

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>4</b>
<b>I</b>	<b>Teoretická část</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Radonová problematika</b>	<b>6</b>
2.1	Použité kontinuální monitory radonu . . . . .	7
2.1.1	TERA sondy . . . . .	7
2.1.2	CANARY měřáky . . . . .	8
2.2	Průtokový radonový zdroj typu RF . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Měření intenzity větrání pomocí techniky indikačních plynů</b>	<b>11</b>
3.1	Přístroje a pomůcky . . . . .	11
3.2	Pracovní postup . . . . .	13
3.2.1	Příprava měření . . . . .	13
3.2.2	Přeprava . . . . .	14
3.2.3	Instalace měřidel . . . . .	14
3.2.4	Doba měření . . . . .	15
3.2.5	Sběr . . . . .	15
3.2.6	Vyhodnocení . . . . .	15
3.3	Určení průtoků vzduchu a výměny vzduchu objektu . . . . .	16
3.3.1	Hmotnostní koncentrace a emise indikačních plynů . . . . .	16
3.3.2	Bilanční rovnice . . . . .	17
3.3.3	Řešení bilančních rovnic . . . . .	17
3.3.4	Výměna vzduchu . . . . .	19
<b>4</b>	<b>Určení objemové rychlosti přísunu zdrojů radonu</b>	<b>20</b>
4.1	Určení nejistot přísunů radonu . . . . .	21
4.1.1	Jeden kompartment . . . . .	22
4.1.2	Dva kompartimenty . . . . .	23
4.1.3	$N$ kompartmentů . . . . .	23
4.2	Interpretace přísunu radonu . . . . .	23
4.3	Implementace . . . . .	24

4.3.1	Rovnovážný stav . . . . .	24
4.3.2	Dynamické měření . . . . .	24
<b>II</b>	<b>Praktická část</b>	<b>25</b>
<b>5</b>	<b>Měření v rovnovážném stavu</b>	<b>17</b>
5.1	Objekt č. 1 . . . . .	18
5.2	Objekt č. 2 . . . . .	19
5.3	Objekt č. 3 . . . . .	20
5.4	Objekt č. 4 . . . . .	20
5.5	Objekt č. 8 . . . . .	21
5.6	Diskuze . . . . .	22
5.7	Závěr . . . . .	23
<b>6</b>	<b>Dynamická měření</b>	<b>25</b>
6.1	TERA sondy . . . . .	25
6.2	Objekt Skála 75, okr. Havlíčkův Brod . . . . .	27
6.2.1	Použitá měřidla . . . . .	27
6.2.2	Naměřené OAR . . . . .	30
6.2.3	Objemové průtoky vzduchu . . . . .	31
6.2.4	Přísluny radonu . . . . .	32
6.3	Objekt Hálková 980, Humpolec . . . . .	41
6.3.1	Použitá měřidla . . . . .	41
6.4	Objekt Anglická 574, Dobřichovice . . . . .	41
6.4.1	Použitá měřidla . . . . .	41
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>42</b>
7.1	Dotazy . . . . .	42
7.2	TO DO . . . . .	42
<b>Seznam literatury</b>		<b>43</b>
<b>A</b>	<b>Python skript pro symbolické určení nejistot příslunů radonu</b>	<b>45</b>
<b>B</b>	<b>Python skript pro vyhodnocení dynamického měření příslunů radonu</b>	<b>47</b>
<b>C</b>	<b>Přílohy k objektu Skála 75, okr. Havlíčkův Brod</b>	<b>48</b>
C.1	Schéma objektu . . . . .	48
C.2	Naměřené vývoje OAR, teplot a relativní vlhkosti vzduchu . . . . .	48

Tab. 1: Značení a jednotky používaných veličin.

$N$	počet kompartmentů/zón	[ $\cdot$ ]
$N_p$	počet použitých indikačních plynů	[ $\cdot$ ]
$R_{ki}$	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]
$p_i$	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. $k_{i_E}$	[m <sup>3</sup> /hod]
$k_{N+1,i}$	infiltrace $i$ -té zóny, ozn. $k_{i_I}$	[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	$\left[ \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}} \right]$

# **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 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., [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.

## 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 příslušejících  $^{218}\text{Po}$ .

RaA+RaC pomalejší, ale přesnější způsob. OAR se počítá z impulzů příslušejících  $^{218}\text{Po}$  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 nějakým 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 jej  $n$ . 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 (imp/hod)/(Bq/m<sup>3</sup>), ale když jsem zkoušel vypočítat citlivost z naměřených dat (jako podíl  $n$  a OAR), tak mi pro každou zaznamenanou hodnotu vycházela 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 průměrnou hodnotu OAR každou hodinu. Tato hodinová 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 [6].

PowerSupply	3 AAA alkaline batteries (LR03)
Dimensions	2 years battery life
Weight	120 × 69 × 25.5 mm <sup>3</sup>
Operation Environment	130 g
Measurement Range	Temperature: +4°C to +40°C Relative humidity: < 85 %
	Lowest detection limit: 0 Bq/m <sup>3</sup> Upper display limit: 9999 Bq/m <sup>3</sup>
<b>Accuracy/Precision at 200 Bq/m<sup>3</sup> (Typical):</b>	
7 days	10 %
2 months	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
Radiové rozhraní	868 MHz
Max. počet prvků v měřící síti	16
Vzdálenost mezi sondou a centrálou (dosah)	600 m ve volném prostoru, v budově závisí na počtu zdí, materiálu atd.
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 centrále	100 dní (1 sonda, záznamy 1 hodina)
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
Vestavěný displej	grafický, 128 × 64 bodů, jantarové podsvícení

## 2.2 Průtokový radonový zdroj typu RF

# 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. (SÚRO) 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 měřeních provedených v rámci této práce. Principem techniky je detekce vhodně použitých indikačních plynů, jejichž zdroje jsou rozmístěny 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 desorpциí. 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 vyvýječů s rozlišením  $5\mu\text{l}$ ; přesné váhy SARTORIUS s přesností na desetinu miligramu pro měření a kontrolu emise indikačního plynu z vyvýječů; 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 patrami 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 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.

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

Přehledněji a korektněji jsou tyto veličiny s 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:

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

$$= \frac{R_{ki}}{U_k \cdot dT} \frac{M_k \cdot p_i}{R \cdot T_i}, \quad (3.3)$$

kde bylo využito relace

$$V_i^{mol} = \frac{R \cdot T_i}{p_i}. \quad (3.4)$$

V tab. 3.1 jsou uvedeny molekulové hmotnosti a odběrové rychlosti všech použitých indikačních plynů v rámci tohoto výzkumného úkolu.

### 3.3.2 Bilanční rovnice

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

$$\sum_{j=1, j \neq i}^N C_{kj} k_{ji} - \sum_{j=1, j \neq i}^{N+1} C_{ki} k_{ij} = -m_{ki}, \quad (3.5)$$

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 (3.5) řešit analyticky. Uvedeme řešení pro  $N = 1, 2$ :

- $N = 1$

$$k_E = \frac{m}{C}. \quad (3.6)$$

- $N = 2$

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

$$k_{12} = \frac{m_{22}C_{12}}{C_{11}C_{22} - C_{12}C_{21}}, \quad (3.8)$$

$$k_{1E} = k_{21} \frac{C_{22}}{C_{21}} - k_{12}, \quad (3.9)$$

$$k_{2E} = k_{12} \frac{C_{11}}{C_{12}} - k_{21}. \quad (3.10)$$

Pro vyšší  $N$  nabývá řešení rychle na složitosti. Pro zjednodušení jsem napsal v Pythonu skript využívající symbolického programování pro vyřešení soustavy pro obecné  $N$ . Naneštěstí

je velmi pomalý, pro  $N = 3$  trvá výpočet přibližně 18 vteřin a pro  $N = 4$  jsem výpočet přerušil, protože trval příliš dlouho.

K propagaci nejistot od vstupních veličin k průtokům vzduchu jsem využil pythonovský balíček [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 (3.5) do tvaru

$$X\beta = y, \quad (3.11)$$

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:

$$\beta = \begin{pmatrix} k_{12} \\ k_{13} \\ \vdots \\ k_{1,N+1} \\ k_{21} \\ k_{23} \\ \vdots \\ k_{2,N+1} \\ \vdots \\ k_{N,N-1} \\ k_{N,N+1} \end{pmatrix}, \quad y = - \begin{pmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ \vdots \\ m_{1,N+1} \\ m_{21} \\ m_{22} \\ \vdots \\ m_{2,N+1} \\ \vdots \\ m_{N,N} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -m_{11} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ -m_{22} \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ -m_{N,N} \end{pmatrix}. \quad (3.12)$$

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

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

$$X_{N_p \cdot k - N_p + j, m} = C_{ki}. \quad (3.14)$$

Pokud řádkový index  $(N_p \cdot k - N_p + i, \text{ resp. } N_p \cdot k - N_p + j)$  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 [11].

Nevýhodou této metody je, že nedokáže určit nejistoty vypočtených průtoků vzduchu při  $N = N_p$ .

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 v této práci neuvádím, jelikož využívají podobných principů jako skripty určené pro výpočet přísluně radonu do zón (viz další kapitola).

### 3.3.4 Výměna vzduchu

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

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

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).

## 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 (objemová aktivita radonu) 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.

Objemové koncentrace 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 vzniknuvší 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 rovnic (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  $\overline{Q_1}, \overline{Q_2}, \dots, \overline{Q_N}$ . V tomto případě provádíme **měření přísunu radonu v rovnovážném stavu**.

Průtoky vzduchu a exfiltrace se měří pomocí metody popsáne 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 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 přísunů radonu

Přísun 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.

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

$$= f(\vec{x}) , \quad (4.9)$$

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

$$\Sigma_{ij}^Q = \sum_k^n \sum_l^n \frac{\partial Q_i}{\partial x_k} \frac{\partial Q_j}{\partial x_l} \Sigma_{kl}^x, \quad (4.10)$$

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 a nebo nevíme, jak jejich závislost určit, pak jsou nediagonální prvky  $\Sigma^x$  nulové a předchozí vztah se zjednoduší na

$$\Sigma_{ij}^Q = \sum_k^n \frac{\partial Q_i}{\partial x_k} \frac{\partial Q_j}{\partial x_k} \Sigma_k^x. \quad (4.11)$$

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 (4.11).

Výpočet nejistot příslunů radonu se značně zesložituje se zvyšujícím se počtem kompartmentů  $N$ , a proto jsem napsal skript v Pythonu, který pomocí modulu 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  $a_i$  lze nejistotu získat aplikováním vzorce (4.11) na časovou derivaci funkce, jenž představuje proklad naměřených hodnot OAR (chceme znát pouze nejistotu jedné veličiny, proto je výsledkem číslo představující rozptyl  $a_i$ ).

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

$$\begin{aligned} \Sigma_{11}^Q = & \sigma^2(a_1) + \sigma^2(a_1)(\lambda + k_{12}/V_1)^2 + \frac{1}{V_1^2} (a_1^2 \sigma^2(k_{12}) + a_2^2 \sigma^2(k_{21}) + k_{21}^2 \sigma^2(a_2)) + \\ & + \frac{1}{V_1^4} \sigma^2(V_1)(a_1 k_{12} - a_2 k_{21})^2, \end{aligned} \quad (4.12)$$

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

### 4.1.2 Dva kompartmenty

Kovarianční matice příslunů radonu má následující tvar

$$\Sigma^Q = \begin{pmatrix} \Sigma_{11}^Q & \Sigma_{12}^Q \\ \Sigma_{12}^Q & \Sigma_{22}^Q \end{pmatrix}. \quad (4.13)$$

Její diagonální prvky lze vypočítat z

$$\begin{aligned} \Sigma_{ii}^Q = & \sigma^2(\dot{a}_i) + \sigma^2(a_i) \left( \lambda + \frac{1}{V_i} \sum_{j=1, j \neq i}^3 k_{ij} \right)^2 + \frac{1}{V_i^2} \sum_{j=1, j \neq i}^3 (\sigma^2(a_j) k_{ji}^2 + \\ & + \sigma^2(k_{ij}) a_i^2 + \sigma^2(k_{ji}) a_j^2) + \frac{\sigma^2(V_i)}{V_i^4} \sum_{j=1}^3 (a_i k_{ij} - a_j k_{ji})^2. \end{aligned} \quad (4.14)$$

Jediný nediagonální prvek je určen vztahem

$$\begin{aligned} \Sigma_{12}^Q = & -\sigma^2(a_1) \frac{k_{12}}{V_2} (\lambda + (k_{12} + k_{13})/V_1) - \sigma^2(a_2) \frac{k_{21}}{V_1} (\lambda + (k_{21} + k_{23})/V_2) + \\ & + \sigma^2(a_3) \frac{k_{31} k_{32}}{V_1 V_2} - \sigma^2(k_{12}) \frac{a_1^2}{V_1 V_2} - \sigma^2(k_{21}) \frac{a_2^2}{V_1 V_2}. \end{aligned} \quad (4.15)$$

### 4.1.3 N kompartmentů

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

$$\begin{aligned} \Sigma_{ii}^Q = & \sigma^2(\dot{a}_i) + \sigma^2(a_i) \left( \lambda + \frac{1}{V_i} \sum_{j=1, j \neq i}^{N+1} k_{ij} \right)^2 + \frac{1}{V_i^2} \sum_{j=1, j \neq i}^{N+1} (\sigma^2(a_j) k_{ji}^2 + \\ & + \sigma^2(k_{ij}) a_i^2 + \sigma^2(k_{ji}) a_j^2) + \frac{\sigma^2(V_i)}{V_i^4} \sum_{j=1}^{N+1} (a_i k_{ij} - a_j k_{ji})^2. \end{aligned} \quad (4.16)$$

Nediagonální prvky:

$$\begin{aligned} \Sigma_{ij}^Q = & -\sigma^2(a_i) \frac{k_{ij}}{V_j} \left( \lambda + \frac{1}{V_i} \sum_{l=1, l \neq i}^{N+1} k_{il} \right) - \sigma^2(a_j) \frac{k_{ji}}{V_i} \left( \lambda + \frac{1}{V_j} \sum_{l=1, l \neq j}^{N+1} k_{jl} \right) + \\ & + \frac{1}{V_i V_j} \sum_{l=1, l \neq i, j}^{N+1} \sigma^2(a_l) k_{li} k_{lj} - \sigma^2(k_{ij}) \frac{a_i^2}{V_i V_j} - \sigma^2(k_{ji}) \frac{a_j^2}{V_i V_j}. \end{aligned} \quad (4.17)$$

## 4.2 Interpretace příslunu radonu

Veličina  $Q_i$ , tj. příslun 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. Zde jako zóny můžeme brát v podstatě cokoliv za podmínky, že je koncentrace radonu ve všech zónách víceméně homogenní. 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, uranová halda poblíž objektu...).

## 4.3 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 s několika malými obměnami, a proto ho v této práci neuvádíme.

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

### 4.3.1 Rovnovážný stav

### 4.3.2 Dynamické měření

# 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.  $T$  značí dobu měření ve dnech (zaokrouhleno na celé dny včetně počátečního a posledního dne).

Objekt	Rozsah měření	$T$ [dny]	Typ objektu
Skála 75, okr. Havlíčkův Brod	23. 5. – 5. 6. 2019	14	chata
Hálková 980, Humpolec	5. 6. – 20. 6. 2019	16	byt
Anglická 574, Dobřichovice	9. 7. – 30. 7. 2019	22	rodinný dům

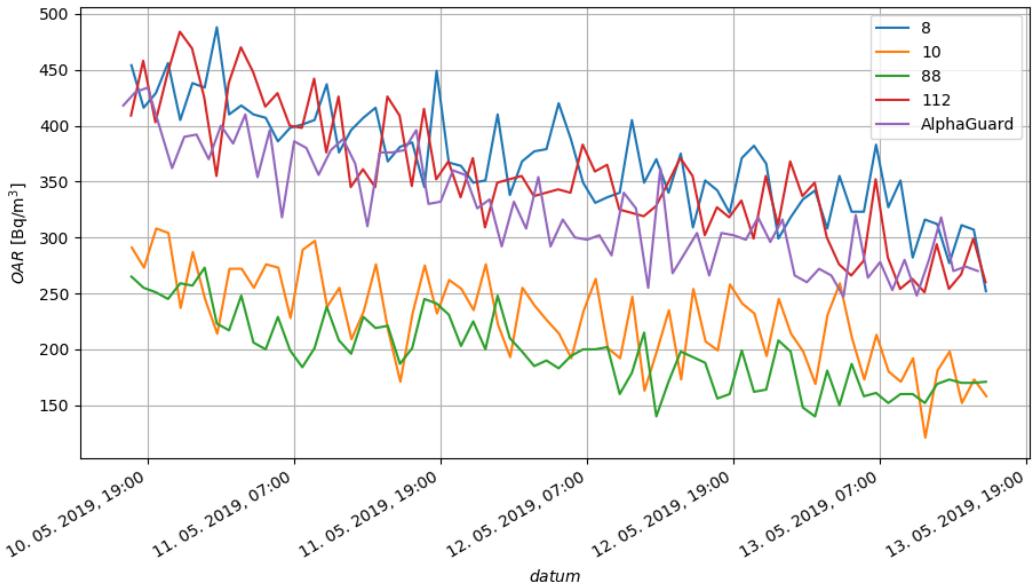
Vývoj OAR v čase v jednotlivých zónách byl měřen primárně *TERA sondami* [4] a sekundárně měřiči radonu *CANARY* [6]. CANARY měřáky byly použity jako záložní systém, tj. pokud by v některé zóně TERA sonda selhala, pak by se OAR v této zóně brala z příslušného CANARY měřáku.

Dále bylo potřeba měřit vývoj teploty, což je znalost nutná při vyhodnocování množství nasorbovaných indikačních plynů v TD detektorech. K tomuto účelu byly použity dataloggeru teploty a vlhkosti *testo 174H* [12].

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.

## 6.1 TERA sondy

Pro dynamická měření přísnů 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* [5]. Hodnota OAR z AlphaGuardu byla brána jako reálná hodnota OAR. V obr. 6.1 jsou zobrazeny naměřené vývoje OAR v čase ze zkoumaných sond a z Alphaguardu, v tab. 6.2 jsou k vidění nejdůležitější statistiky naměřených dat z každého monitoru.



Obr. 6.1: Vývoj OAR naměřený zkoumanými sondami a referenčním AlphaGuardem.

Tab. 6.2: Statistiky vývojů OAR naměřených TERA sondami a AlphaGuardem v  $\text{Bq}/\text{m}^3$ .

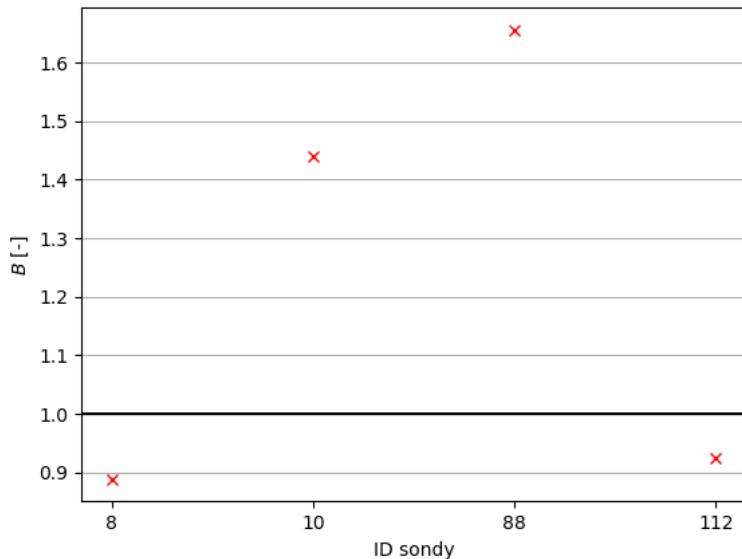
ID sondy	count	mean	std	min	25%	50%	75%	max
8	71	369	47	252	337	368	405	488
10	71	228	41	121	198	232	256	308
88	71	198	33	140	170	198	220	273
112	71	354	58	251	318	349	399	484
AlphaGuard	71	328	50	247	285	318	373	434

Pro opravu odezv byla zavedena pro každou sondu tzv. bulharská konstanta, která je definována následovně:

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

kde  $OAR_A$  je hodnota z AlphaGuardu a  $OAR_T$  je hodnota z příslušné TERA sondy. Pro získání věrohodné hodnoty koncentrace radonu z naměřené hodnoty danou sondou pak stačí tuto naměřenou hodnotu přenásobit  $B$  náležející této sondě.

Za  $OAR_A$ , resp.  $OAR_T$  byly brány průměry naměřených OAR AlphaGuardem a danou Tera sondou. Relativní nejistoty bulharských konstant byly odhadnuty na 10 %. Určené bulharské konstanty všech sond jsou k nahlédnutí na obr. 6.2 a v tab. 6.3.



Obr. 6.2: Bulharské konstanty proměřených TERA sond. Černou čárou je vyznačen ideální případ, kdy se odezva sondy rovná skutečné OAR (resp. OAR naměřené AlphaGuardem).

Tab. 6.3: Bulharské konstanty TERA sond odvozené od referenčního AlphaGuardu. Skutečná hodnota  $OAR$  se vypočte ze vztahu  $OAR = B \cdot OAR_T$ , kde  $OAR_T$  je naměřená obj. aktivita radonu danou TERA sondou. Nejistota bulharských konstant byla odhadnuta na 10 %.

ID sondy	$B$
8	0,889 +/- 0,089
10	1,440 +/- 0,140
88	1,655 +/- 0,166
112	0,925 +/- 0,093

## 6.2 Objekt Skála 75, okr. Havlíčkův Brod

### 6.2.1 Použitá měřidla

- 14 vyvíječů (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

Tab. 6.4: Objemy podlaží objektu, teploty naměřené v každém podlaží dataloggeru testo 174H, odhadnuté atmosférické tlaky v každém podlaží a přiřazení číslování kompartmentů jednotlivým podlažím.

podlaží	$V$ [m <sup>3</sup> ]	$T$ [°C]	$p$ [kPa]	zóna
0	39±5	12,22	100	1
1	127±15	16,12	100	2
2	70±9	17,57	100	3

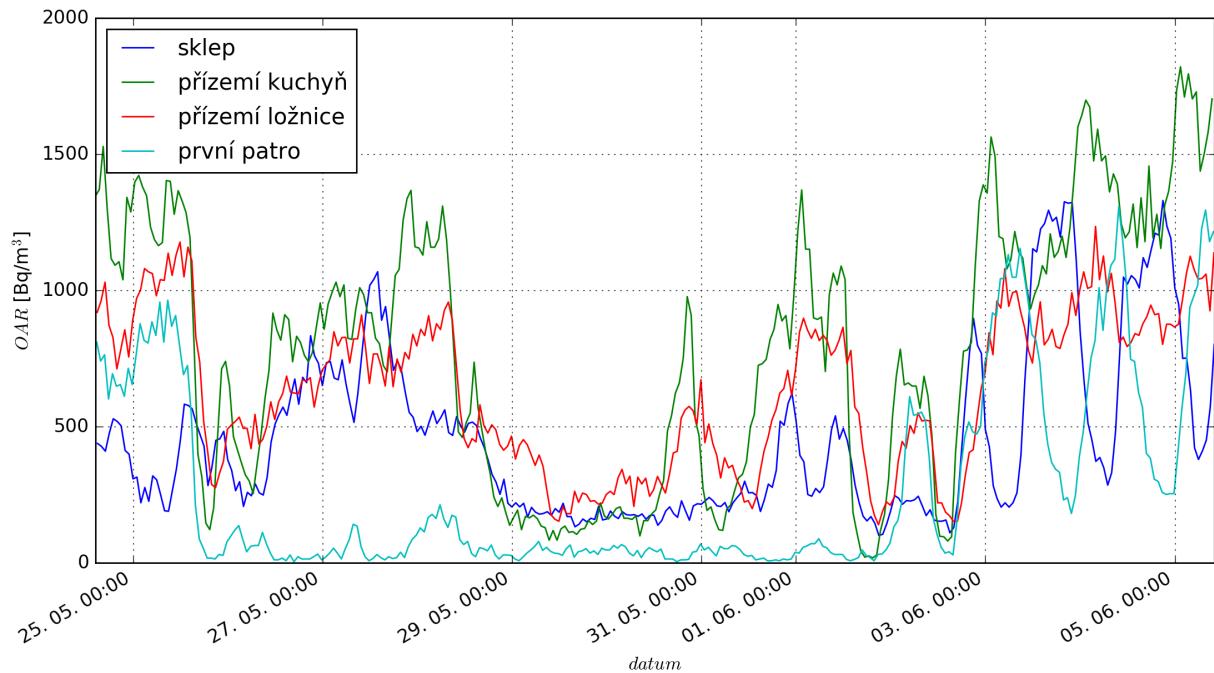
Tab. 6.5: Přehled použitých indikačních plynů.  $M$  je molekulová hmotnost příslušného plynu,  $U$  je jeho odběrová rychlosť. Dále je uvedeno, v jakém podlaží byly vyvíječe plynů umístěny s jejich celkovými odpary za celou dobu měření. Význam označení podlaží je vysvětlen v tab. 5.2.

ozn.	podlaží	odpar [mg]	$M$ [g/mol]	$U$ $\left[ \frac{\text{ng}}{\text{ppm} \cdot \text{min}} \right]$
TMH	0	192,50	450,0	8,000
TCE	0	193,55	130,4	1,000
MCH	1	472,27	350,0	8,000
MDC	1	497,27	400,0	8,000
PCH	2	230,88	450,0	8,000
PCE	2	96,54	165,8	1,385

Tab. 6.6: 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
	2	2,6±0,1
	3	136,9±4,1

### 6.2.2 Naměřené OAR



Obr. 6.3: Hodnoty OAR naměřené TERA sondami po aplikování bulharských konstant (tab. 6.3). Pro další vyhodnocování byly OAR naměřené v přízemí v kuchyni a v ložnici zprůměrovány.

### 6.2.3 Objemové průtoky vzduchu

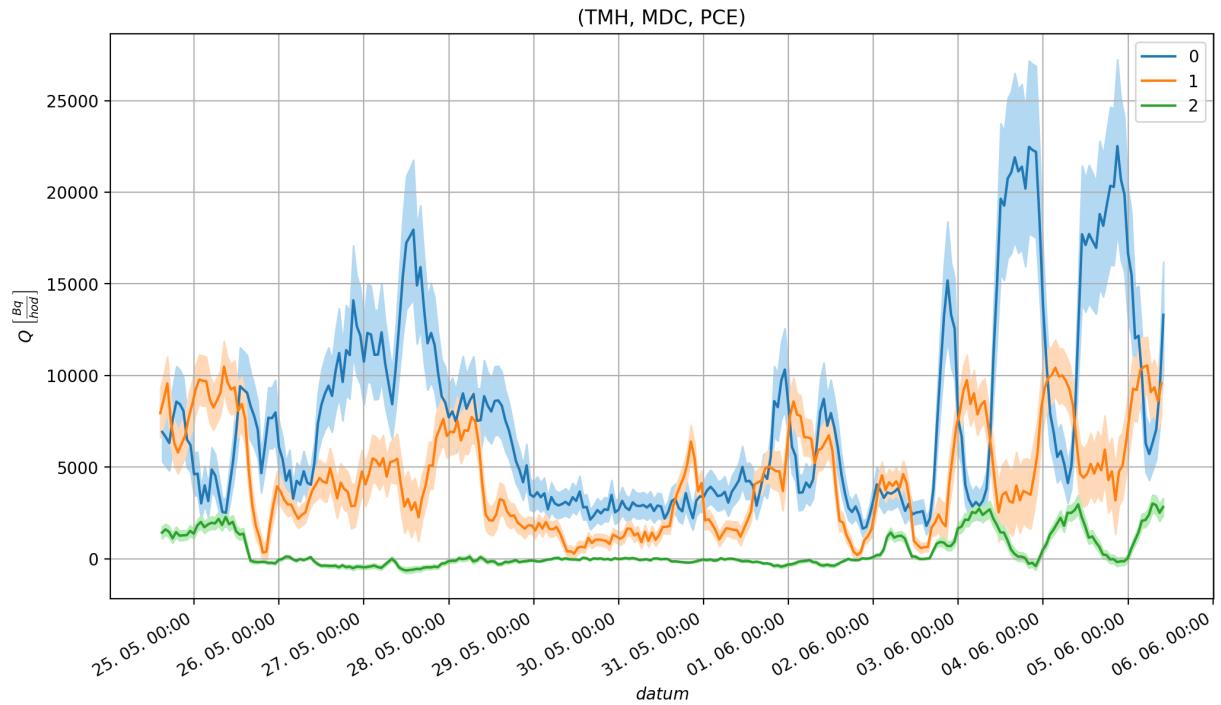
Tab. 6.7: Objemové průtoky vzduchu v m<sup>3</sup>/hod pro všechny kombinace aplikovaných indikačních plynů.  $n$  je výměna vzduchu vypočtená ze vztahu (3.15), [n] = 1/hod.

	(TMH, MDC, PCE)	(TMH, MDC, PCH)	(TMH, MCH, PCE)	(TMH, MCH, PCH)
$k_{12}$	$4.139 \pm 1.044$	$3.771 \pm 0.994$	$3.445 \pm 0.874$	$3.128 \pm 0.830$
$k_{13}$	$0.478 \pm 0.133$	$1.892 \pm 0.533$	$0.495 \pm 0.136$	$1.956 \pm 0.541$
$k_{21}$	$0.656 \pm 0.152$	$0.574 \pm 0.137$	$0.525 \pm 0.126$	$0.455 \pm 0.114$
$k_{23}$	$0.202 \pm 0.030$	$0.800 \pm 0.119$	$0.167 \pm 0.026$	$0.660 \pm 0.104$
$k_{31}$	$-0.019 \pm 0.005$	$0.854 \pm 0.233$	$-0.015 \pm 0.004$	$0.881 \pm 0.237$
$k_{32}$	$0.231 \pm 0.034$	$1.882 \pm 0.282$	$0.192 \pm 0.029$	$1.561 \pm 0.240$
$k_{1_E}$	$12.492 \pm 2.813$	$11.640 \pm 2.705$	$13.100 \pm 2.886$	$12.163 \pm 2.768$
$k_{2_E}$	$7.169 \pm 0.789$	$6.809 \pm 0.790$	$5.990 \pm 0.690$	$5.674 \pm 0.686$
$k_{3_E}$	$1.930 \pm 0.212$	$5.749 \pm 0.804$	$1.964 \pm 0.213$	$6.010 \pm 0.804$
$k_{1_I}$	$16.471 \pm 3.007$	$15.875 \pm 2.943$	$16.530 \pm 3.022$	$15.912 \pm 2.952$
$k_{2_I}$	$3.657 \pm 1.318$	$2.530 \pm 1.313$	$3.045 \pm 1.122$	$2.099 \pm 1.114$
$k_{3_I}$	$1.462 \pm 0.255$	$5.793 \pm 1.039$	$1.478 \pm 0.256$	$5.836 \pm 1.032$
$n$	$0.091 \pm 0.014$	$0.102 \pm 0.015$	$0.089 \pm 0.014$	$0.101 \pm 0.015$

	(TCE, MDC, PCE)	(TCE, MDC, PCH)	(TCE, MCH, PCE)	(TCE, MCH, PCH)
$k_{12}$	$3.330 \pm 0.551$	$2.965 \pm 0.519$	$2.774 \pm 0.468$	$2.462 \pm 0.438$
$k_{13}$	$0.462 \pm 0.081$	$1.828 \pm 0.322$	$0.476 \pm 0.082$	$1.879 \pm 0.326$
$k_{21}$	$0.215 \pm 0.034$	$0.188 \pm 0.032$	$0.172 \pm 0.030$	$0.149 \pm 0.028$
$k_{23}$	$0.203 \pm 0.029$	$0.802 \pm 0.118$	$0.168 \pm 0.026$	$0.662 \pm 0.104$
$k_{31}$	$-0.006 \pm 0.001$	$0.279 \pm 0.060$	$-0.005 \pm 0.001$	$0.288 \pm 0.061$
$k_{32}$	$0.230 \pm 0.034$	$1.922 \pm 0.283$	$0.191 \pm 0.029$	$1.595 \pm 0.241$
$k_{1_E}$	$1.805 \pm 0.627$	$0.865 \pm 0.619$	$2.329 \pm 0.606$	$1.303 \pm 0.596$
$k_{2_E}$	$7.579 \pm 0.796$	$7.166 \pm 0.798$	$6.322 \pm 0.699$	$5.960 \pm 0.695$
$k_{3_E}$	$1.918 \pm 0.212$	$6.281 \pm 0.810$	$1.954 \pm 0.213$	$6.565 \pm 0.810$
$k_{1_I}$	$5.388 \pm 0.840$	$5.191 \pm 0.872$	$5.412 \pm 0.771$	$5.207 \pm 0.812$
$k_{2_I}$	$4.436 \pm 0.970$	$3.269 \pm 1.000$	$3.696 \pm 0.843$	$2.714 \pm 0.863$
$k_{3_I}$	$1.478 \pm 0.231$	$5.852 \pm 0.926$	$1.497 \pm 0.232$	$5.908 \pm 0.914$
$n$	$0.048 \pm 0.006$	$0.061 \pm 0.007$	$0.045 \pm 0.005$	$0.059 \pm 0.007$

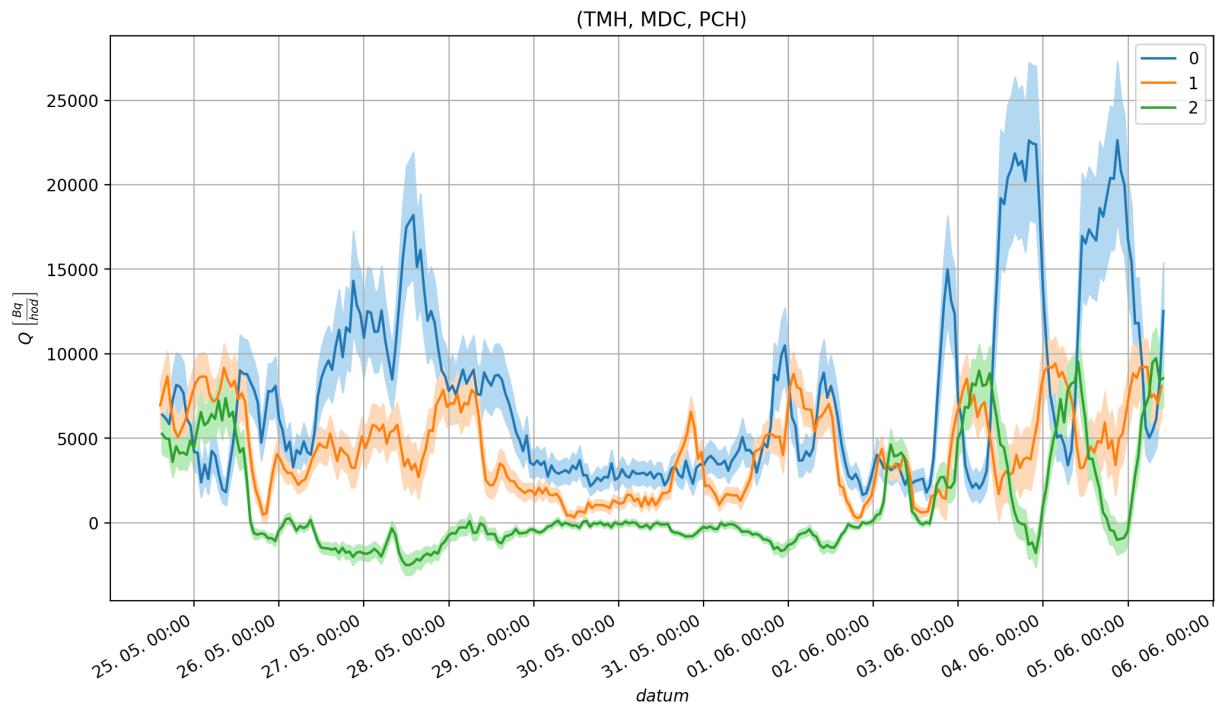
### 6.2.4 Přísuny radonu



Obr. 6.4: Určený časový vývoj přísunů radonu do jednotlivých podlaží. Nad obrázkem je uvedena kombinace tří použitých indikačních plynů. Oblasti označené zesvětlenou barvou značí nejistotu přísunů radonu při faktoru pokrytí  $k = 1$ .

Tab. 6.8: Statistiky vypočítaných přísunů radonu  $Q$  do jednotlivých podlaží při stejné kombinaci použitých plynů jako v obr. nad touto tabulkou.

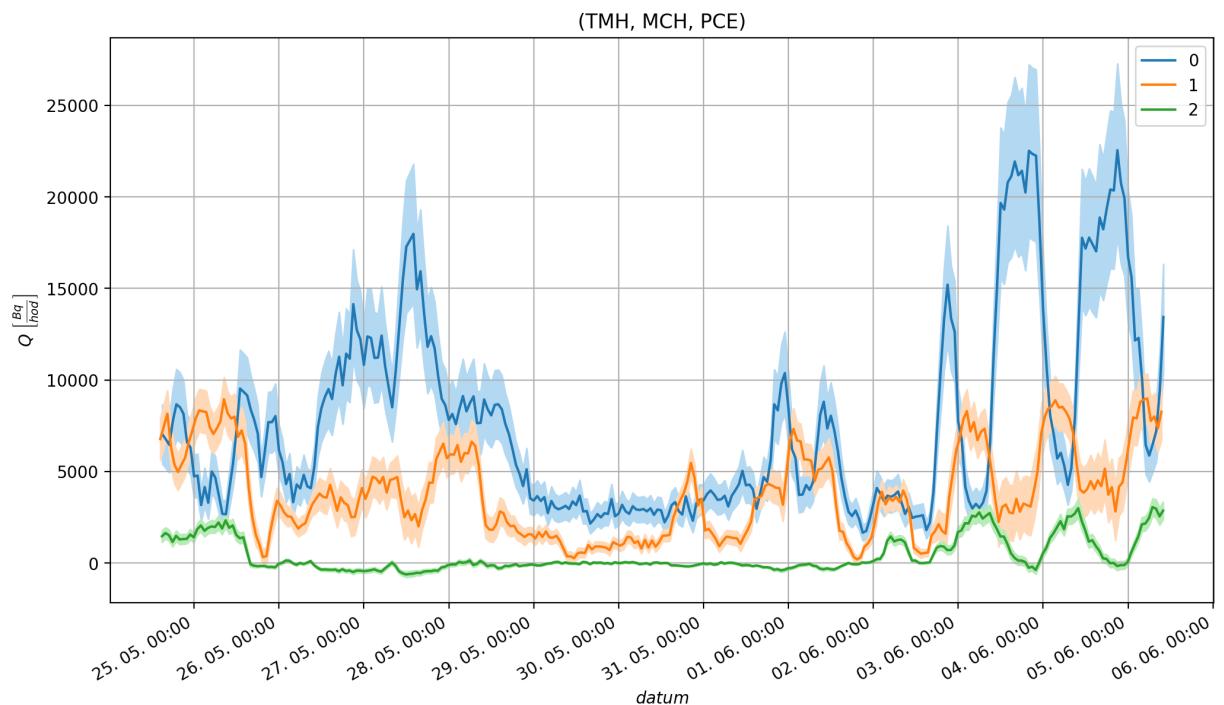
	$Q_0$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{hod}}$ ]	$Q_1$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{hod}}$ ]	$Q_2$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{hod}}$ ]
count	284	284	284
mean	7425	4412	370
min	1571	205	-639
25%	3284	1925	-180
50%	5881	4038	-25
75%	9487	6465	837
max	22435	10530	3011



Obr. 6.5: Určený časový vývoj přísnů radonu do jednotlivých podlaží. Nad obrázkem je uvedena kombinace tří použitých indikačních plynů. Oblasti označené zesvětlenou barvou značí nejistotu přísnů radonu při faktoru pokrytí  $k = 1$ .

Tab. 6.9: Statistiky vypočítaných přísnů radonu  $Q$  do jednotlivých podlaží při stejné kombinaci použitých indikačních plynů jako v obr. nad touto tabulkou.

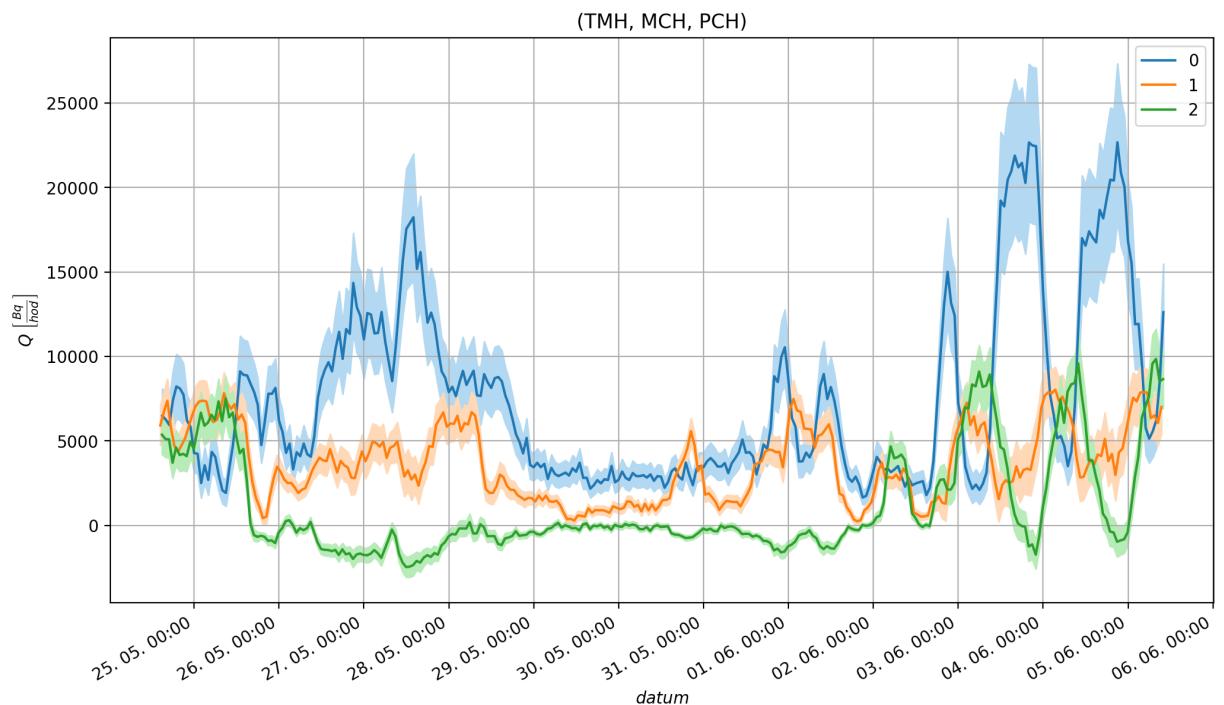
	$Q_0$ [Bq/hod]	$Q_1$ [Bq/hod]	$Q_2$ [Bq/hod]
count	284	284	284
mean	7335	4242	1025
min	1574	267	-2529
25%	3242	1930	-757
50%	5518	3989	-205
75%	9535	6370	2427
max	22552	9413	9711



Obr. 6.6: Určený časový vývoj přísunů radonu do jednotlivých podlaží. Nad obrázkem je uvedena kombinace tří použitých indikačních plynů. Oblasti označené zesvětlenou barvou značí nejistotu přísunů radonu při faktoru pokrytí  $k = 1$ .

Tab. 6.10: Statistiky vypočítaných přísunů radonu  $Q$  do jednotlivých podlaží při stejné kombinaci použitých indikačních plynů jako v obr. nad touto tabulkou.

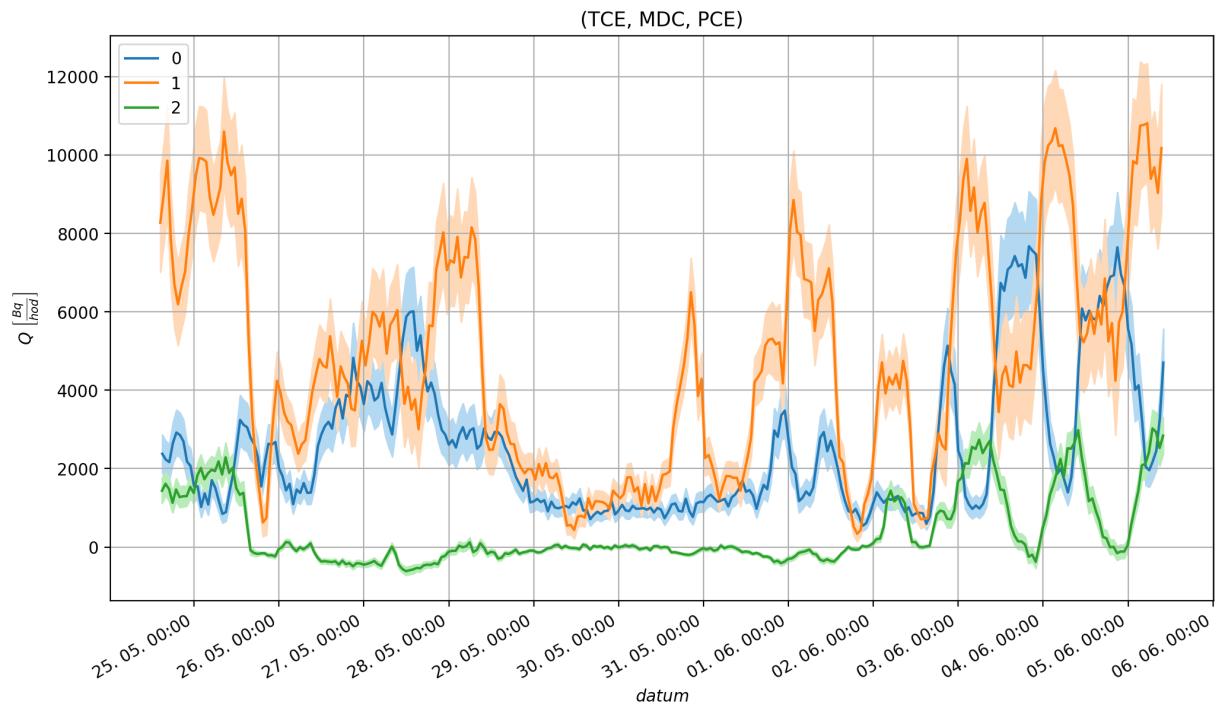
	$Q_0$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{hod}}$ ]	$Q_1$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{hod}}$ ]	$Q_2$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{hod}}$ ]
count	284	284	284
mean	7486	3787	386
min	1575	181	-630
25%	3324	1655	-168
50%	5976	3479	-17
75%	9547	5525	843
max	22472	8974	3046



Obr. 6.7: Určený časový vývoj přísunů radonu do jednotlivých podlaží. Nad obrázkem je uvedena kombinace tří použitých indikačních plynů. Oblasti označené zesvětlenou barvou značí nejistotu přísunů radonu při faktoru pokrytí  $k = 1$ .

Tab. 6.11: Statistiky vypočítaných přísunů radonu  $Q$  do jednotlivých podlaží při stejné kombinaci použitých indikačních plynů jako v obr. nad touto tabulkou.

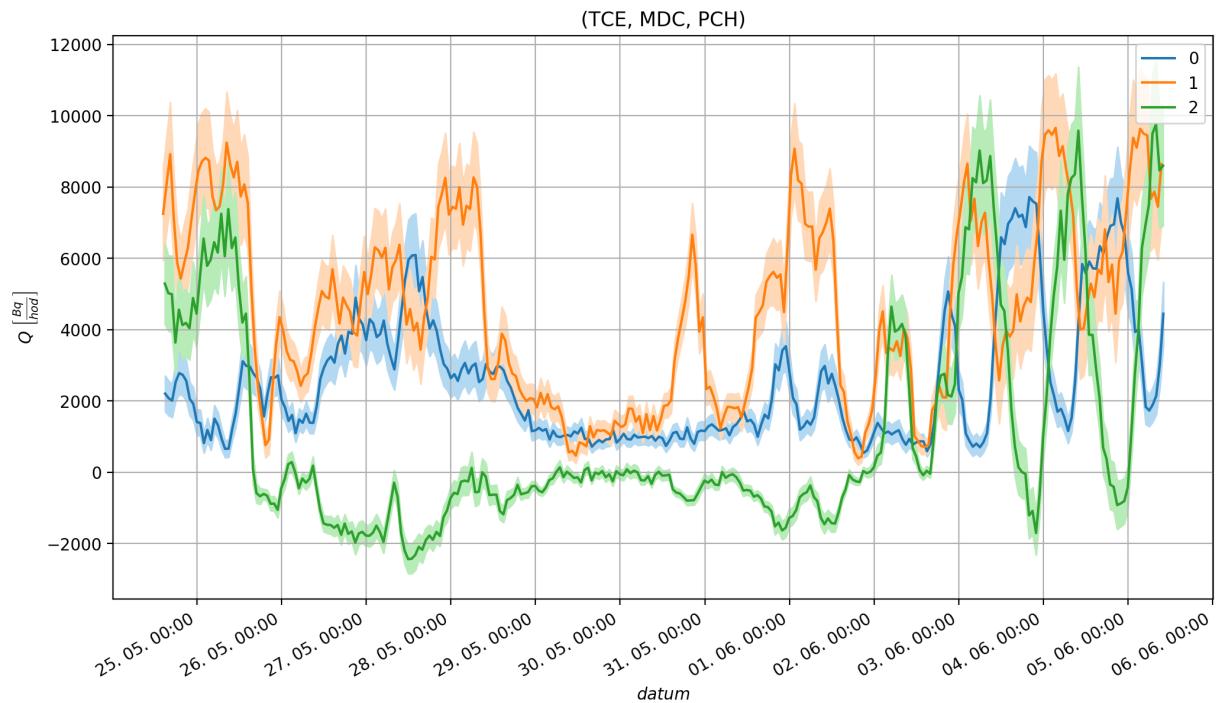
	$Q_0$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{hod}}$ ]	$Q_1$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{hod}}$ ]	$Q_2$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{hod}}$ ]
count	284	284	284
mean	7387	3635	1086
min	1578	232	-2485
25%	3282	1649	-700
50%	5610	3423	-183
75%	9590	5463	2508
max	22588	8028	9819



Obr. 6.8: Určený časový vývoj přísunů radonu do jednotlivých podlaží. Nad obrázkem je uvedena kombinace tří použitých indikačních plynů. Oblasti označené zesvětlenou barvou značí nejistotu přísunů radonu při faktoru pokrytí  $k = 1$ .

Tab. 6.12: Statistiky vypočítaných přísunů radonu  $Q$  do jednotlivých podlaží při stejné kombinaci použitých indikačních plynů jako v obr. nad touto tabulkou.

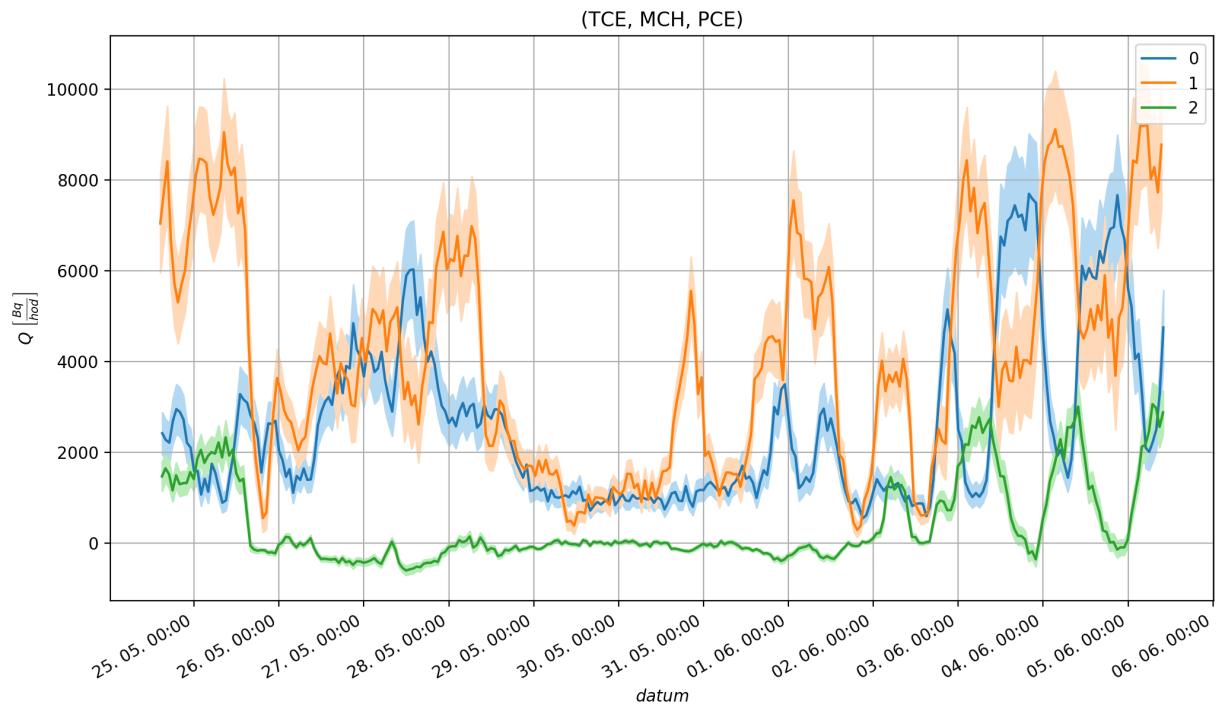
	$Q_0$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{hod}}$ ]	$Q_1$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{hod}}$ ]	$Q_2$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{hod}}$ ]
count	284	284	284
mean	2522	4757	376
min	517	314	-623
25%	1119	2127	-171
50%	1977	4446	-19
75%	3224	6835	845
max	7647	10791	3017



Obr. 6.9: Určený časový vývoj přísunů radonu do jednotlivých podlaží. Nad obrázkem je uvedena kombinace tří použitých indikačních plynů. Oblasti označené zesvětlenou barvou značí nejistotu přísunů radonu při faktoru pokrytí  $k = 1$ .

Tab. 6.13: Statistiky vypočítaných přísunů radonu  $Q$  do jednotlivých podlaží při stejné kombinaci použitých indikačních plynů jako v obr. nad touto tabulkou.

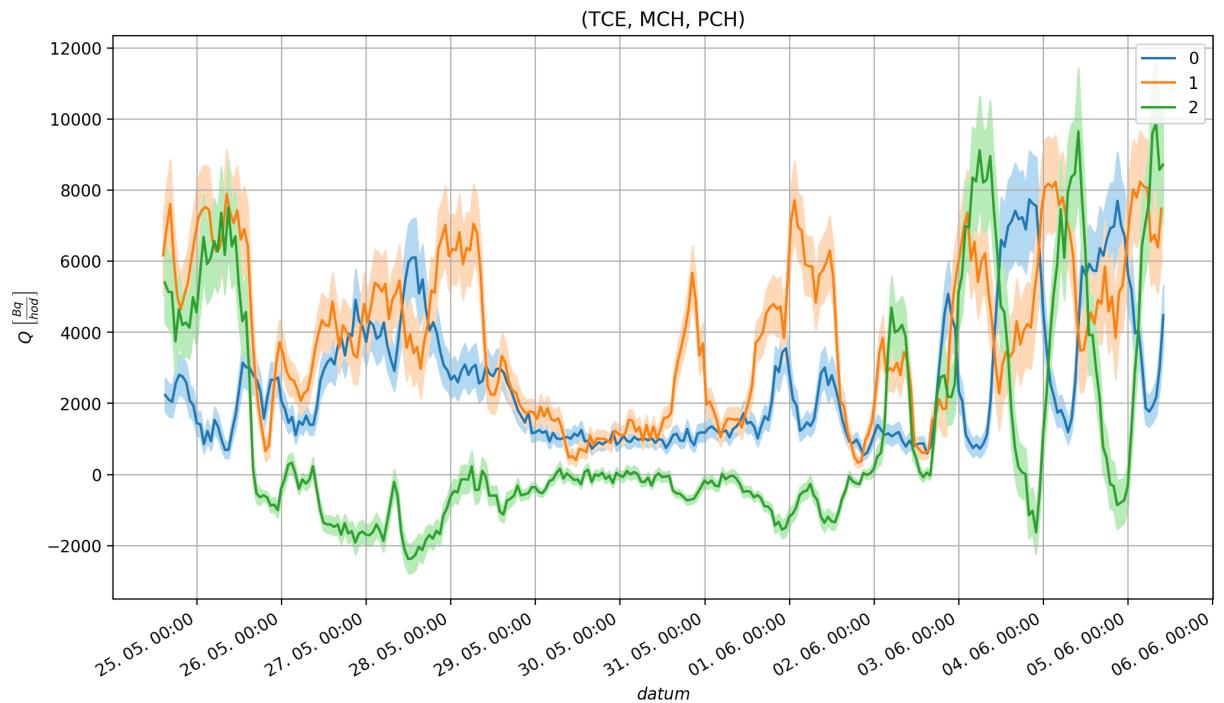
	$Q_0$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{hod}}$ ]	$Q_1$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{hod}}$ ]	$Q_2$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{hod}}$ ]
count	284	284	284
mean	2491	4576	1052
min	518	377	-2466
25%	1106	2160	-735
50%	1873	4475	-193
75%	3196	6805	2469
max	7691	9640	9733



Obr. 6.10: Určený časový vývoj přísnů radonu do jednotlivých podlaží. Nad obrázkem je uvedena kombinace tří použitých indikačních plynů. Oblasti označené zesvětlenou barvou značí nejistotu přísnů radonu při faktoru pokrytí  $k = 1$ .

Tab. 6.14: Statistiky vypočítaných přísnů radonu  $Q$  do jednotlivých podlaží při stejné kombinaci použitých indikačních plynů jako v obr. nad touto tabulkou.

	$Q_0$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{hod}}$ ]	$Q_1$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{hod}}$ ]	$Q_2$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{hod}}$ ]
count	284	284	284
mean	2543	4077	394
min	518	272	-611
25%	1132	1817	-162
50%	2003	3827	-12
75%	3259	5867	856
max	7666	9197	3053



Obr. 6.11: Určený časový vývoj přísunů radonu do jednotlivých podlaží. Nad obrázkem je uvedena kombinace tří použitých indikačních plynů. Oblasti označené zesvětlenou barvou značí nejistotu přísunů radonu při faktoru pokrytí  $k = 1$ .

Tab. 6.15: Statistiky vypočítaných přísunů radonu  $Q$  do jednotlivých podlaží při stejném kombinaci použitých indikačních plynů jako v obr. nad touto tabulkou.

	$Q_0$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{hod}}$ ]	$Q_1$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{hod}}$ ]	$Q_2$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{hod}}$ ]
count	284	284	284
mean	2510	3915	1118
min	519	323	-2408
25%	1119	1853	-673
50%	1908	3828	-164
75%	3217	5836	2559
max	7710	8221	9846

Tab. 6.16: Průměrné přísuny radonu souhrně pro všechny kombinace indikačních plynů pro dynamické vyhodnocení.

použité tracery	$Q_0$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{hod}}$ ]	$Q_1$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{hod}}$ ]	$Q_2$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{hod}}$ ]
(TMH, MDC, PCE)	7425±1366	4412±744	370±89
(TMH, MDC, PCH)	7335±1334	4242±737	1025±352
(TMH, MCH, PCE)	7486±1371	3787±640	386±89
(TMH, MCH, PCH)	7387±1337	3635±632	1086±350
(TCE, MDC, PCE)	2522±382	4757±622	376±74
(TCE, MDC, PCH)	2491±395	4576±627	1052±289
(TCE, MCH, PCE)	2543±351	4077±545	394±74
(TCE, MCH, PCH)	2510±368	3915±546	1118±285

### Vyhodnocení v rovnovážném stavu

Tab. 6.17: Průměrné objemové koncentrace radonu naměřené TERA sondami.  $\sigma_A$  je nejistota typu A plynoucí ze statistického zpracování naměřených dat,  $\sigma_B$  je nejistota typu B plynoucí z nejistoty měřidla a  $\sigma$  je kombinovaná nejistota. 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 [ $\text{Bq}/\text{m}^3$ ]	$\sigma_A$	$\sigma_B$	$\sigma$	prům. citlivost [ $\frac{\text{imp}}{\text{hod}}/\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$ ]
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. 6.18: Přísuny radonu určené z průměrných hodnot OAR, tj. jako v rovnovážném měření.

použité tracery	$Q_0$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{hod}}$ ]	$Q_1$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{hod}}$ ]	$Q_2$ [ $\frac{\text{Bq}}{\text{hod}}$ ]
(TMH, MDC, PCE)	7510±1495	4429±803	376±123
(TMH, MDC, PCH)	7416±1467	4252±799	1054±457
(TMH, MCH, PCE)	7571±1499	3801±690	392±123
(TMH, MCH, PCH)	7468±1470	3644±683	1115±455
(TCE, MDC, PCE)	2548±432	4777±684	383±113
(TCE, MDC, PCH)	2516±445	4591±691	1081±410
(TCE, MCH, PCE)	2570±404	4094±596	401±113
(TCE, MCH, PCH)	2535±420	3928±599	1147±406

## **6.3 Objekt Hálková 980, Humpolec**

### **6.3.1 Použitá měřidla**

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

## **6.4 Objekt Anglická 574, Dobřichovice**

### **6.4.1 Použitá měřidla**

- 12 vývýječů (4x MDC, 4x MCH, 4x PCH)
- 12 TD detektorů
- 2 blank TD detektory
- 4 CANARY monitory
- 4 TERA sondy
- 3 TESTO měřiče teploty a vlhkosti
- 2 zdroje radonu

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

# A. Python skript pro symbolické určení nejistot přísnů radonu

```
1 from sympy import Symbol, diff
2 import numpy as np
3 import time
4 ''
5 POSTUP
6 step 1: inicializace promennych predstavujici veliciny
7 step 2: definovani kovariancni matice namerenych velicin
8 step 3: definovani soustavy rovnic popisujici model
9 step 4: definovani matice derivaci prisunu radonu podle namerenych
   velicin (jakobianu)
10 step 5: vypocet kovariancni matice prisunu radonu
11 ''
12 prem_konstanta_Rn = Symbol('lambda')
13 N=3 #pocet zon
14
15 tic=time.time()
16 #inicializace symbolickych promennych predstavujici veliciny
17 Q=[]
18 a=[]
19 K=[]
20 V=[]
21 a_diff=[]
22
23 for i in np.arange(1,N+2):
24     # od jedne do N+1 (pocita se i venkovni prostredi)
25     a.append(Symbol('a_'+str(i)))
26     for j in np.arange(1,N+2):
27         if i==j:
28             K.append(0)
29         else:
30             K.append(Symbol('k_{'+str(i)+str(j)+'}'))
31     Q.append(Symbol('Q_{'+str(i)}'))
32     V.append(Symbol('V_{'+str(i)}'))
33     a_diff.append(Symbol('aDiff_{'+str(i)}'))
34
35 Q=np.array(Q[:-1])
36 a=np.array(a)
```

```

37 V=np.array(V[:-1])
38 a_diff=np.array(a_diff[:-1])
39
40 #definovani vektoru obsahujici vsechny namerene veliciny
41 veliciny=[a,V,a_diff]
42 for el in K:
43     if el!=0:
44         veliciny.append(np.array([el]))
45 veliciny=np.concatenate(veliciny)
46 pocet_velicin=len(veliciny) #pocet namerenych vstupnich velicin
47
48 K=np.reshape(np.array(K),(N+1,N+1))
49
50 #definovani kovariancni matice namerenych velicin
51 cov_matrix=np.full((pocet_velicin, pocet_velicin), np.nan, dtype=object)
52 for i, el_i in enumerate(veliciny):
53     for j, el_j in enumerate(veliciny):
54         if i==j:
55             cov_matrix[i,i]=Symbol('\sigma^2('+str(el_i)+')')
56         else:
57             #nediagonalni prvky jsou nulove
58             cov_matrix[i,j]=0
59
60 #definovani rovnic popisujici model
61 eqn=np.array([])
62 for i, Q_i in enumerate(Q):
63     rce=(a_diff[i]+prem_konstanta_Rn*a[i]+(a[i]*sum(K[:,i])-sum(a[:,i]*K[:,i]))/V[i]-Q_i)
64     eqn=np.append(eqn,rce)
65
66 #definovani matice derivaci prisunu radonu podle namerenych velicin
67 dQdx_matrix=np.full((len(Q), pocet_velicin), np.nan, dtype=object)
68 for i in np.arange(len(dQdx_matrix)):
69     for j, velicina in enumerate(veliciny):
70         dQdx_matrix[i,j]=diff(eqn[i],velicina)
71
72 #vypocet kovariancni matice prisunu radonu
73 #VYSLEDEK
74 cov_matrix_Q=np.dot(np.dot(dQdx_matrix, cov_matrix), dQdx_matrix.T)
75 toc=time.time()
76 print('spotrebovany cas: '+str(toc-tic))

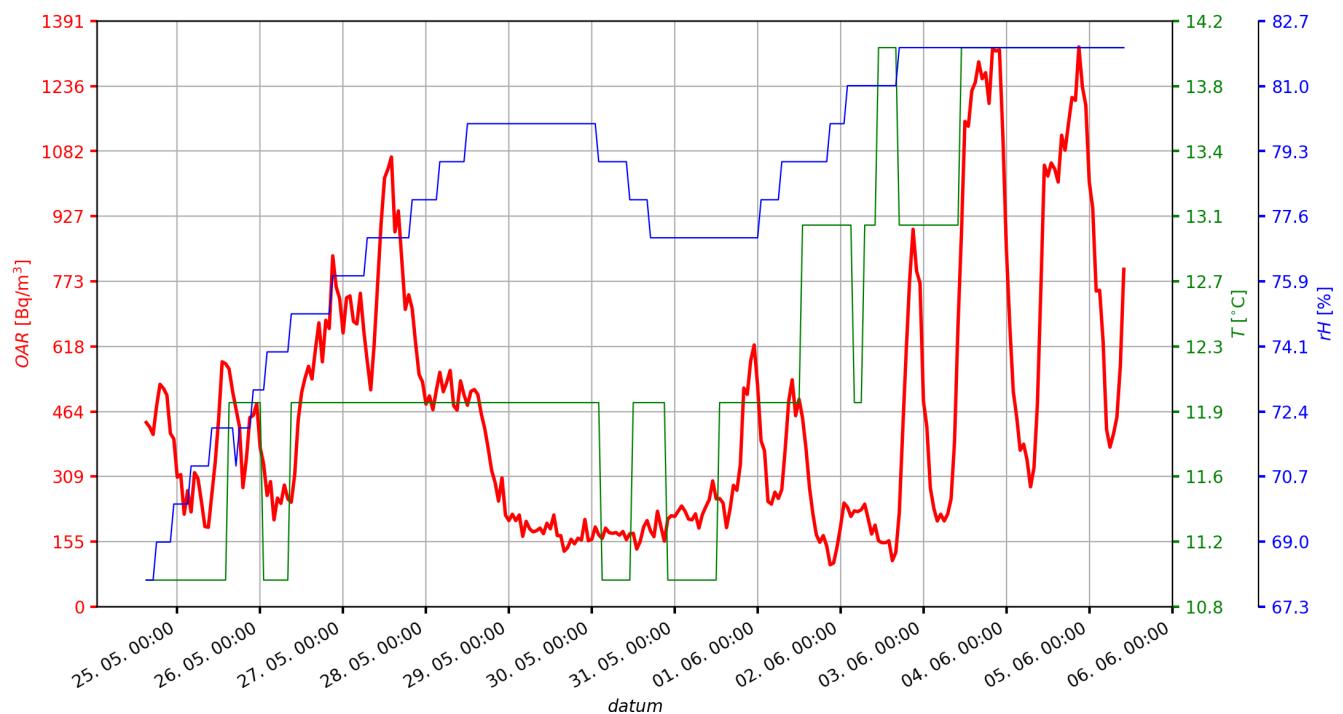
```

## **B. Python skript pro vyhodnocení dynamického měření přísunů radonu**

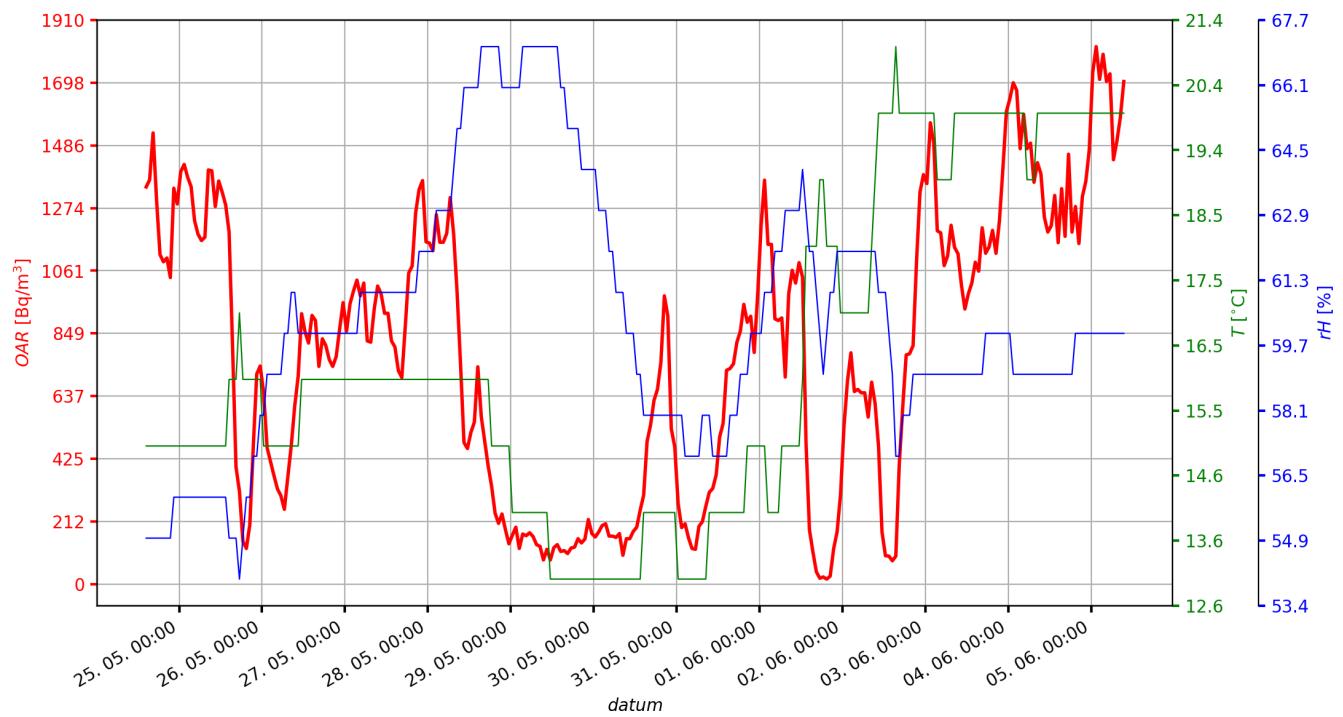
# C. Přílohy k objektu Skála 75, okr. Havlíčkův Brod

## C.1 Schéma objektu

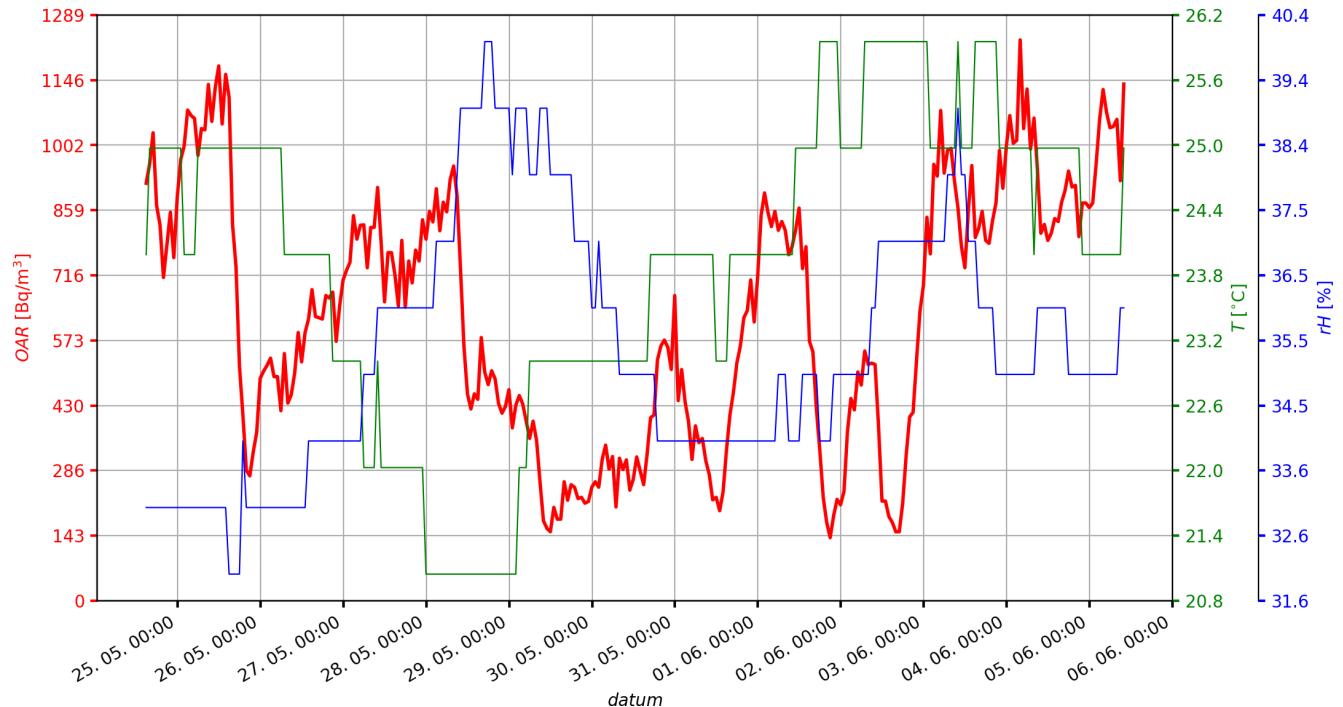
## C.2 Naměřené vývoje OAR, teplot a relativní vlhkosti vzduchu



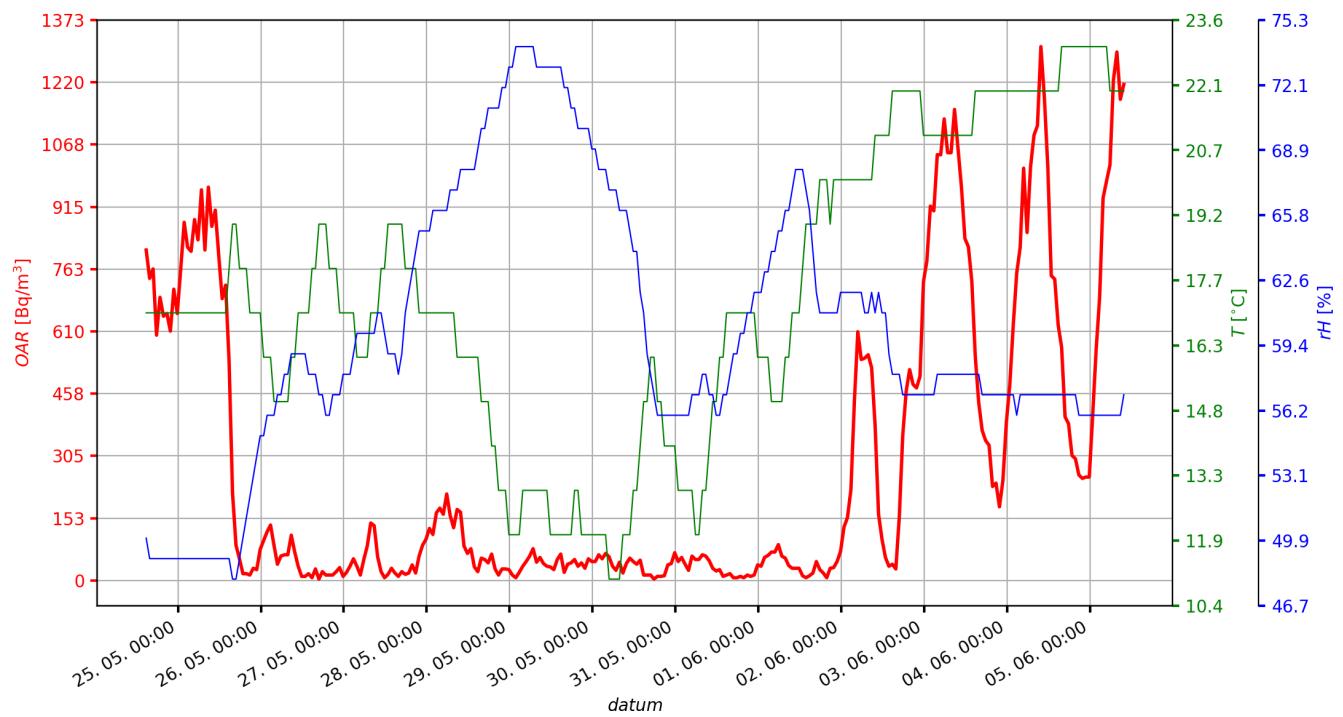
Obr. C.1: Data z TERA sondy č. 8, která byla umístěna ve sklepě.



Obr. C.2: Data z TERA sondy č. 10, která byla umístěna v přízemí v kuchyni.



Obr. C.3: Data z TERA sondy č. 112, která byla umístěna v přízemí v ložnici.



Obr. C.4: Data z TERA sondy č. 88, která byla umístěna v prvním patře.