlediska průměrů

Data nemají normální rozdělení – Shapiro Wilkovy testy mají p-hodnoty menší než 0,05. Pro korelační analýzu byl tedy použit neparametrický Spearmanův korelační koeficient. Tabulka 10 obsahuje výsledky z dob KPP a z nového průzkumu. V případě hodnot z KPP byla pozorována významná pozitivní korelace především mezi Cox a KVK. KVK dále signifikantně koreluje s obsahem jílu. Nasycení sorpčního komplexu vykazuje významný pozitivní vztah s pH, naopak negativně koreluje s obsahem jílu.

Tabulka 10 - Spearmanovy korelace pro data z doby KPP a nová data

Spearmanovy korelace Označ. korelace jsou významné na hl. p <,05000					
proměnná	Cox- KPP	pH- KPP	Jíl - KPP	KVK- KPP	BS- KPP
Cox- KPP	1,000	-0,241	0,434	0,851	-0,120
pH - KPP	-0,241	1,000	-0,548	-0,233	0,491
Jíl - KPP	0,434	-0,548	1,000	0,454	-0,393
KVK- KPP	0,851	-0,233	0,454	1,000	0,028
BS- KPP	-0,120	0,491	-0,393	0,028	1,000
Spearmanovy korelace Označ. korelace jsou významné na hl. p <,05000					
proměnná	Cox - nová data	Ph - nová data	Jíl - nová data	KVK - nová data	BS- nová data
Cox - nová data	1,000	-0,144	0,219	0,402	-0,228
pH- nová data	-0,144	1,000	0,146	-0,137	-0,032
Jíl - nová data	0,219	0,146	1,000	0,512	0,179
KVK - nová data	0,402	-0,137	0,512	1,000	0,292
BS - nová data	-0,228	-0,032	0,179	0,292	1,000

U nových hodnot byla opět zaznamenána signifikantní korelace mezi KVK a obsahem jílu a Cox. Další závislosti nebyly statisticky významné.

## 6 Diskuze

Analýzy byly zaměřeny na srovnání hodnot sorpčních vlastností ve dvou sledovaných obdobích. Kromě celkových změn vybraných vlastností byl hodnocen také vliv využití půd a jeho změn, konkrétně přechodů mezi trvalými travními porosty a ornou půdou. Sledovány byly také další fyzikálně chemické vlastnosti s potenciálním vlivem na hodnoty sorpčních charakteristik. Analýzy byly provedeny pro svrchní horizont, jehož mocnost se v průběhu období výrazně změnila (Svobodová, 2022). Orniční horizont se za pozorovanou dobu prohloubil, a to především z důvodu změny agrotechniky a způsobu obdělávání. Přepočtení dat na hloubku virtuálního horizontu je nutno uvažovat jako jeden z možných faktorů ovlivňujících průkaznost dat. Dalším faktorem je například neúplnost některých dat, a to jak z KPP, tak z nového průzkumu. Posledním problémem je lokalizace výběrových sond, která v rámci KPP probíhala pouze zákresem do map bez přesného zaměření. Následná digitalizace a dohledání sond tedy mohou být zatíženy určitou chybou (Žížala et al., 2020).

Pro obecný přehled ve vývoji trendů sorpčních vlastností byla nejprve porovnávána celková data z obou období bez ohledu na způsob využití. Zatímco u KVK došlo k poklesu (o cca 1 mg/kg), BS mírně stoupla (o cca 1,5 %), žádná z těchto změn ovšem není statisticky průkazná. U KVK je dále nutno uvažovat velkou variabilitu hodnot. Ke změně v KVK mohlo dojít z důvodu zjištěného snížení obsahu jílů a půdního organického uhlíku v půdě. S oběma těmito parametry KVK statisticky významně korelovala. Snížení podílu organické hmoty může být způsobeno řadou faktorů, které mohou způsobit rychlejší mineralizaci organického uhlíku, například intenzifikací zemědělství či odvodněním půd, způsobující rychlejší mineralizaci organického uhlíku (podobně např. Bucur a Moca, 2011 či Ovchinnikova, 2018). Dalším faktorem může být i mírný pokles pH, protože s nižším pH se oslabují vazby mezi půdním organickým uhlíkem a kationtovou výměnnou kapacitou v důsledku nižšího negativního náboje organických látek (Solly et al., 2020). Trend v okyselování půd ukazují i výsledky dlouhodobého monitoringu zemědělských půd ČR (Poláková et al., 2017, MZe, 2018). Důvody tohoto vývoje mohou být jednak kyselé depozice (Šimek, 2019) či intenzivní vstupy průmyslových hnojiv. Zatímco podíl fosforečných hnojiv po roce 1989 silně poklesl, využití dusíkatých hnojiv stoupá (Štípková et al., 2021). Významný vliv těchto hnojiv na pH půdy a další chemické vlastnosti včetně KVK byl dokumentován na příkladu dlouhodobých polních pokusů ve Francii (Pernes-Debuysse a Tessier, 2002) či v USA (Guzman et al., 2006). Naopak Iturri a Buschiazzi (2016) zjistili při pokusech s hnojením dusíkem na sprašových půdách v Argentině, že přes pokles pH nedošlo ke změně KVK a nasycení, což připisují vysokému obsahu organické hmoty a jílu ve sledovaných plochách.

V rámci hypotézy, že land use ovlivňuje sorpční vlastnosti, byly nejprve porovnávány základní statistické parametry pro ornou půdu a trvalý travní porost v obou obdobích. Z výsledků vyplývá, že TTP má statisticky významně vyšší KVK, což může být způsobeno obecně vyšším obsahem organické hmoty v takto využívaných půdách, a to především díky většímu množství kořenové i nadzemní biomasy (Weil & Brady, 2017). To potvrzují i výsledky Svobodové (2022), která zjistila v zájmovém území signifikantně vyšší obsah organického uhlíku u půd pod TTP. U BS naopak nejsou tyto rozdíly významné, naopak v případě KPP byly pozorovány vyšší hodnoty BS u orané půdy, což je možné připisovat vyšším dávkám různých živin, včetně bazických kationtů, například v důsledku vápnění (Weil & Brady, 2017).

Dále byly sledovány rozdíly ve sledovaných vlastnostech v důsledku změny land use. Na místech, kde byla zachována orná půda, byl znatelný mírný pokles v průměru KVK, v případě změny z TTP na ornou půdu bylo snížení KVK výraznější. Oproti tomu u půd se změnou orné půdy na TTP došlo ke zvýšení hodnot KVK. U BS jsou změny celkové méně výrazné. K mírnému snížení došlo u orné půdy, naopak v obou případech změny land use bylo pozorované zvýšení. Podobné výsledky pozoroval během pokusu Lal et al. (1990) na špatně odvodněné jílovité půdě v severozápadním Ohiu, při kterém došli k výsledkům, že v případě dlouhodobé orby klesá KVK i BS v ornici. Zajícová a Chuman (2019) sledovali vývoj řady chemických parametrů na orané, původně lesní či luční půdě v rumunském Banátu. U orných půd zjistili výrazný pokles KVK i báží, který dávají do souvislosti s poklesem organické hmoty a s celkově nízkým vstupem živin do půdy. Rampazzo et al. (1999) sledovali rozdíly v intenzivně oraných půdách na maďarsko-rakouských hranicích a srovnávali je s blízkými půdami pod původními porosty. Zjistili rovněž značný pokles v KVK, BS, obsahu organické hmoty i pH u dlouhodobě zemědělsky využívaných půd ve srovnání s neobdělávanými půdami.



## 7 Závěr

V rámci této práce byly pozorovány vzorky zemědělských půd z okolí města České Budějovice z let 1967 a 2019, za účelem zjištění změny sorpčních vlastností a jejich ovlivnění využíváním půdy. V zájmovém území došlo v průběhu sledovaného období k mnoha změnám. Jedním z pozorovaných faktorů je změna ve využití půdy, kde z 44 sond se čtvrtina změnila z trvale travního porostu na ornou půdu nebo naopak.

První hypotézou bylo, že se hodnoty sorpčních vlastností budou významně lišit. Z výsledků ovšem vyplývá, že změna hodnot u obou sledovaných vlastností není statisticky významná. Celkové hodnoty kationtové výměnné kapacity měly mírně klesající tendenci. U BS ve sledovaném období došlo k minimální změně.

Při detailnější analýze dat, kde byl brán ohled na land use, se prokázalo, že nižší hodnoty u KVK vykazuje orná půda, naopak při změně na trvalé travní porosty došlo ke zvýšení. Tyto změny lze připisovat několika faktorům, včetně odvodnění půd, intenzivního managementu či hnojení. Tím se potvrdila část druhé hypotézy, že land use má vliv na KVK. U nasycení sorpčního komplexu naopak signifikantní změna, a tedy výrazný vliv využití půd, nebyla prokázána.

Změna hodnot nebyla pozorována pouze u sorpčních vlastností, ale i u dalších půdních vlastností jako je pH, obsah půdního uhlíku a jílu. Bylo zde potvrzeno snížení u všech hodnot, které však nebylo také příliš výrazné. Vliv těchto změn je možné vztahovat i na změnu KVK, kdy především organická hmota a jíl tvoří hlavní složky sorpčního komplexu. Snížení pH pak oslabuje sorpční kapacitu organické hmoty a tím vede i ke snížení KVK.

Za posledních několik let bylo přijato v České republice několik opatření podporujících ochranu půdy. Podle strategie Evropské unie pro půdu do roku 2030 je v plánu vytvořit z udržitelného hospodaření s půdou novou a běžnou praxi. Znalosti o současném stavu půdních vlastností, které výrazně ovlivňují kvalitu a produktivitu půd a jejich dlouhodobém vývoji, jsou tedy zásadní pro navržení vhodného obhospodařování půd. Studie ukazuje možnosti využití podrobných archivních dat a srovnává je s dalšími obdobnými výzkumy, prováděnými v odlišných prostředích. Pro ucelenou informaci o vývoji našich zemědělských půd bude třeba provést další pilotní studie v různých půdních a geografických regionech s odlišným typem využívání půd.

## 8 Literatura

Bhadha, J. H., Capasso, J. M., Khatiwada, R., Swanson, S., & LaBorde, C. 2017. Raising Soil Organic Matter Content to Improve Water Holding Capacity

Bucur, D., & Moca, V. 2012. The influence of improvement procedures and a tile drainage system on soil physical properties in a north-east romanian experimental site. *Irrigation and Drainage*, 61(3), 386-397.

Czudek, Tadeáš 1972. Geomorfologické členění ČSR. Brno: Geografický ústav ČSAV

Český statistický úřad. 2020. Charakteristika okresu České Budějovice. [online]. Praha: Český statistický úřad, [citováno 18. dubna 2023]. Dostupné z: [https://www.czso.cz/csu/xc/charakteristika\\_okresu\\_cb](https://www.czso.cz/csu/xc/charakteristika_okresu_cb).

Follett, R. F. 2001. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. *Soil and Tillage Research*, 61(1-2), 77-92.

Goladi, J. T., & Agbenin, J. O. 1997. The cation exchange properties and microbial carbon, nitrogen and phosphorus in savanna Alfisol under continuous cultivation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 75(4), 412-418.

Guzman, J. G., Godsey, C. B., Pierzynski, G. M., Whitney, D. A., & Lamond, R. E. 2006. Effects of tillage and nitrogen management on soil chemical and physical properties after 23 years of continuous sorghum. *Soil and Tillage Research*, 91(1-2), 199-206.

Hazelton, P., & Murphy, B. 2016. Interpreting soil test results: What do all the numbers mean? Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation publishing.

Heckrath, G., Djurhuus, J., Quine, T. A., Van Oost, K., Govers, G., & Zhang, Y. 2005. Tillage erosion and its effect on soil properties and crop yield in Denmark. *Journal of environmental quality*, 34(1), 312-324.

Hillel, D. 2007. Soil in the environment: crucible of terrestrial life. Elsevier.

Iturri, L. A., & Buschiazzo, D. E. 2016. Light acidification in N-fertilized loess soils along a climosequence affected chemical and mineralogical properties in the short-term. *Catena*, 139, 92-98.

Lal, R., Logan, T. J., & Fausey, N. R. (1990). Long-term tillage effects on a Mollic Ochraqualf in North-West Ohio. III. Soil nutrient profile. *Soil and Tillage Research*, 15(4), 371-382

McCauley, A., Jones, C., & Jacobsen, J. 2009. Soil pH and organic matter. Nutrient management module, 8(2), 1-12.

Moca, V., & Bucur, D. 2012. Water balance in the tile drainage system in the soil with excessive moisture from Baia depression-Suceava plateau. *Lucrări Științifice, Universitatea de Științe Agricole Și Medicină Veterinară "Ion Ionescu de la Brad" Iași, Seria Agronomie*, 55(2), 207-214.

- Nath, T. N. 2014. Soil texture and total organic matter content and its influences on soil water holding capacity of some selected tea growing soils in Sivasagar district of Assam, *International Journal of Chemical Sciences* 12(4), 1419-1429.
- Němeček, J. 1967. Průzkum zemědělských půd ČSSR: 1.díl. Metodika terénního průzkumu, sestavování půdních map a geneticko-agronomické klasifikace půd. Ministerstvo zemědělství a výživy.
- Ovchinnikova, M. F. 2018. Changes in the content, composition, and properties of humic substances in particle-size fractions of soddy-podzolic soils under the impact of long-term drainage. *Eurasian soil science*, 51, 647-657.
- Papiernik, S. K., Lindstrom, M. J., Schumacher, T. E., Schumacher, J. A., Malo, D. D., & Lobb, D. A. 2007. Characterization of soil profiles in a landscape affected by long-term tillage. *Soil and Tillage Research*, 93(2), 335-345.
- Penížek V. 2019. Půdní krajiny. Česká zemědělská univerzita v Praze. Praha.
- Pernes-Debuyser, A., & Tessier, D. 2002. Influence de matières fertilisantes sur les propriétés des sols. In *Cas des* (Vol. 42, pp. 177-186).
- Pokorný, E., Šarapatka, B., & Hejátková, K. 2007. Hodnocení kvality půdy v ekologicky hospodařícím podniku: metodická pomůcka. Zemědělská a ekologická regionální agentura.
- Poláková, Š., Prášková, L., Němec, P., & Florián, M. (2017). Bazální monitoring zemědělských půd obsah přístupných mikroelementů B, Cu, Fe, Mn, Mo, Zn 1995 - 2013. Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský v Brně Sekce zemědělských vstupů.
- Rampazzo, N., Rajkai, K., Blum, W. E. H., Varallyay, G., & Ubleis, T. 1999. Effects of long-term agricultural land use on soil properties along the Austrian-Hungarian border. Part I. Soil mineralogical, physical and micromorphological parameters. *International agrophysics*, 13(1).
- Saha, S., Mina, B. L., Gopinath, K. A., Kundu, S., & Gupta, H. S. 2008. Organic amendments affect biochemical properties of a subtemperate soil of the Indian Himalayas. *Nutrient cycling in Agroecosystems*, 80, 233-242.
- Sánka, M., & Materna, J. 2004. Indikátory kvality zemědělských a lesních půd ČR. Ministerstvo životního prostředí.
- Sánka, M., Vácha, R., Poláková, Š., & Fiala, P. 2018. Kritéria pro hodnocení produkčních a ekologických vlastností půd. Ministerstvo životního prostředí ISBN 978-80-7212-627-9.
- Sirový, V., & Facek, Z. 1967. Průzkum zemědělských půd ČSSR 3.díl: Metodika laboratorních rozborů a principy jejich hodnocení. Ministerstvo zemědělství a výživy.
- Situační a výhledová zpráva 2018. [Praha]: Ministerstvo zemědělství České republiky (2018). ISBN 978-80-7434-476-3. ISSN 1211-7692
- Smetanova, A., Verstraeten, G., Notebaert, B., Dotterweich, M., & Létal, A. 2017. Landform transformation and long-term sediment budget for a Chernozem-dominated lowland agricultural catchment. *Catena*, 157, 24-34.

Solly, E. F., Weber, V., Zimmermann, S., Walthert, L., Hagedorn, F., & Schmidt, M. W. 2020. A critical evaluation of the relationship between the effective cation exchange capacity and soil organic carbon content in Swiss forest soils. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3, 98.

Svobodová, L. 2022. Změna zásob humusu v půdách po odvodnění. Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Vedoucí práce doc. RNDr. Tereza Zádorová, Ph.D.

ŠIMEK, M. 2003. Základy nauky o půdě. 1., Neživé složky půdy. České Budějovice: Jihočeská univerzita, Biologická fakulta. ISBN 80-7040-629-1.

ŠIMEK, M., 2019. Živá půda. Praha: Academia. ISBN 978-80-200-2976-8.

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 and Conservation*, 26, e01498.

Thomas, G. A., Dalal, R. C., & Standley, J. 2007. No-till effects on organic matter, pH, cation exchange capacity and nutrient distribution in a Luvisol in the semi-arid subtropics. *Soil and Tillage Research*, 94(2), 295-304.

Vašák, F., et al. 2014. Racionální použití hnojiv. Česká zemědělská univerzita v Praze.

Védère, C., Lebrun, M., Honvault, N., Aubertin, M. L., Girardin, C., Garnier, P., Dignac, M. F., Houben, D. & Rumpel, C. 2022. How does soil water status influence the fate of soil organic matter? A review of processes across scales. *Earth-Science Reviews*, 104214.

Vlček, V., & Pohanka, M. 2020. Glomalinalin—an interesting protein part of the soil organic matter. *Soil and Water Research*, 15(2), 67-74.

Weil, R. R. & Brady N. C. 2017. *The Nature and Properties of Soil*. England: Pearson Education Limited. ISBN 978-1-292-16223-2.

Zádorová T., Žížala D., Penížek V., Čejková Š. 2014. Relating extent of colluvial soils to topographic derivatives and soil variables in a Luvisol sub-catchment, Central Bohemia, Czech Republic. *Soil & Water Research*; 9(2):47-57. doi: 10.17221/57/2013-SWR.

Zádorová, T., Žížala D., Penížek V. a Juřicová A. 2018. Harmonizace databáze KPP s klasifikacemi TKSP a WRB 2014: Metodika. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy. ISBN 978-80-87361-94-8.

Zajícová K., Chuman T. 2019. Effect of land use on soil chemical properties after 190 years of forest to agricultural land conversion. *Soil & Water Research*, 14: 121–131.

Žížala D., Minařík R., Vašát R., Skála J., Juřicová A., Zádorová T., Penížek V. a Beitlerová H. 2020. Metodika tvorby aktuálních půdních map pedometrickými metodami. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i. ISBN 978-80-88323-34-1.

Žížala, D., Penížek, V., Kapička, J., Novotný, I., Vopravil, J., Khel, T., Zádorová, T., & Zelenková, R. 2019. Redakčně upravená periodická zpráva projektu QK1820389. Ministerstvo zemědělství České republiky.

Žížala, D., Penížek, V., Minařík, R., Juřicová, A., Kapička, J., Novotný, I., Vopravil, J., Khel, T., Zelenková, K., Zádorová, T., & Vašát, R. 2020. Redakčně upravená závěrečná zpráva Projektu QK1820389. Ministerstvo zemědělství České republiky.