

## **Geologie a radioaktivita hornin České republiky**

## 1. Radioaktivita přírodního prostředí

Radioaktivita a jaderné záření byly vždy součástí života na Zemi. Lidé a živé organizmy jsou adaptovány na obvyklou radioaktivitu životního prostředí a odpovídající dávky absorbovaného záření. Zvýšené hodnoty radiace jsou objektem studia, hodnocení a vymezení přípustných dávek absorbovaného záření (WHO 2009).

**Zdroje radiace v životním prostředí** jsou přírodní a umělé. Přírodní zdroje radioaktivity působí na populaci kontinuálně, radioaktivitě umělých zdrojů je populace převážně vystavena časově omezeně. Průmyslová činnost a nakládání s přírodními a umělými zdroji radioaktivity může vést ke zvýšení radiace životního prostředí a jeho kontaminaci. Umělým zdrojem radioaktivity jsou rovněž depozice radionuklidů generovaných jadernými reakcemi označované jako jaderný spad. K měření radiace se využívají různé fyzikální a chemické postupy a přístroje, které reagují na měřené pole jaderného záření daného typu.

Při měření radiace jednotlivých zdrojů přístroje reagují na radiaci zdroje a na radiaci okolí. Radiace okolí bývá označována jako **pozadí**. Termín pozadí (radiační pozadí, radiation background) nemá jednotný výklad. Obecně je pozadí suma radiace generovaná v přírodním prostředí v daném místě. Pozadí se mění s místem a časem.

**Přírodní zdroje radiace** jsou radionuklidy v živých organizmech, kosmické záření, kosmogenní radionuklidy, terestrické záření podmíněné radioaktivitou hornin, přírodní radionuklidy ve vzduchu a radionuklidy ve vodě. Tyto zdroje radiace jsou zahrnuty do kategorie NORM (Naturally Occurring Radioactive Material)

V přírodním prostředí se nachází rovněž objekty s přírodními radionuklidy vytvořené cílenou lidskou činností. K takovýmto objektům patří zejména objekty průzkumu a těžby radioaktivních surovin, těžby a spalování uhlí a objekty těžby a zpracování nerostných surovin. Tyto zdroje radiace jsou zahrnuty do kategorie TENORM (Technologically-Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material).

Měření radioaktivity a stanovení kvalitativních a kvantitativních údajů jednotlivých zdrojů vede k evidenci zdrojů radiace území a států a jejich hodnocení.

Jednotlivé zdroje radiace v přírodním prostředí emitují **jaderné záření**. Zájmové objekty jsou nejčastěji zdrojem záření alfa, beta a gama. S ohledem na průchodnost jaderného záření hmotou je při vyhledávání zdrojů radioaktivity v přírodním prostředí, k plošnému mapování radioaktivity oblastí a posouzení úrovně radiace jednotlivých objektů obvykle měřeno **záření gama**.

Významným zdrojem radiace v životním prostředí je rovněž radon v půdním a atmosférickém vzduchu. Radon, zdroj záření alfa, je převážně měřen přístroji a technikou detekujícími **záření alfa**. Geofyzikálním měřením lze radon v horninovém prostředí stanovit pro geologické mapování, vyhledávání radioaktivních surovin a pro hodnocení životního prostředí.

Nejrozsáhlejším přírodním zdrojem radioaktivity jsou horniny. **Horniny generují terestrické gama záření a jsou zdrojem radonu**. Regionální a detailní výzkumy radioaktivity hornin a následná tvorba map radioaktivity hornin jsou realizovány geofyzikálním měřením. Geofyzikální radiometrická měření záření gama, za využití moderní letecké, povrchové a

hlubinné techniky podávají informace o radioaktivitě povrchových a podpovrchových geologických objektů.

V horninách se nachází více než 20 primordiálních radionuklidů. Jako *zdroje radioaktivity hornin* jsou podstatné pouze *draslík, uran a thorium*.

*Draslík* má tři izotopy, radioaktivním izotopem je  $^{40}\text{K}$  *Uran a thorium* jsou mateřskými prvky tří přírodních přeměnových řad  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  a  $^{232}\text{Th}$ , jejichž členy jsou zdroji jaderného záření..

Při geofyzikálních leteckých, pozemních a měřeních radioaktivity hornin ve vrtech se detekuje záření gama. Jednotlivé přírodní radionuklidy K, U a Th v horninách generují pole gama záření stejného řádu. Moderní techniky měření záření gama, postupy kalibrace radiometrických přístrojů a zpracování dat umožňují spolehlivé rozlišení radioaktivity hornin a analýzy obsahů K, U a Th v horninách.

Tabulka 1 Přírodní a umělé zdroje radiace a podíly roční efektivní dávky

Zdroj radiace	UNSCEAR 1993	IAEA 2004	SÚRO 2013
Kosmické záření	14 %	14 %	14 %
Interní záření - radionuklidy v těle	9 %	11 %	9 %
Externí záření - horniny, stavby	17 %	18 %	17 %
Radon	48 %	43 %	49 %
Jiné zdroje (lékařská diagnostika)	12 %	14 %	11 %

## 2. Horniny

Studiem hornin se zabývá geologie a geofyzika. *Geologie* je věda zabývající se složením, strukturou a vývojem Země. Objektem studií jsou fyzické síly Země a chemické složení hornin. Základní geologické vědní obory jsou obecná geologie, strukturní geologie, paleontologie, mineralogie, geochemie, petrologie, hydrogeologie a ložisková geologie.

*Geofyzika* je vědní obor zabývající se studiem Země a jejích sfér fyzikálními metodami. *Geofyzika* se využívá k výzkumu Země v globálním měřítku, zatímco *užitá geofyzika* je zaměřena na výzkum zemské kůry, průzkum nerostných surovin, studium fyzikálních vlastností hornin, lokalizaci podpovrchových objektů a monitorování stavu přírodního prostředí. Základní geofyzikální metody jsou gravimetrie, magnetometrie, geoelektrické metody, radiometrické metody, seismika, termometrie a geofyzikální měření ve vrtech.

Geologické a geofyzikální znalosti jsou použity k zajištění nerostných surovin, při studiu životního prostředí a pro minimalizaci přírodních katastrof.

*Horniny* jsou nehomogenní minerální asociací. Horniny se klasifikují dle řady znaků jako jsou geneze hornin, minerálního složení, stavby hornin, struktury hornin (tvaru, velikosti a sepětí minerálů) textury hornin (prostorového uspořádání minerálů), fyzikálních vlastností hornin (objemové hmotnosti, tvrdosti, nasáklivosti, odlučnosti a dalších vlastností, radioaktivita není ve výčtu vlastností uvedena !), chemismu hornin, barvy hornin a původu hornin. Horniny lze rovněž označovat dle přítomnosti význačných minerálů, dle velikosti částic, které je skládají, dle jejich zpevnění nebo destrukce a dle místa vzniku (autochtonní, allochtonní).

Horniny se dle geneze dělí na horniny magmatické, sedimentární a metamorfované.

**Horniny magmatické** (vyvřelé) vznikly krystalizací tekutého magmatu o vysoké teplotě. Dle pozice tuhnutí jsou to tělesa intrusivní (hlubinná a podpovrchová) a extrusivní (výlevná), dle tvaru jsou to hlubinné batolity (rozsáhlá trojrozměrná tělesa), tělesa žilná, sopouchy (sopečné komíny) a tělesa výlevná (různé formy výlevných těles). Klasifikace a názvy magmatických hornin vychází z jejich podílu křemene, alkalických živců a sodno-vápenatých živců a světlých a tmavých minerálů. Magmatické horniny lze klasifikovat dle obsahu  $\text{SiO}_2$ :

- > 65 %  $\text{SiO}_2$  magmatity kyselé
- 52 – 65 %  $\text{SiO}_2$  magmatity střední
- 44 – 52 %  $\text{SiO}_2$  magmatity bázické
- < 44 %  $\text{SiO}_2$  magmatity ultrabázické

Příklady názvů magmatických hornin jsou granity, granodiority, syenity, diority, gabra (hlubinné magmatity), pegmatity, aplity, žulové porfyry, syenitové porfyry, dioritové porfyry (žilné magmatity), ryolity, trachyty, fonolity, dacity, andesity, basalty (výlevné magmatity).

**Horniny sedimentární** (usazené) vznikly mechanickým usazením úlomků a částic horninového materiálu transportovaného vodou nebo vzduchem, chemickou sedimentací látek z nasycených roztoků a kupením organických hmot. Klasifikace sedimentárních hornin klastických vychází z jejich zrnitosti, dle velikosti zrn se klastické sedimenty označují:

- |                  |          |                            |
|------------------|----------|----------------------------|
| > 2 mm           | psefity  | (slepenec, šterk)          |
| 0,063 – 2 mm     | psamity  | (pískovec, arkóza)         |
| 0,004 – 0,063 mm | aleurity | (prachovec)                |
| < 0,004 mm       | pelity   | (jílovec, jílová břidlice) |

Klasifikace pyroklastických sedimentů (sedimenty s úlomky efusiv) a smíšených sedimentů vychází z kvality a podílů materiálu usazenin. Typy biochemických sedimentů jsou křemičitany, uhličitan, různé soli a kaustobiolity. Příklady názvů sedimentů jsou slepenec, brekcie, pískovce, arkózy, droby, prachovce, jílovec, jílovité břidlice (klastické sedimenty), spongility, diatomity, vápence, dolomity, sádrovce, anhydrity, hality, uhlí (biochemické sedimenty), tufy a tufity (smíšené sedimenty s větším a menším podílem úlomků efuziv).

**Horniny metamorfované** (přeměněné) vznikly rekrystalizací původních hornin za podmínek nízkých, středních a vysokých tlaků a teplot (200 – 1200 °C). Základní formy metamorfózy hornin jsou metamorfóza regionální, kontaktní a dislokační. Stupně metamorfózy ovlivňují vznik typických minerálů. Příkladem metamorfitů jsou kvarcity, fylity, svory, pararuly, krystalické vápence (= mramory), dolomity, skarny, (metamorfity vzniklé regionální metamorfózou převážně ze sedimentů), břidlice, zelené břidlice, porfyroidy, ortoruly, granulity, (metamorfity vzniklé převážně regionální metamorfózou z magmatitů), migmatity (metamorfity vzniklé injekční metamorfózou), břidlice a rohovce (metamorfity vzniklé kontaktní metamorfózou), mylonity a tektonické brekcie (metamorfity vzniklé tektonickou metamorfózou).

Vzhledem k tomu, že **radioaktivita není znakem petrologické klasifikace hornin**, název horniny podle petrologického určení není podkladem pro kvantitativní stanovení radioaktivity horniny.

Horniny lze dělit a označovat dle doby jejich vzniku (podle stáří hornin).

#### **Přehled geologických období**

miliónů let

kvartér (čtvrtohory)	0 – 1,8
holocén	
pleistocén	
terciér (třetihory)	1,8 – 65
neogén	
paleogén	
mezozoikum (druhohory)	65 – 225
křída	
jura	
trias	
paleozoikum (prvohory)	225 – 570
perm	
karbon	
devon	
silur	
ordovik	
kambrium	
proterozoikum (starohory)	570 – 2600
archaikum (prahory)	2600 –
stáří Země	4500 – 4700

### 3. Geologie České republiky

Na území České republiky se nachází dvě základní geologické jednotky: Český masív (Čechy a západní část Moravy) a Západní Karpaty (východní a jihovýchodní část Moravy). Hranicí obou jednotek je přibližně linie Znojmo – Ostrava.

**Český masív** je fragment variského orogenu. Český masív *je tvořen fundamentem* (starším krystalinickým podložím) *a platformními pokryvy* (mladšími sedimenty). Fundament byl zásadně formován kadoamskou orogenezí (proterozoikum až kambrium) a přetvořen variskou orogenezí (devon – karbon). Při obou horotvorných pochodech nastaly laterární posuvy hmot a metamorfóza (rekrytalizace) hornin. Český masív má blokovou stavbu, bloky jsou omezeny zlomy. Český masív je tvořen horninami magmatickými, sedimentárními a metamorfovanými stáří proterozoikum – kvartér.

*Fundament Českého masívu* je tvořen metamorfovanými horninami a magmatickými horninami předvariského a variského stáří. Fundament Českého masívu je heterogenní celek a dělí se na několik regionálních jednotek vymezených oblastí (moldanubická oblast, tepelsko-barrandienská oblast, kutnohorská-železnohorská oblast, sasko-duryňská oblast, lužická oblast, moravskoslezská oblast).

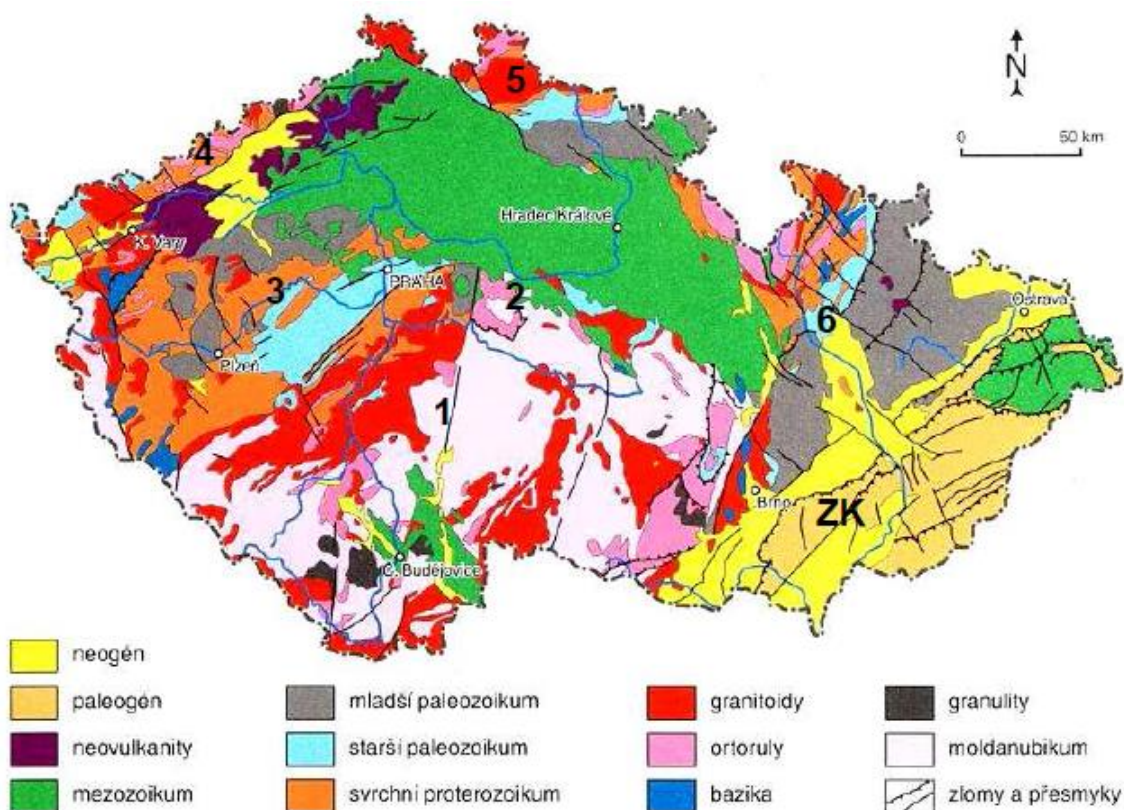
*Sedimenty permokarbonu* (karbon a perm limnických pánví) tvoří přechod mezi předplatformními jednotkami a platformními jednotkami Českého masívu. Četné karbonské pánve s ložisky uhlí jsou v celém území Českého masívu.

*Platformní pokryvy* jsou tvořeny sedimenty mezozoika (jura, křída), terciéru a kvartéru. Jurské sedimenty jsou přítomné na jv. Moravě, sedimenty křída jsou plošně rozšířené zejména

v české křídové pánvi v severních Čechách a v pánvích jižních Čech, terciérní sedimenty jsou např. v podkrušnohorských pánvích a jinde.

**Západní Karpaty** jsou součástí alpid – rozsáhlého horského systému tvořeného sedimenty mezozoika a terciéru, který se táhne ze Španělska do jv. Asie. Jsou výsledkem alpínské orogeneze (paleogén – neogén), kdy vrásněním získaly příkrovovou stavbu. Na území České republiky jsou zastoupeny pouze vnější Karpaty (v. a jv. Morava), které tvoří dva flyšové komplexy a karpatská předhlubeň. Sedimenty flyše jsou střídáním písčitých a jílovitých poloh hornin. Západní Karpaty jsou na území České republiky tvořeny sedimentárními horninami stáří terciér – kvartér.

Schema geologické mapy České republiky barevnými odstíny a směry naznačuje litologické odlišení hlavních geologických struktur a hranici mezi Českým masívem a Západními Karpaty.



Obr.1 Zjednodušená geologická mapa České republiky (podle ČGS, upraveno)  
 Český masív: 1 – moldanubická oblast, 2 – kutnohorsko-železnohorská oblast, 3 – tepelsko-barrandienská oblast, 4 – sasko-durynská oblast, 5 – lužická oblast, 6 – moravskoslezská oblast. ZK - Západní Karpaty

#### 4. Radionuklidy v horninách a radioaktivita hornin

## 4.1 Radionuklidy v horninách

**Primordiální radionuklidy** vznikly při syntézi Země. Zachovaly se radionuklidy s dlouhým poločasem přeměny. V horninách se nachází více než 20 primordiálních radionuklidů ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ ,  $^{147}\text{Sm}$ ,  $^{176}\text{Lu}$ ,  $^{187}\text{Re}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  a jiné), avšak z hlediska jejich obsahů v horninách a energie a intenzity emise jejich jaderného záření jsou podstatné a snadno měřitelné pouze některé. Tyto významné přírodní radionuklidy, podmiňující radioaktivitu hornin, jsou draslík (K), uran (U) a jeho produkty přeměny a thorium (Th) a jeho produkty přeměny.

**Draslík** má 3 izotopy z nichž pouze izotop  $^{40}\text{K}$  je radioaktivní.  $^{40}\text{K}$  je zastoupený v přirozené směsi izotopů draslíku pouze 0,012 procenty.  $^{40}\text{K}$  se přeměňuje beta přeměnou s emisí záření beta, kdy produktem přeměny je  $^{40}\text{Ca}$  a záchytem elektronu s emisí záření gama, kdy produktem přeměny je  $^{40}\text{Ar}$ .  $^{40}\text{K}$  je zdrojem **záření  $\beta$  a  $\gamma$** , záření gama má energii 1,461 MeV. Přítomnost draslíku v horninách (všech izotopů K sumárně) se v geovědách uvádí v hmotnostní koncentraci a vyjadřuje se v %. 1 % K = 10 mg K/1 g horniny = 10 g K/1 kg.

**Uran** má 3 izotopy.  $^{238}\text{U}$  je zastoupen 99,274 %,  $^{234}\text{U}$  je zastoupen 0,006 % a  $^{235}\text{U}$  je zastoupen 0,720 %.  $^{238}\text{U}$  a  $^{235}\text{U}$  vytváří samostatně přírodní přeměnové řady, jejichž radionuklidy jsou zdrojem **záření  $\alpha$ ,  $\beta$  a  $\gamma$** . Z výše uvedených zastoupení izotopů uranu zřejmé, že  $^{238}\text{U}$  je zásadním zdrojem radiace uranu v horninách.

**Thorium** má velký počet izotopů.  $^{232}\text{Th}$  o dlouhém poločasu přeměny vytváří přírodní přeměnovou řadu, jejíž radionuklidy jsou zdrojem **záření  $\alpha$ ,  $\beta$  a  $\gamma$** .

Obsahy U a Th v horninách se v geovědách uvádějí v hmotnostní koncentraci a vyjadřují se v jednotkách ppm (parts per million). 1 ppm = 1  $\mu\text{g}$  /1 g horniny = 1 mg/kg.

Radionuklidy přírodních přeměnových řad  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  a  $^{232}\text{Th}$  emitují jaderné záření, jehož energie je pro jednotlivé radionuklidy charakteristická. Měřením a stanovením energií záření lze jednotlivé radionuklidy určit. Přibližně uprostřed každé přeměnové řady jsou generovány izotopy radioaktivního plynu radonu. Koncové produkty přeměny v přeměnových řadách  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  a  $^{232}\text{Th}$  jsou stabilní izotopy olova:  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$  a  $^{208}\text{Pb}$ . Za stavu radioaktivní rovnováhy v přeměnové řadě jsou aktivity (počet přeměn za jednotku času) všech členů přeměnové řady si rovny.

Tabulka 2 Poločasy přeměn a radiace přírodních radionuklidů K, U a Th

Radionuklid	Poločas přeměny $T_{1/2}$ roky	Zdroj záření
$^{40}\text{K}$	$1.3 \cdot 10^9$	$\beta$ a $\gamma$
$^{238}\text{U}$	$4.47 \cdot 10^9$	$\alpha$ , $\beta$ a $\gamma$
$^{235}\text{U}$	$7.13 \cdot 10^8$	$\alpha$ , $\beta$ a $\gamma$
$^{232}\text{Th}$	$1.39 \cdot 10^{10}$	$\alpha$ , $\beta$ a $\gamma$

Odhadované stáří Země:

$4.5 \cdot 10^9$  roků

Poločasy přeměn K, U a Th jsou velmi dlouhé (tabulka 2) a v době možností našich pozorování úbytek přírodních radionuklidů K, U a Th v horninách není znatelný. *Přírodní radionuklidy K, U a Th jsou tedy stálými zdroji radioaktivity hornin.* Radioaktivitu hornin nejčastěji určujeme měřením záření gama. Dávkový příkon (Gy/s, nGy/h) záření gama generovaný jednotlivě draslíkem nebo radionuklidy přeměnových řad U nebo Th v horninách je stejného řádu.

## 4.2 Radioaktivita Země

Poloměr Země je  $r = 6371$  km. Sféry Země jsou *zemská kůra* (6 – 80 km), *zemský plášť* (do hloubky 2900 km) a *jádro Země* (vnější-tekuté, vnitřní-pevné). Rozložení radionuklidů v Zemi je proměnné: v zemské kůře jsou horniny značně geochemicky diferencované, alkalické horniny mají relativně vyšší obsahy radioaktivních prvků (X % K, X ppm U, X až X0 ppm Th), bazické horniny (s nízkým obsahem SiO<sub>2</sub>) mají nízké obsahy radioaktivních prvků (0,X % K, 0,X ppm U, X ppm Th). V zemském plášti jsou obsahy přírodních radionuklidů velmi nízké (analogie s meteority), v jádře Země se předpokládá obsah radionuklidů ještě nižší.

Radiogenní teplo Země je generováno přeměnami přírodních radionuklidů. Tepelné produkce jednotkových hmotností přírodních radionuklidů jsou:  $3,58 \cdot 10^{-12}$  W/g K,  $9,7 \cdot 10^{-8}$  W/g U a  $2,7 \cdot 10^{-8}$  W/g Th. Teplo slunečního záření dopadající na Zemi je větší než radiogenní teplo Země, avšak 40 % tepla slunečního záření se od povrchu Země odráží. Výsledkem je, že radiogenní teplo Země je jako zdroj tepla na Zemi dominantní. Radiogenní teplo podmiňuje na Zemi tepelný tok s typickými hodnotami 50 – 60 mW/m<sup>2</sup>.

## 4.3 Radioaktivita hornin zemské kůry

Přírodní radioaktivní prvky K, U a Th jsou přítomné v minerálech a komponentách, které horniny tvoří.

**Draslík** (K) má vysoký obsah v draselných živcích, v minerálech leucitu a nefelinu a ve slídách jako jsou biotit, muskovit, sericit a flogopit. Draslík je v horninovém prostředí mobilní.

**Uran** (U) má četné geochemické formy přítomnosti v horninách. Podle chemického složení vytváří oxidy, silikáty, vanadáty, fosfáty, arsenáty, karbonáty, sulfáty, molybdáty a jiné sloučeniny. Uranové minerály se vyskytují jako primární (vznikly krystalizací, např. uraninit) a sekundární (vznikly oxidací primárních minerálů, např. autunit). Z hlediska přítomnosti v minerálech uran vytváří samostatné minerály (uraninit, smolinec) nebo je izomorfně přítomen v jiných minerálech (např. v zirkonu, monazitu, xenotimu, apatitu a j.). Uran čtyřvalentní je geochemicky stálý, uran šestivalentní je rozpustný. Vzhledem k rozpustnosti šestivalentního uranu je uran v horninovém prostředí mobilní.

**Thorium** (Th) má rovněž četné a složité geochemické formy přítomnosti v horninách. Minerály s obsahem Th jsou např. zirkon, monazit, xenotim, apatit, alanit, epidot a j. Thorium je v horninovém prostředí relativně stálé.

Tabulka 3 Hmotnostní koncentrace přírodních radionuklidů K, U a Th v horninách

Radionuklid	globální průměr	typické hodnoty	extrémy
K (%)	2,0 – 2,5	0 - 5	0 – 8 pegmatity
U (ppm)	2,0 – 3,0	0 - 12	0 – X00 alkalické magmatity
Th (ppm)	8,0 – 12,0	0 - 50	0 – X000 plážové písky

**Magmatické horniny** (vyvřelé horniny) vznikají tuhnutím magmatu za tvorby silikátových minerálů. V první fázi magmatické diferenciaci za vysokých teplot převážně krystalizují mafické (tmavé) minerály bohaté na Fe a Mg, a chudé na Al, Si, Na a K. Mafické minerály



převážně nejsou nositeli radioaktivních prvků. V koncové fázi magmatické diferenciace se tvoří minerály s větší komponentou Si a Al. Draslík je významnou součástí tvorby Al-Si základních minerálů pozdní fáze magmatické diferenciace, zatímco uran a thorium se koncentrují v minoritních a akcesorických minerálech. *Radioaktivita magmatických hornin* obvykle roste s obsahem SiO<sub>2</sub> (kyselostí magmatických hornin). Kyselé magmatity (např. granity) vykazují vyšší radioaktivitu než bazické magmatity (např. gabro).

Chemické a mechanické větrání magmatických hornin vede k separaci minerálů a oddělení akcesorických minerálů obsahujících U a Th. Jsou to zejména titanit, apatit, zirkon, xenotim, monazit a ortit.

Produkty větrání magmatitů jsou písčité složka (minerály o nízké radioaktivitě), jílové minerály (jsou nositeli K a dalších radioaktivních prvků) a akcesorické minerály (se zvýšenými obsahy U a Th).

***Sedimentární horniny*** (horniny usazené) jsou v jednotlivých litologických typech k obsahům přírodních radionuklidů K, U a Th specifické. Obecně platí, že radioaktivita sedimentů roste s obsahem jílovitých minerálů. Jílovce mají vysoký obsah jílových minerálů s vysokým obsahem K. Jílovce mohou vázat další radioaktivní prvky a v případě obohacení organickou substancí též U. Pískovce převážně sestávají ze zrn kvarcitu (neradioaktivní) a zrn živců (draselné živce mají vysoký obsah K). Arkózy jsou sedimenty o vysokém obsahu zrn živců (převážně radioaktivní komponenty). Karbonáty (vápenaté sedimenty) vápence a dolomity, mají převážně nízké obsahy K (rozpuštěný) a Th, zatímco tvorba karbonátů v mořském prostředí za podmínek přítomnosti organické substance váže U. Uran může nahrazovat vápník nebo být adsorbován fosfáty. Fosfáty mají vysoké obsahy uranu 50 – 300 ppm U (severní Afrika, severní Amerika a j.).

Vysoce radioaktivní plážové písky obsahující těžké kovy v nerozpustných sloučeninách akumulovaných gravitační sedimentací. Obsahují monazit s vysokou koncentrací Th a též U. Těžké kovy dodávají plážovým pískům černou barvu, monazit sám je světlý. Dávkové příkony záření gama jsou na některých lokalitách s plážovými písky extrémní: Varkala (Indie) 2000 nGy/h, Ramsar (Irán) až 10000 nGy/h, Guarapari (Brazílie) až 50000 nGy/h.

***Metamorfované horniny*** (přeměněné horniny) vznikly rekrystalizací původních horninových mas za daných podmínek teploty a tlaku. Radioaktivita metamorfovaných hornin je v širokém intervalu hodnot, převážně odpovídá radioaktivitě výchozího horninového materiálu. Změna radioaktivity metamorfovaných hornin nastává převážně za vysokých tlaků a teplot regionální metamorfózy, kdy jsou předpokládány pohyby všech tří radioaktivních prvků K, U a Th. Migmatity jsou horniny, které vznikají injekční metamorfózou převážně pararul. Za přínosu křemenného metatektu (fluidní injekční složky vnikající do horniny) se radioaktivita původní horniny snižuje, za přínosu draselného metatektu radioaktivita migmatitu roste.

Vysoce radioaktivní černé břidlice (Alum shale) pozdně kambrického stáří v Norsku a Švédsku s koncentracemi uranu až X000 ppm U a graptolitové jílovité břidlice v Estonsku s koncentracemi až 800 ppm U jsou horniny ovlivňující radioaktivitou významně prostředí ve stavbách a životní prostředí exteriéru.

Příklady obvyklých koncentrací K, U a Th ve vybraných typech hornin zemské kůry uvádí tabulka 4. Poměry Th/U jsou pro některé typy hornin specifické.

Tabulka 4 Typické koncentrace draslíku, uranu a thoria v horninách zemské kůry

hornina	% K	ppm U	ppm Th	Th/U
bázické magmatity	0,5	1,0	3,0	3
středně kyselé magmatity	1,8	2,3	9,0	4
kyselé magmatity	4,0	4,5	25,0	5
písčité sedimenty	1,4	1,5	5,5	4
jílovité sedimenty	2,7	4,0	16,0	4
vápence	0,7	2,0	2,0	1
černé břidlice	2,7	8,0	16,0	2
amfibolity	0,8	1,2	3,3	3

Obvyklé koncentrace přírodních radionuklidů v horninách jsou v mezích 0 – 5 % K, 0 – 12 ppm U, 0 – 50 ppm Th, kterým odpovídají dávkové příkony záření gama v mezích 5 – 300 nGy/h nejčastěji. Změnu obsahů radionuklidů a radioaktivitu hornin může podmínit pohyb přírodních radionuklidů v důsledku jejich rozpustnosti, chemické změny, migrace radonu, přenos mechanických částic větrem a vodou a redepozice horninových materiálů.

*Absorbované dávky záření z přírodních zdrojů se podle atomového zákona (zákon č. 263/2016 Sb, § 2) do limitů expozic nezapočítávají.* Pro teoretické srovnání roční dávky externího ozáření populace z terestrického záření v obvyklém horninovém prostředí lze uvést odhad intervalu efektivní dávky nejčastěji v mezích 0,2 – 1,5 mSv/rok.

Horniny („skalní podklad“) a zeminy a půdy (pokryv) vzniklé destrukcí hornin podloží mohou mít rozdílnou radioaktivitu. Radioaktivita zemin a půd závisí na primárním obsahu radionuklidů v podložních horninách, na klimatických podmínkách a mobilitě jednotlivých radionuklidů v horninovém prostředí. Literární údaje převážně popisují poměr radioaktivity zemin a půd k radioaktivitě podložních hornin v mezích 0,7 – 1,0.

#### 4.4 Uranová mineralizace v České republice

Uranová mineralizace se v České republice nalézá v horninách Českého masívu, který je heterogenní polycyklickou metalogenetickou provincií. Uranová mineralizace se nachází v celém rozsahu krystalinického fundamentu Českého masívu a ve všech vývojových etapách jeho platformních pokryvů. Nejvýznačnějším procesem pro vytváření akumulací uranu a tvorbu ložisek uranu byla variská tektogeneze (Prvohory). V Českém masívu se nachází uranová ložiska endogenního hydrotermálního typu a exogenní epigenetická U ložiska (Matolín, Šuráň, 1989).

**Endogenní uranová ložiska** jsou převážně spjata s plutony (magmatická hlubinná tělesa) a náleží ke křemito-paragenetické formaci s minerálními asociacemi křemen – karbonáty – uraninit, nebo křemen – fluorit – uraninit a k sulfidické paragenetické formaci s minerálními asociacemi sulfidy – uraninit a prvkovou asociací Ag-Bi-Co-Ni-As-U. Hydrotermální uranová ložiska jsou středně a nízko temperovaná. K hydrotermálním U ložiskům patří např. ložiska Jáchymov, Potůčky, Horní Slavkov (sasko-durynská metalogenetická zóna), Medvědin, Javorník a několik výskytů uranu v krystaliniku orlicko-kladské klenby (sudetská metalogenetická zóna), Licoměřice-Březinka, Bernardov a Líšňany (barrandiensko-železnohorská metalogenetická zóna) a řada U ložisek v moldanubické metalogenetické zóně, jako jsou Rožná-Olší, Škrdlovice, Chotěboř, Brzkov, Polná ve východní části moldanubika, Příbram, Ustaleč, Dlažov, Předbořice a Okrouhlá Radouň v centrální části moldanubika, a Zadní Chodov a Dyleň a v západní části moldanubika. Endogenní uranová mineralizace

převážně náleží pozdní fázi variské orogeneze (265 miliónů let, prvohory) a období kimberského vrásnění (185 a 150 miliónů let, druhohory). Formy hydrotermální akumulace uranu jsou pravé žíly, mocné uranem nabohacené zóny a metasomatická mineralizace v granitických horninách. Většina endogenních ložisek uranu v Českém masívu je prostorově vázána na granitické horniny variského stáří s větším zastoupením ložisek U v exokontaktu granitických těles.

**Exogenní uranová mineralizace** a exogenní ložiska uranu se nachází v platformním pokryvu Českého masívu. Syngenetické akumulace uranu v uhelných vrstvách a polohách jílu permokarbónských pánví (prvohory) mají často prvkové asociace U-Pb-Zn-Cu-Mo-(V). Epigenetické akumulace uranu v ložiskách uhlí vnitrosudetské pánve podmiňují zvýšenou radiaci uhelných hald a produktů jejich spalování. Významná uranová mineralizace v sedimentech české křídové pánve je vyvinuta v horninách cenomanu (druhohory, křída) v nadloží hranice s krystalinikem, které je zvažováno jako zdroj uvolněného uranu. Charakteristickým znakem uranové mineralizace na ložiskách Stráž a Hamr je vazba uranu v sedimentech na organické substance a na pyrit. Uranová mineralizace je charakteristická prvkovou asociací U-Zr-Ti-P. Uranová mineralizace v třetihorních sedimentárních horninách sokolovské pánve a chebské pánve je vyvinuta v oblastech, kde podloží sedimentů tvoří žuly karlovarského masívu a smrčinského masívu. Akumulace uranu se nachází v pískovcích, uhelnatých jílech, uhelných vrstvách, tufech a tufitech. Významnými lokalitami uranové mineralizace jsou Odeř, Ruprechtov, Hroznětín.

Koncentrace uranu v hydrotermálních ložiscích Českého masívu odpovídá přibližně 0,3 % U (3000 ppm U), koncentrace uranu v sedimentech české křídové pánve má průměrnou koncentraci 0,1 % U (1000 ppm U). Podrobné údaje o uranové mineralizaci v Českém masívu uvádí referenční literatura ((ČSUP, 1975; ČSUP 1984; DIAMO, 2016; Dahlkamp, 1993).

Stovky uranových mineralizací lokalizovaných při průzkumu uranu v letech 1946 – 1990 na území České republiky o relativně malé rozloze (78866 km<sup>2</sup>) a následně 66 těžných ložisek uranu ukazuje na významnou přítomnost tohoto stopového prvku v horninách území státu. Uranové mineralizace tvoří rozměrově omezená geologická tělesa, zatímco uranem nabohacené geologické struktury ovlivňují radioaktivitu přírodního prostředí plošně. Oba typy radioaktivních objektů jsou z hlediska radiační ochrany významné.

## 5. Měření radioaktivity hornin ČR

Radioaktivitu hornin území lze stanovovat terénním geofyzikálním pozemním a leteckým měřením. Při **měření gama záření** se uplatňují metody *měření úhrnné gama aktivity (TC)* a *gama spektrometrie (GS)*, která umožňuje stanovit hmotnostních koncentrací přírodních radionuklidů K, U a Th, zdrojů radioaktivity v horninách.

V rámci úkolů geologického mapování Československa, geofyzikálních výzkumů a zejména vyhledávání a průzkumu ložisek uranu bylo území České republiky předmětem rozsáhlého měření radioaktivity hornin. Systematické vyhledávání a průzkum uranu začaly zřízením státního podniku Jáchymovské doly v roce 1946. V letech 1957 – 1959 bylo celé území Československa (100 %) pokryto leteckým regionálním měřením úhrnné gama aktivity (TC) a magnetického pole hornin, při vzdálenosti leteckých profilů 2 km a výšce letu 100 m. V letech 1960 – 1971 bylo ve vybraných regionech provedeno detailní letecké měření radioaktivity hornin (TC) se vzdáleností profilů 250 m a pracovní výšce letu 80 m. Od roku

1976 je na území ČR v zájmových územích prováděn letecký gamaspektrometrický průzkum (GS) zahrnující též stanovení koncentrací K, U a Th (pokryto přibližně 60 % plochy ČR). Při vyhledávání radioaktivních surovin byla od roku 1960 na ploše 25 % území ČR uplatněna automobilová gamaspektrometrie. Intenzivní pozemní průzkum gama s přenosnými přístroji (TC a GS) pokryl 35 % plochy ČR. Zdrojem informací bylo měření radioaktivity hornin ve vrtech a laboratorní měření tisíců horninových vzorků v rámci jednotlivých geologických a geofyzikálních výzkumů.

Průzkum uranu provedl Československý uranový průmysl (ČSUP), letecká geofyzikální měření n.p. Geofyzika Brno, k radiometrickému mapování přispěl Český geologický ústav (ČGÚ, dnes ČGS). Výsledky měření radioaktivity byly zobrazovány jako mapy profilů nebo mapy izoliní a jsou převážně dostupné v Geofondu ČR.

**Radonový průzkum** ČSUP (též označení *emanační průzkum*) byl prováděn od roku 1949 do roku 1983 v měřičských sítích 250 x 5 m a 50 x 5 m s hloubkou odběru vzorků půdního vzduchu do 1 m nebo 2 m a pokryl přibližně 25 % plochy ČR.. Objemová aktivita radonu v půdním vzduchu byla vyjadřována v relativních hodnotách (dílkys), v jednotkách Ci/litr, eman (1 eman = 3,7 kBq/m<sup>3</sup>) a v Bq/litr.

## 6. Kalibrace geofyzikálních radiometrických přístrojů

Kvalita radiometrických měření významně závisí na kalibraci radiometrických přístrojů. **Kalibrační základna pro terénní geofyzikální radiometrické přístroje** byla ČSUP zřízena v Bratkovicích u Příbrami v roce 1975. Společně s využitím geologických referenčních materiálů pro laboratorní gama spektrometrii, připravených Mezinárodní agenturou pro atomovou energii v roce 1987 (IAEA 1987), přinesly význačné zlepšení kvality a spolehlivosti terénních a laboratorních radiometrických měření a jejich standardizaci. Kalibrační základna ČSUP pro terénní gama spektrometry byla vybudována v souladu s vývojem a doporučením IAEA (1989) ke konstrukci a užití kalibračních základen. Kalibrační základna ČSUP sestává ze standardů pro kalibraci přenosných, leteckých a automobilových gamaspektrometrů a karotážních radiometrů. Standardy pro terénní a karotážní radiometrické přístroje jsou 4 velkoobjemová cylindrická betonová tělesa, z nichž 3 jsou jednotlivě obohacena radionuklidy K, U a Th. Velkoobjemové kalibrační standardy simulují svým složením matrice, radionuklidy a rozměry podmínky terénních měření radioaktivity hornin na povrchu zemském nebo ve vrtech. Parametry standardů kalibrační základny ČSUP byly v roce 1992 porovnány se standardy Geological Survey of Canada. Kalibrační základna ČSUP byla v roce 2010 přestěhována a nově zřízena s.p. DIAMO ve Stráži pod Ralskem.

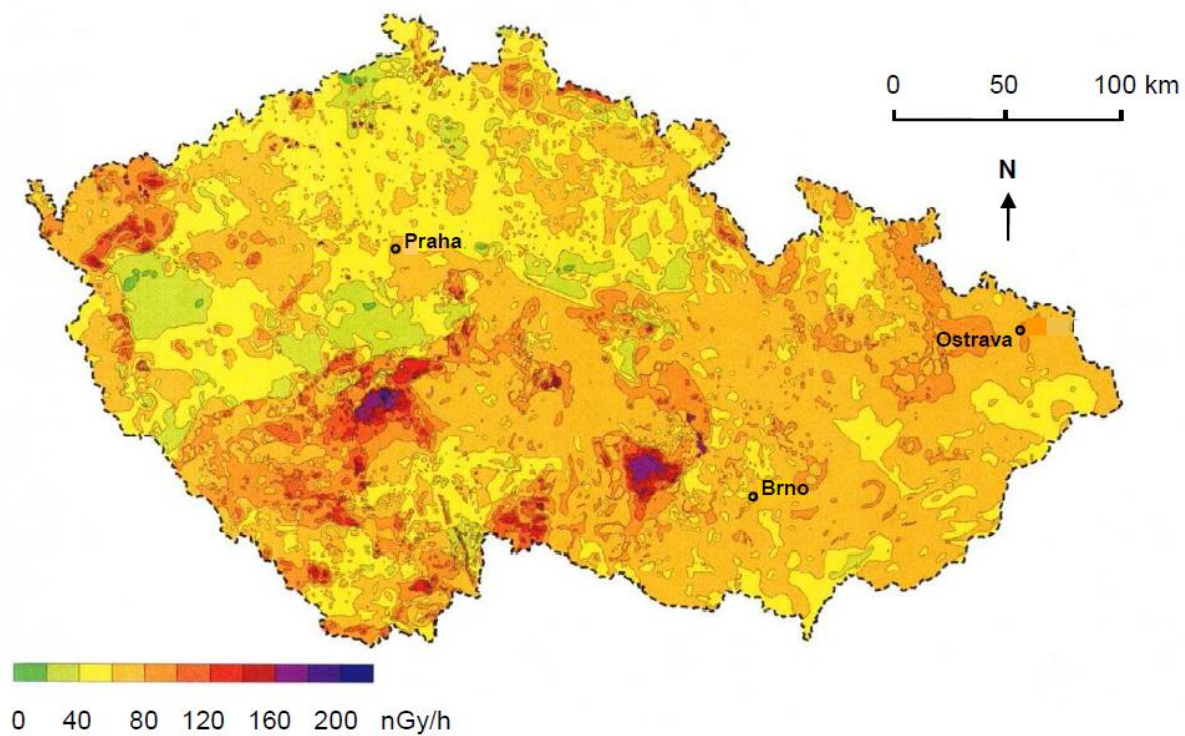
## 7. Radiometrická mapa České republiky 1:500 000

Kompletním pokrytí území ČR leteckým radiometrickým měřením a rozsáhlá pozemní radiometrická měření ČSUP a dalších geologických organizací poskytly údaje o radioaktivitě hornin ČR na vysoké úrovni a umožnily konstrukci mapy radioaktivity hornin ČR

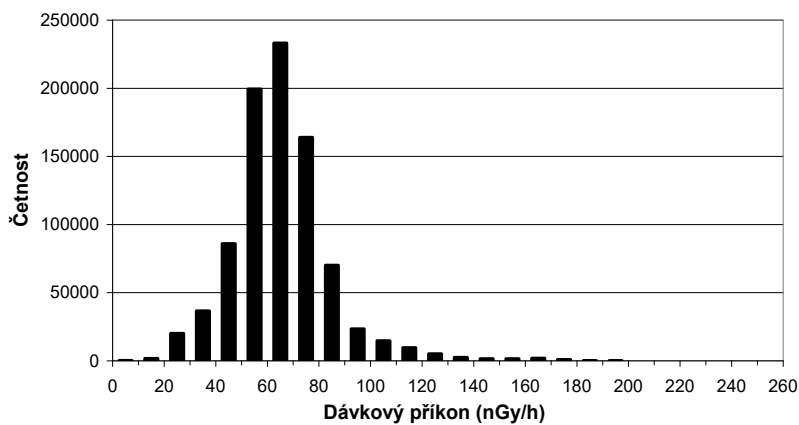
Regionální letecká geofyzikální měření radioaktivity Československa v letech 1957 – 1959 bylo provedeno jednou aparaturou, jedním způsobem kalibrace přístroje a jednotnou metodikou měření a zpracování dat. Vznikl unifikovaný soubor radiometrických dat.

Výsledky byly v roce 1965 zpracovány v Aeroradiometrické mapě 1:200 000 formou map profilů. Vzhledem k použitému způsobu kalibrace leteckého radiometru, vlastnostem použitých detektorů, energiové diskriminaci přístroje a dopadu na výstupní hodnoty expozičního příkonu záření gama byly údaje leteckého měření radioaktivity 1957 – 1959 nově zpracovány za použití postupu zpětné kalibrace (IAEA 1990, IAEA 2003, IAEA 2010). Zpětná kalibrace radiometrických dat je založena na srovnání dat původního souboru s novými spolehlivými údaji. Stodvacetdva regionálních gamaspektrometrických profilů o délce 1 – 5 km, rozmístěných v celém území ČR a situovaných do hornin o nízké, střední a vysoké radioaktivitě, bylo v roce 1994 změřeno kalibrovaným a prověřeným přenosným gama spektrometrem GS-256 a byly stanoveny hodnoty dávkového příkonu záření gama hornin (nGy/h). Regrese digitalizovaných dat leteckého měření 1957 – 1959 a pozemní gama spektrometrie 1994, s koeficientem korelace 0,933, určila převodní vztah pro data původního leteckého měření na hodnoty dávkového příkonu terestrického záření gama. Radiometrická mapa České republiky 1:500 000 byla vydána Českou geologickou službou v roce 1995 (Manová, Matolín 1995).

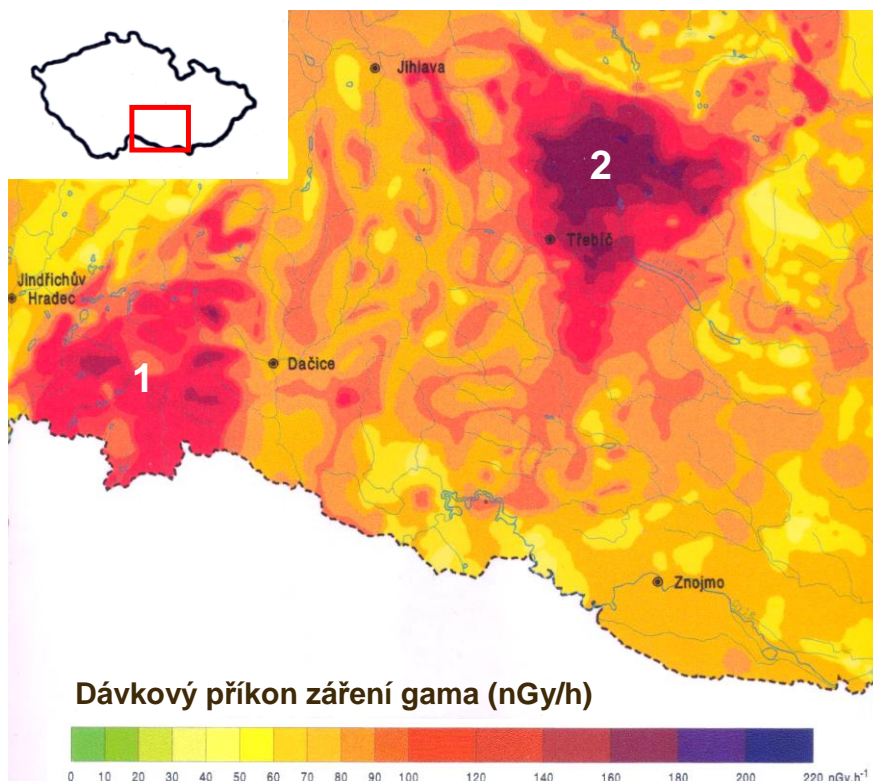
Zjednodušený obraz mapy dávkového příkonu záření gama hornin České republiky je uveden na obr. 2. Rozsah dávkového příkonu gama záření magmatických sedimentárních a metamorfovaných hornin České republiky je v mezích 6 – 245 nGy/h s aritmetickým průměrem  $65,6 \pm 19,0$  nGy/h. Rozdělení hodnot dávkového příkonu je asymetrické (obr. 3) s intervalem nejčastějších údajů (90 %) s hodnotami 31 – 88 nGy/h. Srovnání uvedených údajů radiometrické mapy ČR s odhadem globální střední hodnoty dávkového příkonu hornin 54 nGy/h (UNSCEAR, 2008) ukazuje na zvýšenou radioaktivitu hornin v České republice. Podobnou regionální radioaktivitu hornin jako ČR vykazuje Francie, Finsko a Švédsko, o třetinu nižší průměrné hodnoty uvádí Spojené království, Polsko a Rakousko. Typické koncentrace K, U a Th v regionálních geologických tělesech ČR uvádí Tab. 5.



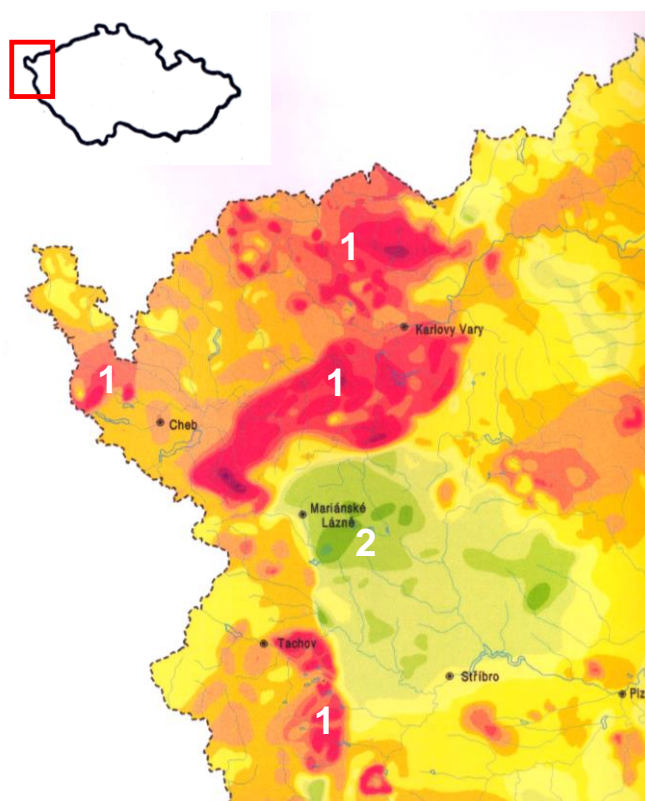
Obr. 2 Radiometrická mapa České republiky – mapa dávkového příkonu terestrického gama záření. (Manová, Matolín 1995, zjednodušeno)



Obr. 3 Histogram četností hodnot dávkového příkonu záření gama hornin v České republice



Obr. 4 Radioaktivita granitoidů centrálního masívu (1) a durbachitů třebíčského syenitového masívu (2)



Obr. 5 Radioaktivita variských granitoidů v západních Čechách (1) a hornin mariánskolázeňského metabazitového masívu (2)

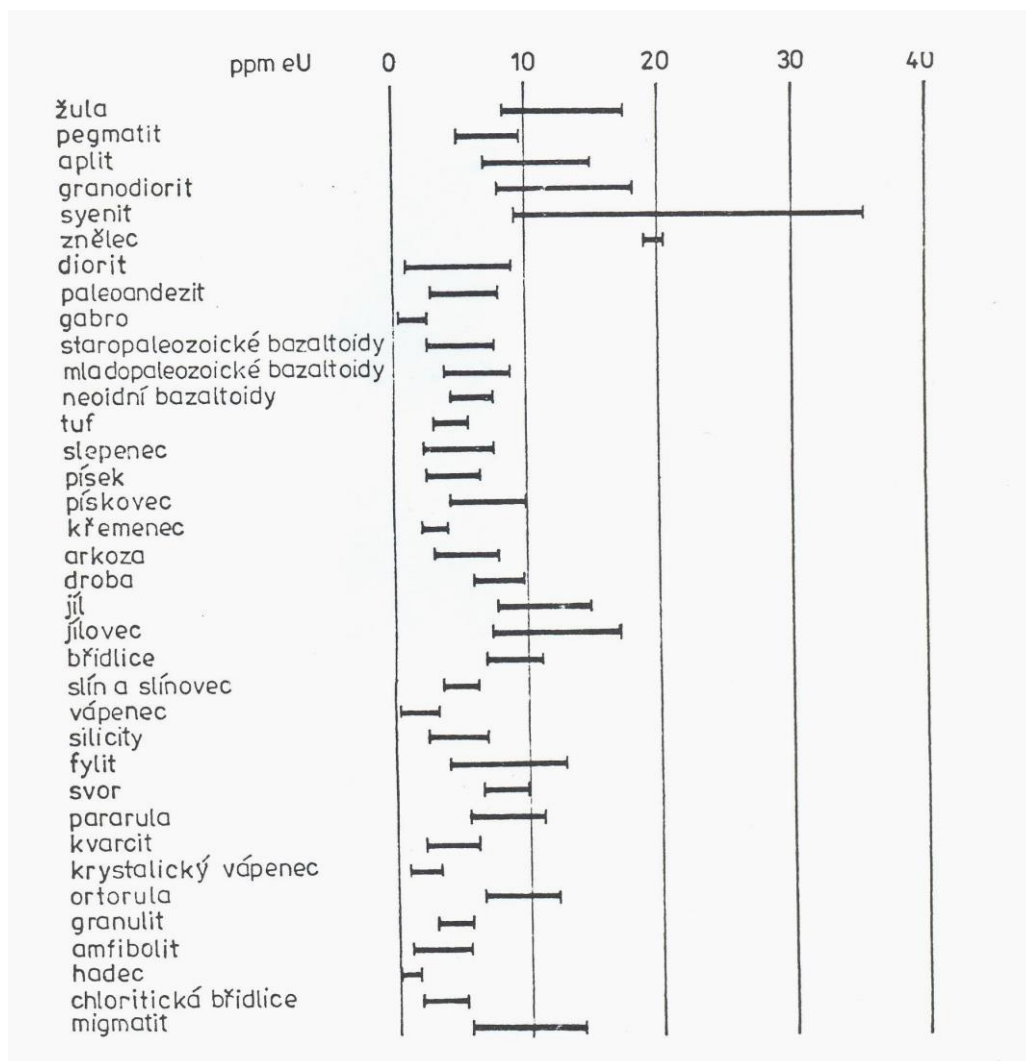
Tabulka 5 Typické hodnoty koncentrace přírodních radionuklidů K, U a Th v horninách a hodnot dávkového příkonu terestrického záření  $D_a$  v České republice.

lokality	hornina	K	U	Th	$D_a$
		% K	ppm eU	ppm eTh	nGy/h
Adršpach	pískovce	0,1	0,6	2,1	9,9
Krucemburk	pískovce	0,9	1,8	4,2	33,0
Příbram	břidlice, droby	1,0	2,4	5,2	40,0
Dol. Rožínka	pararuly	1,7	3,5	8,7	63,9
Radostín n. Osl.	pararuly	2,0	3,3	7,6	64,0
Říp	alkalický čedič	1,2	3,4	13,6	68,9
Příbram	granodiorit	2,0	3,4	13,0	78,5
Budišov	durbachit	3,2	5,9	24,0	135,2
Bezděz	znělec	5,1	8,6	32,0	195,3
Teplice - Cínovec	ryolit	4,7	12,0	41,0	231,6

**Radiometrická mapa České republiky 1:500 000** (obr. 2) zobrazuje pole dávkového příkonu terestrického záření gama, na kterém se podílí v horninách přítomný draslík, uran a thorium hodnotami stejného řádu. Nejvyšší radioaktivita v ČR odpovídá durbachitům, granitům a syenitům, nejnižší hodnoty podmiňují kvarcitické pískovce, hadce a vápence. Radiometrická mapa ČR 1:500 000 (obr. 2) ukazuje zvýšenou radioaktivitu granitoidů střeďočeského plutonu, granitoidů borského masívu a pně Sedmihoří kladrubského masívu, žul karlovarského masívu a slavkovského krystalinika, granitoidů smrčinského masívu, metamorfítů oblasti Jáchymova, teplického ryolitu, liberecké žuly, granitů krkonošsko-jizerského masívu, krystalinika Orlických hor, žulovského masívu, durbachitů v šiším okolí Písku a v Pošumaví, durbachitů třeblčského masívu a menších těles v okolí Nového města na Moravě, granitoidů centrálního masívu v severním výběžku u Melechova a v jižní části u Číměře a Landštejna na hranici s Rakouskem. Velmi nízké hodnoty radioaktivity vykazují druhohorní pískovce Děčínských stěn, teplicko-adršpašských skal, rozlehlý areál mariánskolázeňského metabazitového masívu, kvarcitických hornin středních Čech v Brdech, gaber kdyňského masívu a vátých písků u Hodonína. Četná geologická tělesa se zvýšenou radioaktivitou hornin jsou předmětem hodnocení při těžbě stavebních surovin a indikací zvýšené pozornosti při stanovení radonového indexu stavebních pozemků. Systematický popis radioaktivity regionálních geologických celků v České republice uvádí publikace (Matolín 1970, Matolín 1976).

Charakteristika radioaktivity hornin Českého masívu stanovená laboratorním měřením úhrnné gama aktivity 6266 horninových vzorků, vyjádřená v ekvivalentní koncentraci uranu (ppm eU), podává přehled o radioaktivitě jednotlivých druhů hornin (obr. 6).





Obr. 6 Ra\dioaktivita hornin Českého masívu podle výsledků laboratorního měření horninových vzorků

## 8. Mapa radonového indexu pozemků ČR

Přítomnost radonu ( $^{222}\text{Rn}$ ) v půdním vzduchu je zčásti obrazem radioaktivity hornin. Radon vzniká v přeměnové řadě  $^{238}\text{U}$  a je nepřímým indikátorem přítomnosti U v horninách a fyzikálních vlastností horninového prostředí. Objemová aktivita radonu v půdním vzduchu je v České republice nejčastěji v hodnotách 0 – 100 kBq/m<sup>3</sup>, zvýšené objemové aktivity radonu v půdním vzduchu dosahují hodnot stovek kBq/m<sup>3</sup>. Radonový index pozemku je kombinací objemové aktivity radonu v půdním vzduchu a plynopropustnosti zemin. Česká geologická služba (ČGS) v minulých letech sestavila a v letech 2008 – 2011 aktualizovala mapy radonového indexu pozemků v měřítku 1:50 000. Základem mapy jsou vektorizované kontury geologických jednotek, které jsou barevně plošně označeny podle převládající kategorie radonového indexu na základě statistického zpracování 9100 ploch terénního měření radonu v půdním vzduchu a stanovení plynopropustnosti zemin. V mapách jsou použity 3 kategorie radonového indexu – nízký (žlutá), střední (hnědá) a vysoký (červená). Na vrstvu s informací o půdním radonu je připojena rastrová topografie, pozice ploch měření a legenda. Moderní interaktivní mapa ČGS umožňuje získání údajů o předcházejících měření radonu, přítomných horninách podle litologie a dalších geologických údajů. Mapa radonového indexu pozemků 1:50 000 je dostupná na mapovém serveru České geologické služby ([www.geology.cz](http://www.geology.cz)).

## 9. Radioaktivita hornin a radiační ochrana

Horniny jsou podstatným zdrojem radioaktivity přírodního prostředí a absorbovaných dávek záření v životním prostředí. Přírozené radionuklidy v horninách, draslík, uran a produkty jeho přeměny a thorium a produkty jeho přeměny emitují záření alfa, beta a gama. Uran generuje radioaktivní plyn radon, nejvýznamnější zdroj ozáření populace a thorium generuje radioaktivní plyn thoron. Horniny jsou stavebním materiálem pro budovy, ve kterých obyvatelstvo tráví přibližně 80 % svého času. Stanovení a znalost radioaktivity hornin významně přispívá k hodnocení radiace v životním prostředí a omezení radiace v podmínkách kde je to žádoucí.

Legislativa České republiky vymezuje radiační ochranu obyvatelstva. Jsou to zejména zákon č. 263/2016 Sb.(atomový zákon), vyhláška č. 422/2016 Sb. a vyhláška č. 409/2016 Sb. Ve vztahu k horninám a jejich radioaktivitě jsou vymezeny čtyři oblasti studia a následných opatření, která expozice populace regulují.

Stanovení radonového indexu pozemku (§ 98 zákona) je zaměřeno na omezení pronikání radonu z geologického podloží do obytných a pobytových budov. Radonový index pozemku, kombinace stanovované objemové aktivity radonu v půdním vzduchu a plynopropustnosti zemín, je parametrem určujícím potřebnou stavební a technickou ochranu před vysokými objemovými aktivity radonu v budovách.

Měření a hodnocení přírodního ozáření osob v pobytových prostorách staveb (§ 99 zákona) stanovuje hodnoty objemové aktivity radonu a příkon prostorového dávkového ekvivalentu v obytných prostorách budov. Zdrojem radonu jsou podložní horniny a exhalace radonu ze stavebních materiálů, zdrojem záření gama jsou stavební materiály.

Radioaktivita vod je dána obsahem přírodních radionuklidů, které se do vod z hornin uvolňují. Stanovení radioaktivity vod (§ 100 zákona) vymezuje základní a další radionuklidy, jejichž obsahy se v pitné a balené vodě určují a metody posouzení radioaktivity vod. Vyhláška č. 422/2016 Sb. vymezuje vyšetřovací úrovně, referenční úrovně a nejvyšší přípustné hodnoty radioaktivity pro pitnou vodu.

Stavební materiály jsou v převažujícím podílu horniny. Ochrana před přírodními radionuklidy ve stavebním materiálu (§ 101 zákona) vymezuje postup posouzení přípustnosti obsahů přírodních radionuklidů K, Ra a Th ve stavebních materiálech stanovením „Indexu hmotnostní aktivity“ s přípustnou hodnotou indexu do hodnoty jedna. Příloha č. 28 vyhlášky č. 422/2016 Sb. jmenuje horniny těžené v České republice podléhající stanovení Indexu hmotnostní aktivity.

## Referenční literatura

ČSÚP (1975): 30 let československého uranového průmyslu. SNTL, Praha.

ČSÚP (1984): Československá ložiska uranu. SNTL, Praha

Dahlkamp, F. (1993): Uranium Ore deposits. Springer-Verlag, Berlin.

DIAMO (2016): Sedmdesát let uranového průmyslu. DIAMO, s.p.

IAEA (1987): Preparation and Certification of IAEA Gamma-ray Spectrometry Reference Materials RGU-1, RGTh-1 and RGK-1. Report - IAEA/RL/148. IAEA, Vienna.

IAEA (1989): Construction and Use of Calibration Facilities for Radiometric Field Equipment. TRS No. 309, IAEA, Vienna.

IAEA (1990): The Use of Gamma Ray Data to Define the Natural Radiation Environment. IAEA-TECDOC-566. IAEA, Vienna.

IAEA (2003): Guidelines for Radioelement Mapping Using Gamma-ray Spectrometry Data. IAEA-TECDOC-1363. IAEA, Vienna.

IAEA, 2010. Radioelement Mapping. IAEA Nuclear Energy Series No. NF-T-1.3. IAEA, Vienna, pp. 1-108.

Manová, M., Matolín, M. (1995): Radiometrická mapa České republiky 1:500 000. ČGS, Praha 1-19.

Matolín, M. (1970): Radioaktivita hornin Českého masívu. Academia, Praha, 1-99.

Matolín, M. (1976): Radioaktivita hornin Západních Karpat. UK Praha, 1-127.

Matolín, M., Šuráň, J. (1989): Characteristics of uranium mineralization in the Bohemian Massif. Paper presented at the IAEA Technical Committee Meeting on „Uranium resources and geology in Europe, Mariánské Lázně, 18.9. – 22.9.1989, 13 p.

UNSCEAR, 2008. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR, New York.

Vyhláška č. 422/2016 Sb. o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje

Vyhláška č. 409/2016 Sb. o činnostech zvláště důležitých z hlediska jaderné bezpečnosti a radiační ochrany, zvláštní odborné způsobilosti a přípravě osoby zajišťující radiační ochranu registranta.

WHO (2009): WHO Handbook on Indoor Radon: a Public Health Perspective. World Health Organization, France