

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA JADERNÁ A FYZIKÁLNĚ INŽENÝRSKÁ
KATEDRA DOZIMETRIE A APLIKACE IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ



VÝZKUMNÝ ÚKOL

**Multi-kompártmentový přístup ke
kvantifikaci objemové rychlosti přísunu
zdrojů radonu do budov s využitím měřené
intenzity větrání pomocí techniky
indikačních plynů**

Autor: Bc. Michal Šesták

Vedoucí práce: Ing. Karel Jílek

Odborný konzultант: RNDr. Josef Thomas, CSc.

Praha, 2019

VÝZKUMNÝ ÚKOL

Student: Bc. Michal Šesták
Studijní program: Aplikace přírodních věd
Obor: Dozimetrie a aplikace ionizujícího záření
Téma úkolu: Multi-kompártmentový přístup ke kvantifikaci objemové rychlosti přísunu zdrojů radonu do budov s využitím měřené intenzity větrání pomocí techniky indikačních plynů
Vedoucí úkolu: Ing. Karel Jílek (SÚRO, v.v.i.)
Odborný konzultant: RNDr. Josef Thomas CSc. (SÚRO, v.v.i.)

Pokyny pro vypracování:

1. Vytvořte kompártmentový model chování objemové aktivity radonu v jednotlivých n-kompártmentech v závislosti na intenzitě větrání a objemové rychlosti přísunu radonu do jednotlivých kompártmentů.
2. Seznamte se s technikou indikačních plynů, umožňující stanovení odhadu objemových toků vzduchu mezi jednotlivými kompártmenty.
3. Navrhněte vhodnou numerickou metodu stanovení odhadu přísunů radonu do jednotlivých kompártmentů.
4. Navržený model ověřte v terénu pro 3- kompartmentové uspořádání měření s využitím veškeré potřebné techniky, dostupné v SÚRO, v.v.i.

Doporučená literatura:

- [1] SHINOHARA, Naohide, Toshiyuki KATAOKA, Koichi TAKAMINE, Michio BUTSUGAN, Hirokazu NISHIJIMA a Masashi GAMO. Modified Perfluorocarbon Tracer Method for Measuring Effective Multizone Air Exchange Rates. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2010, **7**(9), 3348-3358. DOI: 10.3390/ijerph7093348. ISSN 1660-4601.
- [2] OKUYAMA, Hiroyasu, Yoshinori ONISHI, Shin-ichi TANABE a Seiichi KASHIHARA. Statistical data analysis method for multi-zonal airflow measurement using multiple kinds of perfluorocarbon tracer gas. Building and Environment. 2009, **44**(3), 546-557. DOI: 10.1016/j.buildenv.2008.04.014. ISSN 03601323.
- [3] SHERMAN, Max H., Iain S. WALKER a Melissa M. LUNDEN. Uncertainties in Air Exchange using Continuous-Injection, Long-Term Sampling Tracer-Gas Methods. International Journal of Ventilation. 2016, **13**(1), 13-28. DOI: 10.1080/14733315.2014.11684034. ISSN 1473-3315.

Datum zadání: 10.10.2018

Termín odevzdání: 2.9.2019



doc. Ing. Tomáš Trojek, Ph.D.
vedoucí KDAIZ FJFI ČVUT v Praze

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svůj výzkumný úkol vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne

Poděkování

Velmi děkuji panu Ing. Karlu Jílkovi za vedení mé práce. Také děkuji panu RNDr. Josefу Thomasovi, Csc. za přečtení a posouzení mé práce. Dále děkuji všem, kdo byli ochotni se se mnou o mém výzkumném úkolu bavit a odpovídat na mé dotazy.

Název práce: Multi-kompártmentový přístup ke kvantifikaci objemové rychlosti přísnunu zdrojů radonu do budov s využitím měřené intenzity větrání pomocí techniky indikačních plynů

Autor: Bc. Michal Šesták

Obor: Dozimetrie a aplikace ionizujícího záření

Druh práce: Výzkumný úkol

Vedoucí práce: Ing. Karel Jílek
Státní ústav radiační ochrana, v. v. i.

Abstrakt: Radon v domech představuje vážné zdravotní riziko, a proto je potřeba ho monitorovat a chránit se před ním. Někdy je však těžké určit, odkud radon do domu proniká. Z tohoto důvodu se zavádí veličina objemový přísnun radonu zdrojů radonu. Dům, či jiná zájmová stavba se rozdělí na několik kompartmentů, a poté se pomocí měření objemové koncentrace radonu (OAR) a ventilace objektu určí přísnuny radonu do těchto kompartmentů. V této práci jsou nejprve uvedeny metody měření OAR a ventilace, následuje odvození výpočetního modelu přísnunů radonu. V praktické části byl výpočetní model ověřen na poskytnutých naměřených datech a dále byla provedena tři měření k vyzkoušení a ověření celého procesu. Ukázalo se, že uvedený postup je velmi náchylný na vznik nejistot a tudíž je nutné provádět veškerá měření precizně.

Klíčová slova: radon, kontinuální měření radonu, měření ventilace, indikační plyny, objemové přísnuny radonu, python

Title: **The multi-compartment approach for the quantification of volumetric radon entry rate to buildings using the ventilation intensity measured by a passive multi tracer gas method**

Author: Bc. Michal Šesták

Abstract: Radon in buildings represents serious health risk and therefore it should be monitored and there should be some protective remedies against it. However, sometimes it is difficult to locate the radon's sources inside the building. For this purpose the idea of radon entry rate is introduced. The building is divided into several compartments and then the radon entry rates into these compartments are determined from the measurement of the radon volume activities (concentrations) in the compartments and from the measurement of building's ventilation intensity.

Firstly the methods of radon concentration measurement and ventilation measurement are introduced in this work. Next, the model for radon entry rates calculation is built. In practical part this model is verified on the provided values of the radon concentrations and the ventilations of several building. Moreover, three full measurements were done. It was found out that the measuring have to be done with big care, otherwise the uncertainties would be huge.

Key words: radon, continuous radon measurement, ventilation measurement, tracer gases, volumetric radon entries, python

Obsah

1	Úvod	10
I	Teoretická část	11
2	Radonová problematika	12
2.1	Použité kontinuální monitory radonu	13
2.1.1	TERA sondy	13
2.1.2	CANARY měřáky	14
2.2	Průtočné radonové zdroje typu RF 2000	16
3	Měření intenzity větrání pomocí techniky indikačních plynů	18
3.1	Přístroje a pomůcky	18
3.2	Pracovní postup	20
3.2.1	Příprava měření	20
3.2.2	Přeprava	21
3.2.3	Instalace měřidel	21
3.2.4	Doba měření	22
3.2.5	Sběr	22
3.2.6	Vyhodnocení	22
3.3	Určení průtoků vzduchu a výměny vzduchu objektu	23
3.3.1	Hmotnostní koncentrace a emise indikačních plynů	23
3.3.2	Bilanční rovnice	24
3.3.3	Řešení bilančních rovnic	24
3.3.4	Výměna vzduchu	26
4	Určení objemové rychlosti přísunu zdrojů radonu	28
4.1	Určení nejistot přísunů radonu	30
4.1.1	Jeden kompartment	31
4.1.2	Dva kompartimenty	31
4.1.3	N kompartmentů	31
4.2	Interpretace přísunů radonu	32
4.3	Ověření modelu výpočtu přísunů radonu	32

4.4	Implementace	33
4.4.1	Rovnovážný stav	33
4.4.2	Dynamické měření	33
II	Praktická část	35
5	Měření v rovnovážném stavu	36
5.1	Objekt č. 1	37
5.2	Objekt č. 2	38
5.3	Objekt č. 3	39
5.4	Objekt č. 4	40
5.5	Objekt č. 8	41
5.6	Diskuze	42
5.7	Závěr	43
6	Dynamická měření	44
6.1	TERA sondy	45
6.2	Objekt Skála 75, okr. Havlíčkův Brod	46
6.2.1	Přísluny radonu	47
6.2.2	Zpětné ověření	49
6.2.3	Diskuze	50
6.2.4	Závěr	52
6.3	Objekt Hálková 980, Humpolec	53
6.3.1	Přísluny radonu	53
6.3.2	Zpětné ověření	54
6.3.3	Diskuze	55
6.3.4	Závěr	56
6.4	Objekt Anglická 574, Dobřichovice	56
6.4.1	Přísluny radonu	57
6.4.2	Zpětné ověření	57
6.4.3	Diskuze	58
6.4.4	Závěr	59
6.5	Shrnutí	59
7	Závěr	60
7.1	Dotazy	60
7.2	TO DO	60
Seznam literatury		61
A	Python skript pro symbolické určení nejistot příslunů radonu	63
B	Python skript pro vyhodnocení dynamického měření příslunů radonu	65

C Certifikáty zdrojů	71
D Přílohy k objektu Skála 75, okr. Havlíčkův Brod	74
D.1 Fotografie objektu	74
D.2 Použitá měřidla	74
D.3 Naměřené OAR, objemy a teploty	75
D.3.1 Průměrné hodnoty OAR	76
D.4 Objemové průtoky vzduchu	77
D.5 Přísuny radonu - grafy a statistiky	80
E Přílohy k objektu Hálková 980, Humpolec	88
E.1 Použitá měřidla	88
E.2 Naměřené OAR, objemy a teploty	88
E.3 Objemové průtoky vzduchu	90
F Přílohy k objektu Anglická 574, Dobřichovice	92
F.1 Fotografie objektu	92
F.2 Použitá měřidla	92
F.3 Naměřené OAR, objemy a teploty	93
F.4 Objemové průtoky vzduchu	94
F.5 Přísuny radonu - grafy a statistiky	95

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 ³ /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 ³]
V_i	objem i -té zóny	[m ³]
k_{ij}	objemový průtok vzduchu z i -té zóny do j -té zóny	[m ³ /hod]
$k_{i,N+1}$	exfiltrace i -té zóny, ozn. $k_{i,E}$; index $N + 1$ značí vnější prostředí	[m ³ /hod]
$k_{N+1,i}$	infiltrace i -té zóny, ozn. $k_{i,I}$; index $N + 1$ značí vnější prostředí	[m ³ /hod]
n	výměna vzduchu celého objektu	[1/hod]
a_i	OAR v i -té zóně	[Bq/m ³]
\dot{a}_i	časová derivace a_i	$\left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}} \right]$
λ	přeměnová konstanta radonu	[1/hod]
Q_i	přísun radonu do i -té zóny	$\left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}} \right]$
W	radonová výdejnost radonového zdroje typu RF 2000	[Bq/hod]
Q_{zdroj}	definovaný přísun radonu od zdroje typu RF 2000	$\left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}} \right]$

1. Úvod

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}Rn z uranové řady vznikající z ^{226}Ra s poločasem přeměny 3,82 dne. Mluví-li se o radonu jako radionuklidu, pak je méněn právě ^{222}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}Po	3,05 min	α
^{214}Pb	26,8 min	β
^{214}Bi	19,7 min	β
^{214}Po	164 μs	α

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 Bq/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}Po .

RaA+RaC pomalejší, ale přesnější způsob. OAR se počítá z impulzů od alfa částic vznikajících při přeměnách ^{218}Po i ^{214}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}Po (6 MeV), do třetího od ^{214}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}Po a ^{214}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 ³
Hmotnost	130 g
Měří při	teplota: +4°C to +40°C relativní vlhkost: < 85 %
Měřící rozsah	nejnižší detekční limit: 0 Bq/m ³ horní limit displeje: 9999 Bq/m ³
Přesnost při 200 Bq/m³:	
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 ³) (metoda RaA+RaC; 15°C – 30°C; rel. vlh. 20 % – 40 %)
Rozsah měření	MDA až 1×10^6 Bq/m ³ ; MDA = 100 Bq/m ³ při 1 hodině měření nebo 20 Bq/m ³ při 24 hodinovém měření < 13% při 300 Bq/m ³ a 1 hodině měření; < 3% při 300 Bq/m ³ a 24 hodinovém měření
Nejistota měření	
Objem měřící komory	0,176 dm ³
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}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.

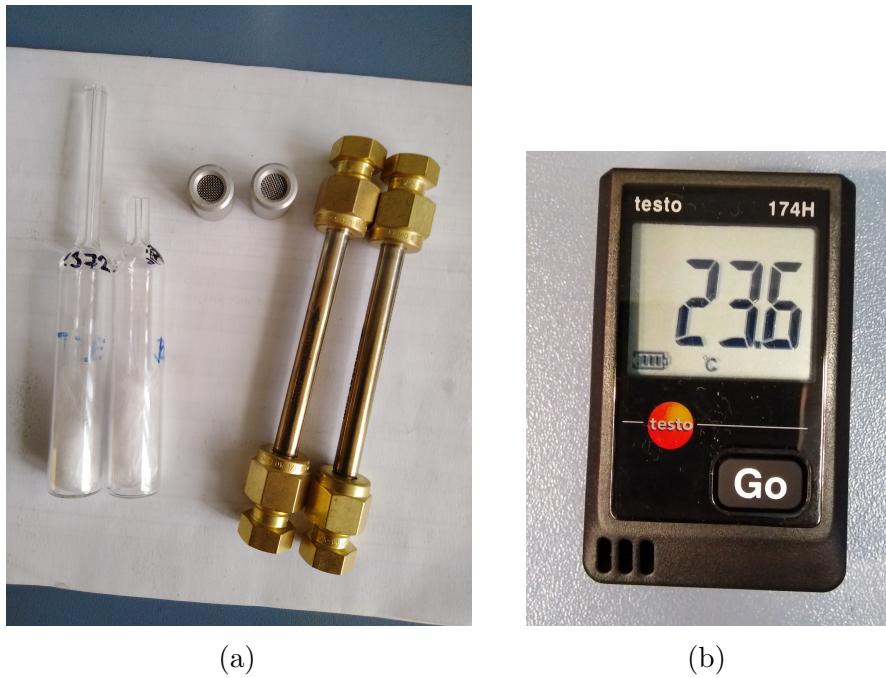
Technika byla vyvinuta Státním ústavem radiační ochrany, v. v. i. a její správnost byla ověřena s obdobnými technikami používanými v zahraničí. Vše o ní je popsáno v certifikované metodice ([7]), podle níž se postupovalo i při měření provedených v rámci této práce. Principem techniky je detekce vhodně 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).



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

TD detektor je zařízení sloužící k záchytu indikačních plynů a tím k měření jejich koncentrace ve vzduchu. Je plněn vhodným sorbentem vzhledem k použitým indikačním plynlům. 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.



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 plyně $m_{ki} = 0$ pro $k \neq i$ (viz oddíl 3.2.3).

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

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

Následující vztahy jsou přebrány z [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:

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

kde bylo využito relace

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

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

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

3.3.2 Bilanční rovnice

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

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

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 β 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 β průtok k_{ij} , pak

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

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

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

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

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

Řešení pro $N = N_p \geq 4$

Jak již bylo řečeno, pro čtyři a více zón trvá výpočet pomocí skriptu řešící soustavu (3.4) analyticky moc dlouho. Pokud při použijeme normální nástroje lineární regrese, pak dostaneme průtoky mezi zónami bez nejistot. Východiskem z této situace je využití metody nejmenších čtverců [12], pomocí níž můžeme parametry β 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 Σ^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 Σ_{ii}^Q představuje rozptyl Q_i (ozn. $\sigma^2(Q_i)$) a nediagonální prvek Σ_{ij}^Q , resp. Σ_{ji}^Q vyjadřuje míru závislosti mezi Q_i a Q_j . x_k je k -tá složka vektoru \vec{x} a Σ^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 Σ^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 Σ^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 Σ^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 Σ^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 Q_{zdroj} do těchto zón (podělením radonových výdejností objemy 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. Toto ověření lze provést ovšem pouze za podmínky, že měření ventilace objektu a OAR v zónách proběhlo s dostatečnou přesností.

Pokud se vypočítané přísuny radonu neshodují s Q_{zdroj} , tak můžeme provést tzv. zpětné ověřování. Tím je míněn výpočet průměrných OAR ve vnitřních zónách objektu, resp. výpočet N vybraných průtoků vzduchu mezi zónami ze soustavy rovnic (4.7), přičemž za Q_i jsou brány přísuny radonu od zdrojů. Za hodnoty ostatních veličin vystupujících v

soustavě (4.7) bereme hodnoty těchto veličin určené z měření ventilace a případně OAR. Za N určovaných průtoků (více jich není možné určit vzhledem k počtu rovnic) se většinou berou průtoky z jedné dané zóny do všech ostatních zón (tj. i do vnějšího prostředí).

Z toho, jak moc rozdílně tyto zpětně určené hodnoty OAR, resp. průtoků vzduchu vycházejí oproti jejich nominálním hodnotám z měření, můžeme usuzovat příčinu rozdílnosti Q_{zdroj} a vypočítaných příslušných radonu z naměřených dat. Chybný může být předpoklad o příslušných radonu blížících se nule. Nějaká chyba také mohla nastat při měření ventilace, např. z důvodu porušení pravidel osazování měřidel či saturace detektorů na některý indikační plyn (což je způsobeno příliš velikou emisí tohoto indikačního plynu) atp. Další příčinou může nepřesnost kontinuálních monitorů radonu.

4.4 Implementace

Výpočetní model příslušných 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 obsahujících naměřené průtoky, objemy a vypočítané příslušné 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 $\vec{a}'(t)$.

Časové vývoje přísunů 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/m³. 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 ³]	V [m ³]
0	1094±55	40±8
1	562±20	84±10
2	51±2	97±15

Tab. 5.4: Objemové průtoky vzduchu mezi zónami v m³/hod a celková výměna vzduchu objektu n v hod⁻¹. 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 ³]	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 ³]	V [m ³]
1	1357±41	91±11

Tab. 5.7: Exfiltrace a infiltrace jediné zóny objektu v m³/hod, jedná se tedy vlastně o exfiltraci a infiltraci celého objektu. n je výměna vzduchu objektu v hod⁻¹.

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 ³]	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 ³]	V [m ³]
1	3042±108	77±8
2	211±7	65±8

Tab. 5.10: Objemové průtoky vzduchu mezi zónami v m³/hod a celková výměna vzduchu objektu n v hod⁻¹. 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 ³]	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 ³]	V [m ³]
1	433±22	119±20
2	208±7	102±14

Tab. 5.13: Objemové průtoky vzduchu mezi zónami v m³/hod a celková výměna vzduchu objektu n v hod⁻¹. 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 ³]	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 ³]	V [m ³]
0	33±2	66±13
1	61±3	105±11
2	79±2	153±15

Tab. 5.16: Objemové průtoky vzduchu mezi zónami v m³/hod a celková výměna vzduchu objektu n v hod⁻¹. 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 ³]	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 přísnury 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 přísnun radonu do ní menší.

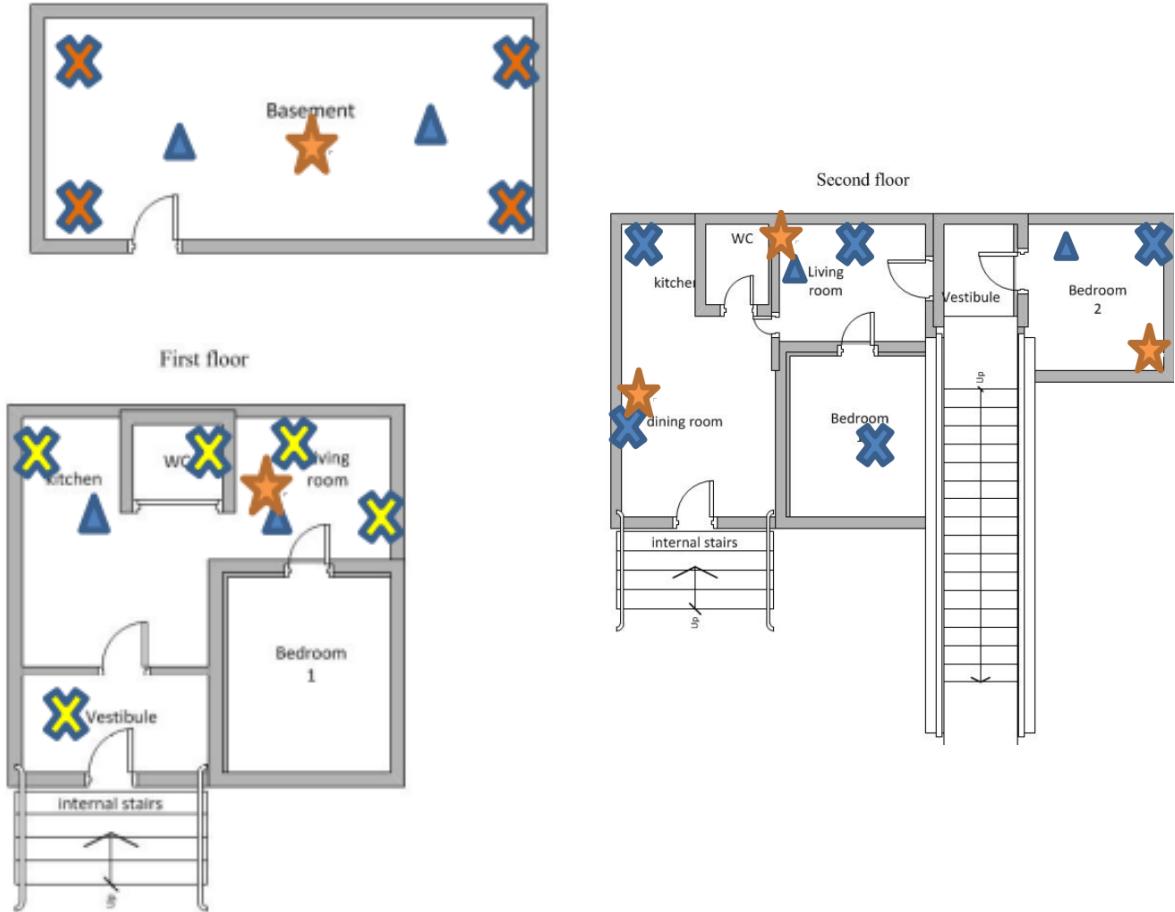
U osmého objektu je vývoj velikostí přísnunů radonu opačný, než bychom předpokládali. Stačí se ovšem podívat na tabulku naměřených OAR v jednotlivých zónách 5.15 a vidíme, proč tomu tak je: OAR je nejvyšší v prvním patře, pak v přízemí a ve sklepě je nejmenší. Toto je velmi nezvyklé a pokud se nejedná 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 ložnici v prvním patře byla naměřena dvojnásobná koncentrace radonu než v ostatních místnostech. S přihlédnutím ke schématu domu (obr. 5.1) si lze domyslet, že ložnice v prvním patře je v kontaktu s podložím a na rozdíl 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 přísnun radonu do sklepa. Lze to přisoudit nepřesnostem vzniklých při měření. Avšak uváděná nejistota je rovna směrodatné odchylce σ 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 ³]	
		Radon concentration	Combined standard uncertainty (1 σ)
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 vyzorovat, že u všech objektů se přísnury 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 měráky byly použity jako záložní systém, tj. pokud by v některé zóně TERA sonda selhala, pak by se OAR v této zóně brala z příslušného CANARY měřáku. Pokud bylo v jedné zóně použito více kontinuálních monitorů radonu, pak se z jejich dat udělal průměrný časový vývoj OAR v této zóně a s tím bylo dále počítáno.

Dále bylo potřeba měřit vývoj teploty, což je znalost nutná při vyhodnocování množství nasorbovaných indikačních plynů v TD detektorech a k určení hmotnostních koncentrací indikačních plynů v zónách. K tomuto účelu byly použity datalogger teploty a vlhkosti testo 174H [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).

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

Objemy všech objektů byly změřeny laserovým dálkoměrem BOSCH GLM 120 C [17].

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

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

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

ID	W [Bq/hod]
38	15588
37	14436

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

6.1 TERA sondy

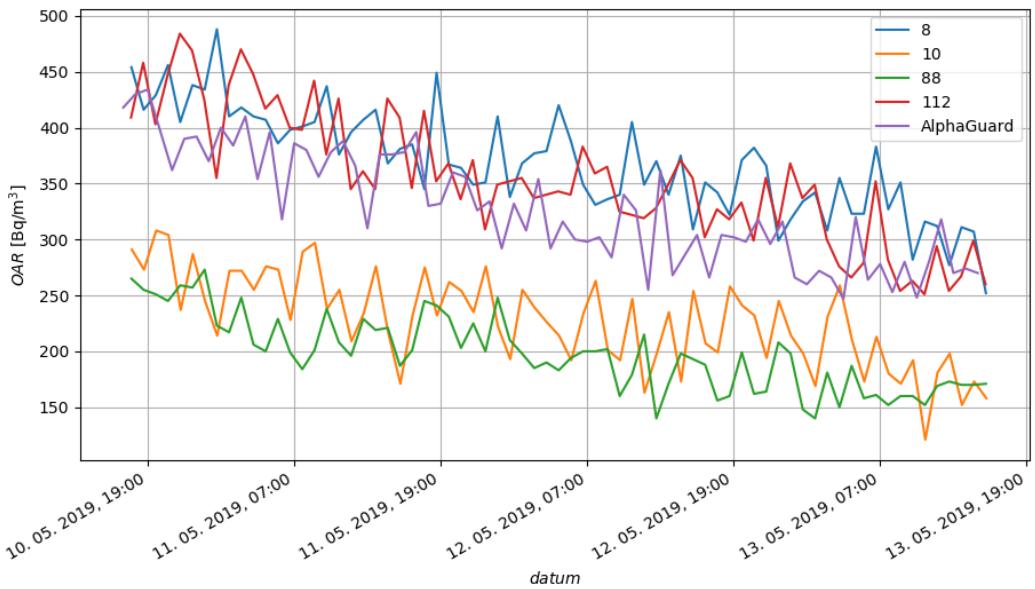
Pro dynamická měření přísunů radonu mi byly poskytnuty čtyři TERA sondy s označením 8, 10, 88 a 112. Pro srovnání jejich odezv s reálnou hodnotou OAR byly vloženy do sudu (nádoba válcovitého tvaru) spolu s referenčním monitorem radonu AlphaGuard (ozn. AG) [5]. Hodnota OAR z AG byla brána jako reálná 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.

Tab. 6.3: Statistiky vývojů OAR naměřených TERA sondami a AG v Bq/m³.

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

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

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



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

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

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

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

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

6.2 Objekt Skála 75, okr. Havlíčkův Brod

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

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

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

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

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

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

6.2.1 Přísuny radonu

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

podlaží	zdroj	Q_{zdroj}
0	38	400 ± 51
1	37	114 ± 13
2	NE	0 ± 0

Vyhodnocení dynamického měření

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

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

Vyhodnocení v rovnovážném stavu

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

použité tracery	Q_0	Q_1	Q_2
(TMH, MDC, PCE)	335 ± 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. 6.8: Přísuny radonu určené z průměrných hodnot vývojů OAR naměřených CANARY měřáky. Jednotkou přísunů radonu je $\text{Bq}/(\text{m}^3 \cdot \text{hod})$.

použité tracery	Q_0	Q_1	Q_2
(TMH, MDC, PCE)	294 ± 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

6.2.2 Zpětné ověření

OAR

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

použité tracery	a_1 [Bq/m ³]	a_2 [Bq/m ³]	a_3 [Bq/m ³]
(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. 6.10: V prvních řádcích těchto tabulek označených *zpětně* jsou průtoky vzduchu z dané zóny do ostatních zón a infiltrace této zóny vypočítané z rovnice (4.7) za využití znalosti ostatních průtoků vzduchu pro kombinaci indikačních plynů (TMH, MCH, PCE), viz tab. D.6, přísluny radonu pocházejících od zdrojů RF 2000 (tab. 6.5) a průměrných OAR naměřených CANARY měřáky. V druhých řádcích tabulek označených *měření* jsou pro srovnání uvedené příslušné průtoky vzduchu z tab. D.6. V (a) je zájmovou zónou první zóna, v (b) druhá zóna a v (c) třetí zóna.

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

6.2.3 Diskuze

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

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

Srovnání dynamického a rovnovážného vyhodnocení

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

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

Srovnání různých kombinací indikačních plynů

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

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

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

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

Srovnání použití OAR z TERA sond a z CANARY měřáků

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

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

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

Srovnání vypočítaných přísunů radonu s Q_{zdroj}

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

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

Zpětné ověření

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

6.2.4 Závěr

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

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

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

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

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

6.3 Objekt Hálková 980, Humpolec

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

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

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

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

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

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

6.3.1 Přísuny radonu

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

zóna	zdroj	Q_{zdroj}
1	38	332 ± 64
2	NE	0 ± 0
3	NE	0 ± 0
4	NE	0 ± 0

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

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

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

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

6.3.2 Zpětné ověření

OAR

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

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

Objemové průtoky vzduchu

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

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

6.3.3 Diskuze

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

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

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

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

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

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

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

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

6.3.4 Závěr

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

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

6.4 Objekt Anglická 574, Dobřichovice

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

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

6.4.1 Přísuny radonu

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

podlaží	zdroj	Q_{zdroj}
0	38 & 37	455 ± 90
1	NE	0 ± 0
2	NE	0 ± 0

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

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

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

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

6.4.2 Zpětné ověření

OAR

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

	a_0 [Bq/m ³]	a_1 [Bq/m ³]	a_2 [Bq/m ³]
vypočítané	1200 ± 360	84 ± 29	22 ± 8
naměřené	2770 ± 196	92 ± 9	98 ± 10

Objemové průtoky vzduchu

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

	(a)			
	k_{12} [m ³ /hod]	k_{13} [m ³ /hod]	k_{1_E} [m ³ /hod]	k_{1_I} [m ³ /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 ³ /hod]	k_{23} [m ³ /hod]	k_{2_E} [m ³ /hod]	k_{2_I} [m ³ /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 ³ /hod]	k_{32} [m ³ /hod]	k_{3_E} [m ³ /hod]	k_{3_I} [m ³ /hod]
zpětně	401,86 ± 97,15	-34,23 ± 12,83	-356,03 ± 92,01	-359,84 ± 92,01
měření	0,18 ± 0,03	0,55 ± 0,08	30,74 ± 3,07	26,93 ± 3,14

6.4.3 Diskuze

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

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

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

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

6.4.4 Závěr

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

6.5 Shrnutí

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

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

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

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

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

7. Závěr

- vlivy na výsledky: roční období, ve kterém měření probíha atd; teplota, tlak, vitr, dest (v případě uvažování koncentrace vonějšího prostředí) atd.
- je prisun radonu větší v zimě nebo v létě?
- Využití, použití

7.1 Dotazy

1. Proč se se zvyšující se venkovní OAR přísluny radonu zmenšuje? (viz rovnovážná měření)
2. Část indikačních plynů se nasorbuje do materiálů k tomu vhodných (koberec), platí to i pro radon? (myslím, že Lenk říkal, že ano, ale jistý si tím nejsem.) U indikačních plynů se takto nasorbuje klidně až 20 %.
3. Počítají se nejistoty u Bulharských konstant pro TERA sondy?
4. Jaký typ detektoru jsou TERA sondy a CANARY měřáky? TERA sondy jsou polovodiče, CANARY zcela určitě taky.
5. Kde lze dohledat U_R a M_w ? Je molekulová hmotnost (M_w) to samé jako molární hmotnost? Lze použít U_R uvedené v metodice?

7.2 TO DO

- (a) radon: přidat fotky kontinuálů

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.
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.
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.
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. *Laserový měřič vzdálenosti GLM 120 C Professional* [online] [cit. 2019-08-27]. Dostupné z: <https://www.bosch-professional.com/cz/cs/products/glm-120-c-0601072F00>.
18. 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.

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 #inicjalizace 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 vstupnych velicin
47
```

```

48 K=np.reshape(np.array(K),(N+1,N+1))
49
50 #definovani kovariancni maticce 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[:, :])-sum(a[:, :]*K[:, i]))/V[i]-Q_i)
64     eqn.append(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 maticce 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

```
1 import numpy as np
2 from uncertainties import ufloat, covariance_matrix, correlation_matrix, unumpy
3 import pandas as pd
4 import logging
5 import matplotlib.pyplot as plt
6 import matplotlib.dates as mdates
7 from scipy.interpolate import CubicSpline
8 from scipy.signal import savgol_filter
9 import matplotlib as mpl
10 mpl.style.use('default')
11 '',
12 Vstupni soubory:
13     airflows.txt
14     volumes.txt
15     a1_modified.csv, a2_modified.csv, ...
16 DULEZITE:
17     - airflows.txt nesmi obsahovat vymenu vzduchu
18 '',
19
20 def lighten_color(color, amount=0.5):
21     """
22         source: https://stackoverflow.com/questions/37765197/darken-or-lighten-a-color-in-
23         matplotlib
24         Lightens the given color by multiplying (1-luminosity) by the given amount.
25         Input can be matplotlib color string, hex string, or RGB tuple.
26     """
27     import matplotlib.colors as mc
28     import colorsys
29     try:
30         c = mc.cnames[color]
31     except:
32         c = color
33     c = colorsys.rgb_to_hls(*mc.to_rgb(c))
34     return colorsys.hls_to_rgb(c[0], 1 - amount * (1 - c[1]), c[2])
35
36 barvy=['tab:blue', 'tab:orange', 'tab:green', 'tab:red']
37 barvy_zesvetlene=[lighten_color(el, 0.3) for el in barvy]
38
39 # premenova konstanta radonu v hod^(-1)
40 prem_kons_Rn = np.log(2)/(3.82*24)
41
42 # relativni chyba vsech objemu
43 V_err_rel=0.2
44 print("Rel. chyba vsech objemu je "+str(V_err_rel)+" %.")
45
46 def completion(velicina, velicina_err):
47     united = np.array([ufloat(value, error) for value, error in zip(velicina.to_numpy(),
```

```

    velicina_err.to_numpy())))
47     return pd.DataFrame(data=united, index=velicina.index, columns=[velicina.name])
48
49 dateparse = lambda x: pd.datetime.strptime(x, '%d.%m.%Y %H:%M')
50 def load_A(umisteni_sond, doplneni_chyb=False):
51     """
52     Input:
53         umisteni_sond(list/array) ... pole obsahujici podlazi, ve kterych byly TERA
54             sondy umisteny (postupne, tj pozice 0 je pro a1, pozice 1 pro a2 atd)
55     Output:
56         A(dataframe) ... kazdy radek obsahuje 0AR z jedne sondy
57     """
58     A=[]
59     for i in np.arange(1,len(umisteni_sond)+1):
60         df=pd.read_csv('a'+str(i)+'_modified.csv', date_parser=dateparse, parse_dates=['cas'],
61                         index_col='zaznam',
62                         comment='#')
63         # a=a[['cas','radon[Bq/m3]]].copy()
64         if doplneni_chyb==True:
65             #POUZE PRO TERA SONDY JE URCEN NASLEDUJICI RADEK
66             a=completion(df.loc[:, 'radon[Bq/m3]'], df.loc[:, 'radon_err'])
67             A.append(a.to_numpy()[:, 0])
68         elif doplneni_chyb==False:
69             a=df.loc[:, 'radon[Bq/m3]']
70             A.append(a.to_numpy())
71     dfA=pd.DataFrame(A, index=umisteni_sond)
72
73     #prumerovani dat ze sond ze stejne zony
74     A = np.full((len(np.unique(umisteni_sond)), dfA.shape[1]), np.nan, dtype=object)
75     for i, el in enumerate(np.unique(umisteni_sond)):
76         if dfA.loc[el].to_numpy().ndim==2:
77             A[i] = dfA.loc[el].to_numpy().mean(axis=0)
78         else:
79             A[i] = dfA.loc[el].to_numpy()
80     return A
81
82 def load_Time(umisteni_sond):
83     """
84     umisteni_sond(list/array) ... pole obsahujici podlazi, ve kterych byly TERA
85         sondy umisteny (postupne, tj pozice 0 je pro a1, pozice 1 pro a2 atd)
86     Output: Time(list containing dataframes)
87     """
88     Time=[]
89     for i in np.arange(1,len(umisteni_sond)+1):
90         df=pd.read_csv('a'+str(i)+'_modified.csv', date_parser=dateparse, parse_dates=['cas'],
91                         index_col='zaznam',
92                         comment='#')
93         cas=df.loc[:, 'cas']
94         Time.append(cas)
95     return Time
96
97 def load_data(umisteni_sond, V_err_rel=V_err_rel):
98     """
99     fce pro nacitani prutoku, objemu a vytvoreni matice K
100    [a]=Bq/m^3
101    [V]=m^3
102    [R_ij]=m^3/hod
103    V_err_rel=0.2*V
104
105    #NACTENI PRUTOKU
106    df = pd.read_csv('airflows.txt',sep=';', decimal=',',index_col='ozn')
107    N = int(np.sqrt(len(df))) #pocet zon
108    for i in np.arange(1,N+1):
109        df.rename(index={'Re'+str(i): 'R'+str(i)+str(N+1)}, inplace=True)
110    R = completion(df.loc[:, 'R'], df.loc[:, 'uR'])

```

```

109
110 #NACTENI OBJEMU
111 dfV = pd.read_csv('volumes.txt', sep=';', decimal=',', index_col='podlazi')
112 dfV = completion(dfV.loc[:, 'V'], V_err_rel*dfV.loc[:, 'V'])
113 V = np.array([])
114 for i in np.unique(dfV.index.values):
115     V = np.append(V, sum(dfV.loc[i].to_numpy()))
116
117 podlazi = np.unique(dfV.index.values)
118
119 #NACTENI KONCENTRACI
120 A = load_A(umistení_sond, doplnení_chyb=True) #A je matice, jejíž řádky jsou casové
vyvoje OAR jednotlivých zon
121
122 #NACTENI PRUTOKU DO MATICE K
123 def infiltrace(i):
124     R_i=R.loc['R'+str(i)+str(N+1), 'R']
125     for j in np.arange(1,N+1):
126         if i!=j:
127             R_i+=R.loc['R'+str(i)+str(j), 'R']-R.loc['R'+str(j)+str(i), 'R']
128     return R_i
129
130 #matice P
131 P = np.full((N+1, N+1), np.nan, dtype=object)
132 for i in np.arange(len(P[:, 0])):
133     for j in np.arange(len(P[0, :])):
134         if i==j:
135             P[i, j]=0
136         elif i+1==N+1:
137             P[i, j]=infiltrace(j+1)
138         else:
139             P[i, j]=R.loc['R'+str(i+1)+str(j+1), 'R']
140
141 #matice K
142 K = np.full((N, N+1), np.nan, dtype=object)
143 for i in np.arange(len(K[:, 0])):
144     for j in np.arange(len(K[0, :])):
145         if i == j:
146             if i+1==N+1:
147                 K[i, i] = -sum(P[i, :])
148             else:
149                 K[i, i] = -sum(P[i, :])-prem_kons_Rn*V[i]
150         else:
151             K[i, j] = P[j, i]
152
153 #doplnění infiltraci do R, aby se dala exportovat
154 R_i, R_i_index=[], []
155 for i in np.arange(1,N+1):
156     R_i.append(infiltrace(i))
157     R_i_index.append('R'+str(N+1)+str(i))
158 df_R_i=pd.DataFrame(R_i, index=R_i_index, columns=['R'])
159 R=R.append(df_R_i)
160
161 K=K/V[:, None]
162 return N, R, K, A, V, podlazi
163
164 #FUNKCE OKOLO KONCENTRACI
165
166 def timedeltas(dates):
167     """
168     fce pro výpočet časových rozdílu, potřebných pro výpočet časových derivací
169     Input: dates(pd.Series)
170     """
171     prevod=3600*10**9 #prevodní koeficient z ns na hodiny
172     casove_rozdily=dates.copy()

```

```

173     for i in np.arange(1, len(dates)):
174         casove_rozdily.iloc[i]=(casove_rozdily.iloc[i]-casove_rozdily.iloc[0]).value/
175         prevod
176     casove_rozdily.iloc[0]=0
177     return casove_rozdily
178
179 def casove_derivace(dates, a, graf=False):
180     """
181     fce pro vypocet casovych derivaci OAR, umoznuje udelat graf, ktery je obsahuje
182     """
183     casove_rozdily=timedeltas(dates)
184     cs = CubicSpline(casove_rozdily, a)
185     if graf==True:
186         fig, ax=plt.subplots()
187         ax.plot(casove_rozdily, a, 'x', label='data')
188         ax.plot(casove_rozdily, cs(casove_rozdily), label='proklad')
189         ax.plot(casove_rozdily, cs(casove_rozdily, 1), label='casova derivace')
190         plt.legend()
191         plt.grid()
192         plt.xlabel('uplynula doba [hod]')
193         plt.ylabel(r'OAR [Bq/m$^3$]')
194     return cs(casove_rozdily, 1)
195
196 def kontrola_rozmeru(K, a):
197     if len(a) != len(K[0, :]):
198         logging.error('Neodpovidaji rozmery matic K a vektoru a!!')
199     return False
200     return True
201
202 #doplnujici funkce
203 def hodnoty_a_chyby(velicina):
204     """
205     Input:
206         array(ndarray)
207     shape = velicina.shape
208     hodnoty = np.reshape(np.array([el.n for el in velicina.flatten()]), shape)
209     smerodatne_odchylky = np.reshape(np.array([el.s for el in velicina.flatten()]), shape)
210     return hodnoty, smerodatne_odchylky
211
212 #VYPOCET Q
213 def calculation_Q(K, a_out, a, a_diff):
214     """
215     fce pro vypocet Q
216     Input:
217         K je matice
218         a_out je skalar (OAR vnejsiho prostredi)
219         a je vektor, length(a)=N
220         a_diff je vektor, length(a_diff)=N
221     """
222     a=np.append(a, a_out)
223     if kontrola_rozmeru(K, a)==False:
224         return False
225     Q = a_diff-np.dot(K, a)
226     return Q
227
228 def graf_Q(podlazi, Dates, Q):
229     """
230     fce pro udelani grafu vyvoje Q; pouziva Savitzky-Golay filtr s velikosti okna 7
231     a s fitovanim kubickym polynomem
232     """
233     fig, ax=plt.subplots(figsize=(12,7))
234     Q=Q.T
235     Q_n, Q_s=hodnoty_a_chyby(Q)
236     for i in np.arange(len(Q_n)):

```

```

237         ax.plot(Dates[i], savgol_filter(Q_n[i],7,3), color=barvy[i], label=str(podlazi[i]))
238     )
239     ax.fill_between(Dates[i], savgol_filter(Q_n[i]-Q_s[i],7,3), savgol_filter(Q_n[i]+
240 Q_s[i],7,3), color=barvy_zesvetlene[i])
241     ax.set_xlabel("$\text{datum}$")
242     ax.set_ylabel(r"\$Q\$ $\left[\frac{Bq}{m^3 \cdot hod}\right]$")
243     ax.grid()
244     days=mdates.DayLocator()
245     ax.xaxis.set_major_locator(days)
246     format_data = mdates.DateFormatter('%d. %m. %H:%M')
247     ax.xaxis.set_major_formatter(format_data)
248     fig.autofmt_xdate()
249     ax.legend()
250     plt.savefig('prisuny.png',format='png',dpi=200, bbox_inches='tight')
251     plt.show()
252     return 0
253
254 #FUNKCE PRO EXPORT DAT DO TABULEK LATEXOVEHO FORMATU
255 def export_inputData(V, podlazi):
256     #fce pro export objemu zon
257     def f(x):
258         return '{:.0f}'.format(x)
259
260     df = pd.DataFrame(V, index=podlazi, columns=[r'$V$ [\si{m^3}]'])
261     df.columns.name = 'podlazi'
262     df.index.name = None
263     df.to_latex('vysledky_inputData.tex', decimal=',', formatters=[f, f], escape=False)
264     return 0
265
266 def vymena_vzduchu(R, V, N):
267     #fce pro vypocet vymeny vzduchu
268     n=0
269     for i in np.arange(1, N+1):
270         n+=R.loc['R'+str(i)+str(N+1), 'R']
271     n=n/sum(V)
272     return n
273
274 def export_R(R,V,N):
275     #export protoku
276     n=vymena_vzduchu(R, V, N)
277     R=R.append(pd.DataFrame([n],index=[r'n [\si{hod^{-1}}]', columns=['R']))
278
279     R.index=R.index.str.replace('R','k')
280     R=pd.DataFrame(np.array([unumpy.nominal_values(R), unumpy.std_devs(R)]).T[0], columns
281     =[r'hodnota $\left[\si{m^3/hod}\right]$', r'$\sigma$'],
282     index=R.index)
283     R.to_latex('vysledky_protoky.tex', decimal=',', float_format='%0.2f', escape=False)
284     return R
285
286 def export_Q_statistiky(Q, podlazi):
287     #export statistik prisunu radonu
288     def titulek(patro):
289         return r'$Q$'+str(patro)+r'$ \left[\si{\frac{Bq}{m^3 \cdot hod}}\right] $'
290     def f(x):
291         return '{:.0f}'.format(x)
292     columns=[titulek(el) for el in podlazi]
293     Q=pd.DataFrame(unumpy.nominal_values(Q), columns=columns)
294     statistiky=Q.describe()
295     statistiky.to_latex('vysledky_Q_statistiky.tex', float_format='%0.0f', decimal=',',
296     escape=False)
297     return 0
298
299 #VYPOCETNI FUNKCE
300 def run(umistení_sond, a_out=0):
301     '',

```

```

298     fce využívající funkce pro výpočet Q, export dat do tabulek
299     a vytvoření grafu vyváže Q; umožnuje také výpočítat kovarianční a korelační matici
300     prisunu radonu
301     '',
302     N, R, K, A, V, podlazi = load_data(umisteni_sond)
303     Dates = load_Time(umisteni_sond)
304     A_diff = np.array([casove_derivace(dates, a) for dates, a in zip(Dates, load_A(
305         umisteni_sond, doplneni_chyb=False))])
306
307     Q = np.array([calculation_Q(K, a_out, a, a_diff) for a, a_diff in zip(A.T, A_diff.T)])
308     graf_Q(podlazi, Dates, Q)
309     export_R(R, V, N)
310     export_Q_statistiky(Q, podlazi)
311     export_inputData(V, podlazi)
312     # Q_covariance = np.array([covariance_matrix(q) for q in Q])
313     # Q_correlation = np.array([correlation_matrix(q) for q in Q])
314     return N, podlazi, Dates, A, A_diff, V, R, Q
315
316 #SKRIPTOVA CAST
317 umisteni_sond=[0, 1, 2]
318 a_out=0
319
320 N, podlazi, Dates, A, A_diff, V, R, Q=run(umisteni_sond)

```


C. Certifikáty zdrojů



Český metrologický institut Okružní 31, 638 00 Brno

tel. +420 545 555 111, fax +420 545 222 728, www.cmi.cz

Pracoviště: Oblastní inspektorát Praha, Radiová 1136/3, 102 00 Praha 10
Budova IZ, Radiová 1288/1a
tel. +420 266 020 497, fax +420 266 020 466

CERTIFIKÁT

Číslo certifikátu: 1035-SE-40901-14

Typ: RF 2000 Výrobní číslo: 211014-524038

Radionuklid: Ra-226

Poločas: 584300 dny

Aktivita: 2068 kBq

Hmotnost Ra-226: 56,53 µg

Emanační schopnost: 0,998

Radonová výdejnost: 4,330 Bq/s

Poločas Rn-226: 3,824 dní

Radionuklidové nečistoty: -

Referenční datum: 1.12.2014

Vnitřní objem mezi ventily: 200 cm³

Kombinovaná standardní nejistota aktivity: 1,5 %

Popis:

Suchý průtočný zdroj Rn-226 s emanační schopností bližící se 1, uzavřený ve válcovém hliníkovém pouzdře, opatřeném dvěma kulovými ventily. Zdroj radonu ve formě polymerové fólie je umístěn ve středu trubice.

Měřící metoda:

Porovnání s Ra-226 standardy OI Praha.

Poznámka:

Zdroj pracuje spolehlivě v rozmezí teplot 0 - 40 stupňů Celsia a relativní vlhkosti 0 - 100 % (nekondenzující).
1 g Ra-226 = 3,658E10 Bq

Datum vydání certifikátu: 11.12.2014

Platnost certifikátu: 5 let

Zákazník:

SÚRO, v.v.i.
Bartoškova 28
140 00 Praha 4



Ing. Jiří Šuráň, MBA
zástupce ředitele OI Praha

Kontrola: Ing. Vlasta Zdychová



Český metrologický institut

Okružní 31, 638 00 Brno

tel. +420 545 555 111, fax +420 545 222 728, www.cmi.cz

Pracoviště: Oblastní inspektorát Praha, Radiová 1136/3, 102 00 Praha 10
Budova IZ, Radiová 1288/1a
tel. +420 266 020 497, fax +420 266 020 466

CERTIFIKÁT

Číslo certifikátu: 1035-SE-40900-14 Typ: RF 2000 Výrobní číslo: 211014-524037

Radionuklid: Ra-226 Poločas: 584300 dny

Aktivita: 1915 kBq Hmotnost Ra-226: 52,35 µg Emanační schopnost: 0,998

Radonová výdejnost: 4,010 Bq/s Poločas Rn-222: 3,824 dní

Radionuklidové nečistoty: -

Referenční datum: 1.12.2014 Vnitřní objem mezi ventily: 200 cm³

Kombinovaná standardní nejistota aktivity: 1,5 %

Popis:

Suchý průtočný zdroj Rn-222 s emanační schopností blížící se 1, uzavřený ve válcovém hliníkovém pouzdře, opatřeném dvěma kulovými ventily. Zdroj radonu ve formě polymerové fólie je umístěn ve středu trubice.

Měřící metoda:

Porovnání s Ra-226 standardy OI Praha.

Poznámka:

Zdroj pracuje spolehlivě v rozmezí teplot 0 - 40 stupňů Celsia a relativní vlhkosti 0 - 100 % (nekondenzující).
1 g Ra-226 = 3,658E10 Bq

Datum vydání certifikátu: 11.12.2014

Platnost certifikátu: 5 let

Zákazník:

SÚRO, v.v.i.
Bartoškova 28
140 00 Praha 4



Ing. Jiří Šuráň, MBA
zástupce ředitele OI Praha

Kontrola: Ing. Vlasta Zdychová

D. Přílohy k objektu Skála 75, okr. Havlíčkův Brod

D.1 Fotografie objektu



Obr. D.1: Fotografie objektu z přední strany.

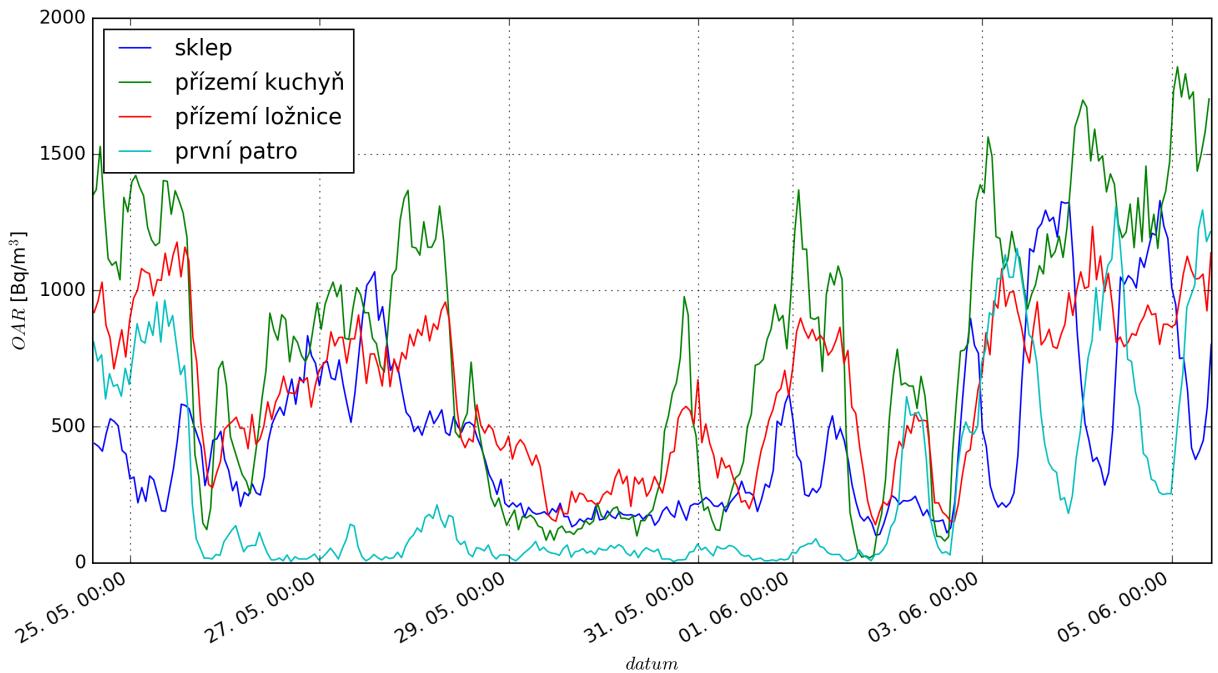
D.2 Použitá měřidla

- 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

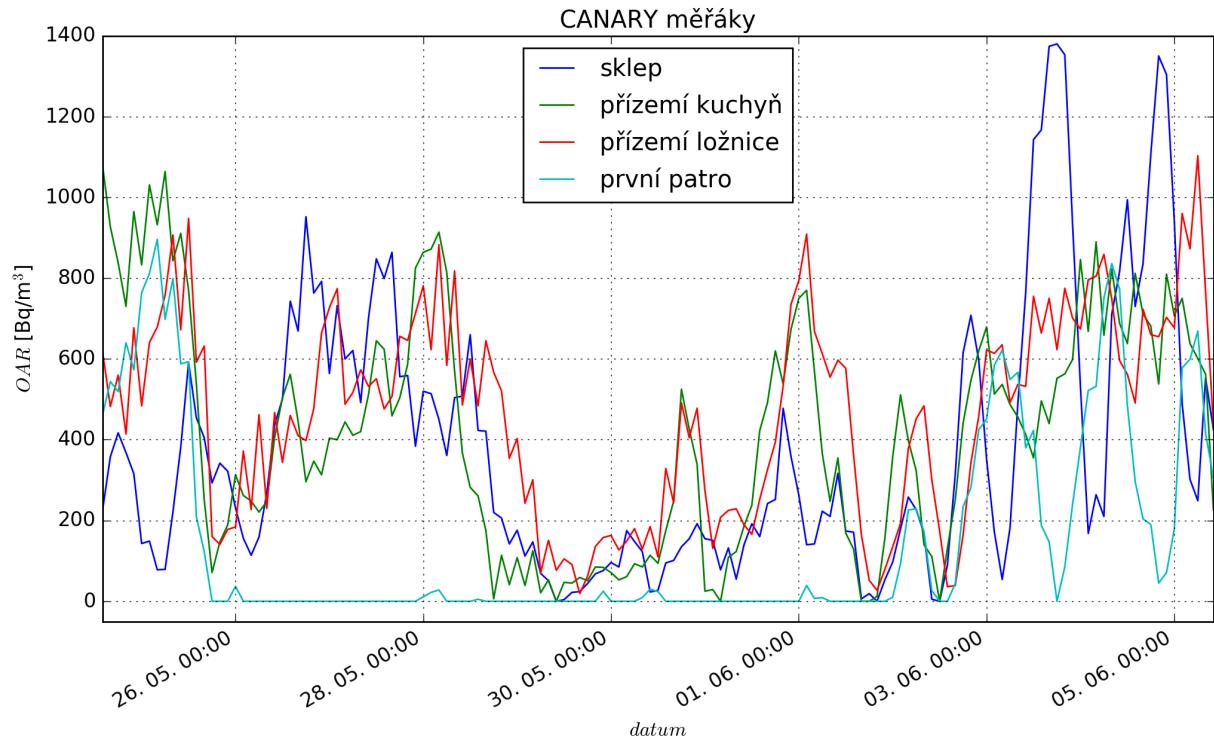
D.3 Naměřené OAR, objemy a teploty

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



Obr. D.2: Vývoj OAR naměřený TERA sondami po aplikování kalibračních konstant (tab. 6.4). Pro další vyhodnocování byly OAR naměřené v p̍ízemí v kuchyni a v ložnici zprůměrovány.



Obr. D.3: Vývoj OAR naměřený CANARY měřáky.

D.3.1 Průměrné hodnoty OAR

Tab. D.2: Průměrné objemové koncentrace radonu naměřené TERA sondami umístěnými v uvedených podlažích. σ_A je nejistota OAR typu A plynoucí ze statistického zpracování naměřených dat, σ_B je nejistota OAR typu B plynoucí z ostatních zdrojů (statistika detekce, nejistota měřidla) a σ je kombinovaná nejistota OAR. Při určování přísluní radonu v rovnovážném stavu byla použita pouze nejistota typu B, tj. σ_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 σ_B (viz podkapitola 2.1.1).

ID sondy	podlaží	OAR [Bq/m³]	σ_A	σ_B	σ	\bar{c} [$\frac{\text{imp}}{\text{hod}} / \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$]
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. D.3: Průměrné OAR naměřené CANARY měřáky umístěnými v daných podlažích.

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

D.4 Objemové průtoky vzduchu

Tab. D.4: 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. D.5: Odezvy TD detektorů R na všechny použité indikační plyny ve všech zónách.

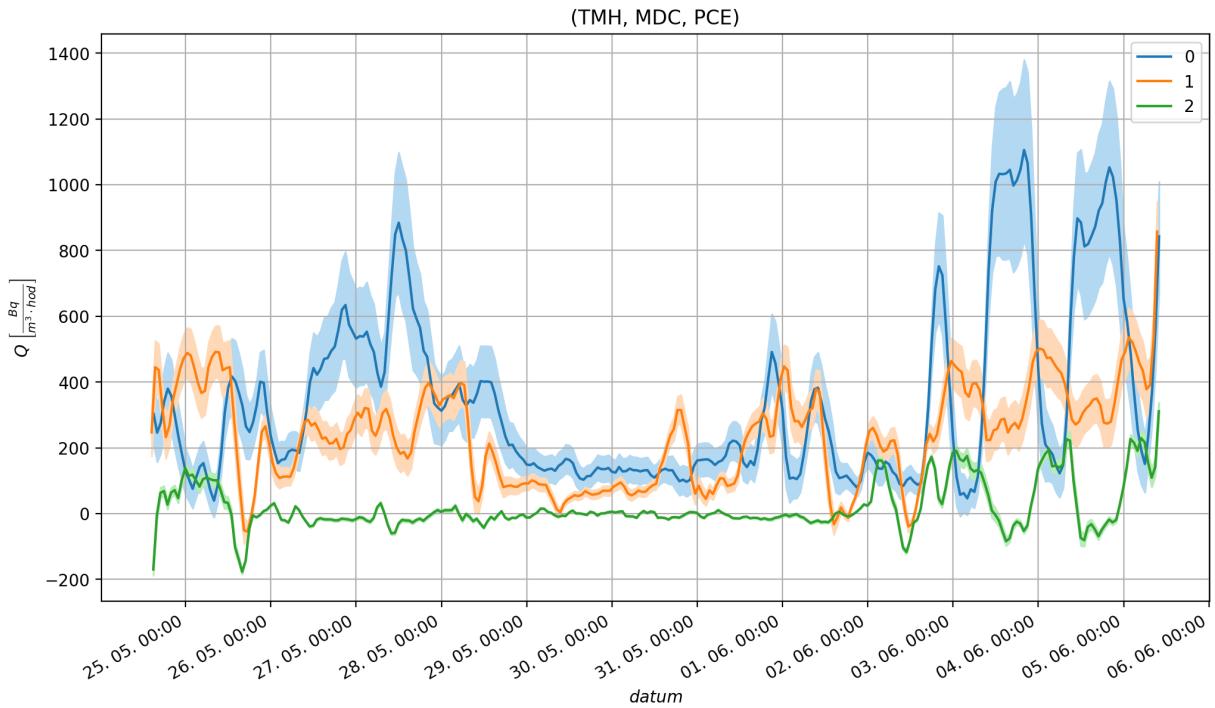
plyn	zóna	R [ng]
MCH	1	36,0 ± 2,3
	2	395,8 ± 16,6
	3	50,8 ± 2,3
MDC	1	34,5 ± 1,2
	2	304,9 ± 7,1
	3	47,2 ± 1,2
TMH	1	145,3 ± 26,0
	2	37,5 ± 3,9
	3	20,2 ± 2,4
PCH	1	20,7 ± 2,4
	2	26,9 ± 0,7
	3	182,2 ± 4,6
TCE	1	191,8 ± 14,5
	2	32,2 ± 1,4
	3	25,0 ± 1,2
PCE	1	0,0 ± 0,0
	2	2,6 ± 0,1
	3	136,9 ± 4,1

Tab. D.6: Objemové průtoky vzduchu v m³/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	$0,239 \pm 0,028$	$0,298 \pm 0,034$	$0,212 \pm 0,025$	$0,275 \pm 0,031$

D.5 Přísuny radonu - grafy a statistiky

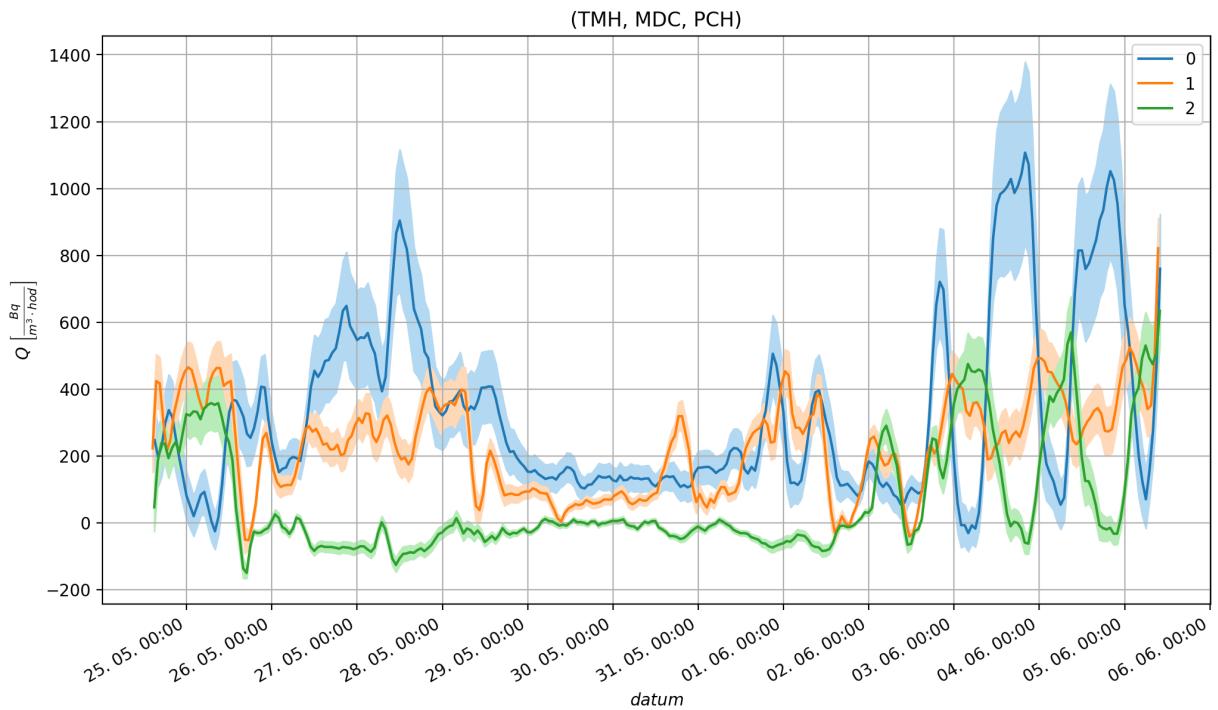
V tomto oddíle jsou uvedeny časové vývoje $Q_i(t)$ z naměřených časových vývojů OAR TERA sondami pro všechny kombinace použitých indikačních plynů.



Obr. D.4: Určený časový vývoj přísunů radonu do jednotlivých podlaží. Nad obrázkem je uvedena kombinace tří použitých indikačních plynů. Oblasti označené zesklenou barvou značí nejistotu přísunů radonu při faktoru pokrytí $k = 1$.

Tab. D.7: Statistiky vypočítaných přísunů radonu Q do jednotlivých podlaží při stejné kombinaci použitých plynů jako v obr. nad touto tabulkou.

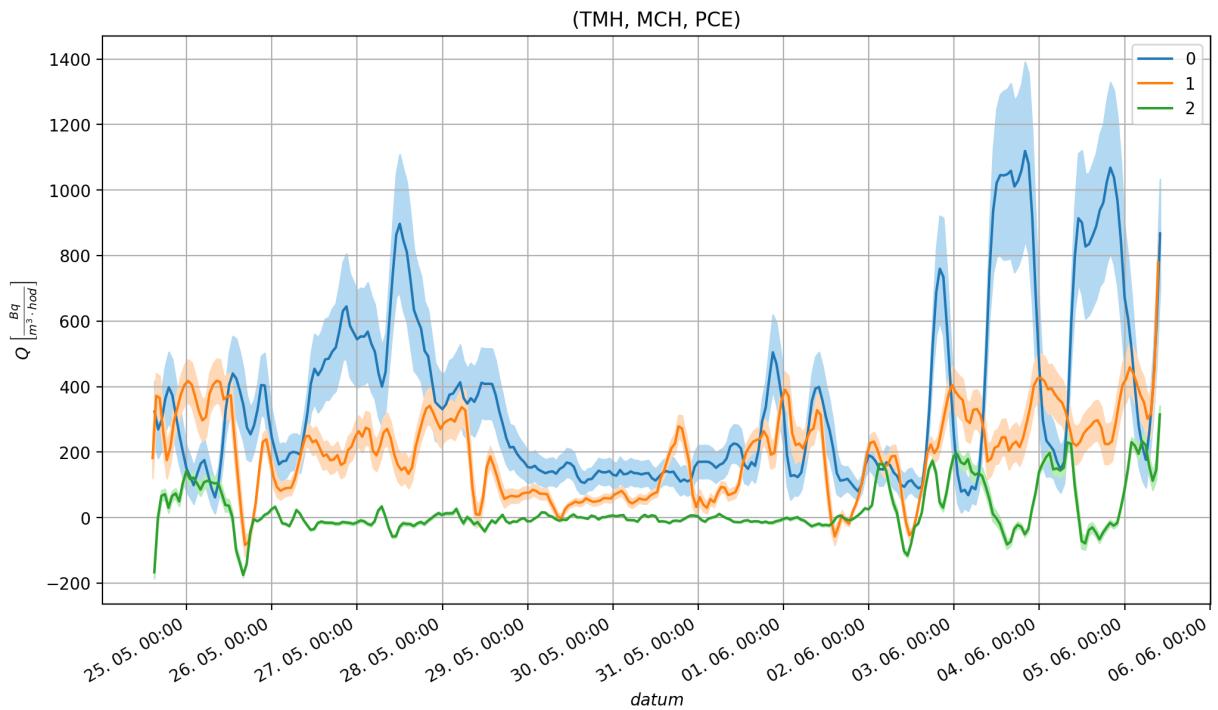
	Q_0 [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$]	Q_1 [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$]	Q_2 [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$]
count	284	284	284
mean	337	237	19
min	15	-85	-269
25%	137	102	-19
50%	222	237	-2
75%	449	352	29
max	1161	891	371



Obr. D.5: 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. D.8: Statistiky vypočítaných přísunů radonu Q do jednotlivých podlaží při stejné kombinaci použitých indikačních plynů jako v obr. nad touto tabulkou.

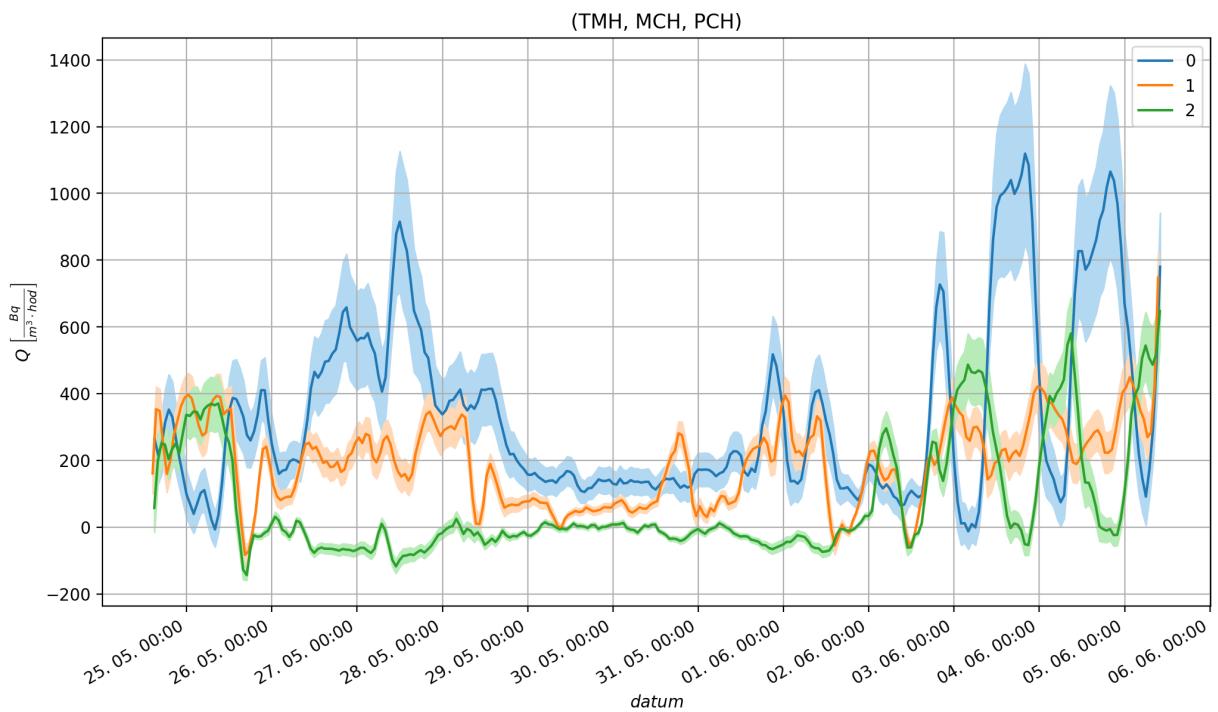
	Q_0 [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$]	Q_1 [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$]	Q_2 [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$]
count	284	284	284
mean	325	232	64
min	-51	-85	-225
25%	136	103	-45
50%	211	230	-7
75%	437	345	126
max	1165	854	704



Obr. D.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. D.9: Statistiky vypočítaných přísunů radonu Q do jednotlivých podlaží při stejné kombinaci použitých indikačních plynů jako v obr. nad touto tabulkou.

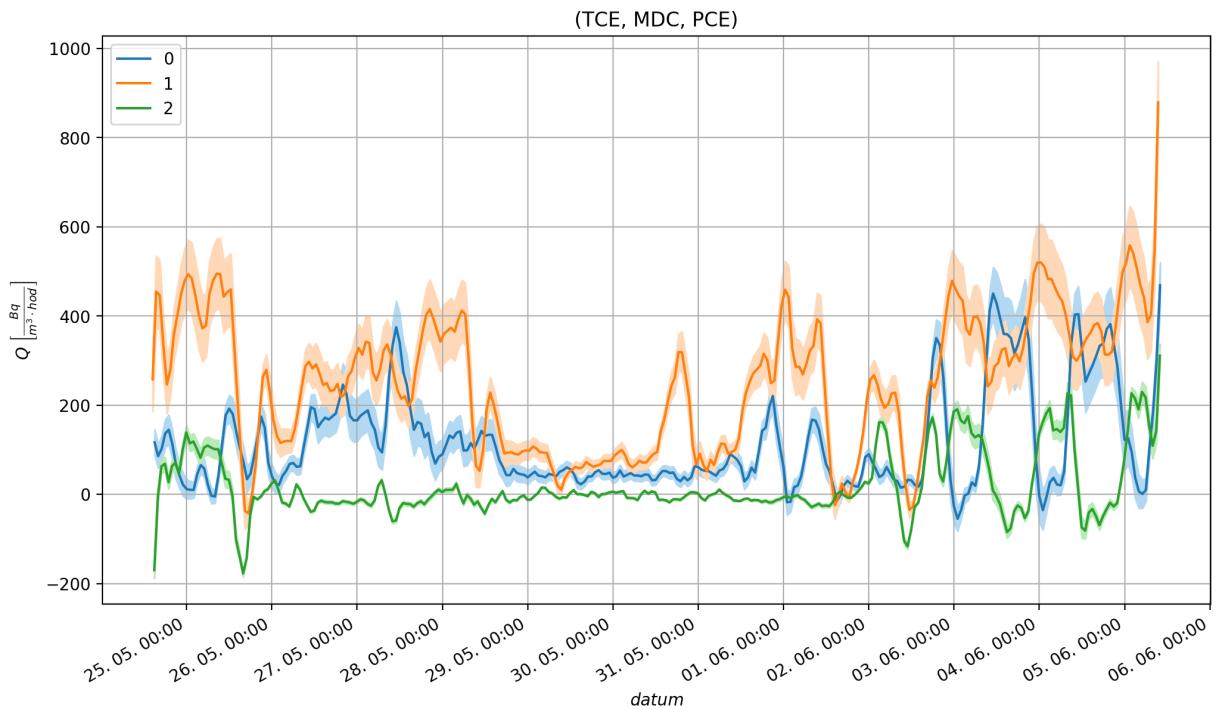
	Q_0 [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$]	Q_1 [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$]	Q_2 [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$]
count	284	284	284
mean	349	198	21
min	37	-121	-266
25%	148	83	-18
50%	239	199	0
75%	461	298	32
max	1175	812	375



Obr. D.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. D.10: Statistiky vypočítaných přísunů radonu Q do jednotlivých podlaží při stejné kombinaci použitých indikačních plynů jako v obr. nad touto tabulkou.

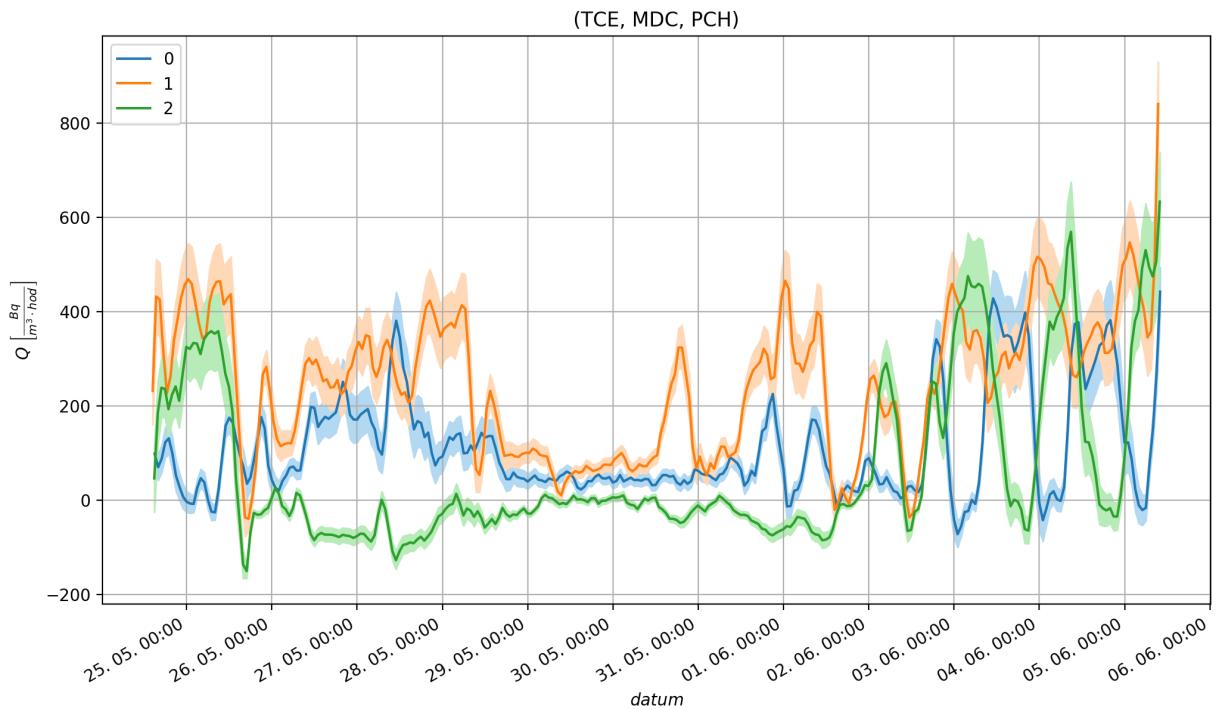
	Q_0 [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$]	Q_1 [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$]	Q_2 [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$]
count	284	284	284
mean	336	193	71
min	-33	-117	-216
25%	140	83	-40
50%	220	191	-2
75%	447	293	133
max	1178	781	717



Obr. D.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. D.11: Statistiky vypočítaných přísunů radonu Q do jednotlivých podlaží při stejné kombinaci použitých indikačních plynů jako v obr. nad touto tabulkou.

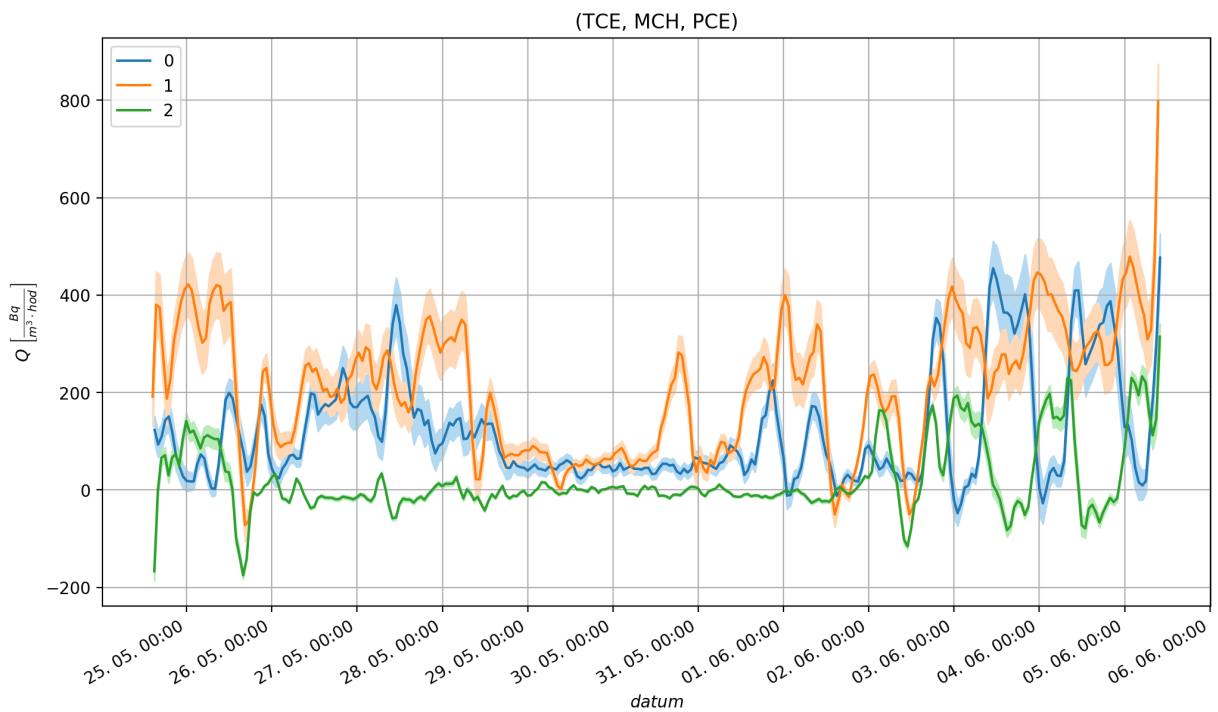
	Q_0 [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$]	Q_1 [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$]	Q_2 [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$]
count	284	284	284
mean	113	250	19
min	-85	-78	-269
25%	37	111	-20
50%	74	255	-2
75%	161	369	29
max	528	913	371



Obr. D.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. D.12: Statistiky vypočítaných přísunů radonu Q do jednotlivých podlaží při stejné kombinaci použitých indikačních plynů jako v obr. nad touto tabulkou.

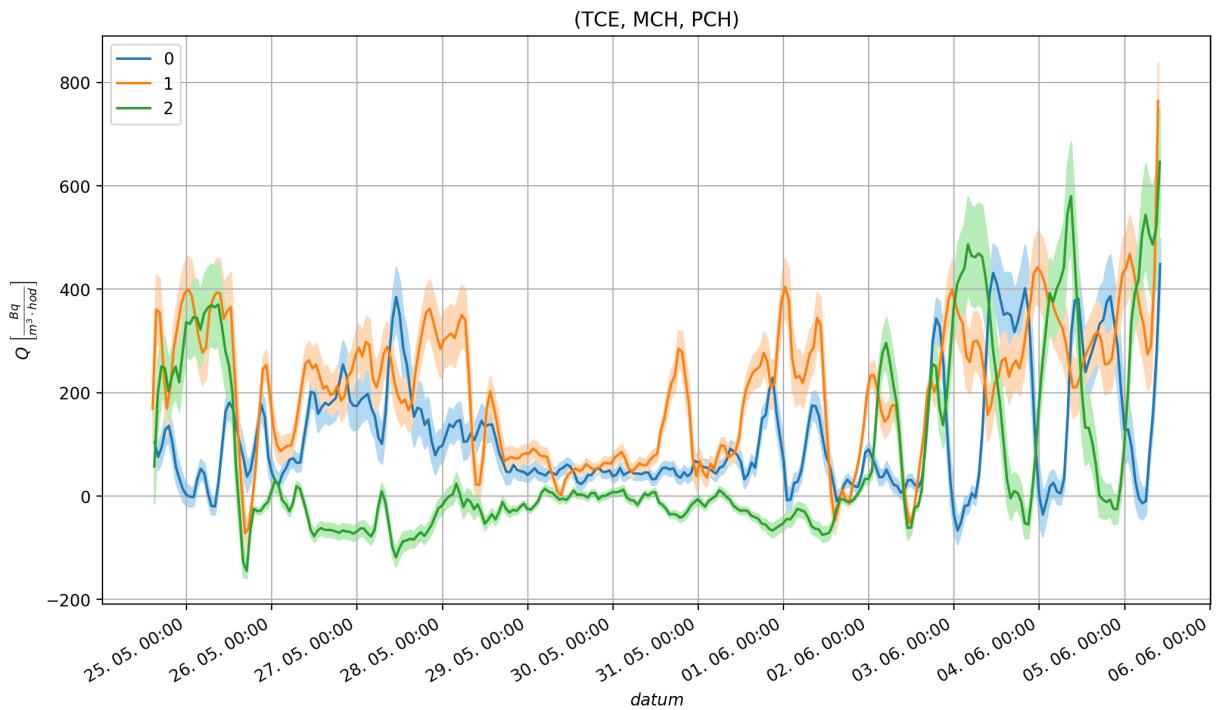
	Q_0 [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$]	Q_1 [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$]	Q_2 [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$]
count	284	284	284
mean	109	245	64
min	-101	-80	-225
25%	32	108	-46
50%	74	247	-8
75%	162	361	125
max	496	873	703



Obr. D.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. D.13: Statistiky vypočítaných přísnů radonu Q do jednotlivých podlaží při stejné kombinaci použitých indikačních plynů jako v obr. nad touto tabulkou.

	Q_0 [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$]	Q_1 [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$]	Q_2 [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$]
count	284	284	284
mean	117	209	21
min	-79	-112	-266
25%	40	89	-18
50%	75	220	0
75%	166	313	32
max	534	832	375



Obr. D.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. D.14: Statistiky vypočítaných přísunů radonu Q do jednotlivých podlaží při stejné kombinaci použitých indikačních plynů jako v obr. nad touto tabulkou.

	Q_0 [Bq/m ³ .hod]	Q_1 [Bq/m ³ .hod]	Q_2 [Bq/m ³ .hod]
count	284	284	284
mean	113	204	71
min	-96	-108	-217
25%	35	90	-40
50%	76	207	-3
75%	165	307	132
max	501	797	717

E. Přílohy k objektu Hálková 980, Humpolec

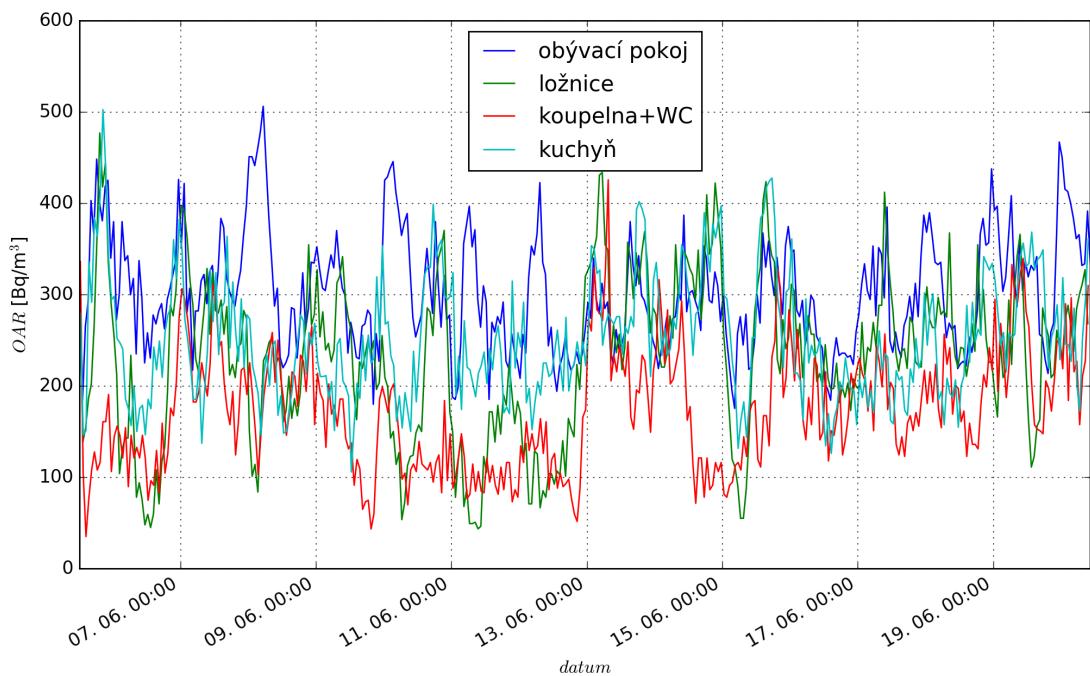
E.1 Použitá měřidla

- 20 vývýječů (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

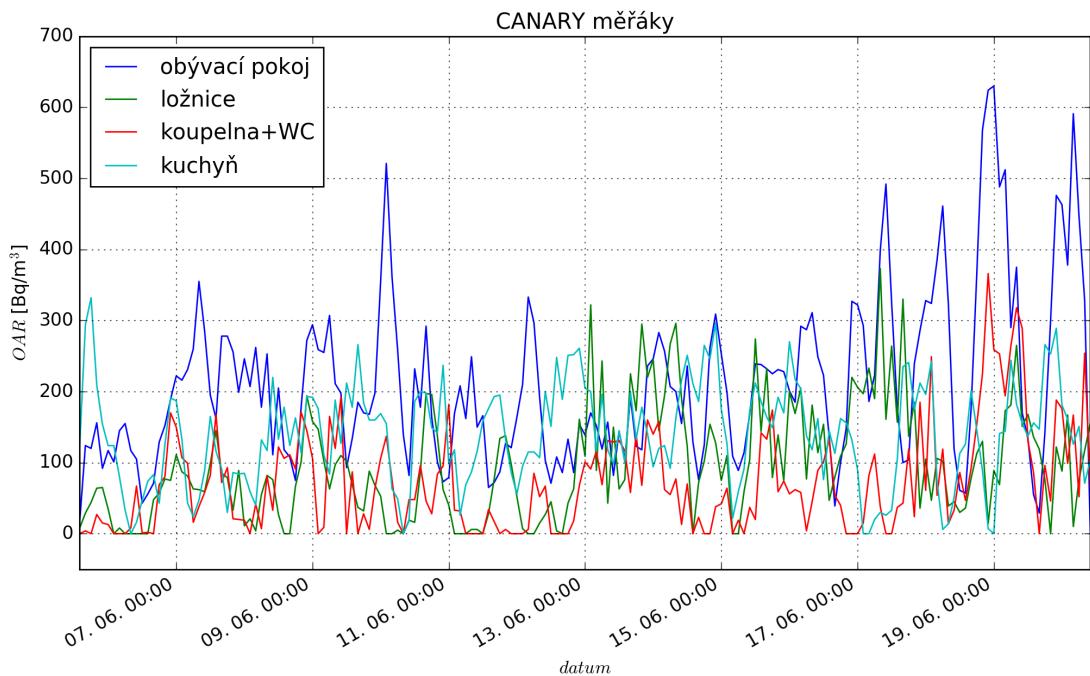
E.2 Naměřené OAR, objemy a teploty

Tab. E.1: 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 Bq/m³.

podlaží	zóna	místnost	V [m ³]	T [°C]	p [kPa]	OAR_T	OAR_C
4	1	obývací pokoj	47±9	25,10	100	302 ± 29	210 ± 21
4	2	ložnice	39±8	25,16	100	232 ± 25	97 ± 10
4	3	koupelna+WC	23±5	24,48	100	172 ± 23	72 ± 7
4	4	kuchyně	28±6	25,03	100	251 ± 23	139 ± 14



Obr. E.1: Vývoj OAR naměřený TERA sondami po aplikování kalibračních konstant (tab. 6.4).



Obr. E.2: Vývoj OAR naměřený CANARY měřáky.

E.3 Objemové průtoky vzduchu

Tab. E.2: Přehled použitých indikačních plynů a umístění jejich vyvíječů v objektu. V posledním sloupci jsou celkové odpary plynů ze všech jím odpovídajících vyvíječů.

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

Tab. E.3: Odezvy TD detektorů R na všechny použité indikační plyny ve všech zónách.

plyn	zóna	R [ng]
MDC	1	406 ± 23
	2	286 ± 16
	3	118 ± 9
	4	336 ± 19
MCH	1	346 ± 25
	2	698 ± 50
	3	126 ± 13
	4	359 ± 26
PCE	1	140 ± 21
	2	277 ± 42
	3	62 ± 9
	4	147 ± 22
TCE	1	152 ± 11
	2	124 ± 9
	3	258 ± 26
	4	167 ± 12
TMH	1	251 ± 27
	2	215 ± 23
	3	113 ± 17
	4	403 ± 43

Tab. E.4: Objemové průtoky vzduchu mezi zónami v m^3/hod a výměna vzduchu n v hod^{-1} .

	(MDC, PCE, TCE, TMH)	(MDC, MCH, TCE, TMH)
k_{12}	$12,2 \pm 4,8$	$40,9 \pm 13,4$
k_{13}	$3,6 \pm 4,7$	$5,1 \pm 4,6$
k_{14}	$96,7 \pm 35,1$	$96,7 \pm 33,5$
k_{21}	$41,8 \pm 28,2$	$42,9 \pm 15,0$
k_{23}	$3,9 \pm 3,2$	$1,1 \pm 1,8$
k_{24}	$21,6 \pm 23,8$	$21,5 \pm 12,7$
k_{31}	$35,0 \pm 14,6$	$34,9 \pm 14,5$
k_{32}	$1,0 \pm 1,5$	$3,4 \pm 5,0$
k_{34}	$25,9 \pm 13,1$	$25,9 \pm 13,1$
k_{41}	$83,1 \pm 36,8$	$82,9 \pm 36,6$
k_{42}	$4,3 \pm 4,0$	$14,4 \pm 12,8$
k_{43}	$8,8 \pm 5,2$	$9,4 \pm 5,3$
k_{1_E}	$72,3 \pm 18,5$	$42,7 \pm 10,8$
k_{2_E}	$-44,4 \pm 15,7$	$10,9 \pm 4,2$
k_{3_E}	$-15,0 \pm 6,7$	$-17,5 \pm 4,6$
k_{4_E}	$48,0 \pm 17,8$	$37,5 \pm 11,6$
k_{1_I}	$25,0 \pm 63,1$	$24,7 \pm 56,7$
k_{2_I}	$5,3 \pm 40,7$	$17,8 \pm 27,8$
k_{3_I}	$30,4 \pm 22,2$	$31,1 \pm 21,9$
k_{4_I}	$0,1 \pm 60,7$	$0,1 \pm 55,9$
n	$0,4 \pm 0,2$	$0,5 \pm 0,1$

F. Přílohy k objektu Anglická 574, Dobřichovice

F.1 Fotografie objektu



Obr. F.1: Fotografie objektu z přední strany.

F.2 Použitá měřidla

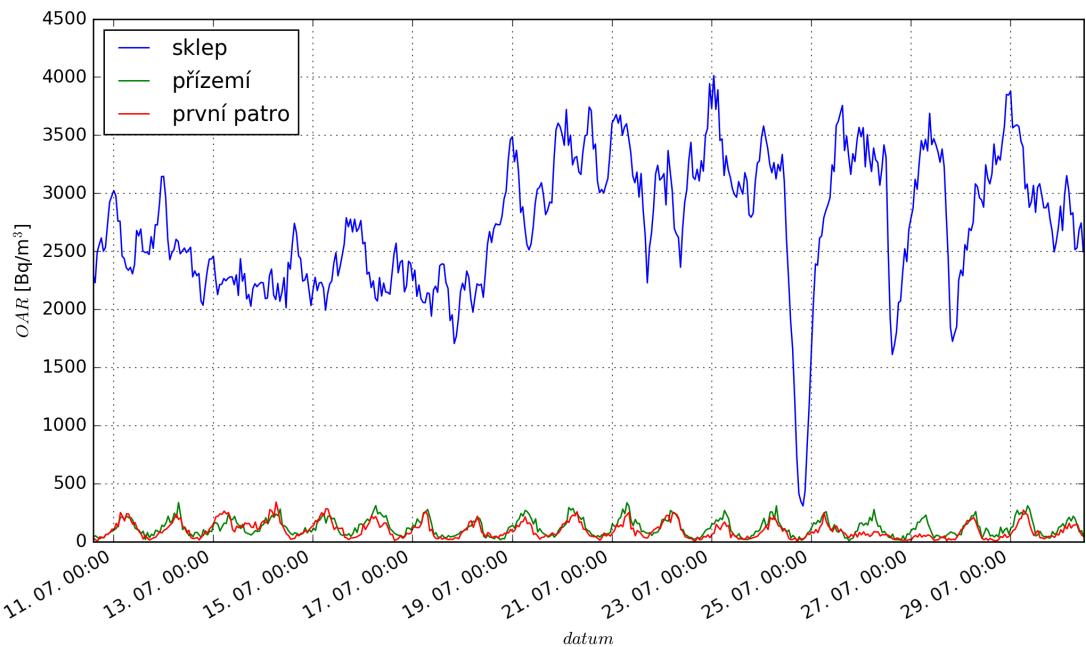
- 12 vyvýječů (4x MCH, 4x MDC, 4x PCH)
- 12 TD detektorů

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

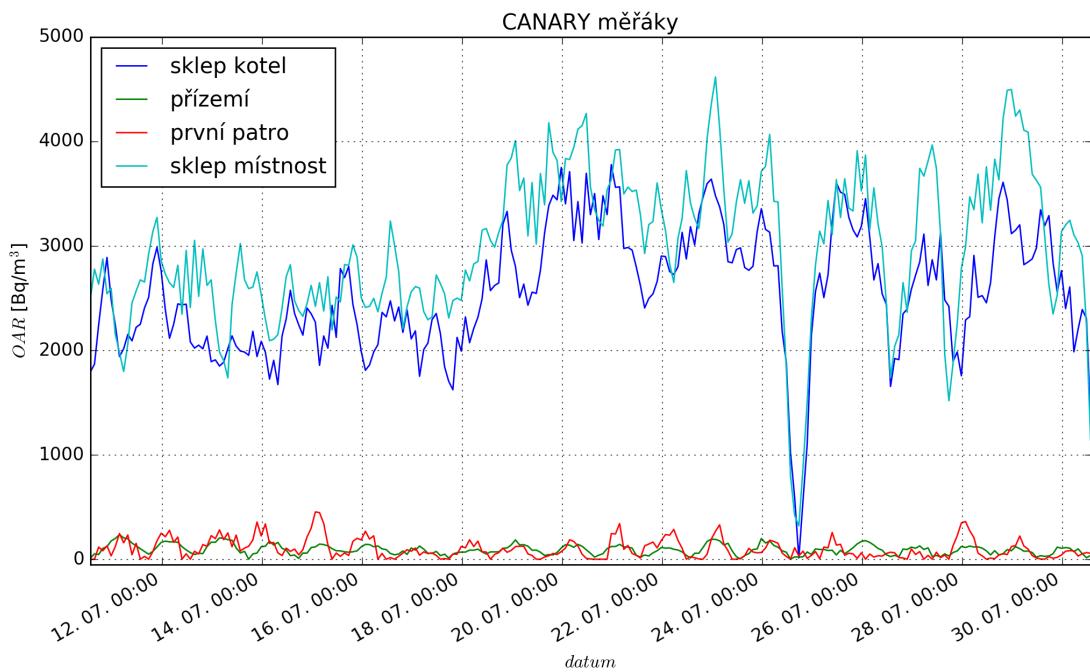
F.3 Naměřené OAR, objemy a teploty

Tab. F.1: 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 Bq/m^3 .

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



Obr. F.2: Vývoj OAR naměřený TERA sondami po aplikování kalibračních konstant (tab. 6.4).



Obr. F.3: Vývoj OAR naměřený CANARY měřáky.

F.4 Objemové průtoky vzduchu

Tab. F.2: 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. F.3: Odezvy TD detektorů R na všechny použité indikační plyny ve všech zónách.

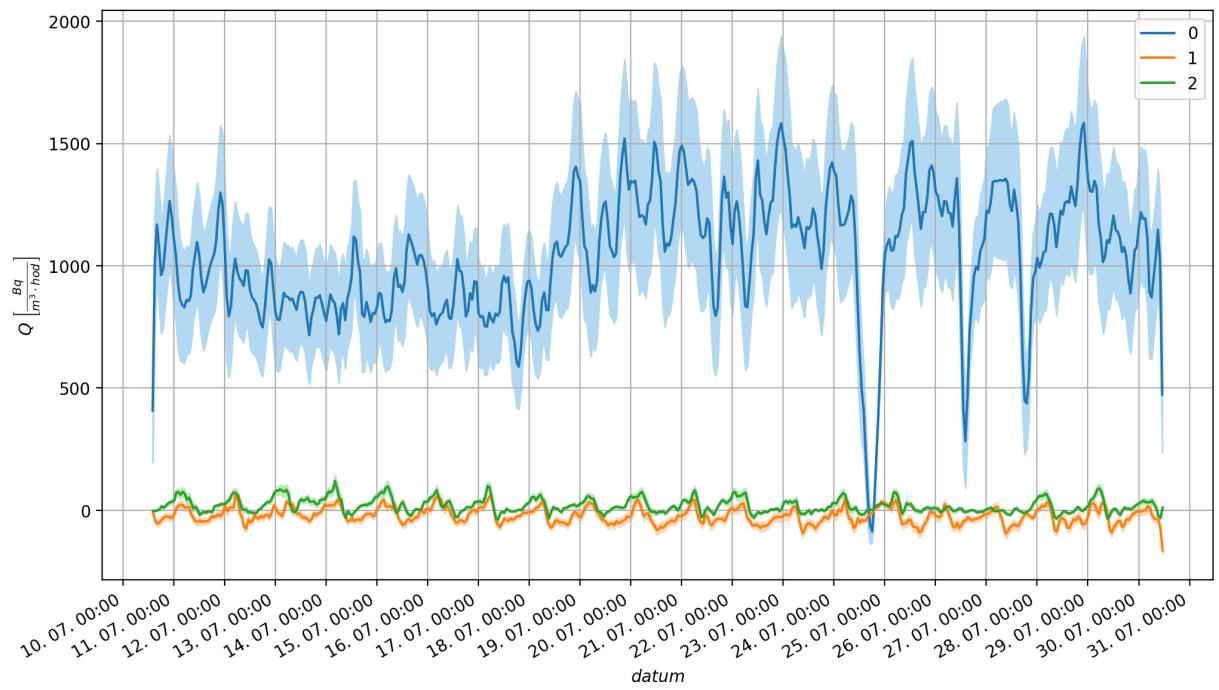
plyn	zóna	R [ng]
MCH	1	$1216,2 \pm 86,0$
	2	$89,1 \pm 5,4$
	3	$23,8 \pm 1,9$
MDC	1	$150,4 \pm 8,5$
	2	$1269,2 \pm 61,9$
	3	$173,8 \pm 9,4$
PCH	1	$9,3 \pm 0,5$
	2	$17,6 \pm 0,9$
	3	$1007,8 \pm 52,8$

Tab. F.4: Objemové průtoky vzduchu mezi zónami v m^3/hod a výměna vzduchu n v hod^{-1} .

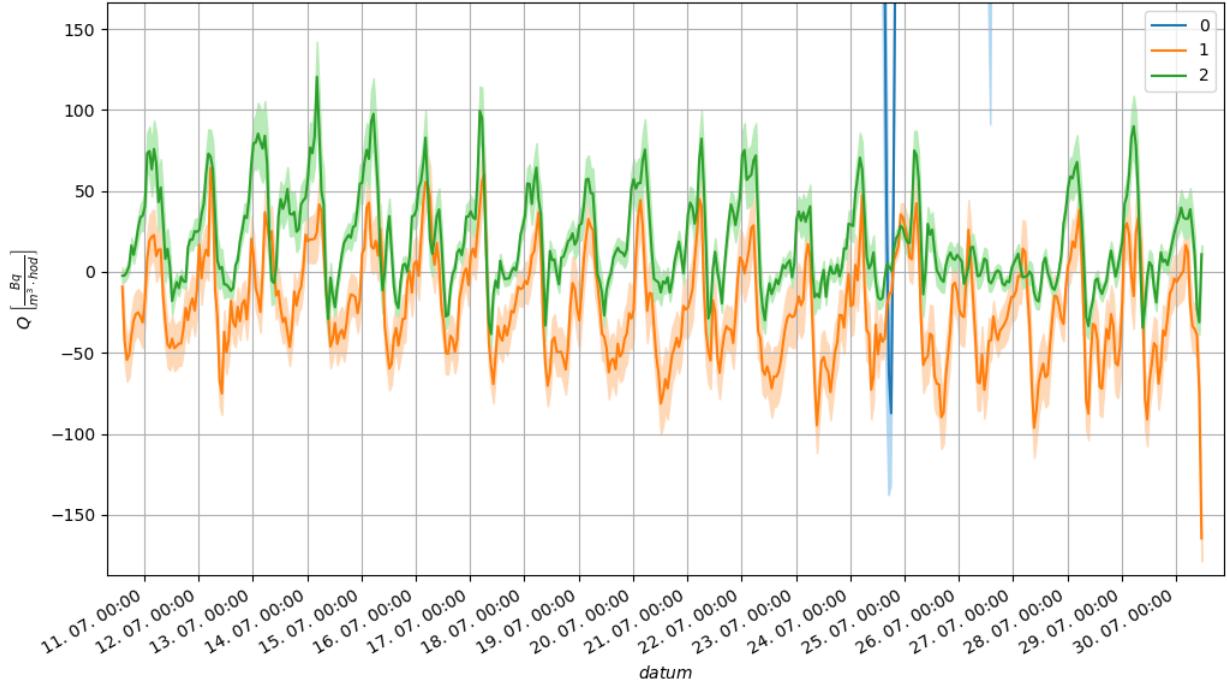
k_{12}	$2,32 \pm 0,38$
k_{13}	$0,29 \pm 0,09$
k_{21}	$2,96 \pm 0,48$
k_{23}	$4,25 \pm 0,65$
k_{31}	$0,18 \pm 0,03$
k_{32}	$0,55 \pm 0,08$
k_{1_E}	$22,05 \pm 2,53$
k_{2_E}	$25,24 \pm 2,80$
k_{3_E}	$30,74 \pm 3,07$
k_{1_I}	$21,52 \pm 2,60$
k_{2_I}	$29,59 \pm 2,94$
k_{3_I}	$26,93 \pm 3,14$
n	$0,29 \pm 0,04$

F.5 Přísluny radonu - grafy a statistiky

V tomto oddíle jsou uvedeny časové vývoje $Q_i(t)$ z naměřených časových vývojů OAR TERA sondami pro všechny kombinace použitých indikačních plynů.



(a)



(b)

Obr. F.4: 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 $k = 1$.

Tab. F.5: Statistiky vypočítaných přísnů radonu Q do jednotlivých podlaží.

	Q_0 [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$]	Q_1 [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$]	Q_2 [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{hod}}$]
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