

## **INTEKO ATCZ42**

AT 1.2.1; AT 1.2.2

Inovovaná metoda měření vyplavování  
dusičnanů, metoda měření pohybu  
dusičnanů v půdě - dopady kompostu



## Obsah

1	ÚVOD.....	6
2	Popis metody.....	7
2.1	Princip měření pomocí iontoměničů ( <i>zpracováno P. Straussem a A. Tiefenbacher, Bundesamt für Wasserwirtschaft - PP4</i> ) .....	7
2.2	Chemická parametrizace iontoměničových pryskyřic .....	8
2.2.1	Adsorpce .....	8
2.2.2	Regenerace / desorpce: .....	9
2.3	Fyzikální parametrizace iontoměničových pryskyřic .....	11
2.4	Vliv živých organismů na množství dusičnanů v půdě .....	12
3	Ověření v polních podmínkách .....	13
3.1	Iontoměničové sondy aplikované přímo do půdy .....	14
3.1.1	Příprava a příklady použití.....	14
3.1.2	Testování v lyzimetrických nádobách .....	17
3.2	Iontoměničové disky aplikované přímo do půdy .....	26
3.3	Inovované iontoměničové disky aplikované přímo do půdy .....	28
3.4	Systém zachytu vyplavovaného minerálního dusíku iontoměniči umožňující výměnu iontoměničů z povrchu půdy a přepočet výsledků na plochu .....	30
3.5	Nový systém zachytu vyplavovaného minerálního dusíku iontoměniči umožňující výměnu iontoměničů z povrchu půdy .....	39
4	Literatura .....	45

## Seznam tabulek

Tabulka 1	Regenerace iontoměničů rozdílnou koncentrací regeneračních roztoků. ....	10
Tabulka 2	Hydraulická vodivost iontoměničů .....	11
Tabulka 3	Varianty nádobového pokusu (n = počet opakování) .....	19

## Seznam obrázků

Obrázek 1	Princip měření pomocí iontoměničových pryskyřic (Alexandra Tiefenbacher, INTEKO, 2018) .....	8
Obrázek 2	Rychlost adsorpce dusičnanů. Kumulativní koncentrace dusičnanů (modrá); dříve stanovená absorpční kapacita iontoměniče (žluté označení) .....	9

Obrázek 3 Průměrná koncentrace desorbovaného dusičnanu a průměrná výtěžnost (%) v průběhu sériové regenerace: první (modrá), druhá (oranžová), třetí (šedá). (n = 4).	10
Obrázek 4 Parametry Darcyho zákona.	11
Obrázek 5 Koloběh dusíkatých látek v agroekosystému.	12
Obrázek 6 Přehled metod, ve kterých jsou uplatňovány iontoměniče.	14
Obrázek 7 Schematické znázornění iontoměničové sondy zapravené do půdního profilu.	15
Obrázek 8 Způsob záchytu iontů do struktur iontoměničů.	15
Obrázek 9 Historicky první použití iontoměničových sond.	16
Obrázek 10 Příklad další aplikace iontoměničových sond.	17
Obrázek 11 Příprava lyzimetrických nádob.	18
Obrázek 12 Osazování připravených lyzimetrických nádob.	18
Obrázek 13 Způsob shromažďování perkolátů.	19
Obrázek 14 Vyplavování minerálních forem dusíku z experimentálních nádob ve třech po sobě jdoucích obdobích v absolutních hodnotách.	20
Obrázek 15 Vyplavování fosforu z experimentálních nádob ve třech po sobě jdoucích obdobích v absolutních hodnotách.	21
Obrázek 16 Uložení iontoměničových sond v nádobách.	22
Obrázek 17 Dostupnost amonného dusíku ve třech po sobě jdoucích obdobích měřená v povrchové vrstvě půdy 0- 10 cm v experimentálních nádobách.	22
Obrázek 18 Dostupnost dusičnanového dusíku ve třech po sobě jdoucích obdobích měřená v povrchové vrstvě půdy 0- 10 cm v experimentálních nádobách.	23
Obrázek 19 Dostupnost fosforu ve třech po sobě jdoucích obdobích měřená v povrchové vrstvě půdy 0- 10 cm v experimentálních nádobách.	24
Obrázek 20 Princip měření produkce CO <sub>2</sub> .	25
Obrázek 21 Půdní respirace.	26
Obrázek 22 Plochý iontoměničový disk připravený k aplikaci do půdy.	27
Obrázek 23 Vložení plochých iontoměničových disků do půdního profilu v hloubce 20 a 50 cm.	27
Obrázek 24 Kumulativní záchyt amonného a nitrátového dusíku.	28
Obrázek 25 Inovace původního plochého disku.	29
Obrázek 26 Sestavení inovovaných iontoměničových disků a příprava na jejich zapravení do půdy.	29
Obrázek 27 Vložení iontoměničových disků do půdy.	30
Obrázek 28 Detailní pohled na (a) povrch disku uzavřený polyamidovou síťovinou o hustotě ok 47 μm, (b) stejný princip byl využit pro uzavření zasakovací nálevky, (c) detail přesahu na okraji nálevky vymezující plochu zasakování, (d) celkový pohled na zasakovací nálevku o průměru 80 mm.	31
Obrázek 29 Schématické znázornění záchytu perkolátů.	31
Obrázek 30 Výměna iontoměničových váčků z povrchu půdy.	32
Obrázek 31 Lokalita "Větrolam".	32
Obrázek 32 Umístění výzkumných lokalit.	33
Obrázek 33 Pohled z dronu na lokalitu „Babička“ doplněný o rozvržení pokusných parcel.	33
Obrázek 34 Schéma polního pokusu.	33
Obrázek 35 Produkce nadzemní biomasy v roce 2017 a v roce 2018.	35
Obrázek 36 Půdní respirace v roce 2017 a v roce 2018.	36
Obrázek 37 Záchyty amonného a nitrátového dusíku v hloubce 25 cm.	37
Obrázek 38 Záchyty amonného a nitrátového dusíku v hloubce 50 cm.	38

Obrázek 39 Schéma nového systému pro záchyt vyplavovaného minerálního dusíku iontoměniči umožňující výměnu iontoměničů z povrchu půdy .....	39
Obrázek 40 Příprava instalace jímací soupravy .....	40
Obrázek 41 Záchyty amonného a nitrátového dusíku v hloubce 25 cm .....	41
Obrázek 42 Záchyty amonného a nitrátového dusíku v hloubce 50 cm .....	42
Obrázek 43 Záchyt minerálního fosforu v hloubkách 25 a 50 cm – iontoměniče .....	43

## 1 ÚVOD

Obsah minerálního dusíku a potenciálně mineralizovatelného dusíku v půdě se obvykle stanovuje inkubačními metodami v laboratoři nebo chemickou analýzou. Tyto výsledky se však liší od skutečných hodnot. Od vzorkování až po analýzu dochází ke kumulaci chyb, které jsou výsledkem manipulace se vzorkem. Přesné stanovení minerálního dusíku v půdě je obzvláště problematické, protože je ovlivněno velkým počtem dynamických a lokálně specifických faktorů. Proto jsou prováděny pokusy vyvinout nové systémy, které mapují skutečnou mineralizaci dusíku co nejpřesněji na daném místě (Hanselman et al., 2004). Dosud je stanovení koncentrace dusičnanů *in situ* stále považováno za výzvu (Willich a Buerkert, 2016).

Intenzivně využívaná orná půda má ve srovnání s jinými formami zemědělského obhospodařování a kultivace pravděpodobně nejvyšší potenciál vyplavování dusičnanů. Ve většině případů má nesprávné hnojení za následek přebytek dusíku v zemědělských půdách, což vede k vyplavování dusičnanů do podzemních vod. Podle české a rakouské legislativy je limitní hodnota dusičnanů v pitné vodě 50 mg / l. Vyšší koncentrace ovlivňují lidské zdraví a vedou k eutrofizaci vodních ekosystémů. Proto je nesmírně důležité vyvinout levný a účinný systém, který by byl schopen podat informaci o nežádoucím vyplavování dusičnanů do půdy a následně do podzemních vod.

Míra mineralizace půdy je určována množstvím různých faktorů, jako je typ půdy, množství a kvalita posklizňových zbytků, množství kořenové hmoty a kořenových výměšků, bilance vody v půdě, teplota půdy, výměna půdního vzduchu a způsoby zpracování půdy. Na základě přímého měření vyplavování dusičnanů z půdy může tak chemická analýza určit v konkrétním čase pouze výsledky nedávného vzájemného působení těchto faktorů, které jsou v čase a sezónně velmi proměnlivé, a závěry a interpretace týkající se dosavadní míry mineralizace dusíkatých látek v půdě mohou být takto určeny pouze okrajově (Weinhold et al., 2009). Metody, které zaznamenávají *in situ* vyplavování dusičnanů kumulativně, by zachytily mineralizaci dusíku a následné vyplavování dusičnanů v půdě přesně pro určité období, např. pro období vegetačního klidu, nebo pro období vegetační sezóny. Díky výsledkům získaným takovouto metodou by mohla dávat přesná doporučení pro hnojení.

Jednou ze zkoumaných metod pro zlepšenou detekci pohybu nitrátů v půdě *in situ* je metoda využití iontoměničů, iontoměničových pryskyřic. Jsou připraveny z umělého polymeru, na němž mohou být rozpuštěné ionty výměně adsorbovány. Iontoměniče absorbují ionty nepřetržitě až do jejich kapacitního limitu. Proto jsou předurčeny pro kumulativní testy, ve kterých by měly být toky živin zaznamenávány po definovaná období. Iontoměniče se již používaly pro detekci toků živin v půdě během vegetačního období (Yavitt a Wright, 1996) a také se hodnotilo zatížení dusičnanů v půdě (Willich a Buerkert, 2016).

Iontoměničové pryskyřice jsou většinou hrubozrnnější než okolní půda, takže přes iontoměničové směsi proudí jen malá část půdní vody. Tento nedostatečný hydraulický kontakt mezi iontoměničem a půdou je důležitým omezujícím faktorem. Předběžná kalibrace iontoměničů bromidem (Li a kol. 1993; Schwartz a kol. 1999) nebo stronciem (Lehmann a kol. 2001) by mohla tento problém eliminovat.

Dosud však nebyl vyvinut systém, který by byl schopen souhrnným, kumulativním způsobem stanovit množství uvolňovaného minerálního dusíku *in situ*. Zavedením takového systému by mohla být

zpřesněna doporučení pro efektivní aplikace hnojiv pro zranitelné a rizikové oblasti a dlouhodobě by tak mohlo být sníženo znečištění dusičnany v podzemních vodách.

Cílem inovované metody je zajistit zachycení nadbytečných minerálních forem dusíku, které jsou vyplavovány z (orné) půdy v průběhu stanovených období. Přestože metoda zachycuje minerální formy dusíku, jejichž množství je určováno mikrobiálními přeměnami dusíkatých látek, není schopna měřit vlastní mikrobiální odběr a produkci těchto látek, není schopna měřit půdní mikrobiální aktivity. Toto omezení je nutné připomenout před detailnějším popisem principu metody.

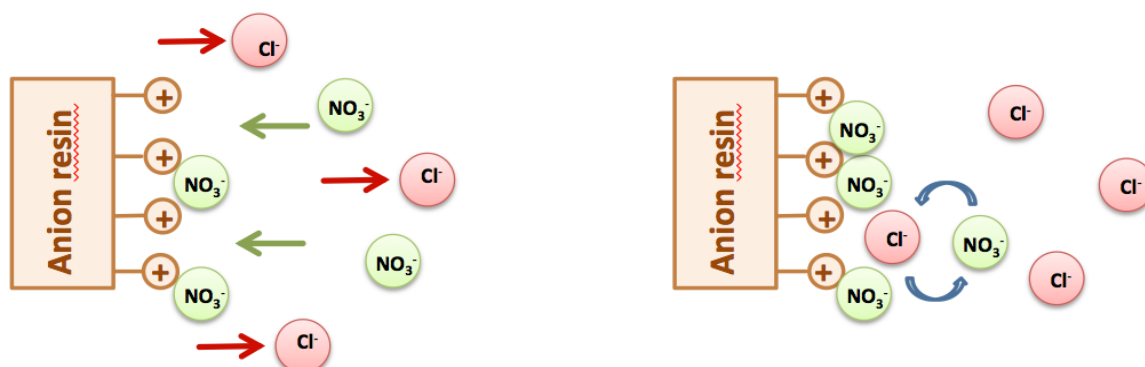
Testování metody, která umožňuje postupný záchyt dusičnanů obsažených v půdním roztoku, bylo rozděleno do dvou částí. V části A byla iontoměničová pryskyřice chemicky a fyzicky testována ve známých, cíleně připravených vodných prostředích a byly vyhodnoceny různé modifikace aplikování iontoměničů v laboratorním měřítku (adsorpce / desorpce). V části B byly testovány různé modifikace zapravení iontoměničových pryskyřic do půdy v experimentech v různých měřících: aplikace různých typů iontoměničových pouzder pro monitorování možných rizik vyplavování dusíku do podzemních vod byla testována v polních a nádobových pokusech. V rámci experimentů byly připraveny různé varianty aplikací aditiv včetně kompostu. Testování metody v laboratorních a polních podmínkách byly iontoměniče ověřovány jako indikátor účinnosti a kvality kompostu a využitelnosti dusíku a fosforu rostlinami s cílem vyhodnocení vlivu základní agrotechniky zemědělských půd v oblastech erozně ohrožených a v oblastech ochrany vod na množství vyplavovaných dusičnanů. Výstupem aktivity je „Inovativní metoda měření vyplavování dusičnanů založená na principu sorpce minerálního dusíku z půdních roztoků na povrch iontoměničových pryskyřičných zrn uložených ve speciálních pouzdrech“. Inovativní metoda měření vyplavování dusičnanů“ je projektovým indikátorem projektu INTEKO.

## 2 Popis metody

### 2.1 Princip měření pomocí iontoměničů (*zpracováno P. Straussem a A. Tiefenbacher, Bundesamt für Wasserwirtschaft - PP4*)

Iontoměniče sestávají z umělého polymeru, pomocí něhož jsou ionty rozpuštěné v roztoku nahrazeny jinými ionty stejného náboje; mechanismus tohoto procesu je založen na iontové výměně. Iontoměniče nepřetržitě absorbují ionty až do jejich kapacitního limitu, což je činí ideálními pro kumulativní měření, ve kterých je tok živin zaznamenáván po stanovenou dobu. Proto se iontoměniče používají ke stanovení živin dostupných v půdě pro rostlinu po definovaná vegetační období.

Princip měření je znázorněn na příkladu použití Purolite® A 520E na obrázku 1. Cílový iont, v tomto případě dusičnan, je reverzibilně adsorbován na iontoměniči náhradou za uvolňování chloridu. Pro fotometrické stanovení dusičnanu musí být adsorbovaný dusičnan desorbován z polymerní pryskyřice, což se provádí nadměrnou koncentrací chloridu v roztoku. Množství adsorbovaného dusičnanu může být v dalším kroku stanoveno stanovením obsahu dusičnanů v roztoku.



Obrázek 1 Princip měření pomocí iontoměničových pryskyřic (Alexandra Tiefenbacher, INTEKO, 2018)

Obrázek 1 znázorňuje princip měření pomocí iontoměničových pryskyřic, tj. měření množství  $\text{NO}_3^-$  pomocí citlivých aniontových pryskyřic; v obrázku označeno jako „Anion resin“); Vlevo: adsorpce: cílové ionty (dusičnaný;  $\text{NO}_3^-$ ) jsou adsorbovány náhradou za uvolňováním chloridu (červená:  $\text{Cl}^-$ ), vpravo: desorpce.

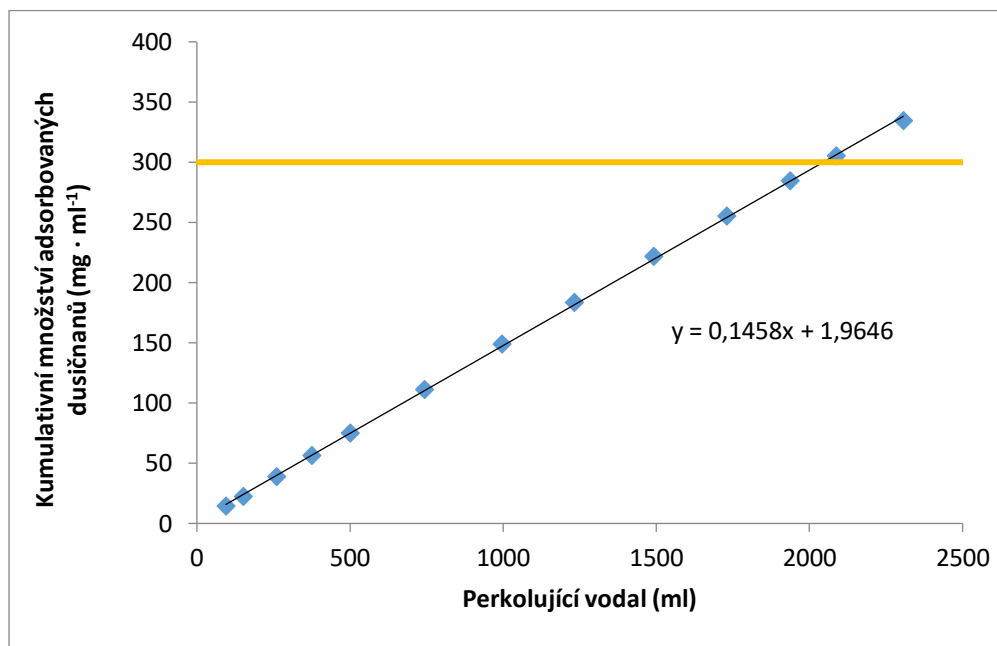
## 2.2 Chemická parametrizace iontoměničových pryskyřic

### 2.2.1 Adsorpce

Výrobce specifikoval adsorpční kapacitu iontoměniče jako 0,5 g dusičnanu na jeden gram pryskyřičných zrn. Tento parametr byl ověřován pomocí velkého počtu testů, průměrná maximální absorpční kapacita byla 0,5287 g dusičnanu na jeden gram iontoměničové pryskyřice.

Rychlost adsorpce iontoměničových pryskyřic byla stanovena pomocí perkolační metody (obrázek 2). Iontoměničová pryskyřice byla kontinuálně promývána roztokem se známou koncentrací dusičnanů a poté, v intervalech 5 minut byly odebírány vzorky pro zpětné stanovení dusičnanů. Dříve stanovená absorpční kapacita iontoměniče (žluté označení v grafice) byla výrazně překročena. Adsorpce dusičnanů v iontoměničové pryskyřici byla rychlá a roztok dusičnanů pronikající pryskyřicí byl pryskyřicí zcela absorbován. Jakýkoli kontakt s roztokem dusičnanu vedl k adsorpci v iontoměničové pryskyřici. Hydraulická vodivost pryskyřice je podrobněji popsána v následující kapitole „Fyzikální hodnocení“.





Obrázek 2 Rychlost adsorpce dusičnanů. Kumulativní koncentrace dusičnanů (modrá); dříve stanovená absorpční kapacita iontoměniče (žluté označení)

### 2.2.2 Regenerace / desorpce:

Předtím, než může být koncentrace adsorbovaného dusičnanu stanovena fotometricky, je nutná regenerace, tj. desorpce adsorbovaného dusičnanu. Nasorbovaná iontoměničová pryskyřice byla regenerována regeneračními roztoky různých koncentrací (tabulka 1). Čím nižší je molarita regeneračního roztoku, tím nižší je koncentrace desorbovaného dusičnanu. Ve výsledku se to projeví tak, že 0,1 molární roztok chloridu sodného (regenerační roztok) byl schopen oddělit nejmenší množství dusičnanů z iontoměničové pryskyřice. S 1 molárním roztokem chloridu sodného lze dosáhnout uspokojivé desorpce. Vyšší molarity nebyly zkoušeny, protože halogeny, jakým je i tento chlorid, mají při dlouhodobějším; měření negativní dopad na měřicí přístroj. I přes halogenový lapač před detektorem fotometru by chlorid mohl způsobit oxidaci detektoru a tím zničit detektor.

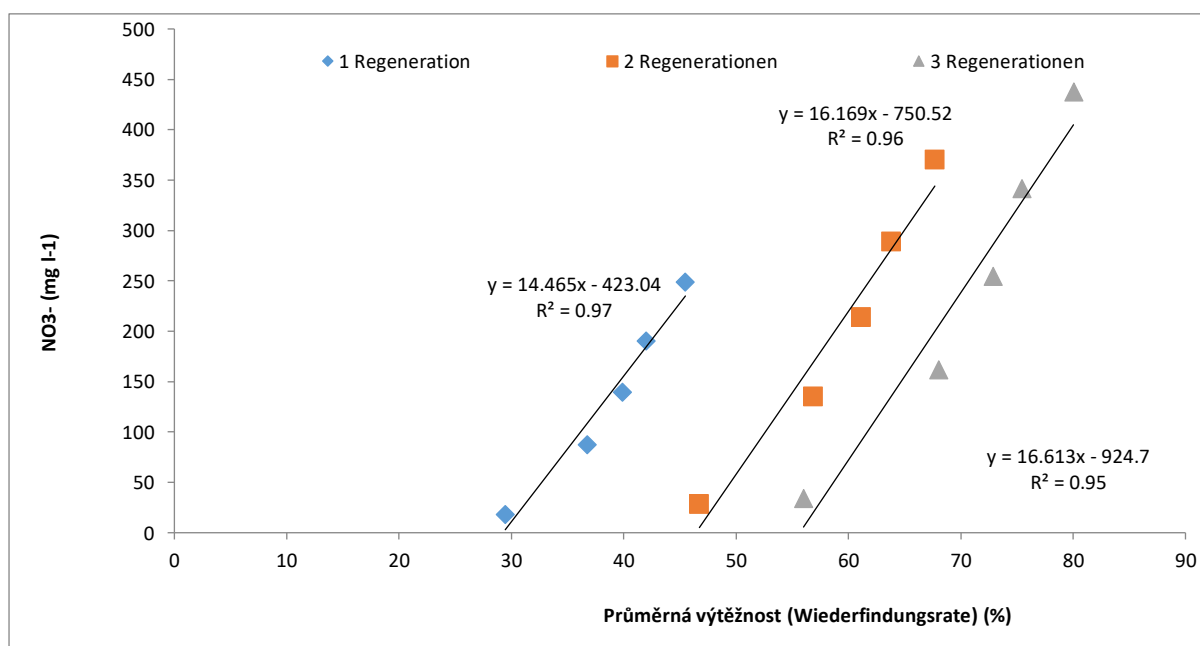
Před a po každé regeneraci byly iontoměniče při pokojové teplotě vysušeny a byla stanovena suchá hmotnost iontoměničů. V případě rutinní, sériové regenerace by byla stanovována suchá hmotnost iontoměniče před a po každé regeneraci. Všechny parametry, které ovlivňují regeneraci, byly stanoveny podle „metody pokusu a omylu“, což vedlo k následujícímu pracovnímu protokolu: exponované iontoměniče jsou třepány s 50 ml 1M roztoku NaCl po dobu 3 hodin, před a po každém regeneračním kroku jsou iontoměničové pryskyřice sušeny při pokojové teplotě, aby se stanovila jejich počáteční a konečná hmotnost.

Tabulka 1 Regenerace iontoměníčů rozdílnou koncentrací regeneračních roztoků.

Regenerační roztok	Koncentrace dusičnanů v roztoku	Měřená koncentrace dusičnanů
1 M NaCl	545.28	261.57
0,5 M NaCl	542.58	193.51
0,1 M NaCl	546.06	54.99
1 M NaCl	545.62	250.58
0,5 M NaCl	547.44	173.17
0,1 M NaCl	547.70	53.56

V dalším experimentu byla stanovena míra výtěžnosti a to desorpcí (regenerací) pryskyřice. K tomuto účelu byly iontoměníčové pryskyřice nasyceny různými koncentracemi dusičnanů a následně z iontoměníčové pryskyřice desorbovány. Tento proces byl opakován čtyřikrát, aby byla potvrzena reprodukovatelnost získaných výsledků.

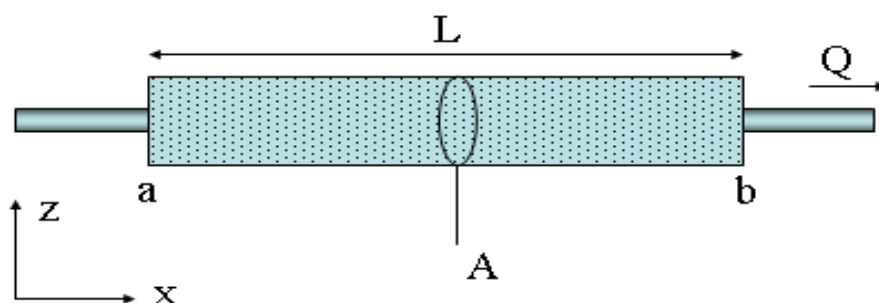
Vícenásobné množství regenerací by postupně desorbovalo více dusičnanů z iontoměníče. Na obrázku 3 je ukázán vztah mezi výtěžností a koncentrací dusičnanů v roztoku. Výsledná hodnota z každého regeneračního kroku byla přidána k předchozímu regeneračnímu kroku, výsledek třetího znázorněného regeneračního procesu je tedy součtem prvního, druhého a třetího regeneračního kroku. Čím vícekrát došlo k regeneraci, tím více dusičnanů bylo možné desorbovat. Vztah mezi výtěžností a koncentrací dusičnanů v roztoku je lineární, a proto je možno koncentraci dusičnanů zachycených v iontoměníči odvodit i po první regeneraci.



Obrázek 3 Průměrná koncentrace desorbovaného dusičnanu a průměrná výtěžnost (%) v průběhu sériové regenerace: první (modrá), druhá (oranžová), třetí (šedá). (n = 4).

## 2.3 Fyzikální parametrizace iontoměničových pryskyřic

Pro fyzikální parametrizaci iontoměničové pryskyřice byl založen perkolační test. Důležitým fyzikálním měřítkem je vodivost vody, která odráží pohyb vody v půdě a je charakterizována Darcyho rovnicí. Obr. 4 ukazuje hlavní parametry Darcyho zákona. Průměrná průtoková rychlost roztoku dusičnanu přes iontoměnič byla  $49,89 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ . Plocha ( $A$ ) byla  $1,33 \text{ cm}^2$ , délka kolony ( $l$ ) byla  $7,2 \text{ cm}$  a výška tlakové ztráty byla ( $\Delta h$ )  $27,2 \text{ cm}$ . Tak bylo možno vypočítat hydraulickou vodivost  $143 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ .



Obrázek 4 Parametry Darcyho zákona.

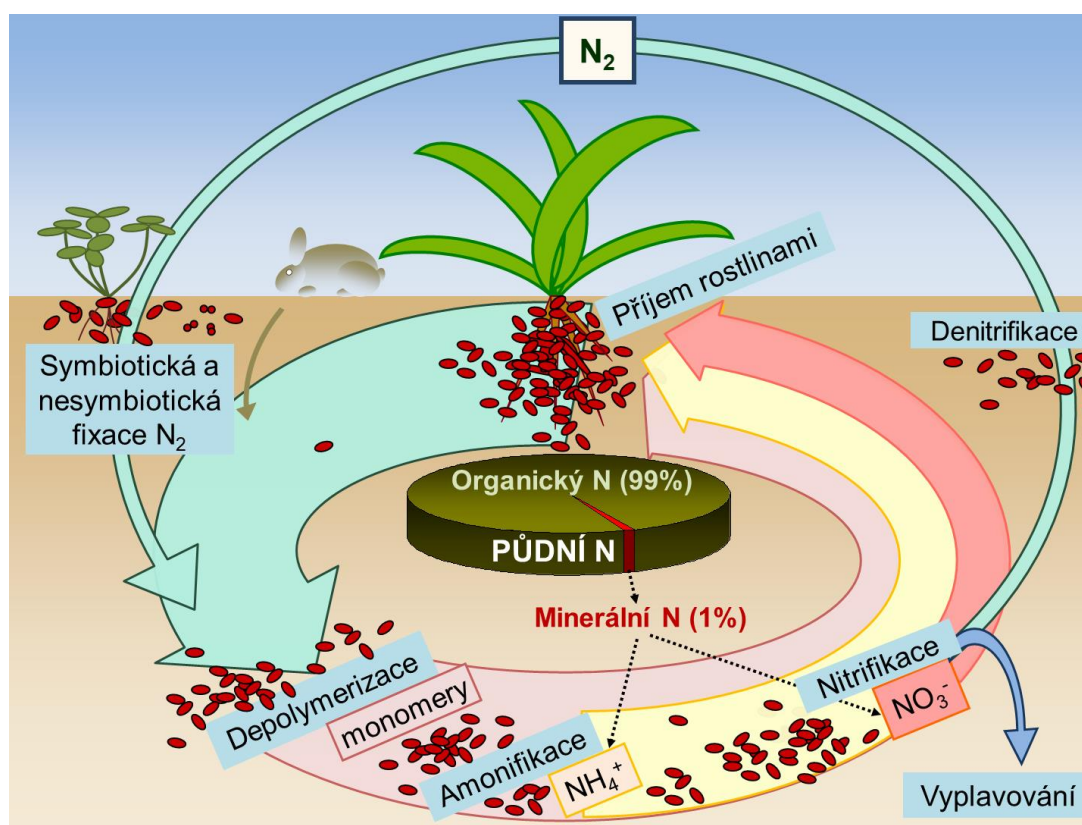
Průměrná hydraulická vodivost iontoměničové pryskyřice ( $143 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ ) je podobná vodivosti půdního typu s vysokým obsahem písku v zrnité frakci (tab. 2). Hydraulická vodivost je mírou odtoku média. Čím je médium poréznější, tím větší je plocha pórů transportujících vodu, v důsledku čehož je odvodnění rychlé. Charakteristickým rysem této oblasti hydraulické vodivosti je vysoký podíl hrubých pórů, které obvykle zajišťují rychlou drenáž. Tvar průtokových drah, charakterizovaný úzkými místy a zakřiveními, také do značné míry určuje vodivost vody. Perkolace dusičnanů závisí na pohybu půdní vody. Aby se zajistil hydraulický kontakt iontoměniče s půdou, je důležité, aby hydraulické vlastnosti iontoměniče odpovídaly vlastnostem půdy, jinak by půdní voda mohla iontoměniče „obtékat“.

Tabulka 2 Hydraulická vodivost iontoměničů

Hmotnost iontoměničů (g)	Hydraulická vodivost ( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ )
48.66	139.7743
49.91	143.3649
50.09	143.8819
50.29	144.4564
50.50	145.0596

## 2.4 Vliv živých organismů na množství dusičnanů v půdě

Teoreticky, za předpokladu rovnoměrné nitrifikace, tedy více méně stálého mikrobiálního uvolňování dusičnanů z půdního prostředí, ve kterém se již nenachází uplatnění pro předcházející meziprodukt mikrobiálních přeměn dusíkatých látek, pro amonný dusík, by cílem modifikace iontoměničů mělo být optimalizovat tento systém tak, aby bylo možné navázat co nejlepší hydraulický kontakt mezi iontoměničovou pryskyřicí a okolní půdou. Praxe je ale přece jen poněkud složitější. K nitrifikaci dochází v půdě nárazově, v době, kdy je například suchem navozená taková situace v půdě, že žádný z živých organismů, které běžně kontrolují množství dusičnanů v půdě, není schopen tuto látku zpracovávat a dusičnany se v půdě hromadí. Následný prudký déšť rozplavuje zásoby dusičnanů do půdy.



Obrázek 5 Koloběh dusíkatých látek v agroekosystému

V přírodních, nebo přírodě blízkých ekosystémech se tak homogenizuje nabídka dusíkatých látek v půdním prostředí. V orných půdách jsou tyto momenty určující pro pohyb klíčové živiny do hlouběji ležících půdních vrstev ke kořenům plodin, a to v její nejatraktivnější podobě, v dusičnanech. Pokud je vegetace stále v růstu, a tím mají i půdní mikroorganismy zajištěn dostatečný přísun energie v podobě jednoduchých organických látek uvolňovaných z kořenů rostlin, je riziko vyplavování dusičnanů

minimální. Stejně tak je riziko paradoxně minimální, pokud vegetace v růstu není, půdní mikroflóra není v dobré kondici a současně je půda fyzikálně silně degradovaná. Taková půda ztěžuje infiltraci srážkové vody, má nadměrný podíl půdních pórů o průměru menším, než je 30  $\mu\text{m}$  a tak dochází velmi rychle ke snížení půdního provzdušení a k masivnímu využívání dusičnanů pro alternativní dýchání specializovaných mikroorganismů - dochází k denitrifikaci a riziko vyplavování dusičnanů z půdy se rovněž snižuje (viz obr. 5). Nadbytečné množství srážkové vody nevsákne, stéká po povrchu, působí erozi, nicméně se nepodílí se na rizikovém posunu dusičnanů do blízkosti podzemních vod. Pro vývoj optimální metody je tedy biologická parametrizace aplikace iontoměničových pouzder minimálně stejně důležitá, jako je parametrizace fyzikální a chemická.

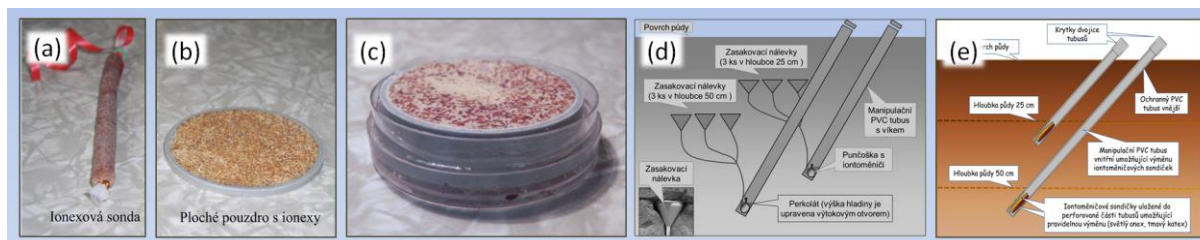
Z biologického hlediska je nutno zachytit nárazové úniky dusičnanů během popisovaného souběhu mimořádných událostí. Není nutno klást takový důraz na měření míry nitrifikace v místech vzniku dusičnanů, na modifikaci iontoměničů k navázání co nejlepšího hydraulického kontaktu mezi iontoměničovou pryskyřicí a okolní půdou. Neustálým odběrem dusičnanů adsorpcí na povrch iontoměničů a jejich výměnou za ionty chloridů totiž měníme aktivním mikroorganismům jejich životní prostředí a dochází k jejich adaptaci. V okolí iontoměničového pouzdra tak může být díky dokonalému hydraulickému kontaktu mezi iontoměniči a půdou a pozměněným podmínkám míra nitrifikace jiná než v okolní půdě. Z biologického hlediska je žádoucí zachytit nárazové úniky dusičnanů při souběhu nepříznivých okolností – dát do cesty prosakující půdní vodě takový „lapač“, který je schopen zachytit vyplavované dusičnany.

### 3 Ověření v polních podmínkách

Různá iontoměničová pouzdra pro monitorování osudů minerálních dusíkatých látek v půdě, která jsou zapravovaná do půdy přímo, jsou na mikrobiologickém pracovišti Agronomické fakulty Mendelovy univerzity používány více než 25 roků. V projektové žádosti INTEKO CZAT 42 je uvedeno, že: „pracovníci Mendelovy univerzity mají velké zkušenosti s technologií využití iontoměničových pouzder, že tyto metody dovolují při příznivých nákladech měřit mobilitu dusíku v půdě během delšího časového období a že Mendelova univerzita bude provádět vědeckou evaluaci výsledků projektu“. Dále, že: „Na základě výsledků testování partneři zpracují report ve formě ukázkové případové studie o testování s předvedením hodnocení výsledků. Podrobný popis jednotlivých kroků, výsledků a jejich verifikace může významným způsobem napomoci implementaci výsledků do praxe v příhraničních regionech, které jsou zdrojem pitné vody“.

Tento materiál, tento výstup z projektu INTEKO, by měl být využitelný praxí, proto je v následujících kapitolách a podkapitolách představen vývoj uplatnění iontoměničů v praxi na příkladu pěti metod využívajících různé možnosti aplikací iontoměničů, které byly využívány a inovovány v průběhu řešení projektu INTEKO (obr. 6).





Obrázek 6 Přehled metod, ve kterých jsou uplatňovány iontoměniče

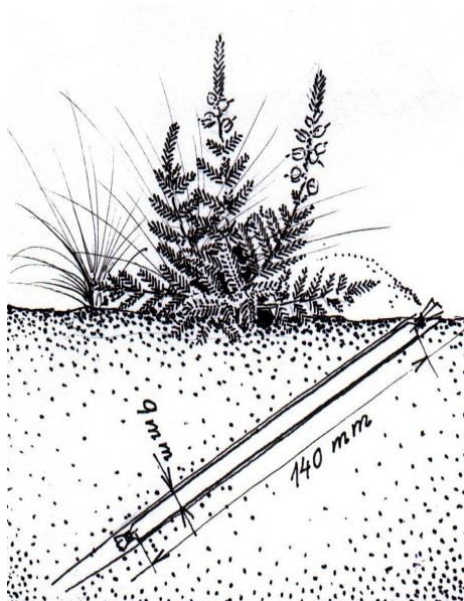
Vysvětlivky k obrázku 6: (a) iontoměničové sondy aplikované přímo do půdy (kap 3.1), (b) iontoměničové disky aplikované přímo do půdy (kap. 3.2), (c) inovované iontoměničové disky aplikované přímo do půdy (kap. 3.3), (d) systém záchytu vyplavovaného minerálního dusíku iontoměniči umožňující výměnu iontoměničů z povrchu půdy a přepočet výsledků na plochu (kap 3.4), (e) nový systém záchytu vyplavovaného minerálního dusíku iontoměniči umožňující výměnu iontoměničů z povrchu půdy (kap 3.5).

U jednotlivých metod jsou uvedeny příklady použití, možnosti interpretace výsledků a výhody, případně nevýhody proti jiným metodám. **Pro snazší orientaci jsou odlišnou barvou a proloženým typem písma zvýrazněny možnosti interpretace výsledků dané metody (na příkladu této věty).**

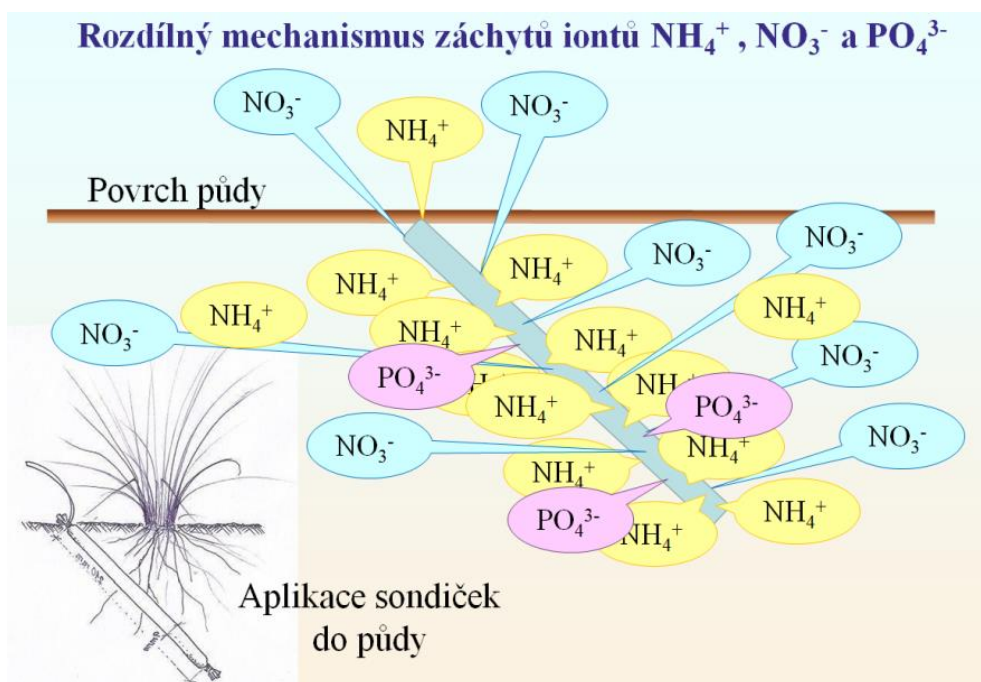
### 3.1 Ion toměničové sondy aplikované přímo do půdy

#### 3.1.1 Příprava a příklady použití

Vlastní iontoměničové prskyřice se vkládají do půdního profilu ve válcovitých sáčcích (v podobě doutníkovitých punčošek) zhotovených z polyamidové síťoviny UHELON (Silk & Progress, typ 130 T, velikost očka 42  $\mu\text{m}$ ). Používané ionexy vyrábí firma PUROLITE (katex - PUROLITE C100E, anex - PUROLITE A520E). Sklon zapravení a parametry ionexové sondy jsou zřejmé z obr. 7. Tyto sondy jsou po expozici v půdě po jednom měsíci až jednom roce (podle zaměření studia) vyjmuty z půdy a zachycené ionty  $\text{NH}_4^+$  a  $\text{NO}_3^-$  jsou desorbovány (viz kap. 2.2.2 Regenerace / desorpce). Ion ty jsou z iontoměničů vytěsněny 10 % roztokem NaCl. Amonné ionty byly stanoveny destilačně titrační metodou (PEOPLES ET AL. 1989). Nitrátové ionty byly stanovovány stejným způsobem po předcházející redukci Devardovou slitinou (Záhora, 2001).



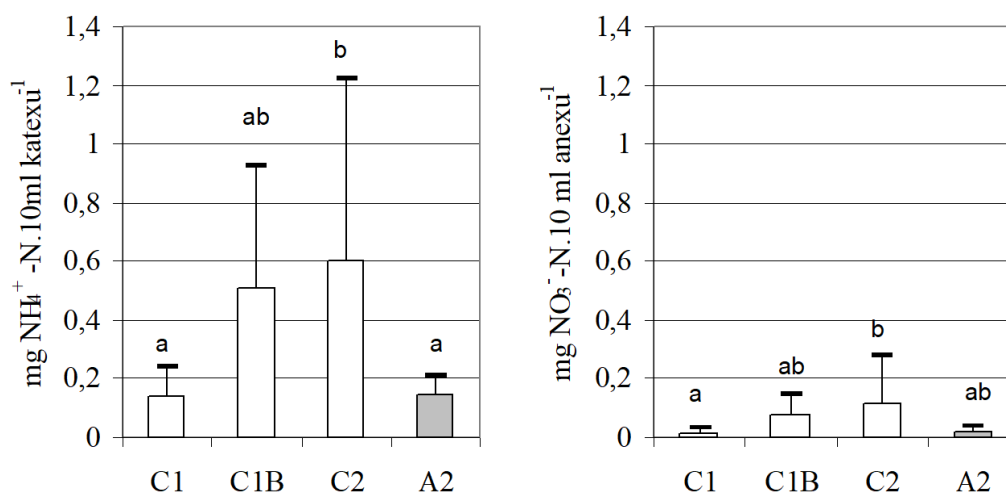
Obrázek 7 Schematické znázornění iontoměničové sondy zapravené do půdního profilu



Obrázek 8 Způsob záchytu iontů do struktur iontoměničů

Na obrázku je znázorněn odlišný způsob záchytu amonných, nitrátových a fosforečných iontů do struktur iontoměničů aplikovaných do půdy v úzkých a dlouhých iontoměničových sondách. Fosforečné anionty jsou zachytávány anezy hlavně ze zdrojů v bezprostředním sousedství iontoměničové sondy v půdě; obdobně jako amonné ionty katexy. Méně významným zdrojem je transport fosforečných iontů v půdním roztoku tak, jako se to děje dominantně v případě nitrátového

dusíku. Měření pomocí iontoměničových sond bylo provedeno z důvodu bližší specifikace míst, ze kterých se generuje dostupnost živin a tím i relativně vysoké ztráty klíčových živin.



Obrázek 9 Historicky první použití iontoměničových sond

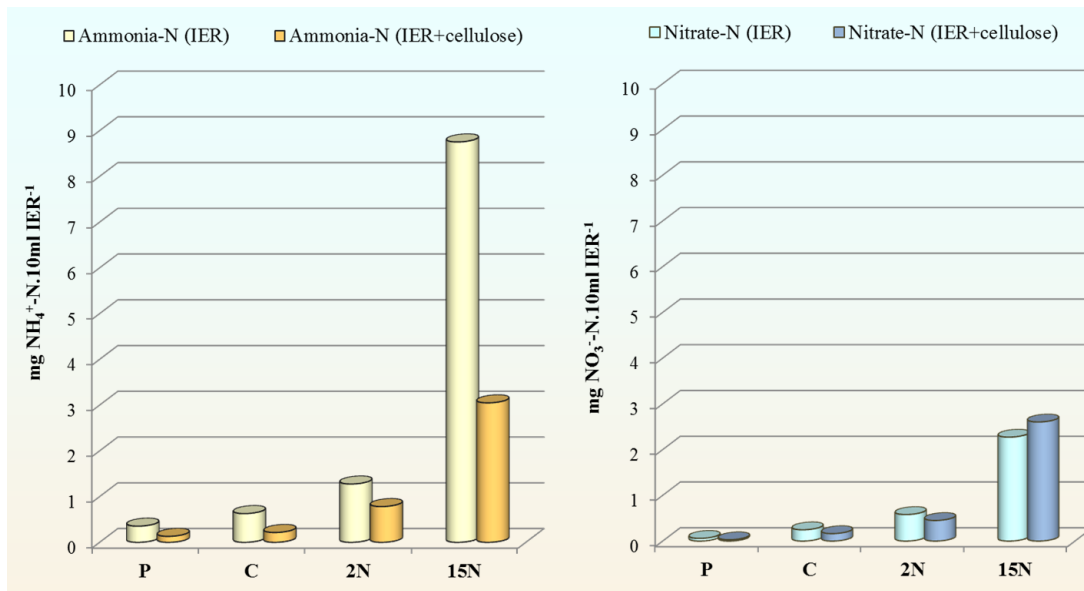
Historicky první použití iontoměničových sond na vřesovištích Národního parku Podyjí (obrázek 9), které umožnilo vysvětlit vyšší zátěž dusíkatými látkami na vřesovištích u Havraníků než na vřesovištích na Kraví hoře. Uvedeno je množství minerálního dusíku zachycené iontoměniči exponovanými po dobu od 6. 10. 2000 do 21. 5. 2001 (227 dnů) v půdní hloubce 0 – 10 cm na lokalitě „Kraví hora“ pod porosty: C1 *Calluna vulgaris*, C1B *C. vulgaris* po vypálení, a na lokalitě „Havraníky“: C2 *Calluna vulgaris*, A2 *Arrhenatherum elatius*. Data zobrazují průměry + směrodatnou odchylku a hodnoty označené různými písmeny jsou statisticky rozdílné při  $P \leq 0,05$  (Záhora, 2001).

Množství minerálního N zachyceného iontoměniči v půdě pod porostem vřesu v době od 6. 10. 2000 do 21. 5. 2001 (227 dní) bylo 5 krát vyšší na lokalitě „Havraníky“ než na lokalitě „Kraví hora“, což odráží nesrovnatelně vyšší zátěž dusíkem na lokalitě „Havraníky“. Nejnižší množství minerálního dusíku bylo zachyceno shodně v půdě pod porostem vřesu na Kraví hoře a v půdě pod porostem ovsíku na Havraníkách. **Znamená to, že na těchto dvou rozdílných lokalitách jsou pod porosty rozdílných rostlin vnitropůdní mikrobiální transformace dusíku vybalancovány stejným způsobem vzhledem ke vstupům a výstupům N z ekosystému. Tyto rostliny mají ale úplně odlišné nároky na dusík. Pomocí iontoměničů se tak podařilo vysvětlit agresivnější zarůstání vřesovišť vysokostébelnými expanzivními druhy trav ovsíkem a třtinou (*Arrhenatherum elatius* a *Calamagrostis epigejos*) na lokalitě Havraníky.**

Z metodického pohledu je zapotřebí vyzdvihnout rozdílnou váhu a rozdílnou vypovídací schopnost aktuálně zjištěného množství minerálního N, které je sice možno vyjádřit na jednotku hmotnosti půdy, které je však poplatné pouze danému a v podstatě neopakovatelnému okamžiku vývoje ekosystému, proti množství minerálního N zachyceného prostřednictvím iontoměničů. Třebaže je možné výsledky získané z iontoměničů interpretovat pouze relativně na objemová množství iontů, mají obrovskou výhodu ve schopnosti akumulovat minerální N uvolňovaný mikrobiálními procesy za



účasti všech ostatních určujících biotických a abiotických faktorů v průběhu dlouhých časových období v prakticky nenarušeném půdním prostředí.



Obrázek 10 Příklad další aplikace iontoměničových sond

Příklad jiné aplikace iontoměničových sond (obrázek 10), které umožnily vysvětlit mechanismy působení atmosférických dusíkatých vstupů do zranitelných alpských trávníků v Západních Tatrách: (a) po přidavku fosforu (varianta „P“) bylo prakticky zamezeno uvolňování dusičnanů do půdního roztoku a tím i jejich rizikovému vyplavování, což dokládá silnou limitaci zdejších porostů fosforem, (b) po přidavku celulózy (tmavší sloupečky „IER + cellulose“) se snížila přítomnost amonných iontů v půdním roztoku na více než polovinu - pro kontrolu zvýšené dusíkaté zátěže by tento ekosystém vyžadoval větší množství organických látek - je limitován energeticky, (c) po přidavku celulózy nedošlo ke změnám dostupnosti dusičnanů - osud dusičnanových iontů, pokud nejsou v ekosystému odebírány, je určován mechanismy transportu v půdním roztoku (vysvětlení viz obr. 8). Pokus by realizován ve spolupráci se Slovenskou akademií věd v Nitře (Halada et al., 2016).

### 3.1.2 Testování v lyzimetrických nádobách

#### 3.1.2.1 Záchyty amonného a nitrátového dusíku a fosforu vyplavovaných z lyzimetrických nádob

V lyzimetrických nádobách umístěných na dvou lokalitách v ochranném pásmu vodního zdroje II. stupně Březová nad Svitavou, do kterých byly aplikovány přídatky různých látek; kompostu, biouhlu, kompostu obohaceného v základce o biouhel, směsi popelu z Vídeňské spalovny a kombinací popelu a kompostu, byl pěstován jílek vytrvalý společně s bobovitými rostlinami (jetel perský, jetel alexandrijský a tollice dětelová). Byl měřen objem odtékajících perkolátů a byly odebírány vzorky těchto

lyzimetrických vod. V laboratořích MENDELU bylo v těchto vzorcích stanovováno množství amonných a nitrátových iontů, pH a množství fosforu.



Obrázek 11 Příprava lyzimetrických nádob

Obr. 11 ukazuje přípravu lyzimetrických nádob před vlastním zahájením experimentu. Pro zabránění zrychleného odtoku průsakových vod po stěnách byl vnitřek nádob pokryt geotextilií (obr. vlevo). Na obrázku vpravo je zachycena aplikace různých druhů kompostu včetně různých aditiv - viz přehled jednotlivých variant v tab. 3.



Obrázek 12 Osazování připravených lyzimetrických nádob

Obrázek 12 ukazuje osazování připravených lyzimetrických nádob rostlinami, které byly předpěstovány v sadbovačích. Na obrázku vlevo je vidět semenáč jílku vytrvalého, který byl vyjmutý z komůrky sadbovače a je vkládán do odpovídajícího otvoru v pokusné nádobě. Prstenec s dvojitým hrdlem a s lomenými nerezovými pásky pro umístění nádobky se sorbentem slouží k měření půdní respirace. Na pravém snímku jsou osázené pokusné nádoby na začátku vegetační sezóny.





Obrázek 13 Způsob shromažďování protékajících perkolátů

Obrázek 13 znázorňuje způsob shromažďování protékajících perkolátů. Modelovými rostlinami pro účel tohoto experimentu byly jílek vytrvalý společně s leguminózami (jetel perský, jetel alexandrijský a tollice dětelová).

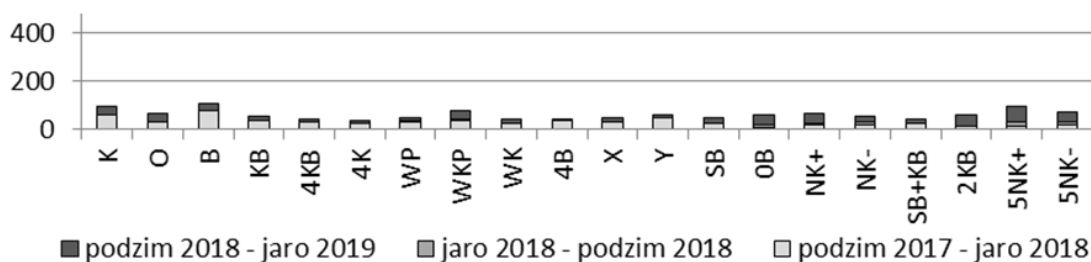
Tabulka 3 Varianty nádobového pokusu (n = počet opakování)

K	vyzrálý kompost v přepočítané dávce 30 t/ha	n = 4
O	kontrola	n = 4
B	biouhel v dávce 3 t/ha	n = 4
KB	kompostovaný biouhel v dávce 30 t/ha	n = 4
4KB	kompostovaný biouhel v dávce 120 t/ha	n = 4
4K	vyzrálý kompost v dávce 120 t/ha	n = 4
WP	popel z vídeňské spalovny v dávce 0,6 t/ha	n = 4
WKP	popel z vídeňské spalovny v dávce 0,6 t/ha + kompost v dávce 30 t/ha	n = 4
WK	kompost z vídeňské kompostárny v dávce 30 t/ha	n = 4
4B	biouhel v dávce 12 t/ha	n = 4
X	vložená kontrola	n = 4
Y	vložená kontrola	n = 4
SB	půda s dřívě aplikovaným biouhlem na lokalitě Babička (v roce 2013)	n = 3
OB	kontrola na lokalitě Babička	n = 3
NK+	náměšťský kompost dobrý v dávce 30 t/ha	n = 3
NK	náměšťský kompost špatný v dávce 30 t/ha	n = 3
SB+KB	kompostovaný biouhel v dávce 30 t/ha přidáný do varianty SB	n = 3

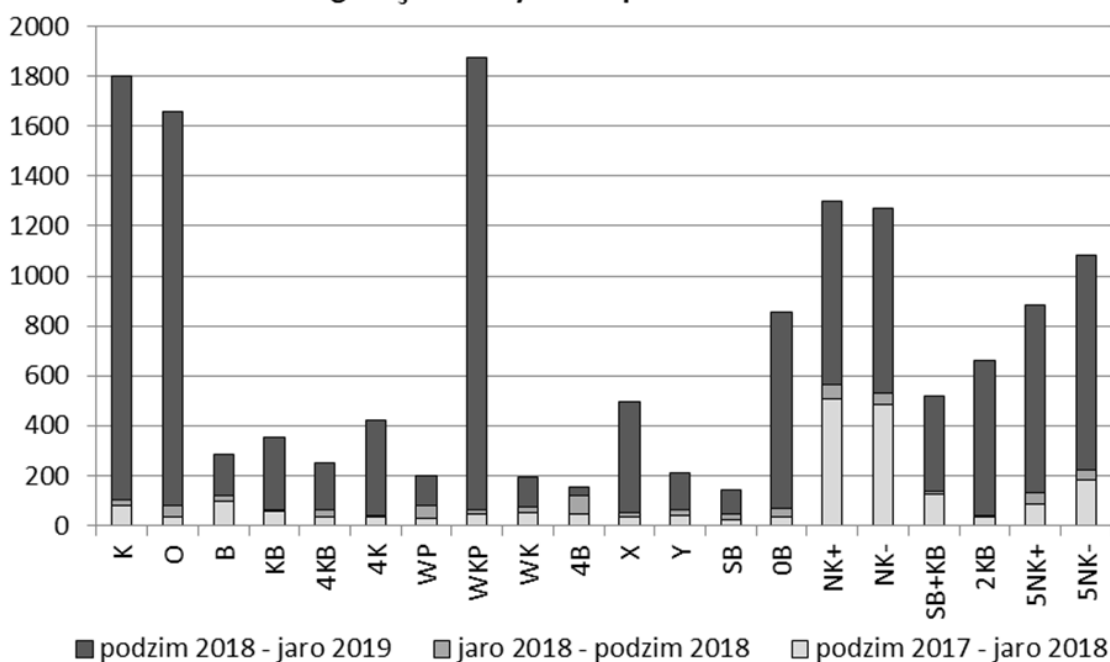
2KB	kompostovaný biouhel v dávce 60 t/ha	n = 3
5NK+	náměštský kompost dobrý v dávce 150 t/ha	n = 3
5NK-	náměštský kompost horší v dávce 150 t/ha	n = 3

## Výsledky měření

### mg NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N zachycené v perkolátech



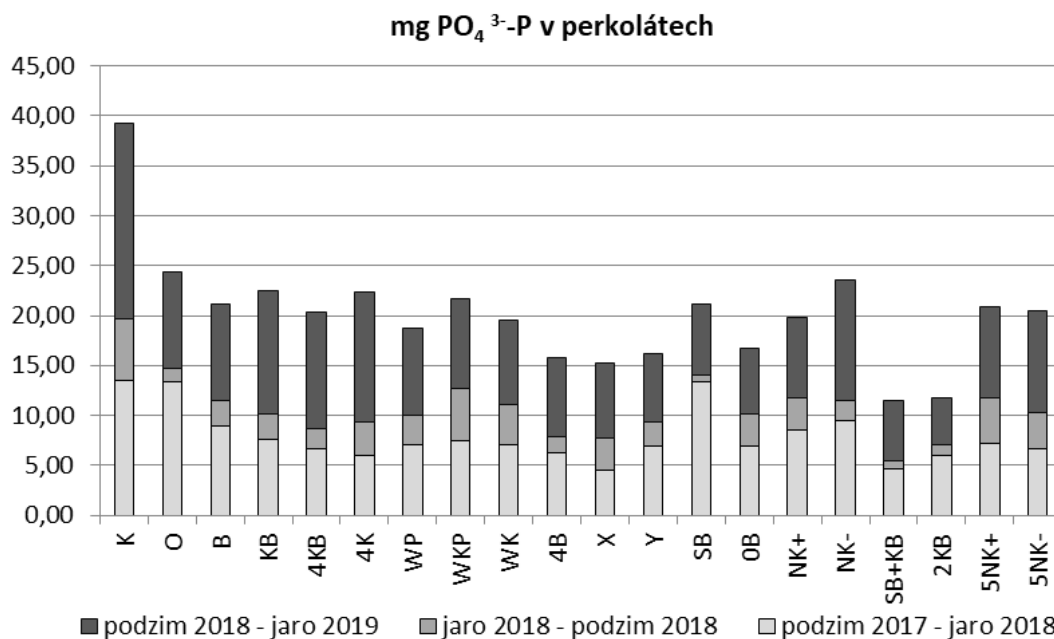
### mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N zachycené v perkolátech



Obrázek 14 Vyplavování minerálních forem dusíku z experimentálních nádob ve třech po sobě jdoucích obdobích v absolutních hodnotách.

Vyplavování amonného dusíku cestou perkolátů bylo ve srovnání s vyplavováním nitratového dusíku cca o jeden řád nižší a během tří po sobě jdoucích období nepřesáhlo ani v jedné variantě 100 mg NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N na jednu experimentální nádobu. Masivní mineralizace půdních organických forem dusíku po

mimořádně suchém létě v roce 2018 se projevila v extrémních únicích nitrátového dusíku v posledním sledovaném období podzim 2018 - jaro 2019. Tyto úniky nitrátového dusíku maskují rozdíly mezi vlivem organických aditiv v jednotlivých variantách (viz obr. 14).



Obrázek 15 Vyplavování fosforu z experimentálních nádob ve třech po sobě jdoucích obdobích v absolutních hodnotách

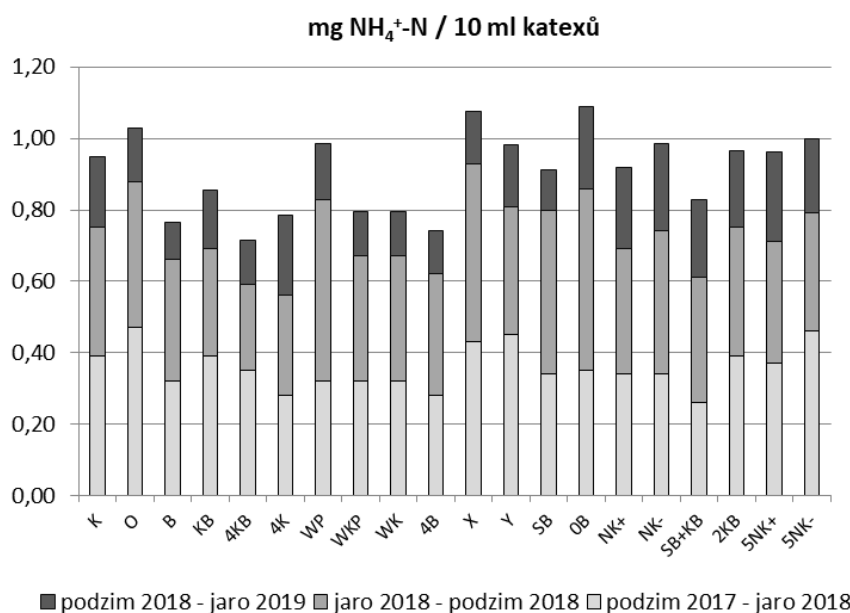
Vyplavování fosforu bylo významně (násobně) nižší během vegetačního období jaro 2018 - podzim 2018 ve srovnání s oběma obdobími vegetačního klidu (podzim 2017 - jaro 2018 a podzim 2018 - jaro 2019). Získané výsledky ilustrují význam interakcí mezi živými složkami ekosystému, jinými slovy význam rostlinných kořenů a s nimi interagujících přátelských mikroorganismů a jejich vitalitou pro kontrolu dostupnosti a uvolňování fosforu z různých půdních zásobníků.

### 3.1.2.2 Dostupnost amonného a nitrátového dusíku a fosforu v povrchové vrstvě půdy



Obrázek 16 Uložení iontoměničových sond v nádobách

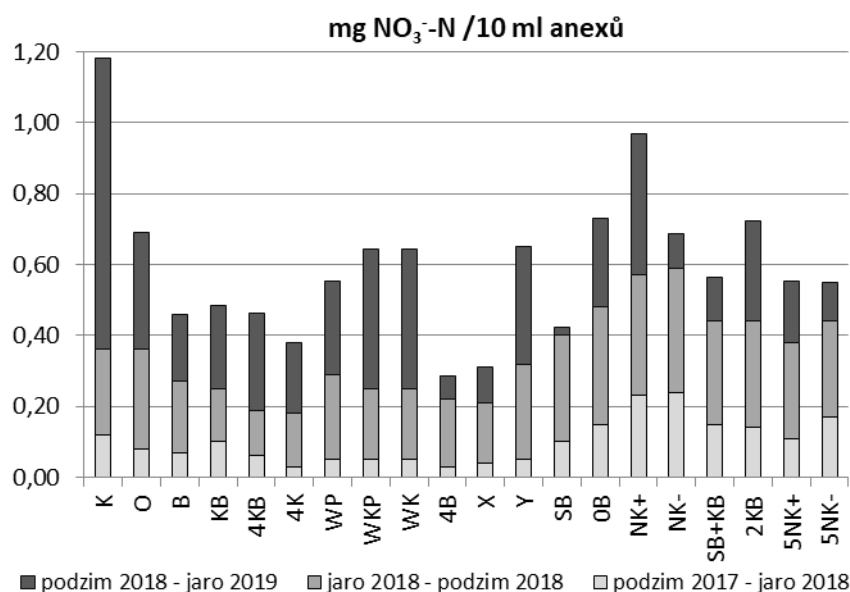
Obrázek 16 - Pro kontrolu mikrobiálního uvolňování minerálních forem dusíku a fosforu byly do povrchové vrstvy půdy v experimentálních nádobách umístěny iontoměničové sondy (obrázek vlevo). Sady anexových (světle krémové barvy) a katexových (hnědé) iontoměničových sond připravených k aplikaci do otvorů vytlačených do půdy pod úhlem 45 ° přiloženým bodcem (popis metody viz kap. 3.1.1). Obrázek vpravo - Katexová sonda k adsorpci amonných iontů povytažená před aplikací z půdy. Za ní se nachází prstenec pro měření půdní respirace.



Obrázek 17 Dostupnost amonného dusíku ve třech po sobě jdoucích obdobích měřená v povrchové vrstvě půdy 0- 10 cm v experimentálních nádobách

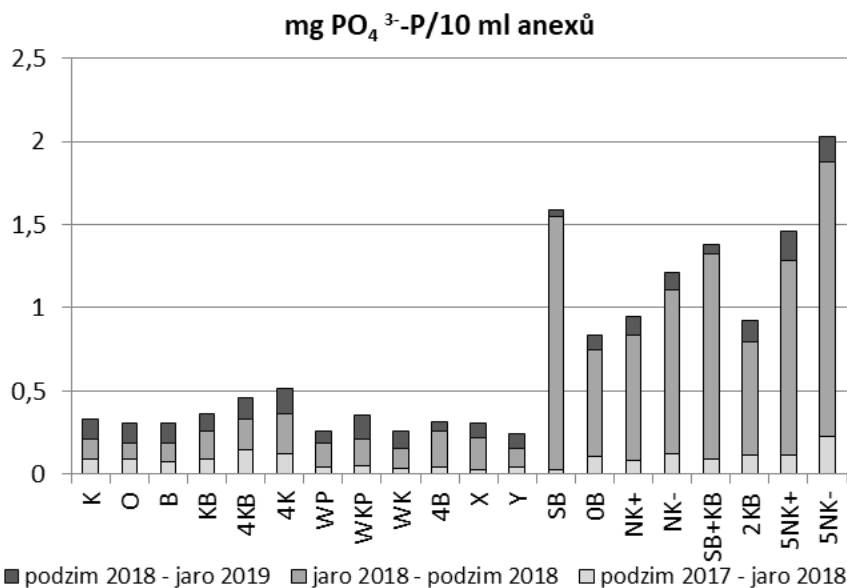


Na základě výsledků stanovení dostupnosti amonného dusíku měřené zpětnou extrakcí z iontoměníčů (z katexů) lze konstatovat, že v porovnání se zanedbatelnou přítomností amonných iontů v průsakových vodách je zřejmé, že potenciál amonizace či mineralizace organických forem dusíku v povrchových půdních horizontech je značný a přesahuje v prvních dvou obdobích potenciál nitrifikace (viz obr. 17 a 18). V posledním období (podzim 2018 - jaro 2019) se na snížení množství zachyceného dostupného amonného dusíku projevovalo déletrvající sucho.



Obrázek 18 Dostupnost dusičnanového dusíku ve třech po sobě jdoucích obdobích měřená v povrchové vrstvě půdy 0- 10 cm v experimentálních nádobách.

Dostupnost nitrátového dusíku měřená zpětnou extrakcí z iontoměníčů (z anexů) byla nejvyšší ve variantě K a NK+. V obou variantách byl aplikován kvalitní kompost z Náměšťské kompostárny. Znamená to, že tento druh stabilizované organické hmoty může sloužit i jako významné dusíkaté hnojivo pro rostliny.



Obrázek 19 Dostupnost fosforu ve třech po sobě jdoucích obdobích měřená v povrchové vrstvě půdy 0- 10 cm v experimentálních nádobách.

Obrázek 19 - Nápadné je selhávání půdního systému stran kontroly mikrobiálního zpřístupňování fosforu v nádobách, které byly více vystaveny klimatickým extrémům (na lokalitě „Babička“ - varianty SB, OB, NK+, NK-, SB+KB, 2KB, 5NK+, 5NK-).

Dostupnost fosforu měřená zpětnou extrakcí z iontoměničů (z anexů). Vliv mimořádné klimatické situace v průběhu vegetačního období roku 2018 (jaro 2018 - podzim 2019) byl významnější než vliv různých organických přídatků. Tento vliv se projevil zejména na lokalitě Babička, která je více exponovaná a nádobové pokusy podléhaly větším klimatickým stresům (varianty SB až 5NK-).

**Na základě provedených měření lze udělat následující závěry: (a) vyplavování amonného dusíku je zanedbatelné, (b) vyplavování nitrátového dusíku je o mnoho vyšší a (c) vyplavování fosforu představuje jenom zlomek množství vyplavovaných dusičnanů, (d) pro velikost ztrát dusíku a fosforu je klíčový stav oživení půdy v mimovegetačním období, méně významným vlivem je kvalita a kvantita organických vstupů z povrchu půdy.**

### 3.1.2.3 Měření půdních mikrobiálních aktivit pomocí měření půdní respirace

Z výše uvedených závěrů vyplývá, že dynamika uvolňování živin a jejich následné vyplavování nebylo příliš ovlivněno různorodou kvalitou a kvantitou organických vstupů z povrchu půdy. Významnější roli sehrály mikroklimatické podmínky a roční období. Dalo se předpokládat, že se půdní organismy a pěstované experimentální rostliny rychle adaptovaly na různorodé organické vstupy. Aby bylo možno potvrdit nebo vyvrátit tento předpoklad, bylo provedeno terénní měření půdních mikrobiálních aktivit pomocí měření půdní respirace. Stanovení kumulativní produkce CO<sub>2</sub> probíhalo v průběhu vegetační



sezóny přímo v jednotlivých lyzimetrických nádobách. Pro měření byla použita upravená metoda s využitím sorpce CO<sub>2</sub> na natrokalcit (Keith & Wong, 2006).

Zrna natrokalcitu obsahují NaOH a Ca(OH)<sub>2</sub> a přibližně 13 - 18 % absorbované vody, která je nezbytná pro chemickou reakci CO<sub>2</sub> s bazickými kationty za vzniku uhličitánů (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> a CaCO<sub>3</sub>). Tvorba uhličitánů se odráží v nárůstu hmotnosti zrn. Přírůstek hmotnosti natrokalcitu se měří ve vysušeném stavu mezi počátečním a konečným stavem.

Pro měření byl použit natrokalcit o velikosti zrn 2-5 mm. Natrokalcit (12 ± 1 g) byl umístěn do uzavíratelných PE lahviček, které byly před aplikací 14 hod. vysušeny při 105 °C. Následně byly lahvičky s vysušeným natrokalcitem umístěny do jednotlivých lyzimetrů a hermeticky uzavřeny plechovou nádobou. Po 24 hodinách inkubace byly lahvičky vyjmuty z lyzimetrů, uzavřeny a po převozu do laboratoře opět vysušeny při 105 °C po dobu 14 hod.

Výsledky byly vyhodnoceny jako kumulativní produkce CO<sub>2</sub> v gramech na 1 m<sup>2</sup> lyzimetru za 1 den (g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> den<sup>-1</sup>). Přepočítání bylo provedeno podle upraveného výpočtu, dle metodiky Keith & Wong (2006):

$$\text{Produkce CO}_2 = \left[ \frac{(m_1 - m_2) \cdot 1,69}{s} \right] \cdot \left[ \frac{24}{t} \right] \cdot \left[ \frac{12}{44} \right] \quad (\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ den}^{-1})$$

m<sub>1</sub>... hmotnostní přírůstek vzorku (g)

m<sub>2</sub>... hmotnostní přírůstek slepého vzorku (g)

1,69... koeficient účinnosti poutání CO<sub>2</sub> na natrokalcitu

S... plocha půdy, na které dochází k poutání CO<sub>2</sub>

t... čas měření respirace (hod)

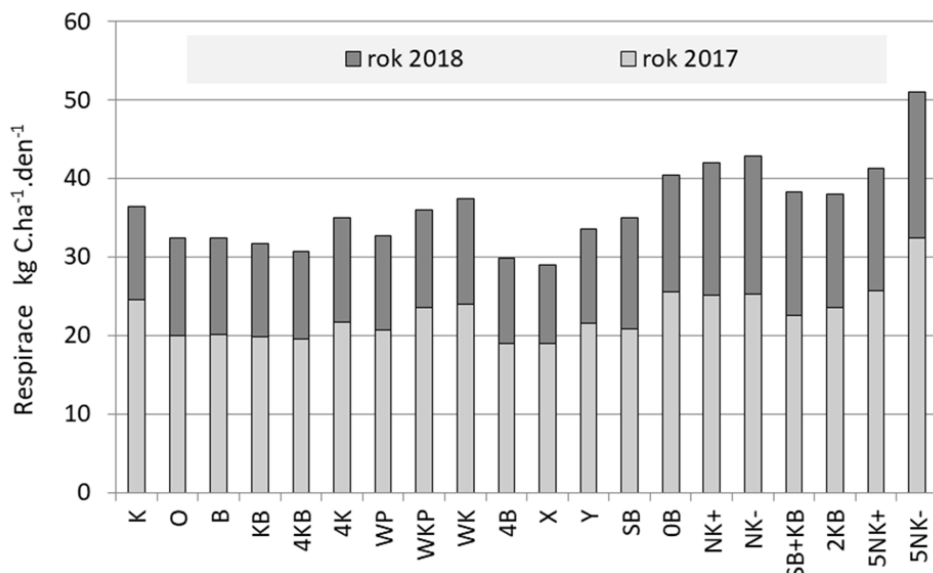
12/44... poměr molární hmotnosti uhlíku k celé molekule CO<sub>2</sub>



Obrázek 20 Princip měření produkce CO<sub>2</sub>

Obrázek 20 - Princip měření produkce oxidu uhličitého jeho záchytem do alkalického sorbentu podle Keith et Wong (2006). Systém uzavírání jímacího prostoru plechovou nádobou ponořenou do vody ve

štěrbíně dvojitého hrdla novodurového prstence, který je trvale zabořený v půdě, je vlastní, navržený a sestavený autory předkládané metodiky



Obrázek 21 Půdní respirace

Obrázek 21 - V celkově sušším roce 2018 byla zaznamenána také nižší půdní respirace, aniž by se v mikrobiálních aktivitách určujících míru půdní respirace nějak významněji promítl vliv nejruznějších organických aditiv.

#### Díličí závěry získané z lyzimetrických nádobových pokusů realizovaných v průběhu projektu INTEKO:

(a) Navzdory zanedbatelnému vyplavování amonného dusíku je intenzita mineralizace v povrchové vrstvě půdy (zde prezentovaná jako dostupnost amonného dusíku /obr. 18/) dostatečně vysoká, rovnocenná intenzitě nitrifikace, která je prezentovaná jako dostupnost nitrátového dusíku /obr.19/, (b) různorodé přídavky kompostů a jiných aditiv mají na půdní mikrobiální procesy menší vliv než jsou sezónní a mimosezónní výkyvy teplot a srážek a rovněž vliv lokalit, (c) vyšší intenzita mikrobiálních aktivit v povrchové vrstvě půdy se nepromítá do množství vyplavovaných minerálních sloučenin - platí pro amonný dusík a pro fosfor (porovnání obr. 14 a 18, resp. v případě fosforu obr. 15 a 20), jinými slovy případné ztráty amonného dusíku a fosforu jsou půdním sloupcem ještě dostatečně efektivně kontrolovány, (d) výše uvedené závěry ohledně nevýznamného vlivu dodaných organických látek potvrzují výsledky nevýznamných rozdílů v měřeních půdní respirace /obr. 21/.

### 3.2 Iontoměničové disky aplikované přímo do půdy

V roce 2011 byly prezentovány výsledky pětiletého studia (2005 - 2010) zaměřeného na únik minerálního dusíku z jímacího území vodního zdroje Březová nad Svitavou, který je zdrojem pitné vody pro brněnskou oblast a okolí. K měření množství vyplavovaných dusičnanů byla použita v dané době nová metoda aplikace plochých vodorovných disků s iontoměníči vloženými vodorovně do půdní

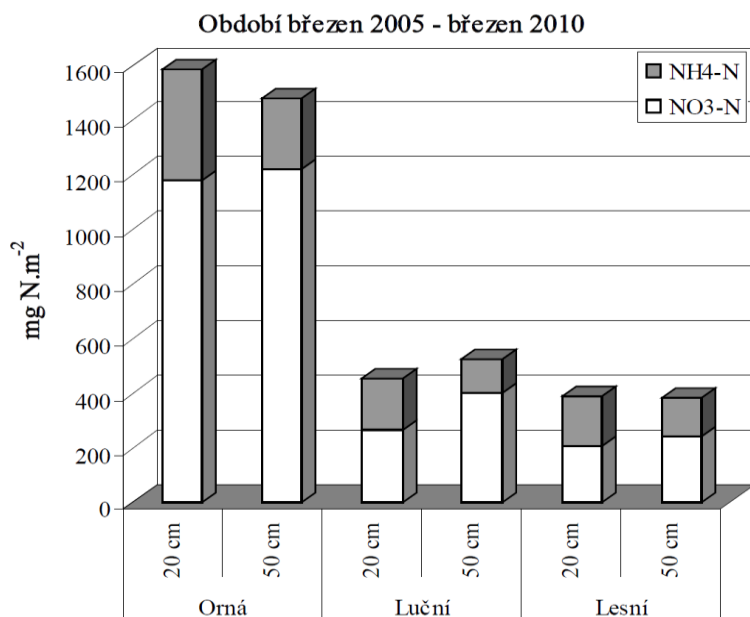
hloubky 20 a 50 cm (Šrámek et al., 2004; Nohel et al., 2008). Povodí má vysoký podíl orné půdy, která je obhospodařována konvenčně, tj. s použitím běžných agrochemikálií a proto byla studie zaměřena na míru té zátěže v zájmovém území, která pochází z orných půd. Pro dostatečnou vypovídací hodnotu měření byly vybrány tři různé lokality s ornou půdou, tři s luční půdou a pět s půdou lesní. Ploché disky byly zhotoveny z novoduru (vnitřní průměr 70 mm; výška 3 mm a uzavřeny shora a zespodu polyamidovou síťovinou o velikosti oka 42  $\mu$ m. Disky byly naplněny směsí katexu s anexem v poměru 1:1. Iontoměničový disk připravený k aplikaci do půdy je na obr. 22.



Obrázek 22 Plochý iontoměničový disk připravený k aplikaci do půdy



Obrázek 23 Vložení plochých iontoměničových disků do půdního profilu v hloubce 20 a 50 cm.



Obrázek 24 Kumulativní záchyt amonného a nitrátového dusíku

Obrázek 24 znázorňuje kumulativní záchyt amonného a nitrátového dusíku v iontoměničových pouzdrech vložených do půd různých typů ekosystémů (orné, luční a lesní půdy, hloubka 20 cm a 50 cm) za pětileté období sledování úniků minerálního dusíku z jímacího území vodního zdroje Březová nad Svitavou.

Díky známé ploše disků jsou výsledky přepočítatelné na mg zachycené formy dusíku na m<sup>2</sup>. **Množství zachycených amonných nebo nitrátových iontů na zrnech iontoměničů podává informaci o tom, kolik dusíku je půdní prostředí schopno nenávratně uvolnit (ztratit) z uzavřených vnitřních cyklů. Z orných půd se v daném území vyplavuje přibližně třikrát více dusičnanů, přičemž část těchto úniků prosakuje do hlouběji ležících horizontů lučních a lesních půd (obr. 24). Závěrem lze doporučit provádění opatření ke snížení množství dusičnanů v pitné vodě v zemědělství.**

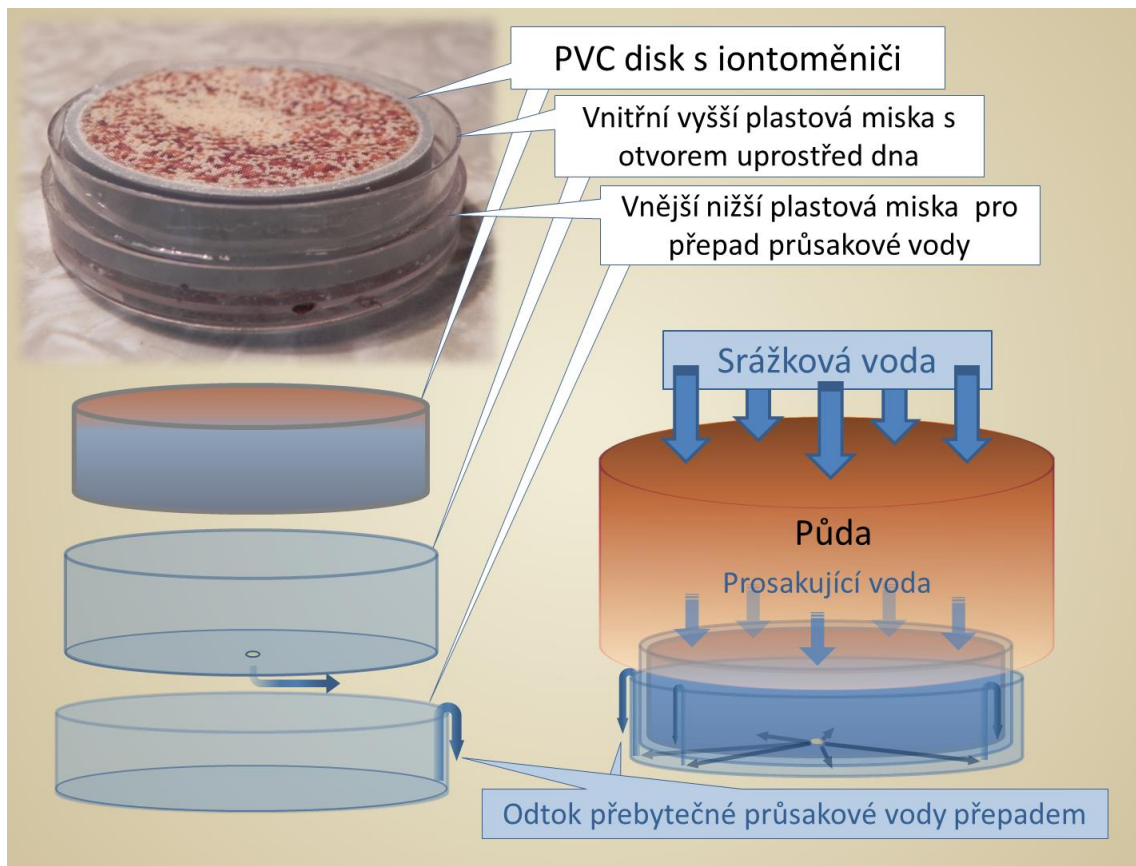
**Nevýhodou těchto iontoměničových disků je slabá vrstva iontoměničů a již vícekrát diskutovaný nedostatečný hydraulický kontakt iontoměničových zrn a půdy. Výsledky lze proto brát pouze jako relativní indikátory k porovnávání rozdílných ekosystémů, rozdílného hospodaření apod.**

### 3.3 Inovované iontoměničové disky aplikované přímo do půdy

Nevýhody předcházející metody se podařilo dořešit inovací iontoměničových disků. Iontoměniče byly umístěny do vyššího PVC disku o výšce 11 mm a průměru 51 mm a po naplnění směsnými iontoměniči vloženy do vnitřní části jednorázové Petriho misky s vyvrtaným otvorem uprostřed, kterým odtéká voda prosakující přes iontoměniče a zdržuje se vnější části, ve které se tímto způsobem udržuje stálá hladina průsakové „demineralizované“ vody. Vznikl tak přepad a doba zdržení prosakujícího půdního



roztoku se prodloužila a adsorpce přítomných iontů je účinnější. Inovace je názorně rozkreslena na obr. 25.



Obrázek 25 Inovace původního plochého disku

Obr. 25 ukazuje princip inovace původního plochého disku s cílem zefektivnit desorpci minerálních sloučenin unášených v prosakujícím roztoku a prodloužit dobu zdržení průsaků v iontoměníčové směsi.



Obrázek 26 Sestavení inovovaných iontoměníčových disků a příprava na jejich zapravení do půdy



Obrázek 27 Vložení iontoměničových disků do půdy

Vložení iontoměničových disků do půdy a přitlačení celé sestavy na klenbu půdního otvoru vhodným předmětem, zde kamenem. Simulace protékání půdního roztoku obarveného potravinářským barvivem (obr. 27 vpravo).

Tím, že je vnitřní plastová miska o 0,5 mm vyšší než iontoměničový disk, je při přitlačení celé iontoměničové sestavy zespodu na klenbu vytvořeného otvoru v půdě mnohem lépe vymezena plocha, ze které prosakuje půdní roztok.

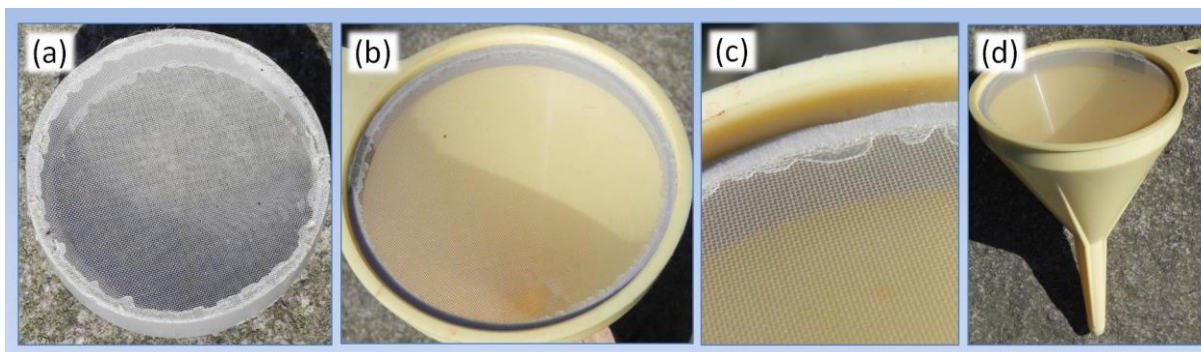
**Výhodami prezentované sestavy je preciznější vymezení plochy, ze které prosakuje půdní roztok, možnost přepočtu na jeden hektar a efektivní záchyt vyplavovaných iontů do struktury iontoměničů. Nevýhodou metody je pracnost a destruktivní způsob výměny nových disků - vždy je zapotřebí odkopat svislou stěnu půdního profilu, která je v mezidobí chráněna geotextilií (netkaná mulčovací textilie) vyčnívající nad povrch půdy. Vyčnívající geotextilie umožňuje znovunalezení měřicího místa. Metoda je vynikající pro jednorázové stanovení, nikoliv pro opakované měření na experimentálních nebo studijních plochách.**

### 3.4 Systém záchytu vyplavovaného minerálního dusíku iontoměniči umožňující výměnu iontoměničů z povrchu půdy a přepočet výsledků na plochu

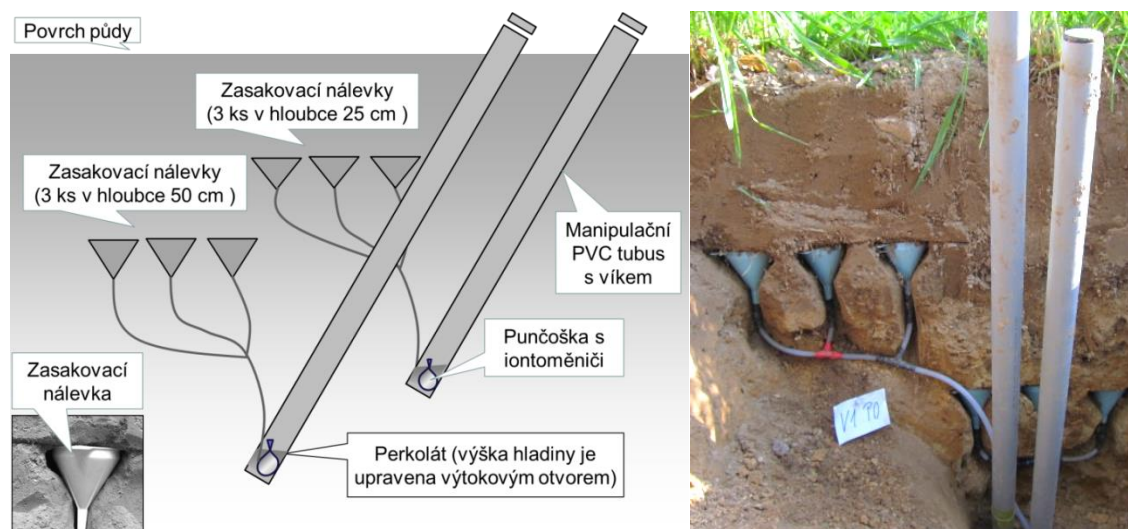
Z důvodu nutnosti sledovat záchyt vyplavovaných živin během víceletého projektu ve velkém množství různých experimentálních variant bylo zapotřebí nalézt takovou metodu, která v sobě integruje výhody dosud používaných metod a současně umožní rychlou výměnu iontoměničů bez narušení integrity půdy v místě měření. Právě taková metoda je jedním z hlavních výstupů projektu INTEKO. Zadání projektu popisovalo metodu jako jednoduchou a levnou metodu měření vyplavování dusičnanů během delšího období s možností interpretace na jednotku plochy s cílem zajistit na základě měření lepší posouzení možných rizik pro podzemní vody. Jde o projektový indikátor, o „**Inovativní metodu měření vyplavování dusičnanů**“. Tato metoda je zaměřena na podporu praktické aplikace nových půdoochranných technologií, na zlepšení stavu životního prostředí. Nová metoda přinese pro praxi možnosti vlastního testování v konkrétních půdně klimatických podmínkách a za konkrétního systému obdělávání půdy. Dále podpoří zvýšení informovanosti a vzdělanostní možnosti cílových skupin. Problematika vhodného hnojiva v ochranných pásmech vod s restriktivními pravidly vztahujícími se k



podzemní vodě je velmi aktuální téma obou zemí. Výstupy projektu umožní zvýšení úrodnosti půdy, aniž by došlo ke znečištění podzemních vod, proto může být tato metoda v rámci projektových akcí představena jak strategickým partnerům, tak klíčovými stakeholderům a zástupcům krajů. Metoda je po iontoměničových sondách a discích v pořadí již čtvrtým systémem záchytu minerálního dusíku uvolňovaného v půdě adsorpcí na iontoměničová zrna.



Obrázek 28 Detailní pohled na (a) povrch disku uzavřený polyamidovou síťovinou o hustotě ok 47  $\mu\text{m}$ , (b) stejný princip byl využit pro uzavření zasakovací nálevky, (c) detail přesahu na okraji nálevky vymežující plochu zasakování, (d) celkový pohled na zasakovací nálevku o průměru 80 mm.



Obrázek 29 Schématické znázornění záchytu perkolátů

Obrázek 29 znázorňuje schématické znázornění záchytu perkolátů a časové prodlevy pro efektivnější výměnu minerálního dusíku z protékajícího půdního roztoku na zrnech iontoměničů na dně manipulačního tubusu. Na konci období monitorování (např. doba vegetačního klidu) se vyměňují pouze váček s iontoměniči (v levé části obrázku označen jako „punčoška s iontoměniči“).

Dostupnost a pohyb minerálních forem dusíku byl měřen metodou stanovení minerálního N nahromaděného na výměnných místech iontoměničových zrn umístěných po určitou dobu v manipulačních tubusech (viz obr. 29) podle Binkley at Matson (1983). Metoda představuje jednoduchý a nedestruktivní způsob záchytu minerálních iontů N z půdního roztoku výměnnými reakcemi na povrchu iontoměničů. Umožňuje stanovit množství nevyužitého odtékajícího minerálního N ze

svrchních půdních horizontů, který je zachytáván vždy třemi nálevkami o průměru 8 cm ve dvou různých hloubkách, 25 a 50 cm.



Obrázek 30 Výměna iontoměničových váčků z povrchu půdy

Obr. 30 - Výměna iontoměničových váčků z povrchu půdy. Iontoměniče jsou umístěné ve váčcích z polyamidové síťoviny o hustotě ok 47  $\mu\text{m}$ . Váčky jsou uzavřeny gumičkou a spuštěny na dno tubusu na silonovém vlákně, které umožňuje jejich vytažení na konci období měření. Paralelně s tímto způsobem měření byly v rámci projektu INTEKO nainstalovány inovativní hloubkové sondy (tenčí tubusy se žlutými uzávěry) s cílem porovnat oba způsoby měření (na levém snímku).



Obrázek 31 Lokalita "Větrolam"

Obrázek 31 - Pohled na lokalitu „Větrolam“ s rozmístěním pokusných parcel. Na obrázku je dobře vidět umístění dvou paralelních systémů využívajících iontoměničů pro měření vyplavování dusičnanů.



Výzkumné aktivity projektu INTEKO probíhaly na dvou lokalitách Babička a Větrolam v katastru obce Banín v ochranném pásmu vodního zdroje 2. stupně Březová nad Svitavou (viz obr. 34).

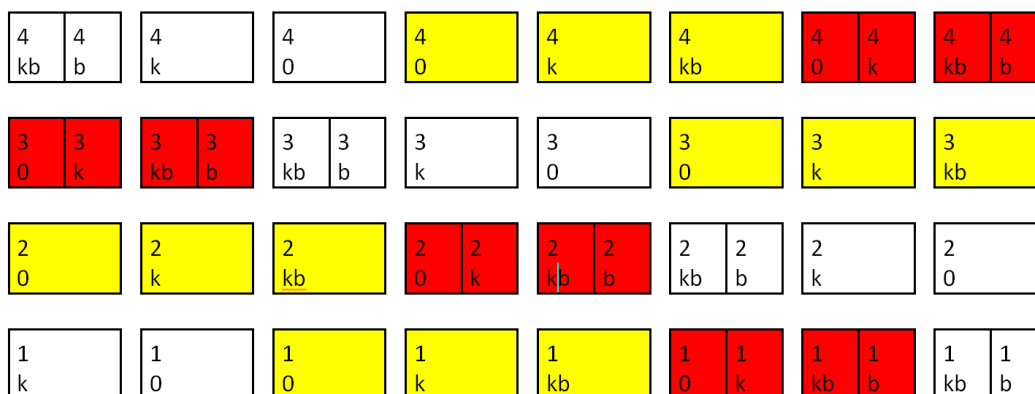


Obrázek 32 Umístění výzkumných lokalit

Obr. 32 Umístění výzkumných lokalit: lokalita Větrolam (site 1; 49°39'50,56“S, 16°28'18,94“V) a lokalita Babička (Site 2; 49°40'24,16“S, 16°27'35,67“V) (zdroj mapového podkladu: Google earth)



Obrázek 33 Pohled z dronu na lokalitu „Babička“ doplněný o rozvržení pokusných parcel



Obrázek 34 Schéma polního pokusu

Legenda k obrázku 34 : bílá – bez přidavku minerálního dusíku, žlutá - hnojení 50% doporučené dávky minerálního dusíku = 70 kg.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup> N, červená – hnojení 100% doporučené dávky minerálního dusíku = 140 kg.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup> N, 0 – bez přidavku organické hmoty, k – aplikace kompostu, kb – aplikace kompostu, který byl v základce obohacen o biouhel, b – aplikace biouhlu

Vedle stávajících jímacích souprav pro záchyt minerálního dusíku v půdním perkolátu byly u všech pokusných parcelk nainstalovány nové hloubkové tubusy, do kterých byla taktéž vložena iontoměničové sondičky.

Od podzimu 2016 byly parcelky ponechány s pokryvem přirozeně vzešlého výdrolu a plevelu, který byl na jaře 2017 zapraven jako zelené hnojení.

Na jaře byla provedena předseťová příprava osevních pásů a na pokusné parcelky byl aplikován přídatek biouhlu, kompostu nebo kompostu obohaceného v základce o biouhel podle přiloženého schéma:

Osevní pásy byly osety ovsem setým. Sledovány byly hodnoty vyplavení nitrátových, amonných a fosforečných iontů do půdního roztoku pomocí hloubkových sond a iontoměničových váčků. Dále byla sledována půdní mikrobiální aktivita pomocí měření respirace.

Na podzim byl na pokusné parcelky aplikován přídatek biouhlu, kompostu nebo kompostu obohaceného v základce o biouhel podle výše uvedeného schéma a byla provedena předseťová příprava osevních pásů. Dne 17. 10. 2017 bylo na pokusné parcelky zaseto žito seté a pokus pokračoval podle stejného schéma až do sklizně v létě 2018.

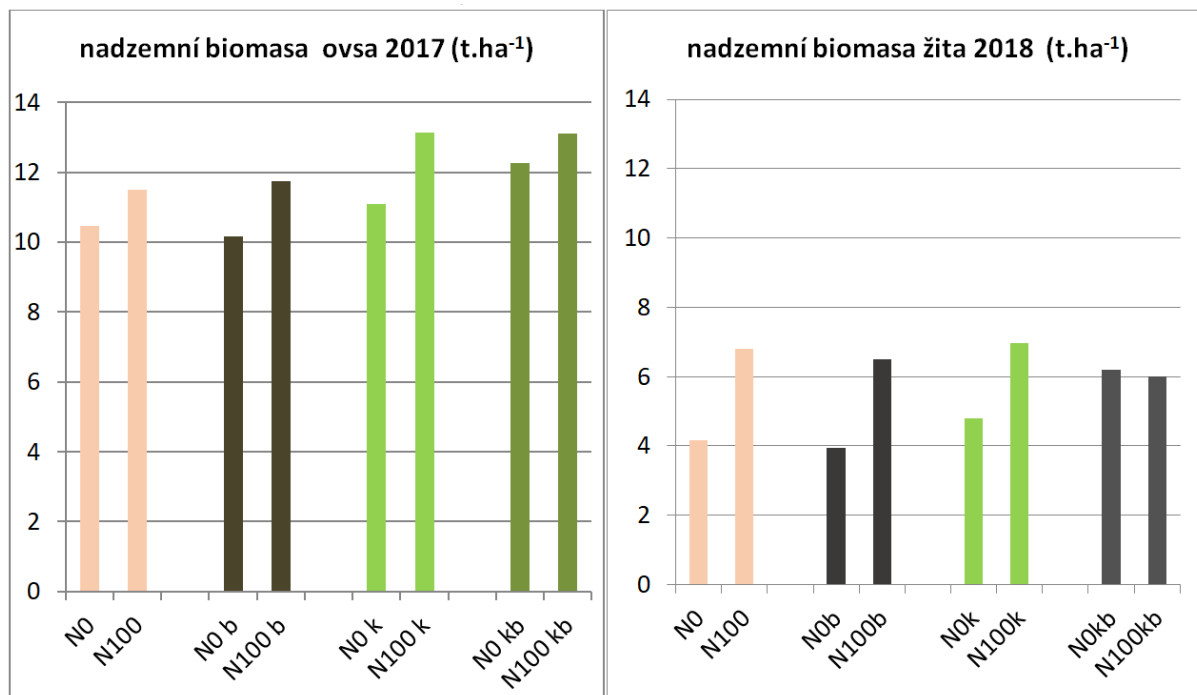
Vždy na začátku vegetační sezony byla vyměněna iontoměničová pouzdra v jímacích soupravách, v hloubkových tubusech a v lyzimetrických nádobách. Odebraná iontoměničová pouzdra byla převezena do laboratoří MENDELU, kde byla dále zpracována. Po vysušení byla iontoměničová zrna zvážena a zachycené ionty byly extrahovány do roztoku. V těchto roztocích pak bylo stanoveno množství amonných a nitrátových iontů a u anexových pouzder také množství iontů fosforu.

V předcházejícím, tříletém období od roku 2013 do roku 2015 byly úniky minerálního dusíku monitorovány nepřetržitě. Pouzdra s iontoměniči byla na základě předběžných pokusů vyměňována pravidelně ve významných předělech, na začátku vegetačního období, na konci periody sucha, po sklizni, na konci vegetačního období a na začátku vegetačního klidu. Překvapivě nebyly úniky minerálního dusíku tak vysoké, jak by se dalo předpokládat při prostém spočítání všech aplikovaných dávek za sledované tříleté období v maximálně hnojené variantě, které dosáhlo hodnoty 414 kg dusíku na hektar. Jenom v jednom případě, v plně hnojené a suchem stresované variantě, překročilo kumulativní množství unikajícího dusíku 4 kg N.ha<sup>-1</sup> (konkrétně 4,26 kg N.ha<sup>-1</sup>).

Na experimentálních parcelkách a současně také v lyzimetrických nádobách byla měřena půdní respirace *in situ*. Půdní respirace byla měřena jednou týdně během 24 hodin z povrchu půdy vymezené prstencem s dvojitým lemem v hermeticky uzavřeném prostoru s vloženou alkalickou pastí pro jímání uvolněného CO<sub>2</sub>.

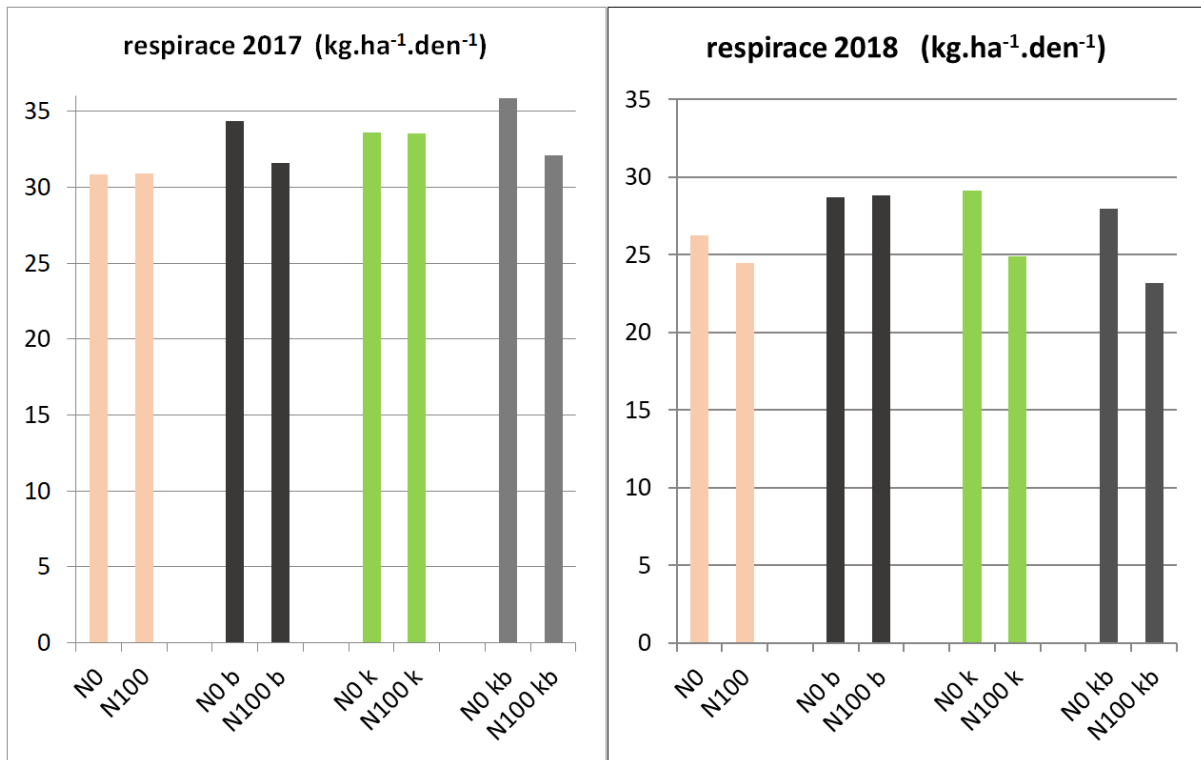
Půdní respirace a tedy i biologické aktivity půdních organismů včetně kořenů od tohoto procesu odvozené jsou u všech variant s výjimkou varianty s přídatkem biouhlu větší tam, kam nebylo

přidáno minerální dusíkaté hnojivo. Zároveň byla půdní respirace u tří z těchto variant s přidávkem organické hmoty (N0, N0 k, N0 kb) větší než varianty kontrolní bez přidavku organické hmoty (obr. 36).

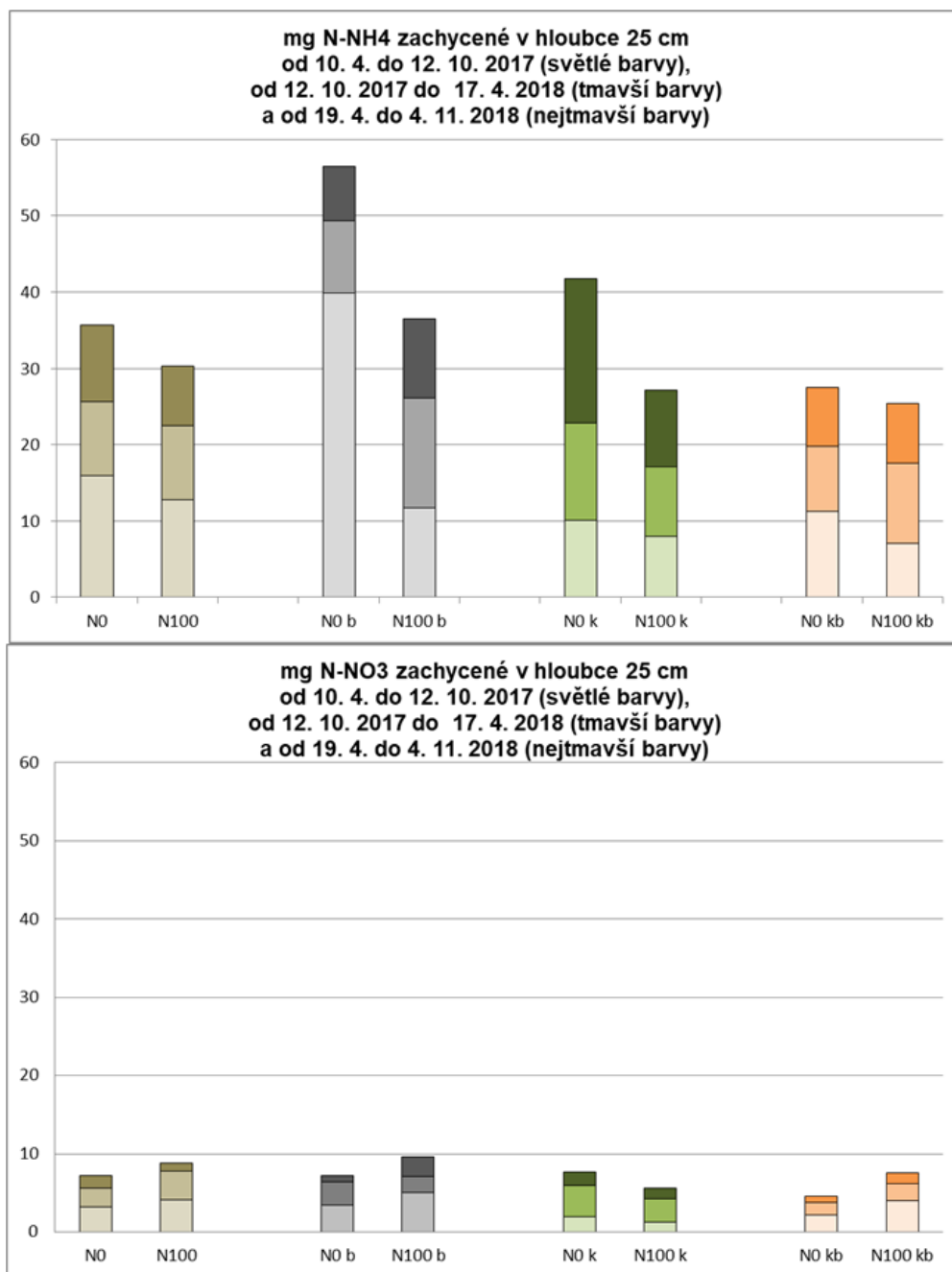


Obrázek 35 Produkce nadzemní biomasy v roce 2017 a v roce 2018

Za povšimnutí stojí hmotnost nadzemní části biomasy i výnos zrna u varianty nehnojené minerálním dusíkatým hnojivem, ke které byl do půdy dodán kompost, který byl obohacený v základce o biouhel (varianta N0kb).



Obrázek 36 Půdní respirace v roce 2017 a v roce 2018

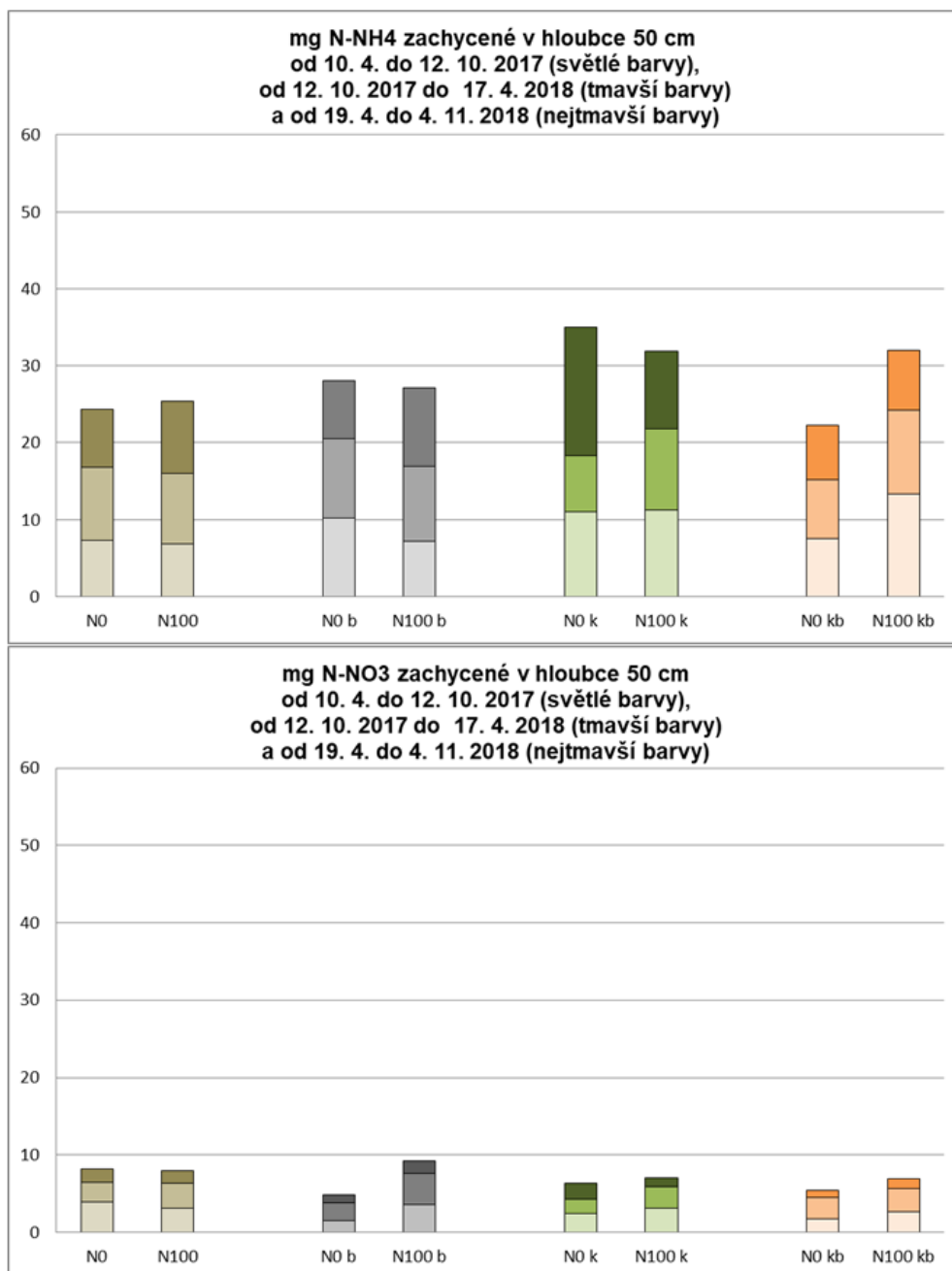


Obrázek 37 Záchyty amonného a nitrátového dusíku v hloubce 25 cm

Obr. 37 Záchyty amonného a nitrátového dusíku v hloubce 25 cm měřené systémem záchytu vyplavovaného minerálního dusíku iontoměničím umožňujícím výměnu iontoměničů z povrchu půdy a přepočítání výsledků na plochu (konstrukce popsána v kap. 3.4)

V hloubce 25 cm se ve vyznačeném období zachytilo v přepočtu na jeden metr čtvereční přibližně třikrát více amonného dusíku než dusíku nitrátového. Záchyt amonného dusíku byl vždy o něco vyšší ve variantách nehnojených dusíkem. Extrémní hodnoty záchytu, téměř 40 mg, byly zjištěny z neznámých příčin v nehnojené variantě s přidávkou biouhlu v průběhu vegetace 2017 (varianta N0 b). Nárůst nabídky amonného dusíku se ale v této variantě neprojevil zvýšeným vyplavováním nitrátů

z dané hloubky. Osud dusíkatých látek měl půdní systém „pod kontrolou“ navzdory extrémnímu uvolňování amonného dusíku. Nejméně nitrátového dusíku bylo zachyceno v nehnojené variantě s přidavkem kompostovaného biouhlu (varianta „N0 kb“).



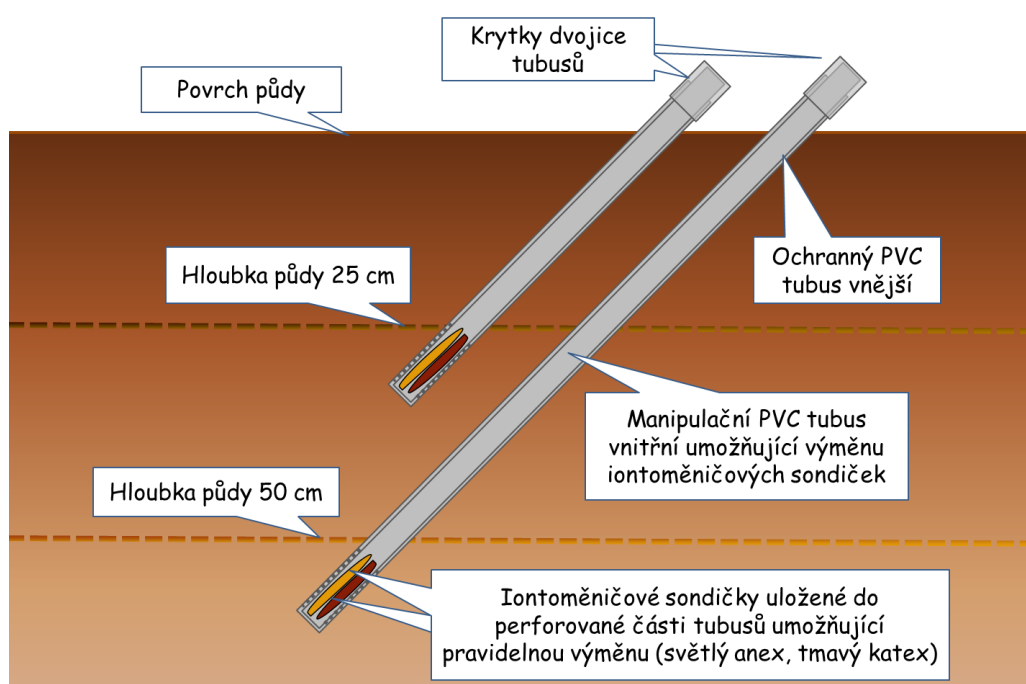
Obrázek 38 Záchyty amonného a nitrátového dusíku v hloubce 50 cm

Obr. 38 - Záchyty amonného a nitrátového dusíku v hloubce 50 cm měřené systémem zachytu vyplavovaného minerálního dusíku iontoměničím umožňujícím výměnu iontoměničů z povrchu půdy a přepočítání výsledků na plochu (konstrukce popsána v kap. 3.4)



V hloubce 50 cm se podobně jako v hloubce 25 cm v průběhu vegetační sezóny roku 2017 a v následném období zachytilo v přepočtu na jeden metr čtvereční přibližně třikrát více amonného dusíku (od 22 do 35 mg  $\text{NH}_4^+\text{-N.m}^{-2}$ ) než dusíku nitrátového (od 5 do 9 mg  $\text{NO}_3^-\text{-N.m}^{-2}$ ). Rozdíly mezi jednotlivými variantami experimentu nebyly příliš velké.

### 3.5 Nový systém záchytu vyplavovaného minerálního dusíku iontoměniči umožňující výměnu iontoměničů z povrchu půdy



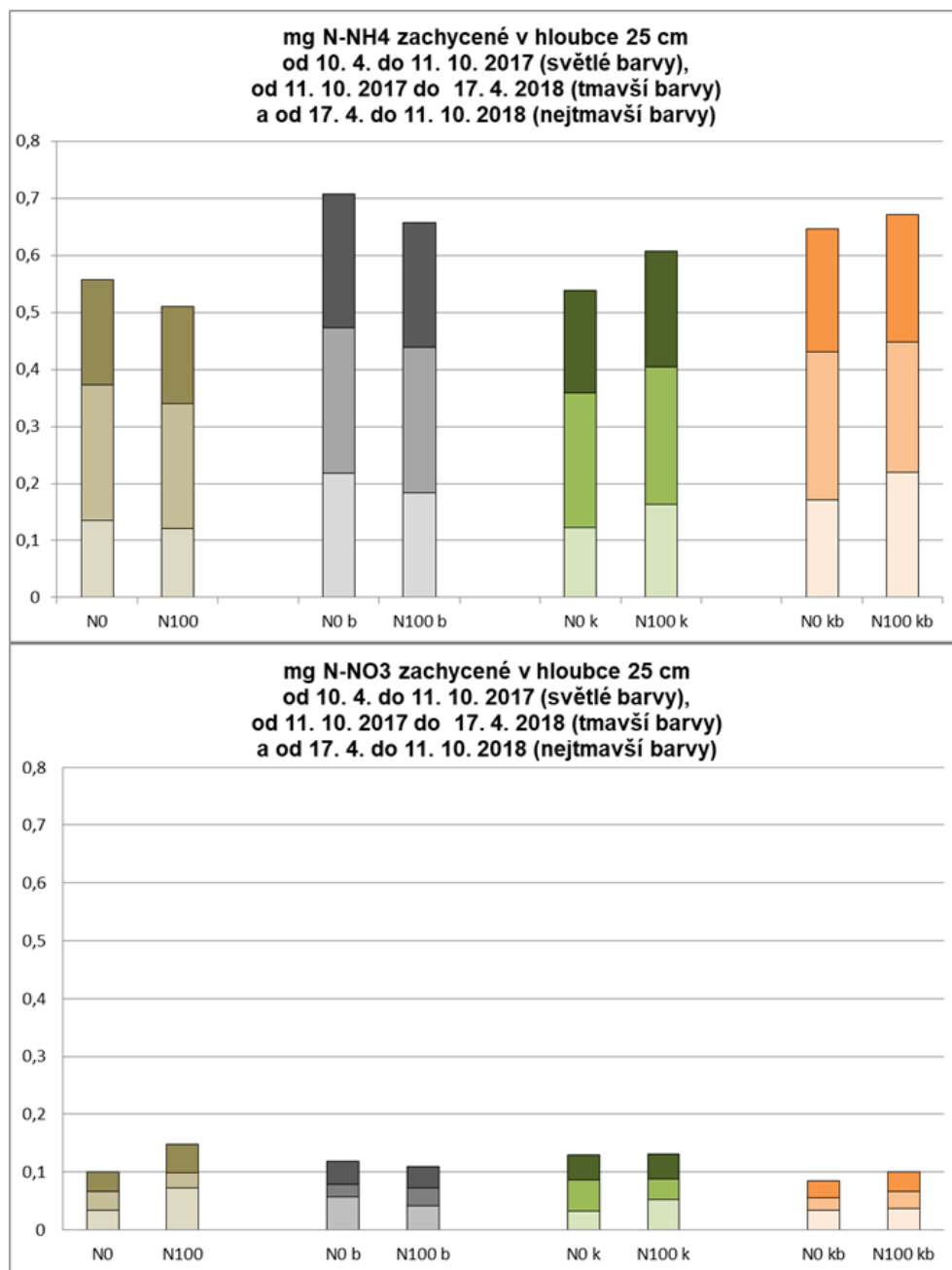
Obrázek 39 Schéma nového systému pro záchyt vyplavovaného minerálního dusíku iontoměniči umožňující výměnu iontoměničů z povrchu půdy



Obrázek 40 Příprava instalace jímací soupravy

Obr. 40 - Příprava instalace jímací soupravy pro záchyt minerálního dusíku a fosforu v prosakujícím půdním roztoku - A: vkládání/výměna iontoměničových sondiček; B: v horní části výřezu je do půdy instalován pouze vnější manipulační PVC tubus; C: pohled na vkládání tubusů do půdy pod úhlem 45°.



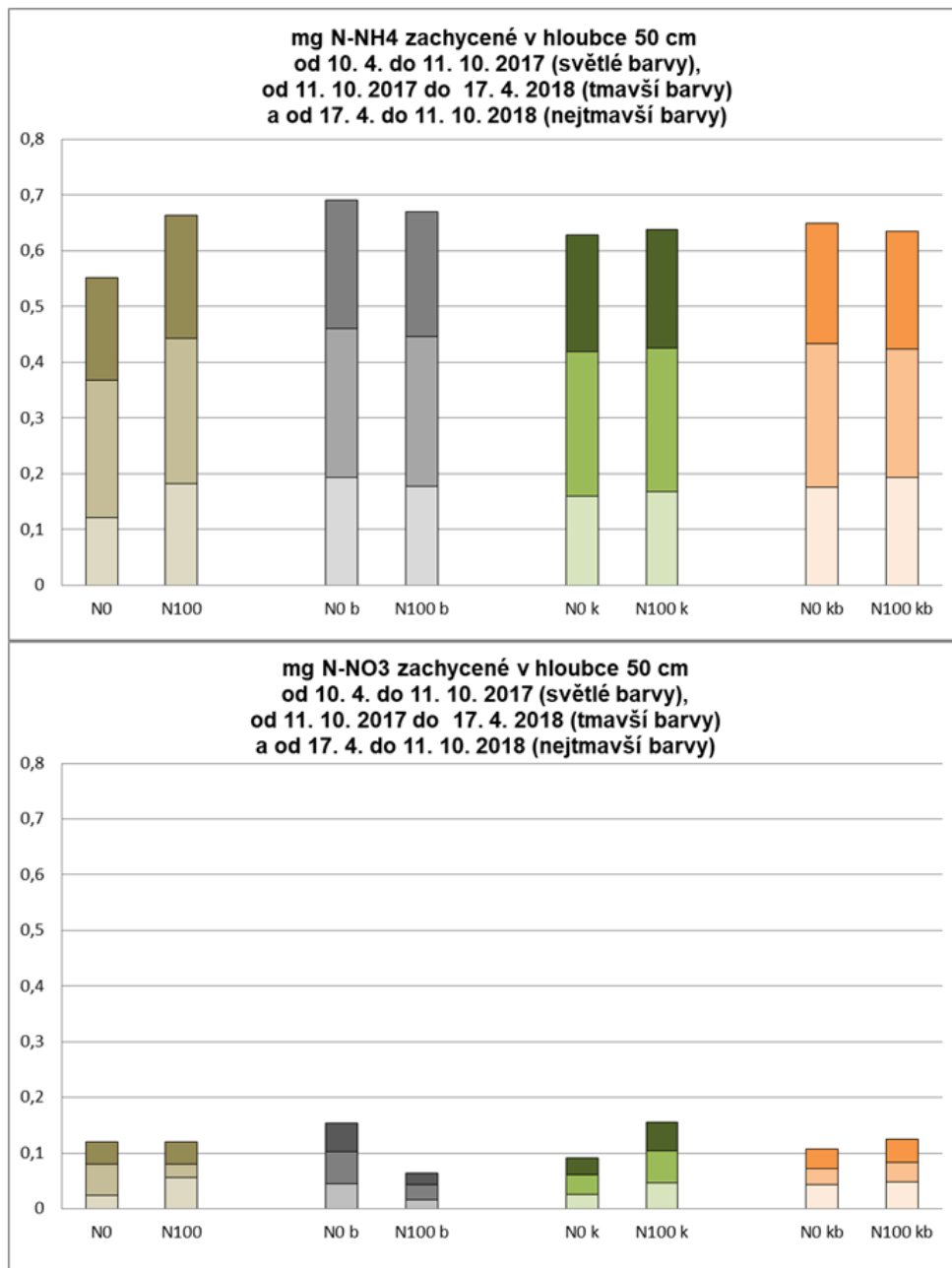


Obrázek 41 Záchyty amonného a nitrátového dusíku v hloubce 25 cm

Obr. 41 Záchyty amonného a nitrátového dusíku v hloubce 25 cm měřené novým systémem záchytu vyplavovaného minerálního dusíku iontoměníči umožňujícím výměnu iontoměníčů z povrchu půdy, tzv. „hloubkovými sondami“ (konstrukce popsána v kap. 3.5)

Hloubkové sondy jsou inovativní metodou umožňující šetrnější umístění iontoměníčových sondiček do intaktního půdního prostředí. Takto získané hodnoty lze použít jako důležitý indikátor půdně biologických procesů, nelze však výsledky přepočítávat na plochu. V hloubce 25 cm se v průběhu vegetační sezóny roku 2017 a v následném období zachytilo v přepočtu na jeden metr čtvereční

přibližně tři- až čtyřikrát více amonného dusíku než dusíku nitrátového. Tato metoda tedy potvrzuje výsledky stanovení metodou předchozí.



Obrázek 42 Záchyty amonného a nitrátového dusíku v hloubce 50 cm

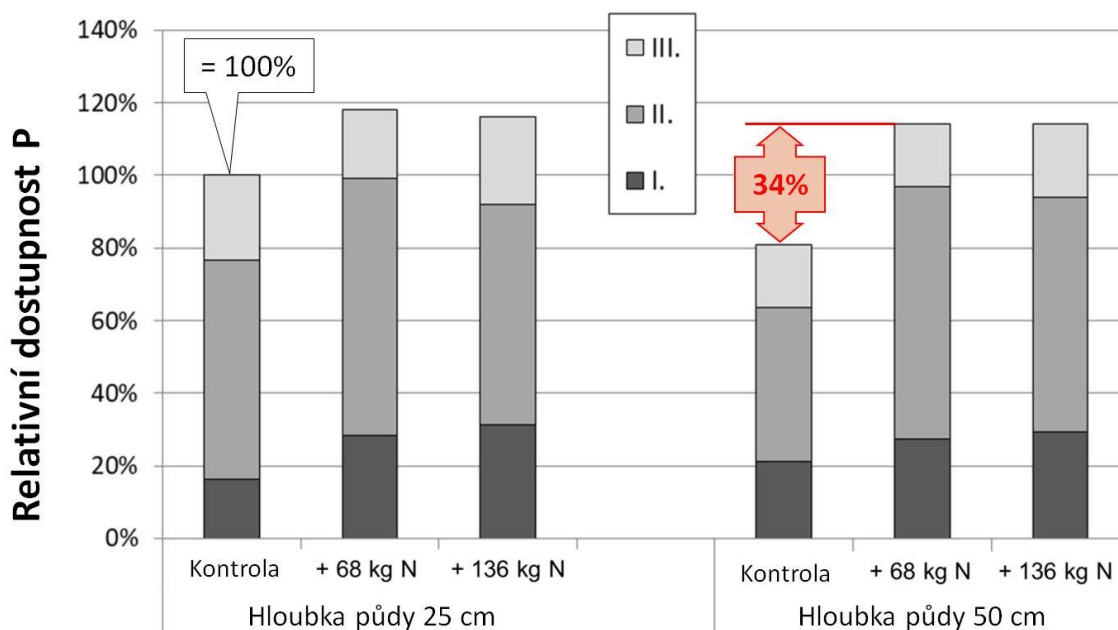
Obrázek 42 - Záchyty amonného a nitrátového dusíku v hloubce 50 cm měřené novým systémem záchytu vyplavovaného minerálního dusíku iontoměničím umožňujícím výměnu iontoměničů z povrchu půdy, tzv. „hloubkovými sondami“ (konstrukce popsána v kap. 3.5)

Také ve větší hloubce (50 cm) se podobně jako v hloubce 25 cm v průběhu vegetační sezóny roku 2017 a v následném období zachytilo přibližně tři- až čtyřikrát více amonného dusíku a také zde můžeme potvrdit soulad prezentovaných výsledků z hloubkových sond s předcházející metodou jímání půdního

roztoku na mikrozimetrech s jasně definovanou plochou. Rovněž rozdíly mezi jednotlivými variantami experimentu nebyly v hloubce 50 cm příliš velké. Závěr sledovaného období byl poznamenán extrémním suchem, proto je nutné hodnotit získané výsledky i s vědomím této skutečnosti.

Oddělené jímání kladných a záporných iontů v novém systému záchytu vyplavovaného minerálního dusíku iontoměničím umožňujícím výměnu iontoměničů z povrchu půdy, v tzv. „hloubkových sondách“, umožňuje tímto zpětnou extrakci zachyceného minerálního fosforu.

Dostupnost fosforu v „Kontrolě“ v hloubce 25 cm (bez aplikace dusíku) byla považována za 100%



(I) = vegetační sezóna 2017; (II) období vegetačního klidu 2017/2018; (III) = vegetační sezóna 2018

Obrázek 43 Záchyt minerálního fosforu v hloubkách 25 a 50 cm – iontoměniče

Obrázek 43 - Záchyt minerálního fosforu v hloubkách 25 a 50 cm měřený novým systémem záchytu vyplavovaných živin iontoměničím umožňujícím výměnu iontoměničů z povrchu půdy, tzv. „hloubkovými sondami“ (konstrukce popsána v kap. 3.5). Relativní porovnání množství fosforu zachyceného ve dvou různých hloubkách 25 a 50 cm v období od 10. dubna 2017 do 11. října 2017 (označeno jako období I.), od 11. 10. 2017 do 17. 4. 2018 (II.) a poslední období od 17. 4. 2018 do 11. října 2018. Záchyty fosforu v hloubce 25cm z experimentální parcely bez hnojení minerálním dusíkem (Kontrola) jsou považovány za 100%.

Výsledky jsou prezentovány v relativním vyjádření v kumulativní podobě za všechna období. Pro snazší vzájemné porovnání jednotlivých variant je za stoprocentní základ zvolena míra záchytů minerálního fosforu v kontrolní variantě bez vstupů minerálního dusíku v hloubce 25cm. Z výsledků vyplývá, že aktivity a odběr fosforu půdními organismy a kořeny rostlin v průběhu vegetačních období měly vliv na snížení záchytu minerálního fosforu přibližně na jednu polovinu proti obdobím vegetačního klidu. Dále že ve variantách hnojených minerálním dusíkem byl v obou hloubkách celkový záchyt minerálního

fosforu o 14 až 18 % větší, což podporuje hypotézu o větším uvolňování fosforu ze starých půdních zásob na lokalitách dlouhodobě nehnojených fosforem při hnojení minerálním dusíkem. Zpřístupnění relativně velmi dobrých zásob fosforu v našich půdách po hnojení minerálním dusíkem může vysvětlit rezignaci na hnojení fosforem v posledních 27 letech ve srovnání s obdobím před rokem 1991 (Sálusová, 2018).

O jednu třetinu menší dostupnost fosforu v hloubce 50cm kontrolní varianty bez přidavku minerálního dusíku lze dát do souvislosti s tím, že snahy o regeneraci půdního oživení cestou snížení minerálního dusíkatého hnojení mohou v budoucnu zmenšovat dostupnost půdního fosforu. Důvodem je regenerace fyzikálního stavu půdy. 13% zvýšení stability půdních agregátů, tedy regeneraci půdní struktury, potvrdili v nehnojené variantě po prvních čtyřech letech téhož experimentu Brtnický a kol. (2017). Obnova půdních agregátů zlepšuje mikrobiální kontrolu půdního fosforu a ztěžuje dostupnost fosforu pro rostliny. Následkem toho se přístup rostlin k fosforu stává komplikovanější. Je vynucena těsnější spolupráce s půdními mikroorganismy, která se ale paradoxně ani nemusí projevit nedostatkem fosforu v rostlině. Naopak může se zvětšit vylučování energie a uhlíkatých látek z kořenů na podporu spolupracujících mikrobů v okolí kořene, a tím i zlepšit kvalita organické hmoty v půdě spojená s efektivnější kontrolou klíčových živin.

Dosahují-li tedy kumulativní zásoby fosforu v našich orných půdách průměrně až  $1450 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  (Van Dijk, 2016) a činí-li každoroční ztráty fosforu v České republice  $2,1 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ , potom by tato zásoba stačila ve stávajícím zemědělském systému hypoteticky na 690 roků. Převedením konvenčního zemědělství na zemědělství bez vstupů minerálního dusíku a tím i odhadovaným snížením ztrát fosforu o jednu třetinu by tato zásoba stačila dokonce na 1030 roků, tedy o 340 roků více. Jde samozřejmě o čísla orientační vypočítaná z měření na jedné lokalitě a z průměrných charakteristik pro celou republiku. Na straně druhé tyto hypotetické hodnoty ilustrují význam potenciálního zdroje fosforu v půdě při úvahách o žádoucích změnách našeho zemědělství.

**ZÁVĚR: V průběhu řešení projektu INTEKO bylo hloubkovými sondami s iontoměničím zjištěno, že zemědělství bez vstupů minerálního dusíku může snížit ztráty fosforu o jednu třetinu. Za takových podmínek bychom mohli být našim zemědělským předkům vděční ještě více; nejen že nahnojením dvojnásobně větších zásob fosforu ve srovnání se sousedními Polskem a Rakouskem ušetřili naši zemi před větší zátěží radioaktivním uranem, ale také za to, že při přechodu na organické zemědělství by současná zásoba fosforu stačila dokonce na 1030 roků, tedy o 340 roků více. Musíme si nicméně připustit, že oživením půdy a zlepšenou mikrobiální kontrolou zdrojů fosforu uvnitř půdních agregátů snížíme současně dostupnost fosforu v půdě, což bude nutno vyrovnat zvýšeným přísunem kvalitního zdroje fosforu - např. ve formě kompostu.**



## 4 Literatura

Binkley, D., Matson, P. (1983): Ion Exchange Resin Bag Method for Assessing Forest Soil Nitrogen Availability. *Soil Science Society of America Journal* 47: 1050-1052.

Brtnický, M., Dvořáčková, H., Elbl, J., Kynický, J., Hladký, J. (2017): Changes in Soil Aggregate Stability Induced by Mineral Nitrogen Fertilizer Application. *Acta Univ. Agric. Silvic. Mendelianae Brun.* 2017, 65, 1477-1482

Hanselman, T.A., Graetz, D.A. and Obreza, T.A. (2004) A comparison of in situ methods for measuring net nitrogen mineralization rates of organic soil amendments, *J. Environ. Qual.* 33:1098–1105.

Lehmann, J., Kaiser, K. and Peter, I. (2001) Exchange resin cores for the estimation of nutrient fluxes in highly permeable tropical soil. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 164, 57- 64.

Halada, L., Záhora, J., Gajdoš, P., Hreško, J., Tůma, I., David, S., Mojses, M., Bugár, G., Kohút F., Boltížiar, M., Majzlan, O. (2016): Alpine Grasslands of Western Tatra Mts. under Impact of Long-Term Air Pollution. *Životné prostredie*, 50, 2, p. 72 – 80.

Keith, H., Wong, S.C. (2006): Measurement of soil CO<sub>2</sub> efflux using soda lime absorption: Both quantitative and reliable. *Soil Biology and Biochemistry* 38(5): 1121-1131.

Li, Z. M., Skogley, E. O., and Ferguson, A. H. (1993) Resin adsorption for describing bromide transport in soil under continuous or intermittent unsaturated water flow. *J. environmental quality*, 22(4), 715-722.

Nohel, P., Záhora, J., Mejzlík, L. (2008): Sledování úniku minerálního dusíku z půd různých ekosystémů v OPVZ II. st. Březová nad Svitavou. *SOVAK*, 7-8: 48-51.

Schwartz, R.C., McInnes, K.J., Juo, A.S.R., and Wilding, L.P. (1999) Boundary effects on solute transport in finite soil columns. *Water Resources Research*. 35 (3) 671- 681.

Šrámek, V. -- Kulhavý, J. -- Fadrhonsová, V. -- Vejpustková, M. -- Lomský, B. -- Záhora, J. (2004): Vliv současných depozic dusíku na zvyšování přírůstu a kvalitu výživy smrkových porostů. dílčí zpráva projektu NAZV QC1723. VÚLHM. 49 s.

Van Dijk, K., Lesschen, J.P., Oenema, O. (2015). Phosphorus flows and balances of the European Union Member States. *The Science of the total environment*. 10.1016/j.scitotenv.2015.08.048.

Wienhold, B.J., Varvel, G.E. and Wilhelm, W.W. (2009) Container and Installation Time Effects on Soil Moisture, Temperature, and Inorganic Nitrogen Retention for an in situ Nitrogen Mineralization Method. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 40:13-14,2044-2057, DOI: 10.1080/00103620902960575.

Willich, M., and Buerkert, A., (2016) Leaching of carbon and nitrogen from a sandy soil substrate: A comparison between suction plates and ion exchange resins. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 179. doi :10.1002/jpln.201600036.

Yavitt, J.B., and Wright, S.J. (1996): Temporal patterns of soil nutrients in a Panamanian moist forest revealed by ion-exchange resin and experimental irrigation. *Plant and Soil* 183: 117-129.

Záhora, J. (2001): Dostupnost dusíku v půdě vřesovišť Národního parku Podyjí. *Thayensia*, 4, 169 – 181.

Záhora, J., Chytrý, M., Holub, P., Fiala, K., Tůma, I., Vavříková, J., Fabšičová, M., Keizer, I., Filipová, L. (2016): The Effect of Nitrogen Accumulation on Heathlands and Dry Grasslands in the české Podyjí National Park. *Životné prostredie*, 50, 2, p. 97 – 107.

Záhora, J., Nohel, P. Kintl, A., (2011): Vyplavování minerálního dusíku z orných, lučních a lesních půd v OPVZ II. st. Březová nad Svitavou. *Sborník přednášek Voda Zlín 2011*, Zlín: Moravská vodárenská, a. s., 1: 49–54.





**EVROPSKÁ UNIE**

Tento materiál byl vydán v rámci projektu ATCZ42 INTEKO

2019

