

**Biofyzikální ústav  
Lékařské fakulty  
Masarykovy university, Brno**

**Metabolismus radionuklidů  
Přirozené a umělé zdroje záření  
(radiobiologie VI)**

# Radionuklidy



Radionuklidy (přírodní a v menší míře i umělé) představují nejvýznamnější zdroj ionizujícího záření, a to jak z hlediska vnější tak i vnitřní expozice člověka – samozřejmě *mimo* zdravotnické aplikace, kde převažuje expozice záření rtg a gama.

Právě v organismu deponované radionuklidy jsou často zdroji záření o vysokém LET (zejména alfa - vnějším zdrojům záření o vysokém LET je člověk vystaven zřídka – snad jen obsluhy velkých urychlovačů a kosmonauti).

# Vstupní cesty radionuklidů



Vstupní cesty radionuklidů jsou dány jejich *chemickými vlastnostmi, které se neliší od vlastností neradioaktivních nuklidů téhož prvku*, nikoliv jejich radioaktivitou, resp. složením jádra. Určitou výjimku představují velmi lehké radionuklidy, jako např. tritium, jehož chemické vlastnosti se nepatrně liší od vlastností lehkého vodíku.

Složitost problému lze ukázat na příkladu **jódu**, který se může do organismu dostat:

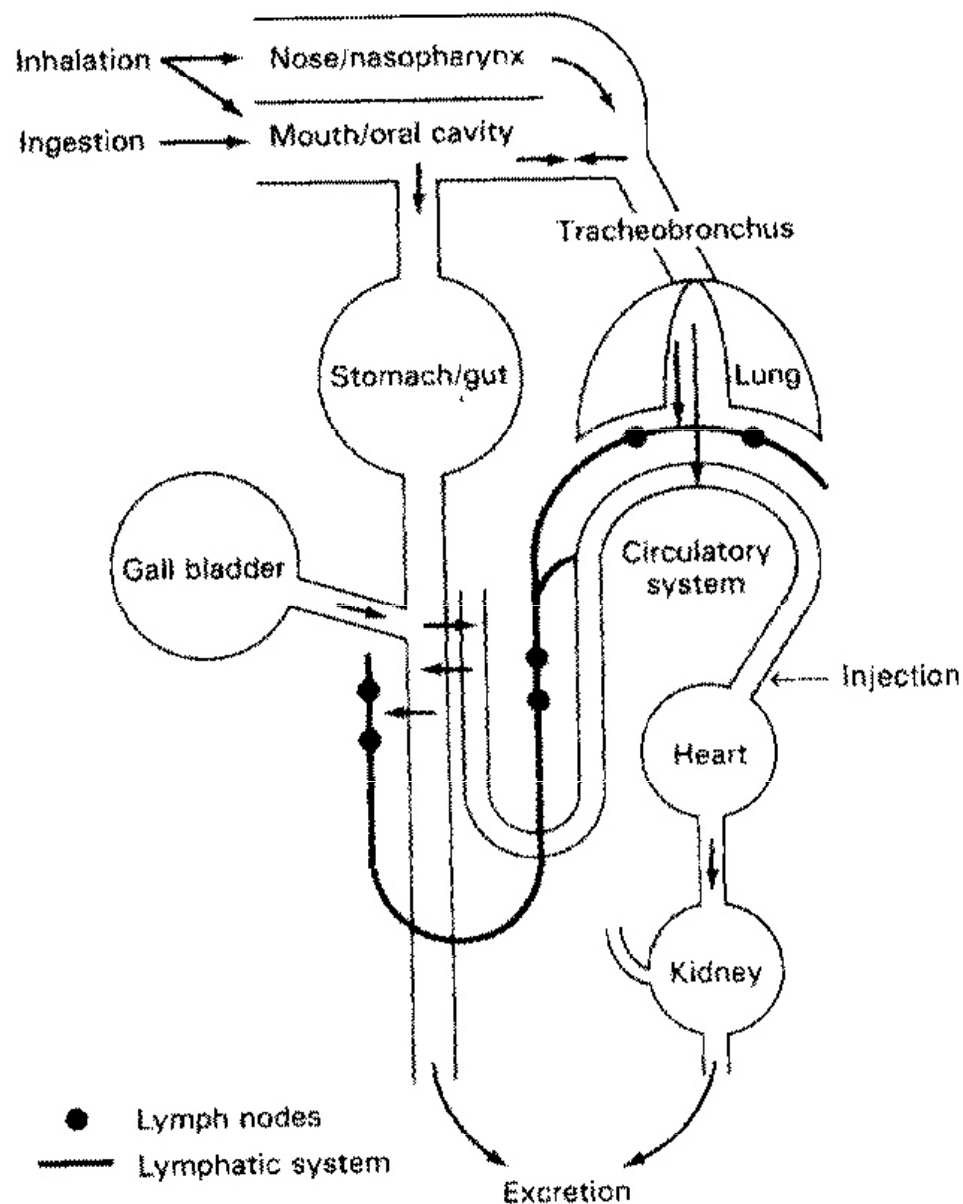
- a) V plynném stavu **inhalací** přes plicní sklípky. Tento mechanismus je málo významný s výjimkou jaderných katastrof, při kterých se „radiojód“ rozptýluje do vzduchu (jaderné výbuchy, Černobyl)
- b) S potravou - **ingescí**. Jód přijímají zelené rostliny a z nich se dostává do potravy – buď přímo, nebo u nás častěji přes mléko. Prostřednictvím masa je příjem jódu bezvýznamný s ohledem na krátké poločasy přeměny.



# Vstupní cesty radionuklidů - jód

Jakmile se jód dostane do našeho těla, je zpracován **štítnou žlázou** a zabudován do jejích hormonů – thyroxinu, trijodthyroninu – stejně jako obyčejný jód. (Dodejme, že radionuklidy prvků, které jinak *nemají* v metabolismu žádnou zvláštní úlohu, se v těle chovají jako jejich nejbližší „chemičtí příbuzní“, např. rubidium a cesium se chovají podobně jako draslík.)

Radionuklidy se mohou dostat do těla též **injekcí** – pro účely diagnostické nebo terapeutické.



## Interakce vstupních a výstupních cest radionuklidu

Sytou černou čarou je vyznačen lymfatický (mízní) systém s uzlinami

**Figure 15.1** Pathways for the absorption, transport, and excretion of radionuclides in mammals. Inhalation may be by either nose/nasopharynx or by way of the mouth. Ingestion is via the mouth, but the two-way arrows indicate that inhaled material may return from the tracheobronchial tree to the oral cavity and be swallowed to become part of the ingestion pathway. The text describes the processes in detail.



# Ingesce radionuklidu

**Ingescí** (pozřením) se radionuklidy dostávají do organismu buď s potravou nebo s vykašlávaným a následně *polykaným hlenem* z dýchacích cest. Tento mechanismus může být významný při vdechování kontaminovaného prachu nebo aerosolu, který může současně dráždit ke kašli. Další osud radionuklidu pak závisí především na rozpustnosti sloučeniny, která jej obsahuje, v tekutině žaludku (kyselé prostředí) a střev (neutrální prostředí).

# Inhalace radionuklidů



V souvislosti s transportem radionuklidů v lidském těle (s ohledem na **retenci** – zadržování - částic, které radionuklid obsahují) dýchací cesty rozdělujeme do tří úseků: nosní cesty, tracheobronchiální kmen a hluboký plicní parenchym - alveoly.

**Aerodynamické vlastnosti** částic aerosolů pronikajících do plic jsou popsány veličinou **AMAD** (*activity median aerodynamic parameter*), definovanou takto: AMAD je průměr koule o jednotkové hustotě, která má stejnou konečnou usazovací rychlost ve vzduchu jako částice aerosolu, jejíž aktivita je mediánem celého aerosolu (☺ - tato definice nás mj. upozorňuje na to, že usazování částic závisí na jejich velikosti a tíze).

Z nosních cest a tracheobronchiálního kmene jsou částice aerosolu z větší části vykašlány, a pak se dostávají do žaludku. Hluboký plicní parenchym je proto nejdůležitější pro *prostup inhalovaných* radionuklidů do těla.



# Inhalace radionuklidů

Do parenchymu – plicních sklípků - pronikají obecně částice s AMAD pod 1  $\mu\text{m}$ .

Z alveolů pronikají dále do těla nejspíše rozpustné sloučeniny radionuklidů, které přecházejí do krve nebo lymfy. **Ner rozpustné částice** mohou být **fagocytovány** plicními makrofágy, poté se dostávají do mízních uzlin a pomalu jsou z nich vyplavovány do krevního oběhu. Další metabolický osud inhalovaných radionuklidů je pak již stejný, jako kdyby přišly do organismu s potravou nebo byly injikovány.



# Další poznámky k metabolismu radionuklidů



Podobně jako radionuklidy jódu vstupují přímo do metabolických pochodů C-14, K-40, Fe-55, Fe-59, Na-24, Ca-45 a H-3, jejichž výskyt v těle je přirozený a vede k určité rovnovážné koncentraci. Ve skutečnosti je však obtížné tuto rovnováhu vyjádřit, protože je výsledkem souhry příjmu radionuklidu na straně jedné a jeho výdeje + přeměny na straně druhé.

Nebiogenní prvky mohou v rozsahu daném tzv. **diskriminačním poměrem** vstoupit do metabolismu jako „jejich sousedé“ v periodické tabulce. Jestliže 100 atomů radionuklidu soutěží o metabolizaci se 100 atomy jejich biogenního protějšku a zjistíme, že 5 atomů radionuklidu a 50 atomů biogenního prvku bylo skutečně metabolizováno, pak diskriminační poměr je  $5/50$ , tj. 0,1. Znalost diskriminačního poměru je důležitá pro matematické modelování transportu a ukládání radionuklidů v těle.

# Dávka pocházející od radionuklidů deponovaných v těle



..... je obtížný problém, jehož řešení závisí na fyzikálních i ryze biologických faktorech. Příkladem biologického faktoru je nestejně rozložení v různých tělesných orgánech (srv. jód ve štítné žláze nebo např. stroncium v kostech). Fyzikálním (opomíjeným) faktorem může být např. radioaktivní čistota (tj. zastoupení různých radionuklidů téhož prvku) a radiochemická čistota (tj. čistota chemického nosiče – může degradovat).



# Absorbovaná dávka

Výpočet/odhad absorbované dávky záření z deponovaného radionuklidu:

Rozlišujeme **zdrojovou** a **terčovou** oblast, které mohou, ale nemusí být totožné. Střední absorbovaná dávka v terčové oblasti v důsledku radioaktivních přeměn ve zdrojové oblasti je dána:

$$\bar{D} = \bar{A} n E \phi m^{-1}$$

kde  $D$  s *pruhem* je absorbovaná dávka,  $A$  s *pruhem* je časový integrál aktivity (počet přeměn za určitý čas),  $n$  je počet ionizací připadající na jednu přeměnu,  $E$  je střední energie částice,  $\phi$  je v terčovém objemu absorbovaný podíl částic,  $m$  je hmotnost terčového objemu.

# Absorbovaná dávka



Zápis  $\phi(r_2 \rightarrow r_1)$  označuje absorbovaný podíl přicházející ze zdrojového objemu  $r_2$  do terčového objemu  $r_1$ .

Veličina  $\Phi = \phi/m$  se nazývá **specifický absorbovaný podíl**. Je možný i formální zápis  $\Phi(r_2 \rightarrow r_1)$ .

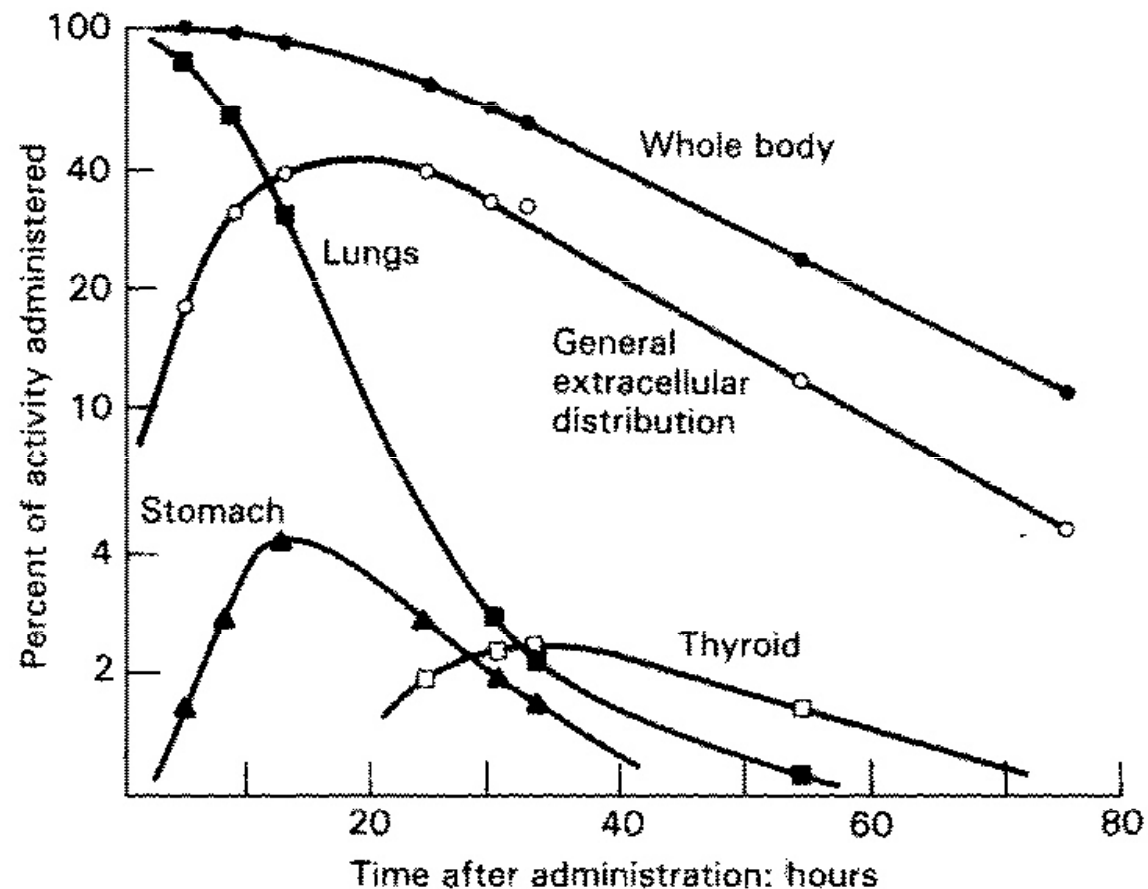
Výrazem  $\Delta$  označíme  $nE$  – celkovou energii uvolněnou při přeměně.

S ohledem na předchozí lze psát pro absorbovanou dávku:

$$\bar{D} = \bar{A}\Delta\Phi$$

Za podmínky rovnoměrného rozdělení radionuklidu v nekonečně velkém tělese a za nepřítomnosti rozptylu platí tzv. **reciproční teorém**, podle kterého je specifický absorbovaný podíl nezávislý na tom, co považujeme za objem terčový a objem zdrojový.

Aktivitu radionuklidu v těle obecně popisujeme pomocí efektivního poločasu, ale v některých orgánech může být časový průběh aktivity složitější.



**Figure 15.3** Complexities of the time course of activity in individual organs after the single administration of a radionuclide. The example is the data following administration of  $^{131}\text{I}$  labeled macroaggregated albumin. Data are from Galt and Tothill (1973). Reproduced by permission of the British Institute of Radiology.

# Dozimetrie na základě kompartimentové analýzy

Velmi složité modelování a matematické postupy umožňují s ne příliš velkou přesností určit dávky záření od aplikovaného radionuklidu absorbované v jednotlivých kompartmentech („oddílech“ těla = tkáních, orgánech...). Chyba závisí na odchylce od ideálního (modelového) tvaru postavy i dalších parametrech.

# Radionuklidy biologického významu



**Tritium** (čistý  $\beta$ -minus,  $T = 12,33$  roku) – v životním prostředí se vyskytuje v důsledku jaderných pokusů a uvolňuje se i při činnosti jaderných reaktorů. Biologický poločas tritiované i obyčejné vody je 10 dnů. Tritium vyzařuje částice beta o velmi malé energii (max. 18,6 keV). Nejnebezpečnější je tritium zabudované v prekursorech DNA.

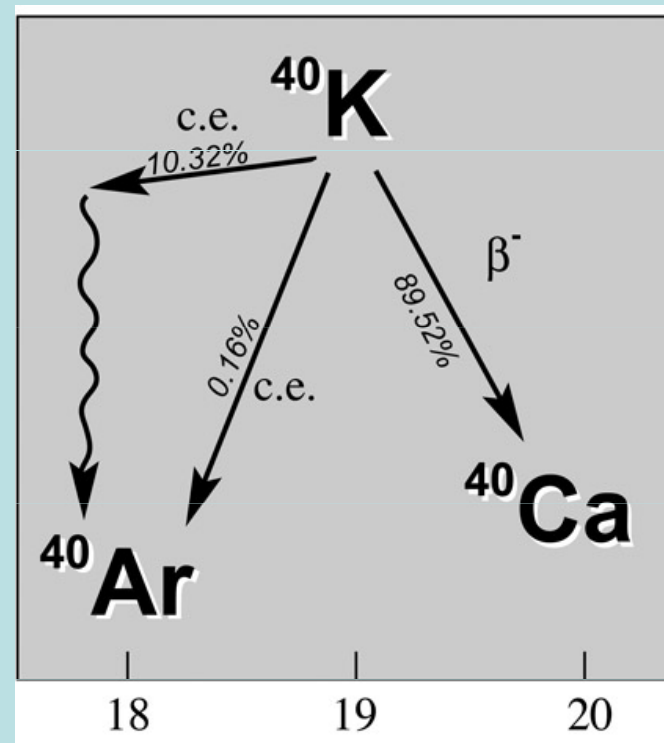
**Krypton-85**, (téměř čistý  $\beta$ -minus,  $T = 3900$  dnů, max. 687 keV), uvolňuje se z vyhořelého jaderného paliva. Dávka v plicích je tisíckrát vyšší než v kostní dřeni.

# Radionuklidy biologického významu



**Sodík** – (převážně gama a  $\beta$ -minus) radioizotopy se používají v nukleární medicíně, žádný význam pro životní prostředí. V atmosféře vznikající Na-22 má malý význam.

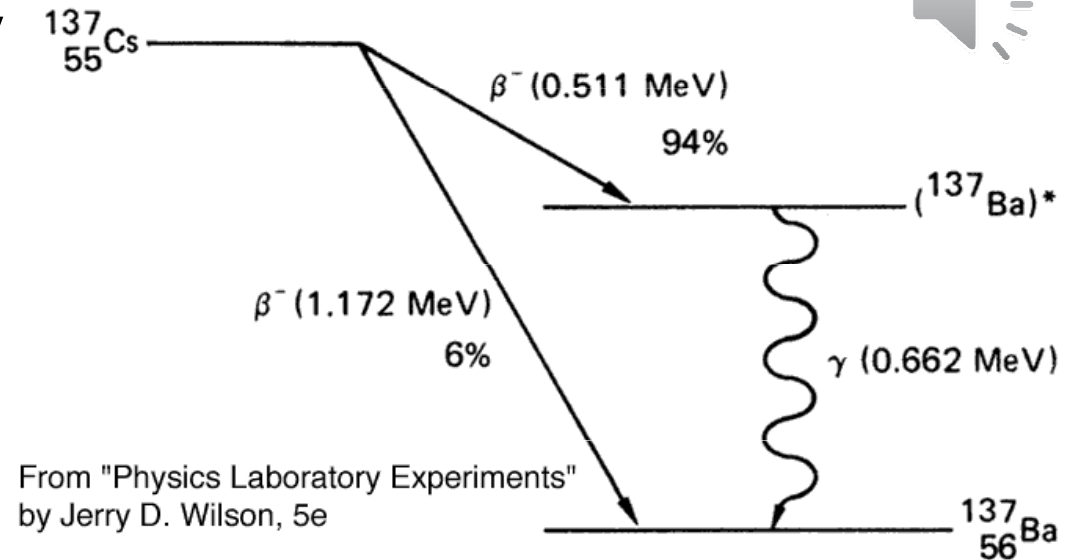
**Draslík-40** – (převážně  $\beta$ -minus a gama) velmi dlouhý poločas přeměny, vyskytuje se přirozeně, reprezentuje značnou část přirozené radiační zátěže externí a interní – **zhruba jednu třetinu**.



V obrázku by mělo být uvedeno nikoliv c.e., ale EC – electron capture, **záchyt elektronu!**



# Radionuklidy biologického významu



**Cesium-137** – (převážně gama a  $\beta$ -minus, též vnitřní konverze záření gama) vzniká při jaderném štěpení, zářič gama, rozpustné ve vodě, přijímané s potravou, chová se podobně jako draslík, biologický poločas 50-150 dnů.

**Stroncium-90**(resp. 89), zářič  $\beta$ -minus,  $T = 28$  let, v 50. a 60. letech se dostalo značné množství stroncia do atmosféry při pokusných výbuších, snadno se zabudovává do kostí místo vápníku, kam se u člověka dostává zejména přes mléko, u psů a prasat způsobuje v experimentu zvýšený výskyt rakoviny.

# Radionuklidy biologického významu



**Barium-140**, významný štěpný produkt uranu, ( $\beta$ -minus,  $\gamma$  -  $T = 12,7$  dnů), vzniká z něj radionuklid **lanthan-140** ( $\beta$ -minus,  $\gamma$  -  $T = 1,68$  dne), člověka ohrožuje zejména při jaderných haváriích.

**Radium-226**, (zejména  $\alpha$ -zářič produkující rovněž různé druhy fotonového záření,  $T = 1600$  let), jeden z produktů uranové řady, chová se podobně jako stroncium, resp. vápník, tedy ukládá se v kostech. Vyzářením částice alfa poskytuje **radon-222**, který je snad nejvýznamnějším přirozeně se vyskytujícím nebezpečným radionuklidem (alfa-zářič,  $T = 3,8$  dne) a který má řadu dceřinných radionuklidů s krátkými poločasy.

Zvýšený počet rakovin kostí a kostní dřeně popsán již mezi válkami u malířek svítících ciferníků hodin (v barvě bylo radium). Po válce zjištěn výskyt kostních nádorů i u pacientů s ankylozující spondylartritidou (Bechtěrevova nemoc, vede ke ztuhnutí páteře) léčených **radiem-224** ( $T = 362$  dnů).

# Radionuklidy biologického významu



**Jód-131** – vzniká podobně jako ostatní radionuklidy jódu v důsledku štěpení uranu nebo plutonia. (převážně záření  $\gamma$  a  $\beta$ -minus,  $T = 8,02$  dne). Z jaderného spadu se dostává do lidského organismu rychle přes mléko. S ohledem na krátký poločas však lze přijmout potravinářská opatření. Tento radionuklid je zjevně odpovědný za nárůst výskytu zhoubných i nezhoubných nádorů štítné žlázy u dětí exponovaných v důsledku Černobylské havárie. Ukládání jódu-131 do štítné žlázy lze účinně bránit nadbytkem normálního jódu.

# Radionuklidy biologického významu

**Uran.** Většina přírodního uranu je U-238, U-235 je zastoupen 0,7%. Pro výrobu jaderných zbraní i pro energetické účely je nutno přírodní uran obohatit izotopem U-235.  $T_{U238} = 4,5$  mld let,  $T_{U235} = 700$  mil. let. Oba izotopy působí na organismus nikoliv zářením, nýbrž jako chemické jedy (nefrotoxicita).

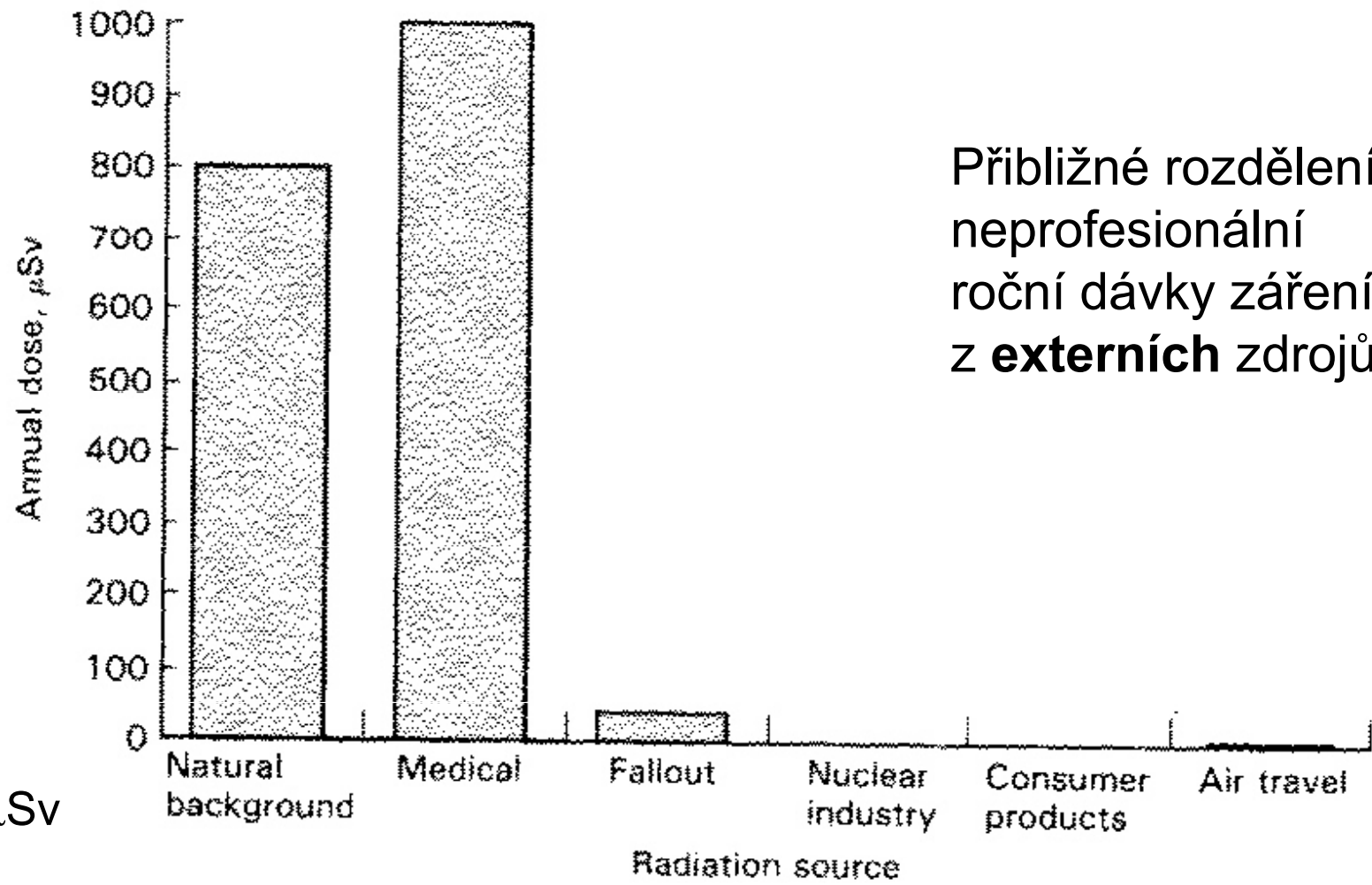
**Plutonium** (238 –  $T = 86,4$  let, 239 –  $T = 24\,890$  let). Pu-238 se používá jako zdroj energie pro termoelektrické články družic. Nejvíce plutonia v životním prostředí je pozůstatkem testování nukleárních zbraní v atmosféře. V těle se chová podobně jako radium, avšak jeho soli jsou většinou špatně rozpustné – do organismu proniká inhalací aerosolu.

**Thorium-232** – uranovou rozpadovou řadu lze posuzovat společně s řadou thoriovou

# Radionuklidy biologického významu



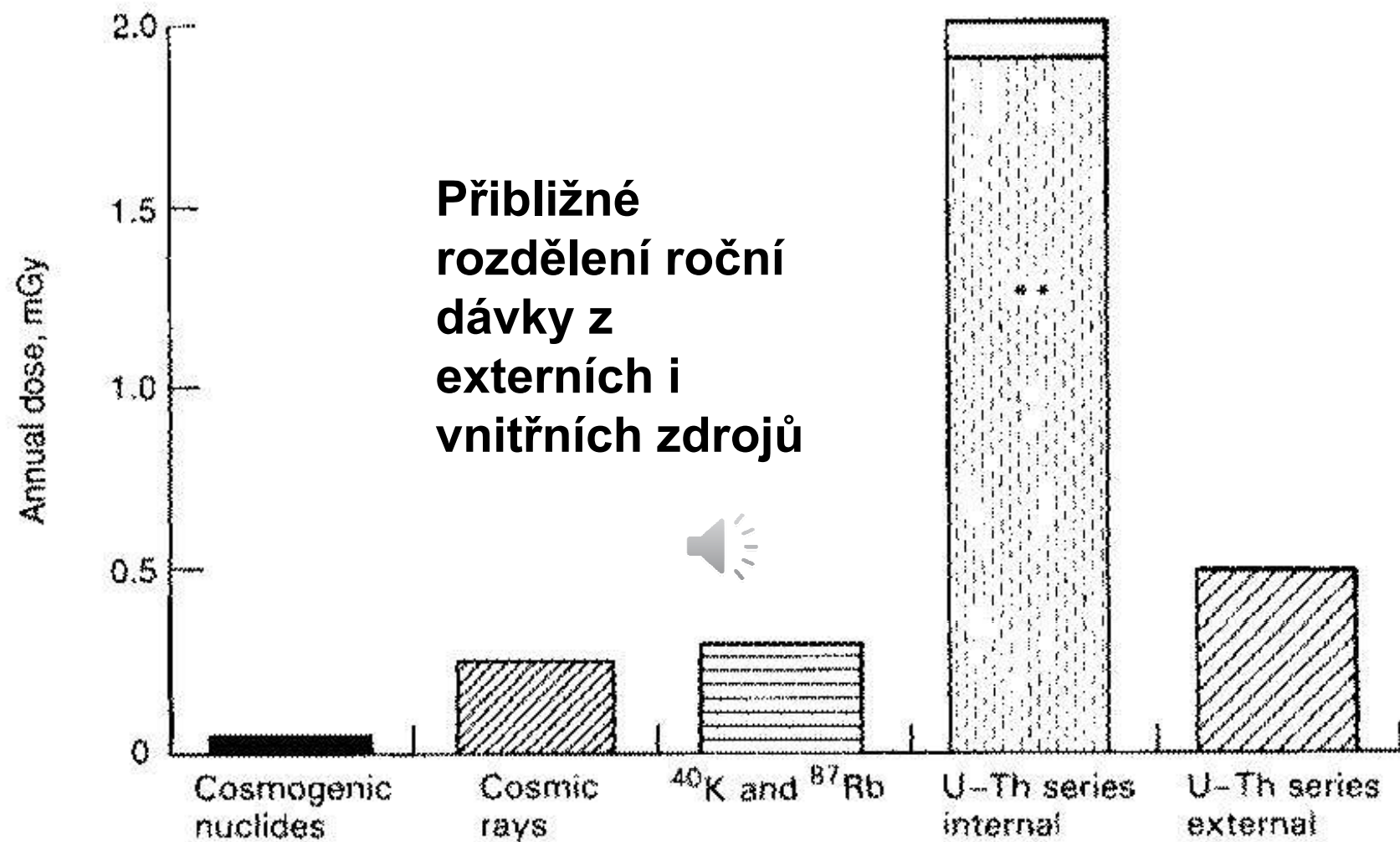
Striktně vzato je přirozeným zdrojem záření několik desítek radionuklidů uranové a thoriové řady plus radionuklidy vznikající v atmosféře působením kosmického záření (zejména H-3, C-14 a Na-22), dále kosmické záření samo o sobě a několik radionuklidů, které nemají souvislost s uranovou a thoriovou řadou a které se přirozeně vyskytují v zemské kůře (K-40, Rb-87 –  $\beta$ -minus,  $T = 49$  mld let). K těmto radioizotopům přibyly další, uměle vytvořené v důsledku štěpení uranu a plutonia, které jsou však až na výjimky málo biologicky významné – radioaktivní spad přispívá k celkové zátěži zářením jen několika procenty.



Přibližné rozdělení  
neprofesionální  
roční dávky záření  
z **externích** zdrojů

Má být  
uvedeno  $\mu\text{Sv}$

**Figure 16.1** Approximate distribution of external average annual individual dose from natural and manmade nonoccupational sources. The first block is the average annual individual dose delivered externally from all naturally occurring sources. This value can vary widely depending upon location and other factors. The medical dose is the approximate average for the United States and other countries with advanced economies. Exposure from the three sources to the right (nuclear industry, consumer products, and air travel) are all less than  $10 \text{ mSv year}^{-1}$ . Doses from radioactive material deposited in the body are considered elsewhere in the text.



**Figure 16.4** Contributions of each of the components of the natural background exposure are shown, with the dose expressed in mGy/y. The vertical columns for the U-Th series internal dose is further subdivided to show the overwhelming contribution of the  $^{222}\text{Rn}$  daughters, denoted by the double asterisks, to the total internal dose from the U-Th series.



# Celková zátěž z různých zdrojů

Velmi přibližně lze říci, že k celkové **roční** absorbované dávce přispívá *externě* necelým 1 mSv přirozené pozadí (může být značně variabilní dle místa na Zemi), 1 mSv přispívají lékařské aplikace (rtg a nukleární medicína - i zde může být ohromná variabilita – od prakticky nuly až ke stovkám mSv – v diagnostice) a 2 mSv přispívají *interně* některé radionuklidy deponované v organismu (již zmiňovaný K-40, dceřinné produkty inhalovaného radonu aj.). Příspěvek jaderného průmyslu a různých materiálů s obsahem radionuklidů je nepatrný. Vzdušná doprava přispívá asi 0,01 mSv za rok – u jednotlivců (posádky letadel) to však může být citelně více.



# Přírodní radiační pozadí v různých částech světa se liší

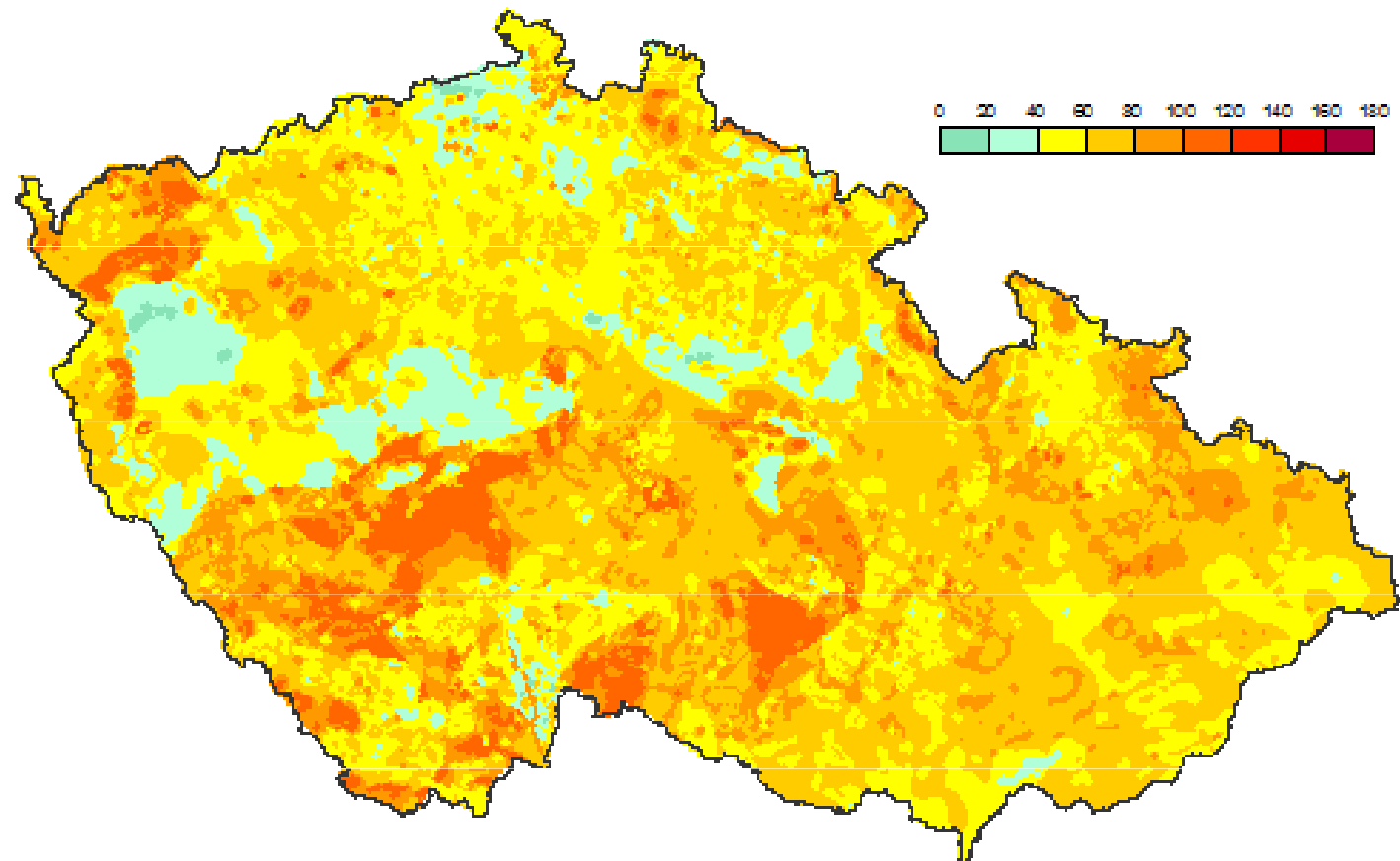
Čechy	- cca 3 mSv/rok
Irán (Ramsar)	- až 400 mSv/rok
Indie (Kerala)	- až 17 mSv/rok
Brazílie (Guarapari)	- až 175 mSv/rok



Radiometrická  
mapa České  
republiky. Hodnoty  
jsou v nGy/h (nGy/h  
= nanogray za  
hodinu). Zdroj:  
Česká geologická  
služba

**Rn + K + Th**  
**Jen gama**  
**záření!**

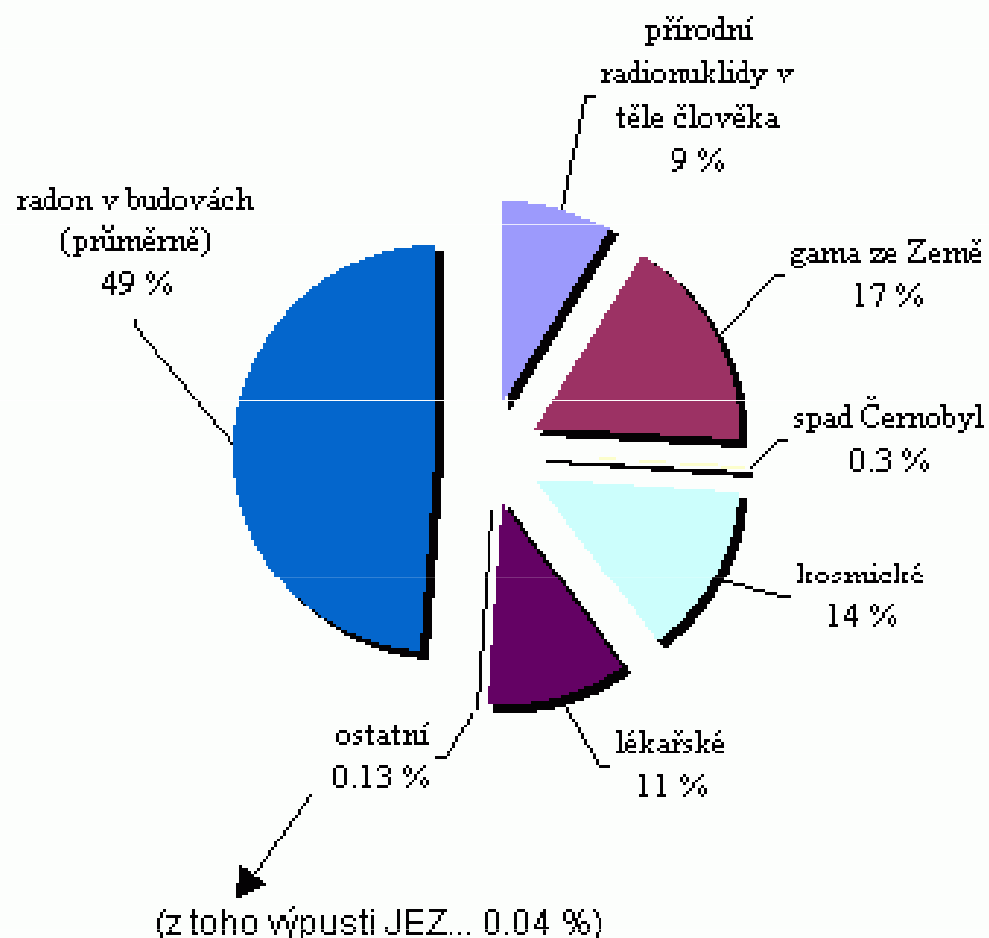
<http://www.geology.cz/extranet/vav/analyza-zranitelnosti-krajiny/radon>



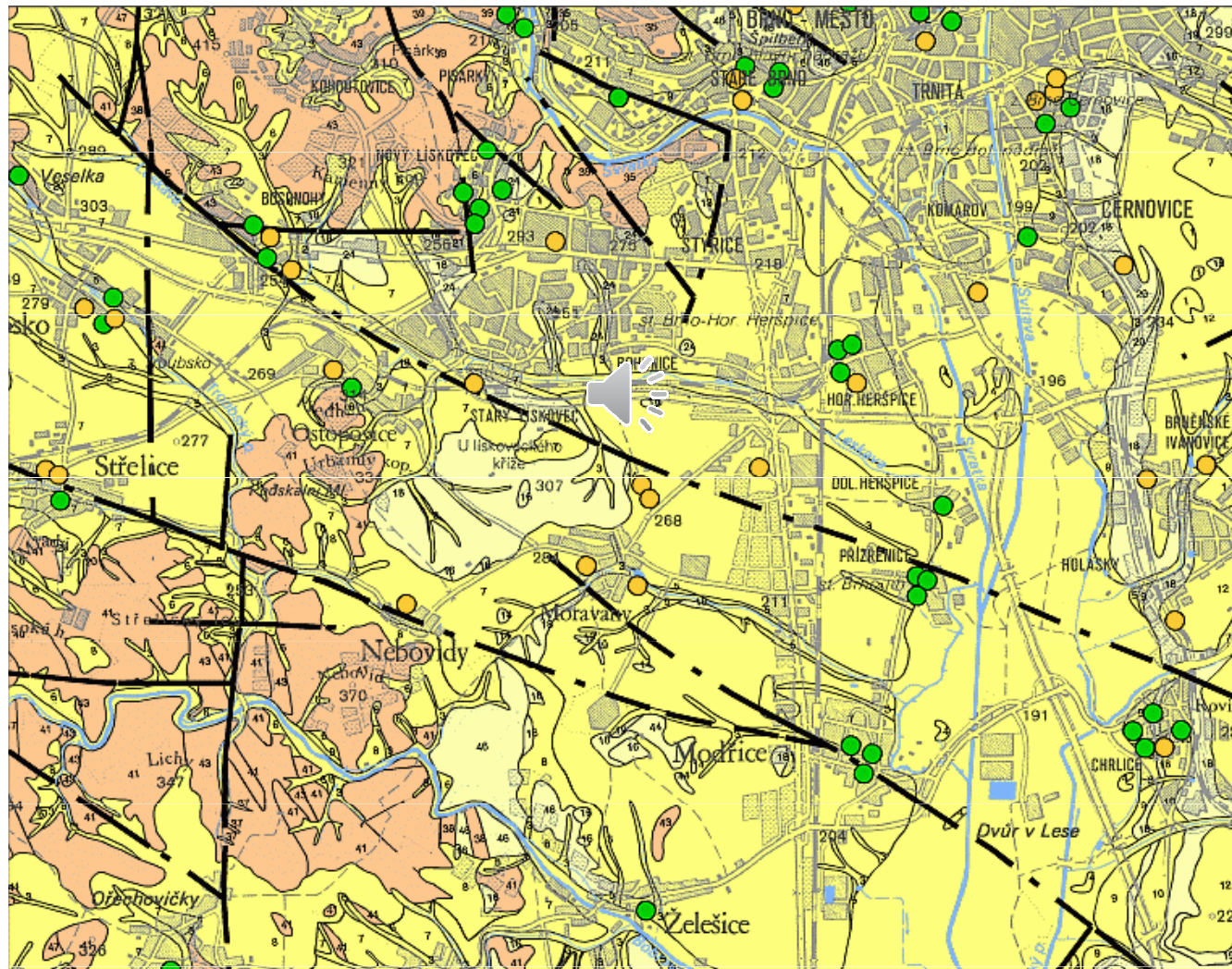
# Zátěž obyvatelstva zářením dle SÚRO



Rozdělení dávek obyvatelstvu

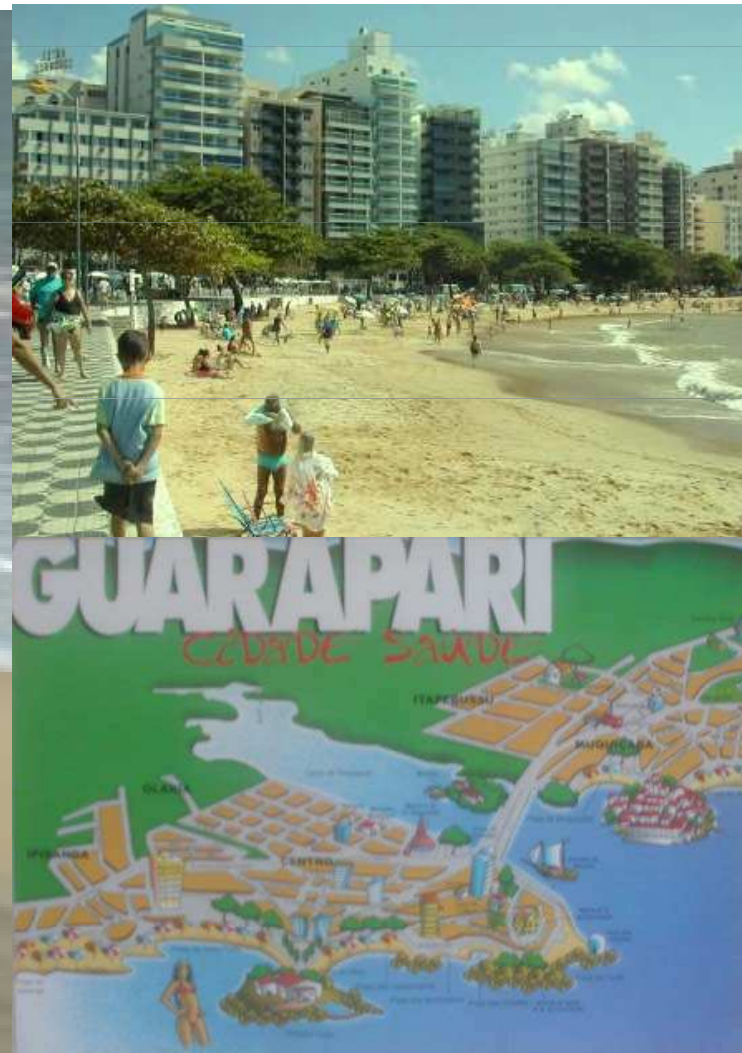


# Radonové riziko - Kampus





# Přírodní pozadí 175 mSv/rok – Guarapari, Brazílie



Prospekt zve návštěvníky do slavných mořských lázní.

# Hormeze



- Příznivý vliv malých dávek na organismus
- Adaptivní odezva
- Prodloužení života
- Příznivý vliv na metabolismus
- Radiační lázně – léčba pohybového ústrojí
- Příklady z vědeckých výzkumů

Vypůjčeno!!!!



Léčebné lázně Jáchymov



Autor: Vojtěch Mornstein

Poslední revize a ozvučení: duben 2020