

# **Metody a agrotechnické postupy vedoucí ke zvýšení stability půdních agregátů**

**CERTIFIKOVANÁ METODIKA**



**Markéta Mayerová, Jan Křen, Mikuláš Madaras,  
Magdaléna Koubová, Iva Stehlíková,  
Martin Stehlík, Alena Czako**



Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.  
2022

## **Metody a agrotechnické postupy vedoucí ke zvýšení stability půdních agregátů**

### **Autorský kolektiv:**

Mgr. Markéta Mayerová<sup>a</sup>, Ph.D.

prof. Ing. Jan Křen<sup>b</sup>, CSc.

RNDr. Mikuláš Madaras<sup>a</sup>, Ph.D.

Mgr. Magdaléna Koubová<sup>c</sup>, Ph.D.

Ing. Iva Stehlíková<sup>a</sup>

Mgr. Martin Stehlík<sup>a</sup>

Ing. Alena Czakó<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Drnovská 507/73, 161 06 Praha 6 – Ruzyně

<sup>b</sup>Mendelova univerzita, Zemědělská 1665/1, 613 00 Brno

<sup>c</sup>Česká geologická služba, Klárov 131/3, 118 21 Praha 1

Kontakt na vedoucího autorského kolektivu: mayerova@vurv.cz

**Odborný oponent:** doc. Ing. Milan Kroulík, Ph.D., TF ČZU v Praze

**Oponent ze státní správy:** Ing. Michaela Smatanová, Ph.D., ÚKZÚZ

### **Vydal:**

© Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha-Ruzyně, 2022

ISBN 978-80-7427-396-4

Obálka: Vyseparované půdní agregáty velikosti 3-5 mm. Foto: Jan Lukáš

## **Dedikace**

Uplatněná metodika pro praxi vznikla za finanční podpory MZe ČR a je výstupem řešení projektu NAZV QK1810186 „Zlepšení stability půdní struktury a zvýšení infiltrace pomocí agrotechnických postupů“ a institucionálního projektu VÚRV, v.v.i. č. MZE-RO0418.

Metodika prošla oponentním řízením.

O uplatnění metodiky byla uzavřena smlouva č. 13/2022 podle ustanovení § 269 zákona č.513/1991 Sb., obchodního zákoníku.

## **Prohlášení**

Předkladatel metodiky prohlašuje, že zpracovaná metodika nezasahuje do práv jiných osob z průmyslového nebo jiného duševního vlastnictví.

## **Metody a agrotechnické postupy vedoucí ke zvýšení stability půdních agregátů**

**Anotace:** Stabilita půdních agregátů je důležitá vlastnost půdy, která ovlivňuje kvalitu půdy a půdní úrodnost. Je závislá na mnoha faktorech, které jsou částečně určeny podmínkami daného stanoviště, částečně ovlivněny způsobem obhospodařování půdy. Předkládaná metodika shrnuje současný stav poznání a na základě výsledků z dlouhodobých a krátkodobých polních pokusů popisuje agrotechnické postupy, které pozitivně ovlivňují stabilitu půdních agregátů. Mezi opatření, která vedou k zachování nebo zvýšení stability půdních agregátů patří především organické hnojení, zařazení meziplodin a pestrý osevní postup, ponechání posklizňových zbytků či omezené zpracování půdy. V případě špatného strukturního stavu půdy lze stabilitu půdních agregátů významně zvýšit založením travního porostu minimálně na tři roky. Aplikace zlepšujících přípravků do půdy je málo efektivní a finančně náročná.

**Klíčová slova:** stabilita půdních agregátů, kvalita půdy, hnojení, agrotechnika

## **Methods and agronomical practices leading to an increase in the soil aggregate stability**

**Summary:** The soil aggregate stability is an important soil characteristic that affects soil quality and soil fertility. It depends on many factors, which are partly given by soil and climate conditions of the locality, partly influenced by agronomical practices. The presented methodology summarizes the current state of knowledge and, based on results of the long-term and short-term field trials, defines agricultural practices affecting the soil aggregate stability. Agronomical practices leading to maintaining or increasing the soil aggregate stability mainly comprise: organic fertilisation, varied crop rotation and growing intercrops, leaving postharvest residues or limited tillage. In the case of a poor soil structure, the soil aggregate stability can be significantly increased by grassland establishment for at least three years. The application of improving preparation to the soil is not effective and financially demanding.

**Keywords:** soil aggregate stability, soil quality, fertilisation, agronomical practices

# Obsah

1.	Cíl metodiky.....	5
2.	Vlastní popis metodiky.....	6
2.1	Stabilita půdních agregátů a její význam.....	6
2.1.1	Vztah stability půdních agregátů k erozi půdy.....	7
2.1.2	Tvorba a stabilizace agregátů.....	7
2.2	Metody stanovení SAS.....	8
2.2.1	Metoda mokrého prosévání podle Kandelera (1996).....	8
2.2.2	Měření stability půdních agregátů pomocí obrazové analýzy.....	8
2.2.3	Stanovení stability agregátů podle Le Bissonnais (1996).....	9
2.3	Faktory ovlivňující stabilitu půdních agregátů.....	10
2.3.1	Vnější faktory stanoviště.....	10
2.3.2	Vliv půdy.....	11
2.4	Zemědělské hospodaření.....	14
2.4.1	Zpracování půdy.....	14
2.4.2	Vliv hnojení.....	21
2.4.3	Posklizňové zbytky.....	25
2.4.4	Druh plodin a střídání plodin.....	28
2.4.5	Zlepšující přípravky.....	30
3.	Praktická doporučení.....	33
4.	Srovnání novosti postupů.....	34
5.	Popis uplatnění metodiky.....	35
6.	Ekonomické aspekty.....	36
6.1	Stabilita agregátů jako externalita hospodaření na půdě.....	36
6.2	Vlastní ekonomické aspekty.....	39
7.	Seznam použité a související literatury.....	40
8.	Seznam publikací, které předcházely metodice.....	46

## 1. Cíl metodiky

Cílem metodiky je poskytnout odborné veřejnosti informace o stabilitě půdních agregátů a komplexně popsat faktory a opatření, které ji ovlivňují.

Strukturální vlastnosti půdy mají významný vliv na půdní úrodnost a schopnost půdy zadržovat vodu. Struktura půdy je závislá na mnoha faktorech, které jsou z části určeny vlastnostmi daného stanoviště (např. klima, minerální a organická složka půdy, biologická aktivita), zčásti ovlivněny způsobem obhospodařování půdy. Snížení kvality půdní struktury je vnímáno jako forma degradace půdy a projevuje se zhoršením půdních vlastností, utužením půdy a tvorbou nepropustné krusty na povrchu, což se dále projevuje zvýšenou erozí, nízkou retencí vody v krajině a v neposlední řadě snížením úrodnosti půdy. Porozumět procesům, které vedou ke zlepšení stability půdních agregátů, je proto důležité nejen z pohledu produkce potravin plodin, ale i z pohledu životního prostředí. Mezi antropogenní vlivy působící negativně na půdní strukturu řadíme intenzivní kultivaci půd, odvodnění půd, nebo naopak intenzivní zavlažování. Změny v půdní struktuře mohou mít důsledky na lokální i globální úrovni. Zlepšení struktury půdy má potenciál zmírnit dopady změny klimatu, a to sekvestrací uhlíku v půdě.

Strukturální vlastnosti půdy jsou obtížněji měřitelné než chemické či biologické vlastnosti půdy, proto existuje relativně málo prací, které se zabývají touto problematikou komplexně. Tato metodika shrnuje stav současného poznání a na základě výsledků z vlastních dlouhodobých polních pokusů uvádí některé agrotechnické postupy, které pozitivně ovlivňují stabilitu půdních agregátů. V metodice dále navrhuje opatření, která přispívají k zachování nebo zvýšení stability agregátů. Metodika je tak určena především pro zemědělce a farmáře, kteří mohou volbou vhodné agrotechniky částečně ovlivnit strukturu půdy a stabilitu půdních agregátů. Věříme, že se metodika stane užitečnou pomůckou také při technologickém poradenství a při výuce na středních a vysokých zemědělských školách.

## 2. Vlastní popis metodiky

### 2.1 Stabilita půdních agregátů a její význam

Půdní agregace je soubor procesů tvorby a stabilizace půdních agregátů, při kterém jsou agregáty různých velikostí spojovány a drženy pohromadě různými organickými a anorganickými součástmi.

Stabilita půdních agregátů je schopnost agregátů odolávat destrukčním vlivům způsobujícím jejich rozpad. Rozpad půdních agregátů způsobuje kinetická energie dešťových kapek, objemové změny, rozplavovací účinek vody, obdělávání půdy a další faktory. Změny fyzikálních vlastností půdy a snížená schopnost půdních agregátů odolávat destrukčním mechanismům vede ke zhoršené úrodnosti půdy a zvýšenému riziku půdní eroze (Barthes a Roose, 2002). Vodostálost půdních agregátů lze stanovit např. pomocí rozplavování agregátů ve vodě. Vodostálost je pak vyjádřena jako poměr mezi hmotností nerozplavených agregátů k počáteční navážce – čím vyšší kvalita struktury, tím vyšší vodostálost agregátů (Tab. 1).

Tab. 1. Klasifikační stupnice kvality struktury dle Bartlová a kol. 2015.

Vodostálost %	kvalita struktury
< 20	velmi nízká
20,1 - 36	nízká
36,1 - 50	střední
50,1 - 66	vysoká
> 66	velmi vysoká

Agregáty různých velikostních tříd mohou mít různou stabilitu. Agregáty nižšího řádu (menší velikosti) mají vyšší hustotu a větší pevnost než agregáty vyššího řádu, které vznikají jako shluk agregátů nižšího řádu. Při degradaci nejnižšího řádu půdní struktury jsou návazně zničeny i ostatní řády. V dobré půdní struktuře jsou všechny řády dobře vyvinuté a jsou stabilní vůči působení vody a vnějších mechanických stresů (Dexter, 1988).

Existence a udržení stabilních půdních agregátů jsou nezbytné pro zachování půdní úrodnosti. Zdravá půda je optimálně kyprá, drobivá a obsahující porézní shromáždění stabilních agregátů. V takových podmínkách půda umožňuje volný vstup a pohyb vody a vzduchu, jednodušší obdělávání a pěstování, neomezuje klíčení, ujímání sazenic a růst kořenů (Hillel, 2004).

Stabilita půdní struktury a uspořádání půdního porézního systému ovlivňuje půdní hydraulické vlastnosti (Kodešová a kol., 2006). Snížená stabilita půdních agregátů může snížit infiltraci vody a produkci plodin díky následnému nedostatku vody v sušším období, nebo může zvýšit nežádoucí zamokření, způsobit krustování a erozi. Z hlediska vodní bilance je důležité, že míra infiltrace neovlivňuje pouze hospodaření s vodou u rostlin, ale také intenzitu povrchového odtoku. Snížená infiltrace zvyšuje nebezpečí půdní eroze a povodní.

### 2.1.1 Vztah stability půdních agregátů k erozi půdy

Na území České republiky je asi 50 % orné půdy ohroženo vodní erozí a asi 10 % větrnou erozí (Janeček a kol., 2012). Na vodní erozi a následnou ztrátu půdy má vliv řada faktorů – kinetická energie deště, vlastnosti samotné půdy (tzv. erodovatelnost), délka a sklon svahu, ochranný vliv vegetace, přítomnost protierozních opatření a jejich účinnost. Erodovatelnost půdy souvisí zejména s texturou a strukturou ornice, obsahem organické hmoty a propustností půdního profilu. Rozplavování nebo mechanickým tlakům a následné erozi nejlépe odolávají větší agregáty. Soudržnost agregátů je vyšší u půd s vyšším podílem jemnějších částic, vyšším podílem organické hmoty, přítomností vápníku a hlinitých a železitých sesquioxidů. I když zvýšení obsahu jílu nemusí vždy vést ke zvýšení stability agregátů (Reichert a kol., 2009), u písčitéjších půd obecně dochází k rychlejšímu rozpadu agregátů. Obecně lze jako nejvhodnější strukturu půdy považovat strukturu drobtovitou s vyrovnaným poměrem kapilárních a gravitačních pórů.

Vlivem srážek dochází u nestabilní povrchové vrstvy k rozplavení agregátů, vyplavení jemných částic do pórů a následně k zanesení pórů. V důsledku tohoto procesu vzniká na povrchu půdy stmelená vrstva (půdní krusta), která se vyznačuje sníženou schopností infiltrace. Tímto se snižuje propustnost půdy pro vodu a dochází k rychlejší tvorbě povrchového odtoku a následné erozi půdy. Vyšší stabilita agregátů zajišťuje nižší náchylnost k rozplavení a zamezuje vytvoření půdní krusty.

Mimo vlivu deště působí na stabilitu půdních agregátů také faktor teploty. V důsledku promrznutí půdy a vyšší vlhkosti půdy dochází v období tání k výraznému rozpadu agregátů, snížení infiltračních schopností půdy a tvorbě půdních krust a následné erozi půdy.

### 2.1.2 Tvorba a stabilizace agregátů

Půdní agregáty jsou výsledkem přeuspořádání, spájení a zpevnění stavebních částic agregátů (Duiker a kol., 2003). Podle velikosti lze agregáty rozdělit na mikroagregáty (agregáty menší než 0,25 mm), makroagregáty (0,25 – 50 mm) a megaagregáty (nad 50 mm). Stavební částice agregátů jsou tvořeny z půdního organického uhlíku (SOC – soil organic carbon), bioty a jejich organických produktů, vyměnitelných kationtů, které vážou jednotlivé komponenty agregátů (především  $\text{Ca}^{2+}$ ) a minerální složky, která je tvořena především jílovými minerály, (oxo)hydroxidy Al a Fe, karbonáty, fosfáty, sírany apod. (Bronick a Lal, 2005).

Tab. 2. Hlavní organické tmely podílející se na stabilizaci půdních agregátů (Cambardella. 2002).

Činitel	Proces	Hlavní stupeň agregace
humusové látky	tvorba silné vazby s půdními minerálními složkami	základ tvorby mikroagregátů
polysacharidy	působí jako tmely organo-minerální spojování	stabilizace mikro a makroagregátů
kořeny rostlin	zaplévání půdních agregátů vylučování polysacharidů	tvorba makroagregátů a krátkodobé vazby
hyfy hub	zaplévání půdních agregátů vylučování polysacharidů	tvorba makroagregátů a krátkodobé vazby
žížaly	míchání organické hmoty a jílových koloidů míchání rozkládajících se zbytků s půdou	tvorba makroagregátů



## 2.2 Metody stanovení SAS

Existuje mnoho metod stanovení stability půdních agregátů. Metody se liší charakterem analyzovaného vzorku, mechanismem působícím rozpad agregátů, metodikou stanovení nebo vyjádřením výsledku. V následující kapitole jsou popsány vybrané metody stanovení agregátů. Postupy a přehled dalších metod je uveden například v Nimmo a Perkins (2002).

### 2.2.1 Metoda mokrého prosévání podle Kandelera (1996)

Vodostálost půdních agregátů je vyjádřena jako procento stabilních agregátů z celkového množství agregátů po odečtení obsaženého písku.

#### Postup

Ze vzorků půdy vysušených při pokojové teplotě se pomocí sít šetrně vyseparují agregáty o velikosti 1–2 mm. Z takto připraveného vzorku se naváží 4 g (s přesností 0,0001 g) a převedou se do rozplavovacích síték speciálního přístroje, ve kterém se sítko během 5 minut střídavě ponořují a vynořují nad hladinu vody. Poté se vzorky vyndají, položí do mističek dnem vzhůru a destilovanou vodou se vymyjí tak, aby na nich nic nezůstalo. Mističky se vzorkem se vysuší při 105 °C po dobu 24 h. Poté se ponechají v exikátoru, aby vychladly a následně se zváží. Do zvážených vzorků se přidá přiměřené množství roztoku dispergačního činidla ( $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ). Po 2 hodinách působení se půdní částice rozetrou stěrkou a suspenze se opětovně nalije na sítko do přístroje na rozplavování. Po 5 minutách promývání se sítko i s rozpuštěnými půdními agregáty a zbylým pískem propláchnou proudem vody, dokud odtékají jílové částičky. Zbylý písek se vypláchne zpět do příslušných mističek, vysuší při 105 °C po dobu 24 h a po vychladnutí opět zváží. Procento stabilních půdních agregátů se vypočítá podle rovnice:

$$\% \text{ SAS} = \frac{(M_2 - M_3)}{w - (M_3 - M_1)} \cdot 100$$

Kde  $M_1$  je hmotnost misky [g];  $M_2$  hmotnost misky, stabilních agregátů a písku [g];  $M_3$  hmotnost misky a písku [g];  $w$  navážka vzorku; 100 přepočítávací faktor.

### 2.2.2 Měření stability půdních agregátů pomocí obrazové analýzy

Rozpad půdních agregátů při náhlém ponoření do vody lze snímat pomocí digitální kamery se simultánním softwarovým vyhodnocením velikosti plochy, na kterou se agregát rozpadne. Čím větší je plocha zabraná materiálem z rozpadajícího se agregátu, tím je agregát méně stabilní. Tento způsob digitálního snímání umožňuje sledovat rozpad několika agregátů současně a umožňuje také přesnou kvantifikaci změn velikosti plochy, které během rozpadu agregáty zabírají. Metoda hodnocení stability půdních agregátů po náhlém ponoření do vody (Fajardo a kol. 2016) zpřístupněná široké veřejnosti jako aplikace SLAKES, volně dostupná na mobilních zařízeních v prostředí Android a iOS (Fajardo a McBratney, 2019). Tato metoda byla rozpracována na pracovišti autorů metodiky a vyústila v navržení nových postupů, které umožňují rychlé a efektivní stanovení stability půdních agregátů v praxi (Madaras a kol. 2019, 2020; Madaras a Krejčí, 2020).

### **2.2.3 Stanovení stability agregátů podle Le Bissonnais (1996)**

Le Bissonnais (1996) navrhl metodu, která umožňuje oddělit působení jednotlivých destruktivních mechanismů. V této metodě hraje velkou roli použití etanolu, který zabraňuje opakované agregaci v průběhu prosévání. Agregáty o velikosti 2-5 mm jsou podrobeny třem různým testům. Každý test simuluje jiné působení mechanismu vyvolávající degradaci. První test posuzuje stabilitu agregátů při jejich náhlém zatopení vodou. Při tomto testu se projevuje destrukce vyvolaná roztržením agregátu tlakem vzduchu uvnitř agregátu. Druhý test posuzuje odolnost agregátů vůči degradačním silám působícím při postupném zvlhčování a vysoušení. Sleduje destrukci vlivem objemových změn a fyzikálně chemickou disperzi koloidních částic. Třetí test simuluje mechanické rozrušování agregátů při dopadu dešťových kapek. Posuzuje odolnost agregátů při působení mechanických vlivů, které působí na soudržné síly mezi půdními částicemi.

## 2.3 Faktory ovlivňující stabilitu půdních agregátů

Proces agregace a tvorba agregátů jsou závislé na mnoha faktorech, které zahrnují vnitřní faktory, což jsou vlastnosti půdy, a vnější faktory, což jsou stanovištní podmínky včetně průběhu počasí a způsob obhospodařování půdy. Stanovištní podmínky a klima lze jen těžko ovlivnit, stejně tak minerální složení půdy. Naopak zvolením vhodné agrotechniky lze částečně ovlivnit chemické složení půdy (např. pH, obsah organického uhlíku v půdě, složení půdní organické hmoty), hydrofyzikální vlastnosti půdy (pórovitost, infiltrace vody, stabilita půdních agregátů) a mikrobiální aktivitu.

### 2.3.1 Vnější faktory stanoviště

Při tvorbě půdní struktury hraje zásadní roli klima. Stabilita půdních agregátů souvisí s teplotou a zároveň se mění v závislosti na srážkách. Při zvlhčení půdy dochází k hydrataci, která působí bobtnání půdních agregátů, naopak při schnutí půdy se agregáty smršťují a tvoří se trhliny. Tyto objemové změny závisejí na obsahu jílovitých částic a specifikách půdotvorného substrátu. Bylo zjištěno, že vliv teploty na strukturální stabilitu byl největší v půdách bohatých na uhličitany s nízkým obsahem jílu a organického uhlíku a nejmenší v půdách bohatých na organický uhlík (Kelishadi a kol., 2018). Stabilita agregátů klesala se zvyšováním okolní teploty na suchých a polosuchých vápenatých půdách, zejména v důsledku změn v distribuci pórů. Počet makropórů se zvýšením teploty výrazně poklesl, naopak počet mikropórů se nezměnil. Tato zjištění naznačují, že struktura půdy je poškozena působením vysokých teplot a dochází k „rozvolnění“ mezičásticových vazeb, což vede ke zničení makropórů.

Role klimatu pro stabilitu půdních agregátů je silně závislá na půdním druhu (Dowdeswell-Downey a kol., 2020). Zatímco vyšší teploty signifikantně zvýšily stabilitu půdních agregátů v případě jílovitohlinitých půd, vyšší vlhkost snížila stabilitu na písčitohlinitých půdách. Naopak v semiaridním a aridním pásmu vysoké teploty ovlivňují stabilitu agregátů negativně (Habel, 2013; Lavee a kol., 1996). Cerda (2000) potvrdil silnou pozitivní závislost stability půdních agregátů na srážkách - agregáty na plochách s úhrnem 900-1000 mm srážek za rok byly 2 až 4krát stabilnější než na plochách s úhrnem 300-400 mm.

Stabilita agregátů rovněž závisí na obsahu vody v půdě v době jejího zamrznutí. Změna skupenství kapilární a nekapilární vody v led přispívá k tvorbě půdní struktury během zimy. S narůstajícím obsahem vody při zamrznutí se lineárně snižuje makroagregátová stabilita (Bullock a kol., 1988). Zamrznutí agregátů způsobí expanzi ledových krystalů mezi částicemi, rozbití vazeb mezi částicemi a rozštěpení agregátů na menší agregáty. Během tání fungují pouze malé vazby mezi mikroagregáty, póry vzniklé při expanzi ledu se hroutí. Vlastnosti zhutněných jílovitých půd se mrznutím zlepšují, protože dochází k rozbití půdy, čímž se zvyšuje provzdušnění a odvodnění. Vlastnosti nezhutněných půd mohou být mrazem zhoršeny z důvodu změn v mikrostruktuře tlakem ledu.

Na tvorbě půdní struktury se významně podílejí také živé organismy – kořeny rostlin, půdní mikroby a půdní fauna (Carter, 2004). Kořeny vylepšují makroagregátovou stabilitu – zachycují

jemné částice do stabilních agregátů, suší okolní prostředí, zásobují půdu rozložitelnými organickými residui, podporují mikrobiální populaci v rhizosféře, poskytují potravu pro půdní faunu a zvyšují koncentraci iontů v roztoku. Kořeny různých druhů rostlin ovlivňují půdní strukturu různě, na základě rozdílné architektury a funkce kořenů. Obecně, jednoděložné rostliny stabilizují agregáty více než dvouděložné. Spolu s kořenovou soustavou se na tvorbě makroagregátů podílejí mykorrhizní a saprofytické houby, hyfy a půdní fauna. Právě symbiotické endomykorrhizní houby, které prorůstají kořeny rostlin, mají nejvýznamnější efekt ze všech biotických činitelů na tvorbu a stabilitu půdních agregátů (Bronick a Lal, 2005). Tuto funkci autoři připisují mimo jiné látce zvané glomalin, glykoproteinu vylučovanému hyfami endomykorrhizních hub. Kromě sekrece proteinového „lepidla“, hyfy hub i fyzicky spojují dohromady složky agregátů a přispívají k stabilizaci makroagregátů.

Větší půdní fauna ovlivňuje cyklus živin, schopnost agregace půdních částic a propustnost půdy. Např. žížalí chodbičky zvyšují schopnost infiltrace, výměnu plynů a růst kořenů. Ostatní fauna jako např. hlístice, pavouci a larvy mohou formovat půdní strukturu vytvářením tzv. biopórů.

Mikroagregáty stmeluje komplex produktů mikrobiální aktivity půdy, jako jsou samotné polysacharidy, slizovité filmy bakteriálních kolonií a houbových vláken.

### **2.3.2 Vliv půdy**

Tvorba a stabilita půdních agregátů jsou významně ovlivněny půdními vlastnostmi. Jedná se o souhrn mineralogických, geochemických, fyzikálních a mikrobiologických vlastností, které se navzájem ovlivňují a spolu s dalšími faktory utvářejí vlastnosti půdních agregátů.

Na agregaci mají vliv obsah a mineralogie frakce jílu, kationtová výměnná kapacita (CEC), půdní pH, porozita a půdní voda. Faktory jako rozpustnost oxo-hydroxidů kovů (např. Fe, Al), mikrobiální aktivita a disperze jílu jsou zároveň velmi závislé na pH půdy.

Obsah stabilních agregátů obecně roste s rostoucím obsahem půdního organického uhlíku (SOC – soil organic carbon), měrným povrchem minerálů a s rostoucí kationtovou výměnnou kapacitou (CEC). V půdách s nízkým obsahem SOC nebo frakce jílu se může na agregaci více podílet obsah kationtů a opačně.

Ke stabilitě půdních agregátů přispívají reaktivní minerální složky půd – vrstevnaté silikáty, krystalické, špatně krystalické a amorfnní (oxo)hydroxidy Fe a Al, alumosilikáty a organokovové komplexy. Každá z těchto složek se liší měrným povrchem, reaktivitou, rozpustností a sorpční kapacitou (Sposito a kol. 1999). Mineralogie půdy má podstatný vliv na disperzi jílu, a tím ovlivňuje stabilitu agregátů, odtok a ztráty půdy (Lado a Ben-Hur, 2004).

#### Jílové minerály

Jílové minerály (vrstevnaté silikáty – fylosilikáty: slídy, chlority, smektit a kaolinit) zvyšují zadrženi vody v půdách. Fylosilikáty, které mají nízký až téměř nulový permanentní náboj jako např. kaolinit, jsou hydrofobní a mají nízkou tendenci rozptylu (disperze) ve vodě (Lado a Ben-

Hur, 2004). Minerály skupiny smektitu a vermikulitu jsou naopak hydrofilní. Snadno se ve vodě dispergují a mohou na svém povrchu vázat kladně nabitě kationty a funkční skupiny. Tyto minerály v závislosti na vlhkosti okolí bobtnají nebo se smršťují. Zvyšují CEC půd a obsahem vyměnitelných kationtů (především  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) podporují stabilizaci agregátů. Zároveň ale díky cyklům sušení a vlhčení jsou agregáty snadněji rozpojitelné. Jílové minerály skupiny smektitu mají proto mnohem silnější účinek na rozpad agregátů než jílové minerály jako kaolinit a chlorit (Bronick a Lal, 2005).

Ve frakci jílu půd se fylosilikáty vyskytují pouze v malém množství jako jednotlivé fáze (kaolinit, illit, méně chlorit), především jsou zastoupeny ve formě smíšeněvrstevných minerálů.

Vlastnosti jílových minerálů se mohou měnit v závislosti na vlastnostech půdního prostředí. Při nižších hodnotách pH, v oxidačních podmínkách s častými cykly vlhčení a sušení a při nízkém obsahu půdní organické hmoty může v mezivrstvi smektitů a vermikulitů vznikat neúplné Al-hydroxidové mezivrstvy, které snižuje schopnost bobtnání a zadržení vody (Georgiadis a kol., 2020).

#### (Oxo)hydroxidy, amorfni alumosilikáty a vícevalentní kationty

Navzdory jejich malému příspěvku ve hmotnosti půdy, hrají oxidy železa zásadní roli ve vazbě částic do agregátů. Fe-(oxo) hydroxidy mají velkou povrchovou plochu, dostupnou pro sorpci SOC, stabilizují SOC a podporují tvorbu organo-minerálních asociací v půdách (Regelink a kol., 2013). Fe-(oxo) hydroxidy mají schopnost tvořit pevné vazby s částicemi jílu, prachu i písku a tím mohou poskytnout sorpční místa pro organické látky na jejich málo reaktivních površích (Sei a kol., 2002). Povlak Fe-(oxo) hydroxidů usnadňuje interakce mezi většími minerálními částicemi a organickými látkami. Fe-(oxo)hydroxidy tím podporují tvorbu malých agregátů z částic, které by se jinak agregace neúčastnily (např. zrna křemene).

Na povlaku Fe-(oxo)hydroxidů se může vytvářet souvrství organických látek. V kontaktní zóně na povrchu se nachází pevně vázaná organická hmota. Její hydrofobní části zasahují do roztoku a působí jako sorbent pro druhou vrstvu, kterou tvoří ostatní organické látky, jako jsou např. sacharidy a glomalin. Ve vnější třetí vrstvě se pak nachází organické látky volně vázány prostřednictvím kationtových můstků a hydrofobních interakcí (Kaiser a kol., 2012).

Fe-(oxo)hydroxidy i SOC přispívají k tvorbě pórů. Regelink a kol. (2015) popisují silnou pozitivní korelaci mezi SAS, obsahem amorfních a špatně krystalických Fe-(oxo)hydroxidů a pórovitostí půdy a uvádí, že jejich příspěvek k agregaci je nejsilnější u nejmenších velikostí agregátů.

Vícevalentní  $\text{Al}^{3+}$  a  $\text{Fe}^{3+}$  kationty zlepšují půdní strukturu tvorbou organo-kovových komplexů a gelů (Amezketá, 1999). Tvoří přemostění mezi dalšími složkami půdy, typicky mezi funkčními skupinami organické hmoty a/nebo záporně nabitými povrchy jílových minerálů (Kleber a kol., 2015).

#### Půdní reakce

Hodnota pH odráží celkový chemický stav půdního systému, určuje geochemické gradienty, včetně míry rozpouštění kovů, reaktivity půdních komponent, náboje minerálů a organických molekul a převažující typ vazby. Tyto faktory mají následně vliv na agregaci.

Mechanismus, který stabilizuje půdní organickou hmotu se mění podle měnícího se pH. Koncentrace  $\text{Al}^{3+}$  a  $\text{Fe}^{3+}$  silně rostou s klesajícím pH v důsledku rozpouštění Fe- a Al-(oxo)hydroxidů, zatímco při hodnotě pH nad 6,5 se zvyšuje vliv vyměnitelných kationtů, především  $\text{Ca}^{2+}$  na stabilizaci půdní organické hmoty, při pH pod 6,5 nejvíc ovlivňují agregaci špatně krystalické a amorfny (oxo)hydroxidy a alumosilikáty a Al-, Fe- organo-kovové komplexy, které jsou hlavním faktorem při pH pod 5,5.

Pro kyselé půdy stejné množství půdní organické hmoty odpovídá vyšší stabilitě agregátů ve srovnání s půdami s neutrálním až mírně alkalickým pH. Nižší pH odpovídá vyššímu obsahu huminových kyselin na minerálních površích, zvýšení tloušťky organo-minerální vrstvy na minerálních površích a zvýšením vazebné síly mezi organicky potaženými částicemi. S klesajícím pH, klesají elektrostatické odpuzivé síly mezi záporně nabitými látkami a tendence organických a minerálních částic ke srážení se zvyšuje (Tombacz a Szekeres, 2004).

### Organická hmota

Organickou hmotou se rozumí veškeré živé i neživé složky pevné fáze půdy organického původu. Neživé části organického podílu můžeme rozdělit na primární organickou hmotu a humusové látky. Mezi pozitivní vlivy primární organické hmoty lze zařadit snížení objemové hmotnosti půdy, zvýšení pórovitosti, což dále ovlivňuje transport vody v půdě a zlepšuje schopnost půdy zadržovat vodu ze srážek, přestože na rozdíl od humusových látek není schopná vodu vázat. Dalším prvkem organického podílu půdy jsou humusové látky. Humusové látky dlouhodobě zvyšují infiltraci vody do půdy, ve své struktuře jsou schopny vodu zadržet. Takto zadržovaná voda může být využívána rostlinami, na rozdíl od vody pevně vázané na minerální koloidy.

Půdní organická hmota může mít jak pozitivní, tak i negativní vliv na stabilitu agregátů. Dodání nebo uvolnění jednoduchých organických aniontů jako jsou fulváty, citráty, oxaláty, salicyláty, aspartáty, laktáty a acetáty do půdy se zvyšuje disperze jílu. Naopak, přítomnost aromatických sloučenin způsobuje vyšší pravděpodobnost spojování ve větší částice. Řada prací uvádí pozitivní korelace mezi organickou hmotou a vodostí agregátů (Amézqueta, 1999). Rozdílné působení organické hmoty na stabilitu agregátů lze částečně vysvětlit, pokud rozdělíme stabilitu agregátů na stabilitu mikroagregátů a makroagregátů. Poté lze říci, že organická hmota snižuje stabilitu mikroagregátů a zároveň zvyšuje stabilitu makroagregátů. Organické vazby stabilizují makroagregáty proti rozplavení, ale jestliže dojde k rozbití těchto vazeb a k desagregaci, organická hmota pak může působit jako disperzní činidlo (Goldberg a kol., 1990).

Spojením huminových kyselin a jílových minerálů vznikají organominerální komplexy, které jsou vysoce stabilní, v půdě vytvářejí velké množství dutin a vnitřních prostorů (vyšší pórovitost) a jsou dobrým předpokladem pro tvorbu dobré a stabilní struktury půdy. Organominerální komplexy hrají významnou roli ve stabilizaci mikroagregátů (Tisdall a Oades, 1982).

## 2.4 Vliv zemědělského hospodaření

### 2.4.1 Zpracování půdy

Zpracování půdy je jednou z hlavních technik hospodaření na půdě. Je používáno k přípravě seťového lůžka a zakládání porostů polních plodin, zapravování hnojiv a zbytků rostlin do půdy a k regulaci plevelů. Zpracování půdy tak zahrnuje řadu rozdílných zásahů (orbu, podrývání půdy, kypření, vláčení, válení) a jejich modifikací používaných v různých kombinacích.

Způsob a intenzita zpracování půdy jsou významné faktory ovlivňující strukturu půdy a stabilitu půdních agregátů. Při hodnocení vlivu zpracování půdy na stabilitu struktury půdy jsou dosahovány rozdílné a často kontroverzní výsledky.

Zpracování půdy nepřímo ovlivňuje stabilitu půdních agregátů především prostřednictvím vlivu na půdní vlhkost (Mahboubi a kol., 1993), redistribuci půdní organické hmoty a mikrobiální aktivitu (Carter, 1992), složení půdního roztoku (Naidu a kol., 1996) a populaci půdní fauny (Amézketa, 1999).

Mnoho studií prokázalo, že intenzivní zpracování půdy zhoršuje strukturu půdy a zvyšuje erozi půdy (Kladivko, 2001). Zejména orba, která mísením ředí organickou hmotu v povrchovém horizontu na ní bohatém s horizonty s jejím nízkým obsahem, může narušit kontinuitu pórů v půdě a stabilitu agregátů, jejichž velikost se snižuje (Al-Kaisi a kol. 2014). Rozpad půdních agregátů zvyšuje dostupnost a kontakty organické hmoty s mikroorganismy, které ji rozkládají (Roberson a kol., 1991). Výsledkem je podpora mineralizace a úbytek organické hmoty (Liang a kol. 2009). Pokles organické hmoty v půdě je obvykle doprovázen poklesem počtu vodostálých agregátů (Six a kol. 1999), což zvyšuje riziko eroze a vytváření škraloupy na povrchu půdy (Hamza a kol. 2005).

Intenzivní postupy zpracování však mohou také způsobit nadměrné zhutnění půdy a zhoršit její strukturu, zejména při vysoké vlhkosti půdy (Carter, 1994). Vyšší četnost pojezdů zemědělské techniky vede k vyššímu zatížení půdy, které způsobuje její zhutňování ve větších hloubkách včetně orničního podloží (Soane a kol., 1982).

Zpracování půdy může zvýšit infiltraci, když narušuje povrchové krusty, nakypřuje utužené vrstvy půdy nebo vytváří povrchové nerovnosti pro zachycování vody (Unger, 1992). Zpracováním půdy (kromě válení) jsou v půdě vytvářeny makropóry (Gibbs a Reid, 1988; Dexter, 1988). Mnoho půd potřebuje pravidelné obdělávání, aby se zabránilo nadměrnému zhutnění nebo se zlepšila jejich struktura (Carter, 1994).

Zpracování půdy může snížit infiltraci vody přerušením kontinuity biopórů v hloubce prováděné operace (Tisdall a kol., 1978). Mnoho půd vystavených časté a intenzivní kultivaci trpí zhoršením struktury, což se projevuje snížením stability agregátů. Zpracování půdy narušuje životní prostředí větších organismů žijících v půdě a snižuje jejich počet (Oades, 1993).

Při porovnání čtyř různých systémů hospodaření bylo zjištěno, že nejintenzivnější systém z hlediska zpracování půdy měl nejnižší stabilitu makroagregátů (Amézketa a kol., 1996 in Amézketa 1999). Podobně Tisdall a Oades (1982) uvádějí, že stabilita agregátů je zvýšena na pastvinách a klesá s intenzitou zpracování půdy. Watts a kol. (1996) zjistili, že agregáty hodnocené po zpracování půdy vykazovaly větší množství rozptýleného jílu než agregáty hodnocené bezprostředně před zpracováním půdy. Také pozorovali, že vyšší intenzita zpracování půdy vedla k vyšší disperzi jílu při určitém obsahu vody v půdě.

Naopak, přímé setí a omezení zpracování půdy výrazně zvyšuje obsah organického uhlíku v půdě, mikrobiální aktivitu a zlepšuje stabilitu struktury půdy (Carter, 1992; Cambardella a Elliott, 1993). Absence zpracování půdy (NT) má důležitý stabilizační účinek na makroagregaci ve srovnání s jinými způsoby zpracování půdy; agregáty pod NT byly méně vystaveny rozplavování (Angers a kol., 1993).

Podle různých autorů umožňují půdoochranné technologie zpracování půdy či technologie přímého setí dosažení vyšší stability půdní struktury (Carter, 1992; Obalum, 2019). Bartlová a kol. (2015) zaznamenali pozitivní vliv redukováného zpracování půdy jak na vodostálost agregátů, tak i na výnos pěstované plodiny. Kasper a kol. (2009) zjistili při přímém setí až dvojnásobnou stabilitu agregátů v porovnání s konvenčním i redukováným zpracováním půdy. V porovnání s neobdělávanou půdou však měly všechny systémy zpracování půdy negativní vliv na vodostálost agregátů.

Metody konzervačního zpracování půdy omezují erozi půdy (Wollenhaupt a kol., 1995). V důsledku toho se konzervační zpracování půdy (přímé setí, omezení kultivačních zásahů, zachování strniště) stalo předmětem zájmu jako metoda pro snížení degradace půdy a také zachování půdní vlhkosti a je vnímáno jako účinný postup ochrany půdy a udržitelného zemědělství (Topa a kol. 2021). Přehled strategií konzervačního zpracování půdy pro vlhké oblasti mírného pásma uvádí Carter (1994).

Při omezeném zpracování půdy se zbytky plodin rozkládají pomaleji, což vede k postupnému hromadění a nárůstu organického uhlíku v půdě. Výsledný substrát z rozkladu reziduí přispívá ke stabilizaci půdních agregátů (Six a kol., 2004). Kromě těchto pozitivních efektů je však ponechání posklizňových zbytků na povrchu půdy nebo jejich mělké zapravení v povrchové vrstvě půdy určitým handicapem těchto technologií. Zatímco zpracování půdy orbou zajišťuje více méně rovnoměrné zapravení organické hmoty do orané vrstvy půdy, redukováné, půdoochranné zpracování půdy nebo přímé setí vytváří klesající gradient obsahu organické hmoty od povrchu směrem do hloubky půdy (Fierer a kol., 2003). Ponechání posklizňových zbytků na povrchu půdy ve vlhkém počasí také vede k šíření chorob s negativním vlivem na výnosy.

#### Hodnocení tří způsobů zpracování půdy a zakládání porostů ozimé pšenice a jarního ječmene

V letech 2018-2021 byl v dlouhodobých maloparcelních pokusech na dvou lokalitách Žabčice a Ivanovice na Hané (Tab. 3) hodnocen výnos zrna (t/ha) a stabilita půdních agregátů (SAS, %) metodou mokrého prosévání podle Kandelera (1996) při pěstování ozimé pšenice po dvouleté



vojtěšce a jarního ječmene po cukrovce s využitím tří způsobů zpracování půdy a zakládání porostu (Tab. 4).

Tab. 3. Charakteristika lokalit s dlouhodobými maloparcelními pokusy.

Lokalita/ Charakteristika	Žabčice (ŽB)	Ivanovice na Hané (IH)
Půdní typ	fluvizem glejová	černozem degradovaná
Půdní druh	jílovito hlinitá	hlinitá
Nadmořská výška	184 m	225 m
Průměrná denní teplota	9,2 °C	8,8 °C
Roční suma srážek	483 mm	549 mm
Výrobní oblast	kukuřičná	řepařská
Klimatický region	velmi teplý suchý	teplý, mírně suchý

Tab. 4. Hodnocené varianty v maloparcelních stacionárních polních pokusech se 4 opakováními.

Číslo	Označení varianty	Hloubka zpracování půdy (cm)
1	PS-OP-ŽB	0
2	K-OP-ŽB	12-15
3	O-OP-ŽB	20-24
4	PS-OP-IH	0
5	K-OP-IH	10
6	O-OP-IH	22
7	PS-JJ-ŽB	0
8	K-JJ-ŽB	12-15
9	O-JJ-ŽB	20-24
10	PS-JJ-IH	0
11	K-JJ-IH	10
12	O-JJ-IH	22

Varianty zpracování půdy: **PS** – přímé setí / **K** – kypření, redukované zpracování / **O** – orba  
 Plodiny a předplodiny: **OP** – ozimá pšenice po dvouleté vojtěšce / **JJ** – jarní ječmen po cukrovce  
 Lokality: **ŽB** – Žabčice / **IH** – Ivanovice na Hané

#### Popis pokusu v Žabčicích:

Po sklizni vojtěšky aplikován totální herbicid na ukončení její vegetace a na variantách K a O byla provedena podmínka do hloubky 12-15 cm, na variantě PS nebyla podmínka provedena. Následně bylo na všech třech variantách provedeno hnojení 90 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha (trojitý superfosfát 45 %, 200 kg/ha), 120 kg K<sub>2</sub>O/ha (draselná sůl 60 %, 200 kg/ha). Na variantě PS byla minerální hnojiva aplikována bez zapravení do půdy, na variantě K byla zapravena kypřením do hloubky 12-15 cm a na variantě O střední orbou do hloubky 20-24 cm. Následně bylo provedeno založení porostu ozimé pšenice secí kombinací s aktivními branami výsevkem 350–400 semen/m<sup>2</sup> podle vláhových

podmínek. Během vegetace byla ozimá pšenice hnojena regenerační dávkou dusíku (BBCH 23) 50 kg N/ha (ledek amonný s vápencem) a produkční dávkou (BBCH 30) 30 kg N/ha (DAM 390). Ochrana porostu byla prováděna podle výskytu škodlivých činitelů.

Předplodinou jarního ječmene byla cukrovka hnojená chlévským hnojem v dávce 25 t/ha. Po její sklizni bylo na všech třech variantách provedeno podobně jako po vojtěšce hnojení 90 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha, a 120 kg K<sub>2</sub>O/ha na variantě PS bez zapravení, na variantě K byla minerální hnojiva zapravena kypřením do hloubky 12-15 cm a na variantě O střední orbou do hloubky 20-24 cm. Na jaře následujícího roku byl aplikován dusík v dávce 40 kg N/ha ve formě ledek amonný s vápencem a provedeno smykování povrchu půdy na všech variantách. Následovalo setí secí kombinací a aktivními branami výsevkem 350–400 semen/m<sup>2</sup> podle vláhových podmínek.

Sklizeň ozimé pšenice i jarního ječmene byla provedena sklízecí mlátičkou SAMPO 2010 (Sampo Rosenlew, Pori, Finland), výnos zrna byl přepočten na 14% vlhkost.

#### Popis pokusu v Ivanovicích na Hané:

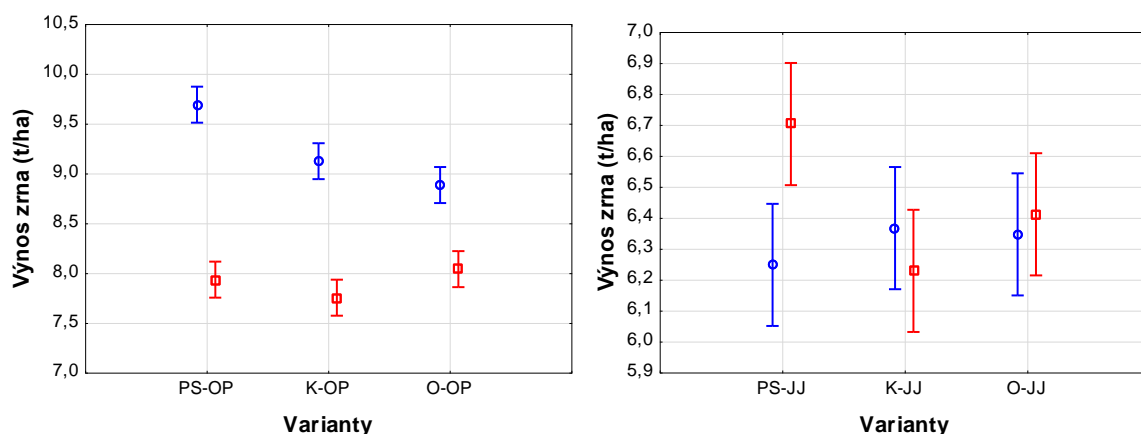
Po sklizni vojtěšky aplikován totální herbicid na ukončení její vegetace a na variantách K a O byla provedena podmítka do hloubky 10 cm, na variantě PS nebyla podmítka provedena. Následně bylo na všech třech variantách provedeno hnojení 92 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha (trojitý superfosfát 45 %, 204 kg/ha), 96 kg K<sub>2</sub>O/ha (draselná sůl 60 %, 160 kg/ha). Na variantě PS byla minerální hnojiva aplikována bez zapravení do půdy, na variantě K byla zapravena kypřením do hloubky 10 cm a na variantě O střední orbou do hloubky 22 cm. Na všech variantách byla půda urovnána kompaktořem a následně aplikováno 60 kg N/ha v síranu amonném. Ten byl zapraven kompaktořem při předset'ové přípravě. V první dekádě října bylo provedeno setí ozimé pšenice secí kombinací výsevkem 400 semen/m<sup>2</sup>. Během vegetace byla ozimá pšenice hnojena regenerační dávkou dusíku (BBCH 23) 30 kg N/ha a produkční dávkou (BBCH 31) 30 kg N/ha (ledek amonný s vápencem). Ochrana porostu byla prováděna podle výskytu škodlivých činitelů.

Předplodinou jarního ječmene byla cukrovka hnojená chlévským hnojem v dávce 40 t/ha. Po její sklizni bylo na všech třech variantách provedeno hnojení 69 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha a (trojitý superfosfát 45 %, 153 kg/ha), a 72 kg K<sub>2</sub>O/ha (draselná sůl 60 %, 120 kg/ha) na variantě PS bez zapravení, na variantě K byla minerální hnojiva zapravena kypřením do hloubky 10 cm a na variantě O střední orbou do hloubky 22 cm. Na jaře následujícího roku bylo provedeno urovnání povrchu půdy kompaktořem a aplikován dusík v dávce 40 kg N/ha ve formě ledku amonného s vápencem a předset'ová příprava druhým ošetřením kompaktořem na všech variantách. Následovalo setí secí kombinací výsevkem 400 semen/m<sup>2</sup>.

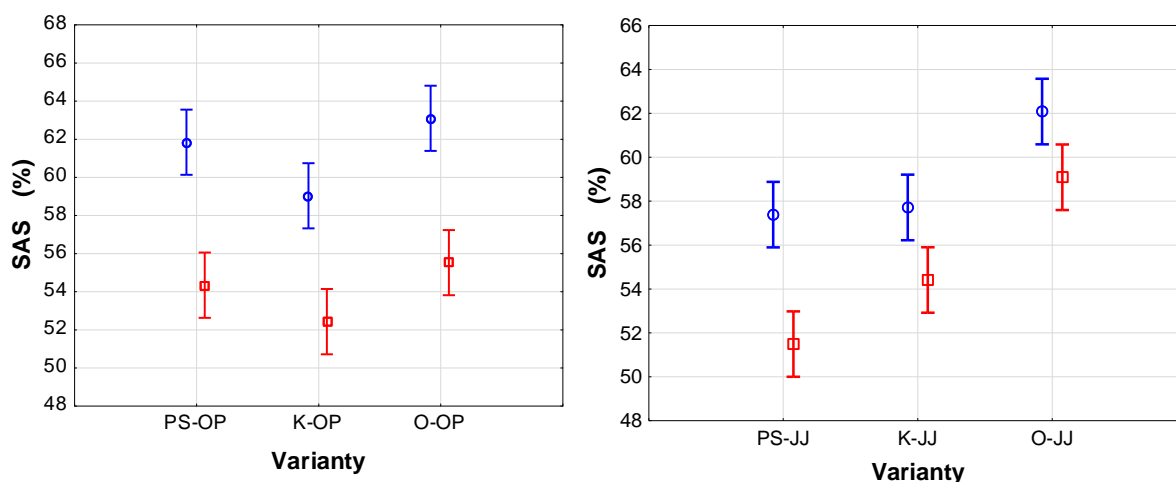
Sklizeň ozimé pšenice i jarního ječmene byla provedena maloparcelní sklízecí mlátičkou, výnos zrna byl přepočten na 14% vlhkost.

Vzorkování půdy bylo na obou lokalitách prováděno ve dvou termínech: jarní (konec dubna a květen) a letní (srpen). Vzorky byly odebírány z vrchní vrstvy půdy (0-5 cm), mezi řádky obilnin speciální lopatkou, náhodně uvnitř parcel, nejméně 50 cm od jejich okrajů. Vybrané výsledky

čtyřletého hodnocení (2018-2021) jsou graficky znázorněny pro výnosy zrna na Obr. 1 a pro stabilitu půdních agregátů na Obr. 2.



Obr. 1. Výnosy zrna ( $t \cdot ha^{-1}$ ) ozimé pšenice (OP) po dvouleté vojtěšce (vlevo) a jarního ječmene (JJ) po cukrovce (vpravo) při různém způsobu zpracování půdy (PS – přímé setí, K – kypření, redukované zpracování, O – orba). Konfidenční intervaly charakterizují měření provedená ve 4 letech, na 4 opakováních,  $n = 16$  (modrá – Žabčice, červená – Ivanovice na Hané).



Obr. 2. Hodnoty SAS (%) zjištěné při pěstování ozimé pšenice (OP) po dvouleté vojtěšce (vlevo) a jarního ječmene (JJ) po cukrovce (vpravo) při různém způsobu zpracování půdy (PS – přímé setí, K – kypření, redukované zpracování, O – orba). Konfidenční intervaly charakterizují měření provedená ve 4 letech, na 4 opakováních,  $n = 16$  (modrá – Žabčice, červená – Ivanovice na Hané).

## Výsledky

Rozdíly mezi variantami znázorněné na Obr. 2 nejsou v souladu s obecně přijímanými závěry o vztazích mezi intenzitou zpracování půdy a stabilitou půdních agregátů, uváděnými v odborné literatuře a shrnuté v přecházejícím textu. K vysvětlení tohoto nesouladu lze využít výsledky analýz variance uvedené v Tab. 5 pro výnos zrna a v Tab. 6 pro SAS. Z Tab. 6 je zřejmé, že

působení všech hodnocených faktorů (varianty zpracování půdy, lokality, roky a termíny odběru vzorků půdy) na hodnoty SAS bylo statisticky průkazné. Statisticky průkazná byla také většina jejich interakcí. Podobně výnos zrna pšenice pěstované po vojtěšce byl statisticky průkazně ovlivněn variantami zpracování půdy, lokalitami a roky, průkazné byly rovněž jejich interakce, s výjimkou interakce variant zpracování půdy s roky, která byla na hranici průkaznosti (Tab. 5). U výnosu jarního ječmene pěstovaného po cukrovce byla z hodnocených faktorů zjištěna statistická průkaznost pouze u vlivu roků.

Tab. 5. Analýza variance výnosu zrna (t. ha<sup>-1</sup>) porovnávaných variant zpracování půdy při pěstování ozimé pšenice po vojtěšce a jarního ječmene po cukrovce.

Zdroje variability	DF	Ozimá pšenice		Jarní ječmen	
		MS	p	MS	p
Varianty (A)	2	1,41	0,000	0,25	0,206
Lokality (B)	1	42,06	0,000	0,39	0,120
<b>Roky (C)</b>	<b>3</b>	<b>158,71</b>	<b>0,000</b>	<b>46,98</b>	<b>0,000</b>
Varianty*Lokality (AxB)	2	1,68	0,000	0,73	0,013
<b>Varianty*Roky (AxC)</b>	6	0,12	0,502	<b>0,90</b>	<b>0,000</b>
<b>Lokality*Roky (BxC)</b>	3	<b>31,47</b>	<b>0,000</b>	0,39	0,067
Varianty*Lokality*Roky (AxBxC)	6	1,17	0,000	0,66	0,001
Chyba	72	0,13			
Celkem	95				

Tab. 6. Analýza variance hodnot SAS (%) porovnávaných variant zpracování půdy při pěstování ozimé pšenice po vojtěšce a jarního ječmene po cukrovce

Zdroje variability	DF	Ozimá pšenice		Jarní ječmen	
		MS	p	MS	p
Varianty (A)	2	211,81	0,000	649,44	0,000
<b>Lokality (B)</b>	1	<b>2506,62</b>	<b>0,000</b>	792,49	<b>0,000</b>
Termíny vzorkování (C)	1	390,62	0,000	<b>1852,34</b>	<b>0,000</b>
Roky (D)	3	425,83	0,000	442,68	0,000
Varianty*Lokality (AxB)	2	4,62	0,824	40,62	0,112
Varianty* Termíny vzorkování (AxC)	2	178,30	0,001	51,87	0,061
Varianty*Roky (AxD)	6	107,38	0,000	59,31	0,005
Lokality*Termíny vzorkování (BxC)	1	91,13	0,052	313,07	0,000
Lokality*Roky (BxD)	3	162,90	0,000	65,65	0,015
Termíny vzorkování x Roky (CxD)	3	101,44	0,007	225,84	0,000
Varianty*Lokality*Termíny vzorkování (AxBxC)	2	55,70	0,102	40,26	0,114
Varianty*Lokality*Roky (AxBxD)	6	58,67	0,028	97,63	0,000
Varianty*Termíny vzorkování*Roky (AxCxD)	6	39,86	0,135	32,75	0,104
Lokality*Termíny vzorkování*Roky (BxCxD)	3	<b>565,34</b>	<b>0,000</b>	<b>407,56</b>	<b>0,000</b>
Varianty*Lokality*Termíny vzoko.*Roky (AxBxCxD)	6	26,63	0,360	62,55	0,003
Chyba	144	24,00		18,24	
Celkem	191				

Z velikosti hodnot MS v Tab. 5 (průměrné čtverce odchylek) můžeme usuzovat, že výnos zrna (t/ha) ozimé pšenice po vojtěšce i jarního ječmene po cukrovce byl ovlivněn faktory v sestupném pořadí: roky, lokality a způsob zpracování půdy. U ozimé pšenice byla nejvýznamnější interakce roky x lokality a u ječmene jarního varianty x roky.

Analogicky je z hodnot MS v Tab. 6 zřejmé, že při pěstování ozimé pšenice po vojtěšce byla SAS ovlivněna hodnocenými faktory v sestupném pořadí: lokalita, rok, termín odběru vzorků a intenzita zpracování půdy. Při pěstování jarního ječmene po cukrovce byla SAS ovlivňována hodnocenými faktory v sestupném pořadí: termín odběru vzorků půdy, lokalita, intenzita zpracování půdy a rok. Z hodnocených interakcí byla SAS u obou plodin (OP i JJ) nejvíce ovlivněna vztahy mezi lokalitami x termíny odběru půdy x roky. Tyto faktory překrývaly vliv hodnocených variant zpracování půdy na SAS.

I přes působení faktorů s větším vlivem na SAS než hodnocené varianty zpracování půdy, odhalilo čtyřleté hodnocení významně vyšší SAS pro orbu (O) ve srovnání s kypřením (K) při pěstování ozimé pšenice po vojtěšce. Při pěstování jarního ječmene po cukrovce se SAS zvyšovala s intenzitou zpracování půdy a hodnoty SAS u orby byly významně vyšší než u kypření půdy a přímého setí.

Hodnoty SAS se na obou lokalitách pohybovaly mezi 50–65 %. Podle Bartlové a kol. (2015) je lze považovat za vysoké. Jejich změny způsobené rozdílným zpracování půdy byly relativně malé (v rozsahu do 4 % u ozimé pšenice po vojtěšce a do 8 % u jarního ječmene po cukrovce) a významně nekorelovaly se změnami výnosu zrna hodnocených variant.

Výsledky ukazují vysokou citlivost SAS (podobně jako výnosu polních plodin) na různé faktory s časovými a prostorovými vlivy. Ty zvyšují variabilitu hodnot SAS, která „překrývá“ rozdíly mezi variantami hodnocených pěstebních opatření a zpřisňuje jejich statistické ověřování, vyžadující víceleté (minimálně tříleté) hodnocení.

Kromě faktorů přímo hodnocených analýzou variance se na změnách a variabilitě hodnot SAS mohly podílet další vlivy, z nichž lze uvést:

- zpracování půdy k předplodinám a působení porostů samotných předplodin na půdu,
- odběr vzorků byl prováděn z vrchní vrstvy půdy, citlivé na působení vnějších vlivů, např. dešťové kapky nebo rychlejší změny vlhkosti,
- působení porostů plodin v průběhu vegetace, např. u jarního ječmene pěstovaného po cukrovce došlo k průkaznému snížení hodnot SAS mezi jarním a letním odběrem půdních vzorků.

Tyto a další vlivy vysvětlují častou rozporuplnost výsledků dosahovaných při hodnocení dopadů zpracování půdy na SAS. Dopady procesů ovlivněných pěstebními opatřeními na SAS je proto potřeba posuzovat komplexně s přihlédnutím ke všem dostupným informacím.

## 2.4.2 Vliv hnojení

Hnojení má na kvalitu půdní struktury významný vliv. Některé studie uvádí pozitivní vliv jak organických, tak i minerálních hnojiv na půdní strukturu, aktivitu organismů a množství organického uhlíku (Naveed a kol., 2014). Jiné studie pozitivní vliv na agregaci přisuzují pouze hnojení organickému (Zhou a kol., 2013). V našich předchozích studiích (Stehlíková a kol., 2014, 2016) byly zkoumány půdy dlouhodobého polního pokusu probíhajícího na 6 lokalitách, přičemž na 5 z nich byla zjištěna nižší stabilita půdních agregátů u hnojených variant ve srovnání s nehnojenými variantami.

Studie zabývající se vlivem aplikace minerálních forem dusíku nejsou jednotné. Například Wang a kol. (2018) uvádí, že dusík v půdě zvyšuje tvorbu makroagregátů a jeho vliv na půdní strukturu je pozitivní, zatímco Brtnický a kol. (2017) jsou toho názoru, že hnojení dusíkem stabilitu agregátů zhoršuje.

Rovněž Fonte a kol. (2009) uvádí, že se zvyšující se dávkou dusíku klesá stabilita mikroagregátů ve prospěch makroagregátů. Z těchto protichůdných názorů je možné usuzovat, že vliv dusíku na stabilitu agregátů závisí na intenzitě hnojení dusíkem nebo na jeho půdní zásobě.

Blanco-Canqui a kol. (2014) dospěli k závěru, že při hospodaření s minimálním zpracováním půdy spojeném s pěstováním plodin s velkým množstvím posklizňových zbytků má dlouhodobé hnojení dusíkem pozitivní vliv na agregaci půdy v povrchové vrstvě, ale v hlubších vrstvách je agregace potlačena. Z uvedeného tedy vyplývá, že stabilita agregátů může být vlivem hnojení minerálním dusíkem snížena nebo zvýšena, v závislosti na zásobě půdní organické hmoty v půdě a na intenzitě hnojení.

### Výživářské pokusy VÚRV, v.v.i. a ÚKZÚZ

Výzkum vlivu hnojení na stabilitu půdních agregátů se opírá o hodnocení dlouhodobých polních pokusů, které provozuje Výzkumná ústav rostlinné výroby, v.v.vi. a Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský. Do hodnocení byl zahrnut dlouhodobý výživářský pokus založený v roce 1956 na 3 lokalitách České republiky: Čáslav, Lukavec a Ivanovice na Hané. Pokus probíhá s osmiletým osevním postupem (brambory – ječmen jarní – jetel – pšenice ozimá – kukuřice silážní – ječmen jarní – řepka ozimá – pšenice ozimá) s 12 variantami hnojení ve 4 opakováních. Pro studii byly vybrány následující varianty:

- kontrola (bez hnojení),
- hnůj (40 t ha<sup>-1</sup> každé 4 roky před kukuřicí a bramborami),
- minerální hnojení NPK (průměrná dávky 66 kg N ha<sup>-1</sup>, 40 kg P ha<sup>-1</sup>, 87 kg K ha<sup>-1</sup>) + hnůj (40 t ha<sup>-1</sup> každé 4 roky před kukuřicí a bramborami)

Vliv organického hnojení na půdní strukturu byl zkoumán v polním pokusu ÚKZÚZ založeném v roce 2011 v Lípě u Havlíčkova Brodu a v roce 2013 v Jaroměřicích nad Rokytnou a Hradci nad Svitavou. Pokus má šestiletý osevní postup (brambory – pšenice ozimá – kukuřice silážní –

ječmen jarní – řepka ozimá – pšenice ozimá), 6 variant hnojení ve 4 opakováních. Pro výzkum byly vybrány tyto varianty hnojení:

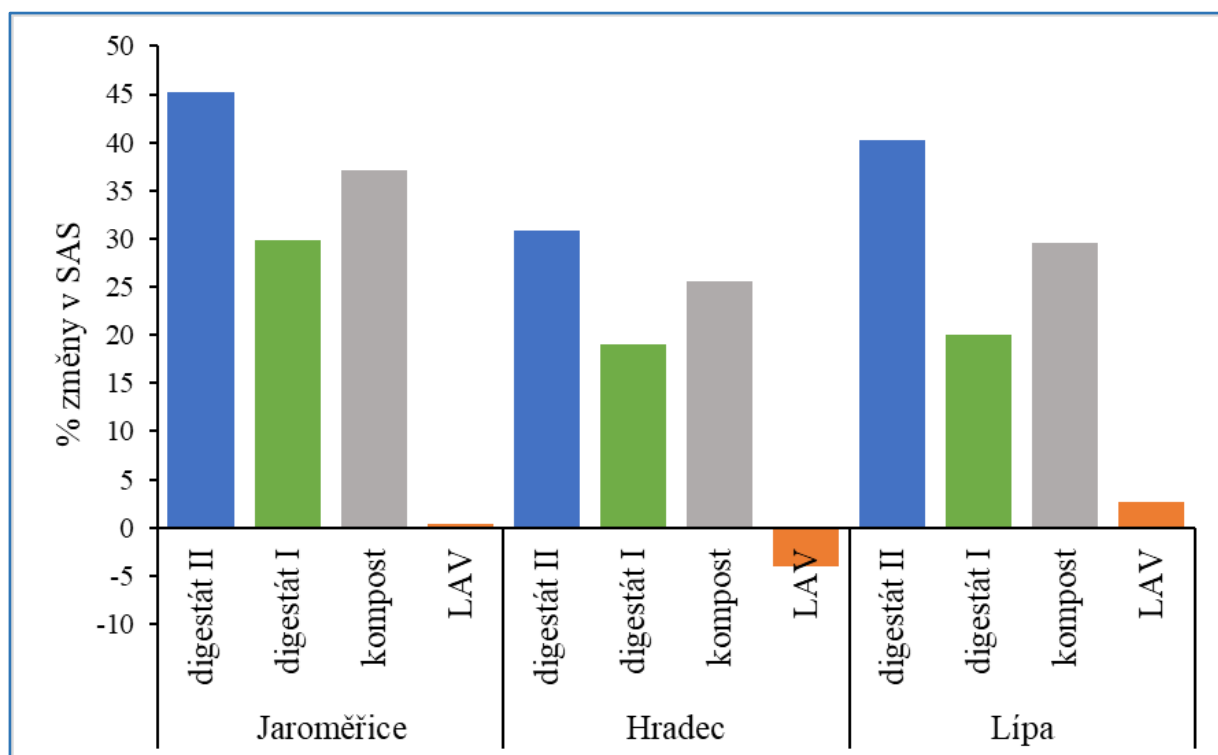
- kontrola (bez hnojení)
- minerální hnojení LAV
- digestát I (siláž, kejda skotu)
- digestát II (siláž, kejda prasat, hnůj skotu, jetelotravní senáž)
- kompost (štěpka, městská zeleň)

Průměrná dávka dusíku podle pěstované plodiny byla 120 až 150 kg N ha<sup>-1</sup>, u kompostu z důvodu pomalého rozkladu dusíku byla dávka dvojnásobná.

Během 4 let (2018-2021) byly na výše uvedených pokusech každoročně prováděny analýzy mineralogických, geochemických, chemických a fyzikálních půdních vlastností. Na základě těchto analýz bylo možno učinit obecné závěry.

## **Výsledky**

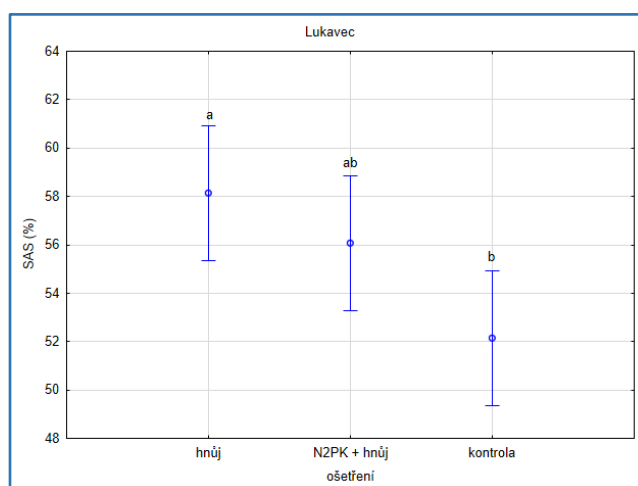
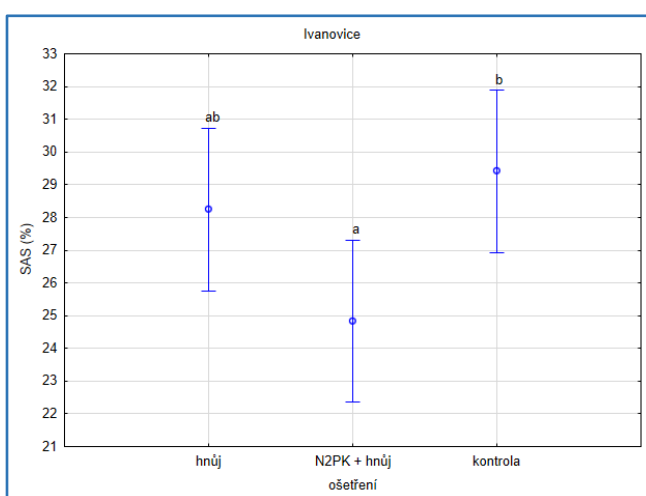
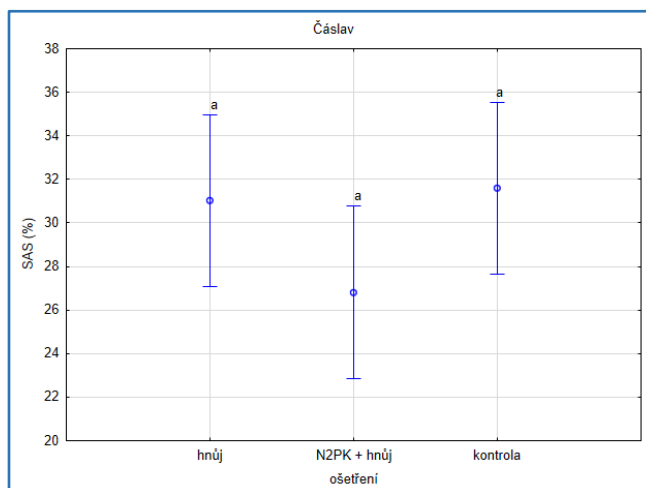
Výlučně minerální hnojení ovlivnilo stabilitu půdních agregátů (SAS) minimálně, v případě Jaroměřic s teplejším klimatem a jílovito-hlinitou půdou byl vliv negativní. Naopak organické hnojení kompostem a digestáty významně zlepšily půdní strukturu, stabilita půdních agregátů se v případě hnojení kompostem zvýšila průměrně o 30,8 %, digestátem I o 23 % a digestátem II o 38,8 % oproti kontrole (Obr. 3). Pozitivní vliv organického hnojení je spojen jednak se zvýšeným obsahem organického uhlíku v půdě a změnou rozložení složek půdní organické hmoty ve prospěch hydrofobní složky, jednak snížením objemové hmotnosti půdy a zvýšením pórovitosti. Přidání kompostu do půdy má navíc pozitivní vliv na půdní organismy, který se mimo jiné projevil vyššími hodnotami koncentrace glomalinu v půdě.



Obr. 3. Procentuální nárůst stability půdních agregátů (SAS) na hnojených parcelách oproti kontrole.

Také hnojení hnojem mělo na stabilitu půdních agregátů pozitivní vliv, ale pouze v případě kambizemě modální v Lukavci. V případě úrodných půd v Ivanovicích (černoze na spraši) a Čáslavi (šedoze) se hnojení hnojem prokázalo jako neefektivní a hnojení hnojem s minerálním hnojivem mělo negativní účinek (Obr. 4).





Obr. 4. Průměrné hodnoty stability půdních agregátů za 4 roky na lokalitách Čáslav, Ivanovice a Lukavec. Rozdílná písmena označují rozdíly na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$  (Tukey HSD test). Vertikální úsečky znázorňují konfidenční interval 0,95.

### 2.4.3 Posklizňové zbytky

Management posklizňových zbytků je chápán jako "strategie pro využívání zbytků organické hmoty předplodin" řešící vzájemné působení způsobu využití zbytků plodin (zachování nebo odvoz) a způsobu zpracování půdy. Hloubka a způsob zpracování půdy ovlivňuje rozmístění zbytků plodin v půdě. Management posklizňových zbytků tak ovlivňuje strukturu půdy, obsah a rozdělení organické hmoty v půdním profilu, dostupnost živin a aktivitu mikrobů. Má tedy souběžné účinky na fyzikálně-mechanické vlastnosti a pórovitost půdy i její hydraulické vlastnosti (Bronick a Lal, 2005), ale také na výskyt a šíření škodlivých organismů.

Posklizňové zbytky zanechané na povrchu půdy obvykle zvyšují infiltraci rozptylováním energie dešťových kapek, a tak minimalizují rozpad agregátů pokryvem půdy a zpomalují odtok povrchové vody, čímž poskytují více času pro infiltraci (Cassel a kol., 1995). Sláma zanechaná na povrchu půdy zvyšuje stabilitu agregátů snížením rychlosti smáčení (Chan, 1995). Posklizňové zbytky zapravené do půdy působí pozitivně na infiltraci vody, neboť udržují příznivou pórovitost půdy a obsah organické hmoty v půdě (Unger, 1992; Pikul a Zuzel 1994).

Množství posklizňových zbytků, poměr C: N, a jejich intenzita rozkladu se projevují ve změnách struktury půdy (Hadas a kol. 1994; Sun a kol. 1995). Pozitivní vliv zlepšení struktury byl zjištěn u posklizňových zbytků s poměrem C: N mezi 15 a 40 (Avnimelech a Cohen, 1989). Obsah vody v půdě a dostupnost N ovlivňují rozklad posklizňových zbytků s dopadem na stabilitu půdních agregátů (Hadas a kol. 1994).

#### Pokus s managementem slámy v monokultuře ječmene jarního

Vliv managementu slámy na výnosy a půdní charakteristiky byl sledován v pokusu založeném v roce 1970 na fluvizemi glejové na Polní pokusné stanici Agronomické fakulty Mendelovy univerzity v Brně v Žabčicích v kukuřičné výrobní oblasti. V letech 2018–2021 bylo provedeno na vybraných variantách (Tab. 7) hodnocení výnosu zrna a stability půdních agregátů metodou podle Kandelera (1996).

Tab. 7. Přehled hodnocených variant.

Management slámy	Dávky N (kg/ha) síran amonný (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Označení variant
Sláma sklízena	0	SS-0N
	30	SS-30N
	60	SS-60N
	90	SS-90N
Sláma zaorána	0	SZ-0N
	30	SZ-30N
	60	SZ-60N
	90	SZ-90N

Agrotechnika pokusu:

Velikost parcel: 9.6 – 12.15 m<sup>2</sup>, 4 opakování, (1) podmínka do 8 cm po sklizni, (2) P+K hnojení (superfosfát 45%, dávka 90 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + draselná sůl 60%, dávka 120 kg K<sub>2</sub>O), (3) orba (22 cm), ve třetí dekádě října, (4) předseťová příprava a následná ruční aplikace síranu amonného (30, 60, 90 kg N.ha<sup>-1</sup>), (5) setí (400 semen na m<sup>2</sup>) v březnu, (6) válení co nejdříve po zasetí, (7) aplikace post-emergentního herbicidu (druhá dekáda dubna), (8) aplikace fungicidu a insekticidu, (9) sklizeň v první polovině července.

## Výsledky

I přes působení faktorů s větším vlivem na SAS (vliv ročníku a termínu odběru vzorků) než hodnocené pěstební zásahy (Tab. 8) odhalily analýzy čtyřletých výsledků zajímavé a průkazné rozdíly mezi hodnocenými variantami. Z Obr. 5 je zřejmé, že hodnoty SAS se zvyšovaly s narůstající dávkou N rozdílně na SS a SZ variantách:

- u SS variant se hodnoty SAS zvyšovaly skokem z 56 % u 0N na 61-62 % u 30N, 60N, 90N,
- u SZ variant se hodnoty SAS zvyšovaly postupně s nárůstem dávky N z 56,5 % u 0N na 59 % u 30N, 61,5 % u 60N a 62,5 % u 90N.

Provedenými geochemickými a mineralogickými analýzami bylo zjištěno, že:

- výsledkem dlouhodobé aplikace síranu amonného bylo zvýšení celkového obsahu N v půdě a snížení pH půdy (Obr. 6),
- v důsledku zapravení slámy se obsah uhlíku v půdě mírně zvyšoval (Obr. 6).

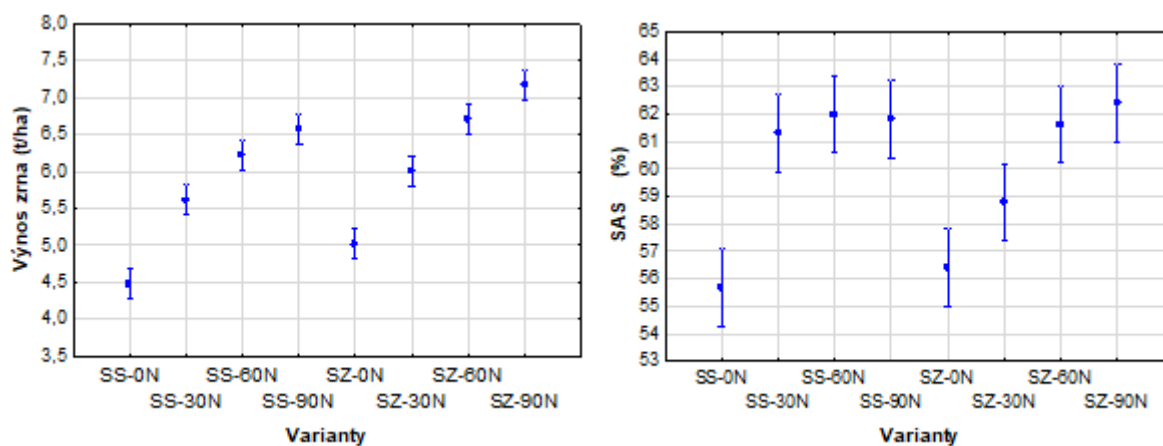
Se zapravením slámy se výnosy zrna zvyšovaly, v průměru 0,51 t. ha<sup>-1</sup> (Obr. 5), zejména s mírně rostoucím obsahem půdního organického uhlíku, i když hodnoty SAS v případě hnojení 30N a 60N byly nižší než u slámy sklizené. Hodnoty SAS na lokalitě Žabčice jsou vysoké (Obr. 5), změna SAS proto neovlivňovala výnosy zrna tolik jako malá změna obsahu půdního uhlíku (Obr. 6).

Potvrdily se dřívější poznatky o vlivu Fe<sub>ox</sub> + Al<sub>ox</sub> na zvýšení hodnot SAS s klesajícím pH. Hodnota pH klesala se zvyšováním dávek síranu amonného v důsledku okyselení. Toto zvýšení SAS tzv. „chemickou cestou“ spojenou s nižším pH však nelze z hlediska správného hospodaření s půdou považovat za výhodné.

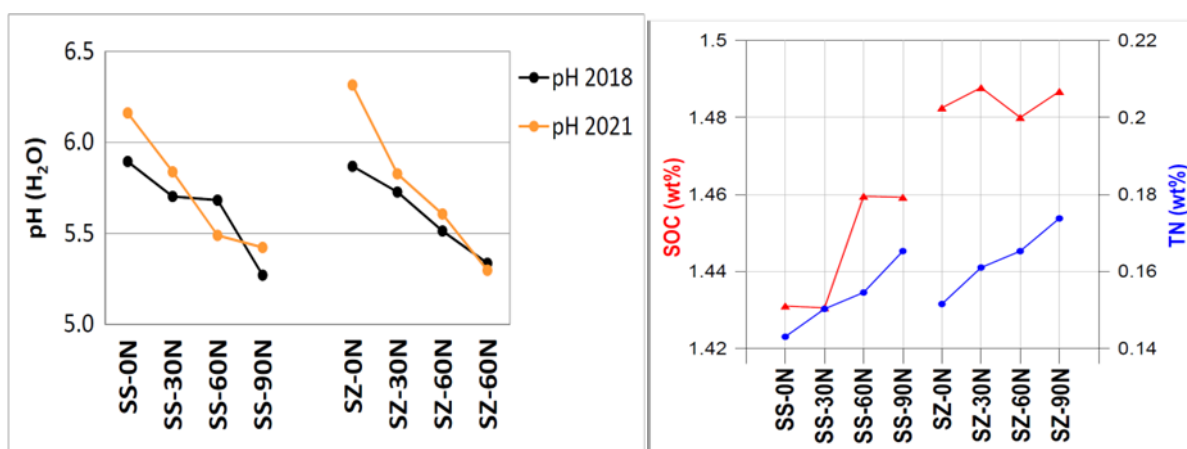
SAS jako důležitý ukazatel kvality a úrodnosti půdy je třeba posuzovat i v těchto souvislostech, měla být vždy posuzována ve vztahu k ostatním půdním vlastnostem. Výsledky rovněž ukazují na důležitou roli organické hmoty posklizňových zbytků při ovlivňování půdních procesů a úrodnosti půdy.

Tab. 8. Analýza variance výnosu zrna ( $t \cdot ha^{-1}$ ) jarního ječmene a hodnot SAS (%) porovnávaných variant polního pokusu

Zdroj variability	Výnos zrna ( $t/ha$ )			SAS (%)		
	DF	MS	p	DF	MS	p
Varianty (A)	7	13,043	<b>0</b>	7	231,5	<b>0</b>
Roky (B)	3	<b>51,522</b>	<b>0</b>	3	<b>659,5</b>	<b>0</b>
Termíny vzorkování (C)				1	<b>539,5</b>	<b>0</b>
Varianty*Roky (AxB)	21	3,472	<b>0</b>	21	32,7	<b>0,008</b>
Varianty*Termíny vzorkování (AxC)				7	51,2	<b>0,004</b>
Roky*Termíny vzorkování (BxC)				3	<b>769,2</b>	<b>0</b>
Varianty* Roky*Termíny vz. (AxBxC)				21	32,9	<b>0,008</b>
Chyba	96	0,171		192	16,5	



Obr. 5. Grafické znázornění ve výnosu zrna a hodnotami SAS mezi hodnocenými variantami (2018-2021). SS – sláma sklizená, SZ – sláma zaorána.



Obr. 6. Změny pH půdy, obsahu organického uhlíku (SOC) a celkového dusíku (TN) ve vzorcích půdy z hodnocených variant. SS – sláma sklizená, SZ – sláma zaorána.

## 2.4.4 Druh plodin a střídání plodin

Na stabilitu agregátů má pozitivní vliv zvýšené množství rostlinných zbytků a s tím spojené vyšší koncentrace organického uhlíku v půdě (Jin a kol., 2021). Také zařazení meziplodin, zejména jednoděložných, do osevního postupu může zvýšit organický uhlík v půdě a podpořit stabilitu agregátů. Důležitý je celoroční pokryv půdy plodinou (Bayer a kol., 2003; Wohlenberg a kol., 2004). Jednoděložné plodiny díky vyšší hustotě kořenů a rovnoměrnějšímu rozložení kořenového systému podporují spojení kontaktních bodů mezi minerálními částicemi agregáty, což také přispívá k tvorbě a stabilitě agregátů (Mielniczuk, 1999).

### Pokus s různými osevními sledy - Hněvčeves

Vliv střídání plodin na stabilitu půdních agregátů byl zkoumán v pokusu s osevními postupy, který je prováděn na PS Hněvčeves, VÚRV, v.v.i. od roku 1971. V rámci pokusu byly hodnoceny tyto osevní postupy:

- 122, 222 - jetel – pšenice ozimá – pšenice ozimá – ječmen jarní
- 272 - kukuřice – pšenice ozimá – meziplodina – ječmen jarní – meziplodina
- 922 - pšenice ozimá – meziplodina – ječmen jarní
- 932 - monokultura pšenice ozimé

Tab. 9. Pořadí plodin ve sledovaných letech.

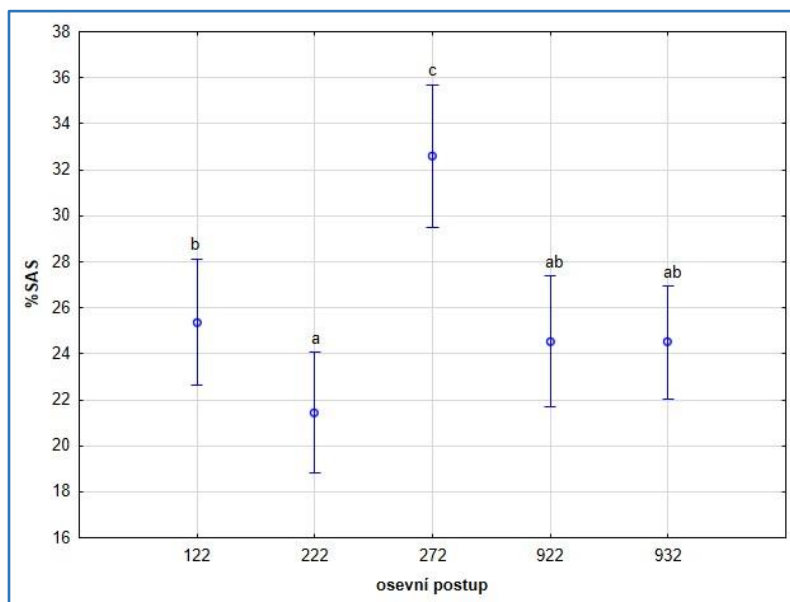
Osevní postup	2017	2018	2019	2020	2021
122	jetel	pšenice oz.	pšenice oz.	ječmen jarní	jetel
222	pšenice oz.	pšenice oz.	ječmen j.	jetel	pšenice oz.
272	kukuřice	pšenice oz.	ječmen j.	kukuřice	pšenice oz.
922	ječmen j.	pšenice oz.	ječmen j.	pšenice oz.	ječmen j.
932	pšenice oz	pšenice oz.	pšenice oz.	pšenice oz.	pšenice oz.

U všech variant byla jednotná agrotechnika, hnojení bylo minerální, jen před kukuřicí byl aplikován hnůj. Během 4 let (2018-2021) byly každoročně prováděny analýzy mineralogických, geochemických, chemických a fyzikálních půdních vlastností.

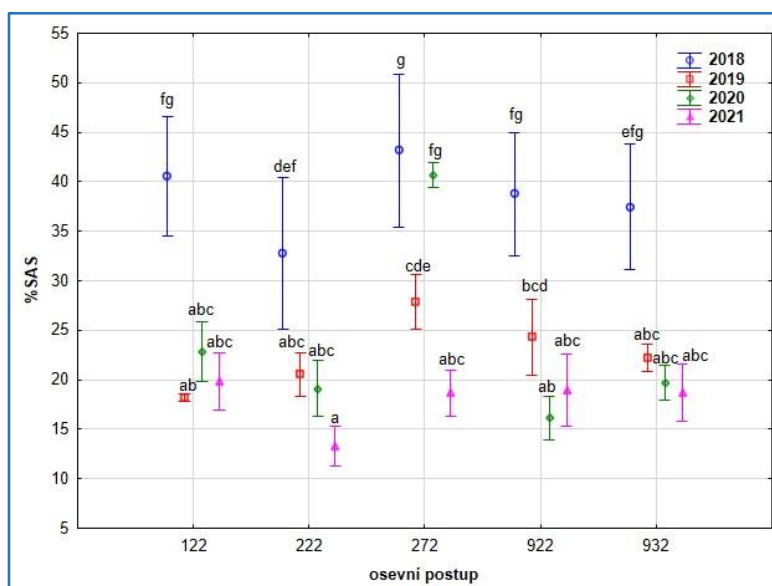
### **Výsledky**

Byl zjištěn statisticky významný vliv osevních postupů na stabilitu půdních agregátů (Obr. 7). Signifikantně nejvyšší hodnoty SAS (průměrně 32,6 %) byly zjištěny u osevního postupu s kukuřicí, kde ale spolu s vlivem pěstovaných plodin mohlo agregaci pozitivně ovlivnit i hnojení hnojem. To dokládá obr. 8, kde je vidět, že v roce 2020, kdy byla na této variantě pěstována

kukuřice, byla SAS mnohem vyšší (40,7 %) oproti ostatním variantám. Při hodnocení vlivu jednotlivých rostlin je proto třeba vzít v úvahu i agrotechniku, která je s pěstováním dané plodiny spojená. Největší rozdíly mezi roky byly zjištěny na variantě 272, kde je nejpestřejší osevní postup včetně meziploidy. Naopak na variantě 932, kde je pěstována monokultura pšenice, se kromě roku 2018 roky navzájem nelišily, což také ukazuje na možný vliv pěstované plodiny na SAS. Pozitivní vliv zařazení kukuřice do osevního postupu potvrzují i práce jiných autorů.



Obr. 7. Průměrné hodnoty stability půdních agregátů (SAS) za 4 roky v jednotlivých osevních postupech. Rozdílná písmena označují rozdíly na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$  (Tukey HSD test). Vertikální úsečky znázorňují konfidenční interval 0,95.



Obr. 8. Vliv interakce osevního postupu a odběrového roku na stabilitu půdních agregátů (SAS). Rozdílná písmena označují rozdíly na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$  (Tukey HSD test). Vertikální úsečky znázorňují konfidenční interval 0,95.

## 2.4.5 Přípravky zlepšující agregaci

Stabilitu půdních agregátů lze zlepšit nejen organickým hnojením, ale i přidáním různých aditiv do půdy, např. hydrogelu na bázi kyseliny polyakrylové. Nevýhoda syntetických hydrogelů je ve špatné biologické rozložitelnosti, která je velmi dlouhá nebo nulová. V zemědělství je proto lepší používat přípravky v půdě snadno rozložitelné. Některé studie naznačují slibné účinky biouhlu (Khademalrasoul a kol., 2014; Ouyang, 2013), přičemž důležitý je původ biouhlu a struktura půdy, na kterou je biouhel aplikován. Práce Burrell a kol. (2016) ukázala, že biouhel ze slámy zlepšil půdní strukturu půdy více než biouhel ze dřevní štěpky. Tato práce zároveň prokázala, že zlepšující vliv biouhlu je významný zejména v půdách s hrubou strukturou (Planosol), naopak jeho aplikace v černozemi neměla na stabilitu půdních agregátů žádný vliv. Pozitivní vliv biouhlu je větší v písčitéch půdách než jílovitých (Blanco-Canqui, 2017). Sun a Lu (2014) prokázali zlepšení půdní struktury po aplikaci biouhlu i v jílovité půdě, ale pouze v případě biouhlu ze slámy, nikoliv ze dřevní štěpky. Většina studií, které se věnují biouhlu, má však krátkodobý charakter nebo se jedná o nádobové pokusy, nelze proto určit, jak dlouho pozitivní vliv aplikace biouhlu přetrvává.

### Pokus s aplikací přípravků pro zlepšení agregace

Vliv potenciálních zlepšujících přípravků byl ověřen v maloparcelkovém polním pokusu, založeném na podzim roku 2018 na pokusné stanici Hněvčeves. V pokusu byly použity tyto materiály:

1. Kontrola
2. Kompost
3. Biouhel z dřevní štěpky
4. Vápní 5 t.ha<sup>-1</sup> (7 kg/parcela)
5. Hnůj skotu 80 t.ha<sup>-1</sup> (120 kg/parcela)
6. Dřevní štěpka (jabloň)
7. Dřevní štěpka + houba (Polymix)
8. Pelety (50 % separát z bioplynové stanice + 50 % sláma)
9. Pelety + houba (Polymix)
10. Hydrogel na bázi uhličitanu draselného upravený nanotechnologií
11. Travní porost

Podpurný přípravek „Polymix“ obsahuje konidie hub rodů *Botryotrichum*, *Isaria*, *Clonostachys* a *Talaromyces*.

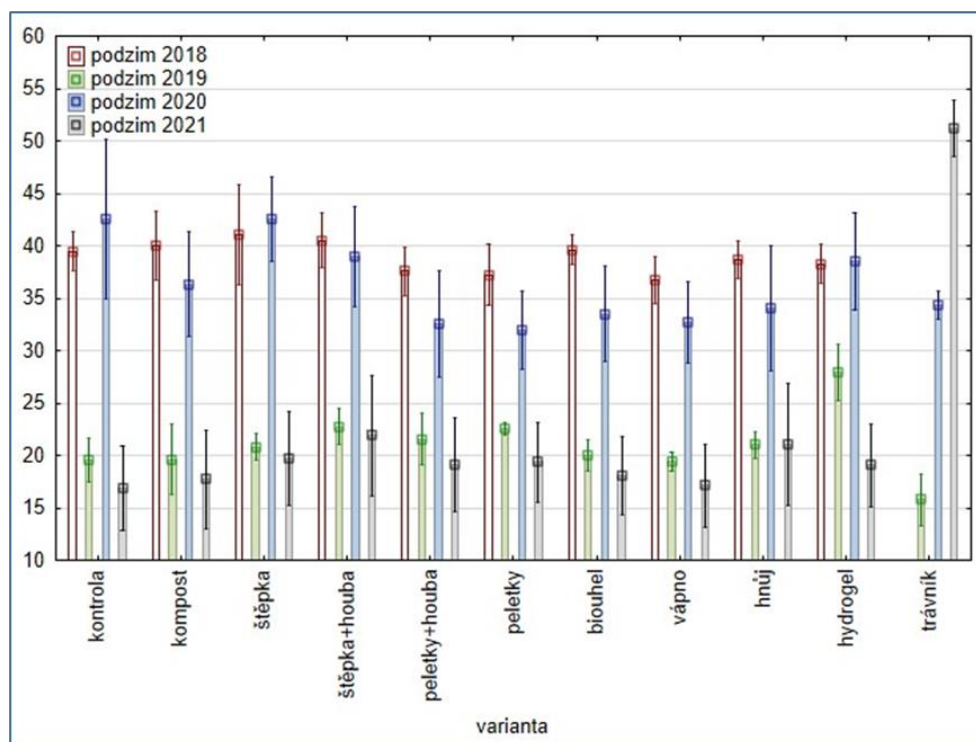
Pokus je rozdělen do 30 parcel o velikost 3 x 5 m, každá parcela je na všech stranách oddělena od ostatních parcel izolačními pásy: 1,5 m po podélných stranách; 2,5 m po vodorovných stranách. Každá varianta je ve třech opakováních.

Jednotlivé přípravky byly rovnoměrně aplikovány na zvolené parcely a následně zapraveny do hloubky cca 10 cm diskovým podmiřákem. Na jaře 2019 byla na pokus zasetá pšenice jarní, v následujících letech byla pěstována pšenice ozimá, kukuřice a ječmen jarní. Část pokusu byla jednotně oseta jetelotravní směsí, která byla každoročně 1-2 sečena. V letech 2019-2022 byly po sklizni odebrány vzorky půdy ze všech variant a opakování včetně 6 vzorků z travního porostu a byla provedena analýza stability půdních agregátů.

## Výsledky

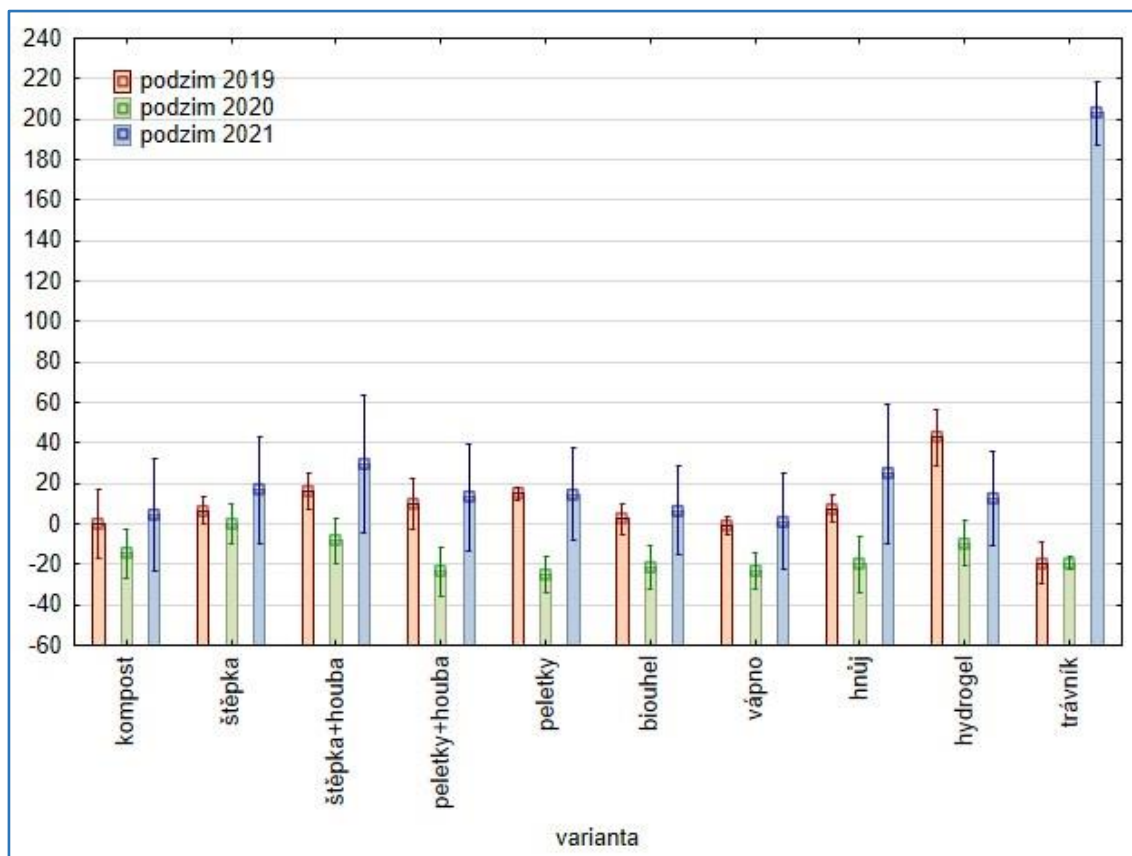
Průměrně nejnižší hodnoty SAS byly na variantě s vápnem, nejvyšší na variantě se štěpkou, štěpka s houbou a u trávniku. Na Obr. 9 je patrný trend zvyšování stability půdních agregátů u trávniku založeného na podzim 2018, kdy signifikantně nejnižší byla SAS na podzim 2019 (15,8 %), pak následoval podzim 2020 (34,32 %) a v roce 2021 byl SAS signifikantně nejvyšší (51,2 %). Naopak na ostatních variantách byla SAS nejnižší v roce 2021. U varianty s hydrogelem byly zaznamenány největší meziroční rozdíly.

Pro lepší představu o účinku jednotlivých přípravků bylo provedeno srovnání průměrných hodnot poklesu/nárůstu SAS oproti kontrolní variantě za roky 2019 až 2021. Pozitivní vliv na stabilitu půdních agregátů měla aplikace dřevní štěpky, hnoje a hydrogelu, který zvýšil SAS zejména na počátku pokusu. Na podzim 2021 byl vliv hydrogelu nižší. Nejvyšší nárůst SAS oproti kontrole byl však zaznamenán po 3. roce pěstování travního porostu, kdy došlo k rapidnímu nárůstu SAS, takže SAS zjištěná v travním porostu v roce 2021 byla o 200 % vyšší než na kontrole. Vápnění a aplikace biouhlu měly na stabilitu agregátů negativní vliv (Obr. 10).



Obr. 9. Stabilita půdních agregátů za jednotlivé roky na jednotlivých variantách. Průměr pro každý rok  $\pm 0,95$  konfidenční interval.





Obr. 10. Procentuální nárůst/pokles SAS na jednotlivých variantách oproti kontrole. Průměr pro každý rok  $\pm 0,95$  konfidenční interval.

### 3. Praktická doporučení

Zemědělské hospodaření má velký vliv na fyzikální vlastnosti půdy, a tedy i na stabilitu agregátů. Tento vliv je významný zejména na půdách utužených, méně úrodných a ohrožených erozí. Volba vhodné agrotechniky ale musí vždy vycházet z půdně-klimatických podmínek prostředí a zároveň musí být ekonomicky přijatelná.

V případě velmi špatného strukturního stavu půdy lze stabilitu půdních agregátů významně zlepšit založením travního porostu minimálně na 3 roky, což je sice efektivní, ale z ekonomického pohledu pro zemědělské podniky většinou nepřijatelné řešení. Je proto důležité zařazovat meziplodiny do osevního postupu a zajistit tak celoroční pokryv půdy plodinou. Významné je střídání pěstovaných plodin, protože každá plodina a s ní související agrotechnika ovlivňuje stabilitu půdních agregátů jinak. Také ponechání posklizňových zbytků hraje důležitou roli při ovlivňování půdních procesů a úrodnosti půdy.

Obecně lze konstatovat, že výlučně minerální hnojení ovlivňuje stabilitu půdních agregátů minimálně, v případě více jílovitých půd s teplejším klimatem je vliv mírně negativní. Naopak aplikace organických hnojiv, jako je ke kompost, digestát a hnůj se podílí na zlepšení půdní struktury. Vliv organického hnojení se projevuje zejména na středně těžkých půdách, méně úrodných půdách a půdách s horší strukturou. Na úrodných půdách (černozemě, šedozemě) s dobrou strukturou je organické hnojení málo efektivní a jeho vliv na stabilitu půdních agregátů není výrazný.

Také zpracování půdy má na stabilitu půdních agregátů významný vliv. Poznatky mnoha studií uvádí, že orba ovlivňuje stabilitu agregátů negativně. V našich dlouhodobých pokusech na černozemi se negativní vliv orby neprokázal, což však nemusí platit v případě dalších, méně kvalitních půd.

Co se týká zlepšujících přípravků, na 1-2 roky lze stabilitu agregátů zvýšit přidáním syntetického hydrogelu do půdy, pozitivní vliv má i aplikace dřevné štěpky. Nicméně používání zlepšujících přípravků v zemědělské praxi se příliš neosvědčilo z důvodu krátkodobého efektu přípravků, potížím při aplikaci do půdy a u některých přípravků i z důvodu vyšší finanční náročnosti.

#### **4. Srovnání novosti postupů**

Stabilita půdních agregátů je důležitá vlastnost, která ovlivňuje kvalitu půdy a půdní úrodnost. V zemědělské praxi je jí však věnována relativně malá pozornost. Důvodem je mimo jiné i to, že strukturální vlastnosti půdy jsou obtížně měřitelné a zároveň jsou ovlivňovány kombinací vnějších i vnitřních faktorů, takže je složité stanovit obecně platná agrotechnická doporučení.

Metodika podává komplexní pohled na problematiku stability půdních agregátů v šíři, která dosud nebyla v České republice zpracována. Do metodiky byly zahrnuty nejen nejnovější poznatky, ale zároveň byly zpracovány výsledky vlastních dlouhodobých a krátkodobých pokusů. Tyto pokusy se nacházejí na několika lokalitách s rozdílnými půdně-klimatickými podmínkami, charakteristickými pro ČR. V rámci jednotlivých pokusů jsou dlouhodobě sledovány různé faktory – agrotechnické zásahy, jako např. způsob a intenzita hnojení, management posklizňových zbytků, zpracování půdy, osevní postupy apod. V rámci projektu byly 4 roky sledovány mineralogické, geochemické, fyzikální a mikrobiologické vlastnosti půdy, na základě kterých byla definována agrotechnická opatření, která mohou způsobit pokles či nárůst stability půdních agregátů v určitých půdně-klimatických podmínkách.

## 5. Popis uplatnění metodiky

Metodika podporuje promyšlené uplatňování správných zásad agrotechniky a hospodaření na půdě. Je určena k využití zemědělským podnikům, technologickému poradenství a k výuce na středních a vysokých zemědělských školách.

Bude uplatňována následujícími způsoby:

- a) na řešitelských pracovištích projektu s přednostním určením pro zemědělskou praxi,
- b) v rámci poradenské činnosti prováděné poradenskými útvary řešitelských pracovišť,
- c) na řešitelských pracovištích bude možné konzultovat praktické uplatnění metodiky se specialisty, např. jako podklad pro stanovení pravidel SZP,
- d) v zemědělské praxi při plnění standardů dobrého zemědělského a environmentálního stavu (DZES) pro získání přímých plateb na půdu v rámci prvního pilíře SZP, především standardů DZES 1, 3, 5, a 6, a také hospodaření s organickou hmotou v orné půdě v rámci ekoschématu na kultuře (R), dále při plnění programů environmentálních opatření z II. pilíře SZP, zaměřených na zatravnění orné půdy a pěstování meziplodin pro zlepšení struktury půdy a proti utužení půdy,
- e) při plánování a vedení polních pokusů,
- f) využití při výuce studentů na AF MENDELU v Brně,
- g) na webových stránkách vydavatele ([www.vurv.cz](http://www.vurv.cz)).

## 6. Ekonomické aspekty

### 6.1 Stabilita agregátů jako externalita hospodaření na půdě

Stabilita agregátů je významná půdní vlastnost ovlivňovaná řadou faktorů. Velká část z nich je dána půdním typem a půdním druhem, klimatem a průběhem počasí, tj. obecně půdně-klimatickými podmínkami, které pěstitelé polních plodin nemohou prakticky ovlivnit a při hospodaření na půdě se jim musí přizpůsobit. Na druhou stranu mohou způsobem hospodaření a pěstitelskými zásahy stabilitu agregátů významně ovlivňovat – pozitivně i negativně. Z přehledu uvedeném v Tab. 10 je zřejmé, že se jedná o složitou problematiku s různou úrovní poznání a prokázání efektu působení jednotlivých faktorů.

Tab. 10. Shrnutí vlivu nejdůležitějších faktorů na stabilitu půdních agregátů (upraveno dle Amézqueta, 1999).

Faktor	Změna měřeného parametru	Vliv na stabilitu agregátů podle velikosti		
		jíl <2 μm	mikroagregáty <250 μm	makroagregáty >250 μm
Koncentrace elektrolitu	KE	+++	++	(+)?
Složení elektrolitu	SAR	---	-	(-)?
	pH	--	-	(-)?
Obsah jílu	obsah jílu	(+)?	(+)?	(+)?
CaCO <sub>3</sub>	obsah CaCO <sub>3</sub>	++	+	(+)?
Sádrovec	obsah CaSO <sub>4</sub>	++	+	(+)?
Organická hmota (OH)	obsah OH	---	++	+++
Fe a Al oxidy	obsah Fe/Al oxidů	++	+	(+)?
Klima a počasí	cyklus smáčení/sušení	(+)???	(+)??	(++)?
	rychlost smáčení	???	(-)?	--
	počáteční obsah vody	(-)??	(+)?	(++)?
	cyklus zmrazení/rozmrazení	(+)???	(+)??	(++)?
	obsah vody při zmrazování	???	(-)??	--
	rychlost větru	???	---	-
Čas (věk)	čas (věk)	(+)???	+	+
Biologické faktory	množství kořenů	(-)??	(+)?	+++
	půdní mikrobi	(+)???	(+++)?	+++
	půdní fauna	(-)???	(+)?	++
Hospodaření na půdě	zpracování půdy	(-)???	(-)?	--
	zbytky plodin	??	(+)?	+++
	meziplodiny	??	(+)?	+++
	hnůj a kompost	(-)???	(+)?	+++
	kaly a ostatní hno.	(+)?	(+)?	+++
	pastební a krmné plodiny	(+)???	(+)?	++
	polní plodiny v OP	(+)???	(+)?	+
	monokultura PP	(-)???	(-)?	--
	úhor	(-)???	(-)?	--
	fosfáty		(+)?	+
polyakrylamidy	(++)???	(+)?	+++	

Některé faktory vykazují rozdílný vliv na stabilitu jednotlivých kategorií agregátů (makroagregáty x mikroagregáty). Korelační vztahy mezi stabilitou agregátů a výnosy polních plodin jsou velmi variabilní, nicméně je třeba upozornit, že stabilita půdních agregátů podporuje i mimoprodukční funkce, např. odolnost půdy proti erozi, vytvoření vhodných podmínek pro půdní faunu, pro sekvestraci uhlíku, pro hospodaření s vláhou anebo omezení povodňového rizika atd.

Působení pěstebních zásahů na stabilitu půdních agregátů je překrýváno průběhem počasí a případně i prostorovými efekty půdních rozdílů v rámci pozemků. Ekonomické hodnocení dopadů pěstitelských opatření na stabilitu půdních agregátů je proto komplikované a obtížně proveditelné z následujících důvodů:

- Náklady na jednotlivá opatření se v současné době turbulence cen, především energie, obtížně stanovují. Normativní náklady na pěstební opatření na odpovídajících internetových adresách nejsou dosud inovovány.
- Omezení nákladů s pozitivním dopadem na stabilitu půdních agregátů obvykle vyvolává zvýšení nákladů na jiná následná pěstební opatření pro zajištění výnosů polních plodin. Především se jedná o problematiku snížení nákladů na zpracování půdy, které vyvolá potřebu aplikace pesticidů, především herbicidů a fungicidů.
- Zvýšení stability agregátů ještě jednoznačně neznamená zvýšení výnosu. Stabilita agregátů je jeden s významných faktorů ovlivňujících úrodnost půdy, výnosy a kvalitu produkce polních plodin.

Pro motivaci zemědělců k péči o půdu, zlepšování jejího „zdraví“ a úrodnosti lze využít koncepci externalit. Jako externality jsou označovány náklady na využití prostředí, které jsou vedlejším dopadem hospodářské aktivity, za kterou neplatí jejich producent ani spotřebitel. Ekonomové rozlišují externality na pozitivní a negativní. Ke vzniku pozitivní externality dochází v případě, kdy vedle soukromých užitků jsou vytvářeny užitky celospolečenské, za které nikdo ze společnosti kromě původce neplatí. K negativní externalitě naopak dochází v případě, kdy společenské náklady určité aktivity převyšují soukromé, aniž by společnost nesla oproti tomu nějaké užitky (Pretty a kol., 2001; Macháč a kol., 2020; Macháč a kol. 2021). Jde tedy o situaci, kdy subjekt provádějící určitou činnost nenese všechny její náklady, neboť jejich určitou část přesouvá na jiné subjekty bez jejich souhlasu (negativní externalita) anebo z ní nezískává všechny užitky (pozitivní externalita). Náklady, které jsou přesunuty na jiný subjekt, se označují jako externí náklady. Tyto externí náklady se obvykle velmi obtížně oceňují. Proto je obtížné je zahrnovat do běžného účetnictví a finančně vyjadřovat a hodnotit.

Změna stability agregátů jako důsledek komplikovaného působení množství faktorů při hospodaření na půdě tak může být považována za externalitu, v případě nárůstu hodnot SAS za kladnou a v případě snížení hodnot SAS za zápornou externalitu. V rámci Společné zemědělské politiky Evropské unie (SZP EU) jsou vytvářeny finanční nástroje (dotační tituly) motivující zemědělce k omezování záporných externalit a k tvorbě kladných externalit. V nových pravidlech

SPZ platných od 1. 1. 2023 jsou zahrnuta níže uvedená finančně podporovaná opatření ovlivňující stabilitu půdních agregátů:

a) Vybrané standardy dobrého zemědělského a environmentálního stavu (DZES) motivující zemědělce k opatřením s pozitivními dopady nebo omezující negativní dopady na stabilitu půdních agregátů

DZES 1. Zachování poměru trvalých travních porostů k zemědělské ploše

DZES 3. Zákaz vypalování strnišť na orné půdě

DZES 5. Obhospodařování půdy způsobem, který snižuje riziko degradace půdy a eroze, včetně zohlednění sklonu svahu

DZES 6. Minimální pokryv půdy pro zamezení vzniku holé půdy v nejcitlivějších obdobích.

Zemědělci jsou motivováni získáním základní (BISS) a doplňkové redistributivní (CRISS) podpory příjmu pro udržitelnost v rámci prvního pilíře SZP.

b) Vybraná opatření ekoschémat motivující zemědělce k aktivitám s pozitivními dopady na stabilitu půdních agregátů

Zemědělská kultura standardní orná půda (R) – udržitelné hospodaření s organickou hmotou (OH) v orné půdě – na ploše odpovídající alespoň výměře 35 % orné půdy v hospodářském roce, prostřednictvím „MODELU OH“.

Zemědělci jsou motivováni získáním Celofaremní ekoplátby – základní úroveň 65,47 EUR/ha.

c) Vybraná environmentální opatření motivující zemědělce k aktivitám s pozitivními dopady na stabilitu půdních agregátů

Zatravnění orné půdy (vybraných a citlivých ploch - 8 dotačních titulů) 312 – 136 EUR/ha.

Meziplodiny pro zlepšení struktury půdy - 154 EUR/ha.

Meziplodiny proti utužení půdy – 152 EUR/ha.

Zemědělci jsou motivováni finanční podporou na realizaci pětiletých programů, kterými se zavazují dodržet stanovené požadavky v souladu s podmínkami hospodaření na celé ploše zemědělské půdy, se kterou do závazku vstoupili v souladu s podmínkami Cross Compliance a ostatními podmínkami danými planou evropskou a národní legislativou.

## 6.2 Vlastní ekonomické aspekty

Motivací k vytvoření této metodiky bylo časté upozorňování veřejnosti na současně uplatňované způsoby hospodaření a zpracování půdy v ČR a jejich dopady na kvalitu a zdraví půdy, dále dlouhodobé výzkumy prováděné v této oblasti i poznatky a zkušenosti získané spoluprací se zemědělskými podniky v praxi. Především se jedná o snížení intenzity zpracování půdy, dodání dostatečného množství organické hmoty a půdy a zajištění jejího kontinuálního pokryvu porosty hlavních plodin, meziplodin a posklizňovými zbytky. Tato opatření by měla být v akceptovatelné míře implementována při vytváření způsobů hospodaření pro konkrétní stanovištní podmínky. Volbou vhodných pěstitelských postupů tak lze zvýšit stabilitu půdních agregátů a zároveň snížit:

- přímé náklady na pěstební opatření,
- spotřebu pohonných hmot,
- spotřebu pracovního času.

Uvedené úspory jsou rozdílné v závislosti na půdním typu a druhu, průběhu počasí, způsobu hospodaření a použitých mechanizačních prostředcích.

Kromě ekonomických úspor přímých nákladů je významným přínosem, který se obtížně finančně vyjadřuje, omezení eroze půdy a efektivní využívání hnojiv. Pěstební opatření zvyšující stabilitu půdních agregátů jsou v souladu s novými standardy dobrého zemědělského a environmentálního stavu (DZES) a faremním ekoschématem pro ornou půdu, jejichž plnění je podmínkou pro získání přímých plateb na obhospodařovanou půdu v rámci prvního pilíře a rovněž jsou součástí řady programů z druhého pilíře SZP (viz. kapitola 6.1). Metodika tak podporuje realizaci nových pravidel SZP zaměřených na péči o půdu.

Z dlouhodobého hlediska metodika přispěje ke snížení nákladů a zlepšení stavu a úrodnosti půdy v ČR.



## 7. Seznam použité a související literatury

- Al-Kaisi M. M., Douelle A., Kwaw-Mensah D. (2014): Soil microaggregate and macroaggregate decay over time and soil carbon change as influenced by different tillage systems. *Journal of Soil and Water Conservation*, 69(6): 574–580.
- Amézketa E. (1999). Soil Aggregate Stability: A Review. *Journal of Sustainable Agriculture*, 14: 83–151.
- Avnimelech Y., Cohen A. (1989): Use of organic manures for amendment of compacted clay soils. II. Effect of carbon to nitrogen ratio. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 20: 1635–1644.
- Barthés B., Roose E. (2002): Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. *Catena*, 47: 133–149.
- Bartlová J., Badalíková B., Pospíšilová L., Pokorný E., Šarapatka B. (2015): Water stability of soil aggregates in different systems of tillage. *Soil and Water Research*, 10 (3): 147-154.
- Bayer C., Spagnollo E., Wildner L.P., Ernani P.R., Alburquerque J.A. (2003): Incremento de carbono e nitrogênio num Latossolo pelo uso de plantas estivais para cobertura do solo. *Ci. Rural*, 33:469-475.
- Blanco-Canqui H. (2017): Biochar and Soil Physical Properties. *Soil Science Society of America Journal* 81:687-711.
- Blanco-Canqui H., Ferguson R.B., Shapiro Ch. A., Drijber R. A., Walters D. T. (2014): Does Inorganic Nitrogen Fertilization Improve Soil Aggregation? Insights from Two Long-Term Tillage Experiments. *Journal of Environmental Quality*, 43: 995-1003.
- Bronick C.J., Lal R. (2005): Soil structure and management: A review. *Geoderma*, 124: 3-22.
- Brtnický M., Elbl J., Dvořáčková H., Kynický J., Hladký J. (2017): Changes in soil aggregate stability induced by mineral nitrogen fertilizer application. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 65: 1477-1482.
- Bullock M. S., Kemper W. D., Nelson S. D. (1988): Soil cohesion as affected by freezing, water content, time and tillage. *Soil Science Society of America Journal*, 52: 770–776.
- Burrell L.D., Zehetner F., Rampazzo N., Wimmer B., Soja G. (2016): Long-term effects of biochar on soil physical properties. *Geoderma*, 282: 96-102.
- Cambardella C.A. (2002): Aggregation and Organic Matter. In: Lal, R.[ed.]. *Encyclopedia of Soil Science*. Marcel Dekker, Inc., New York, 41-44, ISBN 0-8247-0634-X.
- Cambardella C. A., Elliott, E. T. (1993): Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 57: 1071–1076.
- Carter M. R. (1992): Influence of reduced tillage systems on organic matter, microbial biomass, macro-aggregate distribution and structural stability of a surface soil in a humid climate. *Soil and Tillage Research*, 23: 361–372.

- Carter M. R. (1994): A review of conservation tillage strategies for humid temperate regions. *Soil and Tillage Research*, 31: 289–301.
- Carter M. R. (2004) Researching structural complexity in agricultural soils. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79.1: 1–6.
- Cassel D. K., Raczowski C. W., Denton H. P. (1995): Tillage effects on corn production and soil physical conditions. *Soil Science Society of America Journal*, 59: 1436–1443.
- Cerda A. (2000): Aggregate stability against water forces under different climates on agriculture land and scrubland in southern Bolivia. *Soil and Tillage Research*, 57: 159-166.
- Chan K. Y. (1995): Enhanced structural stability of a straw amended soil in the presence of gypsum.. *Comm. Soil Science and Plant Analysis*, 26: 1023–1032.
- Dexter A. R. (1988): Advances in characterization of soil structure. *Soil and Tillage Research*, 11: 199–238.
- Dowdeswell-Downey E., Grabowski R., and Rickson J. (2020): Temperature and moisture content influences aggregate stability: linking climate induced microbial change to aggregate (de)stabilisation, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-16470, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-16470>, 2020.
- Duiker S.W., Rhoton F.E., Torrent J., Smeck N.E., Lal R. (2003): Iron (hydr)oxide crystallinity effects on soil aggregation. *Soil Science Society of America Journal*, 67: 606–611.
- Fajardo M., McBratney A. (2019). Slakes: A soil aggregate stability smart-phone app [Mobile application software]. Retrieved from <https://play.google.com/store/apps/details?id=slaker.sydneyuni.au.com.slaker&hl=en>. The University of Sydney, Australia.
- Fajardo M., McBratney A.B., Field D.J., Minasny B. (2016): Soil slaking assessment using image recognition. *Soil and Tillage Research*, 163: 119-129.
- Fierer N., Shimel J.P., Holden P.A. (2003): Variations in microbial community composition through two soil depth profiles. *Soil Biology & Biochemistry*, 35: 167-176.
- Fonte S.J, Yeboah E., Ofori P., Quansah G.W., Vanlauwe B., Six J. (2009): Fertilizer and Residue Quality Effects on Organic Matter Stabilization in Soil Aggregates. *Soil Science Society of America Journal*, 73: 961-966.
- Georgiadis A., Dietel J., Dohrmann R., Rennert T. (2020): What are the nature and formation conditions of hydroxy-interlayered minerals (HIMs) in soil? *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 183: 12–26.
- Gibbs R. J., Reid J. B. (1988): A conceptual model of changes in soil structure under different cropping systems. In *Advances in soil science*. Edited by: Stewart, B. A. Vol. 8, 123–149. Springer-Verlag New York, Inc.
- Goldberg S., Kapoor B.S., Rhoades J.D. (1990): Effect of aluminium and iron oxides and organic matter on flocculation and dispersion of arid zone soils. *Soil Science* 150: 588-593.

- Habel A. (2013): The Role of Climate on The Aggregate Stability and Soil Erodibility of Selected El-Jabal Al-Akhdar Soils-Libya. *Alex.J.Agric.res.* 58: 161-271.
- Hadas A., Rawitz E., Etkin H., Margolin, M. (1994): Short-term variations of soil physical properties as a function of the amount and C/N ratio of decomposing cotton residues. I. Soil aggregation and aggregate tensile strength. *Soil and Tillage Research*, 32: 183–198.
- Hamza M. A., Anderson W. K. (2005): Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes, and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, 82:121–145.
- Hillel D. (2004): *Introduction to environmental soil physics*. Boston. Elsevier Academic Press, 494 p. ISBN 01-234-8655-6.
- Janeček M. a kol. (2012) *Ochrana zemědělské půdy před erozí*. Praha: VÚMOP, v.v.i.
- Jin V.L., Wienhold B.J., Mikha M.M., Schmer M.R. (2021): Cropping system partially offsets tillage-related degradation of soil organic carbon and aggregate properties in a 30-yr rainfed agroecosystem. *Soil and Tillage Research*, 209: 104968.
- Kaiser M., Ellerbrock R.H., Wulf M., Dultz S., Hierath C., Sommer M. (2012): The influence of mineral characteristics on organic matter content, composition, and stability of topsoils under long-term arable and forest land use. *Journal of Geophysical Research*, 117: 1–16.
- Kandeler E. (1996): Aggregate stability. In: Schiner F., Öhlinger R., Kandeler E., Margesin R. (eds.): *Methods in Soil Biology*. Berlin, Springer-Verlag, 426 p.
- Kasper M., Buchan G. D., Mentler A., Blum W. E. H. (2009): Influence of soil tillage systems on aggregate stability and the distribution of C and N in different aggregate fractions. *Soil and Tillage Research*, 105: 192–199.
- Kelishadi H., Mosaddeghi M.R., Ayoubi S., Mamedov A.I. (2018): Effect of temperature on soil structural stability as characterized by high energy moisture characteristic method. *Catena*, 170: 290-304.
- Khademalrasoul A., Naveed M., Heckrath G., Kumari, K.G.I.D., de Jonge L.W., Elsgaard L., Vogel H.J., Iversen B.V. (2014): Biochar Effects on Soil Aggregate Properties Under No-Till Maize. *Soil Science*, 179: 273-283.
- Kladivko, E.J. 2001. Tillage systems and soil ecology. *Soil and Tillage Research*. 61:61–76.
- Kleber M., Eusterhues K., Keiluweit M., Mikutta Ch., Mikutta R., Nico P.S. (2015): Chapter one – Mineral–Organic Associations: Formation, Properties, and Relevance in Soil Environments. *Advances in Agronomy*, Editor: Donald L. Sparks, Volume 130, pp. 1-140, ISSN 0065-2113 ISBN 9780128021378.
- Kodešová R., Kodeš. V., Žigová A., Šimůnek J. (2006): Impact of plant roots and soil organisms on soil micromorphology and hydraulic properties. *Biologia*, 61: 339–343.
- Lado M., Ben-Hur M. (2004): Soil mineralogy effects on seal formation, runoff and soil loss. *Applied Clay Science*, 24: 209–224.

- Lavee H., Sarah, P., Imeson A. C. (1996). Aggregate Stability Dynamics as Affected by Soil Temperature and Moisture Regimes. *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography*, 78(1): 73–82.
- Le Bissonnais Y. (1996): Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 47: 425-437.
- Liang A.Z., Yang X.M., Zhang X.P., Shen Y., Shi X. H., Fan R.Q. a kol. (2009): Short-term impacts of no-tillage on soil organic carbon associated with water-stable aggregates in Black Soil of Northeast China. *Scientia Agricultura Sinica*, 42(8): 2801–2808.
- Mahboubi A. A., Lal R. and Faussey N. R. (1993): Twenty-eight years of tillage effects on two soils in Ohio. *Soil Science Society of America Journal*, 57: 506–512.
- Macháč J., Nobilis L., Zaňková L., Matějka J., Dubová L., Hekerle M., Maňhal J. (2020): Metodika ocenění externalit produkce biomasy a zahrnutí jejich vlivů do regulace rozvoje OZE. Institut pro ekonomickou a ekologickou politiku, Ústí nad Labem, 51 s. [http://www.ieep.cz/wp-content/uploads/2021/04/Metodika\\_NAZV\\_Externality\\_Final.pdf](http://www.ieep.cz/wp-content/uploads/2021/04/Metodika_NAZV_Externality_Final.pdf).
- Macháč J., Trantinová M., Zaňková L. (2020). Externalities in agriculture: How to include their monetary value in decision making. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-18.
- Mielniczuk J. (1999): Organická hmota a udržitelnost zemědělských systémů. In: Santos, G.A. & Camargo, F.A.O., eds. *Základy půdní organické hmoty – tropické a subtropické ekosystémy*. Porto Alegre, Genesis, 1-8.
- Naidu R., McClure S., McKenzie N. J., Fitzpatrick, R. W. (1996): Soil solution composition and aggregate stability changes caused by long-term farming at four contrasting sites in South Australia. *Australian Journal of Soil Research*, 34: 511–527.
- Naveed M., Moldrup P., Vogel H.J., Lamandé M., Wildenschild D., Tuller M., de Jonge L.W. (2014): Impact of long-term fertilization practice on soil structure evolution. *Geoderma*, 217–218: 181–189.
- Nimmo J.R., Perkins K.S. (2002): Aggregate stability and size distribution. In: Dane, J.H, Topp, G.C. [eds.]. *Methods of Soil Analysis, Part 4 – Physical Methods*, Soil Science Society of America, Inc. Madison, No. 5: 317-328.
- Oades J. M. (1993): The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma*, 56: 377–400.
- Obalum S. E., Uteau-Puschmann D., Peth S. (2019): Reduced tillage and compost effects on soil aggregate stability of a silt-loam Luvisol using different aggregate stability tests. *Soil and Tillage Research*, 189: 217-228.
- Ouyang L., Wang F., Tang J., Yu L., Zhang R. (2013): Effects of biochar amendment on soil aggregates and hydraulic properties. *Journal of Science and Plant Nutrition*, 13: 991-1002.
- Pikul J. L. Jr., Zuzel J. F. (1994): Soil crusting and water infiltration affected by long-term tillage and residue management. *Soil Science Society of America Journal*, 58: 1524–1530.

- Pretty J., Brett C., Gee D., Hine R., Mason Ch., Morison J., Rayment M., Van der Bijl G., Dobbs T. (2001). Policy challenges and priorities for internalizing the externalities of modern agriculture. *Journal of environmental planning and management*, 44: 263-283.
- Reichert J.M., Norton L.D., Favaretto N., Huang C., Blume E. (2009): Settling Velocity, Aggregate Stability, and Interrill Erodibility of Soils Varying in Clay Mineralogy. *Soil Science Society of America Journal*, 73(4):1369-1377.
- Regelink I.C., Weng L., Koopmans G.F., Van Riemsdijk W.H. (2013): Asymmetric flow field-flow fractionation as a new approach to analyse iron-(hydr) oxide nanoparticles in soil extracts. *Geoderma*, 202: 134–141.
- Regelink I.C., Stoof C.R., Rousseva S. Weng L., Lair G.J., Kram P., Nikolaidis N.P., Kercheva M., Banwart S., Comans R.N.J. (2015): Linkages between aggregate formation, porosity and soil chemical properties. *Geoderma*: 24–37.
- Roberson E. B., Sarig S. and Firestone M. K. (1991): Cover crop management of polysaccharide-mediated aggregation in an orchard soil. *Soil Science Society of America Journal*, 55: 734–739.
- Sei, J. Jumas J.C, Olivier-Fourcade J., Quiquampoix H., Staunton S. (2002): Role of iron oxides in the phosphate adsorption properties of kaolinites from the ivory coast. *Clay and Clay Minerals*, 50 (2): 217–222.
- Six J., Elliot E.T., Paustian K. (1999): Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Science Society of America Journal*. 63: 1350–1358.
- Six. J., Bossuyt H., Degryze, Deneff K. A. (2004): History on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic dynamic. *Soil and Tillage Research*, 79: 7–31.
- Soane B. D., Dickson J. W., Campbell D. J. (1982): Compaction by agricultural vehicles: a review. 3. Incidence and control of compaction in crop production. *Soil and Tillage Research*, 2: 3–36.
- Sposito G., Skipper N.T., Sutton R., Park S.H., Soper A.K., Greathouse J.A. (1999): Surface geochemistry of the clay minerals. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 96: 3358–3364.
- Stehlíková I., Madaras M., Lipavský J., Šimon, T. (2016): Study on some soil quality changes obtained from long-term experiments. *Plant Soil and Environment*, 62: 74-79.
- Stehlíková I., Teplá D., Madaras M. (2014): Vliv různých systémů hospodaření na půdě na stabilitu půdních agregátů. *Úroda*, 62 (12, vědecká příloha): 425–428.
- Sun F.F., Lu S.G. (2014): Biochars improve aggregate stability, water retention, and pore- space properties of clayey soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177: 26-33.
- Tisdall J. M., Cockroft B., Uren, N. C. (1978): The stability of soil aggregates as affected by organic materials, microbial activity and physical disruption. *Australian Journal of Soil Research*, 16: 9–17.
- Tisdall J. M., Oades J. M. (1982): Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33: 141–163.

- Tombacz E., Szekeres M. (2004): Colloidal behavior of aqueous montmorillonite suspensions: the specific role of pH in the presence of indifferent electrolytes. *Applied Clay Science*, 27: 75–94.
- Topa D., Cara I. G., Jitäreanu G. (2021): Long term impact of different tillage systems on carbon pools and stocks, soil bulk density, aggregation and nutrients: A field meta-analysis, *Catena*, 199, 105102.
- Unger P. W. (1992): Infiltration of simulated rainfall: Tillage system and crop residue effects. *Soil Science Society of America Journal*, 56: 283–289.
- Wang Y., Wang Z.L., Zhang Q., Hu N., Li Z., Lou Y., Li Y., Wue D., Chen Y., Wu Ch., Zou Ch.B., Kuzyakov Y. (2018): Long-term effects of nitrogen fertilization on aggregation and localization of carbon, nitrogen and microbial activities in soil. *Science of The Total Environment*, 624: 1131-1139.
- Watts C. W., Dexter A. R., Longstaff D. J. (1996): An assessment of the vulnerability of soil structure to destabilization during tillage. Part II. Field trials. *Soil and Tillage Research*, 37: 175–190.
- Wohlenberg E.V., Reichert J.M., Reinert D.J, Blume E. (2004): Aggregation dynamics of a sandy soil under five cropping systems in rotation and in succession. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 28: 891-900.
- Wollenhaupt N. C., Bosworth A. H., Doll J. D., Undersander D. J. (1995): Erosion from alfalfa established with oat under conservation tillage. *Soil Science Society of America Journal*, 59: 538–543.
- Zhou H., Peng X., Perfect E., Xiao T., Peng G. (2013): Effect of organic and inorganic fertilization on soil aggregation in an Ultisol as characterized by synchrotron based X-ray micro-computed tomography. *Geoderma*, 195 – 196: 23-30.

## 8. Seznam publikací, které předcházely metodice

Madaras M., Krejčí M. Způsob stanovení stability půdních agregátů a zařízení pro toto stanovení. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i. Číslo patentu: 308456. Datum udělení patentu: 15.07.2020.

Madaras M., Mayerová M., Czako A. Způsob stanovení stability půdních agregátů pomocí optické detekce jejich rozpadu ve vodě. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i. Číslo technologie: VÚRV-OT-6/2019.

Madaras M., Mayerová M., Krejčí R. Měřič stability půdních agregátů. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i. Datum zapsání vzoru: 01.10.2020. Číslo vzoru: FV-08-2020.

Madaras M., Mayerová M., Stehlík M., Czako A. Stanovení kvality půdní struktury pomocí mobilních zařízení. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i. Číslo certifikované metodiky: VÚRV-10/2020.

Madaras M., Stehlík M., Mayerová M., Procházka J. LED panel pro měření stability půdních agregátů pomocí aplikace SLAKES. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i. Datum zapsání vzoru: 01.10.2020. Číslo vzoru: FV-07-2020.

Stehlík M., Czako A., Mayerová M., Madaras M. (2019): Influence of organic and inorganic fertilization on soil properties and water infiltration. *Agronomy Research*, 17: 1769-1778.

Stehlíková I., Madaras M., Lipavský J., Šimon, T. (2016): Study on some soil quality changes obtained from long-term experiments. *Plant Soil and Environment*, 62: 74-79.

Stehlíková I., Teplá D., Madaras M. (2014): Vliv různých systémů hospodaření na půdě na stabilitu půdních agregátů. *Úroda*, 62 (12, vědecká příloha): 425–428.

Řezáčová V., Czako A., Stehlík M., Mayerová M., Šimon T., Smatanová M., Madaras M. (2021): Improved soil aggregation due to the application of compost and digestates is accompanied by increased abundance of eubacteria, glomalins, soil fertility and decomposition resistance. *Scientific Report* 11, 12548.