

	<p><b>Státní ústav radiační ochrany,</b>  <b>v.v.i.</b>          Bartoškova 28, Praha 4  <b>Odbor přírodních zdrojů, oddělení</b>  <b>pro radon a NORM</b></p>		
<p><b>CERTIFIKOVANÁ METODIKA</b></p>			
<p><b>Metodika stanovení výměny vzduchu ve</b>  <b>vnitřním ovzduší budov s využitím</b>  <b>pasivních integrálních měřidel indikačních</b>  <b>plynů (pro potřeby SÚJB)</b></p>			
<p><b>Vypracoval:</b></p>			
<p><b>Funkce</b></p>	<p><b>Jméno</b></p>	<p><b>Datum</b></p>	<p><b>Podpis</b></p>
<p>Vedoucí oddělení radonové a thoronové laboratoře</p>	<p>Ing. Karel Jílek</p>		
<p>Vedoucí odboru</p>	<p>Mgr. Aleš Froňka, Ph.D.</p>		
<p><b>Oponenti:</b></p>			
<p><b>Jméno</b></p>	<p><b>Organizace</b></p>		
<p>Doc.Ing.Martin Jiránek, CSc.</p>	<p>Fakulta stavební, ČVUT v Praze</p>		
<p>Ing.Zuzana Mathauserová</p>	<p>Státní zdravotní ústav, NRL pro prašnost a mikroklima v pracovním prostředí</p>		
<p><b>Vypracováno v rámci výzkumného projektu:</b></p>			
<p>TAČR program BETA č. TB04SUJB002 Vytvoření nových strategických podkladů pro regulaci ozáření z přírodních zdrojů v bytovém fondu na území ČR</p>			

## Změnový list

Číslo změny	Vypracoval	Důvod změny		Schválil	Účinnost Od
	Jméno, podpis	Nové listy:	Zrušené listy:	Jméno, podpis	
01					
02					
03					
04					
05					
06					
07					
08					

## Přehled revizí

Číslo revize	Důvod revize	Účinnost Revize od
0	Původní dokument	25. 11. 2016

## 1. Názvosloví a zkratky

V dokumentu byly použity termíny a definice podle ČSN EN ISO 12569 [1] a dále tyto:

### 1.1 Objemový průtok vzduchu:

- je celkové množství vzduchu vyměněného mezi měřenou zónou a venkovním prostředím za časovou jednotku, v ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) nebo ( $\text{m}^3/\text{h}$ ).

### 1.2 Výměna vzduchu pro měřenou zónu:

- je hodnota celkového množství vzduchu vyměněného mezi měřenou zónou a venkovním prostředím za časovou jednotku, vztažená k celkovému objemu měřené zóny, v ( $1/\text{s}$ ) nebo ( $1/\text{h}$ ).

### 1.3 Výměna vzduchu pro N- měřených zón budovy:

- je hodnota celkového množství vzduchu vyměněného mezi N- měřenými zónami a venkovním prostředím za časovou jednotku, vztažená k celkovému objemu měřených N- zón.

### 1.4 Měřená zóna:

- prostor nebo několik prostorů, kde může být rovnoměrně udržovaná koncentrace indikačního plynu a kde dochází k výměně vzduchu pouze s venkovním prostředím.

### 1.5 N- měřených zón:

- představuje N- prostorů, kde v každém z nich může být rovnoměrně udržovaná koncentrace k- tého z N- použitých indikačního plynu a kde dochází k výměně vzduchu mezi všemi jednotlivými zónami a mezi každou z N- zón a venkovním prostředím.

### 1.6 Budova:

- budovou se rozumí pro účely této metodiky technicko- konstrukčně byty, rodinné domy, bytové domy a pracovní haly, využívané obecně pro jakýkoli pobyt osob nejčastěji pak pro bydlení, pobyt a práci.

### 1.7 Rodinný dům:

- má maximálně tři samostatné byty, nejvíce dvě nadzemní a jedno podzemní podlaží a podkroví. Mezi rodinné domy patří rovněž rekreační chalupy s číslem popisným

nevyčleněné z bytového fondu, využívané k rekreaci. Rodinný dům může být samostatný, dvojdomek (společná část obvodové zdi s rodinným domem na sousedící parcele) nebo řadový (alespoň tři rodinné domy k sobě přiléhají částí obvodového pláště-zdi).

#### 1.8 Bytový dům:

- má více bytů přístupných ze společné chodby nebo schodiště a nejde o rodinný dům, počet podlaží není určující. Mezi bytové domy patří také vily, které nesplňují podmínky rodinného domu.

#### 1.9 Byt:

- představuje pro účely této metodiky jednu měřenou zónu.

#### 1.10 Indikační plyn:

- je plyn, který je dobře mísitelný se vzduchem, má minimálními adsorpční a absorpční vlastnostmi k předmětům v budovách, má zanedbatelné pozadí ve venkovním ovzduší budov, je z hlediska zdravotní závadnosti akceptovatelný a používá se k měření výměny vzduchu.

**POZNÁMKA:** Typy a příklady doposud rutinně používaných indikačních plynů, měřicích přístrojů, limity měření, dovolené koncentrace a přesné informace o jednotlivých indikačních plynech jsou uvedeny v [1]. Plyn o jiné teplotě, než je teplota místnosti, nemůže být použit jako indikační plyn.

## 2. Účel metodiky

Metodika popisuje postup a způsob stanovení průměrné hodnoty výměny vzduchu v budovách, jejíž znalost je nezbytná i pro objektivní interpretaci dosažených výsledků měření objemových aktivit radonu ve stavbách s obytnými nebo pobytovými místnostmi, prováděnými ve smyslu Doporučení SÚJB [2].

## 3. Specifikace metodického postupu

Pro stanovení průměrné hodnoty výměny vzduchu během doby jejího měření v budovách se podle této metodiky používá pasivní integrální detekční systém, založený na detekci vhodně použitých indikačních plynů, definovaně injektovaných s konstantním přísunem do měřené zóny nebo N- měřených zón budovy.

Z rozdílu známé hmotnostní bilance celkového přísunu indikačního plynu do měřené zóny a jeho měřené průměrné hmotnostní koncentrace se pak stanovuje jeho odstranění, které je

přímo úměrné výměně vzduchu. Časově vážené průměrné hmotnostní koncentrace příslušného indikačního plynu se pak stanovují z jeho hmotnosti nasorbované uvnitř použitých detektorů na použitý sorbent během doby měření. Vzorkování měřeného vzduchu s obsahem indikačního plynu na nebo směsi indikačních plynů na detektor se děje difuzním způsobem. Celková hmotnost indikačního plynu sorbovaná uvnitř detektoru se stanovuje s využitím plynové chromatografie s ECD koncovkou.

Matematický popis úloh pro námi uvažované případy budov s maximálním počtem zón  $N=3$  je pak uveden v Příloze 1.

#### **4. Použitá přístrojová technika**

Pro účely této metodiky mezi nezbytné přístroje patří především zařízení pro konstantní a definovanou injektáž indikačního plynu do měřených zón budov, prostředky k získání měřených vzorků vzduchu, analyzátor plynu pro měření koncentrace indikačního plynu nebo směsi indikačních plynů ve vzorku vzduchu a další pomocná zařízení a vybavení.

##### **4.1 Zařízení pro definovanou a konstantní injektáž indikačního plynu:**

Jedná se o vhodnou kapiláru plynově neprodyšnou (např. skleněnou či kovovou) s obsahem příslušné kapalné fáze indikačního plynu, opatřenou difuzní membránou, která řídí definované a konstantní odpařování- emisi indikačního plynu z jeho kapalné fáze do měřené zóny, tzv. vyvíječ. Vhodnou konstrukcí celkového objemu kapiláry a difuzní membrány jsou zajištěny potřebné parametry emise, která je principiálně ovlivňována pouze okolní teplotou.

Námi používané vyvíječe jsou pak celoskleněné a opatřeny svými identifikačními čísly. Pro převoz, distribuci a použití jsou použity vhodné držáky a přepravní obaly, aby se zabránilo kontaminaci používaných integrálních měřidel (detektorů) během transportu a jejich nerozbití. Pro kontrolu stability difuzního odparu vyvíječe a jejich výběr k měření jsou dále použity přesné laboratorní váhy SARTORIUS a digitální teploměr TESTO.

##### **4.2 Zařízení pro měření vzorků vzduchu**

Pro měření vzorků vzduchu s příslušným indikačním plynem resp. časově vážené hmotnostní koncentrace použitých indikačních plynů jsou používány celokovové trubice, dále TD detektory fy. MARKES<sup>TD</sup> (UK), plněné vhodným sorbentem vzhledem k použitému typu indikačního plynu. Námi používané sorbenty jsou pak Chromosorb 102, TENAX -TA 35/60 a TENAX - TA- 80/100.

Trubice jsou pro přepravu opatřeny celokovovými šroubovacími uzávěry s PFTE těsnícími ferulemi. Pro měření se pak jednoznačně konstrukčně definovaná strana trubice opatří difuzním uzávěrem se silikonovými o- kroužky namísto přepravního. Konstrukce TD detektorů umožňuje jejich hromadné termické vyhřátí a následnou chromatografickou analýzu uvolněných indikačních plynů, zachycených na sorbentu detektoru v analyzátoru plynu.

### **4.3 Analyzátor indikačních plynů**

Analyzátor indikačních plynů se principiálně skládá z:

- zařízení pro řízenou termickou desorpci vyhodnocovaných TD detektorů (zařízení ULTRA-UNITY fy. MARKES<sup>TD</sup>, UK)
- kapilární kolony pro záchyt a separaci použitých indikačních plynů typu Rxi®-624Sil MS Restek (30 m, ID 0,25 mm, 1,4 µm)
- plynového chromatografu Shimadzu GC 17A-FID/ECD tj. s detektory typu ECD a nebo FID vč. relevantního SW pro kvantitativní a kvalitativní analýzu použitých indikačních plynů.

### **4.4 Indikační plyny**

Pro účely této metodiky jsou námi používány v měřených zónách budov následující indikační plyny, které jsou v kapalně fázi vhodně skladovány v chladničkách při teplotách v rozmezí 8-12 °C :

- TCE trichlorethylen (CAS.No. 79-01-6)
- PCE tetrachlorethylen (CAS.No. 127-18-4)
- PFDMCH perfluoro-1,3-dimethylcyklohexan (CAS.No. 335-27-3).

### **4.5 Další pomocná zařízení**

- Kontinuální měřidla venkovní teploty se záznamem TESTO typ. 374 s propojovacím USB kabelem a vyhodnocovacím SW
- Laserové dálkoměry pro stanovení geometrického objemu měřené budovy
- Přesné laboratorní digitální váhy SARTORIUS s přesností na desetiny miligramu pro měření a kontrolu emise indikačního plynu z použitých vyvíječů indikačních plynů
- Přesné laboratorní dávkovače kapalně fáze indikačních plynů z jejich zásobních lahví do vyvíječů s rozlišením 5 µl
- Další drobné pomocná zařízení jako pinzety a spotřební materiál potřebný pro zajištění chodu analyzátoru plynu (láhve s nosným plynem apod.).

## **5. Manipulace se zkušebními vzorky**

Pro účely této metodiky považujeme za zkušební vzorky vnitřní atmosféru měřené zóny budov, která obsahuje časové proměnou hmotnostní koncentraci měřených indikačních plynů. Takový vzorek jednoznačně souvisí pouze s měřícím místem a časem. Měření vzorků probíhá po celou dobu měření pomocí TD detektorů umístěných v měřených zónách budov.

## 6. Pracovní postup

### 6.1 Plánování a příprava k realizaci měření

1.1 Podle typu měřené budovy se v laboratoři se připraví v potřebném počtu potřebná měřící technika:

- vyvíječe použitých indikačních plynů
- TD detektory
- měřidla se záznamem teploty a laserové dálkoměry pro výpočet objemu měřené budovy, pokud není k dispozici technický výkres
- pracovní dokumentace, nezbytná pro zachycení měřené situace, umístění měřidel apod. Její minimální rozsah pracovní dokumentace pak uvádí její vzor, uvedený v Příloze 2.

1.2 Potřebná emise použitých vyvíječů se řídí odběrovými rychlostmi použitých TD detektorů s daným sorbentem nalezenými z kalibrace na použité typy indikačních plynů, dynamickým měřícím rozsahem pro odezvy použitých TD detektorů použitého plynového chromatografu, dobou měření, objemem měřené zóny a očekávanou průměrnou výměnou vzduchu. Pro odhad potřebné emise lze pak využít vztah (6) uvedený v Příloze 1.

Jako příklad může posloužit následující Tabulka 1, kde jsou odhady potřebných celkových emisí námi používaných indikačních plynů pro použité TD detektory na bázi komerčního sorbentu Chromosorb 102. Objem zóny je  $200\text{m}^3$ , průměrná teplota a tlak  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  resp.  $980\text{ hPa}$ , doba měření 7 dní resp. 31 dní pro minimální a maximální rozsahy detekce odezev použitých TD detektorů s celkovými nejistotami méně než 20% (pro 95% spolehlivost).

1.4 Provede se kontrola dotažení přepravních uzávěrů TD detektorů, a zda odpovídá počet potřebných měřících difuzních uzávěrů.

1.5 Provede se umístění TD detektorů a vyvíječů do oddělených transportních obalů, aby se zabránilo kontaminaci detektorů již během přepravy.

Tab.1 Typické celkové emise *m* námi používaných indikačních plynů pro

## Použitý sorbent Chromosorb 102 v TD detektorech pro 200m<sup>3</sup> měřenou zónu

Indikační plyn	Texp (den)	n <sub>1min</sub> (1/h)	n <sub>2 max</sub> (1/h)	m (mg/h)
TCE	7	1,73	0,04	1,5
TCE	31	1,70	0,04	0,5
PCE	7	1,70	0,06	1,5
PCE	31	1,31	0,04	0,3
PFT	7	1,75	0,03	8
PFT	31	3,12	0,08	5

n<sub>1min</sub>, n<sub>2max</sub> odpovídají dynamickému rozsahu vypočtených průměrných hodnot výměn vzduchu

### 6.2 Zásady umístění použitých měřidel

1.1. Do každé nejmenší místnosti v měřené zóně budovy (mimo WC a koupelen) se umísťuje jeden vyvíječ s vhodnou emisí indikačního plynu.

1.2 Pro budovu, která má N- zón (= počet poschodí plus suterén rodinných domů) se musí použít N- typů indikačních plynů. V každé zóně je pak použit vždy indikační plyn jednoho typu.

1.3 Do místností lišící se celočíselným k- násobkem objemu od ostatních místností měřené zóny se umísťuje vyvíječ s k- násobně vyšší emisí indikačního plynu než v ostatních místnostech zóny.

1.4 Vyvíječe se umísťují mimo přímé zdroje tepla a chladu tak, aby přirozeným způsobem tok vzduchu místností nad vyvíječem homogenizoval směs indikačního plynu a vzduchu. Umísťují se ideálně na plochách ve vzdálenosti 1-2 m od okolních stěn tzn. na stolech, visících svítidlech. Prakticky pak do výšky 0,5- 1,5 m nad zemí na nábytek, orientované výstupem zdroje do středu měřené místnosti, mimo přímých zdrojů tepla a chladu a ne na okenní parapety. Z důvodu principiální závislosti jejich emise na teplotě je třeba během celého měření zaznamenávat nejlépe celý časový průběh teploty v měřené místnosti nebo alespoň minimální a maximální teplotu.

1.5 Vyvíječe se umísťují vždy na protilehlých stranách v místnosti oproti umístěným TD detektorům.



1.6 V případě měření vícepodlažních budov se doporučuje díky komínovému efektu osazovat vždy vyšší podlaží indikačními plyny s výrazně vyššími emisními rychlostmi. V našem případě uvažovaného maximálně 3- zónálního měření rodinných domů se pak doporučuje použít pro nejvyšší zónu indikační plyn, pro něhož součin celkové emisní rychlosti a odběrové rychlosti TD detektoru pro tento plyn je alespoň 5-10 x vyšší než pro indikační plyn, použitý dispozičně v nejnižší zóně.

1.7 TD detektory se umísťují vždy nejméně po dvojicích v jednom měřicím místě, které je jedno vždy pro každou měřenou zónu a vzdálenost TD detektorů od vyvíječů by měla být alespoň 2 m.

1.8 TD detektory se umísťují na nábytek pokud možno ve stejné výšce jako vyvíječe, ale na opačné straně od nich v měřené místnosti a nejlépe v geometrickém středu měřené zóny. Jejich vzdálenost od stěn má být min. 2cm a orientace jejich vstupní difúzní části směrem ke stěně.

1.9 TD detektory je doporučeno neumísťovat na přímé zdroje tepla a chladu a do chodeb a předsíní bytů a rodinných domů.

### **6.3 Postup při zahájení a ukončení měření**

1.1 Při zahájení měření se podle typu měřené budovy a počtu měřených zón a místností založí vyvíječe a TD detektory postupem podle předchozího odstavce 6.2.

1.2 Do pracovního formuláře dle vzoru Příloha 2 se zapíše a zakreslí:

- identifikace majitele a měřené budovy
- datum a čas zahájení měření
- stručný plánec a popis dispozice budovy s vyznačením umístěných vyvíječů a TD detektorů vč. jejich evidence podle příslušných výrobních čísel a případně použitých sorbentů
- umístění měřidel se záznamem teploty, nastavené na hodinové záznamy
- dobu časové prodlevy od transportu do zahájení měření.

1.3. Sundají se přepravní uzávěry TD měřidel a nahradí se difúzními pro měření.

1.4. Spustí se kontinuální měření teploty měřené zóny s nastavenými hodinovými záznamy anebo alespoň nainstaluje teploměr - min/max.

1.5 Při ukončení měření se zapíše čas sběru měřidel a vyvíječů s přesností alespoň na jednotky minut.

1.6. Difúzní uzávěry TD měřidel se nahradí opět přepravními a všechna nainstalovaná měřidla vč. vyvíječů se uklidí zpět do transportních obalů a provede se jejich celková evidence.

1.7 Po příjezdu na vyhodnocovací pracoviště se zaznamená do formuláře časová prodleva od sběru měřidel do jejich předání k vyhodnocení.

1.8 Do formuláře se dále doplní údaj o průměrné hodnotě atmosférického tlaku během doby měření nebo údaj min/max, získaný buď z vlastního měření nebo jiným způsobem např. z nejbližší meteorostanice ČHMÚ.

1.9 Během transportu se dbá na zajištění odděleného umístění TD detektorů a vyvíječů, aby se minimalizovala možnost kontaminace měřidel během převozu.

#### **6.4 Doba měření**

1.1. Pro účely této metodiky a její další využití jsou uvažována postupně 7 denní screeningová nebo měsíční integrální měření v budovách, které zaručují splnění požadovaného časového kritéria na minimální dobu měření viz. Vztah (3) v Příloze 1.

1.2. S ohledem na odběrové difúzní rychlosti použitých TD detektorů, dolní meze jejich chromatografického vyhodnocení a měřené průměrné hmotnostní koncentrace indikačních plynů řádu desetin  $\text{mg}/\text{m}^3$ , je přesnost stanovení doby měření požadována alespoň na 1 hodinu.

#### **6.5 Pracovní záznamy**

1.1 Nejdůležitější výstupy z ručního zápisu do prvotního formuláře k měřenému objektu na místě jsou poskytnuty do elektronické formy tabulkového editoru Excel, kde je proveden numerický výpočet průměrné výměny vzduchu pro daný objekt a jeho databázové uložení.

1.2. Dosažený výsledek průměrné hodnoty výměny vzduchu vč. její nejistoty je pak součástí dalšího hodnocení ozáření osob v budově ve smyslu citovaného Doporučení SÚJB [2].

## **7. Validace a verifikace**

### **7.1 Konfirmace identity a selektivnost metody**

Použití vybraných typů sorbentů TD detektorů, chromatografických kolon a použití standardizovaných operačních postupů TD GC- 17A-1-1-02 a TD GC-17A-1-2-0, specifikovaných v Příloze 3 zajišťují selektivní stanovení indikačních plynů v dostatečných měřených koncentracích pro pokrytí námi požadovaného rozsahu výměn vzduchu i pro N-zonální měření bez interferujících vlivů.

### **7.2 Správnost metody**

1.1 Správnost metody jako souhlas mezi výsledkem stanovení průměrné výměny vzduchu její pomocí a konvenčně pravé hodnoty je zajištěna vnitřní a vnější kontrolou.

1.2 Vnitřní kontrola metody spočívala její komparaci s konvenčně pravou metodou, která využívá definované stanovení výměny vzduchu v radonové komoře SÚRO, v.v.i. [3], které je založeno na přesném měření objemového průtoku vzduchu známým objemem komory ( $48\text{m}^3$ ).

1.3. Vnější kontrola metody spočívá v její komparaci s PFT metodou [4], kterou rutině provozuje a komerčně nabízí renomovaná americká laboratoř NBL (National Brookhaven Laboratory) z New Yorku.

Souhrnné výsledky z nezávislých pěti týdenních a pěti měsíčních komparačních testů, provedených v radonové komoře za podmínek podobných v bytech tj. měnící se teploty T (15 - 30) °C, RH vzduchu (30 - 70) % a pro 5 úrovní výměn vzduchu pokrývající typický rozsah výměn vzduchu v budovách (0,05 - 1) 1/h indikovaly vnitřní chybu metody 12 % nezávislou na použitém typu sorbentu v detektoru.

Každá z 5 testovaných úrovní výměny vzduchu pak byla měřena vždy 7 dní a poté 30 dní a pro každou úroveň se exponováno vždy celkem 60ks TD detektorů.

Z tohoto počtu TD detektorů bylo vždy každých 20 ks TD detektorů naplněno jedním ze tří námi používaných sorbentů.

Emisní rychlosti vyvíječů všech tří námi použitých indikačních plynů do komory byly voleny tak, aby chromatografické vyhodnocování TD měřidel probíhalo v polovině možného měřitelného rozsahu sorbovaných množství indikačních plynů na detektorech.

### **7.3 Přesnost metody**

1.1 Na základě nezávislých testů provedených v radonové komoře a výše popsáných v předchozím textu odst. 7.2 byla přesnost metody kvantifikována pomocí maximální vypočtené směrodatné odchylky  $S_x$  normalizované pro relevantní střední hodnotu úrovně výměny vzduchu samostatně, pro každý ze tří námi používaných sorbentů a indikačních plynů. Dosažené výsledky pak indikovaly nezávislost sledované směrodatné odchylky na typu sorbentu a indikačního plynu a její maximální hodnota normalizovaná k relevantní úrovni průměrné výměny vzduchu činila 0,09.

1.2 Výsledky nezávislých porovnání validované metody, provedených v terénu s nezávislými metodami konstantního přísunu indikačního plynu do měřené zóny s využitím kontinuálně měřených koncentrací indikačních plynů na bázi  $N_2O$  a  $SF_6$  resp. na bázi indikačního plynu  $^{222}Rn$  [1] indikovaly statisticky významnou shodu obou přístupů pro hladinu významnosti  $\alpha = 5\%$ . Vstupní data pro analýzu a výsledky použití neparametrického Mannova - Whitneyova [5] jsou ilustrovány v Příloze 4.

### **7.4 Opakovatelnost metody**

Vybrané výsledky výše zmíněných nezávislých testů provedených v radonové komoře SÚRO v.v.i. vždy za stejných podmínek indikovaly opakovatelnost metody lepší než 5%, nezávislou na typu sorbentu a typu indikačního plynu.

### **7.5 Systém pro integrální měření průměrné výměny vzduchu**

#### **7.5.1 Požadavky na použité vyvíječe indikačních plynů**

1.1 Výběrovým kritériem pro použití vyvíječů je celková nejistota v jejich emisi příslušného indikačního plynu pro měřený rozsah okolních teplot (15 - 35) °C, která by neměla přesáhnout 5%.

1.2 Před a po použití vyvíječů v terénu, a to po dobu vždy nejméně 10 dnů, jsou všechny použité vyvíječe kontrolovány na odchylku jejich emise od její nominální požadované

hodnoty, zjištěné v Laboratoři z předchozích dlouhodobých měření, pro relevantní rozsah okolních teplot a dobu měření alespoň 20dnů.

1.3 Laboratoř si vede záznamy o emisi každého vyvíječe.

7.5.2 Požadavky na použité TD detektory a chromatografické vyhodnocení (dolní a horní meze detekce)

1.1 Pro měření se používají pouze TD detektory s příslušným sorbentem, které neprošly maximálním počtem termických cyklů, doporučených výrobcem sorbentu a jsou kalibrovány, kondicionovány a analyzovány dle standardních operačních postupů TD GC-17A-1-1-02 a TD GC-17A-1-2-0, které vychází z ČSN EN ISO 16017-2 a které jsou Přílohou 3.

1.2 V následující Tabulce 2 jsou pak uvedeny dynamické měřicí rozsahy TD detektorů pro množství sorbovatelného indikačního plynu  $R_d$  v [ng], bez jeho průrazu sorpční kolonou detektoru stanovené s celkovou nejistotou menší než 20% dle výše zmíněných operačních postupů s 95% spolehlivostí tzn. dolní ( $R_{dmin}$ ) a horní meze detekce ( $R_{dmax}$ ).

Tab 2. Dynamické měřicí rozsahy  $R_d$  (min/max.) TD detektorů měřené s celkovou nejistotou lepší než 20% s 95% spolehlivostí

Rd(ng) /indikační plyn Sorbent	min. TCE	max.. TCE	min. PCE	max.. PCE	min. PFDMCH	max.. PFDMCH
Chromosorb 102	5	400	5	300	10	700
TENAX - TA 35/60	5	700	5	300	10	700
TENAX- TA 60/100	5	700	5	300	10	700

1.3 Pro zpřesnění výsledků z použitých TD detektorů se použije jako měřidlo v jednom měřícím místě dvojice TD detektorů a za výslednou hodnotu se považuje aritmetický průměr z obou hodnot.

1.4 Pro měření se používají průměrné odběrové rychlosti  $U_r$  použitých TD detektorů v [ng/ppm min] pro námi používané sorbenty jejich náplně podle následující Tabulka 3, získané v kalibrační radonové komoře se známou, konvenčně pravou hodnotou průměrné hodnoty výměny vzduchu během typických okolních podmínek měření tj  $RH=(40 - 65)\%$   $T=(18 - 30)^\circ C$ . Celková nejistota stanovení  $U_r$  byla lepší než 10% pro faktor pokrytí ( $k=1$ )

Tab 3. Odběrové rychlosti použitých TD detektorů jako funkce náplně -sorbentu a uvažované doby expozice

Doba expozice/ $U_r$	7 dní	31 dní
----------------------	-------	--------

(ng/ppm min)	TCE	PCE	PFDMCH	TCE	PCE	PFDMCH
Chromosorb 102	1,5	1,8	0,6	0,7	1,1	0,45
TENAX - TA 35/60	1,4	1,9	0,3	0,8	1,3	0,20
TENAX- TA 60/100	1,4	2,0	0,25	0,8	1,3	0,15

### 7.5.3 Dynamický měřicí rozsah metody

S uvážením výše zmíněných klíčových detekčních a vyhodnocovaných parametrů  $R_d$  a  $U_r$ , pro TD detektory, uvedených v Tabulkách 2-3 a s použitím vztahu (6) v Příloze 1 je dynamický rozsah měřených průměrných hodnot výměn vzduchu v budovách pro uvažovanou dobu měření 7 dní resp. 31dnů odhadnout i s uvážením možnosti volby celkové emise indikačního plynu na ( 0,05 - 2) 1/h.

## 8. Odhad nejistoty měření

### 8.1 Postup výpočtu nejistot měření

Vlastní postup výpočtu nejistot jednotlivých vstupních veličin včetně rozboru klíčových ovlivňujících faktorů a analýza kombinované nejistoty výsledku stanovení průměrné hodnoty výměny vzduchu vychází z dokumentů [6] a z uživatelských manuálů výrobců jednotlivých měřících zařízení.

Pro odhad rozšířené celkové nejistoty měření průměrné výměny vzduchu označené  $U_c$  lze

$$\text{psát: } U_c = k \sqrt{u(y)} = k \sqrt{\sum u(y_i)} = k \cdot \sqrt{(u_A)^2 + (u_B)^2} = 2 \sqrt{(u_A)^2 + (u_B)^2} \quad (i)$$

kde:

$k$  je koeficient rozšíření, který za předpokladu normálního rozdělení stanovované veličiny, odpovídá pro  $k=2$  95% intervalu spolehlivosti pokrytí

$u(y)$  je celková nejistota odhadu průměrné hodnoty výměny vzduchu

$u(y_i)$  jsou příspěvky celkových nejistot k celkové nejistotě od dílčích vstupních veličin, vystupujících modelu výpočtu průměrné výměny vzduchu viz. Příloha 1

$u_A$  jsou nejistoty typu A, reprezentované výsledky přímých opakovaných měření především:

- chromatografického stanovení nasorbovaného množství použitého indikačního plynu v TD detektoru

- vážení úbytků použitých indikačních plynů pro stanovení jejich celkové a průměrné emise do měřeného objemu zóny budov

$u_B$  jsou nejistoty typu B vstupních parametrů, které nejsou předmětem přímého stanovení

Mezi nejistoty typu B patří především:

- nejistota kalibračního standardu pro chromatograf, který slouží ke stanovení celkového sorbovaného množství příslušného indikačního plynu v TD detektoru
- nejistota konvenčně pravé hodnoty průměrné výměny vzduchu, použité ke kalibraci odběrových rychlostí TD detektorů
- nejistota vlivu teploty na emisi vyvíječů indikačního plynu
- nejistota stanovení měřeného objemu zóny
- nejistota odběrové rychlosti, daná kalibrací
- nejistota stanovení molárního objemu pro daný indikační plyn vlivem změn stavových veličin tlaku vzduchu  $p$  a jeho teploty  $T$ .
- vliv rychlosti homogenizace vzduchu a indikačního plynu v měřené zóně.

Příklad analýzy vlivu dílčích nejistot ke stanovení celkové nejistoty odhadu průměrné výměny vzduchu pomocí této metodiky a potřebné vztahy pro její výpočet jsou uvedeny v Příloze 5.

S ohledem na multiplikativní charakter modelu výpočtu veličiny průměrná výměna vzduchu je zde s výhodou použit i následující přístup s využitím známých relativních standardních nejistot vstupních veličin [7].

Pro výpočet rozšířené celkové relativní nejistoty měření odhadu průměrné výměny vzduchu  $U_c/n$  je pak možno psát:

$$\left(\frac{U_c}{n}\right) = k \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial nX_i} x_i\right)^2 \bigg|_{x_i} \left(\frac{u(x_i)}{x_i}\right)^2 + 2 \sum_{j < k} r_{jk} \left(\frac{\partial f}{\partial nX_j}\right) \left(\frac{\partial f}{\partial nX_k}\right) \left(\frac{u(x_j)}{x_j}\right) \left(\frac{u(x_k)}{x_k}\right)} \quad (\text{ii})$$

kde

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial X_i}\right)^2 \bigg|_{x_1 = x_1, x_2 = x_2, \dots, x_N = x_N} \quad \text{jsou citlivostní koeficienty pro příslušné odhady } x_i \text{ relevantních}$$

vstupních veličin (proměnných)  $X_i$ , které vystupují v příslušném modelu výpočtu průměrné výměny vzduchu podle Přílohy 1.

$\left(\frac{u(x_i)}{x_i}\right)$  jsou relativní standardní nejistoty proměnných  $X_i$ , uvedené v tabulce 4, Příloha 5

$n$  je odhad vypočtené průměrné hodnoty výměny vzduchu

$r_{jk}$  je koeficient korelace mezi  $j$ -tou a  $k$ -tou nezávislou proměnnou z  $X_i$ , kde  $i=1,j,k$  a  $j \neq k$

$k$  je již výše zmíněný koeficient rozšíření.

Za předpokladu vzájemné nezávislosti vstupních proměnných  $X_i$  a jejich odhadů  $x_i$ , vystupujících v modelu výpočtu průměrné výměny vzduchu podle Přílohy 1 je pak

ve vztahu (ii)  $r_{jk} = 0$ .

**POZNÁMKA:** Vliv rychlosti homogenizace vzduchu.

Rychlost homogenizace je funkcí konkrétních podmínek měření v zóně a je ovlivněna především:

- chováním uživatele
- charakterem venkovního počasí s ohledem na těsnost měřené zóny
- dobou měření
- umístěním vyvíječů indikačních plynů.

Ovlivňující faktory se snažíme eliminovat především delší dobou měření tj. minimálně 7 dní, která navíc reprezentuje typický režim chování uživatele a doporučeným umístěním vyvíječů. Chování uživatele a charakter počasí během měření je pak zaznamenáváno v Pracovním listě měření a slouží k dalším úvahám a zlepšení kvality měření.

## 9. Řízení kvality

1.1 V rámci tvorby a ověřování navrženého metodického postupu byl proveden rozbor zdrojů, které by mohly nepříznivě ovlivnit kvalitu výsledků, a byla přijata preventivní opatření na jejich eliminaci nebo alespoň na omezení jejich vlivu na přijatelnou míru. V rámci zajištění kvality je námi prováděna vnitřní a vnější kontrola.

### 1.2 Vnější kontrola

- je zajištěna nezávislou komparací našeho přístupu s renomovanou institucí NBL - NY USA. Kontroluje se vzájemná odchylka dosažených výsledků stanovení na souboru minimálně 10 TD detektorů pro jednu zónu a všechny námi používané indikační plyny nebo se vzájemně porovnají výsledky stanovení z budovy s dvěma nebo třemi zónami. Četnost kontrol je doporučena 1x / 4 roky.



### 1.3 Vnitřní kontrola

- je zajištěna opakovanými testy, jak v prostředí jedné zóny radonové komory, kde je velmi přesně nastavitelná a udržovatelná dlouhodobě definovaná výměna vzduchu na různých úrovních, pokrývající potřebný rozsah nebo v terénu s využitím především kontinuálního monitoru výměny vzduchu SÚRO v.v.i., založeném na již zmíněné známé metodě konstantního přísunu indikačních plynů do měřené zóny s možností kontinuálních minutových záznamů měřené objemové koncentrace indikačních plynů N<sub>2</sub>O, SF<sub>6</sub> a CO. Vhodné je i využití možností měření v bytech s jednou či více zónami, kde je přirozeným indikačním plynem <sup>222</sup>Rn ze stavebních materiálů budov a naše možnosti jeho precizního kontinuálního měření s desetiminutovými záznamy. Doporučená četnost kontrol je 1x / rok s minimálním počtem 10ks TD měřidel a pro všechny používané indikační plyny. Zaznamenávají se formou regulačních diagramů střední odběrové rychlosti použitých TD měřidel pro jednotlivé sorbenty a indikační plyny jako funkce počtu použitých termických cyklů, provedených pro vyhodnocení každého TD měřidla.

## 10. Bezpečnost práce

Manipulace s indikačními plyny, vč. jejich skladování, vychází z obecně závazných bezpečnostních opatření uvedených v jednotné Příručce zabezpečení kvality SÚRO, v.v.i. a relevantních Bezpečnostních listů. Průměrné hmotnostní koncentrace jednotlivých indikačních plynů v měřených zónách budov jsou na úrovni maximálně desetin mg/m<sup>3</sup>.

## 11. Seznam související dokumentace

1. Tepelné vlastnosti budov a materiálů - Stanovení výměny vzduchu v budovách : ČSN - EN ISO 12569 , 730311, ÚNMZ Praha, 2013.
2. Doporučení SÚJB, Měření a hodnocení ozáření z přírodních zdrojů ve stavbách s obytnými nebo pobytovými místnostmi, duben 2012.
3. Jílek K., Thomas J., Brabec M.,: QA programme for radon and its-short lived progeny measuring instruments in NRPI Prague. RPD, Vol.130, No.1, Oxford Journals, ISSN 0144-8420, 2008.
4. Dietz, R.N., Goodrich, R.W., Cote, E.A., et al., "Detailed Description and Performance of a Passive Per-Fluorocarbon Tracer System for Building Ventilation and Air Exchange Measurements," *ASTM Special Tech. Publ. No. 904*, p203, American Society of Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1986.

5. Whitney, Donald R. "On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other". Annals of Mathematical Statistics. 18 (1): 50–60, 1947.
6. Measurement Uncertainty – Practical Guide for Secondary Standards Dosimetry Laboratories, IAEA-TECDOC-1585, May 2008.
7. EA- 4/02 M: Vyjadřování nejistot při kalibraci. Překlad ČIA – duben 2013.

## **SEZNAM PŘÍLOH:**

**Příloha 1:** Matematická formulace úloh

**Příloha 2:** Pracovní list

**Příloha 3:** Postup při chromatografickém vyhodnocování TD měřidel

**Příloha 4:** QC použité metodiky v terénu

**Příloha 5:** Nejistoty měření při použití metody.

# PŘÍLOHA 1 Matematická formulace úloh a výpočty

## I. 1 Případ měřené budovy s jednou měřenou zónou ( N=1)

Pro případ měřené budovy s jednou zónou, kterou v našem případě reálně představují především jednotlivé byty v bytových domech, předpokládáme dobře promíchanou směs vzduchu s indikačním plynem, který je do zóny injektován s konstantní a známou celkovou emisí zdroje  $m$ . Vzájemný vztah mezi měřenou koncentrací indikačního plynu  $C(t)$  v čase  $t$  a výměnou vzduchu  $n(t)$  v čase  $t$  popisuje následující bilanční diferenciální rovnice:

$$\frac{dC(t)}{dt} = m - n(t) C(t) \quad (1)$$

S využitím diferenčního přístupu a za předpokladu měřené pouze průměrné hmotnostní koncentrace indikačního plynu  $\langle C \rangle$  během doby měření  $dT = (t_2 - t_1)$ , lze pro průměrnou výměnu vzduchu během doby  $dT$   $\langle n \rangle$  psát:

$$\langle n \rangle = \frac{m}{\langle C \rangle} - \frac{C(t_2) - C(t_1)}{\langle C \rangle (t_2 - t_1)} \quad (2)$$

kde  $t_1, t_2$  označují časově počátek a konec měření.

Za předpokladu doby měření  $dT$ , která splňuje podmínku:

$$dT = (t_2 - t_1) \gg \frac{\langle C \rangle}{m} \quad (3)$$

je pak možno pro průměrnou výměnu vzduchu v zóně během této doby  $\langle n \rangle$  psát:

$$\langle n \rangle = \frac{m}{\langle C \rangle} \quad (4)$$

Průměrnou hmotnostní koncentraci indikačního plynu  $\langle c \rangle$  je možno stanovit na základě chromatografického stanovení odezvy TD detektorů  $R_d$  a jejich známé odběrové rychlosti označené  $U_r$  následujícím způsobem:

$$\langle c \rangle = \frac{R_d}{U_r dT} \frac{M_w}{V_{mol}} \quad (5)$$

a pro molární objem použitého indikačního plynu  $V_m$  lze dále psát:

$$V_{mol} = \frac{R T}{p} \quad (6)$$

kde

$R_d$  je odezva TD detektorů, stanovená chromatograficky jako množství zachyceného indikačního plynu na sorbentu detektoru v [ng]

$U_r$  je odběrová difuzní rychlost objemové koncentrace indikačního plynu, stanovená z kalibrace TD detektoru v [ng/ppm min]

$dT$  je doba měření v [min]

$M_w$  je molekulová hmotnost použitého indikačního plynu v [g/mol]  
 $V_{mol}$  je molární objem indikačního plynu přepočtený na průměrnou hodnotu atmosférického tlaku vzduchu a teploty v měřené zóně za dobu měření v [dm<sup>3</sup>]  
 $R$  je univerzální plynová konstanta 8,315 [J/ K mol]  
 $T$  teplota okolního vzduchu [K]  
 $P$  atmosférický tlak vzduchu [Pa].

Pro výpočet průměrné výměny vzduchu  $\langle n \rangle$  za dobu jejího měření  $dT$ , splňující podmínku (3), lze s uvažováním předchozích vztahů (4-6) psát:

$$\langle n \rangle = \frac{m}{Rd} \frac{Ur}{Vz} \frac{dT}{p} \frac{RT}{Mw} \quad (7)$$

kde:

$m$  je celková a známá a konstantní emise indikačního plynu do měřené zóny o objemu  $V_z$  v (mg/h)

$V_z$  je objem měřené zóny v [m<sup>3</sup>]

Význam ostatních symbolů ve výrazu (7) je stejný jako ve výrazu (6).

## I. 2 Příklad měřené budovy s dvěma zónami $N=2$

Případy budov s dvěma měřícími zónami představují nejčastěji nepodsklepené rodinné domy s půdními vestavbami nebo jen s půdou.

Z bilanční rovnice (1) rozepsané pro dvě měřené zóny budovy lze pro průměrnou hodnotu výměny vzduchu  $\langle n \rangle$  mezi budovou a vnějším okolím psát:

$$\langle n \rangle = \left[ \frac{Re_1 + Re_2}{V_1 + V_2} \right] \quad (8)$$

kde  $Re_1$  a  $Re_2$  jsou celková množství vzduchu, které se vymění s venkovním okolím za jednotku času ze zóny č.1 resp. č.2 ( exfiltrace) v [m<sup>3</sup>/h]

$V_1$  a  $V_2$  jsou postupně objemy zón 1 a 2 v [m<sup>3</sup>]

Pro exfiltrace vzduchu ze zón 1 a 2 je pak možné psát:

$$Re_1 = R_{21} \left[ \frac{C_{22}}{C_{21}} \right] - R_{12} \quad (9)$$

$$Re_2 = R_{12} \left[ \frac{C_{11}}{C_{12}} \right] - R_{21} \quad (10)$$

kde  $C_{ij}$   $i, j= 1,2$  jsou známé průměrné hmotnostní koncentrace  $i$ - tého typu indikačního plynu v  $j$ - té zóně, stanovené podle vztahu (5) za dobu měření  $dT$  v [mg/m<sup>3</sup>]

$R_{ij}$   $i, j = 1, 2$  jsou celková množství vzduchu, která se vymění za dobu měření  $dT$  mezi  $i$ -tou a  $j$ -tou zónou v  $[m^3/h]$ .

Toky vzduchu mezi zónami  $R_{ij}$  je pak možno vyjádřit a vypočítat z měřených koncentrací indikačních plynů  $i$ - tého typu v  $j$ - té zóně  $C_{ij}$  a známých hodnot celkové a konstantní emise indikačního plynu  $i$ -tého typu do příslušné  $j$ -té zóny  $m_{ij}$  následovně:

$$R_{21} = [m_{11} C_{21}] \left[ \frac{1}{(C_{11} C_{22} - C_{12} C_{21})} \right] \quad (11)$$

$$R_{12} = [m_{22} C_{12}] \left[ \frac{1}{(C_{11} C_{22} - C_{12} C_{21})} \right] \quad (12)$$

### I. 3 Příklad měřené budovy s třemi zónami $N=3$

Případy budov s třemi měřícími zónami představují nejčastěji podsklepené rodinné domy s dalšími dvěma obývanými podlažími nebo rodinné domy s obývanými dvěma nadzemními podlažími vč. dalšího suterénu spojeného často z garáží, sklepem a kotelnou.

Z bilanční rovnice (1) rozepsané pro tři měřené zóny budovy lze pro průměrnou hodnotu výměny vzduchu  $\langle n \rangle$  mezi budovou a vnějším okolím psát:

$$\langle n \rangle = \left[ \frac{Re_1 + Re_2 + Re_3}{V_1 + V_2 + V_3} \right] \quad (13)$$

kde  $Re_1, Re_2, Re_3$  jsou postupně celková množství vzduchu, které se vymění s venkovním okolím za jednotku času ze zón č.1, č.2 resp. č.3 ( exfiltrace) v  $[m^3/h]$

$V_1, V_2, V_3$  jsou postupně objemy zón 1,2,3 v  $[m^3]$

Pro exfiltrace vzduchu se zón 1,2, 3 je pak možné psát:

$$Re_1 = R_{31} \left[ \frac{C_{23}}{C_{21}} \right] + R_{21} \left[ \frac{C_{22}}{C_{21}} \right] - R_{13} - R_{12} \quad (14)$$

$$Re_2 = R_{32} \left[ \frac{C_{13}}{C_{12}} \right] + R_{12} \left[ \frac{C_{11}}{C_{12}} \right] - R_{23} - R_{21} \quad (15)$$

$$Re_3 = R_{13} \left[ \frac{C_{11}}{C_{13}} \right] + R_{23} \left[ \frac{C_{12}}{C_{13}} \right] - R_{31} - R_{32} \quad (16)$$

kde  $C_{ij}$   $i, j = 1, 2, 3$  jsou měřené průměrné hmotnostní koncentrace  $i$ - tého typu indikačního plynu v  $j$ - té zóně, stanovené podle vztahu (5) za dobu měření  $dT$  v  $[mg/m^3]$

$R_{ij}$   $i, j = 1, 2, 3$  jsou celková množství vzduchu, která se vymění za dobu měření  $dT$  mezi  $i$ - tou a  $j$ - tou zónou v  $[m^3/h]$

Toky vzduchu mezi zónami  $R_{ij}$  je pak možno vyjádřit a vypočítat z měřených koncentrací indikačních plynů  $C_{ij}$  a známých hodnot celkové a konstantní emise indikačního plynu  $i$ -tého typu do příslušné  $j$ -té zóny  $m_{ij}$  následovně:

$$R_{21} = [ m_{11} (C_{21} C_{33} - C_{23} C_{31}) ] \left[ \frac{1}{(A)} \right] \quad (17)$$

$$R_{31} = [ m_{11} (C_{22} C_{31} - C_{21} C_{32}) ] \left[ \frac{1}{(A)} \right] \quad (18)$$

$$R_{12} = [ m_{22} (C_{12} C_{33} - C_{13} C_{32}) ] \left[ \frac{1}{(A)} \right] \quad (19)$$

$$R_{32} = [ m_{22} (C_{11} C_{32} - C_{12} C_{31}) ] \left[ \frac{1}{(A)} \right] \quad (20)$$

$$R_{13} = [ m_{33} (C_{13} C_{22} - C_{12} C_{23}) ] \left[ \frac{1}{(A)} \right] \quad (21)$$

$$R_{23} = [ m_{33} (C_{11} C_{23} - C_{13} C_{21}) ] \left[ \frac{1}{(A)} \right] \quad (22)$$

kde:  $A = [C_{11}(C_{22}C_{33} - C_{23}C_{32}) + C_{12}(C_{23}C_{31} - C_{21}C_{33}) + C_{13}(C_{21}C_{32} - C_{22}C_{31})]$  .

## PŘÍLOHA 2: Pracovní list č.

**Projekt název:**

**I.D. objektu/majitel/ počet zón:**

.....  
.....  
.....

**START:/ DD:MM:/RRRR/HH:MM Č. prodleva: (min)**

**STOP: / DD:MM:/RRRR/HH:MM TAM: ZPĚT:**

**Popis objektu:**

----- 1 podlaží

----- 2 podlaží

----- 3 suterén

**Poznámky:**

w krb, rozdělené patro, plastová okna,  
novostavba, po rekonstrukci, stávající budova

u uživatele budovy /rodina, děti apod.

v četnost větrání

p počasí během měření, vítr, Tmin/max

**Zóna č. ...., ID. zóny,,,,,,,,, vyvíječe/počet: zdroje:/ typ a počet:.....**

**Průměrná teplota: XX,X (°C)..... Objem zóny: X,X (m<sup>3</sup>) .....**

**TD detektor ID:**

**místnost:**

**umístění:**

-----  
-----  
-----  
-----

**Umístění vyvíječů:**

**místnost:**

**umístění:**

-----  
-----  
-----  
-----

**Zóna č. ...., ID. zóny,,,,,,,,, vyvíječe/počet: zdroje:/ typ a počet:**

.....

**Průměrná teplota: XX,X (°C)..... Objem zóny: X,X (m<sup>3</sup>) .....**

**TD detektor ID:**

**místnost:**

**umístění:**

-----  
-----  
-----  
-----

**Umístění vyvíječů:**

**místnost:**

**umístění:**

-----  
-----  
-----  
-----

**Zóna č. ...., ID. zóny,,,,,,,,, vyvíječe/počet: zdroje:/ typ a počet:**

.....

**Průměrná teplota: XX,X (°C)..... Objem zóny: X,X (m<sup>3</sup>) .....**

**TD detektor ID:**

**místnost:**

**umístění:**

-----  
-----  
-----  
-----

**Umístění vyvíječů:**

**místnost:**

**umístění:**

-----  
-----  
-----  
-----

**Podpis a datum vzorkaře:**

## PŘÍLOHA 3

### **Příklad postupu analýzy vzorků z TD detektorů na základě standardních operačních postupů TD GC-17A-1-1-02 a TD GC-17A-1-2-0, které vychází z ČSN EN ISO 16017-2 pro používaný sorbent Chromosorb 102**

I. Zařízení pro difúzní odběr vzorku se po měřený časový interval vystavilo působení ovzduší. Organické páry migrují trubicí vlivem difúze a jsou zachycovány sorbentem. Zachycené páry analytů v sorpční trubici se desorbují působením tepla a převádějí se proudem inertního nosného plynu do plynového chromatografu vybaveného kapilární kolonou a detektorem elektronového záchytu a plamenově ionizačním detektorem, kterými jsou analyzovány.

II. Kalibrace analytického systému se provádí nástřikem páry do sorpční trubice. Odběry vzorků byly provedeny umístěním trubice se sorbentem Chromosorb102 (300 mg) po definované dobu na odběrové místo s jedním koncem těsně uzavřeným a druhým koncem uzavřeným difúzní čepicí.

III. Sorbent Chromosorb102 byl před jeho použitím stabilizován po dobu 10 hodin při 190 °C a průtoku nosného plynu 100 ml.min<sup>-1</sup>. Následně byl přesypán do označených sorpčních trubic (300 ± 2 mg) a kondicionován 2 hodiny při 220 °C a průtoku nosného plynu 60 ml.min<sup>-1</sup>. Vzorky byly ze sorbetu termicky desorbovány na zařízení ULTRA-UNITY fy. Markes International a obsah analytů v desorbovaném plynu byl stanoven na plynovém chromatografu Shimadzu GC 17A-FID/ECD. Plynový chromatograf je vybaven kapilární kolonou Rxi®-624Sil MS Restek (30 m, ID 0,25 mm, 1,4 µm). Teplotní program metody byl následující: 60 °C (5 min) do 120 °C (0 min) až 220 °C (5 min) s rychlostí ohřevu 5 °C.min<sup>-1</sup> a od 120 °C 20 °C.min<sup>-1</sup>. ECD detektor je vyhříván na 300 °C, FID na 250 °C, flow path 190 °C. RANGE detektorů – EDC 1, FID 0. Průtok dusíku kapilární kolonou byl 0,7 ml.min<sup>-1</sup> (velocity 19 cm.s<sup>-1</sup>) a tlak 59 kPa.

IV. Při zkoušení byla splněna následující kritéria pro schválení:

- Pokud trubice nebyly analyzovány do 8 hodin po odběru, byly uchovány v hermeticky uzavřeném boxu a uzavřené těsnými uzávěry s PTFE těsněním.
- Vzorek při převozu do laboratoře nebyl vystaven vysokým teplotám
- Pro použitý sorbent nebyl překročen doporučený počet termických cyklů.
- Pro zabezpečení čistoty sorbentu před odběrem byla provedena kondicionace sorbentu Chromosorb102, která probíhala za teploty při 200 °C po dobu 15 minut s průtokem nosného plynu 60 ml.min<sup>-1</sup>. Pro analýzu byly použity sorpční trubice, ve kterých obsah artefaktů ze sorbentu je nižší než 1 %.

Účinnost desorpce pak byla ve všech případech vyšší než 98,5 %. Účinnost desorpce se stanoví porovnáním chromatografické odezvy analýzy a rezidua při opakované desorpci trubice.

V. Výsledky

Výsledky měření jsou uváděny s nejistotou měření vyjádřenou jako rozšířená nejistota s koeficientem rozšíření k=2, což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí 95 %. Uváděná nejistota nezahrnuje nejistotu vzorkování a nevztahuje se na výsledky pod mezí stanovitelnosti.

**POZN.** Pro splnění funkčnosti a vhodnosti použité metody byla využita metoda kalibrace s použitím referenčního standardu pro chromatografii TOL MIX-5 v methanolu s kapilárou



CERTAN® (každá složka  $1000 \pm 10 \mu\text{g}\cdot\text{ml}^{-1}$ , ANALYTIKA®, spol. s r.o., č. Osvědčení o jakosti 002538). Definované množství TOL MIX-5 bylo kalibrovanou mikrostříkačkou Hamilton (10  $\mu\text{l}$ , s dělením 0,1  $\mu\text{l}$ ) převedeno do nádoby o objemu  $2379 \pm 1 \text{ ml}$ . Tato plynná směs byla temperována při  $20 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$  a spikována plynotěsnou mikrostříkačkou Hamilton (1000  $\mu\text{l}$ , s dělením 10  $\mu\text{l}$ ) na sorpční trubice se sorbentem Chromosorb102.

## PŘÍLOHA 4

Dosažené výsledky komparativního porovnání průměrné hodnoty výměny vzduchu naším integrálním přístupem pomocí indikačních plynů vs. s využitím konstantního přísunu  $N_2O$  resp.  $^{222}Rn$  s jejich kontinuálním měřením s desetiminutovými záznamy.

**Tabulka dosažených výsledků**

Objekt č.	$n_k$ (h-1)	$n_T$ (h-1)	kampaň	objekt	pobyt	Zdroj I. P.
1	0,07	0,09	30.10. - 17. 11. 2014	bytovka	A	SM
2	0,15	0,11	30.10. -17. 11. 2014	bytovka	A	SM
3	0,16	0,15	30.10. - 17. 11. 2014	bytovka	A	SM
4	0,19	0,16	30.10. - 17. 11. 2014	bytovka	A	SM
5	0,19	0,22	30.10. - 7. 11. 2014	bytovka	A	SM
6	0,24	0,25	30.10. - 7. 11. 2014	bytovka	A	$N_2O$
7	0,28	0,30	30.10. - 7. 11. 2014	bytovka	A	SM
8	0,29	0,30	7.11.- 14.11. 2014	RD	A	SM
9	0,36	0,30	7.11.- 14.11. 2014	RD	A	SM
10	0,37	0,42	7.11.- 31.11.2014	RD	A	SM
11	0,40	0,53	7.11.- 31.11.2014	RD	A	SM
12	0,58	0,58	20.11.-28. 11. 2014	RD	A	SM
13	0,60	0,48	20.11.-28. 11. 2014	RD	A	SM
14	0,60	0,70	20.11.-28. 11. 2014	RD	A	SM
15	0,07	0,07	11.-18. 3. 2015	RD	NE	SM
16	0,07	0,07	5.-11.4.2015	RD	NE	SM
17	0,19	0,20	5.-13.6.2015	RD	NE	SM
18	0,19	0,15	13.-20.6.2015	RD	NE	SM
19	0,29	0,31	31.7.-13.8.2015	RD	NE	SM
20	0,08	0,09	17.9. -3.10.2014	RD	NE	SM
21	0,34	0,34	25.11.-22.12.2014	bytovka	NE	SM
22	0,32	0,36	25.11.-22.12.2014	RD	A	$N_2O$
23	0,35	0,37	25.11.-22.12.2014	RD	A	$N_2O$
24	0,34	0,35	25.11.-22.12.2014	RD	A	$N_2O$
25	0,44	0,44	25.11.-2.12.2014	RD	A	$N_2O$
26	0,67	0,65	25.11.-2.12.2014	RD	A	$N_2O$
27	0,31	0,26	25.11.-2.12.2014	RD	A	$N_2O$

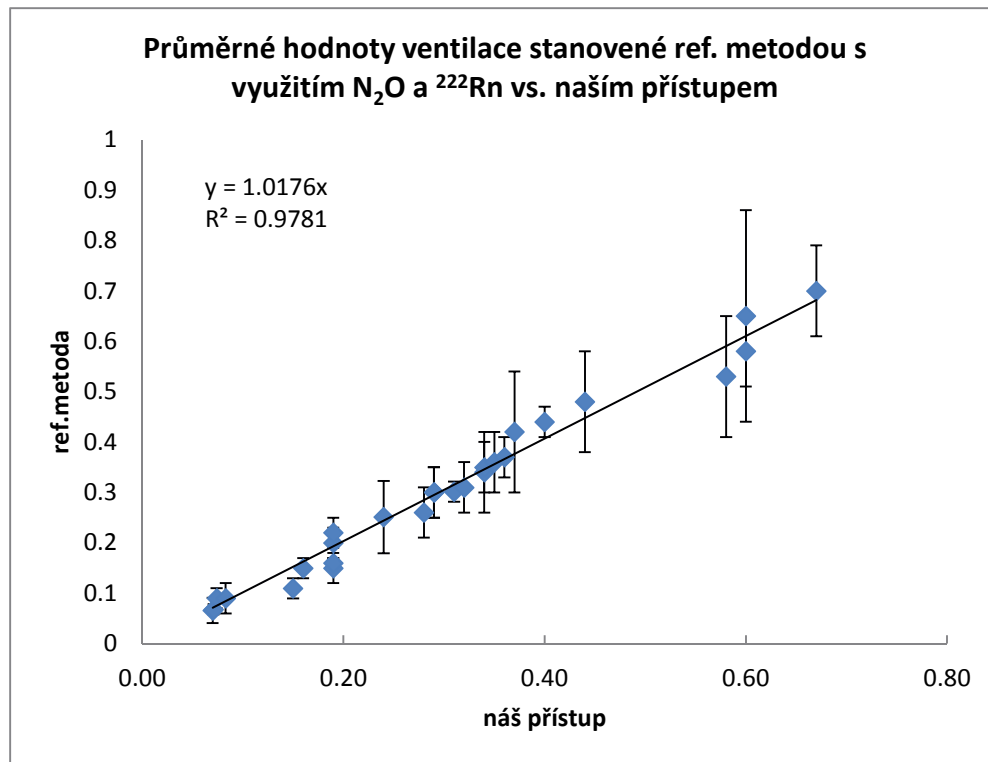
$n_k$  je průměrná výměna vzduchu stanovená komparační metodou s využitím konstantního a známého přísunu  $^{222}Rn$  resp.  $N_2O$ , které byly kontinuálně měřeny s 10 minutovými záznamy

$n_T$  je průměrná výměna vzduchu stanovená integrálním způsobem naším přístupem

SM je stavební materiál jako zdroj radonu s konstantním přísunem

$N_2O$  je injektován se známým a konstantním přísunem z umělého zdroje

I.P. je použitý indikační plyn.



Testovací statistiky Mannova -Whitneyova [5] testu  $U_i$ , resp. pomocné statistiky  $S_i$  pro rozsahy porovnávaných souborů  $s_i$ , kde  $i = 1, 2$ .

$S_1$	735	$U_1$	357	$n_1$	27
$S_2$	750	$U_2$	372	$n_2$	27

**Závěr:**

Protože testované statistiky  $U_i$  jsou větší než kritická hodnota testu pro hladinu významnosti  $\alpha = 0,05$   $U_{krit} = 231$  pro dané stupně volnosti testu, nelze vyloučit statisticky významnou shodu.

## PŘÍLOHA 5

I. Příklad výpočtu relativní rozšířené standardní nejistoty jednoho měření průměrné výměny vzduchu  $U_c/n$  pro případ jedné měřené zóny, kdy  $N=1$ .

$$u^2(n) = \left( \frac{UrT_{\text{exp}}V_{\text{mol}}}{V_z\bar{R}_dM_w} \right)^2 \cdot (u^2(m)) + \left( \frac{-mUrT_{\text{exp}}V_{\text{mol}}}{V_z^2\bar{R}_dM_w} \right)^2 (u^2(V_z)) + \left( \frac{mT_{\text{exp}}V_{\text{mol}}}{V_z\bar{R}_dM_w} \right)^2 (u^2(Ur))^2 +$$

$$+ \left( -\frac{mT_{\text{exp}}UrV_{\text{mol}}}{V_z\bar{R}_d^2M_w} \right)^2 (u^2(\bar{R}_d)) + \left( \frac{mT_{\text{exp}}UrR}{V_z\bar{R}_dM_w p} \right)^2 (u^2(T)) + \left( -\frac{mT_{\text{exp}}V_{\text{mol}}}{p^2V_z\bar{R}_dM_w} \right)^2 (u^2(p))$$

$$\frac{U_c}{n} = k\sqrt{u^2(n)/n^2} \quad (23)$$

kde význam všech symbolů v rovnici je stejný jako ve vztahu (7) v Příloze 1.

Pouze  $\bar{R}_d$  a  $u(\bar{R}_d)$  jsou průměrná hodnota z odezev vždy z použité dvojice TD měřidel v jednom měřicím místě, resp. její relevantní standardní nejistota.

**POZNÁMKA:** Ve výpočtu již byly zohledněny zanedbatelné příspěvky relativních standardních nejistot molekulové váhy použitého indikačního plynu  $M_w$  a plynové konstanty  $R$ . Dále jsme předpokládali, že vstupní veličiny vystupující v použitém modelu (7) v Příloze 1 jsou nekorelované.

II. Příklad výpočtu relativní rozšířené standardní nejistoty jednoho měření průměrné výměny vzduchu  $U_c/n$  pro případ dvou měřených zón, kdy  $N=2$ .

$$u^2(n) = (n)^2 \cdot \left( \frac{u^2(RE)}{(RE)^2} + \frac{u^2(V)}{(V)^2} \right) \quad (24)$$

$$\frac{U_c}{n} = k\sqrt{u^2(n)/n^2} \quad (25)$$

kde:

$$u^2(V) = V_1u^2(V_1) + V_2u^2(V_2) \quad (26)$$

$$u^2(RE) = (\mathbf{DRE})^T (\mathbf{VCR}) (\mathbf{DRE}) \quad (27)$$

$(\mathbf{DRE})$  je vektor a  $(\mathbf{DRE})^T$  je jeho transpozice o složkách:

$$(\mathbf{DRE}) = \left( \frac{\partial RE}{\partial CC_1}, \frac{\partial RE}{\partial CC_2}, \frac{\partial RE}{\partial m_{11}}, \frac{\partial RE}{\partial m_{22}} \right) \quad (28)$$

$(\mathbf{VCR})$  je pak následující matice (4x4):

$$\mathbf{VCR} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & 0 & 0 \\ X_{21} & X_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (m_{11}s)^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (m_{22}s)^2 \end{bmatrix} \quad (29)$$

s prvky:

$$\begin{aligned} X_{11} &= \sum_{i=1}^4 (C_i E)^2 \left( \frac{\partial CC_1}{\partial C_i} \right) \\ X_{22} &= \sum_{i=1}^4 (C_i E)^2 \left( \frac{\partial CC_2}{\partial C_i} \right) \\ X_{12} = X_{21} &= \sum_{i=1}^4 (C_i E)^2 \left( \frac{\partial CC_1}{\partial C_i} \right) \left( \frac{\partial CC_2}{\partial C_i} \right) \end{aligned} \quad (30)$$

kde:

$V = V_1 + V_2$  je celkový objem měřené budovy s dvěma zónami s dílčími a známými objemy  $V_1, V_2$

$m_{11}, m_{22}$  jsou známé celkové emise i-tého indikačního plynu do příslušné j- té zóny  $m_{ij}$  se známým objemem  $i=j, i= 1,2$

$E = u(C)/C$  je známá celková relativní standardní nejistota v měřené koncentraci indikačního plynu  $C_{ij}$ , stanovená s využitím tabulky 4 a vztahu (5) z Přílohy 1

$s = u(m)/m$  je známá celková relativní standardní nejistota v měřené celkové emisi i- tého indikačního plynu do příslušné j- té zóny  $m_{ij}$

RE je celková exfiltrace vzduchu s budovy, stanovená jako součet exfiltrací vzduchu z jednotlivých zón  $Re_1, Re_2$  viz.vztahy (9-10) v Příloze 1.

Celkovou exfiltraci vzduchu z budovy RE můžeme pak vyjádřit pomocí známých celkových emisí indikačních plynů do jednotlivých zón  $m_{ij}$  a měřených hmotnostních koncentraci i- tého indikačního plynu v j-té zóně  $C_{ij}$  následujícím způsobem:

$$RE = Re_1 + Re_2 = m_{11} CC_1 + m_{22} CC_2 \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \text{kde } CC_1 &= (C_{22} - C_{21}) / (C_{11}C_{22} - C_{12}C_{21}) \\ CC_2 &= (C_{11} - C_{12}) / (C_{11}C_{22} - C_{12}C_{21}) \end{aligned} \quad (32)$$

III. Příklad výpočtu relativní rozšířené standardní nejistoty jednoho měření průměrné výměny vzduchu  $U_c/n$  pro případ tří měřených zón, kdy  $N=3$ .

$$u^2(n) = (n)^2 \cdot \left( \frac{u^2(RE)}{(RE)^2} + \frac{u^2(V)}{(V)^2} \right) \quad (33)$$

$$\frac{U_c}{n} = k \sqrt{u^2(n) / n^2} \quad (34)$$

kde:

$$u^2(V) = V_1 u^2(V_1) + V_2 u^2(V_2) + V_3 u^2(V_3) \quad (35)$$

$$u^2(RE) = (\mathbf{DRE})^T (\mathbf{VCR}) (\mathbf{DRE}) \quad (36)$$

**(DRE)** je vektor a **(DRE)<sup>T</sup>** je jeho transpozice o složkách:

$$\mathbf{(DRE)} = \left( \frac{\partial RE}{\partial CC_1}, \frac{\partial RE}{\partial CC_2}, \frac{\partial RE}{\partial CC_3}, \frac{\partial RE}{\partial m_{11}}, \frac{\partial RE}{\partial m_{22}}, \frac{\partial RE}{\partial m_{33}} \right) \quad (37)$$

**(VCR)** je pak následující matice (9 x 9) :

$$\mathbf{VCR} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \\ X_{31} & X_{32} & X_{33} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (m_{11}s)^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (m_{22}s)^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (m_{33}s)^2 \end{bmatrix} \quad (38)$$

s prvky matice:

$$\begin{aligned} X_{11} &= \sum_{i=1}^9 (C_i E)^2 \left( \frac{\partial CC_1}{\partial C_i} \right) \\ X_{22} &= \sum_{i=1}^9 (C_i E)^2 \left( \frac{\partial CC_2}{\partial C_i} \right) \\ X_{33} &= \sum_{i=1}^9 (C_i E)^2 \left( \frac{\partial CC_3}{\partial C_i} \right) \\ X_{12} &= X_{21} = \sum_{i=1}^9 (C_i E)^2 \left( \frac{\partial CC_1}{\partial C_i} \right) \left( \frac{\partial CC_2}{\partial C_i} \right) \\ X_{13} &= X_{31} = \sum_{i=1}^9 (C_i E)^2 \left( \frac{\partial CC_1}{\partial C_i} \right) \left( \frac{\partial CC_3}{\partial C_i} \right) \\ X_{32} &= X_{23} = \sum_{i=1}^9 (C_i E)^2 \left( \frac{\partial CC_2}{\partial C_i} \right) \left( \frac{\partial CC_3}{\partial C_i} \right) \end{aligned} \quad (39)$$

kde:

$V = V_1 + V_2 + V_3$  je celkový objem budovy s třemi měřenými zónami s dílčími objemy  $V_1, V_2, V_3$

$m_{11}, m_{22}, m_{33}$  jsou známé celkové emise i-tého indikačního plynu do příslušné j- té zóny  $m_{ij}$  se známým objemem  $i=j, i= 1,2,3$

$E = u(C)/C$  je známá celková relativní standardní nejistota v měřené koncentraci indikačního plynu C, stanovená s využitím tabulky 4 a vztahu (5) z Přílohy 1

$s = u(m)/m$  je známá celková relativní standardní nejistota v měřené celkové emisi příslušného indikačního plynu do příslušné zóny

RE je celková exfiltrace vzduchu s budovy, stanovená jako součet exfiltrací vzduchu z jednotlivých zón  $Re_1, Re_2, Re_3$  viz.vztahy (14-16) v Příloze 1.

Celkovou exfiltraci vzduchu z budovy RE pak můžeme vyjádřit pomocí známých celkových emisí indikačních plynů i- tého typu, umístěných v j- té zóně  $m_{ij}$ , kde  $i=j$  a měřených hmotnostních koncentrací i- tého indikačního plynu v j-té zóně  $C_{ij}$  následujícím způsobem:

$$RE = Re_1 + Re_2 + Re_3 = m_{11} CC_1 + m_{22} CC_2 + m_{33} CC_3 \quad (40)$$

$$\begin{aligned} \text{kde } CC_1 &= (C_{22} C_{33} - C_{32} C_{23} - C_{21} C_{33} + C_{31} C_{23} - C_{31} C_{22} + C_{21} C_{32}) / \det A \\ CC_2 &= (C_{11} C_{33} - C_{31} C_{13} - C_{12} C_{33} + C_{32} C_{13} - C_{11} C_{32} + C_{31} C_{12}) / \det A \\ CC_3 &= (C_{11} C_{22} - C_{21} C_{12} - C_{22} C_{13} + C_{12} C_{23} - C_{11} C_{23} + C_{21} C_{13}) / \det A \end{aligned} \quad (41)$$

$$a \quad \det A = [C_{11}(C_{22}C_{33} - C_{23}C_{32}) + C_{12}(C_{23}C_{31} - C_{21}C_{33}) + C_{13}(C_{21}C_{32} - C_{22}C_{31})] \quad (42)$$

#### POZNÁMKA.

Tabulka 4 Analýza příspěvků dílčích relativních standardních nejistot k rozšířené relativní nejistotě průměrné výměny vzduchu  $U_{\text{Jn}}$

Veličina $X_i$	zdroj stanovení nejistoty	typ nejistoty	použitý typ rozdělení	dílčí příspěvky k rel. nejistotě v (%)
Kalibrační koeficient referenčního měřidla	- certifikát - opakovaná měření	B A	rovnoměrné	3,1
Rychlost emise vyvíjecího plynu $m$	- vážení plus chyba vah - teplotní závislost	A, B B	rovnoměrné normální	5,2
Odběrová rychlost TD měřidel $U_r$	- vlastní kalibrace	A, B	rovnoměrné	11,8
Objem měřené zóny $V_z$	- dokumentace - měření	B A, B	rovnoměrné normální	10,1
Měření teploty $T$	technický list přístroje	A, B	rovnoměrné	4,8
Měření tlaku vzduch $p$	technický list přístroje	A, B	rovnoměrné	4,1
Opakovatelnost metody	vnitřní kontrola	B	rovnoměrné	5,2
Linearita použitého chromatografu	technický list přístroje	B	rovnoměrné	3,1
Měření odezev $R_d$ - TD měřidel	vnitřní kontrola	A, B	normální	9,3
Plynová konstanta $R$	tabelováno	B	normální	< 0,001
Molekulové váhy $M_w$	tabelováno	B	normální	< 0,001
$U_{\text{Jn}}$ v (%) pro ( $k=1$ )				<b>21,0</b>