

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>5</b>
<b>I</b>	<b>Teoretická část</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Radonová problematika</b>	<b>7</b>
2.1	Použité kontinuální monitory radonu . . . . .	8
2.1.1	TERA sondy . . . . .	8
2.1.2	CANARY měřáky . . . . .	9
2.2	Průtočné radonové zdroje typu RF 2000 . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Měření intenzity větrání pomocí techniky indikačních plynů</b>	<b>13</b>
3.1	Přístroje a pomůcky . . . . .	13
3.2	Pracovní postup . . . . .	15
3.2.1	Příprava měření . . . . .	15
3.2.2	Přeprava . . . . .	16
3.2.3	Instalace měřidel . . . . .	16
3.2.4	Doba měření . . . . .	17
3.2.5	Sběr . . . . .	17
3.2.6	Vyhodnocení . . . . .	17
3.3	Určení průtoků vzduchu a výměny vzduchu objektu . . . . .	18
3.3.1	Hmotnostní koncentrace a emise indikačních plynů . . . . .	18
3.3.2	Bilanční rovnice . . . . .	18
3.3.3	Řešení bilančních rovnic . . . . .	19
3.3.4	Výměna vzduchu . . . . .	21
<b>4</b>	<b>Určení objemové rychlosti přísunu zdrojů radonu</b>	<b>22</b>
4.1	Určení nejistot přísunů radonu . . . . .	24
4.1.1	Jeden kompartment . . . . .	25
4.1.2	Dva kompartimenty . . . . .	25
4.1.3	$N$ kompartmentů . . . . .	25
4.2	Interpretace přísunů radonu . . . . .	26
4.3	Ověření modelu výpočtu přísunů radonu . . . . .	26

4.4	Implementace . . . . .	27
4.4.1	Rovnovážný stav . . . . .	27
4.4.2	Dynamické měření . . . . .	27
<b>II</b>	<b>Praktická část</b>	<b>29</b>
<b>5</b>	<b>Měření v rovnovážném stavu</b>	<b>30</b>
5.1	Objekt č. 1 . . . . .	31
5.2	Objekt č. 2 . . . . .	32
5.3	Objekt č. 3 . . . . .	33
5.4	Objekt č. 4 . . . . .	34
5.5	Objekt č. 8 . . . . .	35
5.6	Diskuze . . . . .	36
5.7	Závěr . . . . .	37
<b>6</b>	<b>Dynamická měření</b>	<b>38</b>
6.1	TERA sondy . . . . .	39
6.2	Objekt Skála 75, okr. Havlíčkův Brod . . . . .	40
6.2.1	Použitá měřidla . . . . .	40
6.2.2	Naměřené OAR, objemy a teploty . . . . .	41
6.2.3	Objemové průtoky vzduchu . . . . .	42
6.2.4	Přísuny radonu . . . . .	45
6.2.5	Zpětné ověření . . . . .	47
6.3	Objekt Hálková 980, Humpolec . . . . .	48
6.3.1	Použitá měřidla . . . . .	48
6.3.2	Naměřené OAR, objemy a teploty . . . . .	49
6.3.3	Objemové průtoky vzduchu . . . . .	50
6.3.4	Přísuny radonu . . . . .	52
6.3.5	Zpětné ověření . . . . .	53
6.4	Objekt Anglická 574, Dobřichovice . . . . .	54
6.4.1	Použitá měřidla . . . . .	54
6.4.2	Naměřené OAR, objemy a teploty . . . . .	55
6.4.3	Objemové průtoky vzduchu . . . . .	56
6.4.4	Přísuny radonu . . . . .	57
6.4.5	Zpětné ověření . . . . .	58
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>53</b>
7.1	Dotazy . . . . .	53
7.2	TO DO . . . . .	53
<b>Seznam literatury</b>		<b>54</b>
<b>A Python skript pro symbolické určení nejistot přísunů radonu</b>		<b>56</b>

<b>B Python skript pro vyhodnocení dynamického měření přísnů radonu</b>	<b>58</b>
<b>C Certifikáty zdrojů</b>	<b>64</b>
<b>D Přílohy k objektu Skála 75, okr. Havlíčkův Brod</b>	<b>67</b>
D.1 Fotografie a schéma objektu . . . . .	67
D.2 Naměřené vývoje OAR, teplot a relativní vlhkosti vzduchu . . . . .	68
D.3 Přísný radonu . . . . .	71
<b>E Přílohy k objektu Hálková 980, Humpolec</b>	<b>79</b>
E.1 Schéma objektu . . . . .	79
E.2 Naměřené vývoje OAR, teplot a relativní vlhkosti vzduchu . . . . .	79
<b>F Přílohy k objektu Anglická 574, Dobřichovice</b>	<b>80</b>
F.1 Fotografie a schéma objektu . . . . .	80
F.2 Naměřené vývoje OAR, teplot a relativní vlhkosti vzduchu . . . . .	80

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]

# **1. Úvod**

kompartment==zóna

# Část I

## Teoretická část

## 2. Radonová problematika

Radon je bezbarvý, nereaktivní plyn, je bez chuti a zápachu [1]. 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 [2].

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 [2].

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 [3] 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 Státního ústavu radiační ochrany, v. v. i. (SÚRO), [2].

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 [2]). 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). [4]

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 [5], 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.



(a)



(b)

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 [6].

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) [4].

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 [7].

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 Státním ústavem radiační ochrany, v. v. i. a její správnost byla ověřena s obdobnými technikami používanými v zahraničí. Vše o ní je popsáno v certifikované metodice ([7]), 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).



(a)



(b)

Obr. 3.1: V (a) jsou zobrazeny vyvíječe (skleněné trubičky) a TD detektory (kovové zlatě zbarvené trubice). Mezi vyvíječi 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 [7]. Jejich výrobcem je firma MARKES [8]. 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 desorpcí, 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 [7].

## 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 [7].

### 3.2.4 Doba měření

V rámci metodiky [7] 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 vyhodnocení naměřených dat známe  $R_{ki}$ , což je průměr odezev 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 plyne  $m_{ki} = 0$  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 [7]. 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:

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

kde bylo využito relace

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

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).

#### 3.3.2 Bilanční rovnice

V rovnovážném stavu se hmotnostní koncentrace indikačních plynů v zónách chovají podle následující soustavy rovnic [9]:

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

Tab. 3.1: Molekulové hmotnosti  $M$  indikačních plynů a jejich odběrové rychlosti do TD detektorů  $U$ . [7]

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

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 [10].

## 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  $(N_p \cdot k - N_p + i, \text{ resp. } N_p \cdot k - N_p + j)$  přesáhne řádkový rozdíl 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  $i$ -tém řádku a  $m$ -tém sloupci je roven  $-C_{1i}$  a prvek v  $j$ -tém řádku a  $m$ -tém 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 [11].

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 přeuroveností soustavy a nepřesnostem ve vyhodnocování odezv TD detektorů a odparů z vyvíječů.

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 přísluně 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 [12], 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 [10], 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.

## 4. Určení objemové rychlosti přísunu zdrojů radonu

V této kapitole je popsán model pro výpočet objemové rychlosti přísunu zdrojů radonu (zkráceně přísunů radonu) do jednotlivých kompartmentů zkoumaného objektu. Slovo kompartment je zde často nahrazováno kratším synonymem zóna.

Uvažujme obecné rozdělení objektu na  $N$  zón. Pro určení přísunů radonu  $Q_1, Q_2, \dots, Q_N$  potřebujeme znát OAR ve všech zónách, objemové průtoky vzduchu mezi jednotlivými zónami a objemy zón. Tyto veličiny jsou svázány následující soustavou diferenciálních rovnic

$$\dot{a}_i = \frac{1}{V_i} \left( \sum_{j=1}^{N+1} a_j k_{ji} - \sum_{j=1}^{N+1} a_i k_{ij} \right) - \lambda a_i + Q_i, \quad i \in \{1, 2, \dots, N\}. \quad (4.1)$$

Značení je vysvětleno v tab. 1. Indexem  $N+1$  je značeno vnější prostředí, které je tedy uvažováno jako  $N$  plus první kompartment. Přísun radonu do vnějšího prostředí nás nezajímá, proto máme pouze soustavu  $N$  rovnic.

Průtok vzduchu  $k_{i,N+1}$  představuje objemový průtok vzduchu z  $i$ -té zóny do vnějšího prostředí a je nazýván exfiltrace  $i$ -té zóny. Průtok vzduchu  $k_{N+1,i}$  představuje objemový průtok z vnějšího prostředí do  $i$ -té zóny a nazýváme jej infiltrace  $i$ -té zóny. Pro jednoduchost budeme exfiltrace značit jako  $k_{i_E}$  a infiltrace jako  $k_{i_I}$ . Veličinou  $a_{N+1}$  je značeno OAR vnějšího prostředí. Lze si povšimnout, že pokud platí  $a_{N+1} = 0$ , pak nemá vnější prostředí vliv na dynamiku přenosu radonu uvnitř objektu.

Uvažování infiltrací zón v soustavě rovnic (4.1) má za důsledek, že vypočtené přísuny radonu v sobě nezahrnují množství radonu, který se do zón dostane za jednotku času z vnějšího prostředí. To znamená, že při větší koncentraci radonu ve vnějším prostředí bude větší část OAR ve vnitřních zónách objektu pocházet od infiltrace z vnějšího prostředí a tedy přísuny radonu do vnitřních zón budou nižší (to vše za předpokladu nenulových infiltrací).

Objemové aktivity radonu lze změřit jakýmkoliv detektorem radonu. Pokud měříme kontinuálními monitory radonu, pak je možné určit časový vývoj přísunů radonu v době měření OAR. Tato měření nazýváme **dynamické měření přísunu radonu**. Derivace v rovnicích (4.1) lze získat například tak, že příslušné naměřené časové vývoje OAR interpolujeme nějakým vhodným způsobem a vzniknoucí funkce zderivujeme podle času.

Měříme-li integrálními detektory radonu, pak máme pro danou zónu k dispozici pouze průměrnou hodnotu OAR  $\bar{a}_i$ . Lze ukázat (viz [11]), že v tomto případě můžeme levou stranu

rovníc (4.1) položit nule, tj. soustava rovnic přechází na tvar

$$0 = \frac{1}{V_i} \left( \sum_{j=1}^{N+1} \bar{a}_j k_{ji} - \sum_{j=1}^{N+1} \bar{a}_i k_{ij} \right) - \lambda \bar{a}_i + \bar{Q}_i, \quad i \in \{1, 2, \dots, N\}. \quad (4.2)$$

Řešením této soustavy získáme pouze průměrné přísuny radonu  $\bar{Q}_1, \bar{Q}_2, \dots, \bar{Q}_N$ . V tomto případě provádíme **měření přísunu radonu v rovnovážném stavu**.

Průtoky vzduchu a exfiltrace se měří pomocí metody popsané v kapitole 3. Pomocí této metody lze určit pouze průměrné hodnoty těchto veličin pro daný časový úsek. Infiltrace se musí dopočítat z průtokových bilančních rovnic:

$$k_{i_I} = k_{i_E} + \sum_{j=1}^N (k_{ij} - k_{ji}). \quad (4.3)$$

Je potřeba, aby měření pro stanovení OAR v zónách a průtoků vzduchu mezi nimi bylo simultánní, tj. aby se časové rozsahy obou měření protínaly a v případě použití integrálních detektorů radonu by se měly shodovat.

Soustavu rovnic (4.1) lze přepsat do maticového tvaru

$$\mathbb{K} \cdot \vec{a} + \vec{Q} = \vec{a}, \quad (4.4)$$

kde  $\mathbb{K}$  je matice typu  $N \times (N+1)$ ,

$$\mathbb{K} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{V_1} \sum_{j=1}^{N+1} k_{1j} - \lambda & \frac{k_{21}}{V_1} & \frac{k_{31}}{V_1} & \cdots & \cdots & \frac{k_{N+1,1}}{V_1} \\ \frac{k_{12}}{V_2} & -\frac{1}{V_2} \sum_{j=1}^{N+1} k_{2j} - \lambda & \frac{k_{32}}{V_2} & \cdots & \cdots & \frac{k_{N+1,2}}{V_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & & \vdots \\ \frac{k_{1N}}{V_N} & \frac{k_{2N}}{V_N} & \frac{k_{3N}}{V_N} & \cdots & -\frac{1}{V_N} \sum_{j=1}^{N+1} k_{N+1,j} - \lambda & \frac{k_{N+1,N}}{V_N} \end{pmatrix}, \quad (4.5)$$

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_N \\ a_{N+1} \end{pmatrix}, \quad \vec{Q} = \begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_N \end{pmatrix}, \quad \vec{\dot{a}} = \begin{pmatrix} \dot{a}_1 \\ \dot{a}_2 \\ \vdots \\ \dot{a}_N \end{pmatrix}. \quad (4.6)$$

V případě rovnovážného měření je možné soustavu rovnic (4.2) přepsat do tvaru

$$\mathbb{K} \cdot \vec{a} + \vec{Q} = \vec{0}. \quad (4.7)$$

Vyjádřením  $\vec{Q}$  z (4.4), resp. (4.7) můžeme určit přísuny radonu do všech zón zkoumaného objektu. Důvodem převodu do maticového zápisu je snadnější implementace výpočtu přísunů radonu v programovacím jazyce Python, pomocí něhož jsem vyhodnocoval provedená měření.

## 4.1 Určení nejistot příslunů radonu

Příslun radonu  $Q_i$  je veličina závislá na OAR všech zón, všech průtoků vzduchu z a do  $i$ -té zóny, na objemu  $i$ -té zóny a případně na časové změně OAR  $i$ -té zóny, tj.

$$Q_i = f(a_1, \dots, a_{N+1}; k_{i1}, \dots, k_{iN}, k_{i_E}; k_{1i}, \dots, k_{Ni}, k_{i_I}; V_i; \dot{a}_i) = f(\vec{x}), \quad (4.8)$$

naměřené veličiny byly pro zjednodušení značení shrnutý do vektoru  $\vec{x}$ .

Pokud jsou rozptyly naměřených veličin malé, pak můžeme použít pro výpočet nejistot příslunů radonů kovarianční matici  $\Sigma^Q$ , kterou lze určit ze vztahu

$$\Sigma_{ij}^Q = \sum_k^n \sum_l^n \frac{\partial Q_i}{\partial x_k} \frac{\partial Q_j}{\partial x_l} \Sigma_{kl}^x, \quad (4.9)$$

Diagonální prvek  $\Sigma_{ii}^Q$  představuje rozptyl  $Q_i$  (ozn.  $\sigma^2(Q_i)$ ) a nediagonální prvek  $\Sigma_{ij}^Q$ , resp.  $\Sigma_{ji}^Q$  vyjadřuje míru závislosti mezi  $Q_i$  a  $Q_j$ .  $x_k$  je  $k$ -tá složka vektoru  $\vec{x}$  a  $\Sigma^x$  je kovarianční matice naměřených veličin. Parciální derivace příslunů radonu podle naměřených veličin se určí pomocí (4.1).

Jestliže jsou naměřené veličiny nezávislé, pak jsou nediagonální prvky  $\Sigma^x$  nulové a předchozí vztah se zjednoduší na

$$\Sigma_{ij}^Q = \sum_k^n \frac{\partial Q_i}{\partial x_k} \frac{\partial Q_j}{\partial x_k} \Sigma_k^x. \quad (4.10)$$

Vzhledem k tomu, že nevíme, jak moc velké závislosti jsou mezi jednotlivými naměřenými veličinami a jejich kvantifikace by vyžadovala mnoho náročných měření, ze kterých by stejně nešla míra těchto závislostí určit dostatečně přesně, tak byl pro výpočet  $\Sigma^Q$  používán vztah (4.10).

Výpočet nejistot příslunů radonu se značně ztěžuje se zvyšujícím se počtem kompartmentů  $N$ , a proto jsem napsal skript v Pythonu, který pomocí balíčku Sympy symbolicky vypočítá  $\Sigma^Q$  pro požadovaný počet zón. Počet zón je přitom limitován pouze výpočetním časem, např. pro  $N = 3$  výpočet zabral pouhých 0,2 s, pro  $N = 10$  už 3,9 s. Ovšem více než deset zón nepřichází v praxi v úvahu vzhledem k počtu použitelných indikačních plynů a náročnosti provedení měření. Skript je k nahlédnutí v příloze A.

Nejistoty naměřených veličin jsou určeny nejistotou daného měřidla či použité metody. V případě  $\dot{a}_i$  lze nejistotu získat aplikováním vzorce (4.10) na časovou derivaci funkce, jenž představuje proklad naměřených hodnot OAR (chceme znát pouze nejistotu jedné veličiny, proto je výsledkem číslo představující rozptyl  $\dot{a}_i$ ).

Dále budou ukázány vztahy pro určení  $\Sigma^Q$  pro jednu, dvě a obecný počet zón.

### 4.1.1 Jeden kompartment

Hledaná kovarianční matice má pouze jeden prvek a to

$$\begin{aligned}\Sigma_{11}^Q = & \sigma^2(a_1) + \sigma^2(a_1)(\lambda + k_{12}/V_1)^2 + \frac{1}{V_1^2} (a_1^2 \sigma^2(k_{12}) + a_2^2 \sigma^2(k_{21}) + k_{21}^2 \sigma^2(a_2)) + \\ & + \frac{1}{V_1^4} \sigma^2(V_1)(a_1 k_{12} - a_2 k_{21})^2,\end{aligned}\quad (4.11)$$

jedná se o rozptyl  $Q_1$ .  $\sigma^2(x)$  značí rozptyl veličiny  $x$ .

### 4.1.2 Dva kompartenty

Kovarianční matice přísunů radonu má následující tvar

$$\Sigma^Q = \begin{pmatrix} \Sigma_{11}^Q & \Sigma_{12}^Q \\ \Sigma_{12}^Q & \Sigma_{22}^Q \end{pmatrix}. \quad (4.12)$$

Její diagonální prvky lze vypočítat z

$$\begin{aligned}\Sigma_{ii}^Q = & \sigma^2(a_i) + \sigma^2(a_i) \left( \lambda + \frac{1}{V_i} \sum_{j=1, j \neq i}^3 k_{ij} \right)^2 + \frac{1}{V_i^2} \sum_{j=1, j \neq i}^3 (\sigma^2(a_j) k_{ji}^2 + \\ & + \sigma^2(k_{ij}) a_i^2 + \sigma^2(k_{ji}) a_j^2) + \frac{\sigma^2(V_i)}{V_i^4} \sum_{j=1}^3 (a_i k_{ij} - a_j k_{ji})^2.\end{aligned}\quad (4.13)$$

Jediný nedagonální prvek je určen vztahem

$$\begin{aligned}\Sigma_{12}^Q = & -\sigma^2(a_1) \frac{k_{12}}{V_2} (\lambda + (k_{12} + k_{13})/V_1) - \sigma^2(a_2) \frac{k_{21}}{V_1} (\lambda + (k_{21} + k_{23})/V_2) + \\ & + \sigma^2(a_3) \frac{k_{31} k_{32}}{V_1 V_2} - \sigma^2(k_{12}) \frac{a_1^2}{V_1 V_2} - \sigma^2(k_{21}) \frac{a_2^2}{V_1 V_2}.\end{aligned}\quad (4.14)$$

### 4.1.3 $N$ kompartmentů

Kovarianční matice přísunů radonu je tvaru  $N \times N$ . Její diagonální prvky:

$$\begin{aligned}\Sigma_{ii}^Q = & \sigma^2(a_i) + \sigma^2(a_i) \left( \lambda + \frac{1}{V_i} \sum_{j=1, j \neq i}^{N+1} k_{ij} \right)^2 + \frac{1}{V_i^2} \sum_{j=1, j \neq i}^{N+1} (\sigma^2(a_j) k_{ji}^2 + \\ & + \sigma^2(k_{ij}) a_i^2 + \sigma^2(k_{ji}) a_j^2) + \frac{\sigma^2(V_i)}{V_i^4} \sum_{j=1}^{N+1} (a_i k_{ij} - a_j k_{ji})^2.\end{aligned}\quad (4.15)$$

Nediagonální prvky:

$$\begin{aligned}\Sigma_{ij}^Q = & -\sigma^2(a_i)\frac{k_{ij}}{V_j}\left(\lambda + \frac{1}{V_i}\sum_{l=1,l\neq i}^{N+1}k_{il}\right) - \sigma^2(a_j)\frac{k_{ji}}{V_i}\left(\lambda + \frac{1}{V_j}\sum_{l=1,l\neq j}^{N+1}k_{jl}\right) + \\ & + \frac{1}{V_i V_j}\sum_{l=1,l\neq i,j}^{N+1}\sigma^2(a_l)k_{li}k_{lj} - \sigma^2(k_{ij})\frac{a_i^2}{V_i V_j} - \sigma^2(k_{ji})\frac{a_j^2}{V_i V_j}. \end{aligned}\quad (4.16)$$

## 4.2 Interpretace přísunů radonu

Veličina  $Q_i$ , tj. přísun radonu do  $i$ -té zóny, nám říká, kolik koncentrace radonu se do  $i$ -té zóny dostává za jednotku času ze zdrojů radonu. Zkoumaný objekt bychom měli rozdělit na zóny, v nichž předpokládáme homogenní koncentraci radonu. Po provedení měření OAR a ventilace můžeme za pomoci výše uvedeného výpočetního modelu určit přísuny radonu do jednotlivých zón a tím kvantitativně určit zdroje radonu v objektu.

Jako příklad uvedeme vícepodlažní dům, což je nejčastější případ zkoumaného objektu. V tomto případě je největším zdrojem radonu podloží. Pokud uvažujeme jednotlivá podlaží za kompartmenty (což se v případě vícepodlažních objektů většinou dělá), pak by měl být přísun radonu největší v zóně s kontaktem s podložím, tj. ve sklepě nebo v přízemí, a ve vyšších patrech by měl být za normálních podmínek zanedbatelný. Vyšší hodnoty přísunu radonu ve vyšších patrech indikují nějakou anomálii.

Dalším příkladem může být byt. Ten rozdělujeme na zóny podle logického uspořádání bytu (obytné prostory, koupelna, kuchyň ...), podle očekávaných hodnot koncentrací radonu nebo podle jiných kritérií. Pokud je byt v kontaktu s podlažím, pak lze podle vypočtených přísunů radonu určit např. chybějící nebo nedostatečnou radonovou izolaci, či ve které zóně bytu se větrá nedostatečně atd. Jestliže se byt nachází ve vyšším patře, pak zvětšený přísun radonu do nějakého jeho kompartmentu indikuje nějakou anomálii (již zmíněný radonový most, smolinec ležící na stole...).

## 4.3 Ověření modelu výpočtu přísunů radonu

Předpokládáme-li, že se přirozené přísuny radonu do zón zkoumaného objektu blíží nule, pak umístněním zdrojů radonu se známými radonovými výdejnostmi do libovolných zón získáme přesně definované přísuny radonu do těchto zón. Tyto přesně definované přísuny radonu lze srovnat s přísuny radonu vypočítané pomocí výše uvedeného výpočetního modelu pro měření přísunu radonu v rovnovážném stavu a tím ověřit správnost výpočetního modelu. Lze ověřovat ovšem pouze za podmínky, že měření ventilace objektu a OAR v zónách proběhlo s dostatečnou přesností.

Pokud se vypočítané přísuny radonu neshodují s přísuny radonu od zdrojů, tak můžeme provést tzv. zpětné ověřování. Tím je méněn výpočet průměrného OAR ve vnitřních zónách objektu, resp. výpočet  $N$  vybraných průtoků vzduchu mezi zónami ze soustavy rovnic (4.7)

při uvažování přísunů radonu od zdrojů. Za hodnoty ostatních veličin vystupujících v soustavě (4.7) bereme hodnoty těchto veličin určené z měření ventilace a případně OAR.

## 4.4 Implementace

Výpočetní model přísunů radonu jsem implementoval rozděleně pro případ měření v rovnovážném stavu a pro případ dynamického měření v programovacím jazyce Python. Skript pro vyhodnocení dynamického měření je v příloze B, skript pro vyhodnocení měření v rovnovážném stavu je pouze jeho jednodušší varianta, a proto není v této práci neuveden.

V následujících odstavcích je zjednodušeně uvedeno, jakým způsobem skripty pracují a jaké mají vstupy a výstupy.

### 4.4.1 Rovnovážný stav

Skript si načítá naměřené veličiny z několika vstupních souborů:

- *volumes.txt* obsahuje objemy zón,
- *airflows.txt* obsahuje průměrné objemové průtoky vzduchu mezi všemi vnitřními zónami objektu a exfiltrace všech zón,
- *concentrations.txt* obsahuje průměrné OAR ve všech zónách objektu, tedy OAR vnějšího prostředí není zahrnuto.

Nejprve skript dopočítá pomocí bilančních rovnic (4.3) infiltrace zón, aby mohl vytvořit matici  $\mathbb{K}$ . Dále vytvoří vektor  $\vec{a}$  a ze soustavy rovnic (4.7) určí  $\vec{Q}$ . Nejistoty jsou propagovány pomocí Python balíčku `uncertainties` [10].

Ve skriptu jsou zahrnuty funkce pro export tabulek obsahující naměřené průtoky, objemy a vypočítané přísyny radonu do typografického systému Latex.

### 4.4.2 Dynamické měření

Skript pro vyhodnocení dynamického měření má za vstupy rovněž soubory *volumes.txt* a *airflows.txt*. Naměřené vývoje OAR si načítá ze souborů *a\_1\_modified.csv*, *a\_2\_modified.csv*, ..., *a\_N\_modified.csv*. Každý z těchto souborů obsahuje OAR naměřený v dané zóně. Pokud bylo v nějaké zóně měřeno více monitory radonu, pak si skript vypočítá z jejich dat průměrný vývoj OAR v oné zóně. Přípona *modified* značí, že se jedná o soubory obsahující OAR po aplikaci kalibračních konstant TERA sond (viz oddíl 6.1).

Opět dojde k sestrojení matice  $\mathbb{K}$  a vektoru  $\vec{a}$ . Dále skript proloží časové vývoje  $a_i(t)$ ,  $i \in \{1, 2, \dots, N\}$  kubickým splinem [13], který následně zderivuje a tím jsou určeny derivace  $\dot{a}(t)$ .

Časové vývoje přísynů radonu  $\vec{Q}(t)$  jsou určeny z rovnice (4.4). Skript umožňuje exportovat naměřené průtoky mezi zónami, objemy zón a statistiky  $\vec{Q}(t)$  do tabulek ve

formátu Latexu. Statistikami  $\vec{Q}(t)$  je myšleno průměr a medián přísunů radonu, jejich maximální a minimální hodnoty a také jejich první a třetí kvartily.

Pomocí skriptu také můžeme vytvářet grafy zobrazující  $\vec{Q}(t)$  v závislosti na čase  $t$ . Zobrazená závislost  $\vec{Q}(t)$  v těchto grafech je vyhlazena Savitzky-Golay filtrem s velikostí okna 7 a s fitovaním kubickým polynomem [14]. Filtrování bylo použito z důvodu velkého zašumění původních dat.

# Část II

## Praktická část

## 5. Měření v rovnovážném stavu

Pro ověření modelu výpočtu příslušnosti radonu z měření v rovnovážném stavu (viz kapitola 4) mi byla poskytnuta data naměřená pro SÚRO (Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.) v Bulharsku. Měření probíhalo v osmi objektech v lednu a únoru 2019 a pomocí techniky indikačních plynů byly změřeny objemové objemové průtoky vzduchu mezi stanovenými kompartmenty všech objektů. OAR ve všech objektech byly změřeny integrálními detektory radonu (konkrétně elektretovými dozimetry, viz kapitola 2), avšak bohužel pouze u objektů č. 1, 2, 3, 4 a 8 byly OAR změřeny ve všech zónách, což je předpoklad pro použití modelu výpočtu příslušnosti radonu do jednotlivých zón.

V tab. 5.1 jsou adresy a počty podlaží všech použitelných objektů spolu s obdobím, kdy byly v daném objektu měřeny průtoky vzduchu mezi zónami a OAR v jednotlivých zónách. Jako zóny byly v každém objektu brány podlaží, tj. počet pater daného objektu určuje počet kompartmentů, na něž je rozdělen.

Tab. 5.1: Adresy a počty podlaží každého použitelného objektu.  $T$  je doba měření absorpcie indikačních plynů v TD detektorech a zároveň je to i doba měření OAR v jednotlivých zónách. Čtvrtý sloupec udává počátek těchto měření.

Adresa	Počet podlaží	Počátek měření	$T$ [dny]	Použitelné
1 Sofia, Kalach 20	3	31. 1. 2019 10:30	29,0	ANO
2 42°41'00.7"N 26°20'00.5"E	1	29. 1. 2019 10:00	28,1	ANO
3 42°42'01.0"N 25°52'21.6"E	2	28. 1. 2019 16:00	28,8	ANO
4 Sofia, Yaroslav Hashek 36	2	31. 1. 2019 13:00	26,0	ANO
5				NE
6				NE
7				NE
8 42°08'14.6"N 24°44'26.5"E	3	29. 1. 2019 15:30	28,9	ANO

V následujících podkapitolách jsou uvedeny naměřené veličiny (průtoky vzduchu, OAR, objemy) a vypočítané příslušnosti radonu do všech zón. U uváděných nejistot je uvažován faktor pokrytí  $k = 1$ , tj. nejistoty jsou rovny směrodatným odchylkám. Podlaží jsou udávána jako čísla, viz tab. 5.2. Koncentrace radonu vnějšího prostředí  $OAR_{out}$  nebyla ani v jednom případě změřena, a proto byly příslušnosti radonu vypočteny pro několik jejich typických hodnot: 0, 5, 10, 20, 30 Bq/m<sup>3</sup>. Nejistota všech objemů byla odhadnuta na 20 % nominální hodnoty.

Tab. 5.2: Význam značení podlaží v následujících podkapitolách.

0	sklep
1	přízemí
2	první patro

## 5.1 Objekt č. 1

První tabulka v tomto oddíle obsahuje naměřené OAR a objemy všech zón (tj. podlaží). Pokud bylo naměřeno více hodnot OAR v nějaké zóně, pak byl z nich byl udělán průměr. Druhá tabulka průtoky vzduchu mezi zónami, exfiltrace zón a dopočítané infiltrace zón. Ve třetí tabulce jsou vypočítané přísuny radonu.

Podkapitoly ostatních objektů mají stejnou strukturu.

Tab. 5.3: Průměrné koncentrace radonu v daném podlaží a objemy všech místností v daném podlaží.

podlaží	OAR [Bq/m <sup>3</sup> ]	V [m <sup>3</sup> ]
0	1094±55	40±8
1	562±20	84±10
2	51±2	97±15

Tab. 5.4: Objemové průtoky vzduchu mezi zónami v m<sup>3</sup>/hod a celková výměna vzduchu objektu  $n$  v hod<sup>-1</sup>. Přiřazení zón podlažím objektu je vzestupné, tj. první zóna je sklep, druhá zóna přízemí a třetí zóna je první patro.

$k_{12}$	$1,32 \pm 0,37$
$k_{13}$	$0,03 \pm 0,03$
$k_{21}$	$2,50 \pm 0,75$
$k_{23}$	$0,47 \pm 0,16$
$k_{31}$	$0,14 \pm 0,12$
$k_{32}$	$1,26 \pm 0,37$
$k_{1_E}$	$45,26 \pm 7,75$
$k_{2_E}$	$23,02 \pm 4,17$
$k_{3_E}$	$16,24 \pm 2,86$
$k_{1_I}$	$43,97 \pm 7,80$
$k_{2_I}$	$23,40 \pm 4,27$
$k_{3_I}$	$17,14 \pm 2,89$
$n$	$0,38 \pm 0,05$

Tab. 5.5: Výsledné přísuny radonu pro několik případů koncentrací radonu ve vnějším prostředí.  $Q_i$  značí přísun radonu do  $i$ -tého podlaží.

$OAR_{out}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	$Q_0$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$ ]	$Q_1$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$ ]	$Q_2$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$ ]
0	1256±335	160±35	7±2
5	1250±334	159±34	6±2
10	1245±332	157±34	5±2
20	1234±329	154±33	3±1
30	1223±326	152±33	1±1

## 5.2 Objekt č. 2

Tab. 5.6: Průměrné koncentrace radonu v daném podlaží a objemy všech místností v daném podlaží.

podlaží	$OAR$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	$V$ [m <sup>3</sup> ]
1	1357±41	91±11

Tab. 5.7: Exfiltrace a infiltrace jediné zóny objektu v m<sup>3</sup>/hod, jedná se tedy vlastně o exfiltraci a infiltraci celého objektu.  $n$  je výměna vzduchu objektu v hod<sup>-1</sup>.

$k_{1_E}$	45 ± 9
$k_{1_I}$	45 ± 9
$n$	0,5 ± 0,1

Tab. 5.8: Výsledné přísuny radonu pro několik případů koncentrací radonu ve vnějším prostředí.  $Q_i$  značí přísun radonu do  $i$ -tého podlaží.

$OAR_{out}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	$Q_1$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$ ]
0	683±157
5	681±157
10	678±156
20	673±155
30	668±154

### 5.3 Objekt č. 3

Tab. 5.9: Průměrné koncentrace radonu v daném podlaží a objemy všech místností v daném podlaží.

podlaží	$OAR$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	$V$ [m <sup>3</sup> ]
1	3042±108	77±8
2	211±7	65±8

Tab. 5.10: Objemové průtoky vzduchu mezi zónami v m<sup>3</sup>/hod a celková výměna vzduchu objektu  $n$  v hod<sup>-1</sup>. Přiřazení zón podlažím objektu je vzestupné: první zóna je přízemí a druhá zóna je první patro.

$k_{12}$	3,2 ± 1,0
$k_{21}$	1,7 ± 0,5
$k_{1_E}$	49,7 ± 8,7
$k_{2_E}$	55,8 ± 9,7
$k_{1_I}$	51,3 ± 8,8
$k_{2_I}$	54,3 ± 9,7
$n$	0,7 ± 0,1

Tab. 5.11: Výsledné přísuny radonu pro několik případů koncentrací radonu ve vnějším prostředí.  $Q_i$  značí přísun radonu do  $i$ -tého podlaží.

$OAR_{out}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	$Q_1$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$ ]	$Q_2$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$ ]
0	2120±418	37±55
5	2117±417	32±55
10	2113±416	28±54
20	2107±415	20±53
30	2100±414	11±52

## 5.4 Objekt č. 4

Tab. 5.12: Průměrné koncentrace radonu v daném podlaží a objemy všech místností v daném podlaží.

podlaží	$OAR$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	$V$ [m <sup>3</sup> ]
1	433±22	119±20
2	208±7	102±14

Tab. 5.13: Objemové průtoky vzduchu mezi zónami v m<sup>3</sup>/hod a celková výměna vzduchu objektu  $n$  v hod<sup>-1</sup>. Přiřazení zón podlažím objektu je vzestupné: první zóna je přízemí a druhá zóna první patro.

$k_{12}$	15 ± 4
$k_{21}$	15 ± 4
$k_{1_E}$	27 ± 7
$k_{2_E}$	44 ± 9
$k_{1_I}$	28 ± 9
$k_{2_I}$	43 ± 11
$n$	0,32 ± 0,04

Tab. 5.14: Výsledné přísuny radonu pro několik případů koncentrací radonu ve vnějším prostředí.  $Q_i$  značí přísun radonu do  $i$ -tého podlaží.

$OAR_{out}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	$Q_1$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$ ]	$Q_2$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$ ]
0	131±38	55±29
5	130±37	53±29
10	129±37	51±28
20	126±36	46±27
30	124±35	42±26

## 5.5 Objekt č. 8

Tab. 5.15: Průměrné koncentrace radonu v daném podlaží a objemy všech místností v daném podlaží.

podlaží	$OAR$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	$V$ [m <sup>3</sup> ]
0	33±2	66±13
1	61±3	105±11
2	79±2	153±15

Tab. 5.16: Objemové průtoky vzduchu mezi zónami v m<sup>3</sup>/hod a celková výměna vzduchu objektu  $n$  v hod<sup>-1</sup>. Přiřazení zón podlažím objektu je vzestupné: první zóna je sklep, druhá zóna přízemí a třetí zóna je první patro.

$k_{12}$	9 ± 3
$k_{13}$	7 ± 4
$k_{21}$	42 ± 13
$k_{23}$	30 ± 14
$k_{31}$	54 ± 22
$k_{32}$	59 ± 25
$k_{1_E}$	91 ± 17
$k_{2_E}$	135 ± 33
$k_{3_E}$	534 ± 128
$k_{1_I}$	11 ± 31
$k_{2_I}$	138 ± 46
$k_{3_I}$	610 ± 134
$n$	2,4 ± 0,4

Tab. 5.17: Výsledné přísuny radonu pro několik případů koncentrací radonu ve vnějším prostředí.  $Q_i$  značí přísun radonu do  $i$ -tého podlaží.

$OAR_{out}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	$Q_0$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$ ]	$Q_1$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$ ]	$Q_2$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$ ]
0	-50±32	73±31	322±76
5	-50±30	67±29	302±71
10	-51±28	60±26	282±67
20	-53±24	47±22	242±57
30	-55±21	34±18	202±48

## 5.6 Diskuze

V tabulkách 5.5, 5.8, 5.11, 5.14 a 5.17 jsou vypočítané přísluny radonů pro objekty č. 1, 2, 3, 4 a 8. Je vidět, že všechny kromě osmého objektu se řídí tím, co bylo uvedeno v podkapitole 4.2, tj. cím dále je zóna od geologického podloží, tím je příslun radonu do ní menší.

U osmého objektu je vývoj velikostí příslun radonu opačný, než bychom předpokládali. Stačí se ovšem podívat na tabulku naměřených OAR v jednotlivých zónách 5.15 a vidíme, proč tomu tak je: OAR je nejvyšší v prvním patře, pak v přízemí a ve sklepě je nejmenší. Toto je velmi nezvyklé a pokud se nejedná o chybu měření (vzhledem k údajům z tabulky 5.18 nepravděpodobné, viz dále), pak je to důsledek nějaké anomálie. Pro větší názornost jsou v tab. 5.18 zobrazeny hodnoty OAR naměřené v místnostech osmého objektu; OAR uvedené v tab. 5.15 jsou pak průměrem přes danou zónu/podlaží. Vidíme, že vyšší koncentrace než ve sklepu byly naměřeny ve všech místnostech v přízemí i v prvním patře a že v ložnice v prvním patře byla naměřena dvojnásobná koncentrace radonu než v ostatních místnostech. Z tab. 5.17 je dále zřejmé, že se zvyšujícím se odhadem koncentrace radonu ve vnějším prostředí se přísluny do všech zón snižují, což značí, že zdrojem radonu nebude vysoká OAR ve vnějším prostředí. S přihlédnutím ke schématu domu (obr. 5.1) si lze domýšlet, že ložnice v prvním patře je v kontaktu s podložím a narozdíl od sklepa nemá tak dobrou radonovou izolaci. Odtud by se radon mohl šířit do dalších částí domu. Fotky objektu, které by nám tuto hypotézu potvrdily, bohužel nejsou k dispozici.

Za zmínku také stojí záporně vycházející příslun radonu do sklepa. Lze to přisoudit nepřesnostem vzniklých při měření. Avšak uváděná nejistota je rovna směrodatné odchylce  $\sigma$  a tudíž  $Q_0$  je v rámci rozšířené nejistoty nezáporný.

Tab. 5.18: Přebraná tabulka z [15] obsahující naměřené koncentrace radonu v některých místnostech objektu č. 8.

Location in dwelling	Period from... to	Results of measurements [Bq/m <sup>3</sup> ]	
		Radon concentration	Combined standard uncertainty (1 $\sigma$ )
Dining room, floor 2	29.01.2019 to 27.02.2019	66	3
Living room, floor 2	29.01.2019 to 27.02.2019	51	3
Bedroom 2, floor 2	29.01.2019 to 27.02.2019	120	6
Living room, floor 1	29.01.2019 to 27.02.2019	61	3
Basement	29.01.2019 to 27.02.2019	33	2

Dále lze vypozorovat, že u všech objektů se přísluny radonu do všech zón zmenšují se zvyšující se koncentrací radonu ve vnějším prostředí. To plně odpovídá našemu očekávání uvedeného v kapitole 4.



Obr. 5.1: Schéma objektu č. 8. Křížky značí vyvýječe, trojúhelníky TD detektory a hvězdičky elektretové dozimetrie. [15]

## 5.7 Závěr

Byly vypočteny přísnury radonu do jednotlivých podlaží pěti objektů (rodinné domy), v nichž proběhlo simultánní měření průtoků vzduchu pomocí techniky indikačních plynů a koncentrací radonu. Měření bylo provedeno pro SÚRO v Bulharsku v různých městech.

Kromě osmého objektu vyšly přísnury radonu tak, jak se předpokládalo, tj. nejvyšší byly přísnury radonu do kompartmentů s kontaktem s podložím a s rostoucí vzdáleností zón od podloží se přísnury radonu zmenšovaly. V osmém objektu vyšly přísnury naopak největší do nejvyššího prvního patra a nejmenší do sklepa. Byla uvedena hypotéza, že je to dáná geometrií domu, totiž že ložnice z prvního patra je v kontaktu s podložím. Bohužel nejsou k dispozici fotografie pro ověření této úvahy.

Bylo ověřeno, že při zvyšující se OAR vnějšího prostředí se přísnury radonu do vnitřních zón zkoumaného objektu snižují.

## 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 [4] a sekundárně měřiči radonu CANARY [6]. CANARY měřáky 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.

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 [16]. 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).

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 přísnu radonu pocházející od daného zdroje do této zóny.

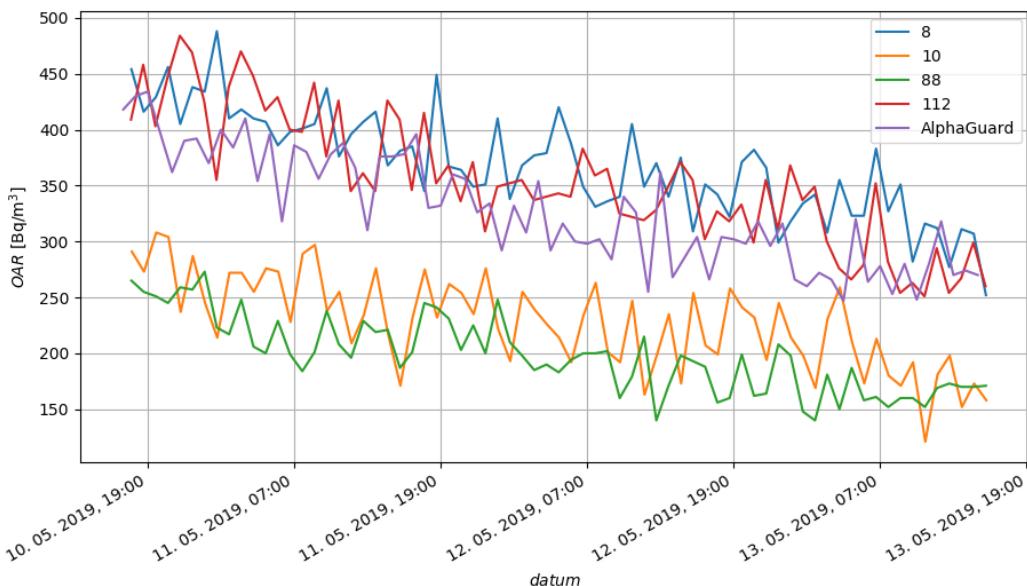
Před samotnými měřeními přísnů radonu v objektech bylo nejprve nutno provést srovnávací měření TERA sond, jelikož každá sonda má různou odezvu při stejném OAR. O tomto pojednává podkapitola 6.1. Další podkapitoly obsahují dynamická měření přísnů radonu v uvedených objektech.

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

## 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) [5]. 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.



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

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

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

kde  $OAR_A$  je průměrná OAR z hodnot naměřených AG a  $OAR_T$  je průměrná OAR z

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

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

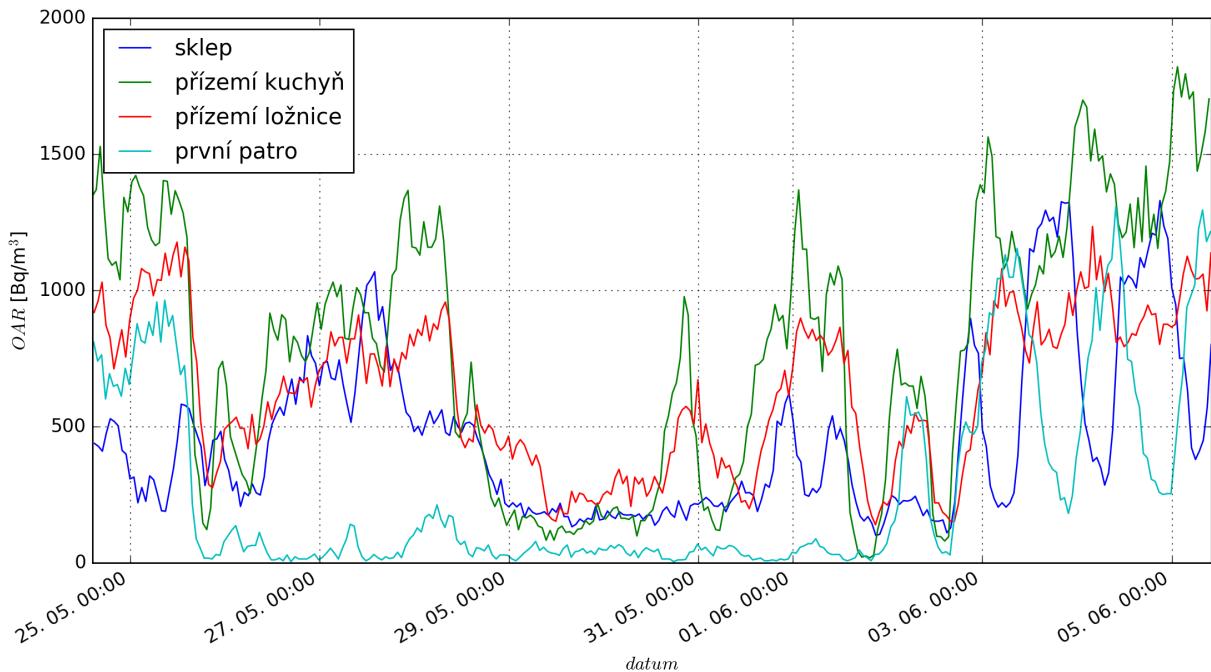
### 6.2.1 Použitá měřidla

- 14 vyvýječů (2x TMH, 2x TCE, 3x MDC, 3x MCH, 2x PCE, 2x PCH)
- 12 TD detektorů
- 4 CANARY monitory
- 4 TERA sondy
- 3 TESTO měřiče teploty a vlhkosti
- 2 zdroje radonu

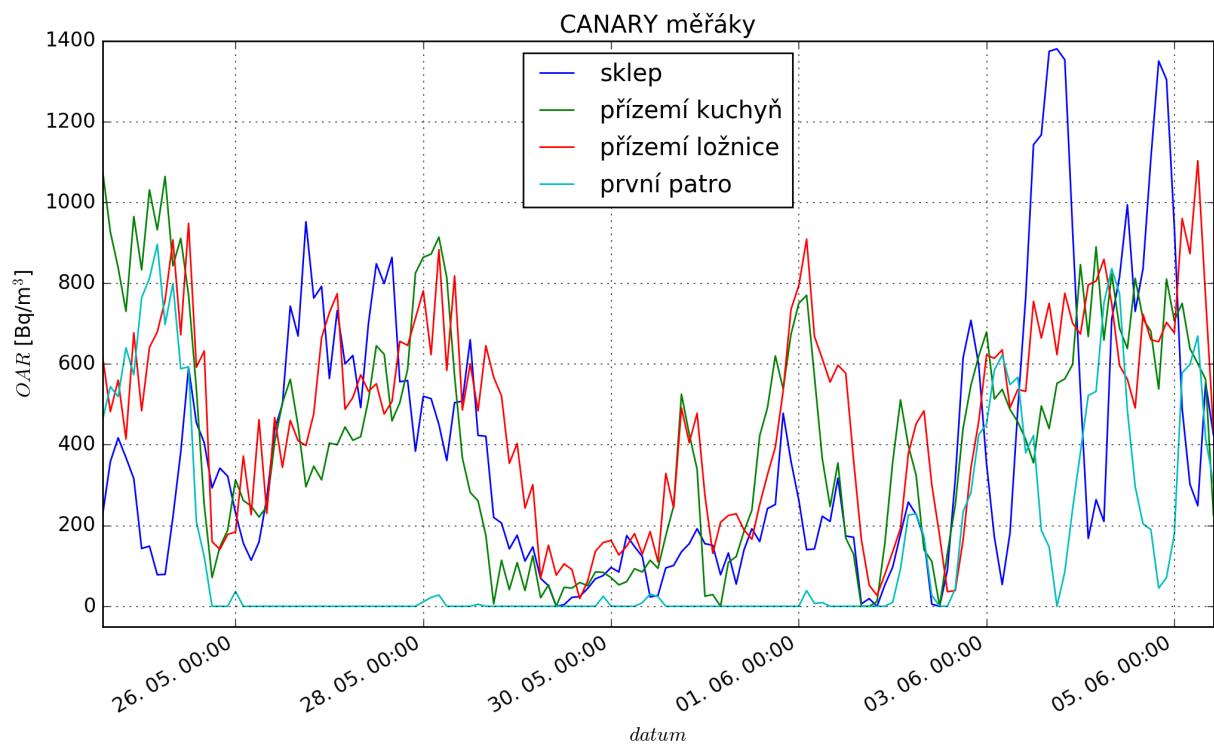
## 6.2.2 Naměřené OAR, objemy a teploty

Tab. 6.5: Objemy podlaží objektu, průměrné teploty naměřené v každém podlaží dataloggeru testo 174H, odhadnuté atmosférické tlaky v každém podlaží a přiřazení číselování kompartmentů jednotlivým podlažím. Význam označení podlaží je vysvětlen v tab. 5.2.

podlaží	$V$ [ $\text{m}^3$ ]	$T$ [ $^\circ\text{C}$ ]	$p$ [kPa]	zóna
0	$39 \pm 5$	12,22	100	1
1	$127 \pm 15$	16,12	100	2
2	$70 \pm 9$	17,57	100	3



Obr. 6.2: Vývoj OAR naměřený TERA sondami po aplikování kalibračních konstant (tab. 6.4). Pro další vyhodnocování byly OAR naměřené v přízemí v kuchyni a v ložnici zprůměrovány.



Obr. 6.3: Vývoj OAR naměřený CANARY měřáky.

### 6.2.3 Objemové průtoky vzduchu

Tab. 6.6: Přehled použitých indikačních plynů a umístění jejich vyvíječů v objektu. V posledním sloupci jsou celkové odpary plynů ze všech jim odpovídajících vyvíječů.

ozn.	podlaží	odpar [mg]
TMH	0	192,50
TCE	0	193,55
MCH	1	472,27
MDC	1	497,27
PCH	2	230,88
PCE	2	96,54

Tab. 6.7: Odezvy TD detektorů  $R$  na všechny použité indikační plyny ve všech zónách.

plyn	zóna	$R$ [ng]
MCH	1	36,0 ± 2,3
	2	395,8 ± 16,6
	3	50,8 ± 2,3
MDC	1	34,5 ± 1,2
	2	304,9 ± 7,1
	3	47,2 ± 1,2
TMH	1	145,3 ± 26,0
	2	37,5 ± 3,9
	3	20,2 ± 2,4
PCH	1	20,7 ± 2,4
	2	26,9 ± 0,7
	3	182,2 ± 4,6
TCE	1	191,8 ± 14,5
	2	32,2 ± 1,4
	3	25,0 ± 1,2
PCE	1	0,0 ± 0,0
	2	2,6 ± 0,1
	3	136,9 ± 4,1

Tab. 6.8: Objemové průtoky vzduchu v m<sup>3</sup>/hod pro všechny kombinace aplikovaných indikačních plynů.  $n$  je výměna vzduchu vypočtená ze vztahu (3.15), [n] = 1/hod.

	(TMH, MDC, PCE)	(TMH, MDC, PCH)	(TMH, MCH, PCE)	(TMH, MCH, PCH)
$k_{12}$	$12,262 \pm 3,129$	$11,759 \pm 3,078$	$10,188 \pm 2,611$	$9,746 \pm 2,563$
$k_{13}$	$0,855 \pm 0,255$	$3,372 \pm 1,013$	$0,908 \pm 0,261$	$3,573 \pm 1,036$
$k_{21}$	$4,028 \pm 0,940$	$3,507 \pm 0,847$	$3,220 \pm 0,776$	$2,780 \pm 0,700$
$k_{23}$	$1,240 \pm 0,183$	$4,889 \pm 0,724$	$1,025 \pm 0,161$	$4,031 \pm 0,635$
$k_{31}$	$-0,076 \pm 0,020$	$3,524 \pm 0,958$	$-0,061 \pm 0,016$	$3,611 \pm 0,968$
$k_{32}$	$0,931 \pm 0,137$	$5,967 \pm 0,967$	$0,774 \pm 0,117$	$4,945 \pm 0,820$
$k_{1_E}$	$21,425 \pm 5,271$	$19,770 \pm 5,057$	$23,244 \pm 5,443$	$21,411 \pm 5,208$
$k_{2_E}$	$44,024 \pm 4,853$	$41,624 \pm 4,833$	$36,712 \pm 4,240$	$34,644 \pm 4,195$
$k_{3_E}$	$7,712 \pm 0,849$	$24,294 \pm 3,199$	$7,850 \pm 0,853$	$25,127 \pm 3,209$
$k_{1_I}$	$30,590 \pm 6,206$	$27,869 \pm 6,140$	$31,181 \pm 6,093$	$28,339 \pm 6,017$
$k_{2_I}$	$36,099 \pm 5,855$	$32,294 \pm 5,917$	$29,994 \pm 5,043$	$26,764 \pm 5,073$
$k_{3_I}$	$6,472 \pm 0,916$	$25,525 \pm 3,693$	$6,630 \pm 0,914$	$26,079 \pm 3,658$
$n$	$0,310 \pm 0,038$	$0,363 \pm 0,042$	$0,287 \pm 0,036$	$0,344 \pm 0,041$
	(TCE, MDC, PCE)	(TCE, MDC, PCH)	(TCE, MCH, PCE)	(TCE, MCH, PCH)
$k_{12}$	$7,859 \pm 1,288$	$7,286 \pm 1,238$	$6,544 \pm 1,094$	$6,050 \pm 1,047$
$k_{13}$	$0,893 \pm 0,159$	$3,523 \pm 0,631$	$0,927 \pm 0,162$	$3,647 \pm 0,641$
$k_{21}$	$1,309 \pm 0,211$	$1,140 \pm 0,195$	$1,049 \pm 0,182$	$0,906 \pm 0,169$
$k_{23}$	$1,235 \pm 0,180$	$4,874 \pm 0,715$	$1,023 \pm 0,159$	$4,025 \pm 0,628$
$k_{31}$	$-0,025 \pm 0,005$	$1,146 \pm 0,243$	$-0,020 \pm 0,004$	$1,176 \pm 0,245$
$k_{32}$	$0,922 \pm 0,136$	$6,419 \pm 0,960$	$0,767 \pm 0,116$	$5,330 \pm 0,817$
$k_{1_E}$	$2,474 \pm 1,325$	$0,539 \pm 1,320$	$3,713 \pm 1,256$	$1,616 \pm 1,248$
$k_{2_E}$	$46,234 \pm 4,862$	$43,556 \pm 4,848$	$38,543 \pm 4,268$	$36,229 \pm 4,226$
$k_{3_E}$	$7,670 \pm 0,848$	$26,236 \pm 3,237$	$7,815 \pm 0,852$	$27,185 \pm 3,242$
$k_{1_I}$	$9,941 \pm 1,867$	$9,061 \pm 1,942$	$10,155 \pm 1,683$	$9,231 \pm 1,776$
$k_{2_I}$	$39,997 \pm 5,039$	$35,866 \pm 5,149$	$33,303 \pm 4,414$	$29,780 \pm 4,477$
$k_{3_I}$	$6,439 \pm 0,891$	$25,404 \pm 3,517$	$6,613 \pm 0,889$	$26,019 \pm 3,470$
$n$	$0,239 \pm 0,028$	$0,298 \pm 0,034$	$0,212 \pm 0,025$	$0,275 \pm 0,031$

### 6.2.4 Přísuny radonu

Tab. 6.9: 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	$0 \pm 0$

Tab. 6.10: Průměrné přísuny radonu v  $\text{Bq}/(\text{m}^3 \cdot \text{hod})$  souhrnně pro všechny kombinace indikačních plynů pro dynamické vyhodnocení.

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. 6.11: Průměrné objemové koncentrace radonu naměřené TERA sondami umístěnými v uvedených podlažích.  $\sigma_A$  je nejistota OAR typu A plynoucí ze statistického zpracování naměřených dat,  $\sigma_B$  je nejistota OAR typu B plynoucí z ostatních zdrojů (statistika detekce, nejistota měřidla) a  $\sigma$  je kombinovaná nejistota OAR. Při určování přísunů radonu v rovnovážném stavu byla použita pouze nejistota typu B, tj.  $\sigma_B$ . V posledním sloupci je průměrná citlivost TERA sond vypočtená z naměřených dat (tj. z naměřeného počtu impulzů a naměřeného OAR). Tato citlivost byla použita pro výpočet  $\sigma_B$ .

ID sondy	podlaží	OAR [ $\text{Bq}/\text{m}^3$ ]	$\sigma_A$	$\sigma_B$	$\sigma$	$\bar{c}$ [ $\text{imp}/\text{hod} / \text{m}^3$ ]
8	0	458	309	33	311	0,405
10	1	789	485	43	487	0,433
112	1	633	282	37	284	0,464
88	2	276	356	31	358	0,296

Tab. 6.12: Průměrné OAR naměřené CANARY měřáky umístěnými v daných podlažích.

ID měřáku	podlaží	OAR [Bq/m <sup>3</sup> ]
1	0	381 ± 38
2	1	419 ± 42
4	1	465 ± 47
3	2	156 ± 16

Tab. 6.13: Přísuny radonu určené z průměrných hodnot vývojů OAR naměřených TERA sondami. Jednotkou přísunů radonu je Bq/(m<sup>3</sup> · hod).

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

Tab. 6.14: Přísuny radonu určené z průměrných hodnot vývojů OAR naměřených CANARY měřáky. Jednotkou přísunů radonu je Bq/(m<sup>3</sup> · hod).

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

### 6.2.5 Zpětné ověření

#### OAR

Tab. 6.15: Průměrné OAR ve všech podlažích vypočítané pomocí rovnice (4.7) za použití průtoků vzduchu z tab. 6.8 a přísumů radonu pocházejících od zdrojů RF 2000 (tab. 6.9) 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> ]
(TMH, MDC, PCE)	496 ± 121	410 ± 72	103 ± 25
(TMH, MDC, PCH)	496 ± 119	410 ± 72	107 ± 26
(TMH, MCH, PCE)	495 ± 120	467 ± 83	102 ± 25
(TMH, MCH, PCH)	495 ± 118	467 ± 82	107 ± 26
(TCE, MDC, PCE)	1417 ± 333	518 ± 85	209 ± 50
(TCE, MDC, PCH)	1416 ± 338	518 ± 86	219 ± 50
(TCE, MCH, PCE)	1415 ± 319	574 ± 96	209 ± 49
(TCE, MCH, PCH)	1415 ± 324	574 ± 96	218 ± 49
naměřené	381 ± 38	442 ± 32	156 ± 16

## Objemové průtoky vzduchu

Tab. 6.16: 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. 6.8, přísluní radonu pocházejících od zdrojů RF 2000 (tab. 6.9) a průměrných OAR naměřených CANARY měřáky. V druhých řádcích tabulek označených *měření* jsou pro srovnání uvedené příslušné průtoky vzduchu z tab. 6.8. 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 ± 6, 18	2, 54 ± 0, 61	31, 37 ± 6, 64	39, 31 ± 7, 19
měření	10, 19 ± 2, 61	0, 91 ± 0, 26	23, 24 ± 5, 44	31, 18 ± 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 ± 6, 01	2, 43 ± 0, 54	43, 72 ± 6, 04	37, 00 ± 6, 63
měření	3, 22 ± 0, 78	1, 02 ± 0, 16	36, 71 ± 4, 24	29, 99 ± 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 ± 17, 34	1, 34 ± 16, 37	27, 71 ± 20, 50	26, 49 ± 20, 50
měření	-0, 06 ± 0, 02	0, 77 ± 0, 12	7, 85 ± 0, 85	6, 63 ± 0, 91

## 6.3 Objekt Hálková 980, Humpolec

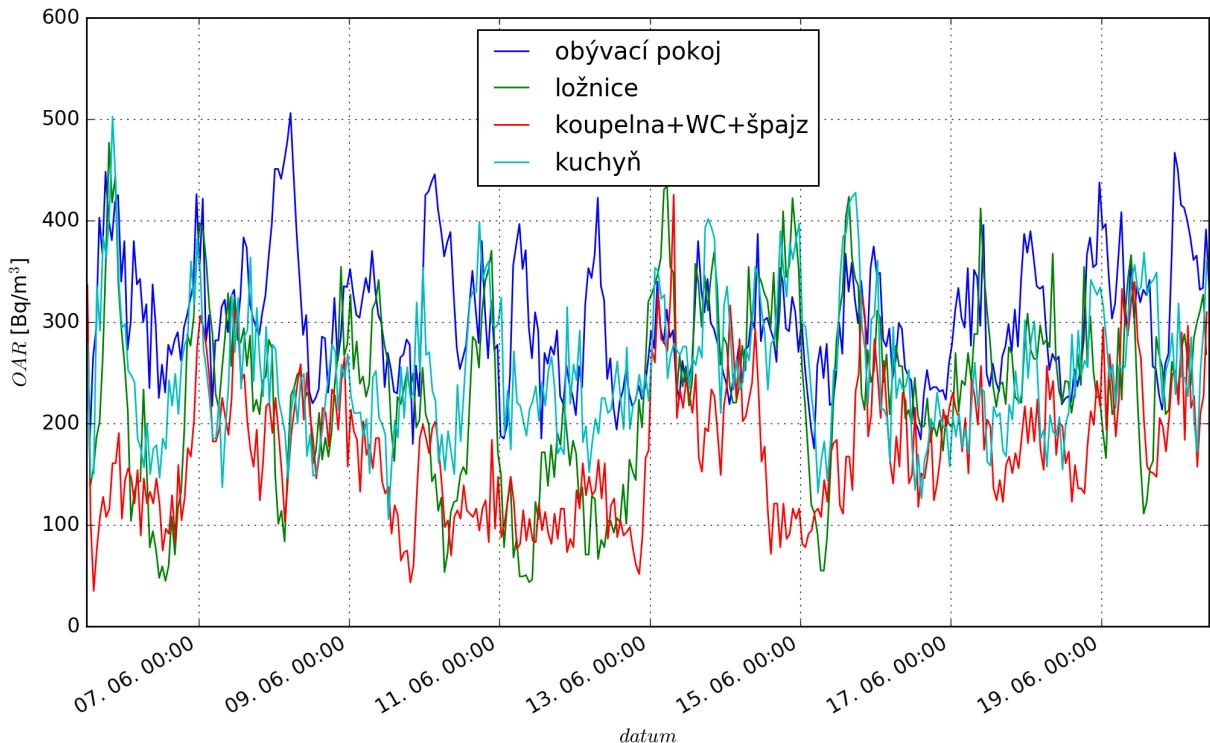
### 6.3.1 Použitá měřidla

- 20 vyvýječů (4x MDC, 4x MCH, 4x PCE, 4x TCE, 4x TMH)
- 8 TD detektorů
- 4 CANARY monitory
- 4 TERA sondy
- 3 TESTO měřiče teploty a vlhkosti
- 1 zdroj radonu

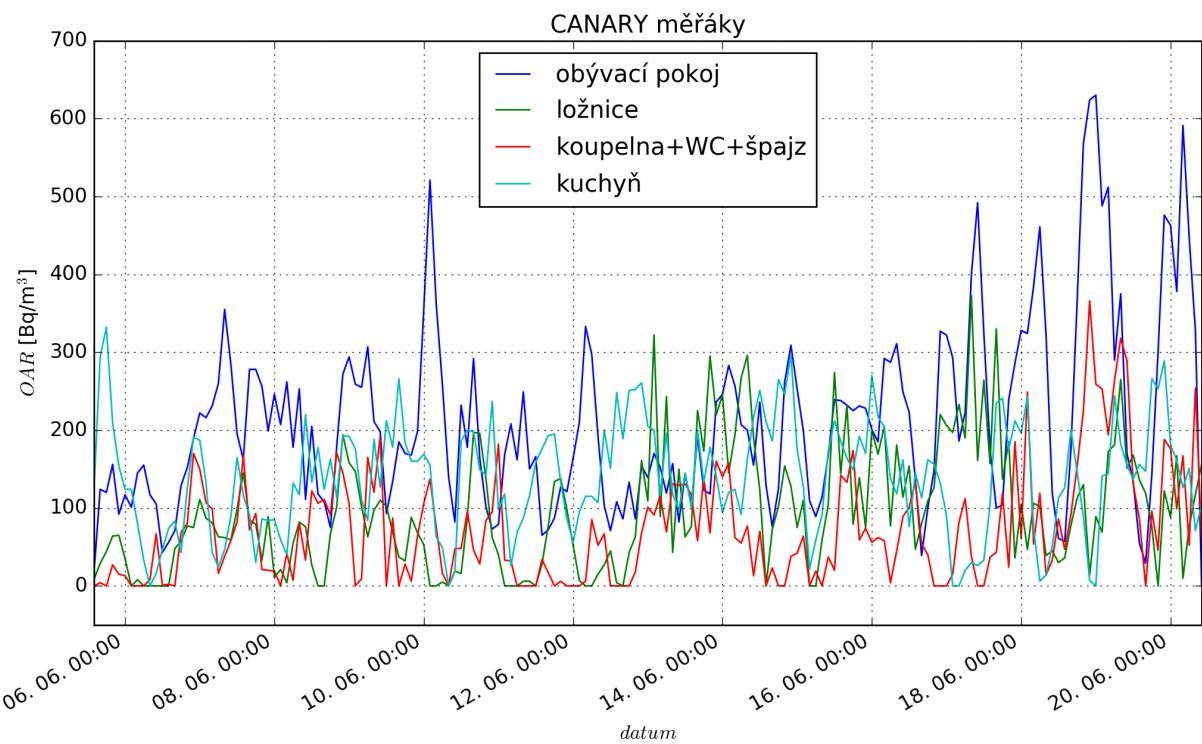
### 6.3.2 Naměřené OAR, objemy a teploty

Tab. 6.17: Přiřazení číslování kompartmentů jednotlivým podlažím, objemy všech zón objektu, průměrné teploty naměřené v každém zóně TERA sondami, odhadnuté atmosférické tlaky v každém zóně a průměrné OAR naměřené TERA sondami ( $OAR_T$ ) a CANARY měřáky ( $OAR_C$ ). OAR jsou uvedené v  $\text{Bq}/\text{m}^3$ .

podlaží	zóna	$V$ [ $\text{m}^3$ ]	$T$ [ $^\circ\text{C}$ ]	$p$ [kPa]	$OAR_T$	$OAR_C$
4	1	$47 \pm 9$	25,10	100	$302 \pm 29$	$210 \pm 21$
4	2	$39 \pm 8$	25,16	100	$232 \pm 25$	$97 \pm 10$
4	3	$47 \pm 9$	24,48	100	$172 \pm 23$	$72 \pm 7$
4	4	$28 \pm 6$	25,03	100	$251 \pm 23$	$139 \pm 14$



Obr. 6.4: Vývoj OAR naměřený TERA sondami po aplikování kalibračních konstant (tab. 6.4).



Obr. 6.5: Vývoj OAR naměřený CANARY měřáky.

### 6.3.3 Objemové průtoky vzduchu

Tab. 6.18: Přehled použitých indikačních plynů a umístění jejich vyvíječů v objektu. V posledním sloupci jsou celkové odpary plynů ze všech jim odpovídajících vyvíječů.

plyn	zóna	odpar [mg]
MDC	1	1042
MCH	2	989
PCE	2	317
TCE	3	841
TMH	4	991

Tab. 6.19: Odezvy TD detektorů  $R$  na všechny použité indikační plyny ve všech zónách.

plyn	zóna	$R$ [ng]
MDC	1	$406 \pm 23$
	2	$286 \pm 17$
	3	$154 \pm 9$
	4	$336 \pm 19$
MCH	1	$346 \pm 25$
	2	$698 \pm 50$
	3	$172 \pm 13$
	4	$359 \pm 26$
PCE	1	$140 \pm 21$
	2	$277 \pm 42$
	3	$97 \pm 11$
	4	$147 \pm 22$
TCE	1	$152 \pm 11$
	2	$124 \pm 9$
	3	$183 \pm 14$
	4	$167 \pm 12$
TMH	1	$251 \pm 27$
	2	$215 \pm 23$
	3	$145 \pm 16$
	4	$403 \pm 43$

Tab. 6.20: Objemové průtoky vzduchu mezi zónami v  $\text{m}^3/\text{hod}$  a výměna vzduchu  $n$  v  $\text{hod}^{-1}$ .

	(MDC, PCE, TCE, TMH)	(MDC, MCH, TCE, TMH)
$k_{12}$	$12,2 \pm 4,9$	$40,4 \pm 13,4$
$k_{13}$	$4,8 \pm 8,9$	$11,9 \pm 8,2$
$k_{14}$	$96,0 \pm 35,9$	$92,9 \pm 34,0$
$k_{21}$	$31,3 \pm 27,5$	$40,5 \pm 14,8$
$k_{23}$	$17,9 \pm 7,9$	$4,4 \pm 3,3$
$k_{24}$	$13,8 \pm 24,1$	$19,7 \pm 12,7$
$k_{31}$	$63,4 \pm 26,0$	$62,6 \pm 26,1$
$k_{32}$	$1,9 \pm 2,8$	$6,2 \pm 8,9$
$k_{34}$	$46,9 \pm 24,3$	$46,5 \pm 23,9$
$k_{41}$	$76,3 \pm 37,1$	$74,6 \pm 37,7$
$k_{42}$	$4,1 \pm 4,1$	$13,6 \pm 13,2$
$k_{43}$	$18,0 \pm 9,7$	$20,4 \pm 9,9$
$k_{1_E}$	$72,6 \pm 18,6$	$45,3 \pm 11,8$
$k_{2_E}$	$-39,9 \pm 15,3$	$12,1 \pm 4,6$
$k_{3_E}$	$-27,3 \pm 12,3$	$-31,5 \pm 8,8$
$k_{4_E}$	$50,9 \pm 18,7$	$41,7 \pm 13,4$
$k_{1_I}$	$14,7 \pm 67,4$	$12,7 \pm 62,2$
$k_{2_I}$	$5,0 \pm 41,0$	$16,6 \pm 29,1$
$k_{3_I}$	$44,2 \pm 40,8$	$47,1 \pm 39,8$
$k_{4_I}$	$-7,5 \pm 65,6$	$-8,8 \pm 61,4$
$n$	$0,4 \pm 0,2$	$0,4 \pm 0,1$

### 6.3.4 Přísuny radonu

Tab. 6.21: 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. 6.22: 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	$Q_1 \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}} \right]$	$Q_2 \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}} \right]$	$Q_3 \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}} \right]$	$Q_4 \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}} \right]$
(MDC, PCE, TCE, TMH)	$404 \pm 403$	$11 \pm 244$	$96 \pm 168$	$-101 \pm 633$
(MDC, MCH, TCE, TMH)	$401 \pm 378$	$31 \pm 192$	$100 \pm 162$	$-104 \pm 598$

Tab. 6.23: Průměrné přísluny radonu do zón pro všechny možné kombinace indikačních plynů vypočtené z průměrných hodnot vývojů OAR naměřených CANARY měřáky.

použité tracery	$Q_1 \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}} \right]$	$Q_2 \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}} \right]$	$Q_3 \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}} \right]$	$Q_4 \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}} \right]$
(MDC, PCE, TCE, TMH)	$446 \pm 260$	$-25 \pm 105$	$19 \pm 78$	$-150 \pm 382$
(MDC, MCH, TCE, TMH)	$455 \pm 250$	$-85 \pm 106$	$6 \pm 76$	$-140 \pm 365$

### 6.3.5 Zpětné ověření

#### OAR

Tab. 6.24: Průměrné OAR ve všech zónách vypočítané pomocí rovnice (4.7) za použití průtoků vzduchu z tab. 6.20 a příslunů radonu pocházejících od zdrojů RF 2000 (tab. 6.21) a průměrné OAR naměřené CANARY měřáky.

	$a_1 \left[ \text{Bq/m}^3 \right]$	$a_2 \left[ \text{Bq/m}^3 \right]$	$a_3 \left[ \text{Bq/m}^3 \right]$	$a_4 \left[ \text{Bq/m}^3 \right]$
(MDC, PCE, TCE, TMH)	$200 \pm 168$	$139 \pm 356$	$75 \pm 127$	$165 \pm 172$
(MDC, MCH, TCE, TMH)	$201 \pm 78$	$141 \pm 75$	$76 \pm 59$	$166 \pm 80$
naměřené	$210 \pm 21$	$97 \pm 10$	$72 \pm 7$	$139 \pm 14$

## Objemové průtoky vzduchu

Tab. 6.25: 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. 6.20, příslušných radonu pocházejících od zdrojů RF 2000 (tab. 6.21) a průměrných OAR naměřených CANARY měřáky. V druhých řádcích tabulek označených *měření* jsou pro srovnání uvedené příslušné průtoky vzduchu z tab. 6.20. 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	24 ± 14	13 ± 15	75 ± 33	51 ± 11	19 ± 62
měření	40 ± 13	12 ± 8	93 ± 34	45 ± 12	13 ± 62
	(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	99 ± 112	7 ± 37	-20 ± 102	25 ± 35	29 ± 45
měření	40 ± 15	4 ± 3	20 ± 13	12 ± 5	17 ± 29
	(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	142 ± 150	-40 ± 56	-7 ± 137	-15 ± 46	64 ± 60
měření	63 ± 26	6 ± 9	46 ± 24	-31 ± 9	47 ± 40
	(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	115 ± 69	-10 ± 26	23 ± 24	50 ± 21	-0 ± 63
měření	75 ± 38	14 ± 13	20 ± 10	42 ± 13	-9 ± 61

## 6.4 Objekt Anglická 574, Dobřichovice

### 6.4.1 Použitá měřidla

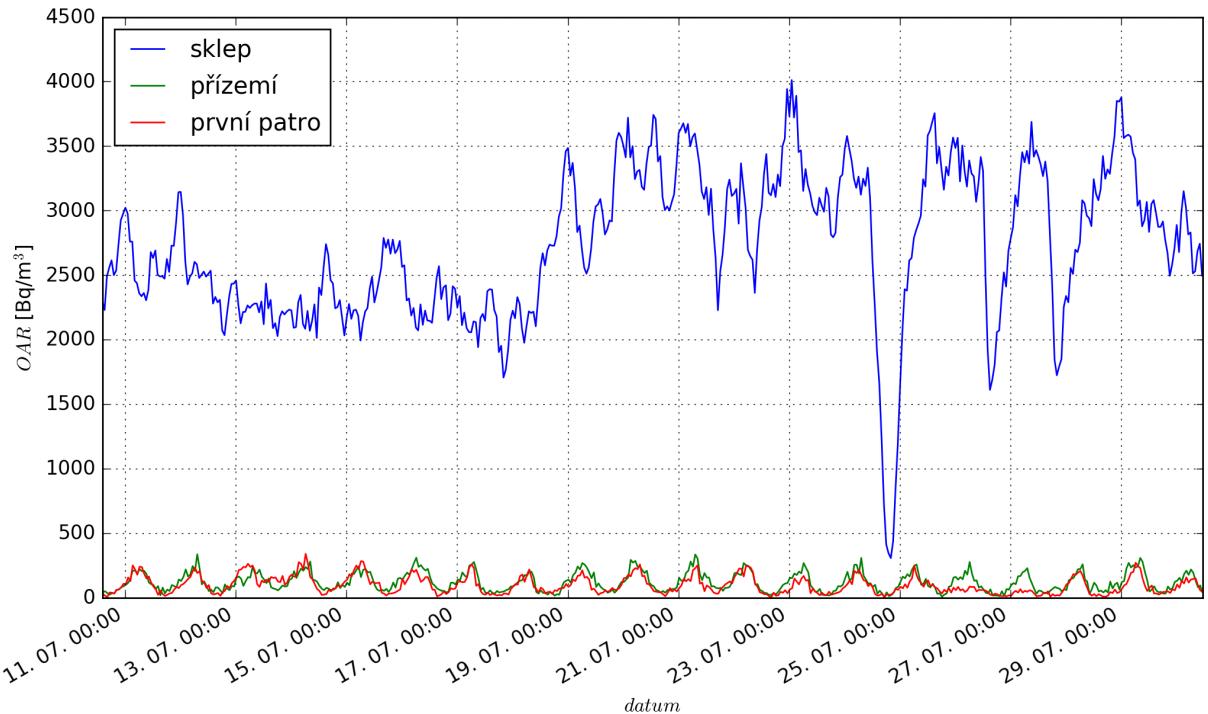
- 12 vyvýječů (4x MCH, 4x MDC, 4x PCH)
- 12 TD detektorů
- 2 blank TD detektory

- 4 CANARY monitory
- 4 TERA sondy
- 3 TESTO měřiče teploty a vlhkosti
- 2 zdroje radonu

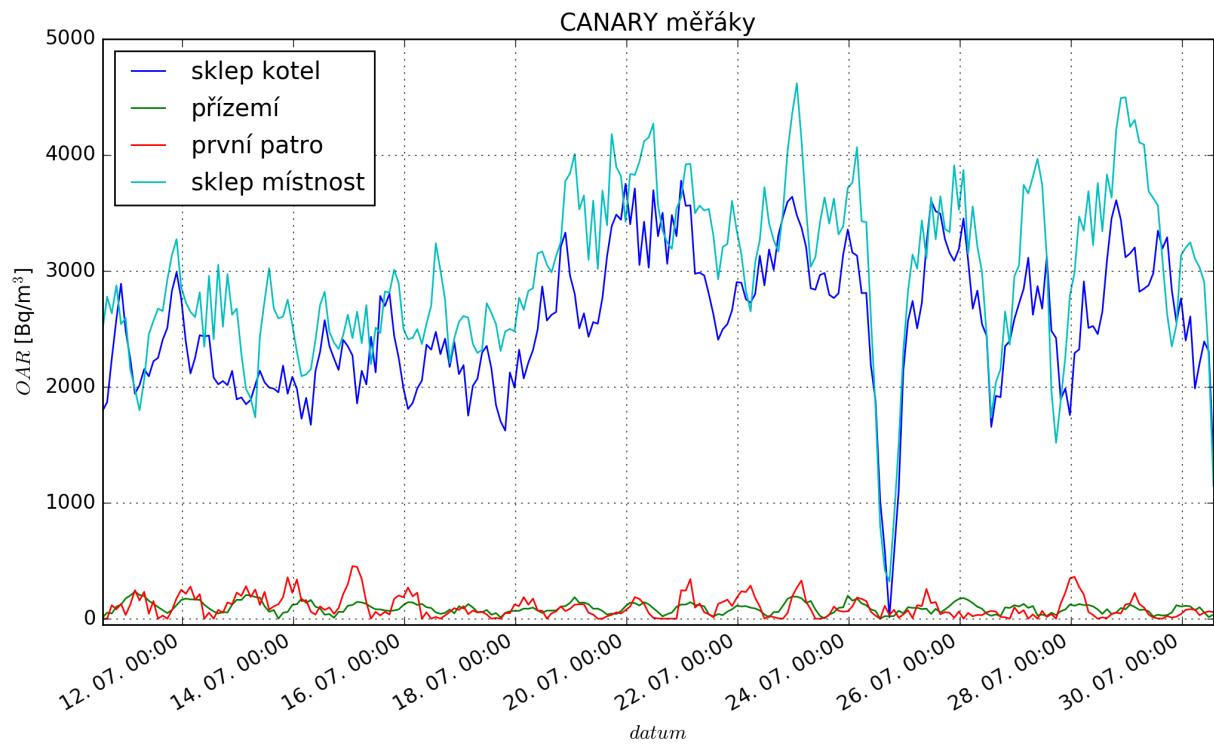
#### 6.4.2 Naměřené OAR, objemy a teploty

Tab. 6.26: Objemy všech podlaží objektu, průměrné teploty naměřené v každém podlaží TERA sondami, odhadnuté atmosférické tlaky v každém podlaží, průměrné OAR naměřené TERA sondami ( $OAR_T$ ) a CANARY měřáky ( $OAR_C$ ) a přiřazení číslování kompartmentů jednotlivým podlažím. OAR jsou uvedené v  $\text{Bq}/\text{m}^3$ .

podlaží	zóna	$V$ [ $\text{m}^3$ ]	$T$ [ $^\circ\text{C}$ ]	$p$ [kPa]	$OAR_T$	$OAR_C$
0	1	$66 \pm 13$	18,35	100	$2733 \pm 89$	$2770 \pm 196$
1	2	$108 \pm 21$	24,74	100	$121 \pm 17$	$92 \pm 9$
2	3	$93 \pm 19$	26,38	100	$97 \pm 19$	$98 \pm 10$



Obr. 6.6: Vývoj OAR naměřený TERA sondami po aplikování kalibračních konstant (tab. 6.4).



Obr. 6.7: Vývoj OAR naměřený CANARY měřáky.

### 6.4.3 Objemové průtoky vzduchu

Tab. 6.27: Přehled použitých indikačních plynů a umístění jejich vyvíječů v objektu. V posledním sloupci jsou celkové odpary plynů ze všech jim odpovídajících vyvíječů.

ozn.	podlaží	odpar [mg]
MCH	0	894± 9
MDC	1	1371±14
PCH	2	1191±12

Tab. 6.28: Odezvy TD detektorů  $R$  na všechny použité indikační plyny ve všech zónách.

plyn	zóna	$R$ [ng]
MCH	1	$1216,2 \pm 86,0$
	2	$89,1 \pm 5,4$
	3	$23,8 \pm 1,9$
MDC	1	$150,4 \pm 8,5$
	2	$1269,2 \pm 61,9$
	3	$173,8 \pm 9,4$
PCH	1	$9,3 \pm 0,5$
	2	$17,6 \pm 0,9$
	3	$1007,8 \pm 52,8$

Tab. 6.29: Objemové průtoky vzduchu mezi zónami v  $\text{m}^3/\text{hod}$  a výměna vzduchu  $n$  v  $\text{hod}^{-1}$ .

$k_{12}$	$2,32 \pm 0,38$
$k_{13}$	$0,29 \pm 0,09$
$k_{21}$	$2,96 \pm 0,48$
$k_{23}$	$4,25 \pm 0,65$
$k_{31}$	$0,18 \pm 0,03$
$k_{32}$	$0,55 \pm 0,08$
$k_{1_E}$	$22,05 \pm 2,53$
$k_{2_E}$	$25,24 \pm 2,80$
$k_{3_E}$	$30,74 \pm 3,07$
$k_{1_I}$	$21,52 \pm 2,60$
$k_{2_I}$	$29,59 \pm 2,94$
$k_{3_I}$	$26,93 \pm 3,14$
$n$	$0,29 \pm 0,04$

#### 6.4.4 Přísluny radonu

Tab. 6.30: Přesně definované přísluny 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. 6.31: Statistiky vypočítaných přísunů radonu  $Q$  do jednotlivých podlaží.

	$Q_0 \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}} \right]$	$Q_1 \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}} \right]$	$Q_2 \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}} \right]$
count	478	478	478
mean	1041	-22	19
min	-161	-188	-60
25%	869	-51	-6
50%	1044	-23	13
75%	1233	6	41
max	1662	93	153

Tab. 6.32: Průměrné přísuny radonu do všech podlaží z rovnovážného vyhodnocení za použití dat z TERA sond.

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

Tab. 6.33: Průměrné přísuny radonu do všech podlaží z rovnovážného vyhodnocení za použití dat z CANARY měřáků.

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

## 6.4.5 Zpětné ověření

### OAR

Tab. 6.34: Průměrné OAR ve všech podlažích vypočítané pomocí rovnice (4.7) za použití průtoků vzduchu z tab. 6.29 a přísunů radonu pocházejících od zdrojů RF 2000 (tab. 6.30) a průměrné OAR naměřené CANARY měřáky.

	$a_0 \left[ \text{Bq}/\text{m}^3 \right]$	$a_1 \left[ \text{Bq}/\text{m}^3 \right]$	$a_2 \left[ \text{Bq}/\text{m}^3 \right]$
vypočítané	$1200 \pm 360$	$84 \pm 29$	$22 \pm 8$
naměřené	$2770 \pm 196$	$92 \pm 9$	$98 \pm 10$

### Objemové průtoky vzduchu

Tab. 6.35: 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. 6.29), přísluní radonu pocházejících od zdrojů RF 2000 (tab. 6.30) a průměrných OAR naměřených CANARY měráky. V druhých řádcích tabulek označených *měření* jsou pro srovnání uvedené příslušné průtoky vzduchu z tab. 6.29. V (a) je zájmovou zónou první zóna, v (b) druhá zóna a v (c) třetí zóna.

(a)

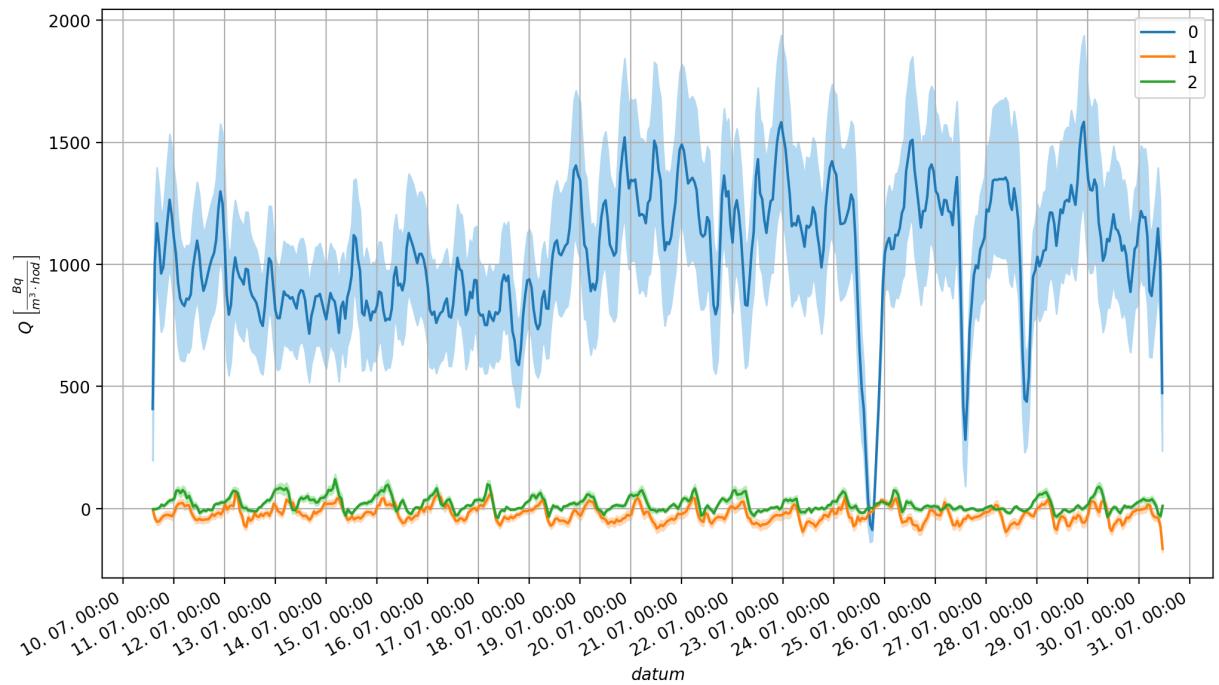
	$k_{12}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{13}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{1_E}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{1_I}$ [m <sup>3</sup> /hod]
zpětně	1,09 ± 0,16	1,00 ± 0,18	8,36 ± 0,67	7,83 ± 0,91
měření	2,32 ± 0,38	0,29 ± 0,09	22,05 ± 2,53	21,52 ± 2,60

(b)

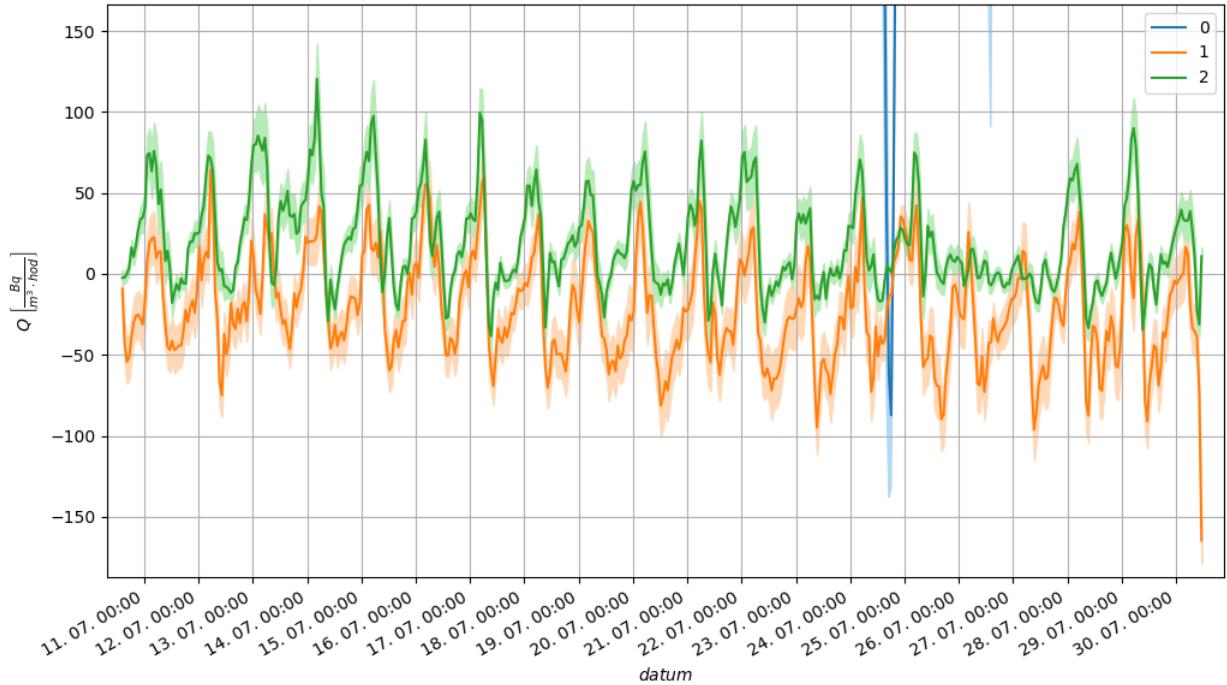
	$k_{21}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{23}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{2_E}$ [m <sup>3</sup> /hod]	$k_{2_I}$ [m <sup>3</sup> /hod]
zpětně	430,84 ± 102,85	25,42 ± 6,02	-386,76 ± 97,72	-382,41 ± 97,72
měření	2,96 ± 0,48	4,25 ± 0,65	25,24 ± 2,80	29,59 ± 2,94

(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



(a)



(b)

Obr. 6.8: V (a) jsou určené časové vývoje přísunů radonu do jednotlivých podlaží. V (b) jsou přiblížené přísuny radonu do přízemí a prvního patra. Oblasti označené zesvětlenou barvou značí nejistotu přísunů radonu při faktoru pokrytí  $k = 1$ .

# Seznam literatury

1. WIKIPEDIA, Otevřená encyklopedie. *Radon* [online]. 2019 [cit. 2019-08-12]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Radon>.
2. 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>.
3. 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>.
4. 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/>.
5. AlphaGUARD – Radon monitor [online]. 2016 [cit. 2019-07-29]. Dostupné z: <https://www.bertin-instruments.com/product/radon-professional-monitoring/radon-alphaguard/>.
6. A radon detector for everyone [online]. 2019 [cit. 2019-07-30]. Dostupné z: <https://www.airthings.com/en-us/home>.
7. 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/Metodika\\_Stanoveni\\_vymeny\\_vzduchu.pdf](https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/Metodika_Stanoveni_vymeny_vzduchu.pdf).
8. 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>.
9. 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](https://doi.org/10.3390/ijerph7093348).
10. LEGIBOT, Eric O. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties* [online] [cit. 2019-08-16]. Dostupné z: <https://pythonhosted.org/uncertainties/>.

11. 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>.
12. 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).
13. *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>.
14. *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).
15. DZHUNAKOVA, D.; IVANOVA, Kremena. *Radon Concentration PEMP-09E/05.03.2019 (report výsledků měření)*. 2019. National Radiation Protection Institute (NRPI).
16. *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>.
17. 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.