

důl Svornost - Jáchymov

MUNI
FACULTY
OF SCIENCE

Radon a jeho migrace v horninovém prostředí

Mgr. Petr Nečas

Obsah

- ❖ Obecné informace
- ❖ Geneze radonu
- ❖ Zdrojové horniny a minerály
- ❖ Radonové zatížení v ČR
- ❖ Využití radonu a zdravotní rizika
- ❖ Měření a vzorkování radonu
- ❖ Vyhodnocení dat - protokol
- ❖ Závěr

„Ničeho na světě se není třeba bát, je jen třeba všemu porozumět.“

Marie Curie-Skłodovská

Obecné

informace

- ❖ vzácný a bezbarvý plyn, bez chuti a zápachu
- ❖ velmi nestabilní chemický prvek (nemá stabilní izotop)

39 radioaktivních izotopů

- ❖ **silně radioaktivní !!!** → α zářič
- ❖ chemické sloučeniny tvoří pouze vzácně s P, Cl, O a F
 - ❖ **silná oxidační činidla**
- ❖ dobře rozpustný v H_2O a v nepolárních rozpouštědlech
- ❖ dobře zachytitelný na aktivním uhlí (při nízkých teplotách)
- ❖ snadno ionizovatelný a v ionizovatelném stavu září



$_{86}\text{Rn}$ - Radon	
protonové číslo	86
elektronové konfigurace	$[\text{Xe}] 4f^{14} 5d^{10} 6s^2 6p^6$
relativní atomová hmotnost	222
elektronegativita	2,2
1. ionizační energie	1037 kJ/mol
hustota	$9,73 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
teplota tání [°C]	-71 °C (202,15 K)
teplota varu [°C]	-65 °C (208,15 K)
krystalografická soustava	krychlová plošně centrovaná
skupenství	plynné (25°C)

Geneze

❖ radioaktivní rozpadový produkt jader radia (Ra), thoria (Th) a uranu (U)

❖ ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U - ^{226}Ra

^{220}Rn ,

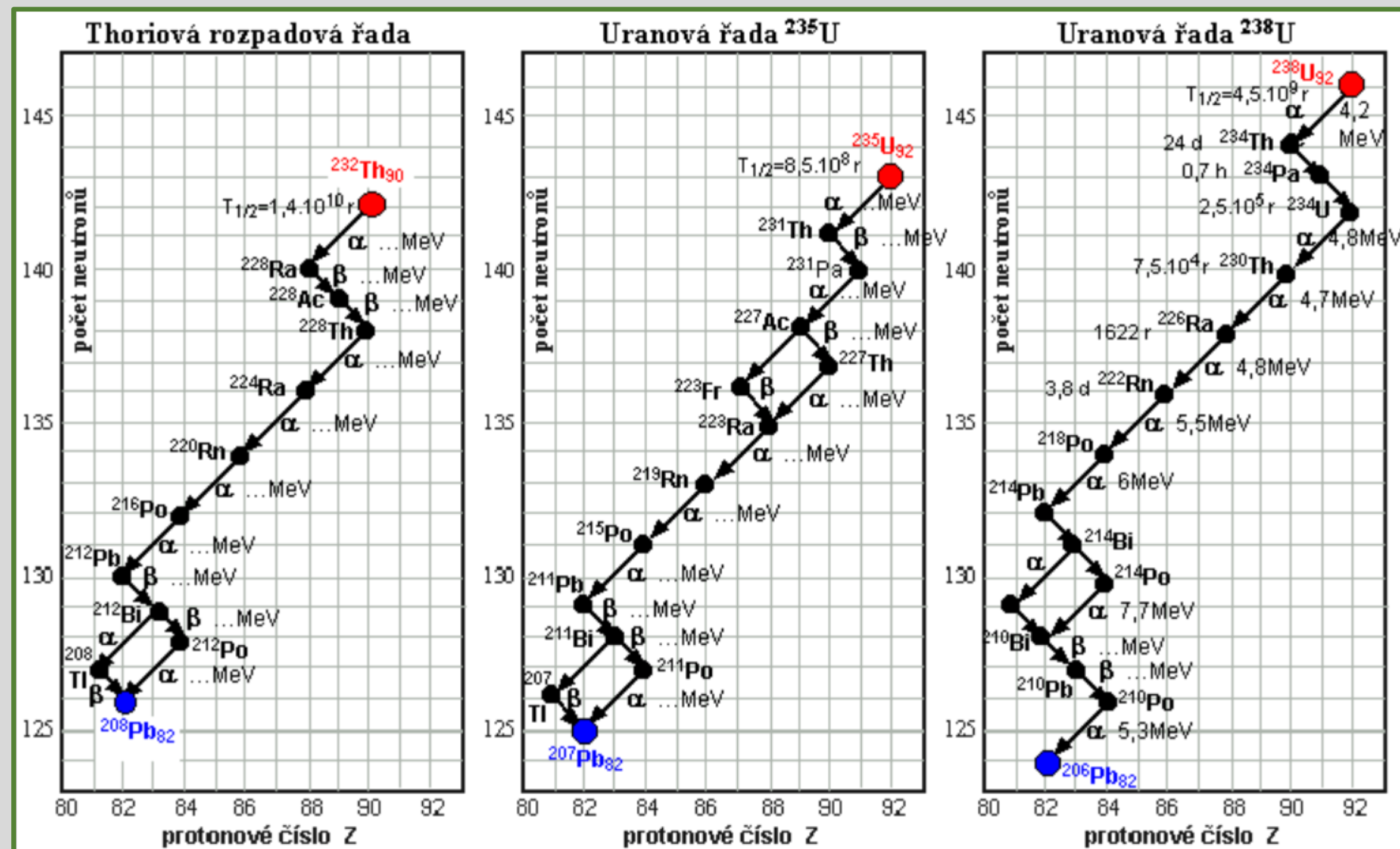
^{219}Rn ,

^{222}Rn

thoron

actinon

zájmový izotop



Přírodní rozpadové řady thoria ^{232}Th a uranu ^{235}U a ^{238}U (Ullman, 2020 – upraveno).

Geneze radonu-rozpadové řady

- **²²²Rn** má nejdelší poločas rozpadu
- konečný produkt: **olovo (Pb)**

izotop	poločas rozpadu	přeměna
²³² Th	1,405x10 ¹⁰ r	α
²²⁸ Ra	5,75 r	β ⁻
²²⁸ Ac	6,15 h	β ⁻
²²⁸ Th	1,9116 r	α
²²⁴ Ra	3,66 d	α
²²⁰ Rn	55,6 s	α
²¹⁶ Po	0,145 s	α
²¹² Pb	10,64 h	β ⁻
²¹² Bi	60,55 min	β ⁻ α
²¹² Po	0,299x10 ⁻⁶ s	α (35,94 %)
²⁰⁸ Tl	3,056 min	α β ⁻
²⁰⁸Pb	<i>stabilní</i>	

izotop	poločas rozpadu	přeměna
²³⁵ U	7,04x10 ⁸ r	α
²³¹ Th	25,52 h	β ⁻
²³¹ Pa	3,276x10 ⁴ r	α
²²⁷ Ac	21,777 r	β ⁻ α
²²⁷ Th	18,68 d	α (1,38 %)
²²³ Fr	22,00 min	β ⁻
²²³ Ra	11,43 d	α
²¹⁹ Rn	3,96 s	α
²¹⁵ Po	1,781x10 ⁻³ s	A
²¹¹ Pb	36,1 min	β ⁻
²¹¹ Bi	2,14 min	β ⁻ α
²¹¹ Po	0,516 s	α (99,72 %)
²⁰⁷ Tl	4,77 min	α β ⁻
²⁰⁷Pb	<i>stabilní</i>	

izotop	poločas rozpadu	přeměna
²³⁸ U	4,468x10 ⁹ r	α
²³⁴ Th	24,10 d	β ⁻
^{234m} Pa	1,17 min	β ⁻
²³⁴ U	2,455x10 ⁵ r	α
²³⁰ Th	7,538x10 ⁴ r	α
²²⁶ Ra	1600 r	α
²²²Rn	3,8235 d	α
²¹⁸ Po	3,10 min	α
²¹⁴ Pb	26,8 min	β ⁻
²¹⁴ Bi	19,9 min	β ⁻ α
²¹⁴ Po	164,3x10 ⁻⁶ s	α (0,02 %)
²¹⁰ Tl	1,30 min	α β ⁻
²¹⁰ Pb	22,20 r	β ⁻
²¹⁰ Bi	5,012 d	β ⁻
²¹⁰ Po	138,376 d	α
²⁰⁶Pb	<i>stabilní</i>	

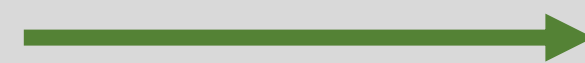
Zdrojové minerály – minerály uranu

- radionuclidní rozpadem vzniklé z ionnovelekočástic a částečně se rozpouští v podzemních vodách
- ❖ zdrojem jsou minerální sloučeniny uranu nebo stopové množství uranu a thoria v jiných minerálech v horninách (hlavní minerály uranu: **uraninit a coffinit**) – **hydrotermální geneze (rudní žíly)**

Uraninit (Smolinec – Pechblende)

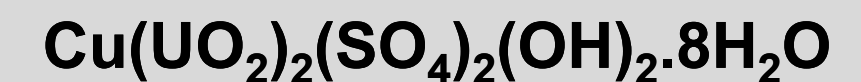
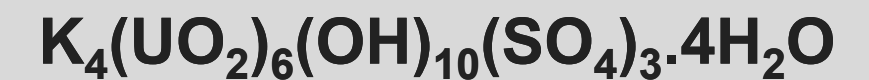


(Jáchymov, 2010 – upraveno)



oxidační zvětrávání
vznik recentních minerálů

Uranové sírany (Zippeit, Johannit)



(Jáchymov, 2010 – upraveno)

uvolňování

Rn

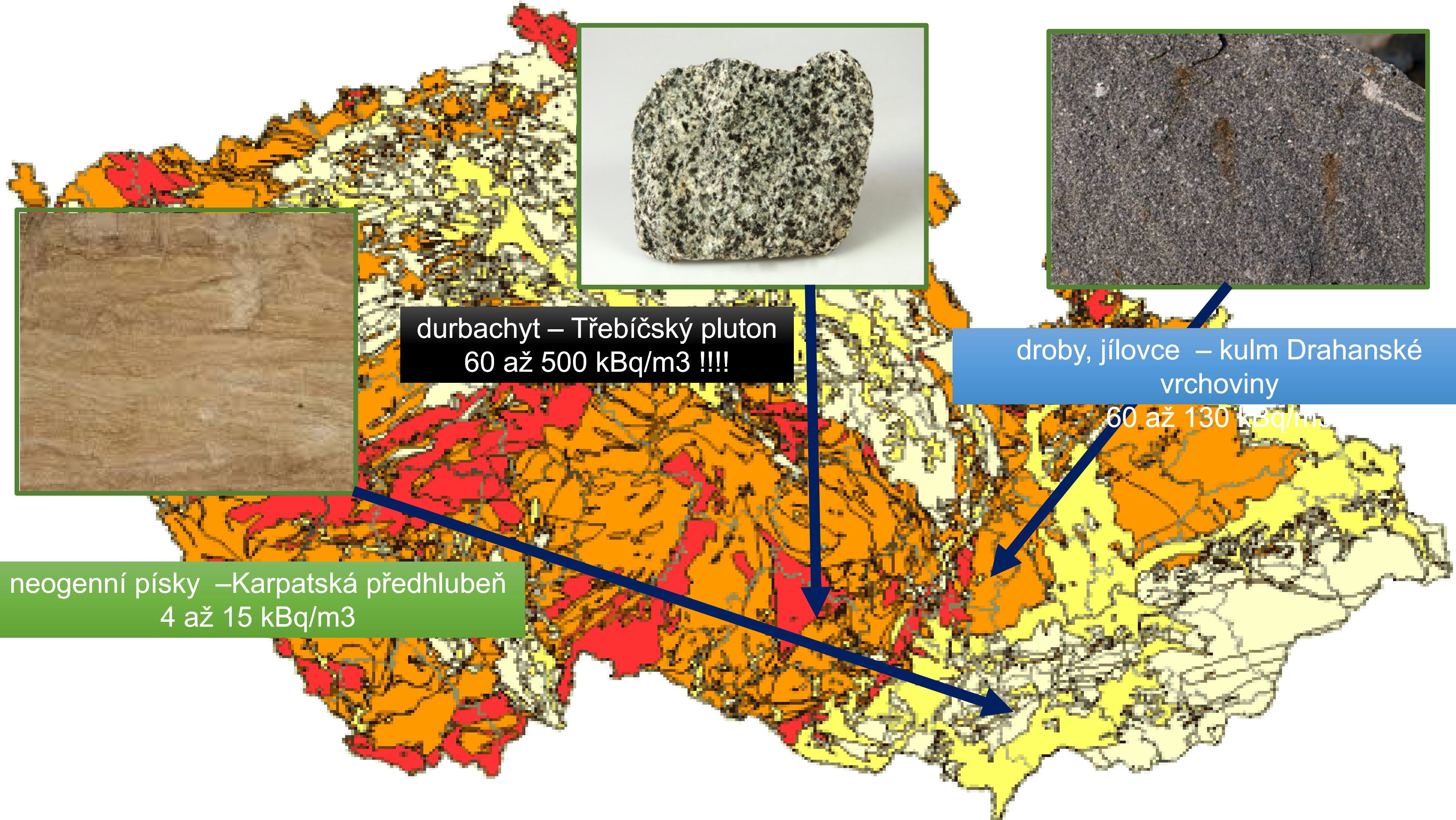
Zdrojové horniny

- ❖ rozdílné množství uranu, radia a thoria v jednotlivých horninách
- ❖ **nejvyšší obsah** U a jeho produktů přeměn:
 - ❖ **vyvřelé a magmatické horniny** (granity, granodiority, durbachity a syenity)
- ❖ **střední obsah** U a jeho produktů přeměn:
 - ❖ **metamorfované horniny** (pararuly, ortoruly...)
- ❖ **nízký obsah U** a jeho produktů přeměn:
 - ❖ **usazené a sedimentární horniny** (křídové sedimenty, paleogenní, neogenní písky, pískovce a jílovce)

horninový typ	průměrná hodnota (kBq/m ³)	převažující radonové riziko		
		nízké	střední	vysoké
<i>silurské černé břidlice a sedimenty</i>	91,9			
<i>durbachity a syenity</i>	77,6			
<i>granity</i>	50,7			
<i>permské sedimenty</i>	41,3			
<i>ortoruly</i>	32,8			
<i>pararuly</i>	30,8			
<i>granodiority</i>	30,3			
<i>proterozoické metasedimenty</i>	27,1			
<i>karbonské sedimenty</i>	26,1			
<i>aluvia</i>	26,1			
<i>neogenní sedimenty</i>	23,7			
<i>devonské sedimenty</i>	23,7			
<i>říční sedimenty</i>	20,4			
<i>paleogenní sedimenty</i>	18,5			
<i>ordovické sedimenty</i>	18,3			

Převažující radonové riziko v horninových typech ČR (Barnet – Neznal, 1998 - upraveno).

- silurské, karbonské a permské sedimenty: **vyšší obsah uranu** (vazba na organické sloučeniny)



**durbachyt – Třebíčský pluton
60 až 500 kBq/m³ !!!!**



**droby, jílovce – kulm Dražanské
vrchoviny**

60 až 130 kBq/m³



**neogenní písky –Karpatská předhlubeň
4 až 15 kBq/m³**

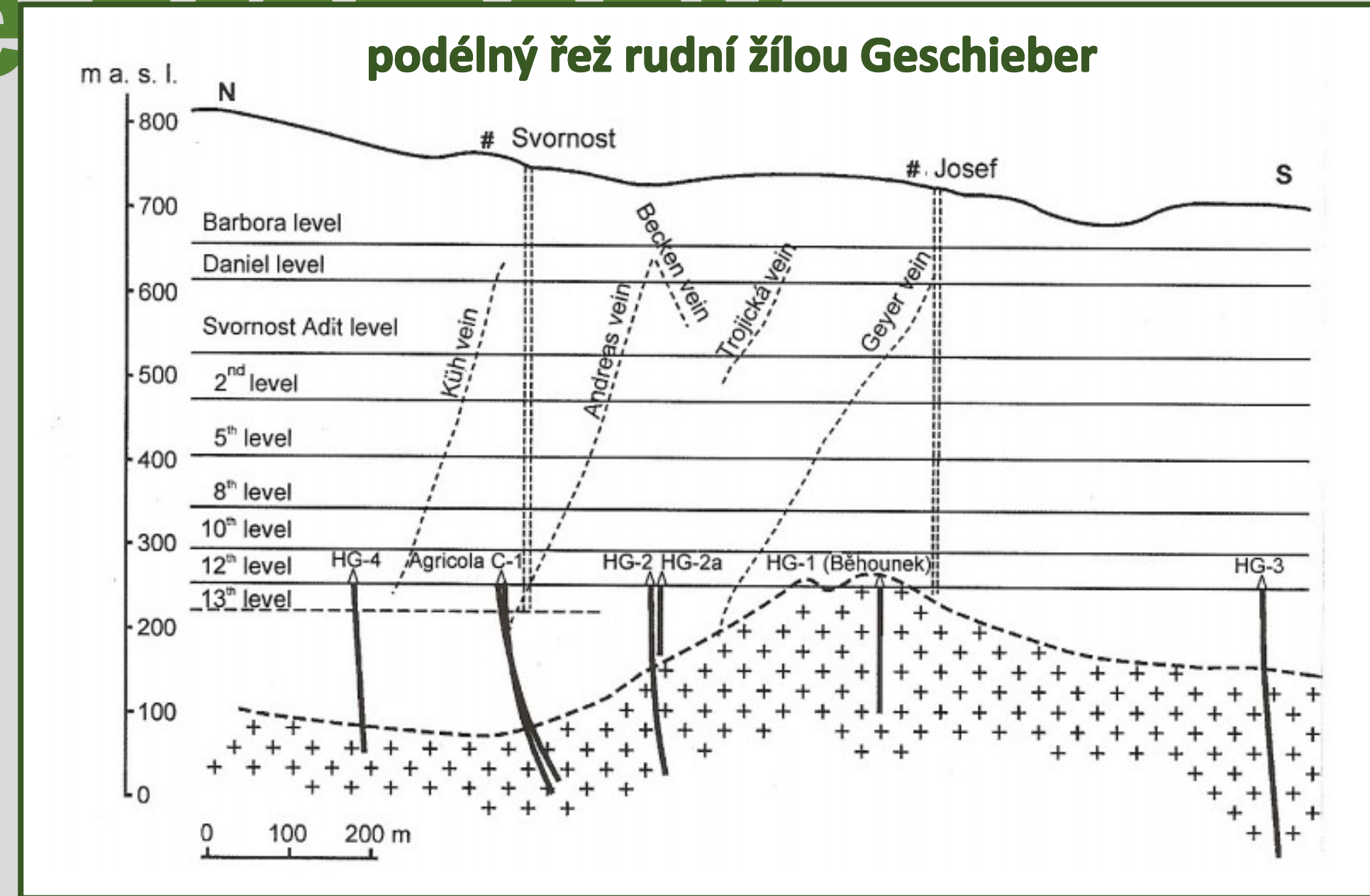
Využití radonu v medicíně –

radonové prameny

- ❖ radonové lázně Jáchymov v Krušných horách
- ❖ využití radioaktivních termálních pramenů z bývalých hlubinných dolů na stříbro a uran

❖ důl Svornost

- ❖ jediný aktivní (radonový) důl na světě
- ❖ hydrogeochemické typy podzemních vod na Jáchymovsku:
 - ❖ Na-HCO_3 – mineralizace cca. 0,7 g/l
 - ❖ Ca-SO_4 – mineralizace cca. 0,2 g/l – 3,0 g/l
 - ❖ smíšené (nejasné typy) s mírnou převahou Ca^{2+} a SO_4^{2+} s mineralizací cca. 0,2 g/l
- ❖ prameny vázané na hydrotermální žíly (př. žíla Geschieber)



(převzato z Odruše et al. 2003)

pramen Curie	vydatnost 30l/min	teplota 29 °C	obsah radonu 5 kBq/l
pramen C1	vydatnost 30 l/min	teplota 29 °C	obsah radonu 11 kBq/l
pramen Běhounek	vydatnost 300 l/min	teplota 36 °C	obsah radonu 10 kBq/l
pramen Agricola	vydatnost 10 l/min	teplota 29 °C	obsah radonu 20 kBq/l

Současné prameny dolu Svornost

(lázně Jáchymov, 2019)

Využití radonu v medicíně –

léčba

- ❖ léčba pomocí radonové vody se specializuje:
- ❖ onemocnění kloubů, periferní nervový systém a páteře, kožní onemocnění, vylepšuje stavy u nemocných cukrovkou a dnou, zlepšuje stavy po úrazech a operacích, léčba Bechtěrevovy choroby, oběhové ústrojí
- ❖ nízké dávky alfa záření ve formě radonu vyvolají v organismu chvilkové podráždění a to má za následek stimulaci buněk a orgánů
- ❖ zlepšuje opravnou kapacitu buněk a stimule produkci životně důležitých hormonů
- ❖ stimuluje účinnost lapačů volných radikálů (nežádoucí oxidační procesy v biochemických dějích v těle organismů)
- ❖ doba trvání jedné procedury: 20 min.
(Lázně Jáchymov, 2019)

lázně v Jáchymově



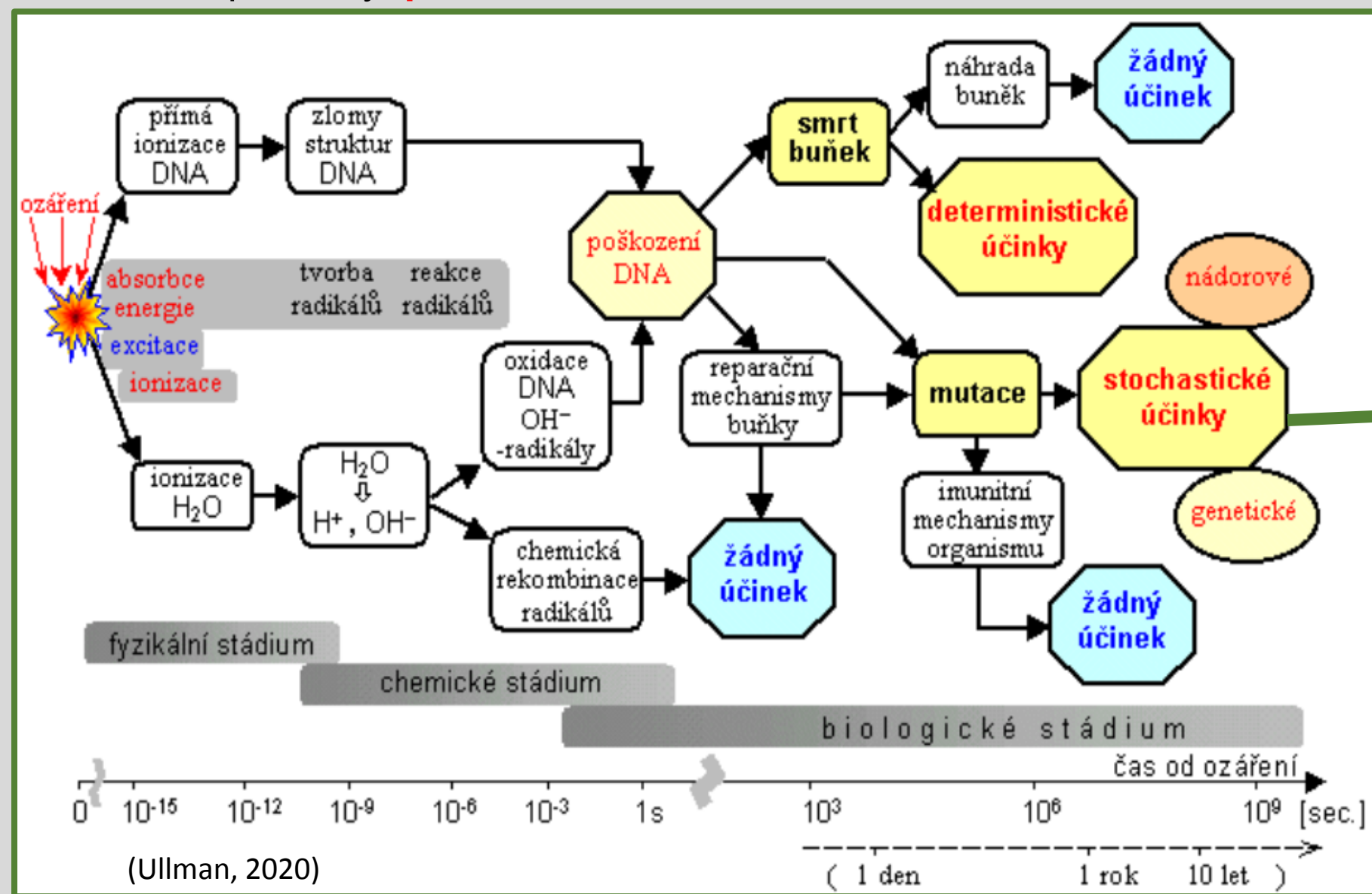
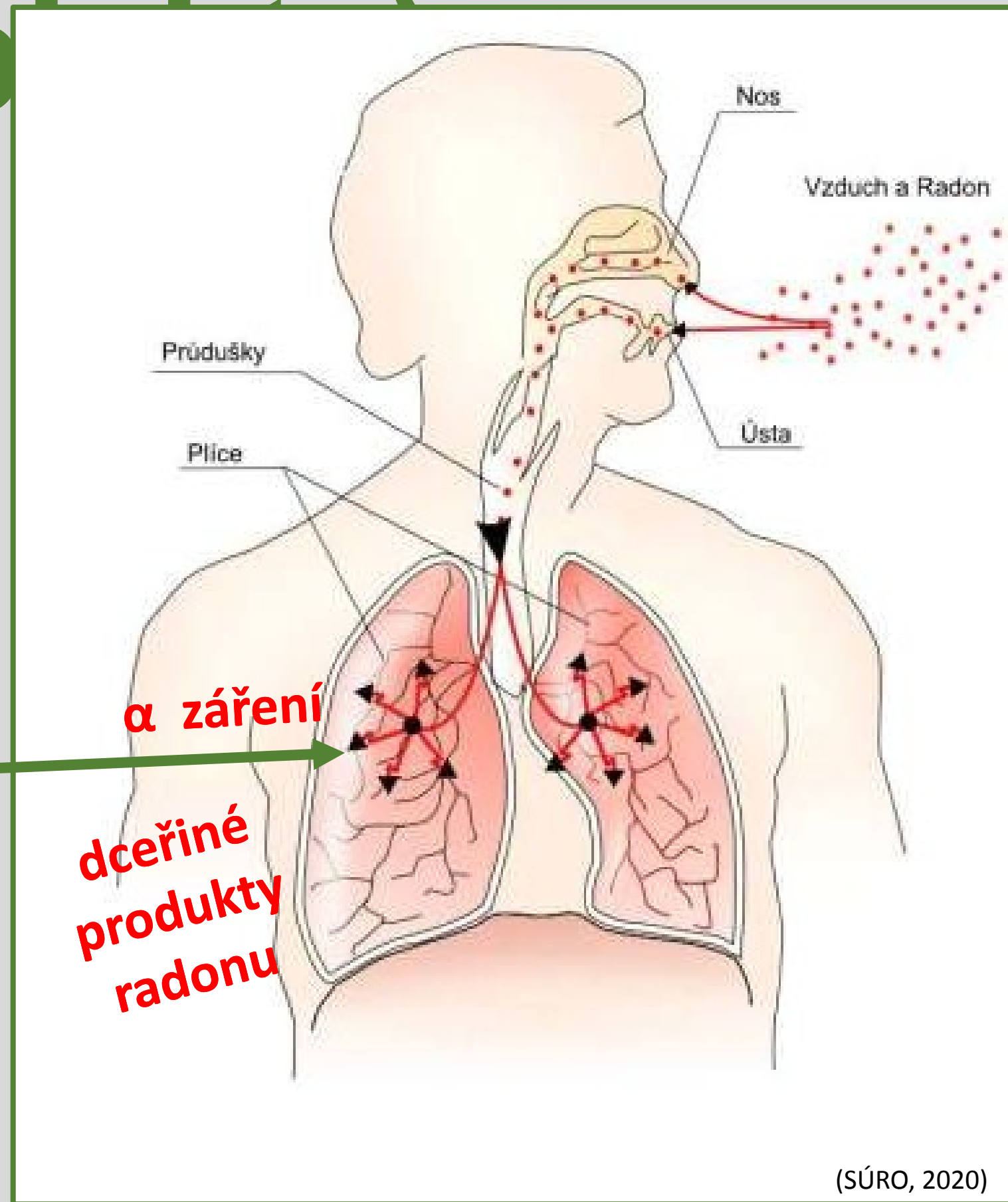
důl Svornost - Jáchymov



Zdravotní rizika radonu

(uzavřené ob

- ❖ největší radonové riziko se nachází v nevětraných důlních dílech – *hornická nemoc*
- ❖ radon sám o sobě není nebezpečný, ale jeho produkty rozpadu vážou se na prachové částice → usazování v plicních sklípcích → interakce s buněčnou tkání → stochastické účinky alfa a beta záření
- ❖ rakovina plic, rakovina kostních tkání
- ❖ dceřiné produkty: **polonium, olovo, bismut**



Vzorkování a měření radonu

Stanovení radonového indexu
pozemku
Metodika

Vzorkování a měření radonu

❖ měření radonu ve vzduchu (v budovách)

- ❖ stopové detektory
- ❖ elektretové detektory
- ❖ kontinuální monitory



- ❖ využívá se při rekonstrukci stávajícího objektu + RI pozemku
- ❖ kolaudační měření

❖ měření radonu ve vodě

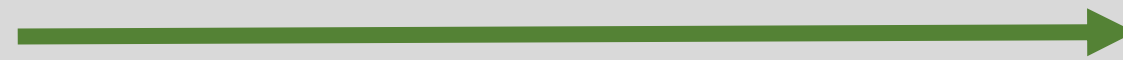
- ❖ podle normy ČSN 75 7611
(https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/metodiky/Screeningova_metoda_stanoveni_celkove_alfa_aktivity_ve_vode.pdf)

❖ měření radonu ve stavebních materiálech

- ❖ spektrometrem (záření gama, detekce ^{226}Ra)
- ❖ komory s aktivním uhlím

❖ měření radonu v půdě – stanovení radonového indexu pozemku

- ❖ přenosné emanometry
- ❖ expoziční emanometrické metody (dlouhodobé měření)



- ❖ rekonstrukce, stavební úpravy
- ❖ stavba novostavby

Stanovení radonového indexu

pozemku

- ❖ Stanovování radonového indexu pozemku vychází z posouzení objemové aktivity radonu z půdního vzduchu a plynopropustnosti zemin. Pokud je objemová aktivita radonu vysoká a plynopropustnost zemin a geologického podloží vyšší, tím bude docházet k pronikání většímu množství radonu.
- ❖ Radonový index pozemku vyjadřuje obecně radonový potenciál daného pozemku pro stavbu objektu.
- ❖ **RI** (radonový index) vyjadřuje míru potřebné stavební ochrany stavby proti pronikání radonu z geologického prostředí do objektu.
- ❖ Metodika stanovení radonového indexu je v souladu s příslušným zákonem č. **263/2016 Sb.** O mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (**atomový zákon**).
- ❖ Daná metodika je v souladu s příslušnou vyhláškou č. **422/2016 Sb., § 96 (radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje)**.
- ❖ Firmy a fyzické osoby provádějící služby ke stanovení radonového indexu pozemku, musí mít dle odpovídajících ustanovení více uvedeného zákona příslušné povolení od Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB).

Státní ústav radiační ochrany



Státní ústav pro jadernou bezpečnost



Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany

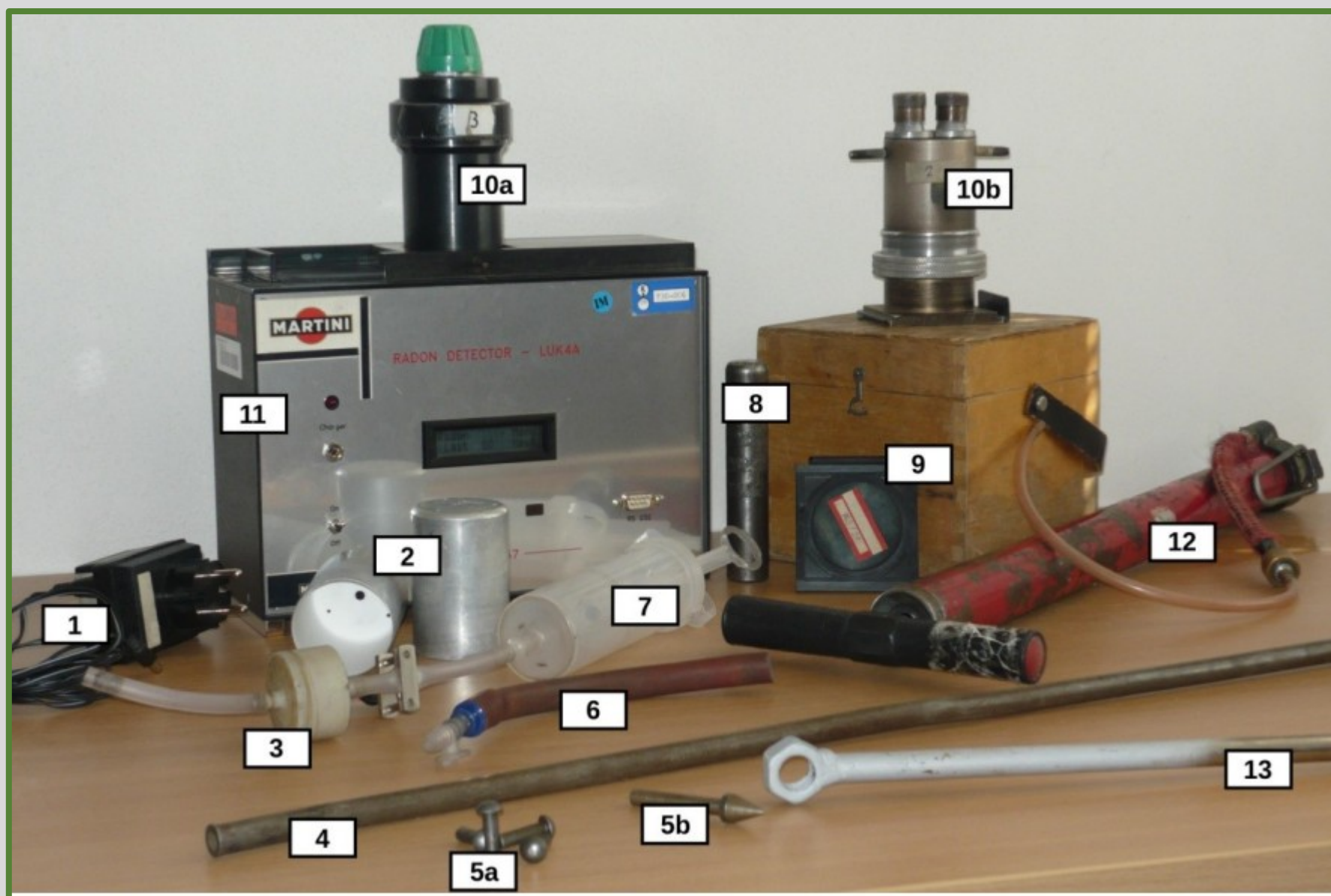


Objemová aktivita radonu v půdním vzduchu

- ❖ objemová aktivita radonu se stanovuje měřením radioaktivity vzorku půdního vzorku v dané hloubce (0,5 – 0,8m)
- ❖ podmínkou užití zvolené metody jsou:
 - ❖ dostatečná citlivost (mez stanovitelnosti $\leq 1 \text{ kBq/m}^3$),
 - ❖ kalibrace přístroje příslušným Státním metrologickým střediskem pro měření radonu a ekvivalentní objemové aktivity radonu
 - ❖ ověření metodiky odběru půdního vzduchu a stanovení objemové aktivity radonu v půdním vzduchu na terénních referenčních plochách pro porovnávací měření objemové aktivity radonu
- ❖ objemová aktivita radonu v půdním vzduchu se značí symbolem C_A a jednotkou kBq/m^3 - podle platné normy **ČSN ISO 31-9**
- ❖ dostatečný počet odměrových míst (*obvykle 15 odběrových bodů pro plochu menší než 800 m²*)
 - ❖ počet odebraných vzorků závisí na velikosti daného pozemku a konkrétní dané situaci na pozemku
- ❖ vzorky půdního vzduchu se měří krátce po odběru nebo cca. 3 hodiny po odběru z důvodu:
 - ❖ *Thorium přítomné v zeminách a horninách generuje thoron (²²⁰Rn), zdroj záření alfa, jehož objemová aktivita v půdním vzduchu bývá stejného řádu jako objemová aktivita radonu. Při stanovení objemové aktivity radonu v půdním vzduchu provedeného v krátkých časových intervalech po odběru vzorků půdního vzduchu je nezbytné použít postupů zpracování měřených veličin, které vliv thoronu na výsledné hodnoty objemové aktivity radonu vylučují. (převzato z SÚJB, 2020).*

Terénní vybavení k práci

- ❖ údaje o pozemku (číslo pozemku z ČÚZK, adresa pozemku)
- ❖ podklady (zastavěná plocha pozemku, typ nemovitosti, geologie)
- ❖ auto
- ❖ pracovní protokol, psací potřeby + kufr na vzorkovnice (ideálně na 30 vzorkovnic – Lucasovy komory)
- ❖ kontrolní zářič, vyvakuovatelné Lucasovy komory, zařízení pro odběr půdního radonu (hadice, uzávěry, vytahovák, tyče, nýty, filtr, velkoobjemové výplachové stříkačky – JANETTE) a ruční pumpa pro vyvakuaci detektoru + ochranná hlavice na tyče a kladivo („vypichovák“, na hroty)

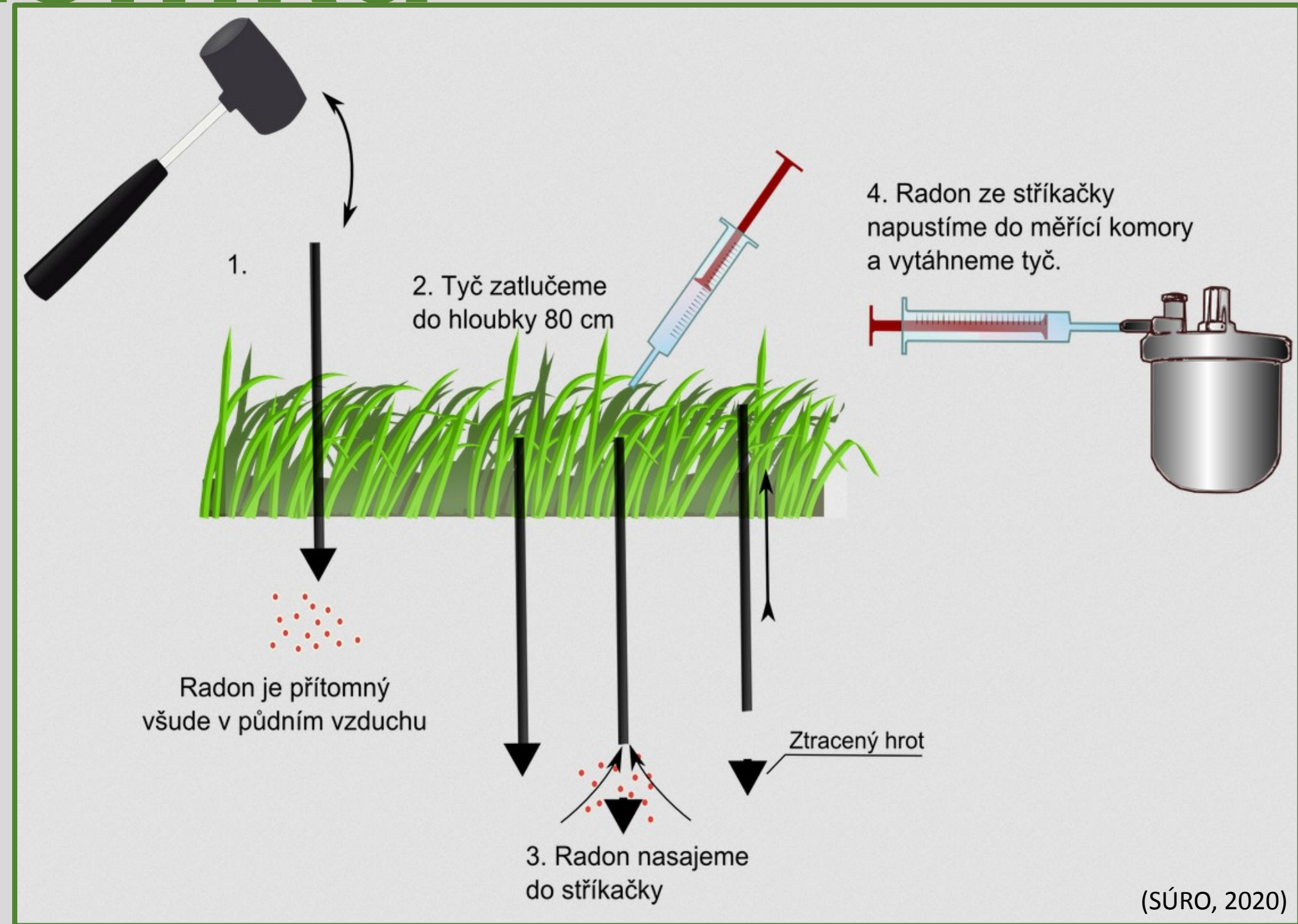


Přístroj LUK 4A a jeho sada: **1** – adaptér; **2** – vyměnitelné vložky s nátěrem ZnS(Ag) – Lucasova komora; **3** – filtr s vysoušečem, hadice s uzávěrem; **4** – dutá tyč; **5** – a – nýty s oblou hlavou, b – nýty s ostrou hlavou (nýty se někdy označují jako „hroty“); **6** – hadice k nasunutí na tyč; **7** – velkoobjemové výplachové stříkačky (JANETTE); **8** – hlavice na tyč (používá se jako ochrana tyče během klepání kladivem); **9** – kontrolní zářič; **10** – detektor; **11** – měřící aparatura LUK 4A; **12** – vypumpovací pumpa; **13** – vytahovák tyče.
(převzato z MS Bakalářská práce – Seko, 2014)

Postup práce k stanovení RI

pozemku

- ❖ domluva s majitelem pozemku na stanovení termínu průzkumných prací, přístupnost lokality, stav pozemku
- ❖ příprava podkladů – informace o pozemku (geologie území, pedologie, radonové mapy – www.geology.cz) a pracovního protokolu
- ❖ vyvakuování odběrových Lucasových komor pomocí speciálně upravení pumpy
- ❖ rozvržení odběrových sond (metoda ztraceného hrotu) – zatlučení pomocí kladiva, vypichovacím drátem vypíchneme hrot a tyč pomocí vytahováku povytáhneme o 1cm (dále potřeby povytahujeme – špatné sací podmínky – malá plynopropustnost zeminy) – **15. odběrových míst (při větší ploše zastavění pozemku se počet odběrových vzorků zvyšuje).**
- ❖ pomocí vysokokapacitní stříkačky 2 krát vysajeme objem vzorkovací sondy, třetí odběr bereme jako vzorkovací a odběrový vzorek přepravíme do příslušné Lucasovy komory
- ❖ po ukončení odběru pomocí vytahováku vytáhneme odběrové sondy (tyče)
- ❖ na místě sepíšeme **pracovní protokol** (číslo souboru, cena, parcela, katastrální území, název stavby, investor, předání výsledků, poznámky, datum měření, odběr provedl, počasí, plocha odběru, hloubka odběru, půda, plynopropustnost, vertikální profil, výsledky měření jednotlivých bodů + 3 kvartil)
- ❖ pomocí detektoru LUK 4A – analýza vzorků
- ❖ sestavení posudku o radonovém indexu pozemku



Stanovení plynopropustnosti zemín

❖ pro stanovení plynopropustnosti zemín je možno využít 2 následující metod:

- ❖ přímé měření plynopropustnosti zemín in situ
- ❖ odborné posouzení plynopropustnosti zemín

❖ plynopropustnost se značí symbolem: **k**

- ❖ v případě přímého měření plynopropustnosti zemín in situ se udává v jednotkách m^2 - plynopropustměr **RADON - JOK**

- ❖ **$k = 5,2 \cdot 10^{-14} m^2$** – mezní hodnota pro nízkou plynopropustnost
- ❖ **$k = 1,8 \cdot 10^{-11} m^2$** – mezní hodnota pro vysokou plynopropustnost

❖ v případě odborného posouzení se hodnotí jako: **NÍZKÁ – STŘEDNÍ – VYSOKÁ**

❖ u odborného posouzení : (v praxi na základě sacího odporu výplachové stříkačky)

- ❖ makroskopický popis vzorku (vzorků) odebraných z hloubky 0,8 m
- ❖ subjektivní hodnocení odporu sání při odběru vzorků půdního vzduchu



Stanovení plynopropustnosti zemin –

Klasifikace jemnozrnných zemin

Třída ČSN 73 1001	Název	Symbol	Kvalitativní znaky			
			Obsah f (%)	g:s	Poloha vůči čáře A diagramu plasticity	W _L (%)
F 1	hlína štěrkovitá	MG	35 at 65	g>s	pod	-
F 2	jíl štěrkovitý	CG	35 až 65	g>s	nad	-
F 3	hlína písčitá	MS	35 až 65	s>g	pod	-
F 4	jíl písčitý	CS	35 až 65	s>g	nad	-
F 5	hlína s nízkou plasticitou střední	ML MI	>65 >65	- -	pod pod	<35 35 až 50
F 6	jíl s nízkou střední plasticitou	CL CI	>65 >65	- -	nad nad	<35 35 až 50
F 7	hlína s vysokou střední plasticitou	MH	>65	-	pod	50 až 70
	hlína s velmi vysokou plasticitou	MV	>65	-	pod	70 až 90
	extrémně vysokou	ME	>65	-	pod	> 90
F 8	jíl s vysokou střední plasticitou	CH	>65	-	nad	50 až 70
	hlína s velmi vysokou plasticitou	CV	>65	-	nad	70 až 90
	extrémně vysokou	CE	>65	-	nad	> 90

Klasifikace písčitých zemin

Třída ČSN 73 1001	Název typu zeminy	Symbol	Kvalitativní znaky			Poloha vůči čáře A diagramu plasticity
			Obsah f (%)	Cu	Cc	
S 1	písek dobře zrněný	SW	< 5	> 6	1-3	-
S 2	písek špatně zrněný	SP	< 5	< 6	< 1 nebo > 3	-
S 3	písek s příměsí jemnozrnné zeminy	S-F	5 až IS	-	-	-
S 4	písek hlinitý	SM	15 až 35	-	-	pod
S 5	písek jílovitý	SC	IS až 35	-	-	nad

Klasifikace štěrkovitých zemin

Třída ČSN	Název typu zeminy	Symbol	Kvalitativní znaky			Poloha vůči čáře A Diagramu plasticity plasticity
			Obsah f (%)	Cu	Cc	
73 1001						
G 1	štěrk dobře zrněný	GW	< 5	> 4	t-3	
G 2	štěrk špatně zrněný	GP	< 5	< 4	< 1 nebo > 3	
G 3	štěrk s příměsí jemnozrnné zeminy	G-F	5 až IS			
G 4	štěrk hlinitý	GM	15 až 35			pod
G 5	štěrk jílovitý	GC	15 až 35			nad

Propustnost základové půdy podle tříd zemin

Kategorie propustnosti základových půd	Třídy zemin podle ČSN 73 1001
nízká propustnost f > 65%	F5, F6, F7, F8
střední propustnost 15 % < f < 65%	F1, F2, F3, F4, S4, S5, G4, G5
vysoká propustnost f < 15%	S1, S2, S3, G1, G2, G3

Vertikální profil zeminy

- ❖ při odborném posouzení plynopropustnosti zemin a pro posouzení jejich vertikálních a horizontálních změn je v případě hodnocení pozemků o rozloze menší nebo rovné 800 m² nutno realizovat minimálně 2 ručně vrtané sondy, v případě pozemků o rozloze větší než 800 m² potom minimálně 2 ručně vrtané sondy + 1 ručně vrtanou sondu na každých ukončených 30 odběrových bodů pro měření objemové aktivity radonu v půdním vzduchu.
- ❖ klasifikace zemin podle stanovených norem
- ❖ popsat všechny skutečnosti na lokalitě (zjištění hladiny podzemních vod, saturovaná zóna)

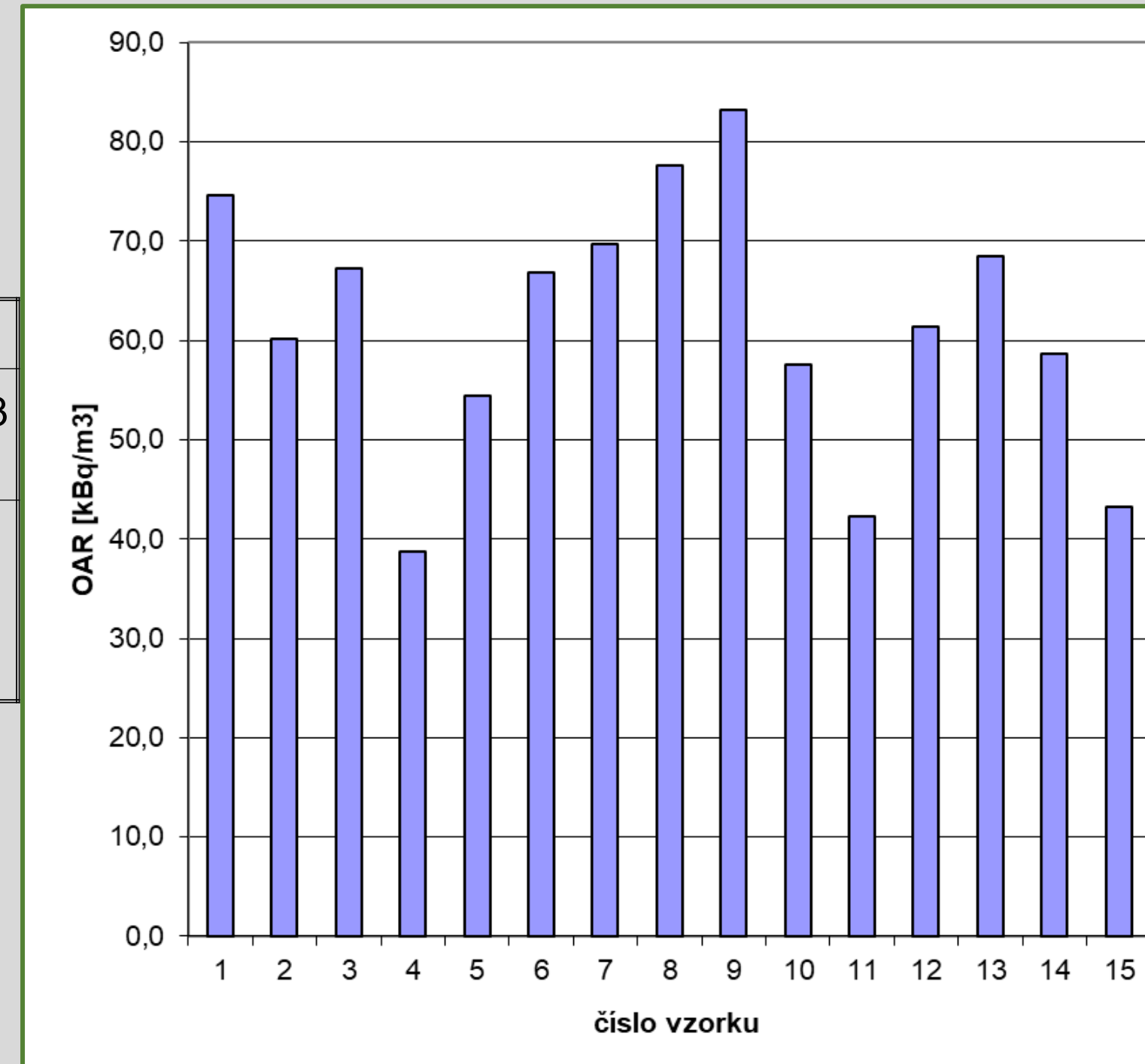
Vyhodnocení výsledků

Radonový index Pozemku	Objemová aktivita radonu v půdním vzduchu (kBq.m ⁻³)		
	<i>Nízký</i>	$C_A < 30$	$C_A < 20$
<i>Střední</i>	$30 \leq C_A < 100$	$20 \leq C_A < 70$	$10 \leq C_A < 30$
<i>Vysoký</i>	$C_A \geq 100$	$C_A \geq 70$	$C_A \geq 30$
	<i>nízká</i>	<i>střední</i>	<i>vysoká</i>
	Plynopropustnost zemin		

vzorek č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
CA [kBq/m ³]	74,6	60,2	67,3	38,8	54,4	66,9	69,7	77,7	83,3	57,6	42,3	61,4	68,5	58,7	43,3

Třetí kvartil souboru hodnot CA75 [kBq/m³] : 68,5

Minimální hodnota: 38,8kBq/m³
 Maximální hodnota: 83,3kBq/m³
 Aritmetický průměr: 61,6kBq/m³
 Medián: 61,4kBq/m³



Závěr-protokol

- ❖ **hlavička posudku:** (název stavby, katastr, parcela č. , investor, kdo provedl měření, odpovědná osoba)
- ❖ **posudek (protokol):** číslo protokolu, držitel povolení SÚJB, datum měření, účel měření, lokalita, místo měření, počasí, měřící aparatura, ověření „*kalibrace*“, měřícího přístroje, metodika měření, počet vzorků, hloubka odběru, makroskopický popis zeminy, plynopropustnost zeminy, odhad obsahu jemné frakce, popis zemin ve vertikálním profilu
- ❖ **závěrečná část:** směrná hodnota III. kvartilu c_{A75} objemové aktivity radonu pro danou třídu zeminy [kBq/m³], hodnota III. kvartilu k_{75} objemové aktivity radonu [kBq/m³], závěr s platným zněním daného zákona, podpis a razítko odpovědné osoby
- ❖ **grafická a tabulková příloha**

Děkuji za pozornost !