

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>11</b>
<b>I</b>	<b>Teoretická část</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>Radonová problematika</b>	<b>13</b>
2.1	Použité kontinuální monitory radonu . . . . .	14
2.1.1	TERA sondy . . . . .	14
2.1.2	CANARY měřáky . . . . .	15
2.2	Průtočné radonové zdroje typu RF 2000 . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Měření intenzity větrání pomocí techniky indikačních plynů</b>	<b>19</b>
3.1	Přístroje a pomůcky . . . . .	19
3.2	Pracovní postup . . . . .	21
3.2.1	Příprava měření . . . . .	21
3.2.2	Přeprava . . . . .	22
3.2.3	Instalace měřidel . . . . .	22
3.2.4	Doba měření . . . . .	23
3.2.5	Sběr . . . . .	23
3.2.6	Vyhodnocení . . . . .	23
3.3	Určení průtoků vzduchu a výměny vzduchu objektu . . . . .	24
3.3.1	Hmotnostní koncentrace a emise indikačních plynů . . . . .	24
3.3.2	Bilanční rovnice . . . . .	25
3.3.3	Řešení bilančních rovnic . . . . .	25
3.3.4	Výměna vzduchu . . . . .	27
<b>4</b>	<b>Určení objemové rychlosti přísunu zdrojů radonu</b>	<b>29</b>
4.1	Určení nejistot přísunů radonu . . . . .	31
4.1.1	Jeden kompartment . . . . .	32
4.1.2	Dva kompartimenty . . . . .	32
4.1.3	$N$ kompartmentů . . . . .	32
4.2	Interpretace přísunů radonu . . . . .	33
4.3	Ověření modelu výpočtu přísunů radonu . . . . .	33

4.4	Implementace . . . . .	34
4.4.1	Rovnovážný stav . . . . .	34
4.4.2	Dynamické měření . . . . .	34
<b>II</b>	<b>Praktická část</b>	<b>36</b>
<b>5</b>	<b>Měření v rovnovážném stavu</b>	<b>37</b>
5.1	Objekt č. 1 . . . . .	38
5.2	Objekt č. 2 . . . . .	39
5.3	Objekt č. 3 . . . . .	40
5.4	Objekt č. 4 . . . . .	41
5.5	Objekt č. 8 . . . . .	42
5.6	Diskuze . . . . .	43
5.7	Závěr . . . . .	44
<b>6</b>	<b>Dynamická měření</b>	<b>45</b>
6.1	TERA sondy . . . . .	46
6.2	Objekt Skála 75, okr. Havlíčkův Brod . . . . .	47
6.2.1	Přísluny radonu . . . . .	48
6.2.2	Zpětné ověření . . . . .	50
6.2.3	Diskuze . . . . .	51
6.2.4	Závěr . . . . .	53
6.3	Objekt Hálková 980, Humpolec . . . . .	54
6.3.1	Přísluny radonu . . . . .	54
6.3.2	Zpětné ověření . . . . .	55
6.3.3	Diskuze . . . . .	56
6.3.4	Závěr . . . . .	57
6.4	Objekt Anglická 574, Dobřichovice . . . . .	57
6.4.1	Přísluny radonu . . . . .	58
6.4.2	Zpětné ověření . . . . .	58
6.4.3	Diskuze . . . . .	59
6.4.4	Závěr . . . . .	60
6.5	Shrnutí . . . . .	60
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>61</b>
7.1	Dotazy . . . . .	61
7.2	TO DO . . . . .	61
<b>Seznam literatury</b>		<b>62</b>
<b>A</b>	<b>Python skript pro symbolické určení nejistot příslunů radonu</b>	<b>64</b>
<b>B</b>	<b>Python skript pro vyhodnocení dynamického měření příslunů radonu</b>	<b>66</b>

<b>C Certifikáty zdrojů</b>	<b>72</b>
<b>D Přílohy k objektu Skála 75, okr. Havlíčkův Brod</b>	<b>75</b>
D.1 Fotografie objektu . . . . .	75
D.2 Použitá měřidla . . . . .	75
D.3 Naměřené OAR, objemy a teploty . . . . .	76
D.3.1 Průměrné hodnoty OAR . . . . .	77
D.4 Objemové průtoky vzduchu . . . . .	78
D.5 Přísuny radonu - grafy a statistiky . . . . .	81
<b>E Přílohy k objektu Hálková 980, Humpolec</b>	<b>89</b>
E.1 Použitá měřidla . . . . .	89
E.2 Naměřené OAR, objemy a teploty . . . . .	89
E.3 Objemové průtoky vzduchu . . . . .	91
<b>F Přílohy k objektu Anglická 574, Dobřichovice</b>	<b>93</b>
F.1 Fotografie objektu . . . . .	93
F.2 Použitá měřidla . . . . .	93
F.3 Naměřené OAR, objemy a teploty . . . . .	94
F.4 Objemové průtoky vzduchu . . . . .	95
F.5 Přísuny radonu - grafy a statistiky . . . . .	96

Tab. 1: Značení a jednotky používaných veličin.

$N$	počet kompartmentů/zón uvnitř zkoumaného objektu	[ - ]
$N_p$	počet použitých indikačních plynů	[ - ]
$R_{ki}$	odezva TD detektorů na $k$ -tý indikační plyn v $i$ -té zóně	[ng]
$U_k$	odběrová rychlosť TD detektorů $k$ -tého indikačního plynu	$\left[ \frac{\text{ng}}{\text{ppm} \cdot \text{min}} \right]$
$M_k$	molekulová hmotnosť $k$ -tého indikačního plynu	[g/mol]
$T_i$	průměrná teplota v $i$ -té zóně v průběhu měření	[K] nebo [°C]
$p_i$	průměrný atmosférický tlak v $i$ -té zóně v průběhu měření	[Pa]
$V_i^{mol}$	molární objem indikačních plynů při průměrné teplotě a tlaku v $i$ -té zóně	[dm <sup>3</sup> /mol]
$dt$	doba měření ventilace objektu	[hod]
$m_{ki}$	emise $k$ -tého indikačního plynu v $i$ -té zóně	[mg/hod]
$C_{ki}$	hmotnostní koncentrace $k$ -tého indikačního plynu v $i$ -té zóně	[mg/m <sup>3</sup> ]
$V_i$	objem $i$ -té zóny	[m <sup>3</sup> ]
$k_{ij}$	objemový průtok vzduchu z $i$ -té zóny do $j$ -té zóny	[m <sup>3</sup> /hod]
$k_{i,N+1}$	exfiltrace $i$ -té zóny, ozn. $k_{i,E}$ ; index $N + 1$ značí vnější prostředí	[m <sup>3</sup> /hod]
$k_{N+1,i}$	infiltrace $i$ -té zóny, ozn. $k_{i,I}$ ; index $N + 1$ značí vnější prostředí	[m <sup>3</sup> /hod]
$n$	výměna vzduchu celého objektu	[1/hod]
$a_i$	OAR v $i$ -té zóně	[Bq/m <sup>3</sup> ]
$\dot{a}_i$	časová derivace $a_i$	$\left[ \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}} \right]$
$\lambda$	přeměnová konstanta radonu	[1/hod]
$Q_i$	přísun radonu do $i$ -té zóny	$\left[ \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}} \right]$
$W$	radonová výdejnost radonového zdroje typu RF 2000	[Bq/hod]
$Q_{zdroj}$	definovaný přísun radonu od zdroje typu RF 2000	$\left[ \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}} \right]$

# 1. Úvod

Tato práce pojednává o problematice zaměřené na určování zdrojů radonu v budovách. Vybral jsem si tuto problematiku, protože je blízká mému profesnímu zaměření a protože mi přijde různorodá. Při jejím zpracovávání bylo potřeba provádět měření, matematicky odvozovat, programovat a vyhodnocovat naměřená data. Navíc jsou mnou uvedené postupy využitelné při reálných měřeních, která se na SÚRO (Státní ústav radiační ochrany) provádějí rutinně, a proto má práce i skutečné uplatnění.

Radon v budovách představuje vážné zdravotní riziko. V současné době existuje řada způsobů a doporučení měření a ochrany proti radonu, avšak někdy se může stát, že i přes veškerá opatření radon do budovy stále proniká. V tomto případě je důležité najít místo, kudy radon dovnitř proudí, což bývá často komplikované. Jednou z nejčastěji používaných metod za tímto účelem je tzv. Blower door test [1]. Nevhodou tohoto testu je jeho finanční náročnost, jeho provádění není snadné a je potřeba ho dělat za zvláštních podmínek. Metoda uvedená v této práci naopak nevyžaduje od obyvatel v podstatě žádné přizpůsobování, není tak nákladná a poskytuje další informace, které lze využít dalším způsobem. Při této metodě se budova rozdělí na několik kompartmentů (nebo také zón), v nichž předpokládáme homogenní koncentraci radonu, a poté v těchto kompartmentech provedeme simultánně měření intenzity větrání pomocí techniky indikačních plynů a měření koncentrace radonu. Z naměřených veličin můžeme určit tzv. objemové rychlosti přísunů zdrojů radonu, které kvantifikují množství radonu dostávajících se do kompartmentů. Díky tomu můžeme zúžit naše hledání zdrojů radonu v budově, což jsou převážně právě místa, kterými do se radon do budovy dostává.

Naneštěstí měření intenzity větrání pomocí techniky indikačních plynů je značně náchylná na dělání chyb. Člověk, který ho provádí, musí být s touto technikou dobré seznámen a měl by mít dobře naučené potřebné postupy. Dalším kamenem úrazu je věrohodnost naměřených koncentrací radonu, jelikož některé používané kontinuální monitory radonu neposkytují vždy spolehlivá data.

Cílem práce bylo vytvořit výpočetní model objemových rychlostí přísunů radonu do kompartmentů, na které je zkoumaná budova rozdělena, a následně tento model ověřit na naměřených datech. V dalších kapitolách se místo výrazu budova používá obecnější pojem objekt, můžeme totiž zkoumat i jednotlivé části budovy, např. byty.

# Část I

## Teoretická část

## 2. Radonová problematika

Radon je bezbarvý, nereaktivní plyn, je bez chuti a zápachu [2]. Vzniká přeměnou z radia. Nejvýznamnějším radionuklidem je  $^{222}\text{Rn}$  z uranové řady vznikající z  $^{226}\text{Ra}$  s poločasem přeměny 3,82 dne. Mluví-li se o radonu jako radionuklidu, pak je méněn právě  $^{222}\text{Rn}$ . V této práci dále uvažujeme pouze tento radionuklid. Radon způsobuje přibližně 50 % celkového ozáření obyvatelstva [3].

V tab. 2.1 jsou uvedeny krátkodobé dceřinné produkty radonu s jejich poločasy přeměny a způsobem přeměny. Pomocí nich se radon může měřit a právě ony mají hlavní podíl na ozařování obyvatelstva.

Tab. 2.1: Krátkodobé dceřinné produkty radonu, jejich poločasy přeměny a způsob dominantní přeměny [3].

RN	$T_{1/2}$	přeměna
$^{218}\text{Po}$	3,05 min	$\alpha$
$^{214}\text{Pb}$	26,8 min	$\beta$
$^{214}\text{Bi}$	19,7 min	$\beta$
$^{214}\text{Po}$	164 $\mu\text{s}$	$\alpha$

Radon vzniká v geologickém podloží, ze kterého se dostává do obytných budov. Pokud se v budovách dostatečně nevětrá, nebo pokud je přísun radonu z podloží do budovy neobvykle vysoký, pak může OAR (objemová aktivita radonu, nazývaná též koncentrace radonu vyjádřená v  $\text{Bq}/\text{m}^3$ ) uvnitř budovy dosahovat velikých hodnot, což může z dlouhodobého hlediska ohrožovat zdraví obyvatel. Pro rozhodnutí, co je a není příliš vysoká hodnota OAR, vyhláška o radiační ochraně [4] stanovuje referenční hodnotu  $300 \text{ Bq}/\text{m}^3$ . Při jejím překročení by měl vlastník budovy v rámci optimalizace radiační ochrany přikročit k úpravě užívání budovy (více větrat) nebo k provedení ozdravných opatření (odčerpávání radonu z půdního vzduchu). Informace o působení radonu na lidské zdraví lze dohledat např. na stránkách SÚRO [3].

Z předchozího textu plyne, že je potřeba koncentraci radonu v budovách dostatečně přesně měřit. Detektory radonu rozdělujeme na integrální a kontinuální. Integrální poskytují jednu průměrnou hodnotu OAR za celou dobu měření, ale nepotřebují napájení. Naopak kontinuální detektory měří průběh OAR v čase a potřebují napájení.

Mezi nejvíce používané integrální detektory radonu pro měření v budovách se řadí stopové detektory a elektretové ionizační komory. Stopové detektory se užívají pro dlouhodobější měření (zpravidla roční), elektretové se využívají při kratších měření (týdenní, dvoutýdenní). V rámci této práce jsem ani s jedním z těchto typů detektorů nepracoval, a proto o nich zde neuvádím podrobnější informace (ty lze opět dohledat v [3]). V kapitole 5 jsem však využíval OAR naměřené elektretovými detektory.

V případě kontinuálních detektorů se používá termín kontinuální monitory radonu, protože tak nedochází ke zmatení názvosloví. Kontinuální monitory radonu se totiž dělí nejenom podle typu použitého detektoru (polovodičový, ionizační komora), ale i podle nasávání vzduchu, způsobu vyhodnocování naměřených dat, atd. V následujícím odstavci jsou uvedeny parametry dvou kontinuálních monitorů, které jsem při měření používal.

V odstavci 2.2 jsou uvedené základní informace o průtočném radonovém zdroji, který jsem používal při měřeních.

## 2.1 Použité kontinuální monitory radonu

### 2.1.1 TERA sondy

Jedná se o monitory s polovodičovým detektorem. Nasávání vzduchu je prováděno difúzně. Mají dva režimy měření:

RaA rychlejší, ale méně přesný způsob. OAR se počítá pouze z naměřených impulzů od alfa částic vznikajících při přeměně příslušející  $^{218}\text{Po}$ .

RaA+RaC pomalejší, ale přesnější způsob. OAR se počítá z impulzů od alfa částic vznikajících při přeměnách  $^{218}\text{Po}$  i  $^{214}\text{Po}$ .

Sondy neustále měří a zpracovávají výsledky v čtyř minutových intervalech, z kterých každou hodinu počítají koncentraci radonu (pomocí klouzavého průměru). Tyto hodinové hodnoty lze po skončení měření vycíst. Některé verze sond mají displej, na němž je vidět tato hodinová hodnota (aktuální v daném čase) a také dlouhodobá koncentrace radonu (24 hodinový klouzavý průměr). [5]

Parametry uváděné výrobcem tohoto kontinuálního monitoru radonu jsou v tab. 2.3, v obr. 2.1a je TERA sonda zobrazena. Tyto monitory byly využity jako primární měřidlo OAR při mých měřeních. Při všech měřeních byl používán režim RaA+RaC.

O TERA sondách je z praxe známo, že jsou značně nepřesné a OAR naměřené několika sondami se mohou lišit až třeba o 40 %. Proto bylo potřeba před samotným měřením udělat se sondami srovnávací měření s nejakým osvědčeným monitorem radonu, např. AlphaGuardem [6], aby se mohly zavádějící hodnoty OAR opravit. Toto srovnávací měření je rozebráno v podkapitolce 6.1.

## Určení nejistot naměřených OAR

Jak již bylo řečeno, TERA sondy zapisují průměrnou hodnotu OAR každou hodinu. Spolu s OAR jsou zapisovány i naměřené počty impulzů v jednotlivých diskriminačních oknech, která mají TERA sondy nastaveny pro rozlišení impulzů: do druhého diskriminačního okna spadají impulzy od  $^{218}\text{Po}$  (6 MeV), do třetího od  $^{214}\text{Po}$  (7,69 MeV), do prvního a čtvrtého impulzy od ostatních energií, jenž nás nezajímají. Díky tomu je možné vypočítat nejistotu naměřeného počtu impulzů náležejících  $^{218}\text{Po}$  a  $^{214}\text{Po}$ . Označme tento počet impulzů jako  $n$ . Počet zaznamenaných impulsů se řídí Poissonovým rozdělením, a proto pro směrodatnou odchylku  $n$  máme:

$$\sigma_n = \sqrt{n}. \quad (2.1)$$

Dle tab. 2.3 je průměrná citlivost měření  $0,25 \text{ (imp/hod)}/(\text{Bq}/\text{m}^3)$ , ale při zkoušení vypočítání citlivosti z naměřených dat (jako podíl  $n$  a OAR) mi pro každou zaznamenanou hodnotu vycházela citlivost jinak. To znamená, že kalibrace sond je nějaká funkce OAR. Proto je přesnější vypočítat si citlivost pro každou hodnotu z naměřených dat místo používání tabelované hodnoty.

Při určování nejistoty OAR vycházíme ze znalosti  $n$  pro danou OAR:

$$\sigma_{OAR} = \frac{\sigma_n}{c} = \frac{\sqrt{n} \cdot OAR}{n} = \frac{OAR}{\sqrt{n}}, \quad (2.2)$$

kde  $c$  je označení citlivosti.

Pro úplnost zde ještě uvadíme definici citlivosti  $c$ :

$$n = c \cdot OAR \quad (2.3)$$

### 2.1.2 CANARY měřáky

Také se jedná o monitory s polovodičovým detektorem zapisující hodnotu OAR každou druhou hodinu. Tato hodnota je průměrem ze dvou hodin měření, přičemž čas zápisu do paměti monitoru je uprostřed tohoto měření. Využívají taktéž pasivního difúzní nasávání vzduchu. Jsou to kompaktní malá zařízení k rychlému určení OAR v zkoumaném objektu.

Parametry uváděné výrobcem jsou v tab. 2.2. V obr. 2.1b je CANARY měřák k nahlédnutí. CANARY měřáky byly použity jako záložní měřidlo OAR.



Obr. 2.1: V (a) je TERA sonda (verze s displejem), v (b) CANARY měřák.

Tab. 2.2: Technické parametry CANARY měřáků, novým názvem Corentium Home Airthings [7].

Baterka	3 AAA alkalínové baterie (LR03) dvouroční životnost baterie
Rozměry	120 × 69 × 25,5 mm <sup>3</sup>
Hmotnost	130 g
Měří při	teplota: +4°C to +40°C relativní vlhkost: < 85 %
Měřící rozsah	nejnižší detekční limit: 0 Bq/m <sup>3</sup> horní limit displeje: 9999 Bq/m <sup>3</sup>
<b>Přesnost při 200 Bq/m<sup>3</sup>:</b>	
7 dní	10 %
2 měsíce	5 %

Tab. 2.3: Technické parametry TSR3D a TSR3 sond (neboli TERA sond) [5].

Průměrná citlivost měření	0,25 (imp/hod)/(Bq/m <sup>3</sup> ) (metoda RaA+RaC; 15°C – 30°C; rel. vlh. 20 % – 40 %)
Rozsah měření	MDA až $1 \times 10^6$ Bq/m <sup>3</sup> ; MDA = 100 Bq/m <sup>3</sup> při 1 hodině měření nebo 20 Bq/m <sup>3</sup> při 24 hodinovém měření < 13% při 300 Bq/m <sup>3</sup> a 1 hodině měření; < 3% při 300 Bq/m <sup>3</sup> a 24 hodinovém měření
Nejistota měření	
Objem měřící komory	0,176 dm <sup>3</sup>
Rychlosť odezvy	< 30 minut (RaA); < 3 hodiny (RaA + RaC)
Měřící algoritmus	rychlý, méně přesný (počítáno z RaA) pomalý, více přesný (počítáno z RaA+ RaC)
Měření relativní vlhkosti	10 – 90 %
Měření teploty	od -20° do +60°C
Možnost použití opakovače pro zvětšení dosahu	ano
Interval čtení výsledků měření ze sondy	240 – 65535 s (4 min – 18,2 hod)
Interval uložení výsledků v sondě	1 – 255 min, defaultně každou 1 hodinu
Kapacita paměti výsledků v sondě (při auto- nomním měření)	150 dní
Napájení sondy	Vnitřní nabíjecí akumulátor; nabíjení přes USB
Předpokládaná doba provozu po nabití	> 1 rok
Indikace aktuální koncentrace radonu	krátkodobá (klouzavý průměr za 1 ho- dinu); dlouhodobá (klouzavý průměr za 24 ho- din)
Rozměry	ø 80 × 175 mm

## 2.2 Průtočné radonové zdroje typu RF 2000

Jedná se o kalibrované zdroje s deklarovanou aktivitou  $^{226}\text{Ra}$  a radonovou výdejností. Radonová výdejnost je množství radonu, které se ze zdroje za pomoci čerpadla dostane ven za jednotku času, a udává se v jednotkách v Bq/s. Vzhled zdroje je k nahlédnutí v obr. 2.2. Při měřeních jsem využíval dva zdroje tohoto typu, viz kapitola 6.



Obr. 2.2: Průtočný zdroj typu RF 2000 s připojeným čerpadlem.

# 3. Měření intenzity větrání pomocí techniky indikačních plynů

Hlavním zdrojem této kapitoly je [8].

Technika indikačních plynů dovoluje určit objemové průtoky vzduchu mezi specifikovanými kompartmenty zkoumaného objektu, jakož i průtoky vzduchu ze všech zón do vnějšího prostředí (exfiltrace) a průtoky z vnějšího prostředí do všech zón (infiltrace). Z exfiltrací a objemů všech zón lze určit výměnu vzduchu objektu. Jedná se o pasivní techniku, a tudíž poskytuje pouze průměrné hodnoty za celou dobu měření. Proměřování objektu pomocí této techniky pro zjednodušení nazýváme měření ventilace objektu.

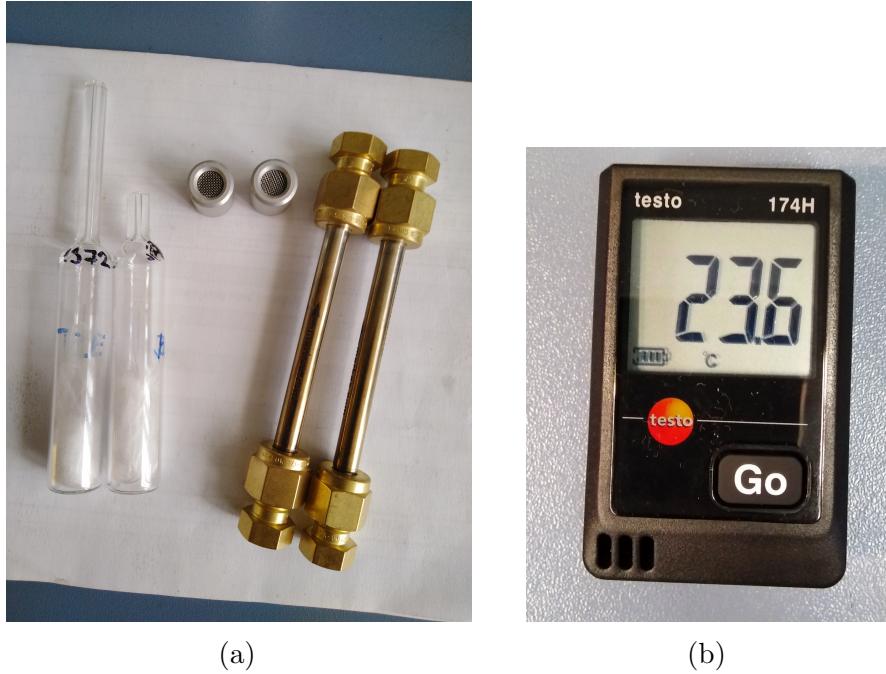
Technika byla vyvinuta v SÚRO a její správnost byla ověřena s obdobnými technikami používanými v zahraničí. Vše o ní je popsáno v certifikované metodice ([8]), podle níž se postupovalo i při měření provedených v rámci této práce. Principem techniky je detekce vhodně použitých indikačních plynů, jejichž zdroje jsou rozmištěny po objektu a které mají definovaný konstantní přísun do zón. Ze známosti těchto přísunů do jednotlivých zón, z odezv detektorů a z dalších faktů je možné určit hledané veličiny, tj. objemové průtoky vzduchu a výměnu vzduchu objektu.

Při měření se používají tzv. vyvíječe, ze kterých se odpařují indikační plyny, dále TD detektory, na které se indikační plyny sorbují. Pomocnými zařízeními jsou především kontinuální měřidla teploty testo 174H a laserové dálkoměry pro určení objemů kompartmentů. Při vyhodnocování se používá plynový chromatograf s termální desorpcí. Vše je podrobněji popsáno v dalším oddíle.

## 3.1 Přístroje a pomůcky

Dva vyvíječe a dva TD detektory jsou k vidění v obr. 3.1a.

**Vyvíječ** je kapilára vhodné tloušťky, plynově neprodyšná, většinou ze skla, obsahující kapalnou fázi příslušného indikačního plynu s difúzní membránou, která řídí definované a konstantní odpařování (emise indikačního plynu). Emise je dále ovlivněna tloušťkou kapiláry a z vnějších faktorů by ji měla teoreticky ovlivňovat pouze okolní teplota. Při zjišťování, kolik plynu se odparilo, se používají laboratorní váhy SARTORIUS. Teplota okolního prostředí při měření je zjištěna pomocí digitálního teploměru testo 174H (obr. 3.1b).



Obr. 3.1: V (a) jsou zobrazeny vyvíječe (skleněné trubičky) a TD detektory (kovové zlatě zbarvené trubice). Mezi vyvíječe a TD detektory jsou difúzní uzávěry. V (b) je digitální měřič teploty testo 174H.

**TD detektor** je zařízení sloužící k záchytu indikačních plynů a tím k měření jejich koncentrace ve vzduchu. Je plněn vhodným sorbentem vzhledem k použitým indikačním plynům. V SÚRO se používají sorbenty Chromosorb 102, TENAX-TA 35/60 a TENAX-TA 80/100 [8]. Jejich výrobcem je firma MARKES [9]. Jedná se o kovovou trubici opatřenou kovovými uzávěry, které by neměly propustit žádný s indikačních plynů dovnitř k sorbentu. Pro měření se jeden závěr (z konstrukce trubice je zřejmé který) odšroubuje a nahradí se difúzním uzávěrem (viz obr. 3.1a). Po skončení měření je difúzní uzávěr vyměněn opět za kovový.

**Plynový chromatograf s termální desorpcí** slouží k určení množství indikačních plynů, které se zachytily v sorbentu v TD detektoru. Z TD detektoru jsou odstraněny oba dva kovové uzávěry a pak je umístěn na příslušné místo do chromatografu. Poté je promýván nosným plynem, kterým je hélium, na který se pomocí termální desorpce zachytávají indikační plyny nasorbované uvnitř TD detektoru. Nosný plyn s indikačními plyny je veden do separačních kapilárních kolon, kde dochází k oddělování jednotlivých indikačních plynů od sebe. Následně jsou již oddělené indikační plyny kvantitativně analyzovány v detektoru typu ECD nebo FID. Plynový chromatograf, který byl použit pro naše měření, je na obr. 3.2.

**Testo 174H** je digitální teploměr. Teplota je potřeba znát k přesnému určení emise vyvíječe a také pro výpočet hmotnostní koncentrace indikačního plynu z odezvy TD detektoru.

**Laserový dálkoměr** pro určení objemů jednotlivých kompartmentů/zón.

**Další pomůcky:** přesné laboratorní dávkovače kapalné fáze indikačních plynů do vyvíječů s rozlišením  $5\mu\text{l}$ ; přesné váhy SARTORIUS s přesností na desetinu miligramu pro měření a kontrolu emise indikačního plynu z vyvíječů; pinzety, nosný plyn do chromatografu a další spotřební materiál.



Obr. 3.2: Plynový chromatograf Shimadzu GC 17A-FID/ECD s termální desorpčí, pomocí níž se indikační plyny desorbují z TD detektoru na nosný plyn (hélium). Úplně napravo je v popředí na stole vidět držák sloužící ke kalibraci chromatografu, za držákem v pozadí jsou vidět tlakové láhve s nosným plynem. V přístroji uprostřed obrázku jsou umístěny kapilární kolony, ve kterých probíhá separace jednotlivých indikačních plynů, a v přístroji úplně napravo dochází k jejich kvantitativnímu zpracování (pomocí detektoru ECD nebo FID). Více informací viz [8].

## 3.2 Pracovní postup

### 3.2.1 Příprava měření

Zkoumaný objekt s více patry rozdělujeme na zóny většinou podle podlaží. Pokud se jedná o jednopodlažní objekt, pak vzhledem k zaměření tohoto výzkumného úkolu objekt rozdělíme tak, aby v každé zóně byla pokud možno homogenní koncentrace radonu. Platí, že máme-li  $N$  kompartmentů, pak potřebujeme minimálně  $N$  indikačních plynů (tracerů).

Před měřením je potřeba připravit všechny potřebné vyvíječe, TD detektory, laserový dálkoměr a teploměry testa. To obnáší nastavit emisi vyvíječů tak, aby nedošlo k nasorbování většího množství indikačních plynů na TD detektory než jejich měřící rozsah. Při tom je zapotřebí vzít do úvahu velikost zón, větrací návyky obyvatel objektu a vnější teplotu v průběhu měření. Pokud dojde k nasorbování nějakého indikačního plynu přes měřící rozsah u některého z TD detektorů, pak je tento TD detektor sice stále možné vyhodnotit, ale s obrovskou nepřesností, která navíc nelze ani určit.

U TD detektorů by mělo být překontrolováno dotažení kovových uzávěrů.

### 3.2.2 Přeprava

Uvažujeme přepravu autem. Při přepravě by neměly být vyvíječe a TD detektory umístěny u sebe, i když se uvádí, že skrz kovový uzávěr se do TD detektoru nemůže indikační plyn dostat. Ideální je, když jsou TD detektory umístěny na přední palubce u řidiče a vyvíječe v kufru. Pak totiž proudění vzduchu v autě zabraňuje indikačním plynům odpařujícím se z vyvíječů dostat se k TD detektorům. Pro jistotu by mely být TD detektory být zabaleny do igelitového pytlíku. Pro zaručení přesnosti jsou navíc používány dva tzv. trip blank TD detektory, což jsou TD detektory, které cestují s ostatními TD detektory, ale neosazují se do objektu a jsou nich neustále kovové uzávěry. Na obr. 3.3 jsou vidět vyvíječe připravené k přepravě.



Obr. 3.3: Vyvíječe připravené k přepravě.

### 3.2.3 Instalace měřidel

V každé zóně musí být umístěny pouze vyvíječe jednoho typu indikačních plynů, pokud je  $N_p = N$ . Pokud máme více typů indikačních plynů než je zón, pak mohou být v jedné zóně vyvíječe více typů indikačních plynů, ale vždy musí být v každé zóně zdroj alespoň jednoho typu indikačního plynu, jehož vyvíječe už nejsou v žádné z ostatních zón.

Vyvíječe se umisťují mimo přímé zdroje tepla a chladu. Ideální je umístění 1 až 2 metry od okolních stěn a 0,5 až 1,5 metrů nad zem. Výstup z kapiláry by měl být orientován do středu místnosti. Lze je tedy umisťovat na nábytek, stoly, avšak umístění na parapety oken není vhodné kvůli zvýšenému proudění vzduchu. Nesmíme zapomenout zapsat si časy, kdy byly jednotlivé vyvíječe umístěny.

TD detektory se umisťují vždy alespoň po dvojicích v jednom měřícím místě, přičemž v každé zóně je právě jedno měřící místo. Vzdálenost mezi TD detektory a vyvíječemi by měla minimálně 2 metry a navíc by musí být umístěny na protilehlých stranách místnosti. Dále by měly TD detektory být umístěny ve stejné výšce jako vyvíječe, difúzní uzávěr musí být orientován směrem ke stěně a minimální vzdálenost od stěn by měla být 2 cm. Stejně jako u vyvíječů není doporučeno umisťovat TD detektory na přímé zdroje tepla a chladu a navíc ani do chodeb.

Spolu s vyvíječi by měly být umístěny teploměry testa 174H.

Nesmíme zapomenout zapsat si časy, kdy byly jednotlivá měřidla umístěna.

Více pravidel osazování měřící techniky lze dohledat opět v [8].

### 3.2.4 Doba měření

V rámci metodiky [8] jsou uvažována sedmidenní screeningová nebo měsíční integrální měření. Je požadováno stanovení přesnosti doby měření minimálně na jednu hodinu.

### 3.2.5 Sběr

Při sběru měřidel si opět zapíšeme časy, kdy byly jednotlivá měřidla sundána ze svých měřících poloh, ideálně s přesností na jednotky minut. Difúzní uzávěry TD detektorů jsou nahrazeny cestovními kovovými. Pravidla přepravy jsou při sběru stejná jako při osazování. Je nutné zaznamenat do formuláře časovou prodlevu mezi sběrem měřidel a jejich předáním k vyhodnocení.

### 3.2.6 Vyhodnocení

Vyhodnocení TD detektorů se provádí pomocí plynového chromatografu, jehož funkce je popsána výše. Množství odpařeného plynu z vyvíječe se zjišťuje pomocí vážení hmotnosti vyvíječe před a po měření s přesností na desetinu miligramu. Při tom je potřeba vzít do úvahu průběh teploty v zóně, ve které byl vyvíječ umístěn, a také je nutné provést opravu na množství plynu odpařeného v průběhu přepravy.

Vyhodnocování TD detektorů a odparů z vyvíječů je prováděno odbornými pracovníky z oddělení radiochemie SÚRO.

### 3.3 Určení průtoků vzduchu a výměny vzduchu objektu

Uvažujme nějaký obecný objekt rozdelený na  $N$  zón, do něhož byly umístěny vyvíječe  $N_p$  indikačních plynů, přičemž musí platit  $N_p \geq N$ .

#### 3.3.1 Hmotnostní koncentrace a emise indikačních plynů

Z využití naměřených dat známe  $R_{ki}$ , což je průměr odezv TD detektorů umístěných v  $i$ -té zóně na  $k$ -tý indikační plyn, průměrnou teplotu  $T_i$  a tlak  $p_i$  v  $i$ -té zóně a množství odparu  $k$ -tého indikačního plynu z vyvíječů umístěných  $i$ -té zóně. Z tohoto odparu lze určit emisi  $k$ -tého indikačního plynu v  $i$ -té zóně:

$$m_{ki} = \frac{\text{odpar}_{ki}}{dt}, \quad (3.1)$$

kde  $dt$  je doba měření ventilace (tj. průtoků a výměny vzduchu) objektu. Z pravidel osazování vyvíječů do kompartmentů plyně  $m_{ki} = 0$  pro  $k \neq i$  (viz oddíl 3.2.3).

Dále musíme znát molekulové hmotnosti použitých indikačních plynů a odběrové rychlosti TD detektorů všech indikačních plynů.

Přehledněji a korektněji jsou tyto veličiny uvedeny v tab. 1, kde jsou uvedeny i jejich jednotky, se kterými se počítá v dalším postupu, pokud není uvedeno jinak.

Následující vztahy jsou přebrány z [8]. Z  $R_{ki}$ ,  $dt$ ,  $T_i$ ,  $p_i$  a konstant pro daný indikační plyn  $M_k$ ,  $U_k$  můžeme vypočítat hmotnostní koncentraci  $k$ -tého indikačního plynu v  $i$ -té zóně:

$$C_{ki} = \frac{R_{ki}}{U_k \cdot dt} \frac{M_k}{V_i^{mol}} = \frac{R_{ki}}{U_k \cdot dt} \frac{M_k \cdot p_i}{R \cdot T_i}, \quad (3.2)$$

kde bylo využito relace

$$V_i^{mol} = \frac{R \cdot T_i}{p_i}. \quad (3.3)$$

V tab. 3.1 jsou uvedeny molekulové hmotnosti a odběrové rychlosti všech indikačních plynů použitých v rámci tohoto výzkumného úkolu. Jedná se o plyny na bázi fluorovaných uhlovodíků (označení plynů: MCH, PCH, TMH, MDC) a chlorovaných uhlovodíků (označení: TCE, PCE).

Tab. 3.1: Molekulové hmotnosti  $M$  indikačních plynů a jejich odběrové rychlosti do TD detektorů  $U$ . [8]

ozn.	$M$ [g/mol]	$U$ $\left[ \frac{\text{ng}}{\text{ppm} \cdot \text{min}} \right]$
TMH	450,0	8,000
TCE	130,4	1,000
MCH	350,0	8,000
MDC	400,0	8,000
PCH	450,0	8,000
PCE	165,8	1,385

### 3.3.2 Bilanční rovnice

V rovnovážném stavu se hmotnostní koncentrace indikačních plynů v zónách chovají podle následující soustavy rovnic [10]:

$$\sum_{j=1, j \neq i}^N C_{kj} k_{ji} - \sum_{j=1, j \neq i}^{N+1} C_{ki} k_{ij} = -m_{ki}, \quad (3.4)$$

pro  $i \in \{1, 2, \dots, N\}$  a  $k \in \{1, 2, \dots, N_p\}$ , což nám dává  $N \times N_p$  rovnic. Jedná se o bilanční rovnice vyjadřující v podstatě zákon zachování hmotnosti každého z indikačních plynů. V těchto rovnicích vystupují průtoky vzduchu mezi jednotlivými zónami a exfiltrace jednotlivých zón, což jsou veličiny, které chceme určit. Index  $N + 1$  značí vnější prostředí.

Infiltrace zón lze dopočítat z  $N$  průtokových bilančních rovnic (4.3). Průtokové bilanční rovnice vyjadřují skutečnost, že objem vzduchu jdoucí do dané zóny musí být roven objemu vzduchu vycházejí z této zóny pryč.

### 3.3.3 Řešení bilančních rovnic

Pokud máme  $N = N_p$ , což je nejčastější případ, pak lze soustavu rovnic (3.4) řešit analyticky. Uvedeme řešení pro  $N = 1, 2$ :

- $N = 1$

$$k_E = \frac{m}{C}. \quad (3.5)$$

- $N = 2$

$$k_{21} = \frac{m_{11}C_{21}}{C_{11}C_{22} - C_{12}C_{21}}, \quad (3.6)$$

$$k_{12} = \frac{m_{22}C_{12}}{C_{11}C_{22} - C_{12}C_{21}}, \quad (3.7)$$

$$k_{1_E} = k_{21} \frac{C_{22}}{C_{21}} - k_{12}, \quad (3.8)$$

$$k_{2_E} = k_{12} \frac{C_{11}}{C_{12}} - k_{21}. \quad (3.9)$$

Pro vyšší  $N$  nabývá řešení rychle na složitosti. Pro zjednodušení vytvořen skript napsaný v Pythonu využívající symbolického programování pro vyřešení soustavy pro obecné  $N$ . Naneštěstí je velmi časově náročný, pro  $N = 3$  trvá výpočet přibližně 18 vteřin a pro  $N = 4$  jsem výpočet přerušil, protože po přibližně dni počítání stále nebyl dokončen.

K propagaci nejistot od vstupních veličin k průtokům vzduchu jsem využil pythonovský balíček uncertainties [11].

## Lineární regrese

Obecnější řešení nabízí lineární regrese, kterou lze použít i pro přeurovenou soustavu rovnic, kterou dostáváme při  $N_p > N$ . Aby jí šlo využít, tak je potřeba přepsat soustavu (3.4) do tvaru

$$X\beta = y, \quad (3.10)$$

kde  $\beta$  je vektor parametrů k určení o  $N^2$  složkách,  $X$  je matice o rozměrech  $(N \cdot N_p) \times N^2$  a  $y$  je vektor o  $N \cdot N_p$  složkách:

$$\beta = \begin{pmatrix} k_{12} \\ k_{13} \\ \vdots \\ k_{1,N+1} \\ k_{21} \\ k_{23} \\ \vdots \\ k_{2,N+1} \\ \vdots \\ k_{N,N-1} \\ k_{N,N+1} \end{pmatrix}, \quad y = - \begin{pmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ \vdots \\ m_{1,N+1} \\ m_{21} \\ m_{22} \\ \vdots \\ m_{2,N+1} \\ \vdots \\ m_{N,N} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -m_{11} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ -m_{22} \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ -m_{N,N} \end{pmatrix}. \quad (3.11)$$

Nulovost  $m_{ki}$  pro  $k \neq i$  plyne z pravidel pro osazování vyvíječů do zón. Matice  $X$  je určena následovně: pokud je  $m$ -tá složka vektoru  $\beta$  průtok  $k_{ij}$ , pak

$$X_{N_p \cdot k - N_p + i, m} = -C_{ki}, \quad (3.12)$$

$$X_{N_p \cdot k - N_p + j, m} = C_{ki}. \quad (3.13)$$

Pokud řádkový index ( $N_p \cdot k - N_p + i$ , resp.  $N_p \cdot k - N_p + j$ ) přesáhne řádkový rozměr matice  $X$ , pak je ignorován a žádná hodnota se nikam nepřiřazuje. Pro vysvětlení uvažujme  $k = 1$ . Pak výše uvedené vztahy říkají, že prvek matice  $X$  v  $i$ -té řádku a  $m$ -ém sloupci je roven  $-C_{1i}$  a prvek v  $j$ -té řádku a  $m$ -ém sloupci  $C_{1i}$ . Výraz  $N_p \cdot k - N_p$  je potřeba pro dopočet ostatních prvků matice, které jsou odvozeny od koncentrací ostatních indikačních plynů. Při odvozování matice  $X$  jsem postupoval podle článku [12].

Nevýhodou této metody je, že nedokáže určit nejistoty vypočtených průtoků vzduchu při  $N = N_p$ . Při  $N_p > N$  jsou nejistoty určeny, avšak většinou bývají řádově větší než určené nominální hodnoty průtoků vzduchu. To je dáno přeurozeností soustavy a nepřesnostem ve vyhodnocování odezv TD detektorů a odparů z vývýječů.

Tento postup výpočtu jsem také implementoval v Pythonu a pro  $N = N_p$  vychází analytické a regresní řešení stejně, výhodou analytického řešení je určení nejistot řešení.

Skripty analytického ani regresního řešení nejsou v této práci uvedeny, jelikož využívají podobných principů jako skripty určené pro výpočet přísunů radonu do zón (viz další kapitola).

### Řešení pro $N = N_p \geq 4$

Jak již bylo řečeno, pro čtyři a více zón trvá výpočet pomocí skriptu řešící soustavu (3.4) analyticky moc dlouho. Pokud při použijeme normální nástroje lineární regrese, pak dostaneme průtoky mezi zónami bez nejistot. Východiskem z této situace je využití metody nejmenších čtverců [13], pomocí níž můžeme parametry  $\beta$  z rovnice (3.10) určit ze vztahu

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y, \quad (3.14)$$

za podmínky, že matice  $(X^T X)$  je invertibilní. Tento jednoduchý výpočet umožňuje propagaci nejistot pomocí balíčku uncertainties [11], díky čemuž jsou určeny průtoky i s nejistotami.

Tento způsob výpočtu byl srovnán s analytickým způsobem výpočtu pro  $N = N_p = 3$ . V obou případech vyšly stejné hodnoty a jejich nejistoty se rovnaly řádem. Nejistoty určené analytickým způsobem vycházejí zpravidla o trochu větší.

#### 3.3.4 Výměna vzduchu

Pokud známe exfiltrace a objemy všech zón, pak můžeme vypočítat výměnu vzduchu objektu:

$$n = \frac{\sum_{i=1}^N k_{iE}}{\sum_{i=1}^N V_i}. \quad (3.15)$$

Udává se v 1/hod a vyjadřuje podíl objemu vzduchu, který za jednu hodinu unikne z objektu do vnějšího prostředí, a celkového objemu vzduchu uvnitř objektu (tj. vlastně součtu objemů všech zón).

Výměnu vzduchu lze definovat i pro jednotlivé zóny. Uvažujme  $i$ -tou zónu:

$$n_i = \frac{k_{iE}}{V_i}. \quad (3.16)$$

Vyjadřuje to samé jako  $n$ , avšak pouze pro  $i$ -tou zónu, ne pro celý objekt.

# Část II

## Praktická část

## 6. Dynamická měření

Dynamická měření přísnů radonu jsem provedl u tří objektů, viz tab. 6.1.

Tab. 6.1: Objekty, v nichž jsem provedl dynamická měření.  $dt$  značí dobu měření ve dnech (zaokrouhleno na celé dny včetně počátečního a posledního dne). V posledním sloupci je počet zón, na které byl daný objekt rozdělen.

Objekt	Rozsah měření	$dt$ [dny]	Typ objektu	$N$
Skála 75, okr. Havlíčkův Brod	23. 5. – 5. 6. 2019	14	chata	3
Hálková 980, Humpolec	5. 6. – 20. 6. 2019	15	byt	4
Anglická 574, Dobřichovice	9. 7. – 30. 7. 2019	22	rodinný dům	3

Vývoj OAR v čase v jednotlivých zónách byl měřen primárně TERA sondami [5] a sekundárně měřiči radonu CANARY [7]. CANARY měráky byly použity jako záložní systém, tj. pokud by v některé zóně TERA sonda selhala, pak by se OAR v této zóně brala z příslušného CANARY měřáku. Pokud bylo v jedné zóně použito více kontinuálních monitorů radonu, pak se z jejich dat udělal průměrný časový vývoj OAR v této zóně a s tím bylo dále počítáno.

Dále bylo potřeba měřit vývoj teploty, což je znalost nutná při vyhodnocování množství nasorbovaných indikačních plynů v TD detektorech a k určení hmotnostních koncentrací indikačních plynů v zónách. K tomuto účelu byly použity datalogger teploty a vlhkosti testo 174H [14]. V případě objektu Hálková 980 byly k určení hmotnostních koncentrací použity teploty naměřené TERA sondami, jelikož v tomto objektu byl osazen pouze jeden datalogger testo 174H (jedná se jednopodlažní byt).

Pro určení hmotnostních koncentrací indikačních plynů je dále nutno změřit průměrné atmosférické tlaky ve všech zónách. Jejich hodnoty však stačí znát pouze přibližně, protože moc neovlivňují výpočet koncentrací. Proto byly všechny potřebné atmosférické tlaky při vyhodnocování všech objektů brány rovny 100 kPa.

Objemy všech objektů byly změřeny laserovým dálkoměrem BOSCH GLM 120 C [15].

Do objektů byly při měřeních umístěny vždy jeden nebo dva zdroje radonu typu RF 2000 (viz podkapitola 2.2). U těchto zdrojů nás pro naše měření zajímají pouze radonové výdejnosti  $W$ , které představují definované absolutní přísnury radonu do zón, ve kterých jsou zdroje umístěny. Absolutními přísnury radonu je myšleno množství aktivity radonu, jenž se do zón dostane za hodinu, a tedy jejich jednotkou je Bq/hod. Radonové výdejnosti

použitých zdrojů jsou uvedeny v tab. 6.2. Podělením  $W$  objemem příslušné zóny můžeme dopočítat přísun radonu pocházející od daného zdroje do této zóny.

Tab. 6.2: ID a radonové výdejnosti  $W$  použitých radonových zdrojů typu RF 2000. Jako ID byla použita část výrobního čísla daného zdroje. Přebráno z certifikátů zdrojů, viz příloha C.

ID	$W$ [Bq/hod]
38	15588
37	14436

Před samotnými měřeními přísunů radonu v objektech bylo nejprve nutno provést srovnávací měření TERA sond, jelikož každá sonda má různou odezvu při stejném OAR. O tom pojednává podkapitola 6.1. Další podkapitoly obsahují dynamická měření přísunů radonu v uvedených objektech. Je potřeba dávat pozor na to, zdali je značení OAR a přísunů radonu bráno podle podlaží či podle zón. Pokud se jedná o objekt, který nelze rozdělit na zóny podle podlaží, pak je značení bráno podle zón, v opačném případě je používáno značení podle podlaží.

## 6.1 TERA sondy

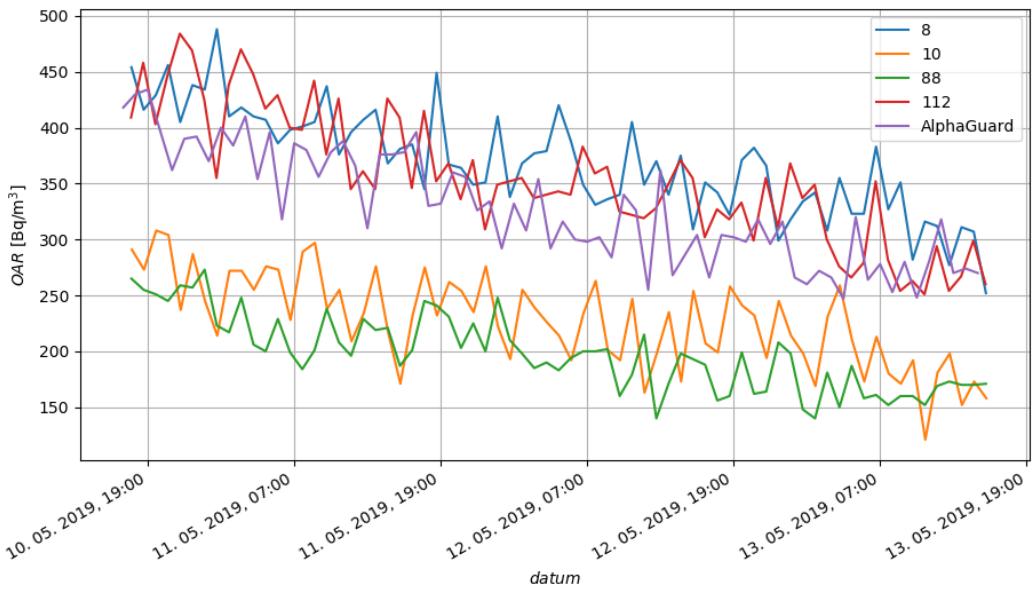
Pro dynamická měření přísunů radonu mi byly poskytnuty čtyři TERA sondy s označením 8, 10, 88 a 112. Pro srovnání jejich odezv s reálnou hodnotou OAR byly vloženy do sudu (nádoba válcovitého tvaru) spolu s referenčním monitorem radonu AlphaGuard (ozn. AG) [6]. Hodnota OAR z AG byla brána jako reálná hodnota OAR. V obr. 6.1 jsou zobrazeny naměřené vývoje OAR v čase ze zkoumaných sond a z AG, v tab. 6.3 jsou k vidění nejdůležitější statistiky naměřených dat z každého monitoru.

Tab. 6.3: Statistiky vývojů OAR naměřených TERA sondami a AG v Bq/m<sup>3</sup>.

ID sondy	count	mean	min	25%	50%	75%	max
8	71	369	252	337	368	405	488
10	71	228	121	198	232	256	308
88	71	198	140	170	198	220	273
112	71	354	251	318	349	399	484
AG	71	328	247	285	318	373	434

Pro opravu odezv byla zavedena pro každou sondu kalibrační konstanta  $B$ , která je definována následovně:

$$B = \frac{OAR_A}{OAR_T}, \quad (6.1)$$



Obr. 6.1: Vývoj OAR naměřený zkoumanými sondami a AG.

kde  $OAR_A$  je průměrná OAR z hodnot naměřených AG a  $OAR_T$  je průměrná OAR z hodnot naměřených příslušnou TERA sondou. Pro získání věrohodné hodnoty koncentrace radonu z naměřené hodnoty danou sondou pak stačí tuto naměřenou hodnotu přenásobit  $B$  náležející této sondě.

Relativní nejistoty kalibračních konstant byly odhadnuty na 10 %. Určené kalibrační konstanty všech sond jsou k nahlédnutí v tab. 6.4.

Tab. 6.4: Kalibrační konstanty TERA sond odvozené od referenčního AG. Skutečná hodnota  $OAR$  se vypočte ze vztahu  $OAR = B \cdot OAR_T$ , kde  $OAR_T$  je naměřená obj. aktivita radonu danou TERA sondou. Nejistota kalibračních konstant byla odhadnuta na 10 %.

ID sondy	$B$
8	$0,889 \pm 0,089$
10	$1,440 \pm 0,140$
88	$1,655 \pm 0,166$
112	$0,925 \pm 0,093$

## 6.2 Objekt Skála 75, okr. Havlíčkův Brod

Jedná se o chatu se sklepem, přízemím (které zahrnuje verandu) a prvním patrem. Rozdělení na kompartmenty bylo provedeno podle těchto podlaží. Do každého podlaží/zóny byly

umístěny vyvíječe dvou typů indikačních plynů. Ve sklepě byly čtyři vyvíječe plynů TMH a TCE, v přízemí šest vyvíječů plynů MDC a MCH a v prvním patře čtyři vyvíječe plynů PCH a PCE. Dále byly umístěny TD detektory: dva do sklepa, šest do přízemí a čtyři do prvního patra. Do sklepa a prvního patra byly umístěny jeden CANARY měřák a jedna TERA sonda, v přízemí byly oba dva typy monitorů dvakrát. Nakonec byly dány do sklepa a přízemí průtočné zdroje radonu typu RF 2000 (do sklepa zdroj s označením 38, do přízemí s označením 37) a byly změřeny objemy.

To, že jsme umístili do každé ze zón zdroje dvou různých indikačních plynů, umožnilo vyhodnocení měření ventilace vícero způsoby. Při vyhodnocování bylo totiž počítáno pouze s  $N = N_p = 3$ , přičemž byly uvažovány plyny, jejichž zdroje byly v různých zónách (viz pravidla o osazování měřidel, podkapitola 3.2.3). To nám dává osm kombinací trojic použitých plynů a tedy osm různých způsobů vyhodnocení měření ventilaci a následně přísunů radonu.

V příloze D lze dohledat vyhodnocené veličiny z měření ventilace a OAR. Je tam také uveden výpočet nejistot průměrných hodnot OAR z dat naměřených TERA sondami (podle informací uvedených v podkapitole 2.1.1).

V následujícím oddíle jsou uvedeny přesně definované přísuny radonu od zdrojů RF 2000 a dále průměrné přísuny radonu vypočítané z naměřených průtoků vzduchu mezi zónami a z OAR naměřených TERA sondami, resp. CANARY měřáky pro všechny kombinace indikačních plynů. V případě TERA sond proběhlo i dynamické vyhodnocení pro určení vývojů  $Q_i(t)$ , které lze vidět v příloze D.5, v následujícím oddílu jsou pouze uvedeny zprůměrované hodnoty  $Q_i(t)$ .

V posledním oddílu této kapitoly je zobrazeno zpětné ověření OAR (pro všechny kombinace tracerů) a  $k_{ij}$  (pro kombinaci (TMH, MCH, PCE)) ve smyslu podkapitoly 4.3, navíc jsou tam uvedeny i průměrné OAR naměřené CANARY měřáky a  $k_{ij}$  z vyhodnocení měření ventilace objektu při použití kombinace tracerů (TMH, MCH, PCE). Zpětné ověření  $k_{ij}$  bylo provedeno pouze pro tuto kombinaci tracerů.

### 6.2.1 Přísuny radonu

Tab. 6.5: Přesně definované přísuny radonu ze zdrojů v  $\text{Bq}/(\text{m}^3 \cdot \text{hod})$ . Ve druhém sloupci je uvedeno, který zdroj byl umístěn v daném podlaží.

podlaží	zdroj	$Q_{zdroj}$
0	38	$400 \pm 51$
1	37	$114 \pm 13$
2	NE	$0 \pm 0$

## Vyhodnocení dynamického měření

Tab. 6.6: Průměrné přísluny radonu v  $\text{Bq}/(\text{m}^3 \cdot \text{hod})$  souhrnně pro všechny kombinace indikačních plynů určené zprůměrováním časových vývojů  $Q_i(t)$  vypočítaných z dynamického vyhodnocení OAR naměřených TERA sondami. Závislosti  $Q_i(t)$  lze vidět v příloze D.

použité tracery	$Q_0$	$Q_1$	$Q_2$
(TMH, MDC, PCE)	$337 \pm 84$	$237 \pm 40$	$19 \pm 5$
(TMH, MDC, PCH)	$325 \pm 82$	$232 \pm 40$	$64 \pm 18$
(TMH, MCH, PCE)	$349 \pm 84$	$198 \pm 34$	$21 \pm 5$
(TMH, MCH, PCH)	$336 \pm 81$	$193 \pm 34$	$71 \pm 18$
(TCE, MDC, PCE)	$113 \pm 26$	$250 \pm 40$	$19 \pm 4$
(TCE, MDC, PCH)	$109 \pm 26$	$245 \pm 39$	$64 \pm 17$
(TCE, MCH, PCE)	$117 \pm 24$	$209 \pm 34$	$21 \pm 4$
(TCE, MCH, PCH)	$113 \pm 25$	$204 \pm 33$	$71 \pm 17$

## Vyhodnocení v rovnovážném stavu

Tab. 6.7: Přísluny radonu určené z průměrných hodnot vývojů OAR naměřených TERA sondami. Jednotkou příslunů radonu je  $\text{Bq}/(\text{m}^3 \cdot \text{hod})$ .

použité tracery	$Q_0$	$Q_1$	$Q_2$
(TMH, MDC, PCE)	$335 \pm 90$	$236 \pm 42$	$18 \pm 6$
(TMH, MDC, PCH)	$323 \pm 88$	$231 \pm 42$	$63 \pm 24$
(TMH, MCH, PCE)	$347 \pm 89$	$197 \pm 36$	$19 \pm 6$
(TMH, MCH, PCH)	$334 \pm 87$	$192 \pm 35$	$70 \pm 24$
(TCE, MDC, PCE)	$111 \pm 28$	$249 \pm 41$	$17 \pm 6$
(TCE, MDC, PCH)	$108 \pm 28$	$243 \pm 41$	$62 \pm 23$
(TCE, MCH, PCE)	$115 \pm 26$	$208 \pm 35$	$19 \pm 6$
(TCE, MCH, PCH)	$111 \pm 27$	$203 \pm 35$	$70 \pm 23$

Tab. 6.8: Přísuny radonu určené z průměrných hodnot vývojů OAR naměřených CANARY měřáky. Jednotkou přísunů radonu je  $\text{Bq}/(\text{m}^3 \cdot \text{hod})$ .

použité tracery	$Q_0$	$Q_1$	$Q_2$
(TMH, MDC, PCE)	$294 \pm 78$	$137 \pm 28$	$8 \pm 4$
(TMH, MDC, PCH)	$289 \pm 77$	$135 \pm 28$	$27 \pm 14$
(TMH, MCH, PCE)	$301 \pm 78$	$115 \pm 24$	$9 \pm 3$
(TMH, MCH, PCH)	$295 \pm 76$	$113 \pm 24$	$31 \pm 14$
(TCE, MDC, PCE)	$98 \pm 24$	$149 \pm 27$	$8 \pm 3$
(TCE, MDC, PCH)	$96 \pm 25$	$146 \pm 27$	$26 \pm 13$
(TCE, MCH, PCE)	$100 \pm 23$	$124 \pm 23$	$9 \pm 3$
(TCE, MCH, PCH)	$98 \pm 24$	$122 \pm 23$	$31 \pm 13$

## 6.2.2 Zpětné ověření

### OAR

Tab. 6.9: Průměrné OAR ve všech podlažích vypočítané pomocí rovnice (4.7) za použití průtoků vzduchu z tab. D.6 a přísunů radonu pocházejících od zdrojů RF 2000 (tab. 6.5) a průměrné OAR naměřené CANARY měřáky.

použité tracery	$a_1$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	$a_2$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	$a_3$ [Bq/m <sup>3</sup> ]
(TMH, MDC, PCE)	$496 \pm 121$	$410 \pm 72$	$103 \pm 25$
(TMH, MDC, PCH)	$496 \pm 119$	$410 \pm 72$	$107 \pm 26$
(TMH, MCH, PCE)	$495 \pm 120$	$467 \pm 83$	$102 \pm 25$
(TMH, MCH, PCH)	$495 \pm 118$	$467 \pm 82$	$107 \pm 26$
(TCE, MDC, PCE)	$1417 \pm 333$	$518 \pm 85$	$209 \pm 50$
(TCE, MDC, PCH)	$1416 \pm 338$	$518 \pm 86$	$219 \pm 50$
(TCE, MCH, PCE)	$1415 \pm 319$	$574 \pm 96$	$209 \pm 49$
(TCE, MCH, PCH)	$1415 \pm 324$	$574 \pm 96$	$218 \pm 49$
naměřené	$381 \pm 38$	$442 \pm 32$	$156 \pm 16$

## Objemové průtoky vzduchu

Tab. 6.10: V prvních řádcích těchto tabulek označených *zpětně* jsou průtoky vzduchu z dané zóny do ostatních zón a infiltrace této zóny vypočítané z rovnice (4.7) za využití znalosti ostatních průtoků vzduchu pro kombinaci indikačních plynů (TMH, MCH, PCE), viz tab. D.6, příslunů radonu pocházejících od zdrojů RF 2000 (tab. 6.5) a průměrných OAR naměřených CANARY měřáky. V druhých řádcích tabulek označených *měření* jsou pro srovnání uvedené příslušné průtoky vzduchu z tab. D.6. V (a) je zájmovou zónou první zóna, v (b) druhá zóna a v (c) třetí zóna.

	(a)			
	$k_{12}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{13}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{1_E}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{1_I}$ [m <sup>3</sup> /hod]
zpětně	$10,42 \pm 6,18$	$2,54 \pm 0,61$	$31,37 \pm 6,64$	$39,31 \pm 7,19$
měření	$10,19 \pm 2,61$	$0,91 \pm 0,26$	$23,24 \pm 5,44$	$31,18 \pm 6,09$
	(b)			
	$k_{21}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{23}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{2_E}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{2_I}$ [m <sup>3</sup> /hod]
zpětně	$-5,39 \pm 6,01$	$2,43 \pm 0,54$	$43,72 \pm 6,04$	$37,00 \pm 6,63$
měření	$3,22 \pm 0,78$	$1,02 \pm 0,16$	$36,71 \pm 4,24$	$29,99 \pm 5,04$
	(c)			
	$k_{31}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{32}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{3_E}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{3_I}$ [m <sup>3</sup> /hod]
zpětně	$-24,45 \pm 17,34$	$1,34 \pm 16,37$	$27,71 \pm 20,50$	$26,49 \pm 20,50$
měření	$-0,06 \pm 0,02$	$0,77 \pm 0,12$	$7,85 \pm 0,85$	$6,63 \pm 0,91$

### 6.2.3 Diskuze

V diskuzi nejprve srovnáme průměrné přísluny radonu z dynamického a rovnovážného vyhodnocení (tab. 6.6, tab. 6.7 a příloha D.5). Bude následovat srovnání příslunů radonu vypočítaných při použití různých kombinací indikačních plynů při vyhodnocování objemových průtoků vzduchu (všechny tabulky uvádějící vypočítané přísluny radonu a příloha D.5), dále srovnání příslunů určených z OAR naměřených TERA sondami a CANARY měřáky (tab. 6.7 a tab. 6.8) a nakonec srovnání vypočítaných příslunů radonu s  $Q_{zdroj}$  (tab. 6.5).

Také budeme diskutovat zpětné ověření OAR a objemových průtoků vzduchu z  $Q_{zdroj}$  (tabulky 6.9 a 6.10).

#### Srovnání dynamického a rovnovážného vyhodnocení

Z uvedených tabulek je zřejmé, že zprůměrováním vývojů  $Q_i(t)$  jsme dostali v podstatě stejné hodnoty jako při rovnovážném vyhodnocení, což bylo očekáváno. Neshodování se hodnot by ukazovalo na nějakou chybu v kódu některého z vyhodnocovacích skriptů.

Výhodou dynamického vyhodnocení je, že nám dává závislosti přísnů radonu na čase,  $Q_i(t)$ . Můžeme tedy určit přísn radonu do jakékoliv zóny v jakýkoliv čas, který spadá do doby našeho měření ventilace a OAR. Problémem je, že jedinými veličinami, jejichž vývoj byl v čase změren, jsou OAR v zónách. Pro objemové průtoky vzduchu mezi zónami máme stále pouze průměrné hodnoty, což znepřesňuje  $Q_i(t)$  do takové míry, že je nelze rozumně použít. V příloze D.5 jsou  $Q_i(t)$  uvedeny graficky i tabelovaně. Pro tento objekt se může zdát, že  $Q_i(t)$  vycházejí celkem pěkně, avšak vzhledem k řečenému nemůžeme říct, jestli jsou to relevantní výsledky, či zdali se jedná o matoucí hodnoty. První by platilo, pokud by se  $k_{ij}$  v průběhu času moc neměnily. To ale není moc pravděpodobné, protože průtoky vzduchu mezi zónami jsou značně ovlivněny venkovní teplotou, a proto zcela určitě  $k_{ij}$  nabývá jiných hodnot např. ve sluneční den a v noci. Další faktory ovlivňující hodnoty  $k_{ij}$  by bylo potřeba prozkoumat.

### Srovnání různých kombinací indikačních plynů

Zde jsou rozdíly mezi jednotlivými přísnymi radonu obrovské. Jsou způsobeny rozdílnými vyhodnocenými  $k_{ij}$  pro různé kombinace použitých indikačních plynů (tab. D.6). Z uvedených hodnot přísnů radonu je zřetelné, že záměna jednoho plynu v některé ze zón vede hlavně ke změně přísnu radonu do této zóny, přísnu radonu do ostatních zón se změní vzhledem k jejich nejistotě víceméně zanedbatelně. Výjimku tvoří záměna plynů TMH a TCE v první zóně, které velmi změní přísn radonu do první zóny a trochu i do druhé zóny. U ostatních zón nevede záměna jejich zdrojového plynu k tak markantní změně přísnu radonu do nich jako v případě první zóny.

Názorné zobrazení rozdílů při použití různých kombinací tracerů je možné vidět v grafech přílohy D.5, ve kterých jsou zobrazeny závislosti  $Q_i(t)$  z dynamického vyhodnocení.

Rozdíly mezi  $k_{ij}$  určenými různými kombinacemi tracerů mohou být způsobeny rozdílným chováním použitých indikačních plynů při homogenizaci a proudění v objektu, dále chyboum odečtením odparů některých vyvíječů, špatným vyhodnocením TD detektorů atp.

Díky znalosti  $Q_{zdroj}$  a také díky v podstatě nulových přirozených přísnů radonu do objektu můžeme určit, která kombinace tracerů vede k nejlepším výsledkům. Jedná se o kombinaci (TMH, MCH, PCH). Plyny jsou v závorce uvedeny postupně pro první, druhou a třetí zónu. Při zpětném ověřování průtoků vzduchu z  $Q_{zdroj}$  se proto uvažovala tato kombinace tracerů.

### Srovnání použití OAR z TERA sond a z CANARY měřáků

Průměrné přísn radonu vypočítané z OAR naměřené CANARY měřáky jsou menší než průměrné přísn radonu vypočítané při použití OAR z TERA sond. Je to dáné tím, že průměrné OAR určené z dat naměřených CANARY měřáky jsou značně nižší než průměrné OAR určené z dat naměřených TERA sondami. Vzhledem ke známé nespolehlivosti a nepřesnosti TERA sond (viz určování kalibračních konstant v podkapitole 6.1) jsou považovány výpočty z dat naměřených CANARY měřáky za přesnější. CANARY měřáky jsou navíc odzkoušeny mnoha lety měření a projevily se jako spolehlivé monitory radonu. Je

zajímavé, že i vývoje OAR se v případě CANARY měřáků a TERA sond liší, viz. obr. D.2 a obr. D.3. Například u CANARY měřáků dosahuje OAR ve sklepě od 3. června do konce měření nejvyšších hodnot ze všech zón (až cca  $1400 \text{ Bq/m}^3$ ), zatímco v případě TERA sond je v tomto období nejvyšší koncentrace v přízemní kuchyni (až cca  $1750 \text{ Bq/m}^3$ ). Jak již vyplývá z nutnosti zavádět kalibrační konstanty, problémem zde je rozdílná odezva jednotlivých TERA sond na stejnou hodnotu OAR. Dále lze z obrázků vypozorovat, že CANARY měřák v prvním patře zaznamenával většinu času nulovou hodnotu OAR, zatímco příslušná TERA sonda nulovou hodnotu v podstatě nikdy neměřila a navíc má zašumější data. Pokud budeme datum z CANARY měřáku věřit, pak to značí, že TERA sondy mají nenulou odezvu na nulovou OAR.

V důsledku uvedených faktů se při zpětném ověřování počítalo s daty z CANARY měřáků.

### Srovnání vypočítaných přísunů radonu s $Q_{zdroj}$

Pomocí tohoto srovnání byla vybrána kombinace tracerů (TMH, MCH, PCH) za davající nejpřesnější výsledky.

Dále lze vidět, že kombinace s TMH plynem v první zóně dávají v rámci nejistot správné hodnoty a že kombinace s TCE plynem v první zóně je nedávají.

### Zpětné ověření

Zpětně dopočítané  $k_{ij}$  pro kombinaci plynů (TMH, MCH, PCE) a  $k_{ij}$  z měření ventilace si v rámci nejistot neodporují. To samé platí pro OAR, ale pouze pro varianty s TMH plynem v první zóně. To značí velikou nepřesnost měření odparů plynu TCE nebo vyhodnocování odezv TD detektorů na tento plyn.

#### 6.2.4 Závěr

Byly určeny průměrné přísuny radonu do sklepa, přízemí a prvního patra objektu pomocí skriptu pro vyhodnocení rovnovážného měření za použití několika kombinací naměřených dat:

- byly použity průměrné OAR z TERA sond a z CANARY měřáků, viz tabulky 6.7 a 6.8, to nám dává dvě varianty vypočítaných  $Q_i$ ;
- dále bylo použito osm kombinací odezv TD detektorů a odparů z tří indikačních plynů pro určení osmi variant  $k_{ij}$ , tj. z toho máme osm variant  $Q_i$ .

Celkově jsme tedy získaly 16 variant přísunů radonu. Porovnáním  $Q_i$  a  $Q_{zdroj}$  byla vybrána nejpřesnější varianta. Tou se stala ta, která byla určena za použití OAR naměřených CANARY měřáky a za použití tracerů (TMH, MCH, PCE). Všechny  $Q_i$  určené z dat CANARY měřáků a z kombinací tracerů s TMH plynem v první zóně odpovídají  $Q_{zdroj}$ .

Pro ověření funkčnosti skriptu pro dynamické měření byly vypočteny i časové závislosti přísunů radonu  $Q_i(t)$  pro OAR z TERA sond. Bohužel  $Q_i(t)$  není možné kvůli známosti

pouze průměrných hodnot  $k_{ij}$  považovat za dostatečně přesné. Proto byly alespoň  $Q_i(t)$  zprůměrovány a tyto průměry srovnány s příslušnými  $\overline{Q_i}(t)$  a  $Q_i$  jsou v podstatě totožné a to potvrzuje správnost skriptu pro vyhodnocování dynamického měření. Správnost skriptu pro vyhodnocování rovnovážného měření byla ověřena v kapitole 5.

## 6.3 Objekt Hálková 980, Humpolec

Jedná se o byt s ložnicí, obývacím pokojem, kuchyní s WC, špajzem a předsíní. Za zóny byly brány obývací pokoj, ložnice, koupelna s WC a kuchyň. Špajz a předsín nebyly zahrnuty do žádné ze zón.

Bыло použito dvacet vyvíječů pěti různých indikačních plynů, čtyři vyvíječe pro daný plyn. Do obývacího pokoje byly umístěny vyvíječe s MDC plynem, do ložnice vyvíječe s MCH a PCE plyny, do koupelny s TCE plynem a do kuchyně s TMH plynem. Díky umístění vyvíječů dvou plynů do ložnice lze vyhodnotit  $k_{ij}$  dvěma způsoby.

TD detektory byly po dvojicích umístěny do každé ze zón kromě koupelny, kam byl umístěn pouze jeden TD detektor. Poslední TD detektor byl umístěn do špajzu, protože původně bylo zamýšleno brát jako jednu zónu koupelnu a špajz.

Do každé zóny byly umístěny jedna TERA sonda a jeden CANARY měřák. Do obývacího pokoje byl umístěn radonový zdroj s označením 38 (dle tab. 6.2).

V příloze E jsou uvedeny naměřené a vyhodnocené veličiny potřebné pro výpočet přísunů radonu.

V dalších oddílech této kapitoly jsou sepsány do tabulek vypočítané  $Q_i$  z OAR naměřených TERA sondami a CANARY měřáky a z obou kombinací použitých tracerů. Pro srovnání jsou tam uvedeny i  $Q_{zdroj}$ . Dále tam lze nalézt zpětné ověření OAR a  $k_{ij}$  pro kombinaci tracerů (MDC, MCH, TCE, TMH) pomocí  $Q_{zdroj}$ .

### 6.3.1 Přísuny radonu

Tab. 6.11: Přesně definované přísuny radonu ze zdrojů v  $\text{Bq}/(\text{m}^3 \cdot \text{hod})$ . Ve druhém sloupci je uvedeno, který zdroj byl umístěn v dané zóně.

zóna	zdroj	$Q_{zdroj}$
1	38	$332 \pm 64$
2	NE	$0 \pm 0$
3	NE	$0 \pm 0$
4	NE	$0 \pm 0$

Tab. 6.12: Průměrné přísluny radonu do zón (ne podlaží!) pro všechny možné kombinace indikačních plynů za použití průměrných hodnot vývojů OAR naměřených TERA sondami (rovnovážné vyhodnocení).

použité tracery	$Q_1$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$ ]	$Q_2$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$ ]	$Q_3$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$ ]	$Q_4$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$ ]
(MDC, PCE, TCE, TMH)	414±389	11±242	165±185	-88±604
(MDC, MCH, TCE, TMH)	414±360	32±188	167±182	-88±564

Tab. 6.13: Průměrné přísluny radonu do zón pro všechny možné kombinace indikačních plynů vypočtené z průměrných hodnot vývojů OAR naměřených CANARY měřáky.

použité tracery	$Q_1$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$ ]	$Q_2$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$ ]	$Q_3$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$ ]	$Q_4$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$ ]
(MDC, PCE, TCE, TMH)	444±253	-25±104	44±86	-152±368
(MDC, MCH, TCE, TMH)	445±241	-86±104	38±84	-152±351

### 6.3.2 Zpětné ověření

#### OAR

Tab. 6.14: Průměrné OAR ve všech zónách vypočítané pomocí rovnice (4.7) za použití průtoků vzduchu z tab. E.4 a příslunů radonu pocházejících od zdrojů RF 2000 (tab. 6.11) a průměrné OAR naměřené CANARY měřáky.

	$a_1$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	$a_2$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	$a_3$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	$a_4$ [Bq/m <sup>3</sup> ]
(MDC, PCE, TCE, TMH)	200 ± 167	139 ± 356	58 ± 83	165 ± 172
(MDC, MCH, TCE, TMH)	201 ± 74	141 ± 72	59 ± 46	166 ± 74
naměřené	210 ± 21	97 ± 10	72 ± 7	139 ± 14

## Objemové průtoky vzduchu

Tab. 6.15: V prvních řádcích těchto tabulek označených *zpětně* jsou průtoky vzduchu z dané zóny do ostatních zón a infiltrace této zóny vypočítané z rovnice (4.7) za využití znalosti ostatních průtoků vzduchu pro kombinaci indikačních plynů (MDC, MCH, TCE, TMH), viz tab. E.4, příslunů radonu pocházejících od zdrojů RF 2000 (tab. 6.11) a průměrných OAR naměřených CANARY měřáky. V druhých řádcích tabulek označených *měření* jsou pro srovnání uvedené příslušné průtoky vzduchu z tab. E.4. V (a) je zájmovou zónou první zóna, v (b) druhá zóna, v (c) třetí zóna a v (d) čtvrtá zóna.

(a)					
	$k_{12}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{13}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{14}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{1_E}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{1_I}$ [m <sup>3</sup> /hod]
zpětně	$25 \pm 13$	$9 \pm 8$	$77 \pm 31$	$50 \pm 10$	$32 \pm 57$
měření	$41 \pm 13$	$5 \pm 5$	$97 \pm 33$	$43 \pm 11$	$25 \pm 57$
(b)					
	$k_{21}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{23}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{24}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{2_E}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{2_I}$ [m <sup>3</sup> /hod]
zpětně	$97 \pm 107$	$10 \pm 20$	$-22 \pm 98$	$26 \pm 31$	$33 \pm 41$
měření	$43 \pm 15$	$1 \pm 2$	$22 \pm 13$	$11 \pm 4$	$18 \pm 28$
(c)					
	$k_{31}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{32}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{34}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{3_E}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{3_I}$ [m <sup>3</sup> /hod]
zpětně	$107 \pm 145$	$-44 \pm 56$	$-32 \pm 133$	$3 \pm 42$	$51 \pm 47$
měření	$35 \pm 15$	$3 \pm 5$	$26 \pm 13$	$-18 \pm 5$	$31 \pm 22$
(d)					
	$k_{41}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{42}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{43}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{4_E}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{4_I}$ [m <sup>3</sup> /hod]
zpětně	$120 \pm 66$	$-10 \pm 26$	$16 \pm 13$	$48 \pm 19$	$11 \pm 58$
měření	$83 \pm 37$	$14 \pm 13$	$9 \pm 5$	$38 \pm 12$	$0 \pm 56$

### 6.3.3 Diskuze

Mnoho informací uvedených u předchozího měření v objektu Skála 75 platí i zde:

- CANARY měřáky měří přesněji a spolehlivěji než TERA sondy,
- časové závislosti příslunů radonu  $Q_i(t)$  nelze považovat za přesné.

Měření ventilace u tohoto objektu je zatíženo velikou nejistotou kvůli saturaci několika TD detektorů na některé druhy tracerů. Stalo se to v důsledku porušení pravidel osazování

měřidel do objektu (podkapitola 3.2.3), jelikož do ložnice bylo umístěno moc vyvíječů, jejichž celkové emise dotyčných tracerů byly příliš veliké. Proto  $k_{ij}$  vycházejí s velikou nejistotou (tab. E.4) a je dost pravděpodobné, že jsou zatíženy nějakou další chybou, která není v uvedených nejistotách zahrnuta.

V tab. 6.13 jsou  $Q_i$  pro data z CANARY měřáků. Kupodivu i přes uvedené nepřesné měření ventilace vychází v rámci nejistot stejně jako  $Q_{zdroj}$  (tab. 6.11). Ovšem jejich nejistoty jsou tak obrovské, že by to při neznámosti  $Q_{zdroj}$  zabráňovalo přesné kvantifikaci zdrojů radonu v objektu.

Jako přesnější byla vybrána kombinace tracerů (MDC, MCH, TCE, TMH), protože pro ní vychází méně průtoků záporně (záporné  $k_{ij}$  jsou nesmyslné).

Při zpětném ověření OAR vyšly hodnoty blízké naměřeným hodnotám (tab. 6.14). Nominální hodnoty zpětně ověřených  $k_{ij}$  vyšly značně rozdílně oproti nominálním hodnotám  $k_{ij}$  z měření, avšak jejich intervaly nejistot jsou tak veliké, že se navzájem protínají (tab. 6.15).

Dynamické vyhodnocení bylo provedeno pro obě kombinace tracerů a pro OAR z TERA sond, avšak závislosti  $Q_i(t)$  byly tak nepřesné (víceméně oscillovaly kolem nuly), že nejsou v této práci uvedeny.

### 6.3.4 Závěr

Byly určeny přísuny radonu do obývacího pokoje, ložnice, koupelny s WC a do kuchyně. Jako přesnější jsou opět brány přísuny radonu, při jejichž výpočtu byly použity OAR z CANARY měřáků. Při vyhodnocování byly uvažovány dvě kombinace tracerů, jako přesnější byla určena kombinace (MDC, MCH, TCE, TMH). Vypočítané a vybrané  $Q_i$  se shoduje s  $Q_{zdroj}$ , avšak mají obrovskou nejistotu.

Hlavním zdrojem nejistot tohoto měření bylo umístění příliš mnoho vyvíječů do zón, což vedlo k saturaci několika TD detektorů na některé druhy tracerů.

## 6.4 Objekt Anglická 574, Dobřichovice

Jedná se o rodinný dům se sklepem, přízemím a prvním patrem. Při měření byla brána jednotlivá podlaží jako zóny. Do sklepa byly umístěny vyvíječe s MCH plynem, do přízemí vyvíječe s MDC plynem a do prvního patra vyvíječe s PCH plynem. Do každé zóny byly dále osazeny čtyři TD detektory. Do přízemí a do prvního patra byly dány po jednom CANARY měřáku a TERA sondě, ve sklepě byly tyto kontinuální motnitory umístěny po dvojicích. Ve sklepě byly navíc instalovány zdroje 38 a 37.

Veličiny vypočítané z měření jsou v příloze F. Přísuny radonu  $Q_{zdroj}$  a  $Q_i$  jsou uvedeny v dalším oddíle. Dále je v této kapitolce uvedeno zpětné ověření OAR a  $k_{ij}$ . Časové vývoje přísunů radonu  $Q_i(t)$  z dynamického vyhodnocení OAR z TERA sond jsou také v příloze F.

### 6.4.1 Přísuny radonu

Tab. 6.16: Přesně definované přísuny radonu ze zdrojů v  $\text{Bq}/(\text{m}^3 \cdot \text{hod})$ . Ve druhém sloupci je uvedeno, ve kterém podlaží byly zdroje umístěny.

podlaží	zdroj	$Q_{zdroj}$
0	38 & 37	$455 \pm 90$
1	NE	$0 \pm 0$
2	NE	$0 \pm 0$

Tab. 6.17: Průměrné přísuny radonu do všech podlaží z rovnovážného vyhodnocení za použití dat z TERA sond.

$Q_0$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$ ]	$Q_1$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$ ]	$Q_2$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$ ]
$1042 \pm 233$	$-22 \pm 12$	$19 \pm 9$

Tab. 6.18: Průměrné přísuny radonu do všech podlaží z rovnovážného vyhodnocení za použití dat z CANARY měřáků.

$Q_0$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$ ]	$Q_1$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$ ]	$Q_2$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$ ]
$1057 \pm 245$	$-31 \pm 13$	$21 \pm 7$

### 6.4.2 Zpětné ověření

#### OAR

Tab. 6.19: Průměrné OAR ve všech podlažích vypočítané pomocí rovnice (4.7) za použití průtoků vzduchu z tab. F.4 a přísunů radonu pocházejících od zdrojů RF 2000 (tab. 6.16) a průměrné OAR naměřené CANARY měřáky.

	$a_0$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	$a_1$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	$a_2$ [Bq/m <sup>3</sup> ]
vypočítané	$1200 \pm 360$	$84 \pm 29$	$22 \pm 8$
naměřené	$2770 \pm 196$	$92 \pm 9$	$98 \pm 10$

## Objemové průtoky vzduchu

Tab. 6.20: V prvních řádcích těchto tabulek označených *zpětně* jsou průtoky vzduchu z dané zóny do ostatních zón a infiltrace této zóny vypočítané z rovnice (4.7) za využití znalosti ostatních průtoků vzduchu (viz tab. F.4), příslunů radonu pocházejících od zdrojů RF 2000 (tab. 6.16) a průměrných OAR naměřených CANARY měřáky. V druhých řádcích tabulek označených *měření* jsou pro srovnání uvedené příslušné průtoky vzduchu z tab. F.4. V (a) je zájmovou zónou první zóna, v (b) druhá zóna a v (c) třetí zóna.

	(a)			
	$k_{12}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{13}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{1_E}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{1_I}$ [m <sup>3</sup> /hod]
zpětně	1,09 ± 0,16	1,00 ± 0,18	8,36 ± 0,67	7,83 ± 0,91
měření	2,32 ± 0,38	0,29 ± 0,09	22,05 ± 2,53	21,52 ± 2,60
	(b)			
	$k_{21}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{23}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{2_E}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{2_I}$ [m <sup>3</sup> /hod]
zpětně	430,84 ± 102,85	25,42 ± 6,02	-386,76 ± 97,72	-382,41 ± 97,72
měření	2,96 ± 0,48	4,25 ± 0,65	25,24 ± 2,80	29,59 ± 2,94
	(c)			
	$k_{31}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{32}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{3_E}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{3_I}$ [m <sup>3</sup> /hod]
zpětně	401,86 ± 97,15	-34,23 ± 12,83	-356,03 ± 92,01	-359,84 ± 92,01
měření	0,18 ± 0,03	0,55 ± 0,08	30,74 ± 3,07	26,93 ± 3,14

### 6.4.3 Diskuze

I u tohoto měření došlo k saturaci několika TD detektorů. Stalo se díky nesprávnému odhadu intenzity větrání, v tomto objektu se totiž větrá velmi málo. Kupodivu však nemají vypočítané  $k_{ij}$  (tab F.4) tak velké nejistoty jako  $k_{ij}$  u předchozího objektu.

Při tomto měření přestala fungovat TERA sonda s označením 10, avšak naštěstí byla umístěna ve sklepě, kde byla ještě jedna TERA sonda, a tudíž tento výpadek další vyhodnocování neovlivnil.

$Q_0$  (tab. 6.18) vychází mnohem větší než  $Q_{zdroj}$  (tab. 6.16). Pravděpodobně to je v důsledku přirozeného příslunu radonu od geologického podloží. Není známo, zdali byla koncentrace radonu v tomto objektu někdy v minulosti proměřována, každopádně nejsou k dispozici žádné hodnoty, a proto v současné době probíhá ve sklepě a v přízemí kontinuální měření radonu. Z výsledků bude hypotéza o příslunu radonu z podloží ověřena.

V tab. 6.19 jsou uvedeny OAR, které by měly být naměřeny, pokud by platilo  $Q_0 = Q_{zdroj}$  a OAR, které bylo skutečně naměřeno CANARY měřáky. Je vidět, že rozdíl je veliký.

V tabulkách 6.20 jsou  $k_{ij}$  vždy pro příslušnou zónu  $i$ , které byly vypočítány z naměřených OAR,  $Q_{zdroj}$  a hodnot  $k_{ij}$  pro ostatní zóny. Vzhledem k rozdílnosti  $Q_0$  a  $Q_{zdroj}$  vycházejí naprosto rozdílně od naměřených  $k_{ij}$  a vlastně ani nemělo smysl počítat je.

#### 6.4.4 Závěr

Byly určeny průměrné příslušnosti radonu do jednotlivých podlaží objektu  $Q_i$ . Pro přízemí a první zónu vyšly v rámci nejistot shodně s příslušnými  $Q_{zdroj}$ , ale pro sklep je vypočítaný příslušnost radonu velmi odlišný od  $Q_{zdroj}$ . Pravděpodobně to je dáno přirozeným příslušnostem radonu do sklepa z geologického podloží. V současné době probíhá měření OAR za účelem ověření této úvahy.

### 6.5 Shrnutí

Zde jsou souhrnně uvedeny všechny vypočítané průměrné příslušnosti radonu, resp. příslušnosti radonu od zdrojů RF 2000 do všech zón všech objektů (tab. 6.21, resp. tab 6.22).

Tab. 6.21: Průměrné příslušnosti radonu  $Q_i$  do všech zón (ne podlaží!) všech objektů vypočítané z OAR naměřených CANARY měráky. V případě objektu Skála 75, resp. Hálková 980 jsou uvedeny  $Q_i$  pro kombinaci tracerů (TMH, MCH, PCE), resp. (MDC, MCH, TCE, TMH). Tyto kombinace jsou považovány za nejpřesnější.

	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$
Skála 75	$301 \pm 78$	$115 \pm 24$	$9 \pm 3$	
Hálková 980	$445 \pm 241$	$-86 \pm 104$	$38 \pm 84$	$-152 \pm 351$
Anglická 574	$1057 \pm 245$	$-31 \pm 13$	$21 \pm 7$	

Tab. 6.22: Příslušnosti radonu ze zdrojů RF 2000 do všech zón všech proměřených objektů.

	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$
Skála 75	$400 \pm 51$	$114 \pm 13$	$0 \pm 0$	
Hálková 980	$332 \pm 64$	$0 \pm 0$	$0 \pm 0$	$0 \pm 0$
Anglická 574	$455 \pm 90$	$0 \pm 0$	$0 \pm 0$	

# Seznam literatury

1. WIKIPEDIA, Otevřená encyklopedie. *Blower-door test* [online]. 2018 [cit. 2019-01-09]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Blower-door\\_test](https://cs.wikipedia.org/wiki/Blower-door_test).
2. WIKIPEDIA, Otevřená encyklopedie. *Radon* [online]. 2019 [cit. 2019-08-12]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Radon>.
3. STÁTNÍ ÚSTAV RADIAČNÍ OCHRANY, v. v. i. *Přírodní radioaktivita a problematika radonu* [online] [cit. 2019-08-12]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/prirodnioz>.
4. VYHLÁŠKA ze dne 14. prosince 2016 o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje [online]. 2012 [cit. 2019-08-12]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/sb0172-2016.pdf>.
5. WLAN bezdrátová a USB radonová sonda TSR4 (TSR3D verze s displejem) [online]. 2014 [cit. 2019-07-30]. Dostupné z: <https://www.tesla.cz/cz/tera-tsr3/>.
6. AlphaGUARD – Radon monitor [online]. 2016 [cit. 2019-07-29]. Dostupné z: <https://www.bertin-instruments.com/product/radon-professional-monitoring/radon-alphaguard/>.
7. A radon detector for everyone [online]. 2019 [cit. 2019-07-30]. Dostupné z: <https://www.airthings.com/en-us/home>.
8. JÍLEK, Karel; FROŇKA, Aleš. Metodika stanovení výměny vzduchu ve vnitřním ovzduší budov s využitím pasivních integrálních měřidel indikačních plynů (pro potřeby SÚJB) [online]. 2016 [cit. 2019-08-01]. Dostupné z: [https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/metodiky/Stanoveni\\_vymeny\\_vzduchu.pdf](https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/metodiky/Stanoveni_vymeny_vzduchu.pdf).
9. Thermal desorption sorbent tubes for air sampling [online] [cit. 2019-08-15]. Dostupné z: <https://www.markes.com/Products/Sampling-accessories/Sorbent-tubes/default.aspx>.
10. SHINOHARA, Naohide; KATAOKA, Toshiyuki; TAKAMINE, Koichi; BUTSUGAN, Michio; NISHIJIMA, Hirokazu; GAMO, Masashi. Modified Perfluorocarbon Tracer Method for Measuring Effective Multizone Air Exchange Rates. *International journal of environmental research and public health*. 2010, roč. 7, s. 3348–58. Dostupné z DOI: 10.3390/ijerph7093348.
11. LEGIBOT, Eric O. Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties [online] [cit. 2019-08-16]. Dostupné z: <https://pythonhosted.org/uncertainties/>.

12. OKUYAMA, Hiroyasu; ONISHI, Yoshinori; TANABE, Shin-ichi; KASHIHARA, Seiichi. Statistical data analysis method for multi-zonal airflow measurement using multiple kinds of perfluorocarbon tracer gas. *Building and Environment*. 2009, roč. 44, č. 3, s. 546–557. ISSN 0360-1323. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.04.014>.
13. WIKIPEDIA, The Free Encyclopedia. *Linear least squares* [online]. 2019 [cit. 2019-08-21]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Linear\\_least\\_squares](https://en.wikipedia.org/wiki/Linear_least_squares).
14. *testo 174 H - datalogger teploty a vlhkosti* [online]. 2019 [cit. 2019-07-29]. Dostupné z: <https://www.testo.com/cz-CZ/testo-174-h/p/0572-6560>.
15. *Laserový měřič vzdálenosti GLM 120 C Professional* [online] [cit. 2019-08-27]. Dostupné z: <https://www.bosch-proffesional.com/cz/cs/products/glm-120-c-0601072F00>.
16. SHERMAN, Max; WALKER, Iain; LUNDEN, Melissa. Uncertainties in Air Exchange using Continuous-Injection, Long-Term Sampling Tracer-Gas Methods. *International Journal of Ventilation*. 2014, roč. 13, s. 13–27. Dostupné z DOI: 10.1080/14733315.2014.11684034.
17. DZHUNAKOVA, D.; IVANOVA, Kremena. *Radon Concentration PEMP-09E/05.03.2019 (report výsledků měření)*. 2019. National Radiation Protection Institute (NRPI).
18. *scipy.interpolate.CubicSpline* [online]. 2016 [cit. 2019-08-21]. Dostupné z: <https://docs.scipy.org/doc/scipy-0.18.1/reference/generated/scipy.interpolate.CubicSpline.html>.
19. *scipy.signal.savgol\_filter* [online]. 2015 [cit. 2019-08-21]. Dostupné z: [https://docs.scipy.org/doc/scipy-0.16.1/reference/generated/scipy.signal.savgol\\_filter.html](https://docs.scipy.org/doc/scipy-0.16.1/reference/generated/scipy.signal.savgol_filter.html).