

Je dlhodobé minerálne hnojenie vhodný nástroj na zlepšenie štruktúrneho stavu piesočnatých pôd?

Is long-term mineral fertilization a suitable tool for improving the structural state of sandy soils?

**Martin Juriga, Vladimír Šimanský,
Jerzy Jonczak**

In this paper, the impact of the long-term application of mineral fertilizers and manure on the soil structure of a sandy soil is quantified, and the relationships between the soil organic matter, Al and Fe oxides and soil structure of sandy soil with a dependence on the length of fertilizers application are determined. Soil samples were taken from all three long-term field experiments in Poland (sandy Arenic Planosol), which were located at Skierniewice experimental station including a 94-year-old experiment with mineral fertilization, a 41-year-old experiment with mineral fertilization and a 25-year-old experiment with mineral fertilization + farmyard manure. The results showed that in 94-year-old experiment the state of soil structure was the most favourable compared to other experiments (25- and 41-year-old). In 94-year-old experiment, NPK rather than CaNPK fertilization had a more pronounced effects on soil structure parameters in comparison to unfertilized control. In NPK treatment the higher content of water-stable macro-aggregates (WSA_{ma}) in size classes of: >5, 5–3, 3–2 and 2–1 mm (by 89, 76, 71 and 71%), lower content of WSA_{ma} 0.5–0.25 mm (by 61%) and higher value of weight mean diameter of water-stable aggregates (MWD_m) (by 48%) in comparison to unfertilized control were observed. Especially in 94-year experiment the content of total organic carbon (C_{org}), labile carbon (C_L), humic substances carbon (C_{HL}), fulvic acids carbon (C_{FA}) as well as iron and aluminium amorphous oxides improved soil structure parameters. All in all, the fertilization had different effects on soil structure in the sandy soil with relation to long-term of individual experiments and the highest correlations: SOM, Al, Fe and its forms vs. soil structure were in 94-year >25-year >41-year-old experiment.

water-stable aggregates, soil organic matter, mineral fertilization

Pôdna štruktúra je najvýznamnejšou fyzikálnou vlastnosťou pôdy, ktorá kontroluje celý rad pôdnych procesov, ako napr. pohyb a zadržiavanie vody, živín, prevzdušnenie pôdy, vznik erózie, rozvoj koreňového systému, či aktivitu mikroorganizmov. Základnou jednotkou pôdnej štruktúry je agregát. Tvorba a stabilita pôdnych agregátov je všeobecne závislá od prítomnosti cementačných činidiel, spájajúcich pôdne častice do mikro-agregátov a mikro-agregáty do makro-agregátov, z ktorých kľúčovým je pôdna organická hmota (POH) (4, 20, 23). Obsah POH môže

v značnej miere meniť vlastnosti povrchových častíc pôdy ako aj ich povrchových nábojov, plochu merného povrchu a hustotu povrchového náboja, čo môže výrazne ovplyvniť interakcie medzi pôdnymi časticami (4). Stav pôdnej štruktúry môže byť okrem iného ovplyvnený aj prítomnosťou kovových iónov. Katióny Fe^{3+} a Al^{3+} stimulujú zrážanie zlúčenín, ktoré pútajú elementárne pôdne častice a v pôdach s nízkym pH a obsahom POH vytvárajú mostíky prostredníctvom ktorých tiež spájajú pôdne častice navzájom, čím sa môžu podieľať na tvorbe pôdnych agregátov (4, 20, 21). Okrem toho môžu k vyššej agregácii pôdy výrazne prispieť aj oxidy Fe a Al. Vďaka veľkej ploche merného povrchu sú schopné absorbovať organické látky, a to prostredníctvom elektrostatických väzieb (23). Okrem účasti jednotlivých cementačných činidiel má v agregáčnom procese významné postavenie zrnitostné zloženie pôdy. Častice ílu sú vďaka veľkej ploche merného povrchu a vysokému počtu funkčných skupín vysoko reaktívne a ich prítomnosť prispieva k priaznivejšiemu stavu pôdnej štruktúry. Naopak so zvyšujúcim sa podielom pieskových zŕn býva pozorovaný menej priaznivý štruktúrny stav pôdy (14). Piesočnaté pôdy sa vyznačujú vysokým podielom piesku (viac ako 90 %) a nízkym podielom ílu (menej ako 10 %). V rámci celosvetovej výmery pôdy zaberajú približne 900 miliónov ha. Všeobecne sú charakteristické nízkou úrodnosťou a horšími vlastnosťami. Vyznačujú sa slabou pôdnou štruktúrou s vysokým sklonom k erózii a tvorbe pôdneho prúsu. Majú veľmi slabé zmršťovacie a rozpínacie vlastnosti, kvôli nízkemu obsahu ílovitej frakcie alebo obsahu ílu s nízkou aktivitou. Obsah POH je v týchto pôdach nízky a zvyčajne predstavuje menej ako 1 % (18). Pravidelné pridávanie väčšieho množstva organických hnojív v kombinácii s adekvátnymi dávkami minerálnych hnojív je kľúčový postup pri zlepšovaní kvality a úrodnosti týchto pôd. Pridané organické hnojivá zlepšujú agregáciu piesočnatých pôd priamo väzbou s ílovitými časticami a nepriamo zvyšovaním mikrobiálnej aktivity a tým i množstva spojív pre pôdne častice, ako sú slizy a hýfy húb. Minerálne hnojenie môže tiež podporovať aktivitu pôdnych mikroorganizmov, či produkciu koreňovej biomasy rastlín, a tak zvyšovať zásobu POH a agregáciu. Hnojenie organickými i minerálnymi hnojivami je teda významný atribút pri tvorbe a stabilite pôdnych agregátov piesočnatých pôd (6).

Cieľom tejto práce bolo:

1. vyhodnotiť účinky dlhodobého (25-, 41- a 94-ročné) minerálneho hnojenia na parametre pôdnej štruktúry,
2. posúdiť vzájomné vzťahy medzi parametrami pôdnej organickej hmoty, humusu, či jednotlivými formami železa, hliníka a parametrami pôdnej štruktúry v jednotlivých experimentoch.

Na základe vyššie uvedeného kontextu sme predpokladali, že:

1. štruktúrny stav piesočnatej pôdy sa v dôsledku dlhodobého minerálneho hnojenia zlepší,
2. účinok hnojenia sa bude zvyšovať spolu s dĺžkou experimentu,
3. čím bude dĺžka experimentu väčšia, tým viac štatisticky významných vzťahov medzi parametrami pôdnej organickej hmoty, humusu, jednotlivými formami železa, hliníka a parametrami pôdnej štruktúry bude pozorovaných.

Materiál a metódy

Štúdia bola vykonaná na experimentálnej stanici Miedniewice (z. š. 51° 85' 05", z. d. 20° 11' 22"), ktorá leží asi 3 km východne od mesta Skierniewice v Poľsku. Na tejto ploche prevládajú plytké pôdy s kyslou pôdnou reakciou a nízkym obsahom pôdneho organického uhlíka. Hlavným pôdnym typom je Pseudoglej (Arenic Planosol). Plocha má rovinný charakter a nachádza sa v nadmorskej výške približne 150 m n. m. Toto územie patrí do mierneho klimatického pásma, s premenlivým vlhkým, prímorským podnebí. Priemerná ročná teplota v tejto oblasti je 8,0 °C, priemerný ročný úhrn atmosférických zrážok 528 mm a vlhkosť vzduchu sa pohybuje okolo 79 % (5).

Experimentálna plocha má veľkosť 5 ha a je rozdelená na niekoľko pokusných plôch, na ktorých prebiehajú experimenty s rôznymi spôsobmi a stupňami hnojenia v 6 rozdielnych oševných postupoch. Všetky pokusy sú založené metódou náhodného rozloženia. Každé políčko v rámci každého experimentu má veľkosť 4 × 9 m a každý jeden pokusný variant v rámci každého experimentu je založený v 3-násobnom opakovaní. Pre účely tejto štúdie boli pôdne vzorky odobraté z troch dlhodobých experimentov s minerálnym hnojením:

- 25-ročný experiment s hnojením maštaľným hnojom (MH) v kombinácii s minerálnym hnojením, založený v roku 1992. Varianty: MH, MH + NPK a MH + CaNPK;
- 41-ročný experiment s rôznymi úrovňami minerálneho hnojenia bol založený v roku 1975. Varianty: kontrola, NPK a CaNPK;
- 94-ročný experiment s rôznymi úrovňami minerálneho hnojenia, založený v roku 1923. Varianty: kontrola, NPK a CaNPK.

Vo všetkých pokusoch bol dusík aplikovaný ako síran amónny (30 kg.ha⁻¹ N od roku 1923 do 1975 a 90 kg.ha⁻¹ N od roku 1976), fosfor ako superfosfát (30 kg.ha⁻¹ P₂O₅ od 1923 do 1975 a 26 kg.ha⁻¹ P₂O₅ od roku 1976) a draslík ako chlorid draselný (30 kg.ha⁻¹ K₂O od roku 1923 do 1975 a 91 kg.ha⁻¹ K₂O od roku 1976). Vápnik bol aplikovaný raz za 4 roky v dávke 1,6 t.ha⁻¹ CaO. V 25-ročnom experimente bol maštaľný hnoj aplikovaný v 4-ročnom cykle v dávke 25 t.ha⁻¹.

Odber pôdných vzoriek bol realizovaný rýľom, z hĺbky 0 – 0,3 m. Po odbere boli pôdne vzorky zhomogenizované a následne prenesené do laboratória, kde boli vysušené pri laboratórnej teplote.

V pôdných vzorkách boli stanovené nasledujúce parametre:

- obsah jednotlivých veľkostných tried vodoodolných makro-agregátov – WSA (frakcie: >5 mm, 5 – 3 mm, 3 – 2 mm, 2 – 1 mm, 1 – 0,5 mm, 0,5 – 0,25 mm a <0,25 mm) Bakšajevovou metódou (12),
- stredný vážený priemer agregátov získaných preosievaním za sucha – MWDs,
- stredný vážený priemer agregátov získaných preosievaním za mokra – MWDm,
- koeficient zraniteľnosti – Kv (26),
- index stability vodoodolných makro-agregátov – Sw (11),
- obsah organického uhlíka v pôde (C_{org}) – oxidometricky (24),
- obsah labilného uhlíka v pôde (C_L) (16),
- skupinové zloženie humusových látok (7),
- farebný kvocient humusových látok (Q_{HL}) a farebný kvocient humínových kyselín (Q_{HK}),

- obsahy celkového železa (Fe_t) a celkového hliníka (Al_t) boli stanovené po rozklade vzoriek pôdy so zmesou 40 % HF a 60 % HClO₄ pomocou atómovej emisnej spektrometrie s mikrovlnne indukovanou plazmou /MP-AES/(Agilent 4100 MP-AES),

- obsahy amorfných oxidov železa (Fe_o) a hliníka (Al_o) boli stanovené po extrakcii metódou MP-AES (27).

Jednotlivé parametre pôdnej štruktúry, pôdnej organickej hmoty a humusu ako i jednotlivé formy železa a hliníka boli vyhodnotené štatistickou analýzou prostredníctvom programu Statgraphics Centurion XV. I (Statpoint Technologies, Inc., USA) s použitím jednofaktorovej analýzy rozptylu (ANOVA). Na porovnanie účinkov jednotlivých spôsobov hnojenia bol použitý LSD test s hladinou významnosti $P \leq 0,05$. Závislosť medzi parametrami pôdnej organickej hmoty, humusu, celkovými obsahmi železa, hliníka, ich amorfných oxidov a parametrami pôdnej štruktúry bola vyhodnotená pomocou jednoduchej korelačnej matice.

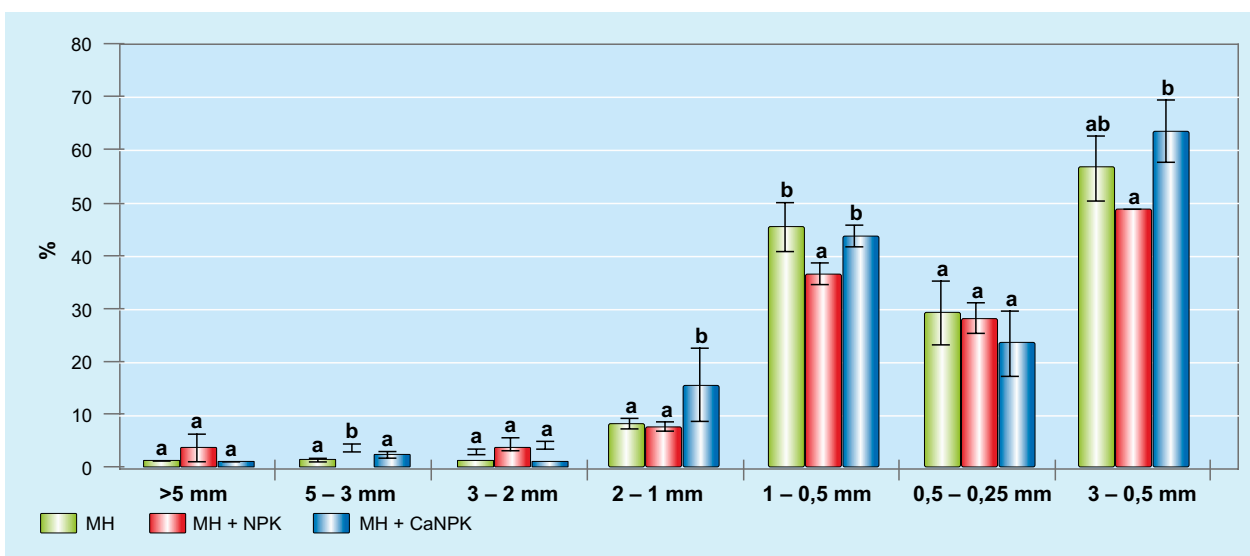
Výsledky a diskusia

Vyhodnotenie parametrov pôdnej štruktúry

Racionálna stratégia hnojenia je považovaná za kľúčové opatrenie ako zlepšiť štruktúrny stav piesočnatých pôd. Z literárnych zdrojov vyplýva, že jedným z najčastejšie používaných organických hnojív na piesočnatých pôdach je maštaľný hnoj. Z minerálnych hnojív sú z dôvodu možnosti kombinovať obsah živín dodávaných do pôdy používané najmä NPK hnojivá. Priaznivé účinky dlhodobého hnojenia maštaľným hnojom ako i NPK hnojivami na pôdnu štruktúru v piesočnatých pôdach boli preukázané v mnohých štúdiách (3, 10). Bembi et al. (3), ale i Hati et al. (10) v rámci 20- a 31-ročných experimentov zistili, že z hľadiska zvyšovania tvorby a stability pôdnej štruktúry je efektívnejšia kombinovaná aplikácia maštaľného hnoja s NPK hnojivami ako ich samostatná aplikácia. Ich zistenia však nekorešponujú s našimi výsledkami. 25-ročné hnojenie maštaľným hnojom v kombinácii s NPK ani s CaNPK významne neovplyvnilo celkový obsah vodoodolných makro-agregátov (WSA_{ma}) ani obsah vodoodolných mikro-agregátov (WSA_{mi}) v porovnaní s hnojením samotným maštaľným hnojom (tabuľka 1). Vo variante MH + NPK bol síce zaznamenaný štatisticky významne vyšší obsah WSA_{ma} vo veľkostnej triede 5 – 3 mm (o 60 %) ale zároveň nižší obsah WSA_{ma} 1 – 0,5 mm (o 19 %) ako vo variante MH (obrázok 1A). Vo variante MH + CaNPK bol na jednej strane zistený významný nárast obsahu WSA_{ma} 2 – 1 mm (o 48 %) no na druhej strane pokles hodnoty indexu stability vodoodolných makro-agregátov (Sw) o 23 % v porovnaní s variantom MH (tabuľka 1). Štatisticky významné rozdiely boli v zastúpení jednotlivých veľkostných tried WSA_{ma} pozorované aj medzi variantmi s minerálnym hnojením. Variant MH + CaNPK vykazoval významne nižší obsah WSA_{ma} 5 – 3 mm (-34 %) a vyšší obsah 1 – 0,5 mm (+16 %) ako variant MH + NPK (obrázok 1A).

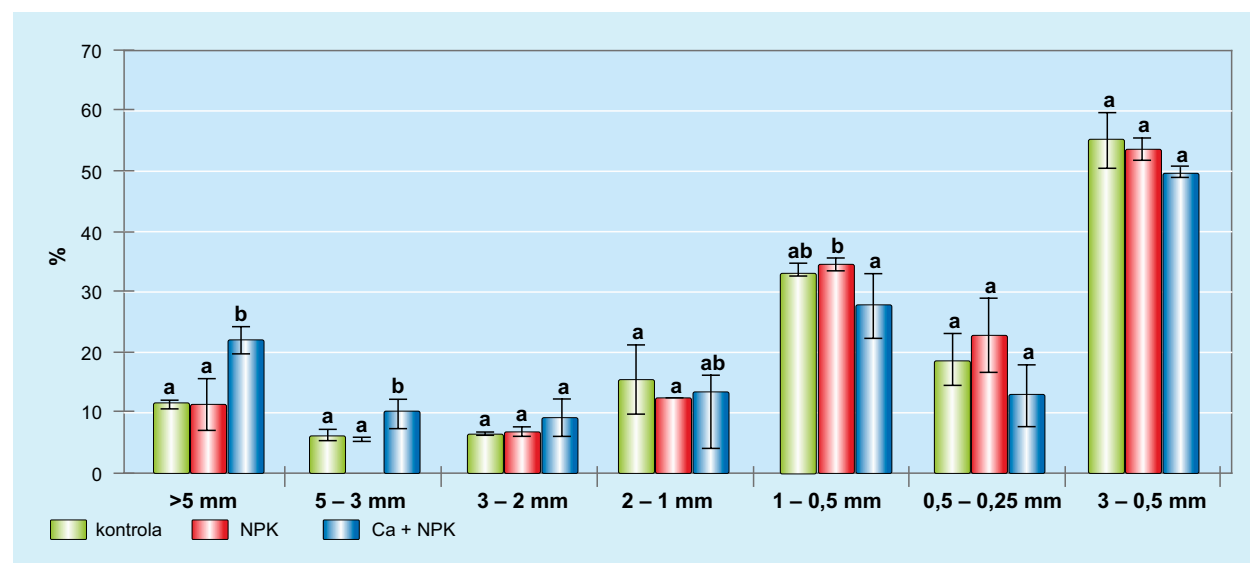
V prípade 41-ročného experimentu so samotným minerálnym hnojením pôsobilo hnojenie NPK a CaNPK odlišne na hodnotené parametre pôdnej štruktúry (Tabuľka 1; obrázok 1B). Oba spôsoby hnojenia síce oproti kontrole zvýšili celkový obsah WSA_{ma} a znížili obsah WSA_{mi}, no tieto zmeny neboli štatisticky významné. Hnojenie CaNPK však významne zvýšilo obsah WSA_{ma} >5 a 5 – 3 mm, a to o 48 a 39 % v porovnaní s kontrolou. Hnojenie NPK sa oproti kontrole prejavilo pozitívne na poklese koeficientu zraniteľnosti pôdnej štruktúry (Kv) o 43 %, no zároveň

Obrázok 1A: Percentuálny podiel jednotlivých veľkostných tried vodoodolných agregátov v 25-ročnom experimente
Figure 1A: The percentage of individual size classes of water-stable aggregates in 25-years-old experiment



Rozdielne písmená (a, b, c) medzi variantmi znázorňujú štatisticky významný rozdiel podľa LSD testu s hladinou významnosti 95%
 Different letters (a, b, c) between treatments represent statistically significant differences according to LSD test at $P \leq 95\%$

Obrázok 1B: Percentuálny podiel jednotlivých veľkostných tried vodoodolných agregátov v 41-ročnom experimente
Figure 1B: The percentage of individual size classes of water-stable aggregates in 41-years-old experiment



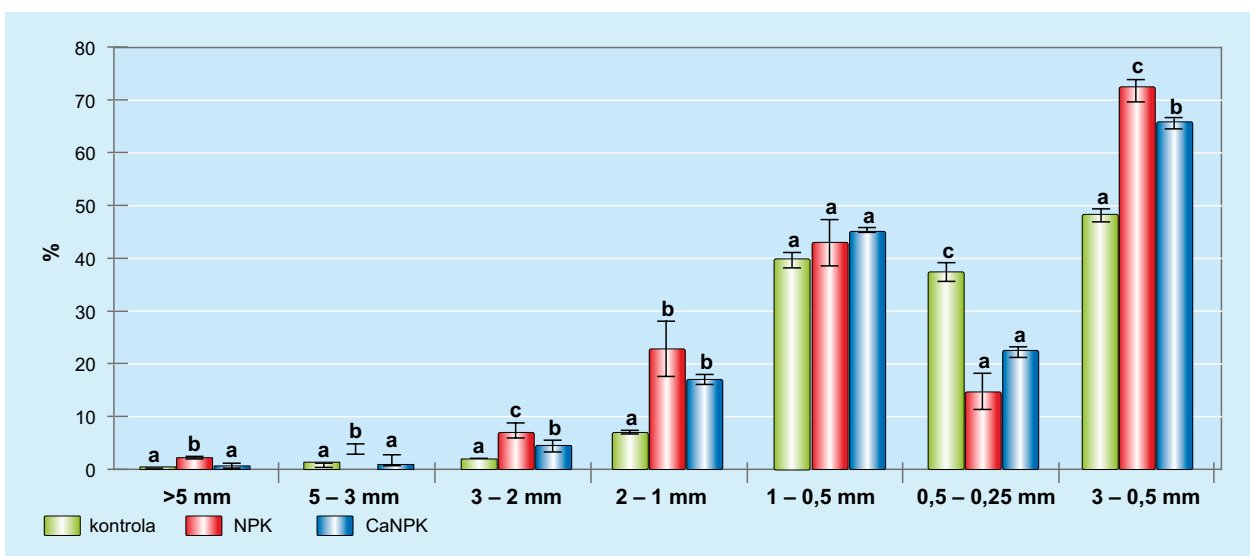
Rozdielne písmená (a, b, c) medzi variantmi znázorňujú štatisticky významný rozdiel podľa LSD testu s hladinou významnosti 95%
 Different letters (a, b, c) between treatments represent statistically significant differences according to LSD test at $P \leq 95\%$

indukovalo i pokles hodnoty Sw (-15 %). Navyše boli vo variante CaNPK zistené výrazne vyššie hodnoty stredného váženého priemeru agregátov získaných preosievaním za sucha (MWDs) a stredného váženého priemeru agregátov získaných preosievaním za mokra (MWDm) (2,07 a 1,86 mm) v porovnaní s kontrolou (1,53 a 1,24 mm). Výraznejší účinok NPK hnojenia spolu s vápnením ako samotného NPK hnojenia na obsah WSA_{ma} potvrdili aj Manna et al. (17) v rámci 30-ročného poľného experimentu na piesočnato-hlinitej pôde. Podľa Paradelo et al. (19) môže vápnenie prispieť k väčšej interakcii medzi minerálnymi pôdnymi časticami a časticami POH prostredníctvom

katiónových mostíkov Ca^{2+} na základe zvýšeného obsahu Ca^{2+} v pôde. Vápnenie tiež efektívne znižuje toxicitu Al^{3+} iónov a zvyšuje pH kyslých pôd, čo vedie k podpore mikrobiálnej aktivity a teda i agregácie (4, 19). Zároveň sme tiež pozorovali výrazné rozdiely medzi hnojenými variantmi. Obsah $WSA_{ma} >5$ a $5-3$ mm bol vo variante CaNPK o 48 a 43 % vyšší a obsah $WSA_{ma} 1-0,5$ mm o 20 % nižší ako vo variante NPK. Hnojenie CaNPK významne zvýšilo hodnoty MWDs a MWDm (2,07 a 1,86 mm) v porovnaní s hnojením samotným NPK (0,89 a 1,23 mm).

Ani 94-ročné minerálne NPK a CaNPK hnojenie štatisticky významne neovplyvnilo obsah WSA_{ma} a WSA_{mi}

Obrázok 1C: Percentuálny podiel jednotlivých veľkostných tried vodoodolných agregátov v 94-ročnom experimente
Figure 1C: The percentage of individual size classes of water-stable aggregates in 94-years-old experiment



Rozdielne písmená (a, b, c) medzi variantmi znázorňujú štatisticky významný rozdiel podľa LSD testu s hladinou významnosti 95%
 Different letters (a, b, c) between treatments represent statistically significant differences according to LSD test at $P \leq 95\%$

(tabuľka 1). Vo variante NPK však bol zistený výrazne vyšší obsah WSA_{ma} vo veľkostných triedach: >5, 5 – 3, 3 – 2 a 2 – 1 mm (o 89, 76, 71 a 71 %) a nižší obsah WSA_{ma} 0,5 – 0,25 mm (o 61 %) v porovnaní s kontrolou. Hnojenie CaNPK oproti kontrole významne zvýšilo zastúpenie WSA_{ma} 3 – 2 (+54 %) a 2 – 1 mm (+60 %) a tiež znížilo zastúpenie WSA_{ma} 0,5 – 0,25 mm (-41 %). V oboch hnojenných variantoch bol v porovnaní s kontrolou zaznamenaný výrazne vyšší obsah agronomicky cenných veľkostných tried WSA_{ma} (3 – 0,5 mm): NPK (+33 %) a CaNPK (+27 %). Po 94-rokoch minerálneho hnojenia sa oproti kontrole vý-

znamne zvýšila hodnota MWDs, a to v prípade hnojenia CaNPK z 0,45 mm na 2,11 mm. Hodnota MWDm bola významne zvýšená účinkom oboch spôsobov hnojenia. Výraznejšie zvýšenie oproti kontrole bolo pozorované vo variante NPK (+48 %) ako vo variante CaNPK (+27 %). Zatiaľ čo NPK hnojenie nemalo významný vplyv na hodnotu Kv, hnojenie CaNPK viedlo k jej výraznému zvýšeniu (o 69 %) v porovnaní s kontrolou. Hodnota Sw nebola minerálnym hnojením významne ovplyvnená. V tomto prípade sa teda efektívnejšie prejavilo samotné NPK ako CaNPK hnojenie (obrázok 1C). Aye et al. (1) zistili, že 34-ročné vápnenie

Tabuľka 1: Priemerné hodnoty parametrov pôdnej štruktúry ovplyvnené dlhodobým minerálnym hnojením
Table 1: The average values of soil structure parameters affected by long-term mineral fertilization

Variant (1)	WSA_{ma} (9)	WSA_{mi} (10)	MWDs (11)	MWDm (12)	Kv (13)	Sw (14)
	(%)		(mm)			
25-ročný experiment (2)						
MH (5)	88,44 ±0,66a	11,57 ±0,67a	0,80 ±0,15a	0,55 ±0,05a	1,45 ±0,15a	5,57 ±0,63b
MH + NPK (6)	84,19 ±0,29a	15,82 ±0,28a	0,70 ±0,17a	0,71 ±0,16a	1,10 ±0,49a	5,03 ±0,22ab
MH + CaNPK (7)	90,29 ±0,47a	9,71 ±0,47a	0,78 ±1,15a	0,64 ±0,07a	1,21 ±0,08a	4,31 ±0,12a
41-ročný experiment (3)						
Kontrola (8)	91,03 ±0,62a	8,97 ±0,61a	1,53 ±0,11ab	1,24 ±0,04a	1,24 ±0,13b	5,14 ±0,13b
NPK	93,36 ±0,40a	6,64 ±0,40a	0,89 ±0,23a	1,23 ±0,24a	0,71 ±0,07a	4,39 ±0,43a
CaNPK	94,28 ±0,26a	5,72 ±0,26a	2,07 ±0,65b	1,86 ±1,24b	1,08 ±0,21b	4,70 ±0,39ab
94-ročný experiment (4)						
Kontrola	86,53 ±0,87a	13,48 ±0,88a	0,45 ±0,02a	0,44 ±0,02a	1,04 ±0,10a	4,87 ±0,33a
NPK	93,01 ±0,66a	6,99 ±0,66a	0,96 ±0,46ab	0,85 ±0,08c	1,09 ±0,44a	4,97 ±0,35a
CaNPK	89,99 ±0,76a	10,02 ±0,75a	2,11 ±1,09b	0,61 ±0,04b	3,36 ±1,57b	4,47 ±1,04a

Rozdielne písmená (a, b, c) medzi riadkami vyjadrujú štatistickú významnosť, podľa LSD testu, WSA_{ma} – obsah vodoodolných makro-agregátov, WSA_{mi} – obsah vodoodolných mikro-agregátov, MWDs – stredný vážený priemer agregátov získaných preosievaním za sucha, MWDm – stredný vážený priemer agregátov získaných preosievaním za mokra, Kv – koeficient zraniteľnosti pôdnej štruktúry, Sw – index stability vodoodolných makro-agregátov

Different letters (a, b, c) between treatments indicate statistically significant differences according to LSD test, (1) treatment, (2) 25-year-old experiment (organic and mineral fertilization), (3) 41-year-old experiment (mineral fertilization), (4) 94-year-old experiment (mineral fertilization), (5) manure, (6) manure + NPK, (7) manure + CaNPK, (8) control, (9) content of water-stable macro-aggregates, (10) content of water-stable micro-aggregates, (11) mean weight diameter of aggregates for dry sieving, (12) mean weight diameter of aggregates for wet sieving, (13) vulnerability coefficient of soil structure, (14) stability index of water-stable macro-aggregates

na piesočnatej intenzívne obrábanej pôde znížilo podiel $WSA_{ma} > 2$ mm o 30 % a zvýšilo obsah WSA_{mi} o 54 % v porovnaní s kontrolou. Vápnenie tiež viedlo k poklesu MWDm z 1,13 mm na 1,01 mm. Podľa nich by tieto účinky mohli súvisieť s vyššou intenzitou obrábania pôdy. V tomto (94-ročnom) ako aj v 25-ročnom experimente bola pôda pravidelne obrábaná pre pestovanie obilnín, ale v 41-ročnom experimente nebola obrábaná, pretože sa na nej od roku 1976 pestovali čučoriedky, pričom sa pôda nekyprila. Okrem toho zvýšenie mikrobiálnej aktivity vplyvom vápnenia môže zvyšovať mieru mineralizácie POH, čo sa môže odraziť na uvoľňovaní CO_2 z pôdy do atmosféry a na znížení zásob POH a teda i na zhoršení stavu pôdnej štruktúry (19). Aj v dôsledku 94-ročného minerálneho hnojenia sme zistili významné rozdiely medzi hnojenými variantmi. Obsah WSA_{ma} vo väčších veľkostných triedach bol vo variante NPK vyšší ako vo variante CaNPK a to o 80, 54 a 36 %, pre $WSA_{ma} > 5$, 5 – 3 a 3 – 2 mm a nižší vo WSA_{ma} 0,5 – 0,25 mm o 36 %. V tomto experimente sa teda na zvýšení obsahu väčších veľkostných tried WSA_{ma} prejavilo výraznejšie NPK ako CaNPK hnojenie, na rozdiel od 41-ročného experimentu, v ktorom sa významne prejavilo iba CaNPK hnojenie.

Vzájomné vzťahy medzi parametrami pôdnej organickej hmoty, humusu a parametrami pôdnej štruktúry

Pravidelná aplikácia organických hnojív do pôdy má tendenciu zvyšovať obsah celkového organického uhlíka (C_{org}), ktorý je dôležitým ukazovateľom zmien v obsahu POH (6, 22). Hati et al. (10) na základe výsledkov získaných v rámci 31-ročného experimentu poukázali na to, že hnojenie samotným maštalným hnojom ako aj samotné NPK hnojenie výrazne zvýšilo obsah C_{org} v pôde, ktorý sa významne podieľal na agregácii pôdy. Ich zistenia sú v súlade s výsledkami Šimanský et al. (22), z ktorých vyplýva, že 25-ročné hnojenie maštalným hnojom v kombinácii s NPK hnojením štatisticky významne zvýšilo obsah C_{org} . Korelačné koeficienty medzi parametrami pôdnej organickej hmoty, humusu a parametrami pôdnej štruktúry sú uvedené v tabuľke 2. V rámci 25-ročného experimentu zvýšený obsah C_{org} významne prispel k tvorbe troch najväčších veľkostných tried WSA_{ma} : >5, 5 – 3 a 3 – 2 mm. Zároveň bol potvrdený jeho významne negatívny korelačný vzťah s K_v a pozitívny s MWDm, čo čiastočne naznačuje jeho podiel na stabilite vodoodolných makro-agregátov. Obsah labilného uhlíka (C_L) je dôležitým ukazovateľom kvality pôdy, ktorý môže taktiež významne prispieť k tvorbe a stabilite pôdných agregátov, čo doposiaľ potvrdili autori mnohých štúdií (13, 20). V rámci 25-ročného experimentu sa obsah C_L významne podieľal na tvorbe WSA_{ma} : 5 – 3 a 3 – 2 mm. Dlhodobé organické hnojenie, môže prispieť aj k vyššiemu obsahu humusových látok v pôde, ktoré sú tiež považované za stabilné cementačné látky pre pôdne častice (8). Šimanský et al. (22) uviedli, že 25-ročné hnojenie maštalným hnojom spolu s minerálnymi hnojivami zvýšilo extrahovateľnosť uhlíka humusových látok (C_{HL}), uhlíka fulvokyselín (C_{FK}), znížilo však pomer uhlíka humínových kyselín k uhlíku fulvokyselín ($C_{HK} : C_{FK}$) a zvýšilo hodnotu farebného kvocientu humusových látok (Q_{HK}). Výsledky tejto štúdie poukázali na to, že obsah WSA_{ma} bol negatívne ovplyvnený extrahovateľnosťou C_{HL} ($r = -0,685$, $P \leq 0,05$) ako aj extrahovateľnosťou uhlíka humínových kyselín (C_{HK}) ($r = -0,921$, $P \leq 0,001$). Na druhej strane hodnota MWDm bola pozitívne ovplyvnená extrahovateľnosťou C_{HL} ($r = 0,998$, $P \leq 0,001$),

C_{HK} ($r = 0,889$, $P \leq 0,01$), a C_{FK} ($r = 0,997$, $P \leq 0,001$), čo potvrdzuje účasť týchto humusových látok na stabilite vodoodolných makro-agregátov.

Aj samotné minerálne hnojenie má potenciál zvyšovať obsah POH a zlepšovať tak stav pôdnej štruktúry, avšak jeho účinky bývajú menej výrazné ako účinky organického hnojenia (4, 19). Podľa výsledkov Šimanský et al. (22) spôsobilo 41-ročné minerálne hnojenie významný nárast obsahu C_{org} , extrahovateľnosti C_{HK} a C_{FK} , ako aj hodnoty farebného kvocientu humínových kyselín (Q_{HK}) a pokles pomeru $C_{HK} : C_{FK}$. Obsah vodoodolných makro-agregátov nebol v dôsledku 41-ročného minerálneho hnojenia významne ovplyvnený obsahom C_{org} ani C_L (tabuľka 2). Oba tieto kvantitatívne parametre sa podieľali na tvorbe WSA_{ma} 2 – 1 mm. Okrem toho výrazne prispeli k nižšej zraniteľnosti pôdnej štruktúry, ale zároveň negatívne korelovali s hodnotou Sw. Obsah vodoodolných makro-agregátov bol v tomto prípade významne pozitívne ovplyvnený extrahovateľnosťou C_{HL} ($r = 0,793$, $P \leq 0,05$), ale najmä extrahovateľnosťou C_{HK} ($r = 0,972$, $P \leq 0,001$). Vápnenie pôdy môže významne prispieť agregácii pôdy prostredníctvom tvorby kationových mostíkov medzi humusovými látkami a minerálnymi pôdnymi časticami. Pri vyššom obsahu Ca^{2+} , ale aj iných dvoj alebo trojmocných kationov sa zvyšuje reaktivita humínových kyselín s ílovými minerálmi, iónmi, organickými molekulami a inými zložkami v pôde, čo prispieva k vyššej agregácii (15). Hodnoty C_{HL} , C_{HK} , C_{FK} významne negatívne korelovali s obsahom WSA_{ma} 2 – 1 mm a hodnota C_{HK} pôsobila negatívne aj na obsah agromicky cenných veľkostných tried WSA_{ma} .

Vplyvom 94-ročného minerálneho hnojenia bol obsah WSA_{ma} priaznivo ovplyvnený zvýšeným obsahom C_{org} ako aj C_L . Obsah C_{org} prispel k tvorbe väčšiny veľkostných tried WSA_{ma} : >5, 5 – 3 – 3 – 2, 2 – 1, a 1 – 0,5 mm. Okrem toho negatívne koreloval s obsahom WSA_{ma} v najmenšej veľkostnej triede (0,5 – 0,25 mm). Obsah C_L sa podieľal na formovaní WSA_{ma} 3 – 2, 2 – 1 a 1 – 0,5 a tiež negatívne koreloval s WSA_{ma} 0,5 – 0,25 mm. Hodnoty C_{HL} a C_{FK} sa významne podieľali na formovaní väčšiny veľkostných tried WSA_{ma} (>5, 5 – 3, 3 – 2, 2 – 1 a 1 – 0,5 mm). K vyššej stabilite vodoodolných makro-agregátov prispela aj extrahovateľnosť C_{HK} , o čom svedčí jej negatívny korelačný vzťah s hodnotou K_v ($r = -0,951$, $P \leq 0,001$) a pozitívny s hodnotou Sw ($r = 0,867$, $P \leq 0,001$). Okrem toho vyššia hodnota Sw bola tiež významne pozitívne ovplyvnená vyššou stabilitou humusových látok a aj humínových kyselín.

Celkovo najväčší počet pozitívnych vzťahov medzi POH, humusom a pôdnou štruktúrou bol pozorovaný v 25- a 94-ročnom experimente. V oboch týchto experimentoch bola pôda intenzívne obrábaná a ako je známe z literatúry, v intenzívne obrábaných pôdach môže byť kvalita humusových látok vyššia (25), čo má pozitívny dopad na pôdnu štruktúru (4).

Vzájomné vzťahy medzi jednotlivými formami železa hliníka a parametrami pôdnej štruktúry

Účinky dlhodobého minerálneho hnojenia na obsah celkového železa (Fe_t) celkového hliníka (Al_t), amorfných oxidov železa (Fe_o) a hliníka (Al_o) na rovnakých experimentoch boli hodnotené v štúdií Šimanský a Jonczak (21). Z ich výsledkov vyplýva, že 41-ročné NPK ako i CaNPK hnojenie štatisticky významne zvýšilo obsah Fe_o a 94-ročné NPK hnojenie obsah Al_o v porovnaní s kontrolou. Korelačné vzťahy medzi jednotlivými formami železa, hliníka a parametrami pôdnej štruktúry sú uvedené v tabuľke 3.

Tabuľka 2: Korelačné koeficienty medzi parametrami pôdnej organickej hmoty, humusu a pôdnej štruktúry
Table 2: Correlation coefficients between soil organic matter, humus and soil structure parameters

25-ročný experiment (organické a minerálne hnojenie) (1)							
Parameter (4)	WSA _{ma} (13)	WSA _{mi} (14)	MWDs (15)	MWDm (16)	Kv (17)	Sw (18)	
C _{org} (5)	-0,515	0,514	-0,863**	0,988***	-1,000***	-0,600	
C _L (6)	-0,178	0,178	-0,629	0,870**	-0,935***	-0,844**	
C _{HL} (7)	-0,685*	0,684*	-0,951***	0,998***	-0,977***	-0,417	
C _{HK} (8)	-0,921***	0,921***	-0,995***	0,889**	-0,808**	-0,013	
C _{FK} (9)	-0,560	0,560	-0,889**	0,997***	-0,999***	-0,556	
C _{HK} : C _{FK} (10)	0,144	-0,144	0,602	-0,853**	0,923***	0,862**	
Q _{HL} (11)	-0,361	0,360	-0,765*	0,948***	-0,985***	-0,727*	
Q _{HK} (12)	-0,928***	0,928***	-0,635	0,308	-0,159	0,695*	
Parameter	WSA _{ma} (mm)						
	>5	5 – 3	3 – 2	2 – 1	1 – 0,5	0,5 – 0,25	3 – 0,5
C _{org}	0,696*	0,953***	0,978***	0,151	-0,853**	-0,369	0,983***
C _L	0,397	0,783*	0,989***	0,491	-0,613	-0,674*	0,003
C _{HL}	0,832**	0,997***	0,911***	-0,062	-0,944***	-0,163	-0,541
C _{HK}	0,985***	0,949***	0,666*	-0,461	-0,997***	0,250	-0,835**
C _{FK}	0,733*	0,968***	0,965***	0,097	-0,879**	-0,318	-0,400
C _{HK} : C _{FK}	-0,365	-0,762*	-0,983***	-0,520	0,585	0,699*	-0,037
Q _{HL}	0,563	0,887**	0,999***	0,317	-0,751*	-0,522	-0,186
Q _{HK}	0,820**	0,452	-0,052	-0,952***	-0,651	0,859**	-0,980***
41-ročný experiment (minerálne hnojenie) (2)							
Parameter	WSA _{ma}	WSA _{mi}	MWDs	MWDm	Kv	Sw	
C _{org}	0,591	-0,592	-0,654	-0,156	-0,995***	-0,971***	
C _L	0,538	-0,539	-0,702*	-0,219	-0,999***	-0,953***	
C _{HL}	0,793*	-0,793*	-0,418	0,126	-0,929***	-0,999***	
C _{HK}	0,972***	-0,972***	-0,014	0,517	-0,700*	-0,898***	
C _{FK}	0,737*	-0,737*	-0,495	0,039	-0,958***	-0,999***	
C _{HK} : C _{FK}	-0,782*	0,782*	0,433	-0,109	0,935***	1,000***	
Q _{HL}	0,441	-0,441	-0,777*	-0,327	-0,997***	-0,913***	
Q _{HK}	0,700*	-0,701*	-0,540	-0,013	-0,972***	-0,995***	
Parameter	WSA _{ma} (mm)						
	>5	5 – 3	3 – 2	2 – 1	1 – 0,5	0,5 – 0,25	3 – 0,5
C _{org}	-0,125	-0,252	-0,016	-0,902***	0,312	0,534	-0,128
C _L	-0,189	-0,313	-0,080	-0,872**	0,372	0,587	-0,064
C _{HL}	0,156	0,028	0,263	-0,987***	0,035	0,277	-0,399
C _{HK}	0,543	0,431	0,632	-0,968***	-0,373	-0,136	-0,736*
C _{FK}	0,070	-0,059	0,179	-0,969***	0,121	0,360	-0,318
C _{HK} : C _{FK}	-0,139	-0,011	-0,247	0,984***	-0,052	-0,293	0,383
Q _{HL}	-0,297	-0,418	-0,191	-0,812**	0,474	0,674*	0,048
Q _{HK}	0,017	-0,111	0,127	-0,954***	0,173	0,408	-0,268

* $P \leq 0,05$, ** $P \leq 0,01$, *** $P \leq 0,001$

C_{org} – celkový organický uhlík, C_L – labilný uhlík, C_{HL} – uhlík humusových látok, C_{HK} – uhlík humínových kyselín, C_{FK} – uhlík fulvokyselín, C_{HK} : C_{FK} – pomer uhlíka humínových kyselín k uhlíku fulvokyselín, Q_{HL} – farebný kvocient humusových látok, Q_{HK} – farebný kvocient humínových kyselín, WSA_{ma} – obsah vodoodolných makro-agregátov, WSA_{mi} – obsah vodoodolných mikro-agregátov, MWDs – stredný vážený priemer agregátov získaných preosievaním za sucha, MWDm – stredný vážený priemer agregátov získaných preosievaním za mokra, Kv – koeficient zraniteľnosti pôdnej štruktúry, Sw – index stability vodoodolných makro-agregátov

(1) 25-year-old experiment (organic and mineral fertilization), (2) 41-year-old experiment (mineral fertilization), (3) 94-year-old experiment (mineral fertilization), (4) parameter, (5) total organic carbon, (6) labile carbon, (7) humic substances carbon, (8) humic acids carbon, (9) fulvic acids carbon, (10) humic acids carbon to fulvic acids carbon ratio, (11) colour quotient of humic substances, (12) colour quotient of humic acids, (13) content of water-stable macro-aggregates, (14) content of water-stable micro-aggregates, (15) mean weight diameter of aggregates for dry sieving, (16) mean weight diameter of aggregates for wet sieving, (17) vulnerability coefficient of soil structure, (18) stability index of water-stable macro-aggregates

Pokračovanie tabuľky 2
Continuation of the table 2

94-ročný experiment (minerálne hnojenie) (3)							
Parameter	WSA _{ma}	WSA _{mi}	MWDs	MWDm	Kv	Sw	
C _{org}	0,862**	-0,862**	0,766*	0,785*	0,555	-0,373	
C _L	0,798**	-0,798**	0,835**	0,708*	0,648	-0,477	
C _{HL}	0,999***	-0,999***	0,384	0,982***	0,111	0,096	
C _{HK}	-0,363	0,363	-1,000***	-0,233	-0,951***	0,867**	
C _{FK}	0,972***	-0,972***	0,547	0,931***	0,291	-0,088	
C _{HK} : C _{FK}	-0,905***	0,905***	-0,704*	-0,838**	-0,477	0,286	
Q _{HL}	0,214	-0,215	-0,849**	0,345	-0,963***	0,998***	
Q _{HK}	0,077	-0,077	-0,914***	0,212	-0,991***	0,997***	
Parameter	WSA _{ma} (mm)						
	>5	5 – 3	3 – 2	2 – 1	1 – 0,5	0,5 – 0,25	3 – 0,5
C _{org}	0,536	0,694*	0,831**	0,912***	0,949***	-0,929***	0,952***
C _L	0,435	0,606	0,762*	0,858**	0,979***	-0,880**	0,910***
C _{HL}	0,864**	0,947***	0,994***	0,999***	0,698*	-0,997***	0,986***
C _{HK}	0,101	-0,099	-0,309	-0,461	-0,941***	0,501	-0,558
C _{FK}	0,758*	0,873**	0,957***	0,992***	0,817**	-0,997***	1,000***
C _{HK} : C _{FK}	-0,611	-0,757*	-0,879**	-0,945***	-0,916***	0,959***	-0,976***
Q _{HL}	0,636	0,469	0,270	0,108	-0,595	-0,063	-0,005
Q _{HK}	0,523	0,342	0,134	-0,031	-0,700*	0,076	-0,143

* P ≤ 0,05, ** P ≤ 0,01, *** P ≤ 0,001

C_{org} – celkový organický uhlík, C_L – labilný uhlík, C_{HL} – uhlík humusových látok, C_{HK} – uhlík huminových kyselín, C_{FK} – uhlík fulvokyselín, C_{HK} : C_{FK} – pomer uhlíka huminových kyselín k uhlíku fulvokyselín, Q_{HL} – farebný kvocient humusových látok, Q_{HK} – farebný kvocient huminových kyselín, WSA_{ma} – obsah vodoodolných makro-agregátov, WSA_{mi} – obsah vodoodolných mikro-agregátov, MWDs – stredný vážený priemer agregátov získaných preosievaním za sucha, MWDm – stredný vážený priemer agregátov získaných preosievaním za mokra, Kv – koeficient zraniteľnosti pôdnej štruktúry, Sw – index stability vodoodolných makro-agregátov

(1) 25-year-old experiment (organic and mineral fertilization), (2) 41-year-old experiment (mineral fertilization), (3) 94-year-old experiment (mineral fertilization), (4) parameter, (5) total organic carbon, (6) labile carbon, (7) humic substances carbon, (8) humic acids carbon, (9) fulvic acids carbon, (10) humic acids carbon to fulvic acids carbon ratio, (11) colour quotient of humic substances, (12) colour quotient of humic acids, (13) content of water-stable macro-aggregates, (14) content of water-stable micro-aggregates, (15) mean weight diameter of aggregates for dry sieving, (16) mean weight diameter of aggregates for wet sieving, (17) vulnerability coefficient of soil structure, (18) stability index of water-stable macro-aggregates

V 25-ročnom experimente bol obsah vodoodolných makro-agregátov významne pozitívne ovplyvnený obsahom celkového hliníka (Al_t). Podľa Golberg et al. (9) oxidy Fe a Al prispievajú skôr k tvorbe menších agregátov, čo sa v tomto experimente nepotvrdilo, pretože obsahy celkového železa, hliníka a ich amorfných oxidov prispeli skôr k formovaniu väčších veľkostných tried WSA_{ma} a negatívne korelovali práve s obsahmi menších veľkostných tried WSA_{ma}. Výsledky ďalej naznačili čiastočný podiel amorfných oxidov železa a hliníka na stabilite vodoodolných makro-agregátov. Obsahy Fe_o a Al_o významne pozitívne korelovali s hodnotou MWDm a negatívne s Kv.

V pôdach s nízkym obsahom ílu a POH môže byť agregácia podporená skôr kationmi Fe³⁺ a Al³⁺, ktorých mobilita narastá spolu kyslosťou pôdy. Na druhej strane v pôdach s vysokým obsahom POH sa na tvorbe pôdnych agregátov môžu významne podieľať skôr oxidy Fe (2). Piesočnaté pôdy sú všeobecne známe nízkym obsahom POH, preto by dlhodobé hnojenie na základe zvýšenia obsahu POH mohlo zvyšovať podiel celkového Fe, Al a ich oxidov na agregáčnom procese. V 41-ročnom experimente s minerálnym hnojením bol zaznamenaný významne pozitívny vzťah medzi celkovým obsahom WSA_{ma} a obsahom Fe_t (r = 0,831, P ≤ 0,01), ale významne negatívny vzťah medzi WSA_{ma} a Al_t (r = -0,715, P ≤ 0,05). Amorfné oxidy Fe a Al prispeli k vyššiemu obsahu WSA_{ma}. Obsah Al_o bol významným prvkom pri tvorbe najväčších veľkostných tried WSA_{ma} >5 a 5 – 3 mm. Obsah veľkostnej triedy WSA_{ma}

2 – 1 mm negatívne koreloval s Fe_o, Fe_t a Al_o, ale pozitívne s Al_t. Jednotlivé formy Fe a Al pôsobili rôzne na stabilitu pôdnych agregátov (tabuľka 3).

V rámci 94-ročného experimentu sa na zvyšovaní celkového obsahu vodoodolných makro-agregátov podieľali amorfné oxidy Al a Fe. Organické látky na svojom povrchu absorbujú oxidy Fe a Al a pomocou elektrostatických väzieb sú schopné tvoriť mostíky medzi pôdnymi časticami (4, 21, 23). Tvorba väčších veľkostných tried ako aj agronomicky cenných tried WSA_{ma} bola tiež významne podporená amorfnými oxidmi Fe a Al. Celkové formy železa a hliníka prispeli významne k tvorbe WSA_{ma} 1 – 0,5 mm. Obsah WSA_{ma} 0,5 – 0,25 mm bol negatívne ovplyvnený celkovými obsahmi železa a hliníka ako aj ich amorfnými oxidmi.

Z uvedených výsledkov (tabuľka 3) vyplýva, že tvorba a stabilita pôdnej štruktúry bola v jednotlivých experimentoch podporená výraznejšie amorfnými oxidmi železa a hliníka ako ich celkovými obsahmi a tieto vzťahy boli výraznejšie v 94-ročnom experimente v porovnaní s 25- a 41-ročným experimentom.

Záver

Na základe získaných výsledkov môžeme skonštatovať, že 25-ročné hnojenie maštaľným hnojom v kombinácii s NPK hnojivami významne neovplyvnilo štruktúrny stav piesočnatej pôdy v porovnaní s hnojením samotným maštaľným hnojom. Avšak 41- a 94-ročné minerálne

Tabuľka 3: Korelačné koeficienty medzi celkovými obsahmi železa, hliníka, ich amorfných oxidov a parametrami pôdnej štruktúry
Table 3: Correlation coefficients between the content of total iron, aluminium, their amorphous oxides and soil structure parameters

25-ročný experiment (organické a minerálne hnojenie) (1)							
Parameter (4)	WSA _{ma} (9)	WSA _{mi} (10)	MWDs (11)	MWDm (12)	Kv (13)	Sw (14)	
Fe _t (5)	0,393	-0,393	-0,097	0,455	-0,586	-1,000***	
Fe _o (6)	0,031	-0,031	-0,453	0,748*	-0,841**	-0,937***	
Al _t (7)	0,678*	-0,678*	0,242	0,131	-0,281	-0,937***	
Al _o (8)	-0,222	0,221	-0,663	0,891**	-0,950***	-0,819**	
Parameter	WSA _{ma} (mm)						
	>5	5 – 3	3 – 2	2 – 1	1 – 0,5	0,5 – 0,25	3 – 0,5
Fe _t	-0,174	0,312	0,743*	0,889**	-0,076	-0,969***	0,553
Fe _o	0,197	0,637	0,936***	0,661	-0,435	-0,813**	0,211
Al _t	-0,494	-0,024	0,477	0,991***	0,262	-0,997***	0,800**
Al _o	0,437	0,810**	0,994***	0,451	-0,647	-0,640	-0,041
41-ročný experiment (minerálne hnojenie) (2)							
Parameter	WSA _{ma}	WSA _{mi}	MWDs	MWDm	Kv	Sw	
Fe _t	0,831**	-0,832**	-0,356	0,191	-0,902***	-0,994***	
Fe _o	0,826**	-0,827**	-0,365	0,183	-0,906***	-0,995***	
Al _t	-0,715*	0,715*	0,523	-0,007	0,966***	0,997***	
Al _o	0,992***	-0,992***	0,347	0,791*	-0,395	-0,679*	
Parameter	WSA _{ma} (mm)						
	>5	5 – 3	3 – 2	2 – 1	1 – 0,5	0,5 – 0,25	3 – 0,5
Fe _t	0,222	0,095	0,327	-0,995***	-0,032	0,213	-0,459
Fe _o	0,213	0,085	0,318	-0,994***	-0,023	0,221	-0,451
Al _t	-0,038	0,091	-0,147	0,960***	-0,153	-0,389	0,287
Al _o	0,809**	0,727*	0,869**	-0,813**	-0,682*	-0,484	-0,931***
94-ročný experiment (minerálne hnojenie) (3)							
Parameter	WSA _{ma}	WSA _{mi}	MWDs	MWDm	Kv	Sw	
Fe _t	0,298	-0,297	0,999***	0,165	0,970***	-0,900***	
Fe _o	0,929***	-0,929***	-0,365	0,870**	0,423	-0,228	
Al _t	0,351	-0,350	1,000***	0,220	0,955***	-0,874**	
Al _o	0,943***	-0,943***	0,001	0,979***	-0,279	0,470	
Parameter	WSA _{ma} (mm)						
	>5	5 – 3	3 – 2	2 – 1	1 – 0,5	0,5 – 0,25	3 – 0,5
Fe _t	-0,170	0,03	0,242	0,399	0,915***	-0,770*	0,499
Fe _o	0,658	0,795*	0,906***	0,963***	0,890**	-0,974***	0,987***
Al _t	-0,114	0,086	0,297	0,450	0,936***	-0,489	0,547
Al _o	0,991***	0,998***	0,960***	0,902***	0,369	-0,881**	0,847**

* P ≤ 0,05, ** P ≤ 0,01, *** P ≤ 0,001

Fe_t – celkové železo, Fe_o – amorfné oxidy železa, Al_t – celkový hliník, Al_o – amorfné oxidy hliníka, WSA_{ma} – obsah vodoodolných makro-agregátov, WSA_{mi} – obsah vodoodolných mikro-agregátov, MWDs – stredný vážený priemer agregátov získaných preosievaním za sucha, MWDm – stredný vážený priemer agregátov získaných preosievaním za mokra, Kv – koeficient zraniteľnosti, Sw – index stability vodoodolných makro-agregátov

(1) 25-year-old experiment (organic and mineral fertilization), (2) 41-year-old experiment (mineral fertilization), (3) 94-year-old experiment (mineral fertilization), (4) parameter, (5) total iron content, (6) iron amorphous oxides, (7) total aluminium content, (8) aluminium amorphous oxides, (9) – content of water-stable macro-aggregates, (10) content of water-stable micro-aggregates, (11) mean weight diameter of aggregates for dry sieving, (12) mean weight diameter of aggregates for wet sieving, (13) vulnerability coefficient of soil structure, (14) stability index of water-stable macro-aggregates

hnojenie výrazne zvýšilo tvorbu a stabilitu pôdnych agregátov. Najpriaznivejšie boli parametre pôdnej štruktúry ovplyvnené 94-ročným NPK hnojením. Vo variante NPK bol v porovnaní s nehnojenou kontrolou zaznamenaný výrazne vyšší obsah vodoodolných makro-agregátov vo väčších veľkostných triedach: >5, 5 – 3, 3 – 2 a 2 – 1 mm, ako i vyššia hodnota stredného váženého priemeru agregátov získaných preosievaním za mokra. V jednotlivých experimentoch boli parametre pôdnej štruktúry pozitívne ovplyvnené obsahom pôdnej organickej hmoty ako i extrahovateľnosťou uhlíka humusových látok a v 94-ročnom

experimente i amorfnými oxidmi železa a hliníka. Výrazne vyšší počet pozitívnych vzťahov medzi pôdnou organickou hmotou, humusom a pôdnou štruktúrou bol pozorovaný v 25- a 94-ročnom ako v 41-ročnom experimente.

Zrinitosne ľahké pôdy zaberajú na Slovensku približne 9 % z poľnohospodárskeho pôdneho fondu. Je teda opodstatnené zaoberať sa problematikou zvyšovania úrodnosti týchto pôd. Voľba správnej stratégie hnojenia predstavuje v tomto smere kľúčové opatrenie. Efektívnosť hnojenia však závisí od mnohých faktorov ako sú: druh hnojiva, aplikačná dávka, vlastnosti pôdy, obrábanie pôdy a iné, čo

je potrebné zväziť. Obzvlášť cennými sú výsledky najmä z dlhodobých experimentov. Preto veríme, že aj naše výsledky hoci sú získané v rámci dlhodobých experimentov prebiehajúcich v Poľsku poslúžia k rozšíreniu poznatkov o účinkoch dlhodobého minerálneho hnojenia na pôdnu štruktúru piesočnatých pôd aj v rámci Slovenskej republiky. Aj keď sa používanie samotných minerálnych hnojív nepovažuje za vhodný spôsob hnojenia môže v správne zvolených kombináciách a aplikačných dávkach významne zlepšovať pôdne vlastnosti vrátane pôdnej štruktúry.

Literatúra

- (1) AYE, N. S. – SZALE, P. W. G. – TANG, C. 2016. The impact of long-term liming on soil organic carbon on aggregate stability in low-input acid soils. In *Biology and Fertility of Soils*, vol. 241, 2016, pp. 155–176.
- (2) BARRAL, M. T. – ARIAS, M. – GUERIF, J. 1998. Effects of soil iron and organic matter on the porosity and structural stability of soil aggregates. In *Soil and Tillage Research*, vol. 46, 1998, pp. 261–272.
- (3) BEMBI, D. K. – BISWAS, C. R. – BAWA, S. S. – KUMAR, K. 1998. Influence of farmyard manure, inorganic fertilizers and weed control practices on some physical properties in a long-term experiment. In *Soil Use and Management*, vol. 14, 1998, pp. 52–54.
- (4) BRONICK, C. J. – LAL, R. 2005. The soil structure and land management: a review. In *Geoderma*, 2005, vol. 124, 2005, pp. 3–22 [online].
- (5) CHOJNICKI, J. – KWASOWSKI, W. – PIOTROWSKI, M. – OKTABA, L. – KONDRAS, M. 2016. Trace elements in arable Cambisols and Luvisols developed from boulder loam and fluvioglacial sands of the Skierniewicka Upland (central Poland). In *Soil Science Annual*, vol. 66, 2016, pp. 198–203.
- (6) DONG, W. Y. – ZHANG, X. Y. – DAI, X. Q. – FUX, L. – YANG, F. T. – LIU, X. Y. – SUN, X. M. – WEN, X. F. – SCHAEFFER, S. 2014. Changes in soil microbial community composition in response to fertilization of paddy soils in subtropical China. In *Applied Soil Ecology*, vol. 84, 2014, pp. 140–147.
- (7) DZIADOWIEC, H. – GONET, S.S. 1999b. Estimation of fractional composition of soil humus by Kononova-Bielcikova's method. In *Methodical guide-book for soil organic matter studies*, vol. 120, 1999, pp. 31–34.
- (8) GALANTINI, J. – ROSELL, R. 2006. Long-term fertilization effects on soil organic matter quality and dynamic under different production systems in semiarid Pampea soils. In *Soil and Tillage Research*, vol. 87, 2006, pp. 72–79.
- (9) GOLBERG, S. 1989. Interaction of aluminium and iron oxides and clay mineralogy and their effect on soil physical properties. In *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, vol. 20, 1989, pp. 1181–1207.
- (10) HATI, K. M. – SWARUP, A. – SINGH, D. – MIRSA, A. K. – GHOSH, P. K. 2005. Long-term continuous cropping, fertilisation, and manuring effects on physical properties and organic carbon content of a sandy loam soil. In *Australian Journal of Soil Research*, vol. 44, 2005, pp. 487–495 [online].
- (11) HÉNIN, S. – GRAS, R. – JUNGERIUS, P. D. 1969. Le profil cultural: l'état physique du sol et ses conséquences agronomiques. Paris : Masson, 1969, 332 p.
- (12) HRAŠKO, J. – ČERVENKA, L. – FACEK, Z. – KOMÁR, J. – NĚMČEK, J. – POSPÍŠIL, J. – SIROVÝ, V. 1962. Rozbory pôd. Bratislava : Slovenské vydavateľstvo pôdohospodárskej literatúry, 1962, 334 s.
- (13) JURIGA, M. – ŠIMANSKÝ, V. – HORÁK, J. – KONDRLOVÁ, E. – IGAZ, D. – POLLÁKOVÁ, N. – BUCHKINA, N. – BALASHOV, E. 2018. The effect of different rates of biochar and biochar in combination with N fertilizer on the parameters of soil organic matter and soil structure. In *Journal of Ecological Engineering*, vol. 19, 2018, no. 6, pp. 153–161 [online].
- (14) KHALID, A. A. – BONSU, H. – TUFOUR, H. O. – PARETR, B. Q. 2014. Effect of poultry manure and NPK fertilizer on physical properties of a sandy soil in Ghana. In *International Journal of Scientific Research in Agricultural Science*, vol. 1, 2014, pp. 1–5.
- (15) KLOSTER, N. – BRIGANTE, M. – ZANINI, G. – AVENA, M. 2013. Aggregation kinetics of humic acids in the presence of calcium ions. In *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 427, 2013, pp. 76–82 [online].
- (16) LOGINOW, W. – WISNIEWSKI, W. – GONET, S. S. – CIESCINSKA, B. 1987. Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation. In *Pol. J. Soil Sci.*, 1987, pp. 47–52.
- (17) MANNA, M. C. – SWARUP, A. – WANJARI, R. M. – MISHRA, B. – SHARI, D. K. 2007. Long-term fertilization, manure and liming effects on soil organic matter and crop yields. In *Soil and Tillage Research*, vol. 94, 2007, pp. 397–409.
- (18) OSMAN, K. T. 2018. Management of soil problems. 2018, pp. 37–65. ISBN 978-3-319-755-27-4.
- (19) PARADELO, R. – VIRTO, I. – CHENU, C. 2015. Net effect of liming on soil organic carbon stocks: A review. In *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 202, 2015, pp. 98–107.
- (20) POLLÁKOVÁ, N. – ŠIMANSKÝ, V. – KRAVKA, M. 2018. The influence of soil organic matter fractions in aggregates stabilization in agricultural and forest soils of selected Slovak and Czech hilly lands. In *Journal of Soils and Sediment*, 2018, pp. 1–11.
- (21) ŠIMANSKÝ, V. – JONCZAK, J. 2020. Aluminium and iron oxides affect the soil structure in a long-term mineral fertilized soil. In *Journal of Soils and Sediments*, vol. 20, 2020, pp. 2008–2018.
- (22) ŠIMANSKÝ, V. – JURIGA, M. – JONCZAK, J. – UZAROWICZ, X. – STĘPIEŃ, W. 2019. How relationships between soil organic matter parameters and soil structure characteristics are affected by the long-term fertilization of a sandy soil. In *Geoderma*, vol. 342, 2019, pp. 75–84.
- (23) SIX, J. – BOSSUYT, H. – DEGRYZE, S. – DENEFF, K. 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter Dynamics. In *Soil and Tillage Research*, vol. 79, 2004, pp. 7–31.
- (24) ŤURIN, I. V. 1966. K metodike analiza deje sravnitel'nogo izučeniya sostava počvennogo peregnoja ili gumusa. In *Voprosy genezisa i plodorodija počv.*, Moskva : Nauka, 1966.
- (25) VÁCHALOVÁ, R. – KOLÁŘ, L. – MUCHOVÁ, Z. 2016. Primární organická půdní hmota a humus, dvě složky půdní organické hmoty. 1. vyd., Nitra : SPU, 2016. 122 s. ISBN 978-80-552-1467-2.
- (26) VALLA, M. – KOZÁK, J. – ONDRÁČEK, V. 2000. Vulnerability of aggregates separated from selected anthrosols developed on reclaimed dumpsites. In *Rostlinná výroba*, roč. 46, 2000, č. 2, s. 563–568.
- (27) VAN REEUWIJK, L. 1995. Procedures for soil analysis. Technical Paper 9, International Soil Reference and Information Centre, 1995.

*Ing. Martin Juriga, PhD.
Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre
FAPZ, Katedra pedológie a geológie,
Tr. A. Hlinku 2, 949 76 Nitra
e-mail: xjuriga@uniag.sk*

Podakovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: „Údajová a vedomostná podpora pre systémy rozhodovania a strategického plánovania v oblasti adaptácie poľnohospodárskej krajiny na klimatické zmeny a minimalizáciu degradácie poľnohospodárskych pôd“ (kód ITMS2014+ 313011W580), spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja