

**Stanovení radonu *in situ* ve vzorcích  
podzemní vody ze štoly Josef**

---

Vadym Prokopec a Gabriela Broncová



**VYSOKÁ ŠKOLA  
CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ  
V PRAZE**

**2018**

**Pracovní text pro Podzemní výukové středisko Josef  
Meziuniverzitní laboratoř pro *in situ* výuku transportních procesů**

*Slouží jako zdroj informací během laboratorní úlohy, která je součástí předmětu „Laboratoř radioanalytických metod“ magisterského programu Analytická chemie a jakostní inženýrství VŠCHT Praha.*

**Podpořeno v rámci projektu PIGA C1\_VSCHT\_2018\_053**

**„Udržitelnost a inovace *in situ* výuky transportních procesů v reálném horninovém prostředí v rámci vybraných předmětů bakalářského a magisterského studia na Ústavu analytické chemie“**

**Teoretický úvod** je detailně popsán v návodu „Stanovení obsahu radonu ve vzduchu“, který je součástí předmětu „Laboratoře z analytické chemie II“ základního bakalářského programu VŠCHT Praha.

## Vlastnosti radonu

Radon je **plynný prvek**, který je součástí životního prostředí. Radon získal svůj název podle svého izotopu  $^{222}\text{Rn}$  s nejdelším poločasem rozpadu. Radon vzniká radioaktivním rozpadem radia a uranu, při němž se uvolňují částice  $\alpha$ , které mají dolet ve vzduchu při atmosférickém tlaku přibližně 4 cm. Radon je nestálý a postupně zaniká dalším radioaktivním rozpadem za vzniku polonia, bismutu a olova. Výše zmíněné kovy vzniklé rozpadem radonových atomů se pohybují ve vzduchu buď adsorbované na prachové částice, nebo v atomárním stavu. Tyto produkty pak negativně ovlivňují lidské zdraví, neboť díky své vysoké ionizační schopnosti mohou zapříčinit nekontrolovatelné množení buněk - rakovinu. Z hlediska **působení radonu na člověka** je nutno rozlišovat příjem inhalací (vdechnutím) a ingescí (požitím potravin či vody). Radon je **dobře rozpustný ve vodě** a v nepolárních organických rozpouštědlech. Je možno ho při velmi nízkých teplotách zachytit na aktivní uhlí.

## Výskyt a měření aktivity radonu

Množství radonu v zemské atmosféře je velmi nízké, prakticky na hranici detekce těch nejcitlivějších analytických metod. Nejčastěji se nalézá **ve vývěrech podzemních minerálních vod**. Radon se do podzemních vod dostává dvěma způsoby a to migrací z půdního vzduchu, anebo z radia již ve vodě rozpuštěného. Voda jako nezastupitelná složka životního prostředí je nepostradatelným přírodním zdrojem. Jako zdroje pitné vody jsou využívány vody podzemní nebo povrchové. Přírodní radionuklidy obsažené v horninách se uvolňují do vod v závislosti na geochemických, fyzikálních a hydrologických poměrech. V podzemních vodách dochází k dlouhodobému kontaktu s horninami s vyšším obsahem přírodních radionuklidů. Požadavky na měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů v pitné vodě jsou stanoveny legislativou České republiky. Základní rozbor vody dle vyhlášky (č. 307/2002 Sb, Atomový zákon) zahrnuje stanovení celkového obsahu radionuklidů a to včetně objemové aktivity  $^{222}\text{Rn}$  v podzemních vodách. Zjišťování koncentrace radonu se u nás provádí převážně u vodních zdrojů, jež se využívají jako zdroje pitné vody. **Měření radioaktivity vod** provádí Státní ústav radiační ochrany (SÚRO) nebo akreditované firmy. **Radioaktivita A** charakterizuje rychlost radioaktivní přeměny, což je úbytek celkového počtu atomů za čas. V daném okamžiku je tato veličina úměrná celkovému počtu radioaktivních atomů. Jednotkou radioaktivity radonu a jeho dceřiných produktů je  $\text{Bq/m}^3$  a  $\text{Bq/l}$ . Rozlišuje se buď objemová aktivita ve vzduchu, nebo v kapalinách. Objemová aktivita radonu ve vzduchu  $1 \text{ Bq/m}^3$  říká, že v objemu  $1 \text{ m}^3$  dojde k  $1 \cdot 10^3$  radioaktivním přeměnám. Podobně je tomu i ve vodě, kdy jsou jednotky  $\text{Bq/l}$ . Objemová aktivita radonu je závislá na více faktorech. Jedním z těchto vlivů může být i počasí. Pokud jsou v delším časovém období velká sucha, dochází k zakoncentrování radonu v podzemní vodě a tudíž ke zvýšení jeho koncentrace. Obdobná situace je i u opačného extrému tedy za dlouhodobě velmi nízkých teplot, kdy dochází díky mrazu k vytvoření neprostupné vrstvy a opětovnému zakoncentrování radonu. V jarních měsících a v deštivých obdobích se zvyšuje hladina podzemní vody, dochází ke zředění koncentrace radonu ve vodě. Radon lze **odstranit z vody aerací**, tedy **provzdušňováním**.

## Využití radonu

Studium obsahu izotopů radonu v podzemních vodách slouží v geologii k určení jejich původu a stáří. Převážná většina izotopů radonu funguje jako alfa-zářiče s poměrně krátkým

poločasem rozpadu (nejznámější izotop  $^{222}\text{Rn}$  má poločas rozpadu 3,82 dne, další izotopy už jen:  $^{220}\text{Rn}$  54,5 s a  $^{219}\text{Rn}$  3,92 s). Používají se proto někdy pro krátkodobé lokální ozařování vybraných tkání v medicíně. Radon je ale stále častěji využíván zejména v lázeňské léčbě. Radonová voda (voda obsahující rozpuštěný radon) se používá např. v jáchymovských lázních, kam je dopravována potrubím z bývalého uranového dolu Svornost, který se měrnou aktivitou přibližně 9-10 kBq/l řadí mezi velmi silné radonové vody (tj. více než 4 kBq/l). Pramen Agricola (navrtnán v roce 2000) má měrnou aktivitu ještě přibližně dvakrát tak větší, ale jeho vydatnost je menší. Vydatnost všech Jáchymovských radioaktivních pramenů činí řádově 500m<sup>3</sup>/den. Typická délka pobytu pacienta ve vaně s radonovou vodou je dvacet minut. Voda z termálních minerálních radonových pramenů se používá k léčbě některých chronických chorob pohybového aparátu. Nejdůležitější z klinických účinků radonových koupelí je účinek analgetický. Koupele tlumí bolesti u chronických bolestivých stavů. V mechanismu účinku terapie alfa zářením je však dosud mnoho nejasného a stále probíhá objektivizace těchto metod.

### **Popis měřicí sestavy AquaKIT**

Sestava AquaKIT je doplňkem k systému monitorování radonu AlphaGUARD PQ2000 PRO. V kombinaci s čerpadlem AlphaPUMP umožňuje přímé a dostatečně přesné stanovení koncentrace radonu ve vodných vzorcích.

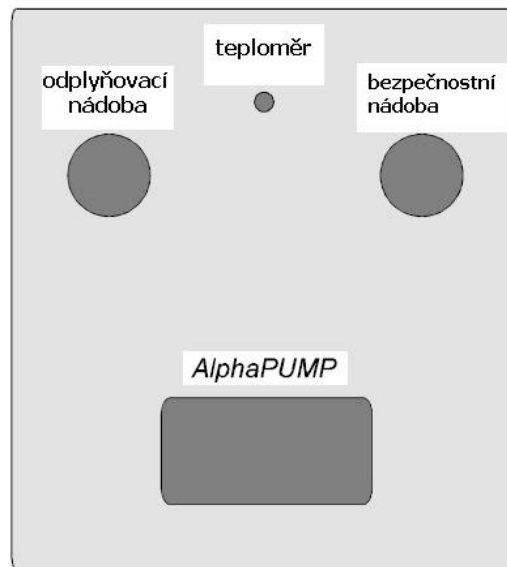
Měřicí sestava AquaKIT obsahuje následující komponenty:

- odplyňovací nádoba
- bezpečnostní nádoba
- 4 vzorkovací nádoby (2 x 100 ml / 2 x 500 ml)
- 4 plastové vzorkovací injekční stříkačky
- upevňovací základna
- spojovací hadičky
- zásobník s aktivním uhlím
- laboratorní teploměr
- odměrný válec

Zásobník s aktivním uhlím slouží k odstranění radonu ze vzduchu proudícího v systému při měření „nulové hodnoty“ aktivity před zahájením měření vzorku. Zásobník je tvořen plastovým válcem naplněným aktivním uhlím (celkový objem náplně – ca. 1000 cm<sup>3</sup>, průměrná velikost částic – 1,5 mm, hustota – 0,4 g/cm<sup>3</sup>, absorpční kapacita  $\approx 1,25 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/g). Zásobník je z obou stran opatřen tryskami pro přívod proudícího vzduchu. Kapacita zásobníku odpovídá ca. 500 l vzduchu.

### **Sestavení měřicí aparatury**

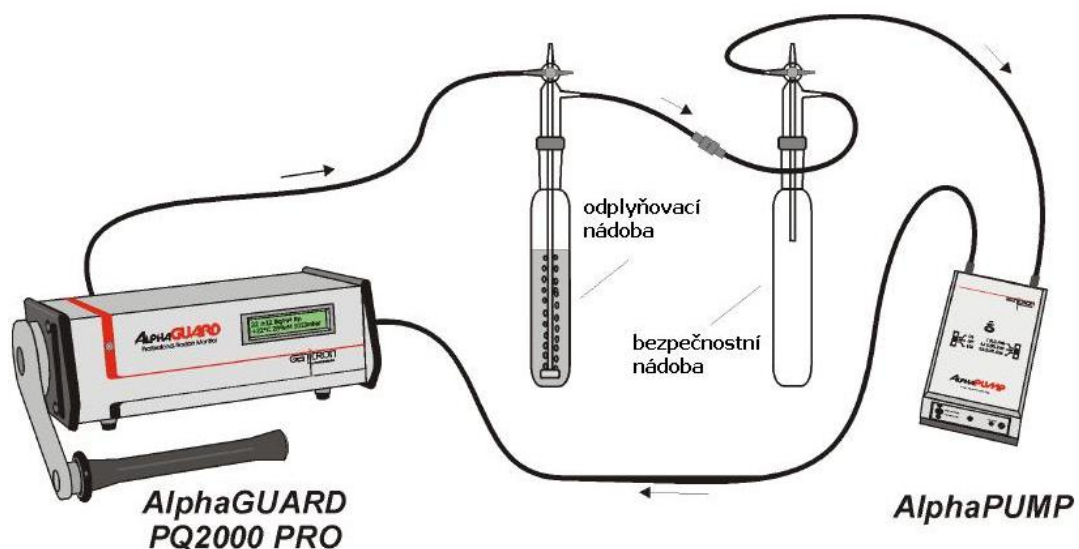
Pro zajištění stability a přesnosti měření systému je potřeba umístit odplyňovací a bezpečnostní nádobu a rovněž čerpadlo AlphaPUMP do těla upevňovací základny tak, jak je znázorněno na Obr. 1. Těsnost uzávěrů obou nádob je zajištěna pomocí plastových bezpečnostních svorek. Měřicí přístroj AlphaGUARD by měl být umístěn v bezprostřední blízkosti upevňovací základny, pro sestavení uzavřeného okruhu proudění plynu se využijí plastové hadičky odpovídající délky.



**Obr. 1 Schématické umístění jednotlivých součástí měřící aparatury na upevňovací základně**

Uzavření okruhu proudění plynu je potřeba provést následujícím způsobem (Obr. 2):

1. Spodní tryska na hlavici uzávěru odplyňovací nádoby musí být propojena se spodní tryskou na hlavici uzávěru bezpečnostní nádoby. K tomuto účelu se použijí 150 mm hadičky spojené uzavíratelnou spojkou.
2. Horní tryska na hlavici uzávěru bezpečnostní nádoby musí být propojena pomocí 400 mm hadičky se vstupní tryskou čerpadla AlphaPUMP (označenou „IN“).
3. Výstupní tryska čerpadla AlphaPUMP (označena „OUT“) musí být propojena pomocí 600 mm hadičky se vstupní tryskou ionizační komory na pravé straně přístroje AlphaGUARD.
4. Výstupní tryska na zadní straně přístroje AlphaGUARD musí být propojena pomocí 500 mm hadičky s horní tryskou na hlavici uzávěru odplyňovací nádoby.

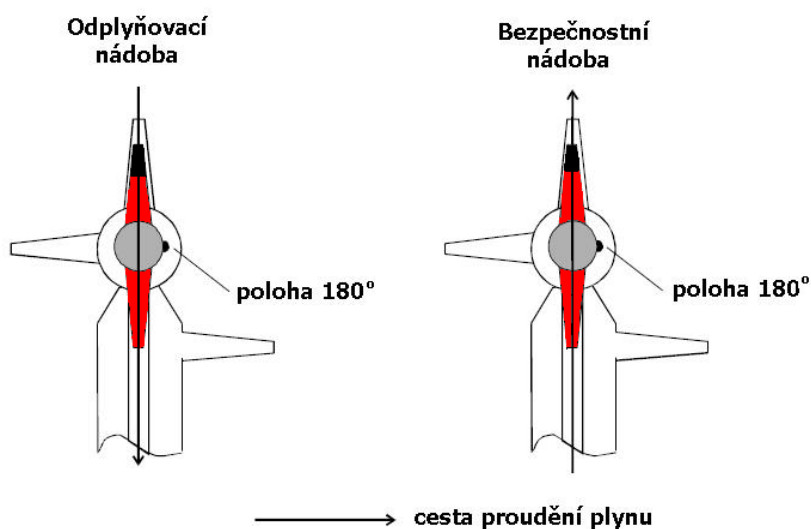


**Obr. 2 Kompletní sestava měřící aparatury**

## Manipulace s trojcestnými kohouty

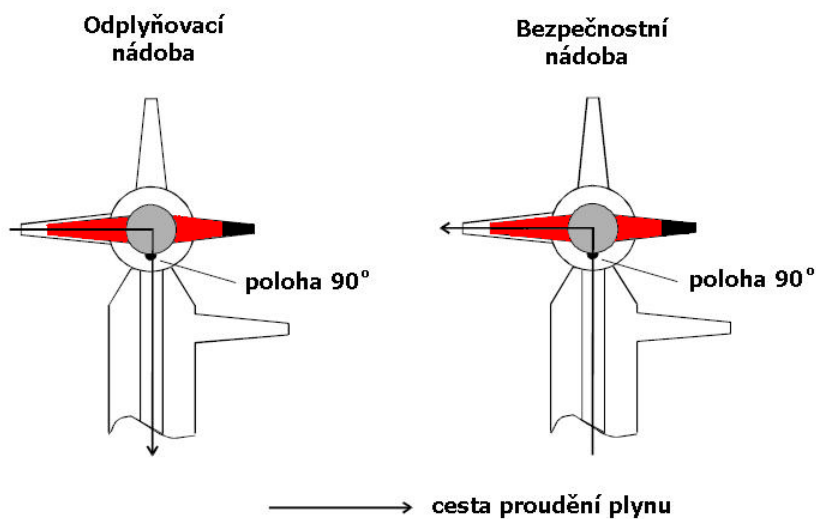
Hlavice uzávěrů odplyňovací a bezpečnostní nádoby jsou opatřeny trojcestnými kohouty pro přívod a odvod plynu, které umožňují změnu cesty proudění plynu v závislosti na provádění přípravných nebo měřicích operací a rovněž zabráňují úniku plynu z uzavřeného okruhu při zařazení zásobníku s aktivním uhlím.

Poloha kohoutů během dávkování vzorku je znázorněna na Obr. 3. Vychýlení polohy kohoutu může způsobit **vniknutí kapaliny** do cesty proudění plynu, což může mít za následek **kontaminaci měřicích přístrojů** vyžadující následný komplikovaný a nákladný servisní zásah. Poloha  $180^\circ$  zajišťuje stabilní vnitřní tlak v systému během dávkování vzorku. Po ukončení dávkování je třeba ihned přepnout kohout na bezpečnostní nádobě do měřicí polohy, čímž se zabrání nekontrolovanému úniku plynného radonu do okolního vzduchu. Rovněž je nutné přepnout kohout odplyňovací nádoby do měřicí polohy před odpojením prázdné vzorkovací injekční stříkačky.



Obr. 3 Poloha trojcestných kohoutů při dávkování vzorku

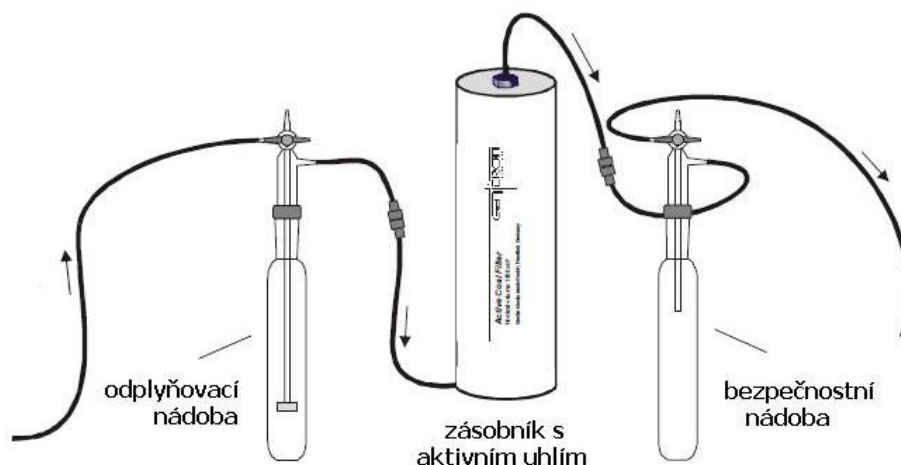
Poloha kohoutů během měření je znázorněna na Obr. 4.



Obr. 4 Poloha trojcestných kohoutů během měření vzorku

## Použití zásobníku s aktivním uhlím

Přesné měření koncentrace radonu vyžaduje minimalizaci aktivity radonu v měřicím systému před zahájením měření vzorku. K tomuto účelu se do uzavřeného okruhu proudění plynu zapojí zásobník s aktivním uhlím (Obr. 5). Radon obsažený ve vzduchu uvnitř uzavřeného okruhu je pak adsorbován aktivním uhlím v zásobníku. Zásobník se umístí mezi odplyňovací a bezpečnostní nádobu rozpojením uzavíratelné spojky a propojením dvěma 500 mm hadičkami. Oba trojcestné kohouty se přepnou do polohy 90°, pustí se čerpadlo AlphaPUMP a jeho výkon se nastaví na hodnotu 1 l/min. Po dosažení požadované hodnoty pozadí aktivity radonu (kdy je ve dvou po sobě jdoucích měřeních dosaženo srovnatelných hodnot aktivity) se vypne čerpadlo, odpojí se zásobník s aktivním uhlím a obnoví se spojení mezi odplyňovací a bezpečnostní nádobou.



Obr. 5 Zapojení zásobníku s aktivním uhlím

## Odběr vzorku

Správný odběr vzorku je hlavní zásadou pro přesná měření koncentrace radonu. Obzvláště je nutné se vyhnout úniku plynného radonu ze vzorku mezi odběrem a měřením. Obecně lze rozlišit přímý a postupný přenos vzorku do měřicího systému.

Při přímém přenosu se kapalný vzorek o objemu 100 ml odebere do plastové injekční stříkačky a následně se ihned dávkuje do systému přes horní trysku odplyňovací nádoby (trojcestné kohouty musí být přepnuty do polohy 180°). Poté se zahájí měření.

Metoda postupného přenosu se používá za účelem odběru co největšího množství vzorků a jejich bezpečného uchování před měřením v laboratoři. V tomto případě lze využít dalších vzorkovacích skleněných nádob (2 x 100 ml a 2 x 500 ml), které se musí po okraj naplnit vzorkem a ihned uzavřít skleněným uzávěrem a zabezpečit plastovou svorkou.

## Stanovení koncentrace radonu

Stanovení koncentrace radonu v odebraném vzorku je založeno na přepočtu hodnoty objemové aktivity odečtené z monitoru přístroje AlphaGUARD. Do výpočtu musí být zahrnut efekt naředění plynného radonu vzduchem obsaženým v systému před zahájením měření, což vyžaduje znalost celkového vnitřního objemu systému  $V_{\text{systém}}$ . Musí se rovněž počítat se zbytkovým množstvím radonu přetrvávajícím ve vodné fázi i po ukončení měření, tomu odpovídá zavedení distribučního koeficientu  $k$ , který popisuje závislost mezi rozpustností radonu ve vodě a teplotou. K výpočtu se používá následující rovnice:

$$c_{H_2O} = \frac{c_{vzduch} \left( \frac{V_{system} - V_{vzorek}}{V_{vzorek}} + k \right) - c_0}{1000}, \quad (1)$$

kde  $c_{H_2O}$  je koncentrace radonu ve vzorku vody (Bq/l)

$c_{vzduch}$  je koncentrace radonu v měřícím systému (Bq/m<sup>3</sup>) po jeho vypuzení ze vzorku vody (odečtena z přístroje AlphaGUARD)

$c_0$  je koncentrace radonu v měřícím systému před zahájením měření (hodnota pozadí; Bq/m<sup>3</sup>)

$V_{system}$  je celkový vnitřní objem měřícího systému (ml)

$V_{vzorek}$  je objem vzorku (ml)

$k$  je distribuční koeficient

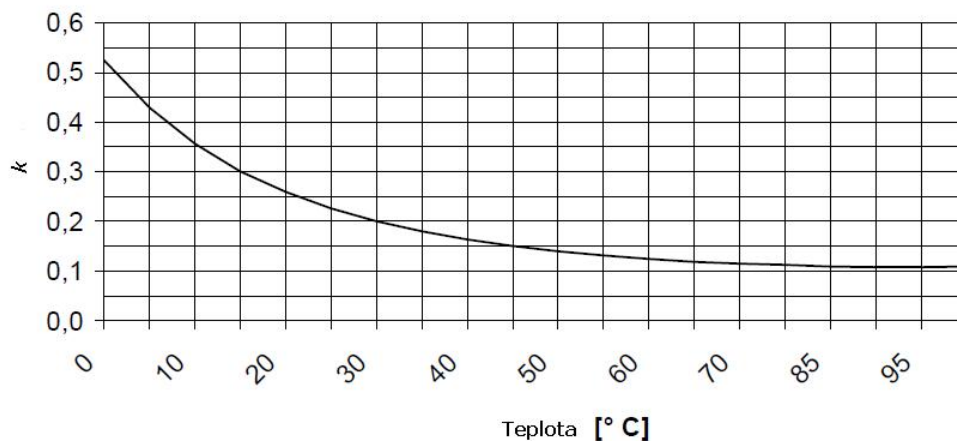
Celkový vnitřní objem systému  $V_{system}$  je dán součtem vnitřních objemů všech jeho součástí (Tab. 1).

**Tab. 1 Objemy jednotlivých komponent měřícího systému**

Komponenta měřícího systému	Objem (ml)
Ionizační komora (AlphaGUARD)	680
AlphaPUMP	18
100 ml odplyňovací nádoba	190
Bezpečnostní nádoba	191
Propojovací hadičky (1,8 m)	23
<b>Celkový objem (<math>V_{system}</math>)</b>	<b>1102</b>

### Teplota vzorku

Difusní koeficient  $k$  určuje vztah mezi koncentrací radonu ve vodné fázi vzorku a ve vzduchu nad ní a je závislý na teplotě vzorku. Se snižující se teplotou stoupá rozpustnost radonu ve vodě, a tudíž se zvyšuje hodnota difusního (distribučního) koeficientu (Obr. 6). Jak je zřejmé z obrázku, zejména při nízkých teplotách se hodnota difusního koeficientu významně mění. Tento koeficient je proto nezbytné zahrnout do výpočtu koncentrace.



**Obr. 6 Teplotní závislost difusního koeficientu**



## Pracovní úkoly

1. Sestavte a zapojte měřící aparaturu podle výše popsaného postupu.
2. Nastavte na přístroji AlphaGUARD průtočný mód měření „10 min FLOW“.
3. Nastavte výkon čerpadla na hodnotu 1 l/min a zapněte ho.
4. Zjistěte objemovou aktivitu radonu ve vzduchu obsaženém v uzavřeném okruhu systému.
5. Nyní vypněte čerpadlo.
6. Zapojte do uzavřeného okruhu zásobník s aktivním uhlím, znovu zapněte čerpadlo a během 10 minutové cirkulace vzduchu v systému docilte minimalizace objemové aktivity a naměření hodnoty pozadí koncentrace radonu, kterou zaznamenejte.
7. Vypněte čerpadlo, odstraňte z měřícího systému zásobník aktivního uhlí, zapojte systém do původní sestavy, zkontrolujte stav trojcestných kohoutů.
8. Odeberte vzorky tekoucí nebo vyvěrající vody v postranních chodbách štol v okolí laboratoře přímo do plastových injekčních stříkaček nebo do skleněných nádob (lze provést v průběhu měření hodnoty pozadí koncentrace radonu).
9. Přepněte trojcestné kohouty do polohy pro dávkování vzorku.
10. Nadávkujte vzorek z injekční stříkačky do odplyňovací nádoby.
11. Ihned přepněte trojcestné kohouty do měřící polohy.
12. Nastavte výkon čerpadla AlphaPUMP na hodnotu 0,5 l/min a zapněte ho. Tím se zahájí měření.
13. Po 10 minutách měření vypněte čerpadlo AlphaPUMP a zaznamenejte hodnotu objemové aktivity. Přístroj AlphaGUARD je pořád zapnutý a měření následně pokračuje dalších 20 min do ustálení hodnoty objemové aktivity radonu v systému.
14. Po ukončení měření vypněte čerpadlo, změřte teplotu vzorku v nádobě, vylijte vzorek z odplyňovací nádoby, rozpojte uzavřený okruh plynu.
15. Na základě zaznamenaných hodnot pozadí, objemové aktivity radonu při měření vzorku, teploty vzorku a odečtené hodnoty difusního koeficientu vypočítejte koncentraci radonu ve vzorku odebrané vody a porovnejte ji s hodnotami v tabulkách uvedených v Příloze 1.

## Příloha 1:

Uvedené tabulky jsou převzaty z *VYHLÁŠKY Státního úřadu pro jadernou bezpečnost č. 307/2002 Sb. o radiační ochraně*

Tab. 2 Směrné hodnoty objemových aktivit v dodávané vodě

Ukazatel obsahu radionuklidů	Směrná hodnota objemové aktivity [Bq/l]		
	balená kojenecká voda	pitná voda pro veřejné zásobování, balená pramenitá voda a balená pitná voda	balená přírodní minerální voda
objemová aktivita radonu 222	<b>20</b>	<b>50</b>	<b>100</b>

Tab. 3 Mezní hodnoty objemových aktivit, při jejichž překročení se nesmí voda dodávat

Radionuklid	Mezní hodnoty objemové aktivity [Bq/l]		
	balená kojenecká voda	pitná voda pro veřejné zásobování, balená pramenitá voda a balená pitná voda	balená přírodní minerální voda
Pb-210	0,2	0,7	1,4
Po-210	0,1	0,4	0,8
<b>Rn-222</b>	<b>100</b>	<b>300</b>	<b>600</b>
Ra-224	0,7	6	12
Ra-226	0,4	1,5	3
Ra-228	0,1	0,5	1
Th-228	0,5	6	12
Th-230	0,4	3	6
Th-232	0,4	3	6
U-234	5	12	24
U-238	5	12	24

V tabulce uvedené mezní hodnoty nezohledňují chemickou toxicitu uranu, která se posuzuje zvlášť.