

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH  
ZDRAVOTNĚ SOCIÁLNÍ FAKULTA

**Souvislost obsahu radonu v podloží a v objektech ve středních Čechách**

**Bakalářská práce**

**Autor: Zdeňka Marková, DiS.**

**Vedoucí práce: Ing. Ivana Fojtíková**

16.5.2008

## **Relation between the level of Radon in the underlay and in structures in Central Bohemia**

Radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) is a natural radioactive gas originating from a radioactive transformation of uranium ( $^{238}\text{U}$ ). Radon causes the highest radiation exposure of inhabitants. It penetrates the Earth's surface from the geologic subsoil and cumulates in buildings where it can reach high concentrations. The highest uranium concentrations are usually in eruptive magmatic rocks. More than two thirds of geologic subsoil of the Czech Republic consists of metamorphosed and magmatic rocks. This implies that it is necessary to pay better attention to radon originating from the geologic subsoil penetrating into the objects from there. Building material is also a radon source in resident premises. The regular building material is produced from natural base-material containing natural radio-nuclides, thus uranium with all its radioactive group members. Water is another radon source in the objects participating on the inhabitants' exposure in two ways: by inhaling and ingestion. It is important to realize that the building materials of a natural origin as well as water supplied to the houses also gain a higher volume radon activity from the geologic subsoil. Hence my thesis particularly focuses on the building subsoil.

The aim was to ascertain the relation between the radon content in building residency premises and the subsoil.

To achieve the hypothesis I have performed a secondary analysis of results of the State scheme for searching building with a higher radon occurrence. I had proved the hypothesis determined by comparing the average values having confirmed a major part of it.

My thesis implies that the geologic subsoil is a significant radon source affecting the radon volume activity in the objects, however, a high radon index of the geologic subsoil does not necessarily mean that a high radon volume activity values will be measured in the building situated on the subsoil. It very much depends on the technical condition of the object and the way of its use.

In future the Bachelor thesis could be used as a methodical aid for self administration employees for targeted organization of local schemes to decrease the inhabitants' burden of radon risk.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě - v úpravě vzniklé vypuštěním vyznačených částí archivovaných Zdravotně sociální fakultou elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

V Českých Budějovicích 16.5.2008

Zdeňka Marková

## **Poděkování**

Je mou příjemnou povinností poděkovat paní Ing. Ivaně Fojtíkové za její odborné vedení na této bakalářské práci, za její vstřícnost, trpělivost, ochotu, poskytnuté rady a materiály a v neposlední řadě za věnovaný čas.

## Obsah

Úvod.....	8
<b>1 SOUČASNÝ STAV RADONOVÉ PROBLEMATIKY.....</b>	<b>9</b>
1.1 Radon a jeho dceřiné produkty.....	9
1.2 Základní jednotky a veličiny.....	11
1.3 Zdroje radonu v objektech.....	14
1.3.1 Radon z geologického podloží domu.....	14
1.3.2 Radon ze stavebního materiálu.....	15
1.3.3 Radon z vody.....	17
1.4 Geologické podloží .....	19
1.4.1 Uran v horninových typech.....	19
1.4.2 Geologické podloží středních Čech.....	22
1.4.3 Radonový index pozemku.....	23
1.4.4 Mapy radonového indexu podloží.....	24
1.5 Souvislost radonu v podloží a v objektech.....	26
1.5.1 Mechanismus vstupu radonu z podloží do budov.....	26
1.5.2 Kolísání obsahu radonu ve stavbách.....	27
1.6 Radonový program ČR.....	29
1.7 Měření radonu v budovách.....	31
1.8 Protiradonová opatření.....	34
1.9 Legislativa.....	36
<b>2 CÍLE PRÁCE A HYPOTÉZY.....</b>	<b>38</b>
2.1 Cíl práce.....	38
2.2 Hypotéza.....	38
<b>3 METODIKA.....</b>	<b>39</b>
3.1 Použitá metoda výzkumu.....	39
3.2 Charakteristika výzkumného souboru.....	39

<b>4</b>	<b>VÝSLEDKY.....</b>	<b>41</b>
4.1	Radonový index podloží.....	41
4.2	Stav objektů .....	44
4.2.1	<i>Kontakt místností s podložím.....</i>	44
4.2.2	<i>Místnosti v jednotlivých podlažích.....</i>	46
4.2.3	<i>Stavební materiál místností.....</i>	49
4.2.4	<i>Těsnost oken.....</i>	53
4.2.5	<i>Stáří stavby.....</i>	55
4.2.6	<i>Místnosti v jednotlivých okresech postavené z kamene.....</i>	58
4.3	Způsob užívání objektů.....	65
4.3.1	<i>Větrání místností .....</i>	65
<b>5</b>	<b>DISKUSE.....</b>	<b>67</b>
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>73</b>
<b>7</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>74</b>
<b>8</b>	<b>KLÍČOVÁ SLOVA.....</b>	<b>77</b>
<b>9</b>	<b>PŘÍLOHY.....</b>	<b>78</b>

## Úvod

Nejvyšší radiační ozáření obyvatel způsobuje přírodní radioaktivita a to zejména radon a jeho produkty přeměny.

Mezi země s nejvyšší průměrnou koncentrací radonu na světě patří i Česká republika s průměrnou koncentrací objemové aktivity radonu  $140 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Do atmosféry se radon uvolňuje z geologického podloží, stavebního materiálu a z vody. Ve volném ovzduší se radon rychle rozptyluje a jeho koncentrace je tedy zanedbatelná. Naopak problém nastává v budovách, kde se radon hromadí a může zapříčinit nebezpečné ozáření populace.

Primárním zdrojem radonu v objektech jsou horniny a půdy v podloží. Je podstatné si uvědomit, že stavební materiály přírodního původu i voda dodávaná do domů získávají vyšší objemovou aktivitu radonu též z geologického podloží. Tudíž moje práce směřuje právě k podloží staveb.

Jsou-li radon a jeho rozpadové produkty vdechovány, usazují se v plicích, kde se dále rozpadají a "bombardují" plicní sliznici vysokými rozpadovými energiemi. Důsledkem ozáření plicní sliznice je schopnost radonu a jeho dceřiných produktů vyvolat rakovinu plic, jak bylo prokázáno epidemiologickými studiemi horníků uranových dolů a některými studiemi na skupinách obyvatel.

Asi 15 % všech úmrtí na rakovinu plic způsobuje radon a jeho radioaktivní produkty. Toto nadměrné ozařování obyvatelstva pokládám za zbytečné, zapříčiněné neznalostí jevu a nízkou pozorností občanů, jejichž starost směřuje spíše k jaderné energetice. Proto jsem si vybrala toto téma, abych docílila lepší informovanosti občanů o radonové problematice.



# 1. SOUČASNÝ STAV RADONOVÉ PROBLEMATIKY

## 1.1 Radon a jeho dceřiné produkty

Názvem radon je zpravidla zkráceně označován izotop  $^{222}\text{Rn}$ , který je členem uranové radioaktivní řady. (18)

Dalším izotopem radonu je  $^{220}\text{Rn}$ , který se nazývá thoron podle thoriové přeměnové řady. Posledním izotopem radonu je  $^{219}\text{Rn}$ , který se nazývá podle aktiniové rozpadové řady aktinon. V této práci se nebudu thoronu a aktinonu více věnovat, protože jejich podíl na ozáření obyvatel není významný.

Radon je přírodní radionuklid vznikající rozpadem rádia ( $^{226}\text{Ra}$ ) v podložních horninách. Patří do skupiny inertních plynů, je bez barvy, chuti a zápachu. Radon se rozpouští ve vodě. Jeho rozpustnost se zvyšuje v organických kapalinách a je nepřímo úměrná teplotě. Jeho objemová hmotnost ( $9,73 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) je větší než objemová hmotnost vzduchu ( $1,29 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

Radon je všudypřítomný radionuklid, vznikající samovolnou přeměnou atomů  $^{226}\text{Ra}$ . Při tomto rozpadu dochází k vyzáření částice alfa s kinetickou energií 5,49 MeV náhodným směrem a opačným směrem je emitován atom radonu s kinetickou energií 0,1 MeV. Jeho dolet v pevných látkách dosahuje desítek nanometrů, ve vodě kolem 100 nm. Tento jev se nazývá emanace. Emanace umožňuje uvolnění atomů radonu z pevné složky v půdě nebo stavebním materiálu do systému pórů a trhlin v materiálu, kterými se může snadno dále šířit. Poměr radonu, který z látky unikl a radonu, který v látce zůstal udává emanační koeficient. Ten bývá v rozmezí jednotek až desítek procent. Vysoký emanační koeficient materiálu způsobuje jemná zrnitost, vlhkost materiálu a uložení radia na povrchu zrn. (3, 18)

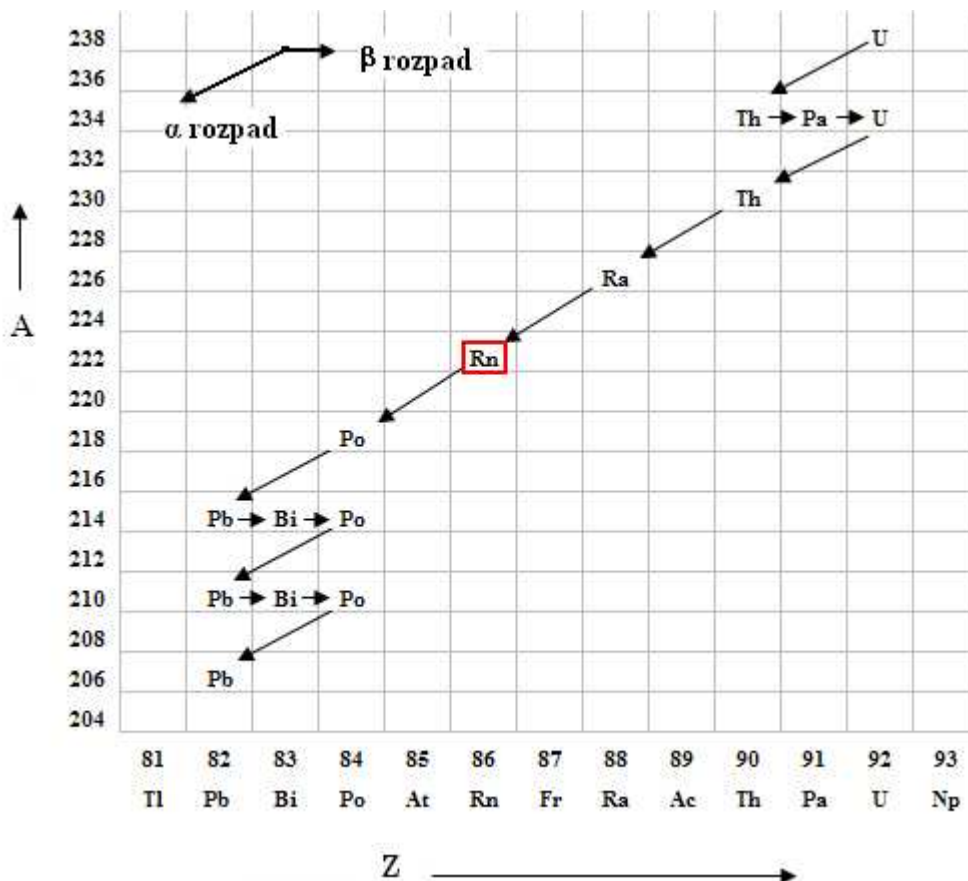
Radon s poločasem rozpadu 3,82 dne se rozpadá na dceřiné produkty (*viz. obrázek 1*). Přeměňuje se na radioaktivní atom polonia ( $^{218}\text{Po}$ ) s poločasem rozpadu 3,05 minuty. Z něj vzniká izotop olova ( $^{214}\text{Pb}$ ), který se s poločasem 26,8 minuty rozpadá na radioaktivní vizmut ( $^{214}\text{Bi}$ ). Ten se dále přeměňuje s poločasem 19,9 minuty na dceřinné polonium ( $^{214}\text{Po}$ ) s poločasem  $1,64\cdot 10^{-4}$  vteřiny. Dalšími přeměnovými

produkty jsou izobary: olovo ( $^{210}\text{Pb}$ ), vizmut ( $^{210}\text{Bi}$ ) a polonium ( $^{210}\text{Po}$ ), s dlouhými poločasy rozpadu, na jejichž konci vzniká stabilní olovo ( $^{206}\text{Pb}$ ).

Z hlediska ozáření obyvatel jsou z dceřiných produktů radonu významné krátkodobé produkty přeměny ( $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  a  $^{214}\text{Po}$ ). Jsou to kovy, které mohou po určitou dobu existovat v atomárním stavu. Převážná část z nich se však rychle naváže na povrch prachových částic a tvoří aerosoly, které se volně pohybují v ovzduší nebo se usazují na předměty. Z tohoto důvodu jsou jejich objemové aktivity ve vzduchu nižší než objemová aktivita radonu. (18)

Dceřinné produkty  $^{226}\text{Ra}$  jsou typické přeměnou  $\alpha$  a přeměnou  $\beta$ . Tyto rozpady vedou do excitovaného stavu dceřinného jádra. Přechod těchto jader do základního stavu doprovází emise fotonů záření  $\gamma$ .

Obrázek 1: Uranová rozpadová řada



A - nukleonové číslo, Z - atomové číslo

## 1.2 Základní jednotky a veličiny

Množství radonu v určitém prostředí lze charakterizovat prostřednictvím četnosti jeho radioaktivních přeměn, ke kterým v něm dochází za jednotku času. Toto množství radonu popisuje veličina **aktivita**, jejíž jednotkou je becquerel [Bq] s rozměrem  $s^{-1}$ . Jednotka byla pojmenována po objeviteli radioaktivity A. H. Becquerelovi. 1 Bq je taková aktivita radioizotopu, kdy se za 1 sekundu rozpadne v průměru jeden atom. Ve starší literatuře se můžeme setkat s dnes již nepřipustnou jednotkou curie [Ci], odvozenou z aktivity jednoho gramu  $^{226}\text{Ra}$ . Přepočítává se dle poměru  $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$ ,  $1 \text{ Bq} = 27 \text{ pCi}$ . (18)

Měrná aktivita je vztažena k jednotce objemu, hmotnosti a plochy. Při měření radonu v půdním vzduchu a v atmosféře se v jednotkách  $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$  (dříve  $\text{pCi} \cdot \text{l}^{-1}$  a WL) uplatňuje veličina **objemová aktivita radonu** (dále OAR). Objemová aktivita radonu např.  $10 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$  tedy znamená, že v  $1 \text{ m}^3$  půdního vzduchu dojde za 1 sekundu k 10 000 radioaktivních přeměn. Objemová aktivita radonu ve vodě bývá v jednotkách  $\text{Bq} \cdot \text{l}^{-1}$ . Aktivitu stavebního materiálu znázorňuje veličina **hmotnostní aktivita**, kterou udáváme v  $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ , obvykle je však aplikována pro  $^{226}\text{Ra}$ .

Při hodnocení obsahu radonu a jeho dceřiných produktů ve vzduchu se kromě objemové aktivity radonu častěji používá veličina **ekvivalentní objemová aktivita radonu** (dále EOAR), která zohledňuje negativní zdravotní účinky produktů přeměny radonu na lidský organizmus. Vyjadřuje se stejně jako objemová aktivita radonu v  $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$  (v minulosti v  $\text{pCi} \cdot \text{l}^{-1}$  a WL).

EOAR se počítá jako součet jednotlivých objemových aktivit krátkodobých dceřiných produktů radonu v reálné směsi těchto atomů v ovzduší, kde  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  jsou objemové aktivity  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ . (18, 33)

$$a_{\text{ekv}} = 0,106 \cdot a_1 + 0,513 \cdot a_2 + 0,381 \cdot a_3$$

Hodnota ekvivalentní objemové aktivity radonu  $a_{\text{ekv}}$  je menší než hodnota objemové aktivity radonu  $a$  z důvodu depozice dceřiných produktů radonu na povrchy různých materiálů v objektech nebo v důsledku jejich odstranění filtrací, větráním atp.

Řada států používá ve své legislativě pouze veličinu objemová aktivita radonu, neboť ekvivalentní objemová aktivita radonu je závislá na přítomnosti aerosolů ve

vzduchu. Avšak v České republice se tato veličina doposud užívá, protože nám vyjadřuje míru efektivní dávky.

**Faktor nerovnováhy**  $F$  ukazuje stupeň porušení radioaktivní rovnováhy mezi radonem a jeho krátkodobými dceřinými produkty v atmosféře poměrem mezi ekvivalentní objemovou aktivitou radonu a objemovou aktivitou radonu: (18)

$$F = a_{\text{ekv}} / a$$

Tento faktor závisí zvláště na množství aerosolu v místnosti, na stáří produktů přeměny radonu a na ventilačním koeficientu.

Můžeme se setkat s dnes již nepoužívanými jednotkami WL (Working Level) a WLM (Working Level Month). Byly zavedeny pro hodnocení ozáření horníků v dolech. 1 WL odpovídá přibližně  $3700 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$  EOAR. WLM zohledňuje pracovní dobu horníků, tj. 170 hodin měsíčně. Je nezbytné si ujasnit, že tyto jednotky se původně používaly u veličiny **koncentrace potenciální (latentní) energie** produktů přeměny radonu. Vyjadřovala se též v  $\text{MeV}\cdot\text{l}^{-1}$ , kde  $1 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$  EOAR se shoduje s  $35 \text{ MeV}\cdot\text{l}^{-1}$  koncentrace potenciální energie. Dnes se používá základní jednotka  $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Koncentrace potenciální energie produktů přeměny radonu je četnost energie alfa částic emitovaných při úplné přeměně všech izotopů krátkodobých dceřiných produktů radonu. Zohledňuje tedy dávku záření obdrženou od krátkodobých produktů přeměny radonu v dýchacích cestách.

Celkové působení ionizujícího záření na látku charakterizuje **dávka**, definovaná jako poměr střední energie předané ionizujícím zářením látky o dané hmotnosti. Základní jednotkou absorbované dávky je gray [Gy] odpovídající  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Je to energie 1 joule absorbovaná v kilogramu látky. Dřívější jednotkou dávky byl rad, který se rovná 0,01 Gy.

Přírůstek dávky za jednotku času se nazývá **dávkový příkon**, který udáváme v  $\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Různé druhy ionizujícího záření mají při stejné dávce různé biologické účinky. Z tohoto důvodu byl zaveden **dávkový ekvivalent**. Dávkový ekvivalent měříme v jednotkách zvaných sievert [Sv], kde 1 Sv se rovná  $1 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

Ve stejných jednotkách nalezneme i veličinu **efektivní dávkový ekvivalent**, která je součtem vážených středních hodnot dávkových ekvivalentů v orgánech a tkáních lidského těla.

### 1.3 Zdroje radonu v objektech

Do ovzduší budov se radon uvolňuje primárně z geologického podloží domu, dále ze stavebního materiálu a z použité vody. V menší míře může být zdrojem radonu venkovní vzduch a použitý zemní plyn.

Obrázek 2: Zdroje radonu v objektech



(23)

*1 – radon z geologického podloží*

*2 – radon z pitné vody*

*3 - radon ze stavebního materiálu*

#### **1.3.1 Radon z geologického podloží domu**

Nejvýznamnějším zdrojem radonu obvykle bývají horniny a půdy pod základy budov. Běžné hodnoty koncentrace radonu v půdním vzduchu v hloubce 1 m pod povrchem země bývají v rozmezí  $1\ 000 - 100\ 000\ \text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ . (5)

Objemová aktivita radonu v půdním vzduchu se mění s místem i časem. Je ovlivňována zejména měrnou aktivitou  $^{226}\text{Ra}$  v mateřské hornině a propustností půdních

vrstev. Čím je základová půda propustnější, tím je větší pohyblivost půdních plynů, a tedy vyšší radonové riziko.

Výměna vzduchu mezi povrchovými vrstvami půdy a atmosférou je závislá na plynopropustnosti povrchových vrstev. Jsou-li dobře propustné, může se radon odvětrávat, a dá se tedy přepokládat jeho nižší koncentrace ve svrchních vrstvách půdy. Naopak pod nepropustnou (např. jílovou) vrstvou se bude radon akumulovat. Přitom musíme vzít v úvahu, že nepropustnost může být pouze sezónní povahy (např. zmrznutí mokré půdy). Čím lépe je objekt izolován vůči podloží, tím vyšší je koncentrace radonu v zemině pod ním.

Na nárůstu objemové aktivity radonu v budově se tudíž podílí: půdní vzduch pod objektem s dostatečnou koncentrací radonu, dobře propustná půdní vrstva pod základy, špatná protiradonová izolace na kontaktní ploše stavby s podložím a podtlak v domě způsobující aktivní nasávání půdního vzduchu (v důsledku difference vnitřních a venkovních teplot).

Protiradonové bariéry mohou obsahovat drobné trhliny, praskliny, ale i úplnou absenci izolační vrstvy, a to je důvod velkého rozpětí naměřených hodnot (10 - 10 000 Bq.m<sup>-3</sup>) v interiérech budov.

Poruchy v izolačních bariérách bývají především u starších stavebních technologií, u nekvalitně provedených izolací, u starých izolačních materiálů a v důsledku otřesů, sedání staveb a jejich nadměrném zatížení. (1, 5)

### ***1.3.2 Radon ze stavebního materiálu***

Druhým významným zdrojem radonu v objektech bývá stavební materiál. Běžný stavební materiál jako je malta, beton, pórobeton, cihly, omítka je vyroben z přírodních surovin (jíl, písek, cement apod.) a obsahuje tedy uran se všemi členy své rozpadové řady stejně jako podloží.

Z hlediska ozáření ze stavebních materiálů se uplatňuje jak zevní ozáření emisí gama, tak inhalace krátkodobých produktů přeměny radonu, uvolňovaného ze stavebního materiálu do pobytových místností. (9)

Ozáření od radonu ze stavebního materiálu závisí v první řadě na měrné aktivitě  $^{226}\text{Ra}$ . Obsah  $^{226}\text{Ra}$  ve stavebních materiálech vyráběných v ČR nebo sem dovážených je většinou v řádu desítek  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  (viz. tabulka 1).

Tabulka 1: Hmotnostní aktivity obsahu  $^{226}\text{Ra}$  ve stavebních materiálech používaných v ČR v období 1998 – 1999

Stavební materiál	Průměrná hodnota [ $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]	Nejvyšší hodnota [ $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]
stavební kámen	27,5	925
cihly	45,2	143
beton	21,1	192
pórobeton	46,1	85
škvárobeton	66,7	118
malty	19,8	82
omítky	13,9	56
keramické obklady	63,0	117
písek	13,3	41
jíl	40,9	199
kamenivo	34,9	1090
popílek, škvára	75,5	363
cement	36,5	88
vápno	12,5	94
sádra	12,1	86

(30)

Vyšší hodnoty vykazují především materiály vyrobené s použitím odpadních surovin (některé strusky, škvára, popílek), odvaly z uranových dolů nebo některé druhy kamene (např. žula). (30)

Vnitřní emanaci a difuzi radonu do místností ovlivňuje struktura materiálu. Materiály nejsou zpravidla používány v původní podobě, ale jsou drceny, mlety a tepelně upravovány, což může vést k většímu uvolňování radonu z povrchu zrn, a tím ze



stavebního materiálu do interiéru budov. Emisi radonu ze stavebního materiálu také ovlivňuje způsob použití materiálu ve stavbě (např. tloušťka stěn). (33)

Hodnocení stavebních materiálů z hlediska emise radonu záleží tedy na hmotnostní aktivitě radia  $a_{226\text{Ra}}$ , na koeficientu emanace  $k_{\text{em}}$  a na hmotnostní rychlosti emise aktivity radonu  $b_{\text{m}}$ . Tyto veličiny spolu souvisí vztahem:

$$b_{\text{m}} = 0,01 \lambda \cdot k_{\text{em}} \cdot a_{226\text{Ra}},$$

kde  $\lambda$  značí přeměnovou konstantu  $^{222}\text{Rn}$ . Koeficient emanace je vyjádřen v procentech. (33)

Efektivní dávku radonu uvolněného ze stavebního materiálu do místnosti je obtížné stanovit. Kromě emise radonu z materiálu závisí na parametrech místnosti, včetně množství a četnosti ventilace. Odhad průměrné efektivní dávky radonu ze stavebního materiálu v ČR dosahuje řádově desetin mSv za rok, což je asi desetkrát méně než ozáření od radonu z podloží.

Radioaktivita stavebních materiálů se v ČR systematicky měří od roku 1998. Pro hodnocení výsledků ozáření z radonu ze stavebního materiálu jsou stanoveny referenční úrovně. K usměrnění tohoto ozáření jsou navrženy optimalizační postupy (viz. dále). (30)

### **1.3.3 Radon z vody**

Dodávaná voda, z níž se radon může uvolňovat do obytných místností při sprchování, mytí, praní a vaření, je třetím možným zdrojem radonu v objektech.

Radon se do vody uvolňuje z horninového podloží procesy, které závisí na fyzikálních, geochemických a hydrologických poměrech. V podzemní vodě je koncentrace radonu vyšší než v povrchové, z důvodu dlouhodobého kontaktu s podložím s vyšším obsahem  $^{222}\text{Rn}$ . (18)

Podzemní voda vykazuje objemovou aktivitu radonu na úrovni objemových aktivit radonu v pórech a dutinách hornin a zemin obvykle v rozmezí 10 – 1 000 Bq.l<sup>-1</sup>. V Jáchymově a jiných místech s lokálními vysokými koncentracemi  $^{226}\text{Ra}$  v horninách dosahují hodnoty objemových aktivit radonu v podzemních vodách 10 000 – 1 000 000 Bq .l<sup>-1</sup>.

V povrchových vodách je obsah radonu zpravidla řádově nižší. Výjimečně je detekována zvýšená koncentrace radonu v tocích, kam ústí důlní voda z dřívější těžby uranových rud nebo kam prosakuje voda z odvalů a úložišť. (14)

Přítomnost radonu ve vodě přispívá k ozáření osob jednak z ingesce radonu s vodou, jednak z inhalace produktů přeměny radonu uvolňovaného do ovzduší při používání vody. Nicméně riziko pití vody se zvýšeným obsahem radonu v porovnání s rizikem z inhalační expozice je zanedbatelné.

Objemová aktivita radonu v ovzduší během spotřeby vody v místnosti prudce vzroste, poté se v bytě postupně rozptýlí a dle intenzity ventilace opět klesne. Krátkodobě může dojít k velkému nárůstu koncentrace radonu. Největší množství radonu uvolněného z vody bývá v koupelnách.

Odhaduje se, že voda o objemové aktivitě radonu  $10 \text{ Bq.l}^{-1}$  způsobuje v průměru zvýšení dlouhodobé průměrné koncentrace radonu ve vzduchu o  $1 \text{ Bq.m}^{-3}$ . (30)

## 1.4 Geologické podloží

Množství radonu v geologickém podloží je závislé na obsahu uranu v horninách. V přírodě je uran relativně častý v nejrůznějších rudách, ale jen v nízkých koncentracích (0,04 - 3 %). Je charakteristický svojí rozptýleností v horninách. Předpokládá se, že v celé zemské kůře je  $4 \cdot 10^{13}$  tun uranu. V geologickém podloží se vyskytují izotopy  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  a  $^{234}\text{U}$ . Nejrozšířenějším izotopem uranu v zemské kůře je  $^{238}\text{U}$ , jehož hmotnostní zastoupení je 99,276 %.  $^{235}\text{U}$  se objevuje v 0,718 % a v nejmenší míře nalezneme  $^{234}\text{U}$ , v pouhých 0,004 %.

V raném stádiu vývoje Země došlo ke gravitační diferenciaci Země, což je pomalý proces rozdělení látek podle hustoty tak, že těžké prvky klesají směrem ke středu Země. Z tohoto důvodu koncentrace uranu s hloubkou roste.

### 1.4.1 Uran v horninových typech

Uran tvoří samostatné minerály, z nichž nejstarší a nejznámější je uraninit (smolincec neboli nasturan), nebo je přítomen v horninových minerálech jako např. biotit, zirkon a apatit. Dále uran nalezneme v jednotlivých typech hornin, kde je jeho obsah velice rozdílný. Typickou horninou obsahující uran je žula (granit), složená především z živce, křemene a slídy, někdy též z amfibolu, pyroxenu, apatitu.

Horniny dělíme podle vzniku na magmatické (vyvřelé), sedimentární (usazené), metamorfované (překrytalizované, přeměněné).

**Magmatické horniny** (syenity, žuly, granodiority a pod.) vznikají krystalizací z magmatu. Dělí se na *hlubinné vyvřeliny* (magma se vlivem své vysoké viskozity není schopno pohybovat a vznikají hlubinná tělesa několik kilometrů pod zemským povrchem), *žilné vyvřeliny* (jsou obrovskými tlaky vtlačovány do puklin, prasklin a elastických částí zemské kůry nedaleko povrchu) a *výlevné horniny* (jsou díky nízké viskozitě dobře pohyblivé a dosáhnou rychle zemského povrchu, kde se rozlévají v podobě lávy). Horniny vzniklé vniknutím magmatu do starších hornin se nazývají migmatity.

**Sedimentární horniny** (pískovce, jílovce) se vyskytují pouze ve svrchní vrstvě zemské kůry. Základními procesy vzniku sedimentárních hornin jsou zvětvávání, transport materiálů, sedimentace a diagenese, která zahrnuje zpevňování sedimentu.

**Metamorfované horniny** (pararuly) nalezneme ve větších hloubkách zemské kůry. Vznikají v důsledku vysokých teplot a tlaků přeměnou z hornin usazených i vyvřelých za odlišných podmínek, než za nichž vznikla hornina původní.

### Radioaktivita horninových typů

*Tabulka 3: Převažující kategorie radonového indexu v hlavních horninových typech na území České republiky*

Horninový typ	Převažující kategorie radonového indexu		
	nízká	střední	vysoká
durbachity a syenity			3
silurské sedimenty			3
granitoidy		2	3
diority		2	3
fonolity		2	3
ortoruly		2	
pararuly		2	
ordovické sedimenty		2	
permské sedimenty		2	
karbonské sedimenty		2	
říční terasy	1	2	
neogenní sedimenty	1	2	
devonské sedimenty	1	2	
paleogenní sedimenty	1		
křídové sedimenty	1		

(3)

**Durbachity a seynity** mají nejvyšší průměrné hodnoty objemové aktivity radonu ze všech horninových typů Českého masívu. Průměrná hodnota objemové aktivity radonu v půdním vzduchu těchto hornin ( $98,7 \text{ kBq.m}^{-3}$ ) je téměř dvojnásobně vyšší než u granitoidních hornin, troj- až čtyřnásobně vyšší než u metamorfovaných hornin a devíti- až desítnásobně vyšší než u sedimentárních hornin. (7)

**Granitoidy** tvoří v Českém masívu plošně rozsáhlá tělesa. Průměrná hodnota objemové aktivity radonu v granitoidních horninách je  $51,9 \text{ kBq.m}^{-3}$ . Obsah radonu v těchto horninách je značně rozdílný pro jednotlivé kraje, což je důsledkem rozdílné geneze mezi jednotlivými typy granitoidů. V kraji středočeském se objevuje průměrná objemová aktivita radonu pro granitoidní horniny  $9,7 \text{ kBq.m}^{-3}$ . (7)

**Diority** jsou průměrnými hodnotami objemové aktivity radonu v půdním vzduchu blízké granitoidům. (7)

**Ortoruly** (k nim jsou řazeny i migmatity) a **pararuly** mají blízké hodnoty objemové aktivity radonu (v průměru  $29,9 \text{ kBq.m}^{-3}$ ). Ortoruly vznikaly metamorfním přepracováním primárních hornin za vyšších teplot a tlaků než pararuly, což vedlo k narušení povrchu minerálních zrn a tím i k zvýšené schopnosti emanování. Primární materiál ortorul byl také bohatší uranem. Pararuly vznikaly obvykle přeměnou sedimentárních hornin s nižším obsahem uranu. Na území českého masívu jsou ortoruly a pararuly řazeny obvykle do 2. kategorie radonového indexu. (7)

**Fonolity** mají průměrnou hodnotu objemové aktivity na úrovni ortorul a pararul. Materiál tufů a tufitů je plošně rozšířenější než primární fonolity. Lokality s výskytem tufů a tufitů byly pro svou vysokou emanační schopnost zařazeny do 2. až 3. kategorie radonového indexu. (7)

**Říční terasy** byly většinou zařazeny do 1. a 2. kategorie radonového indexu. Terasy nemají sice vysokou průměrnou hodnotu objemové aktivity radonu ( $20,6 \text{ kBq.m}^{-3}$ ), avšak vyznačují se vysokým rozptylem hodnot (maximum  $183 \text{ kBq.m}^{-3}$ ). Na objemovou aktivitu radonu má vliv zdrojová oblast. Zrnatostní složení teras je rovněž velmi kolísavé, většina lokalit se však vyznačuje střední až vysokou propustností, což zvyšuje riziko migrace radonu. Říční terasy kromě písčitého a šterkovitého materiálu obsahují i jílovité vložky, které působí jako vertikální bariéra pro

migraci radonu, nevylučují však ani horizontální migraci podél rozhraní. V případě tektonického porušení jílovitých vložek či změn vyvolaných sezónním kolísáním vlhkosti může dojít v profilu terasy k otevření komunikačních prostorů s hlubšími horizonty a ke vzniku lokálních, těžko předvídatelných anomálií radonu. (7)

**Sedimentární horniny** (pískovce, jílovce, břidlice, spraše) se vyznačují ve srovnání s magmatickými a metamorfovanými horninami nízkou průměrnou objemovou aktivitou radonu. Silurské sedimenty (černé břidlice) obvykle obsahují podíl organické hmoty, na kterou se váže uran. Proto se v nich setkáváme s vysokými hodnotami objemové aktivity radonu. Silurské sedimenty zaujímají prostorově omezené území Českého masivu a nepředstavují proto z plošného hlediska významné riziko. Permské sedimenty mají obvykle střední hodnoty objemové aktivity radonu, protože koncentrace uranu je v nich mírně zvýšena přítomností jílovité komponenty ve které jsou vázány slídy. Pro mladší sedimenty, jako jsou např. křídové pískovce nebo paleogenní a neogenní písky, pískovce a jílovce jsou typické nižší hodnoty objemové aktivity. (7)

#### ***1.4.2 Geologické podloží středních Čech***

Převážná část území České republiky náleží ke geologicky stabilnímu útvaru - Českému masivu, vyzdviženému hercynským vrásněním v období devonu a karbonu (v prvohorách). Základ Českého masivu tvoří převážně hlubinné vyvřeliny (žuly).

Geologickou stavbu ČR tvoří ze dvou třetin metamorfované horniny krystalinika (např. ortoruly). Velké plošné zastoupení mají i vyvřelé horniny (granity, diority, syenity). Dalším typem hornin s velkým plošným rozsahem jsou pískovce, které protože jsou dobrým transportním prostředím pro vodu a plyny, mohou také sloužit jako přirozené zásobárny radonu. Schéma geologických jednotek na území České republiky znázorňuje obrázek (viz. 9 Přílohy, příloha 1).

Ve středočeském kraji patří mezi území s nejvyšším radonovým rizikem durbachity a některé granitoidy středočeského plutonu, ze silurských sedimentů liteňské černé břidlice a říční terasy Vltavy a Labe mezi Prahou a Horními Počaply. V místech kontaktu středočeského plutonu s okolními útvary (především v oblasti příbramského rudného pole) lze očekávat kontrastní anomálie, v důsledku lokální redistribuce uranu.

Kontaminované plochy nalezneme ve středočeském plutonu z odvalů uranových dolů v jejich bezprostředním okolí a z úpravárenské činnosti v okolí Příbrami. V širším okolí Příbrami došlo i ke kontaminaci vlivem nekontrolovaného použití odvalových materiálů a úpravárenských odpadů při technických stavbách. (2, 7)

### **1.4.3 Radonový index pozemku**

Stanovení radonového indexu pozemku vychází z posouzení hodnot objemové aktivity radonu v půdním vzduchu a z posouzení plynupropustnosti podloží.

Objemová aktivita radonu v půdním vzduchu se stanovuje přímým měřením vzorků půdního vzduchu. Pomocí tenkých odběrových tyčí a velkoobjemových injekčních stříkaček se odebírají vzorky půdního vzduchu z hloubky 0,8 m.

Druhým parametrem stanovení radonového indexu pozemku je plynupropustnost hornin a zemin. Čím je hornina jemnozrnější, tím vzrůstá celkový povrch zrn, z něhož může být radon emanací uvolňován do mezivrstevních prostor a mikrotrhlin v hornině. Odtud radon postupuje směrem k povrchu. Pokud je půda dobře propustná (např. šterkovitá, písčitá), migraci radonu nejsou kladeny překážky a může snadno pronikat do svrchních vrstev podloží a odtud do objektů. Pokud je půda hlinitá až jílovitá, radon se zdržuje v blízkosti svého vzniku. Půdní profil obvykle není homogenní a skládá se z více vrstev s rozdílnou propustností. Pokud je svrchní část půdy nepropustná a hlubší partie jsou propustnější, radon se může pod ní hromadit a migrovat nikoliv směrem k povrchu, ale do stran a uvolňuje se teprve v místech s vyšší propustností svrchního horizontu. (3, 5)

Čím je tedy vyšší objemová aktivita radonu v půdním vzduchu a čím jsou vrstvy zemin propustnější, tím vyšší je pravděpodobnost pronikání významného množství radonu do budovy. Radonový index pozemku všeobecně vyjadřuje radonové riziko daného pozemku. V České republice se používá standardní jednotná metodika pro klasifikaci radonového indexu (viz. *tabulka 2*). Radonový index stavby vychází z radonového indexu pozemku a vyjadřuje míru potřebné stavební ochrany objektu proti pronikání radonu z geologického podloží. (1)

Tabulka 2: Kategorie radonového indexu

Kategorie radonového indexu	Objemová aktivita radonu v půdním vzduchu (kBq.m <sup>-3</sup> ) při propustnosti podloží		
	nízká	střední	vysoká
1. nízká	< 30	< 20	< 10
2. střední	30 - 100	20 - 70	10 - 30
3. vysoká	> 100	> 70	> 30

(3)

### Tektonické poruchy podloží

Dalším jevem ovlivňujícím kategorii radonového indexu je tektonické porušení hornin. Tektonicky oslabené zóny jsou obvykle rozpraskanější a tím propustnější pro migrování radonu. Záleží však na typu deformace a na výplni tektonické struktury. Pokud je výplň tektonické struktury tvořena převážně jílovými minerály s nízkou propustností, projeví se vyšší hodnoty objemové aktivity radonu pouze na okrajích tektonické poruchy. V mylonitizovaných zónách (v zónách s tektonicky rozdrcenými a následně zpevněnými horninami) se může projevit nárůst objemové aktivity radonu v celé šíři deformace, což je způsobeno redistribucí uranových minerálů a zvýšením emanačních schopností tektonicky postižených hornin. Tímto způsobem se vyznačuje celkové zvýšení radonového rizika na regionálních tektonických zlomech v oblasti Českého masívu. Vysoké hodnoty objemové aktivity radonu se vyskytují i v těsné blízkosti zlomových struktur. (3, 5)

Radonový index podloží je tedy závislý na typu a stáří hornin, na jejich plynupropustnosti, pokryvu a četnosti tektonických zlomů.

#### **1.4.4 Mapy radonového indexu podloží**

Česká geologická služba sestavila v období 1999–2005 mapy radonového indexu geologického podloží (viz. 9 Přílohy, příloha 2, 3). Tyto mapy v měřítku 1:50 000 pokrývají celé území České republiky. Jsme tak první zemí v Evropě, která má



státní území pokryto radonovými mapami detailního měřítka, které jsou volně přístupné veřejnosti.

V systému geologických map je každá geologická jednotka charakterizována jednou kategorií radonového indexu na základě převažující kategorie radonového indexu v daném horninovém typu. Jednotlivým kategoriím radonového indexu byly přiřazeny číselné hodnoty: nízkému indexu jednička, střednímu dvojka a vysokému trojka. Problém se ale vyskytuje v okolí vodních toků. Kolem vodotečí dochází k usazování sedimentů pocházejících z vyšších částí toku. Bez ohledu na skutečnou skladbu tohoto sedimentu je těmto nehomogenním sedimentům v geologické mapě 1:50 000 přiřazen přechodný index, který má hodnotu 1,5. (1, 29)

## 1.5 Souvislost radonu v podloží a v objektech

Pronikání radonu z podloží staveb do objektů je dáno objemovou aktivitou radonu v půdním vzduchu, plynopropustností hornin, izolací staveb vůči podloží, tepelnými a tlakovými rozdíly mezi geologickým prostředím a interiérem budov. Pokud objektům chybí konstrukční ochrana proti pronikání radonu, mohou i nízké koncentrace radonu v podloží způsobit nárůst objemové aktivity radonu v budovách. Objemová aktivita radonu v půdním vzduchu se zpravidla pohybuje v řádu jednotek až stovek  $\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ . Ve stavbách bývají hodnoty objemové aktivity radonu od nejnižších koncentrací, v řádu jednotek  $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ , až k extrémně vysokým hodnotám, v řádu desítek  $\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ . Usuzuje se, že v České republice je průměrná efektivní dávka z radonu více než 2 mSv za rok. Nejvyšším hodnotám, které u nás byly v bytech detekovány, odpovídá roční efektivní dávka až 500 mSv. (1, 2, 18)

### 1.5.1 Mechanismus vstupu radonu z podloží do budov

Radon může do objektu vstupovat dvojím způsobem:

1. Proniká **difúzí** skrze podlahy a stěny, které jsou ve styku s podložím domu. Je to pohyb částic vzduchu vyvolaný koncentračním gradientem, který vede k jejich přemísťování z míst vyšší koncentrace do míst nižší koncentrace.
2. Prostupuje **konvekcí** v důsledku přirozeného podtlaku z míst vyššího tlaku do míst s tlakem nižším. Teplejší a řidší vzduch uvnitř objektu stoupá díky komínovému efektu vzhůru a má tendenci pronikat do vyšších podlaží domu. Tím vzniká ve spodních částech objektu podtlak, který je vyrovnáván přísáváním studeného a radonem obohaceného vzduchu trhlinami a prasklinami v neizolované podlaze, spárami mezi zdmi a podlahou, prostupy inženýrských sítí apod. Objekt tak vlastně nasává radon z geologického podloží. Tímto způsobem se dostává do domu většina radonu. (18)

### ***1.5.2 Kolísání objemové aktivity radonu ve stavbách***

Objemová aktivita radonu v interiéru budov není v průběhu času stálá. Okamžitou hodnotu objemové aktivity radonu v určité místnosti ovlivňuje působení dvou jevů: rychlost přísunu radonu [ $\text{Bq}\cdot\text{s}^{-1}$ ] a ventilace [ $\text{s}^{-1}$ ].

Časové proměny objemové aktivity radonu souvisí se způsobem užívání objektu a s klimatickými podmínkami v době měření. Můžeme je rozdělit na variace dlouhodobé a krátkodobé.

Dlouhodobé časové variace odpovídají změně venkovních teplot v průběhu roku, jejichž výsledkem jsou změny ve větrání, v užívání budovy a změny v topném režimu. V zimním období bývají domy více vytápěny, tím dochází ke zvýšení podtlaku v dolní části stavby, a to má za následek zvýšený přísun radonu do objektů, a tudíž i vyšší hodnoty objemové aktivity radonu v interiéru budov. Typické hodnoty rozdílu tlaku mezi vnější atmosférou a vnitřním prostředím objektu se pro průměrný dvoupodlažní rodinný dům vyskytují v rozmezí 2 až 5 Pa. Rozdíl tlaku mezi podložím stavby a interiérem stavby pro průměrný dvoupodlažní rodinný dům bývá kolem 2 Pa. (12)

Krátkodobé časové variace objemové aktivity radonu souvisí s rozdíly denních a nočních teplot v interiéru a exteriéru budovy a užíváním objektu během dne. Maximálních hodnot dosahují objemové aktivity radonu v noci, nejčastěji od půlnoci do čtvrté hodiny ranní. Během dne závisí aktuální objemová aktivita radonu na způsobu užívání dané budovy. (12)

Časové variace objemové aktivity radonu v objektech mohou ovlivnit i povětrnostní podmínky. Vliv větru způsobuje změny tlakových polí v jednotlivých místnostech. Tlaková diference mezi vnitřním prostředím a exteriérem stavby může působením silného nárazového větru dosahovat až 20 Pa.

#### Větrání

Koncentrace radonu v objektu a doba, za kterou se ustálí, jsou nepřímo úměrné intenzitě větrání.

Ventilace objektu představuje celkovou výměnu vzduchu v budově. Tato výměna je charakterizována exfiltrací a infiltrací ovzduší. Exfiltrací odchází vzduch

z místnosti spolu s určitou částí aktivity radonu a jeho produktů přeměny. Infiltrací proudí do místnosti vzduch z podloží stavby nebo z dalších prostorů objektu. (12, 18)

Výměnu vzduchu v budově ovlivňuje vnější a vnitřní teplota, vytápění objektu, výška objektu, vnitřní členění objektu, těsnost obvodového pláště budovy a distribuce netěsností.

## 1.6 Radonový program ČR

Stejně jako v některých jiných zemích je i u nás snaha ozáření obyvatel z radonu regulovat. Dne 31. května 1999 vláda ČR ve svém usnesení č. 538 schválila **radonový program**. Tento program má za cíl omezit výskyt radonu v nových stavbách - preventivní opatření, a snížit ozáření z radonu v stávajících objektech - intervence (zásahy). S těmito cíly samozřejmě souvisí mnoho dílčích úkolů, například zajištění informování veřejnosti, příprava radonových map, vyhledávání budov s vyšším obsahem radonu, vývojová a výzkumná činnost. Radonový program je koordinován Státním úřadem pro jadernou bezpečnost a účastní se jej Státní ústav radiační ochrany v úzké spolupráci s krajskými úřady. Měření radonu se provádí prostřednictvím stopových detektorů (viz. dále), které se umístí do obytných místností budovy na dobu 1 roku. Měření v rozsahu tohoto průzkumu je pro občany bezplatné. Výsledky měření jsou důvěrné, prostřednictvím krajského úřadu je dostává pouze majitel, příp. uživatel budovy. (32)

V rámci **preventivních opatření** program především usiluje, aby v nově stavěných budovách byla koncentrace radonu tak nízká, jak lze rozumně dosáhnout. (15) Dále zajišťuje právní oblast pro regulaci a kontrolu možných zdrojů radonu - atomový zákon a prováděcí předpisy. Program také zabezpečuje kontrolu výrobců a dovozců stavebních materiálů a dodavatelů vody a posuzování radonu z podlží, které je součástí stavebního řízení a tudíž ho zastávají stavební úřady. V preventivních opatřeních nesmíme opomenout zejména zajištění dostatečné informovanosti obyvatelstva.

Program **intervence** ke snížení ozáření z radonu **ve stávajících objektech** je založen na nabídce podpory ze strany státu a svobodném rozhodnutí občanů tuto podporu přijmout. Zásahové úrovně pro provedení protiradonových opatření byly stanoveny vyhláškou SÚJB č. 307/2002 Sb. V praxi probíhají intervence tak, že se systematicky vyhledávají objekty s vyššími koncentracemi radonu. V budovách, kde byly zjištěny hodnoty převyšující zásahové úrovně, pomáhá stát formou státních příspěvků na realizaci ozdravných opatření. Ve státním rozpočtu je každoročně

vyčleněna částka na protiradonová opatření, která může být poskytována občanům prostřednictvím okresních úřadů.

Vyhledávací program je zaměřen na byty v rodinných nebo bytových domech a dětská zařízení. Není určen pro průzkum obsahu radonu na pracovištích. Přednostně se zaměřuje na obce ležící v oblasti převažujícího vysokého radonového rizika (podle geologické prognózní mapy radonového rizika). V těchto obcích je navrhováno proměření všech domů. V obcích rozprostírajících se na středním nebo nízkém riziku se provádí výběrový průzkum budov (asi 10 % budov) s přihlédnutím k místním geologickým specifikům. Zde je účelem ověřit věrohodnost geologické prognózy radonového rizika. Pořadí proměření obcí závisí na dohodě místní samosprávy s krajským úřadem. (32)

Vyhledávací program se obrací především na budovy se špatnou nebo vůbec žádnou izolací proti vlhkosti, nepodsklepenými obytnými místnostmi, stojící na propustných nebo rozpraskaných horninách, na geologickém zlomu a domy zapuštěné do svahu.

Dosud bylo v České republice změřeno více než 100 000 budov. (32)

## 1.7 Měření radonu

### Měření obsahu radonu v budovách

Měření koncentrace radonu v objektech je z důvodu velké variability objemové aktivity radonu (jak v čase, tak v prostoru) celkem obtížným problémem.

Měření okamžité koncentrace radonu je kvůli těmto variacím velmi nespolehlivé, a proto se jako měření první volby nepoužívá.

Metody, které se používají pro měření obsahu radonu v interiérech staveb, můžeme rozdělit do tří kategorií.

První kategorií jsou dlouhodobá integrální měření. Je to roční měření pomocí stopových detektorů. Hodnocení ročních průměrných hodnot zohledňuje kromě krátkodobých variací i změny během jednotlivých ročních období, proto nám poskytuje nejlepší informace pro odhad ozáření osob pobývajících v objektech.

Pokud nelze na výsledky čekat tak dlouho, bývá rozumným kompromisem druhá kategorie, což jsou střednědobá týdenní měření pomocí integrálních detektorů (např. elektretové detektory) nebo kontinuálních monitorů objemové aktivity radonu. Toto měření by mělo probíhat za tzv. konzervativních podmínek, při kterých je omezena ventilace objektu, uplatňuje se teplotní rozdíl interiéru a exteriéru budovy a vypínají se technologie snižující obsah radonu ve stavbě. Výsledné hodnoty nám dávají informace především o pronikání radonu z podloží a o účinnosti protiradonových opatření.

Třetí kategorie zahrnuje široké spektrum speciálních měřících metod a detekčních zařízení včetně stanovení okamžitých hodnot objemové aktivity radonu ve vzorcích vzduchu. Měření okamžité koncentrace radonu bývá metodou druhé volby při zjištění překročení hodnoty zásahové úrovně v objektu. Okamžité měření odhalí jednotlivé zdroje radonu, jejich podíl na celkové bilanci, transport radonu v budově a dává podklady pro návrh protiradonových opatření. (12)

Nejčastější typy detektorů, které se používají při uvedených měřeních:

**Stopové detektory** (viz. obrázek 3) jsou založeny na bázi detekce stop, které vytvoří částice alfa emitované radonem a produkty jeho přeměny po dopadu na speciální materiál. Pokud jsou detektory položeny volně v prostoru, používají se

k měření ekvivalentní objemové aktivity radonu. Při umístění detektorů do difúzních komůrek zanechávají stopy ve speciálním materiálu pouze částice alfa a slouží tedy k měření objemové aktivity radonu. (12)

**Elektretové detektory** (viz. obrázek 3) fungují na principu vybíjení nabitého elektretového disku umístěného v komůrce, do které difúzí vstupuje radon. V komůrce dochází přeměnou radonu k ionizaci vzduchu a vybíjení elektretu. Tyto detektory nám umožňují stanovit průměrné koncentrace radonu z poklesu napětí a doby expozice. (18)

*Obrázek 3: Stopové a elektretové detektory*



*(vlastní fotografie)*

1 – stopové detektory

2 – elektretový disk

3 – elektretové detektory o různých objemech komor

4 – Reader pro elektretové dozimetry



**Kontinuální monitory** se používají ke kontinuálnímu měření objemové aktivity radonu, nebo k měření produktů přeměny radonu v předurčených intervalech. Monitory objemové aktivity radonu pracují na principu difúze radonu do komory. Radon je měřen nepřímo přes své dceřinné produkty, které jsou sbírány v elektrostatickém poli komory na polovodičový Si detektor. Monitory ekvivalentní objemové aktivity radonu jsou založeny na jiném principu. Prosávají vzduch přes filtr, na němž se zachycují produkty přeměny radonu. K jejich detekci slouží polovodičový Si detektor, který je umístěn těsně u filtru. (18)

**Lucasovy komory** měří okamžité hodnoty objemové aktivity radonu ve vzorcích půdního vzduchu a vody. Vnitřní povrch je pokryt scintilačním materiálem ZnS (Ag). Objemová aktivita radonu je stanovena ze scintilací, které vyvolaly částice alfa po dopadu na scintilační materiál uvnitř komůrky. (18)

#### Měření aktivity $^{226}\text{Ra}$ ve stavebním materiálu

Pro měření aktivity  $^{226}\text{Ra}$  se odebírá vzorek stavebního materiálu v množství 1 až 2 kg, drtí se na zrnitost několika mm, případně vysuší a odešle měřící laboratoři. Analýza vzorků se provádí polovodičovou nebo scintilační spektrometrií. Při vyšší měrné aktivitě  $^{226}\text{Ra}$  ve stavebním materiálu se analýza doplňuje o měření emanačního koeficientu. (33)

#### Měření obsahu radonu ve vodě

Stanovení koncentrace radonu ve vodě se provádí odběrem vzorku vody o objemu obvykle několika desetin litru do speciální nádoby a následným změřením v laboratoři. Ve zdroji vody se obsah radonu mění v čase minimálně, proto nám pro analýzu stačí pouze jeden vzorek. Ke stanovení obsahu radonu se nejčastěji používají tyto metody: měření emitovaného záření gama ze vzorku, převedení radonu do Lucasových komor a měření pomocí elektretů. (14)

## 1.8 Protiradonová opatření

Protiradonová opatření se odlišují u staveb nových a u stávajících.

**Protiradonová opatření u nových staveb** jsou zaměřena na ochranu proti radonu z podloží. Vychází z kategorie radonového indexu podloží zjištěného při radonovém průzkumu. Budovy na podloží s nízkým radonovým indexem nevyžadují žádné zvláštní opatření. Pro objekty na podloží se středním radonovým indexem bývá považována za dostatečnou protiradonovou izolaci každá kvalitnější hydroizolace s dlouhou životností. Musí být umístěna po celé ploše kontaktní konstrukce. Nemělo by se opomenout vzduchotěsné provedení prostupů této izolace instalačním vedením. Na podloží s vysokým radonovým indexem by měla být pod objekty protiradonová izolace ve všech konstrukcích v přímém kontaktu s podložím doplněna o odvětrávací drenážní systém nebo o odvětrávanou vzduchovou mezeru. Úlohou drenážního systému a odvětrávané vzduchové mezery je snížení koncentrace radonu pod základovou deskou, nebo vytvoření podtlaku v podloží vzhledem k tlaku v interiéru. Pro zvýšení účinnosti se drenážní systém doporučuje odvětrávat svislým odvětrávajícím potrubím, které vede nad střechu objektu, které může pracovat pasivně, nebo aktivně s pomocí ventilátoru. (18, 32)

**Protiradonová opatření u stávajících staveb** vychází z analýzy zdrojů radonu a cest jeho šíření objektem. Také se musí vzít ohled na celkový stav budovy, těsnost obvodového pláště, systém větrání, poloha místností ve vztahu k podloží atd. Konkrétní opatření proti radonu závisí na tom, je-li zdrojem radonu podloží, stavební materiál nebo voda.

Opatření proti radonu z podloží jsou nejjednodušší, pokud jsou místnosti odděleny od podloží sklepem nebo pokud hodnota objemové aktivity radonu významně nepřevyšuje směrnou hodnotu ( $400 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Většinou stačí utěsnit cesty vstupu radonu do objektu a zvýšit ventilaci vzduchu. V případě, že objemová aktivita radonu významně převyšuje směrnou hodnotu, rozhoduje se v závislosti na stavebně technickém stavu objektu a propustnosti podloží mezi instalací odvětrávání podloží, položením nové protiradonové izolace a nuceným zvýšením výměny vzduchu. (18)

Mezi opatření proti radonu ze stavebního materiálu patří odstranění materiálů o vysoké rychlosti plošné exhalace radonu. Ale odstraňovat lze jen nenosné konstrukce (např. štuky, omítky, příčky, tepelně-izolační násypy podlah ze škvár a popílků). Drobného snížení exhalace radonu lze dosáhnout i použitím elastických nátěrů nebo tapet z PVC. Nevýhodou této metody je však nízká účinnost a malá životnost způsobená velkou náchylností vzduchotěsné povrchové úpravy k perforaci. Za neúčinnější a nejefektivnější metodu je považováno aktivní odvětrání radonu z interiéru budovy.

Opatření proti radonu z vody zahrnuje jeho odstranění z vody ještě před tím, než se přivede do objektu (např. aerační věží). Z ekonomických důvodů k tomu však dochází pouze u větších zdrojů vody pro hromadné zásobování. U individuálních zdrojů vody se používá metoda odvětrávání radonu z místností. Cíleně se větrají místnosti, kde je velká spotřeba vody (koupelny, kuchyně), aby se odtud radon uvolněný z vody zbytečně nešířil do budovy. (14)

## 1.9 Legislativa

Kritéria hodnocení ozáření obyvatel vycházejí ze zákona č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření, ve znění pozdějších předpisů (dále jen atomový zákon), a vyhlášky č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně. Vyhláška stanovuje též tzv. směrné a mezní hodnoty, které jsou rozhodující pro určení radonového rizika a případné přijetí opatření proti radonu. (25, 26)

### Stavby

Směrná hodnota je míra radonového rizika, při jejímž překročení se posuzuje, zda není možné nějakým rozumným způsobem radioaktivitu snížit. Majitel obytného objektu je při překročení povinen přistoupit k ozdravným opatřením (tzv. zásahová úroveň). Směrné hodnoty pro pobytové prostory stávajících budov jsou:

- a)  $400 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$  pro průměrnou objemovou aktivitu radonu ve vnitřním ovzduší pobytové místnosti,
- b)  $1 \text{ }\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$  pro maximální příkon fotonového dávkového ekvivalentu v pobytové místnosti. (27)

Směrná hodnota pro nové budovy slouží k přípravování a provádění opatření proti pronikání radonu z podloží, stavebních materiálů a dodávané vody. Směrné hodnoty jsou:

- c)  $200 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$  pro průměrnou objemovou aktivitu radonu ve vnitřním ovzduší pobytové místnosti,
- d)  $0,5 \text{ }\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$  pro maximální příkon fotonového dávkového ekvivalentu v pobytové místnosti. (27)

Mezní hodnota objemové aktivity radonu ve vnitřním ovzduší pobytové místnosti je hladina rizika, která s sebou nese při překročení naléhavé zahájení ozdravných opatření. Mezní hodnoty pro ozáření z přírodních radionuklidů ve stávajících stavbách s pobytovými místnostmi jsou:

- e)  $4000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$  pro průměrnou objemovou aktivitu radonu ve vnitřním ovzduší pobytové místnosti,

- f)  $10 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$  pro maximální příkon fotonového dávkového ekvivalentu v obytné nebo pobytové místnosti. (27)

#### Stavební materiál

Atomový zákon a vyhláška č. 307/2002 Sb. ukládají výrobcům a dovozcům stavebního materiálu povinnost zabezpečovat systematické měření a hodnocení obsahu  $^{226}\text{Ra}$  ve vytvářených materiálech. K hodnocení výsledků je vymezena směrná hodnota a mezní hodnota.

Pokud je obsah radia vyšší než stanovená mezní hodnota, nesmí být stavební materiál uveden do oběhu. Mezní hodnoty jsou:

- a)  $150 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  pro materiály používané v objektu ve velkém množství (např.cihly, beton),
- b)  $200 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  pro materiály používané ve stavbě v omezeném množství (např. obkladačky),
- c)  $1000 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  pro stavební materiály používané výhradně ve stavbách, kde není pobytový prostor (např.silnice). (27)

Naše předpisy nepožadují měření radia ve svépomocně vyrobeném stavebním materiálu vyráběným pro vlastní potřebu a nestanoví pro ně žádný limit.

#### Voda

Atomový zákon a vyhláška č. 307/2002 Sb. ukládají dodavatelům vody do veřejných vodovodů povinnost zajišťovat 1x za rok systematické měření a hodnocení obsahu radonu ve vodě. Pokud objemová aktivita je vyšší než mezní hodnota  $300 \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ , nesmí být voda dodávána do veřejných vodovodů. Při překročení této hodnoty je třeba snížit obsah radonu ve vodě vhodnou úpravou nebo nahradit zdroj vody. (27)

Pokud je obsah radonu vyšší než směrná hodnota  $50 \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ , posuzuje se, zda by nebylo i v tomto případě výhodné radon z vody odstranit.

Naše předpisy nevyžadují měření radonu v pitné vodě užívané pro individuální zásobování a nestanoví pro ně žádný limit. Pouze jsou doporučena opatření pro případ překročení směrné hodnoty.

## **2 CÍLE PRÁCE A HYPOTÉZY**

### **2.1 Cíl práce**

Cílem práce je zjistit vztah mezi obsahem radonu v obytných prostorách budov a podloží.

### **2.2 Hypotéza**

Zvýšená koncentrace radonu v obytných objektech je ovlivněna zvýšenou koncentrací radonu v podloží, jeho propustností, stavem objektů a způsobem jejich užívání.

### **3 METODIKA**

#### **3.1 Použitá metoda výzkumu**

Jako základní techniku výzkumu jsem použila sekundární analýzu dat. Zdrojem informací byly výsledky Státního programu vyhledávání budov s vyšším výskytem radonu, které mi byly poskytnuty na Státním ústavu radiační ochrany.

Všechna data jsem zpracovala pomocí tabulkového editoru – programu Microsoft Excel.

Pro přiřazení radonového indexu podloží k jednotlivým objektům jsem použila program IS ARGIS. U naměřených hodnot, které mi byly poskytnuty, byly uvedeny souřadnice jednotlivých objektů. Pomocí tohoto programu jsem zanesla souřadnice do prognózní mapy radonového indexu geologického podloží 1:50 000 (6), kde jsem odečetla, na jaké kategorii radonového indexu podloží se jednotlivé objekty nalézají.

K prezentaci výsledků jsem využila statistické tabulky a grafické vyjádření.

Pro ověření stanovené hypotézy jsem použila porovnání průměrných hodnot.

#### **3.2 Charakteristika výzkumného souboru**

Zkoumaný soubor tvořily výsledky měření Státního programu pro vyhledávání budov se zvýšeným radonovým rizikem naměřené ve Středních Čechách. V tomto kraji bylo celkem změřeno 20 906 budov a v nich 50 025 pobytových místností. Pro měření objemové aktivity radonu byly použity stopové detektory, které se umístily do obytných místností budov na dobu jednoho roku.

Pracovala jsem s daty ze všech změřených místností v objektech ve Středních Čechách. U jednotlivých výsledků jsem použila pouze ta data, která byla úplná.

Monitorování radonu bylo více soustředěno na ty části obce, kde se dá podle složení a stavu geologického podloží předpokládat vyšší radonový index. Dalším vodítkem zvýšeného zájmu o měření byl stav konkrétních objektů z hlediska propustnosti základových konstrukcí staveb pro radon.

Z důvodu zkoumání vztahu mezi radonem v podloží a radonem v objektech bylo pro mě toto záměrné vyhledávání rizikových budov výhodné, kvůli získání více informací nejen o objektech na území s nízkým radonovým indexem, kterých je většina, ale i se středním a vysokým.



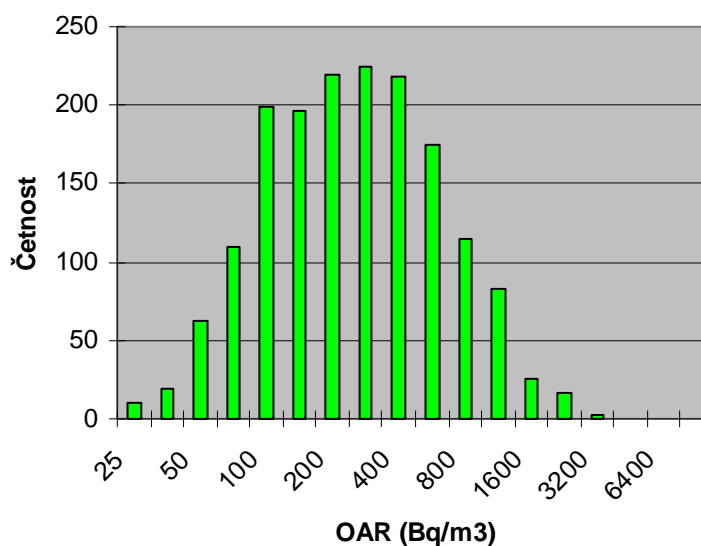
## 4 VÝSLEDKY

### 4.1 Radonový index podloží

Tabulky a grafy 1-4 ukazují naměřené hodnoty OAR v objektech stojících na podloží s různým radonovým indexem a četnost výskytu těchto hodnot ve stanovených třídách.

*Tabulka 1, graf 1: Distribuce hodnot v domech na nízkém radonovém indexu podloží*

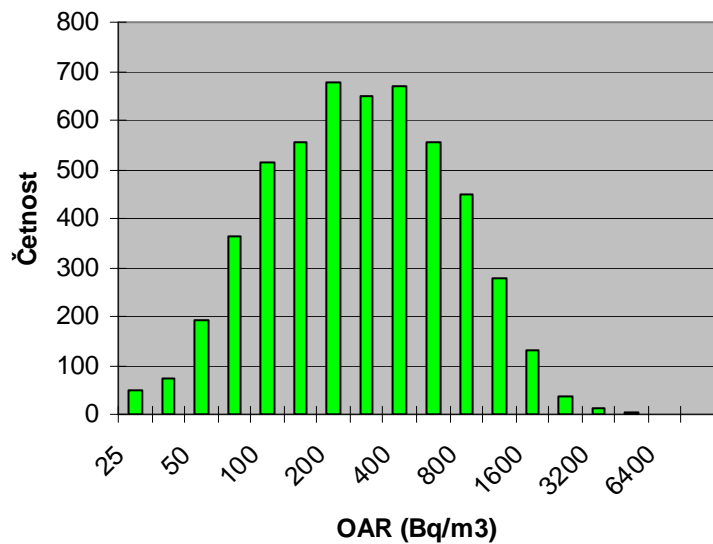
OAR [Bq.m <sup>-3</sup> ]	Četnost
0 - 25	10
26 - 35	19
36 - 50	62
51 - 70	110
71 - 100	199
101 - 140	196
141 - 200	219
201 - 280	225
281 - 400	218
401 - 560	175
561 - 800	115
801 - 1120	83
1121 - 1600	26
1601 - 2240	17
2241 - 3200	3
3201 - 4480	0
4481 - 6400	0



Průměrná hodnota je 312 Bq.m<sup>-3</sup>. Směrodatná odchylka je 320 Bq.m<sup>-3</sup>.

Tabulka 2, graf 2: Distribuce hodnot v objektech na přechodném radonovém indexu podloží

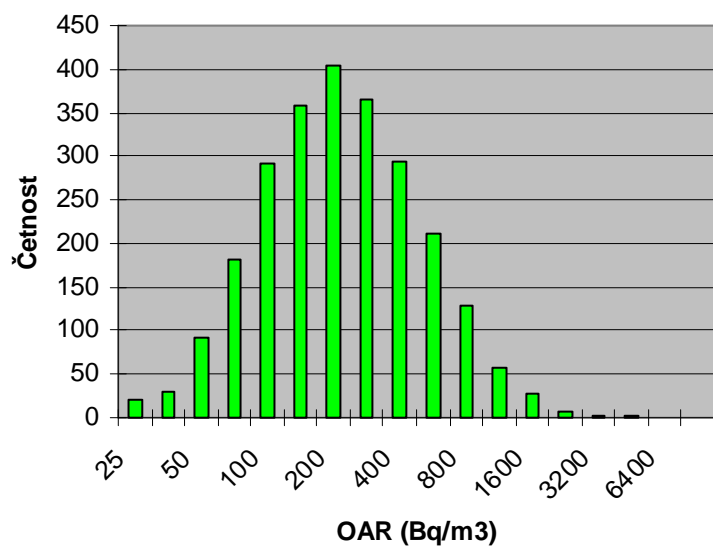
OAR [ $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	Četnost
0 - 25	51
26 - 35	75
36 - 50	193
51 - 70	365
71 - 100	513
101 - 140	554
141 - 200	677
201 - 280	651
281 - 400	669
401 - 560	554
561 - 800	450
801 - 1120	279
1121 - 1600	132
1601 - 2240	38
2241 - 3200	12
3201 - 4480	5
4481 - 6400	1



Průměrná hodnota je  $337 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ . Směrodatná odchylka je  $354 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Tabulka 3, graf 3: Distribuce hodnot na středním radonovém indexu podloží

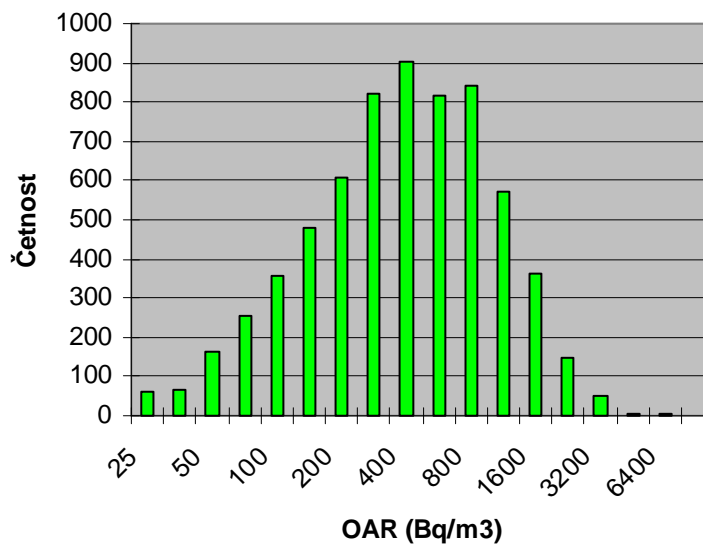
OAR [ $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	Četnost
0 - 25	20
26 - 35	29
36 - 50	92
51 - 70	181
71 - 100	291
101 - 140	358
141 - 200	404
201 - 280	365
281 - 400	293
401 - 560	211
561 - 800	128
801 - 1120	57
1121 - 1600	28
1601 - 2240	8
2241 - 3200	2
3201 - 4480	2
4481 - 6400	0



Průměrná hodnota je  $259 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ . Směrodatná odchylka je  $268 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Tabulka 4, graf 4: Distribuce hodnot v domech na vysokém radonovém indexu podloží

OAR [Bq.m <sup>-3</sup> ]	Četnost
0 - 25	61
26 - 35	68
36 - 50	161
51 - 70	255
71 - 100	357
101 - 140	480
141 - 200	605
201 - 280	821
281 - 400	903
401 - 560	817
561 - 800	842
801 - 1120	573
1121 - 1600	360
1601 - 2240	150
2241 - 3200	50
3201 - 4480	6
4481 - 6400	4



Průměrná hodnota je 487 Bq.m<sup>-3</sup>. Směrodatná odchylka je 576 Bq.m<sup>-3</sup>.

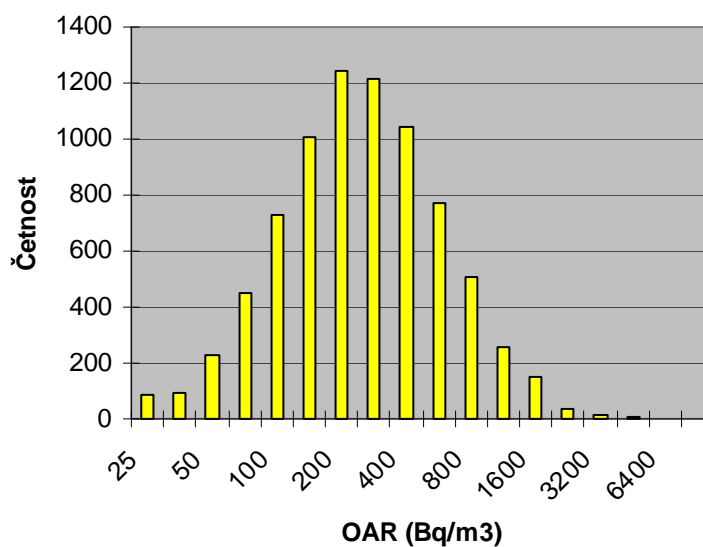
## 4.2 Stav objektů

### 4.2.1 Kontakt místností s podloží

Tabulky a grafy 5, 6 znázorňují naměřené hodnoty OAR v místnostech, které jsou v kontaktu s podloží, a v místnostech, které nejsou v kontaktu s podloží. Dále tabulky a grafy představují četnost výskytu naměřených hodnot v předurčených třídách.

Tabulka 5, graf 5: Distribuce hodnot v místnostech v kontaktu s podloží

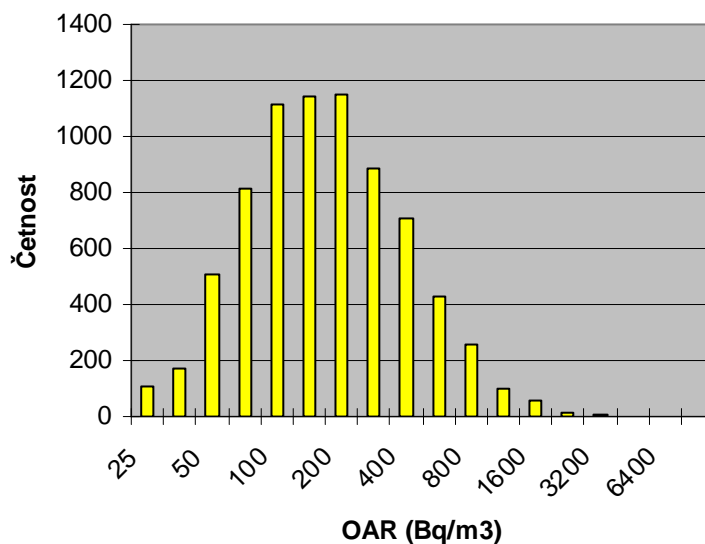
OAR [ $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	Četnost
0 - 25	86
26 - 35	94
36 - 50	231
51 - 70	451
71 - 100	725
101 - 140	1004
141 - 200	1242
201 - 280	1211
281 - 400	1046
401 - 560	768
561 - 800	504
801 - 1120	254
1121 - 1600	147
1601 - 2240	39
2241 - 3200	13
3201 - 4480	4
4481 - 6400	3



Průměrná hodnota je  $301 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ . Směrodatná odchylka je  $340 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Tabulka 6, graf 6: Distribuce hodnot v místnostech, které nejsou v kontaktu s podloží

OAR [Bq.m <sup>-3</sup> ]	Četnost
0 - 25	109
26 - 35	171
36 - 50	510
51 - 70	816
71 - 100	1116
101 - 140	1143
141 - 200	1150
201 - 280	885
281 - 400	710
401 - 560	427
561 - 800	258
801 - 1120	97
1121 - 1600	58
1601 - 2240	14
2241 - 3200	9
3201 - 4480	2
4481 - 6400	0



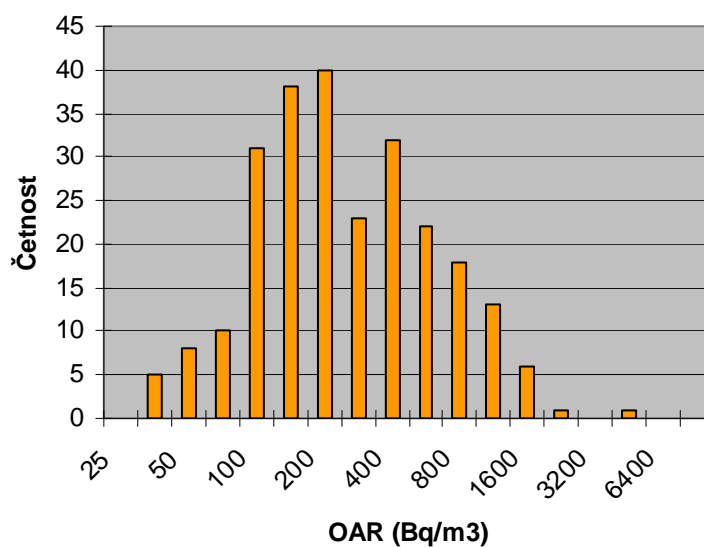
Průměrná hodnota je 207 Bq.m<sup>-3</sup>. Směrodatná odchylka je 232 Bq.m<sup>-3</sup>.

#### 4.2.2 Místnosti v jednotlivých podlažích

V tabulkách a grafech 7 až 11 můžeme vidět naměřené hodnoty OAR v místnostech v konkrétních podlažích budov a četnost jejich výskytu v určených třídách.

Tabulka 7, graf 7: Distribuce hodnot v místnostech nacházejících se v suterénu

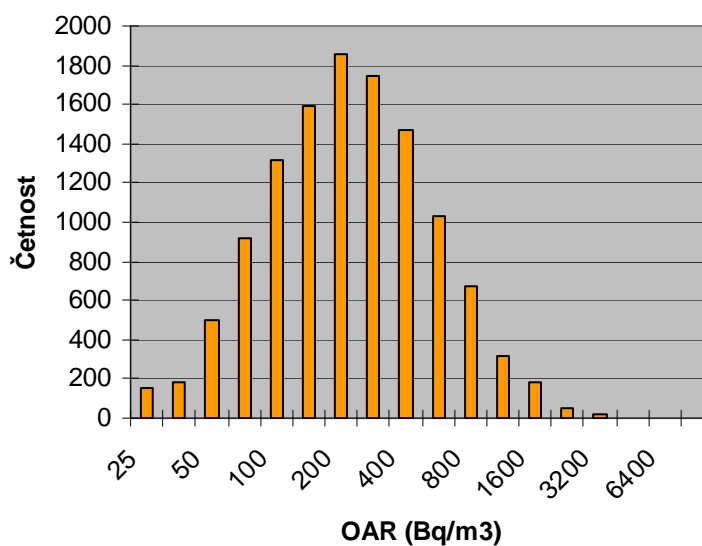
OAR [Bq.m <sup>-3</sup> ]	Četnost
0 - 25	0
26 - 35	5
36 - 50	8
51 - 70	10
71 - 100	31
101 - 140	38
141 - 200	40
201 - 280	23
281 - 400	32
401 - 560	22
561 - 800	18
801 - 1120	13
1121 - 1600	6
1601 - 2240	1
2241 - 3200	0
3201 - 4480	1
4481 - 6400	0



Průměrná hodnota je 318 Bq.m<sup>-3</sup>. Směrodatná odchylka je 373 Bq.m<sup>-3</sup>.

Tabulka 8, graf 8: Distribuce hodnot v místnostech nacházejících se v přízemí

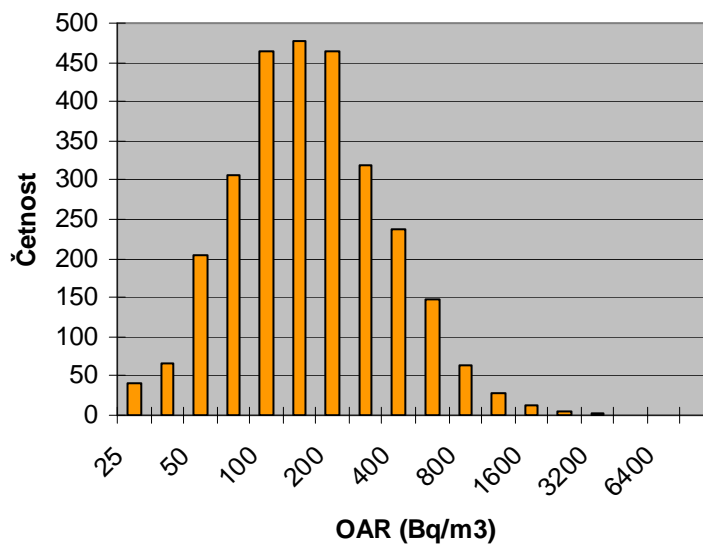
OAR [Bq.m <sup>-3</sup> ]	Četnost
0 - 25	148
26 - 35	181
36 - 50	505
51 - 70	917
71 - 100	1317
101 - 140	1595
141 - 200	1862
201 - 280	1742
281 - 400	1470
401 - 560	1028
561 - 800	678
801 - 1120	318
1121 - 1600	186
1601 - 2240	50
2241 - 3200	23
3201 - 4480	5
4481 - 6400	3



Průměrná hodnota je 273 Bq.m<sup>-3</sup>. Směrodatná odchylka je 316 Bq.m<sup>-3</sup>.

Tabulka 9, graf 9: Distribuce hodnot v místnostech nacházejících se v 1. patře

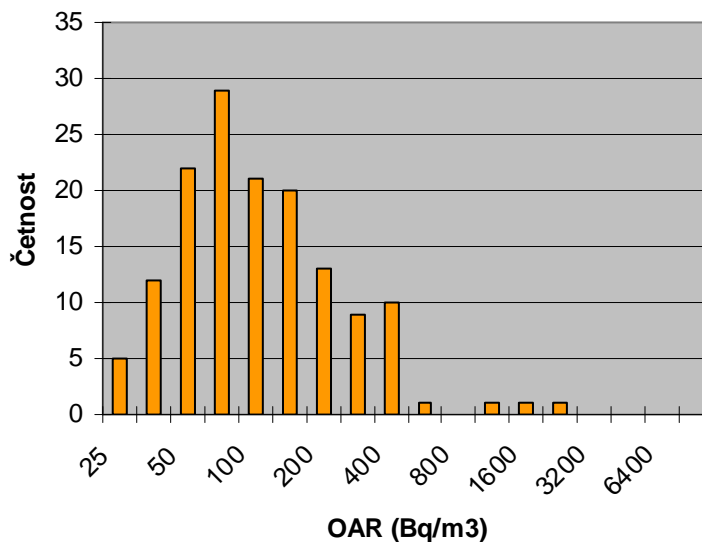
OAR [Bq.m <sup>-3</sup> ]	Četnost
0 - 25	42
26 - 35	67
36 - 50	204
51 - 70	306
71 - 100	465
101 - 140	476
141 - 200	465
201 - 280	320
281 - 400	238
401 - 560	148
561 - 800	64
801 - 1120	27
1121 - 1600	13
1601 - 2240	4
2241 - 3200	2
3201 - 4480	0
4481 - 6400	0



Průměrná hodnota je 185 Bq.m<sup>-3</sup>. Směrodatná odchylka je 192 Bq.m<sup>-3</sup>.

Tabulka 10, graf 10: Distribuce hodnot v místnostech nacházejících ve 2 a vyšším patře

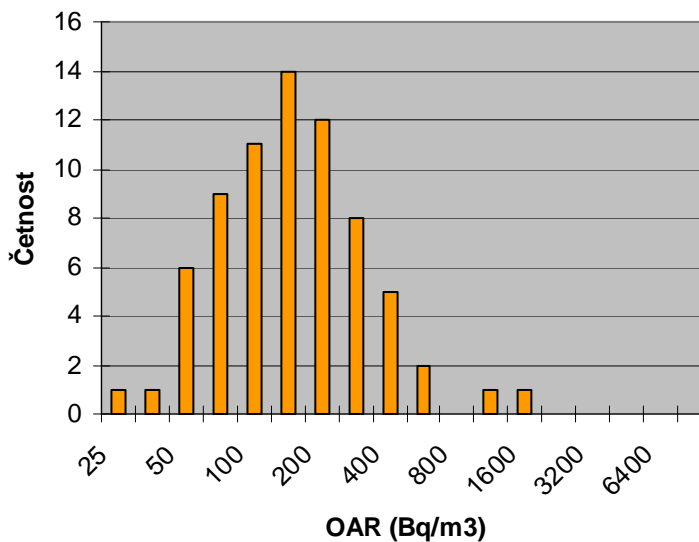
OAR [Bq.m <sup>-3</sup> ]	Četnost
0 - 25	5
26 - 35	12
36 - 50	22
51 - 70	29
71 - 100	21
101 - 140	20
141 - 200	13
201 - 280	9
281 - 400	10
401 - 560	1
561 - 800	0
801 - 1120	1
1121 - 1600	1
1601 - 2240	1
2241 - 3200	0
3201 - 4480	0
4481 - 6400	0



Průměrná hodnota je 135 Bq.m<sup>-3</sup>. Směrodatná odchylka je 212 Bq.m<sup>-3</sup>.

Tabulka 11, graf 11: Distribuce hodnot v místnostech nacházejících se v podkroví

OAR [Bq.m <sup>-3</sup> ]	Četnost
0 - 25	1
26 - 35	1
36 - 50	6
51 - 70	9
71 - 100	11
101 - 140	14
141 - 200	12
201 - 280	8
281 - 400	5
401 - 560	2
561 - 800	0
801 - 1120	1
1121 - 1600	1
1601 - 2240	0
2241 - 3200	0
3201 - 4480	0
4481 - 6400	0



Průměrná hodnota je 142 Bq.m<sup>-3</sup>. Směrodatná odchylka je 183 Bq.m<sup>-3</sup>.

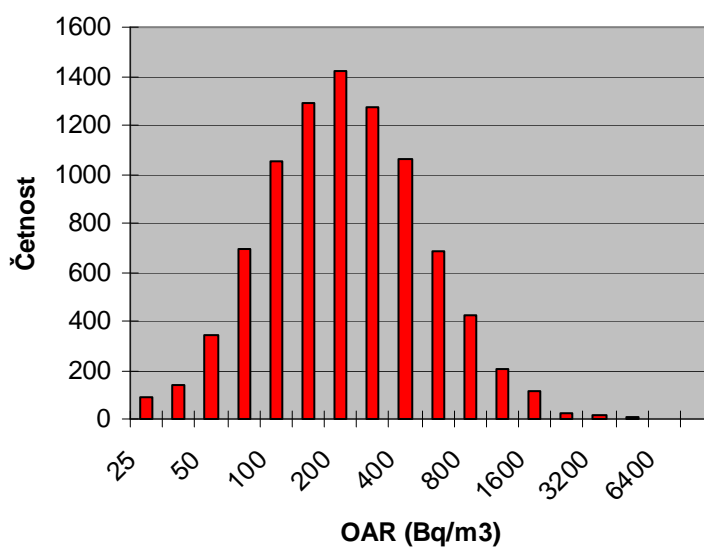


### 4.2.3 Stavební materiál místností

V tabulkách a grafech 12 až 17 pozorujeme různé hodnoty OAR v místnostech s použitým rozdílným stavebním materiálem a četnost jejich výskytu v daných třídách.

Tabulka 12, graf 12: Distribuce hodnot v místnostech, kde je hlavním stavebním materiálem cihla

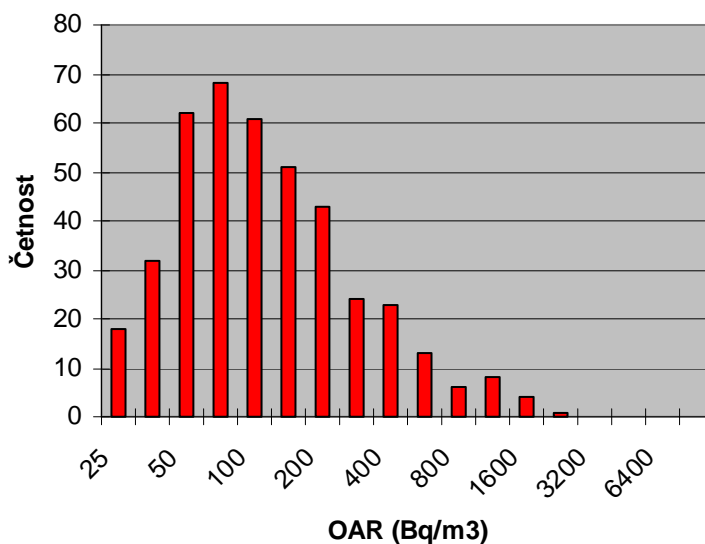
OAR [Bq.m <sup>-3</sup> ]	Četnost
0 - 25	90
26 - 35	141
36 - 50	345
51 - 70	697
71 - 100	1049
101 - 140	1289
141 - 200	1424
201 - 280	1274
281 - 400	1065
401 - 560	684
561 - 800	423
801 - 1120	205
1121 - 1600	115
1601 - 2240	26
2241 - 3200	13
3201 - 4480	5
4481 - 6400	2



Průměrná hodnota je 255 Bq.m<sup>-3</sup>. Směrodatná odchylka je 280 Bq.m<sup>-3</sup>.

Tabulka 13, graf 13: Distribuce hodnot v místnostech, kde je hlavním stavebním materiálem beton

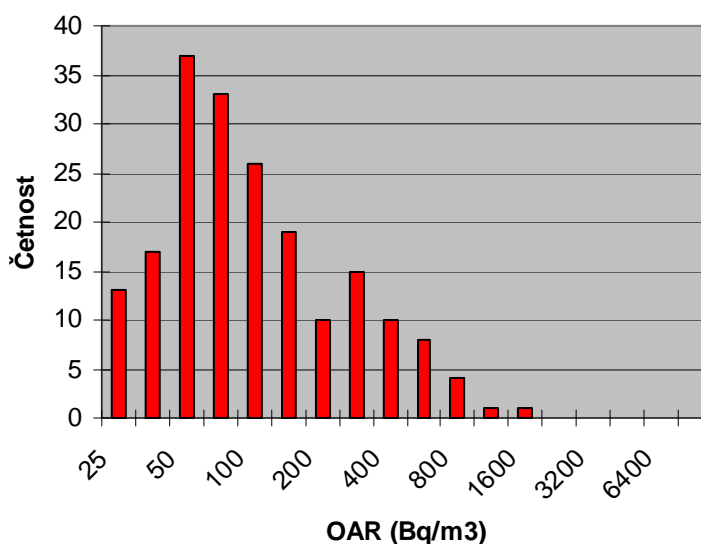
OAR [Bq.m <sup>-3</sup> ]	Četnost
0 - 25	18
26 - 35	32
36 - 50	62
51 - 70	68
71 - 100	61
101 - 140	51
141 - 200	43
201 - 280	24
281 - 400	23
401 - 560	13
561 - 800	6
801 - 1120	8
1121 - 1600	4
1601 - 2240	1
2241 - 3200	0
3201 - 4480	0
4481 - 6400	0



Průměrná hodnota je 156 Bq.m<sup>-3</sup>. Směrodatná odchylka je 219 Bq.m<sup>-3</sup>.

Tabulka 14, graf 14: Distribuce hodnot v místnostech, kde je hlavním stavebním materiálem dřevo

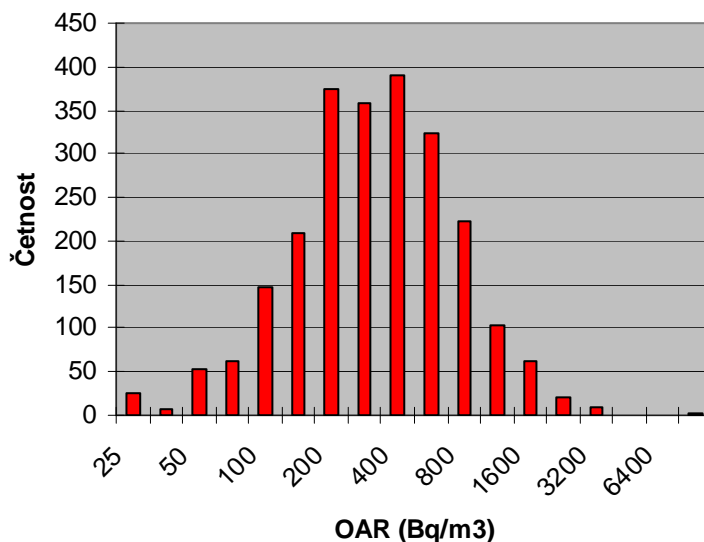
OAR [Bq.m <sup>-3</sup> ]	Četnost
0 - 25	13
26 - 35	17
36 - 50	37
51 - 70	33
71 - 100	26
101 - 140	19
141 - 200	10
201 - 280	15
281 - 400	10
401 - 560	8
561 - 800	4
801 - 1120	1
1121 - 1600	1
1601 - 2240	0
2241 - 3200	0
3201 - 4480	0
4481 - 6400	0



Průměrná hodnota je 132 Bq.m<sup>-3</sup>. Směrodatná odchylka je 163 Bq.m<sup>-3</sup>.

Tabulka 15, graf 15: Distribuce hodnot v místnostech, kde je hlavním stavebním materiálem kámen

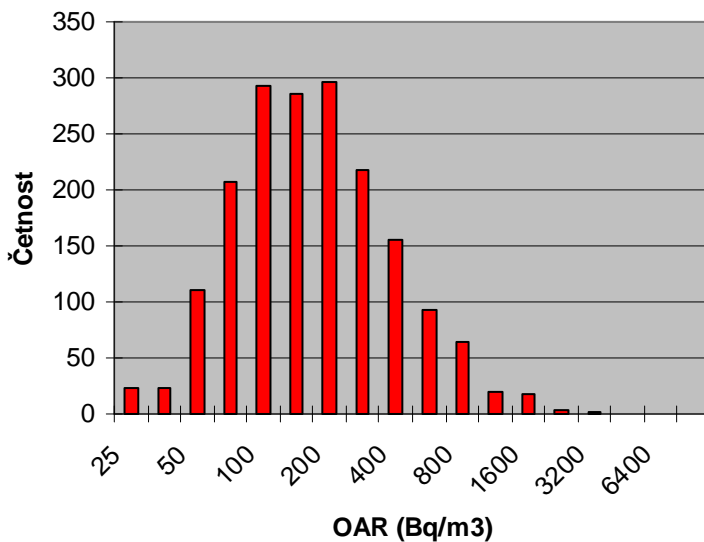
OAR [Bq.m <sup>-3</sup> ]	Četnost
0 - 25	26
26 - 35	7
36 - 50	52
51 - 70	63
71 - 100	146
101 - 140	209
141 - 200	374
201 - 280	359
281 - 400	390
401 - 560	323
561 - 800	223
801 - 1120	104
1121 - 1600	61
1601 - 2240	20
2241 - 3200	10
3201 - 4480	1
4481 - 6400	1



Průměrná hodnota je 376 Bq.m<sup>-3</sup>. Směrodatná odchylka je 428 Bq.m<sup>-3</sup>.

Tabulka 16, graf 16: Distribuce hodnot v místnostech, kde je hlavním stavebním materiálem plynosilikát

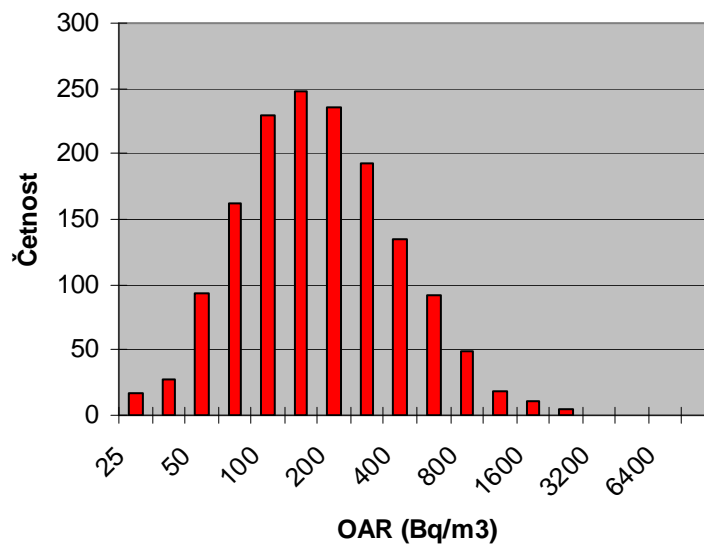
OAR [Bq.m <sup>-3</sup> ]	Četnost
0 - 25	23
26 - 35	23
36 - 50	111
51 - 70	208
71 - 100	292
101 - 140	285
141 - 200	296
201 - 280	218
281 - 400	156
401 - 560	92
561 - 800	64
801 - 1120	19
1121 - 1600	17
1601 - 2240	4
2241 - 3200	1
3201 - 4480	0
4481 - 6400	0



Průměrná hodnota je 203 Bq.m<sup>-3</sup>. Směrodatná odchylka je 220 Bq.m<sup>-3</sup>.

Tabulka 17, graf 17: Distribuce hodnot v místnostech, kde je hlavním stavebním materiálem škvárobeton

OAR [Bq.m <sup>-3</sup> ]	Četnost
0 - 25	17
26 - 35	27
36 - 50	94
51 - 70	163
71 - 100	230
101 - 140	248
141 - 200	236
201 - 280	193
281 - 400	135
401 - 560	92
561 - 800	49
801 - 1120	19
1121 - 1600	11
1601 - 2240	5
2241 - 3200	0
3201 - 4480	0
4481 - 6400	0



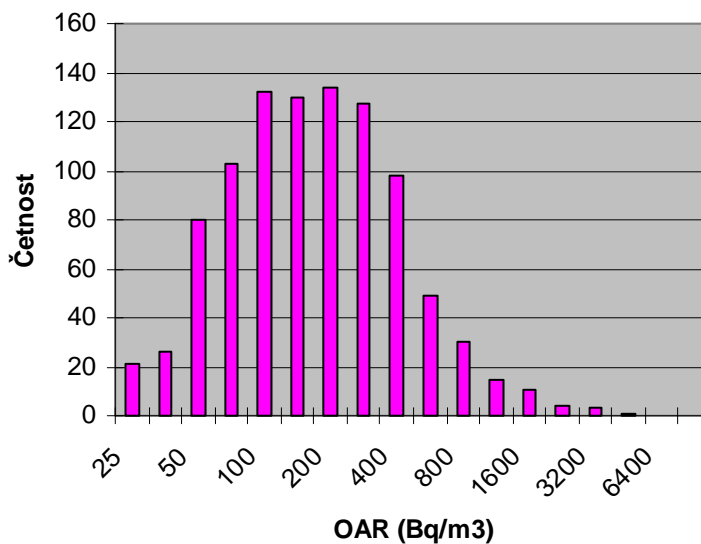
Průměrná hodnota je 205 Bq.m<sup>-3</sup>. Směrodatná odchylka je 211 Bq.m<sup>-3</sup>.

#### 4.2.4 Těsnost oken

Tabulky a grafy 18 až 20 značí naměřené hodnoty OAR v místnostech s různou těsností oken a četnost jejich výskytu v předurčených třídách.

Tabulka 18, graf 18: Distribuce hodnot v místnostech s malou těsností oken

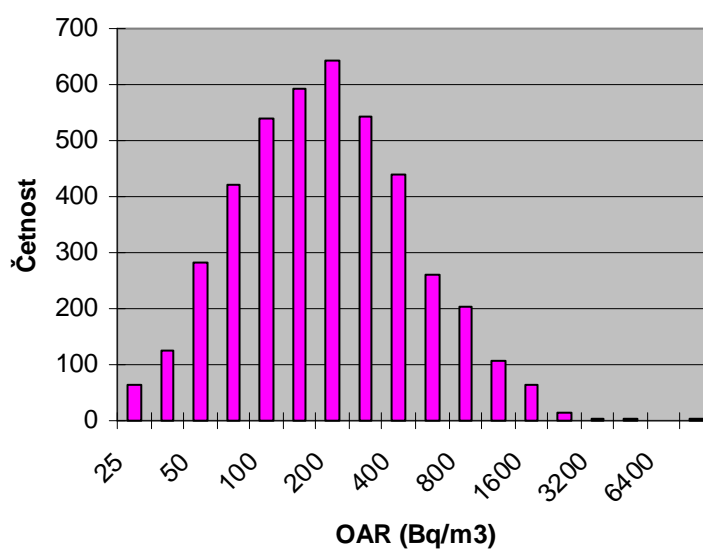
OAR [Bq.m <sup>-3</sup> ]	Četnost
0 - 25	21
26 - 35	26
36 - 50	80
51 - 70	103
71 - 100	132
101 - 140	130
141 - 200	134
201 - 280	127
281 - 400	98
401 - 560	49
561 - 800	30
801 - 1120	15
1121 - 1600	11
1601 - 2240	4
2241 - 3200	3
3201 - 4480	1
4481 - 6400	0



Průměrná hodnota je 223 Bq.m<sup>-3</sup>. Směrodatná odchylka je 299 Bq.m<sup>-3</sup>.

Tabulka 19, graf 19: Distribuce hodnot v místnostech s běžnou těsností oken

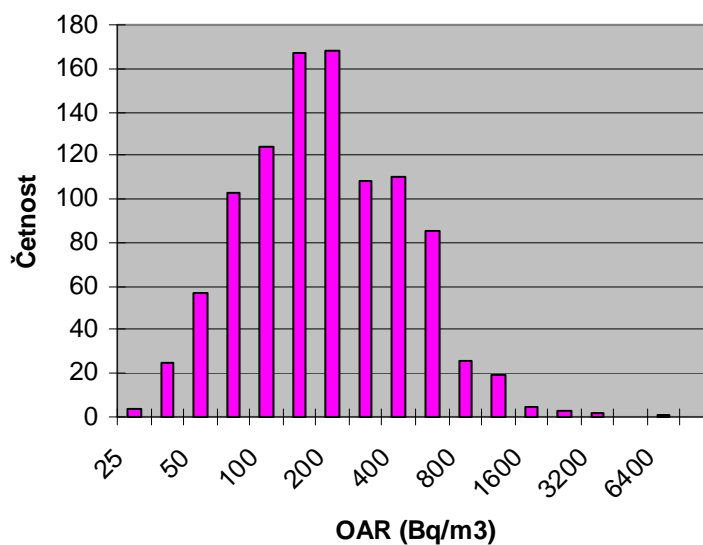
OAR [Bq.m <sup>-3</sup> ]	Četnost
0 - 25	63
26 - 35	126
36 - 50	282
51 - 70	420
71 - 100	539
101 - 140	592
141 - 200	642
201 - 280	544
281 - 400	438
401 - 560	260
561 - 800	205
801 - 1120	108
1121 - 1600	66
1601 - 2240	14
2241 - 3200	4
3201 - 4480	2
4481 - 6400	1



Průměrná hodnota je 244 Bq.m<sup>-3</sup>. Směrodatná odchylka je 335 Bq.m<sup>-3</sup>.

Tabulka 20, graf 20: Distribuce hodnot v místnostech s výbornou těsností oken

OAR [Bq.m <sup>-3</sup> ]	Četnost
0 - 25	4
26 - 35	25
36 - 50	57
51 - 70	103
71 - 100	124
101 - 140	167
141 - 200	168
201 - 280	108
281 - 400	110
401 - 560	85
561 - 800	26
801 - 1120	19
1121 - 1600	5
1601 - 2240	3
2241 - 3200	2
3201 - 4480	0
4481 - 6400	1



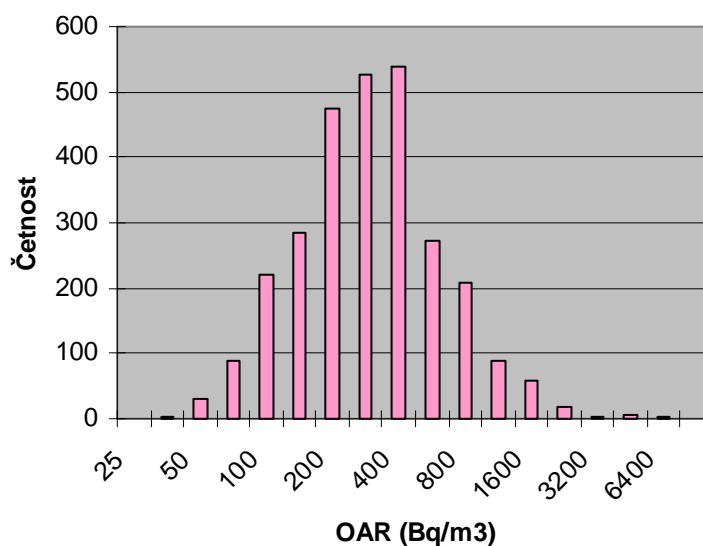
Průměrná hodnota je 228 Bq.m<sup>-3</sup>. Směrodatná odchylka je 278 Bq.m<sup>-3</sup>.

#### 4.2.5 Stáří stavby

Tabulky a grafy 21 až 25 znázorní naměřené hodnoty OAR v budovách různého stáří a četnost jejich výskytu v příslušných třídách.

Tabulka 21, graf 21: Distribuce hodnot ve stavbách z roku 1919 a starších

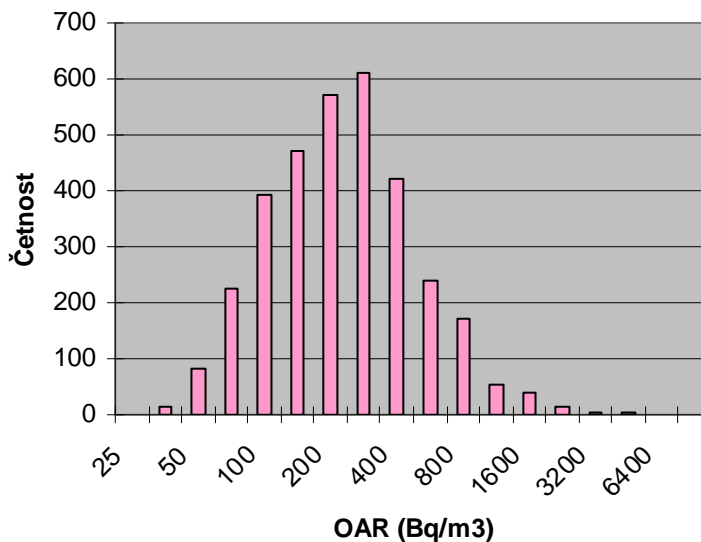
OAR [Bq.m <sup>-3</sup> ]	Četnost
0 - 25	0
26 - 35	4
36 - 50	30
51 - 70	88
71 - 100	219
101 - 140	286
141 - 200	476
201 - 280	526
281 - 400	540
401 - 560	271
561 - 800	209
801 - 1120	88
1121 - 1600	57
1601 - 2240	18
2241 - 3200	2
3201 - 4480	6
4481 - 6400	2



Průměrná hodnota je 333 Bq.m<sup>-3</sup>. Směrodatná odchylka je 345 Bq.m<sup>-3</sup>.

Tabulka 22, graf 22: Distribuce hodnot v budovách postavených v letech 1920-1945

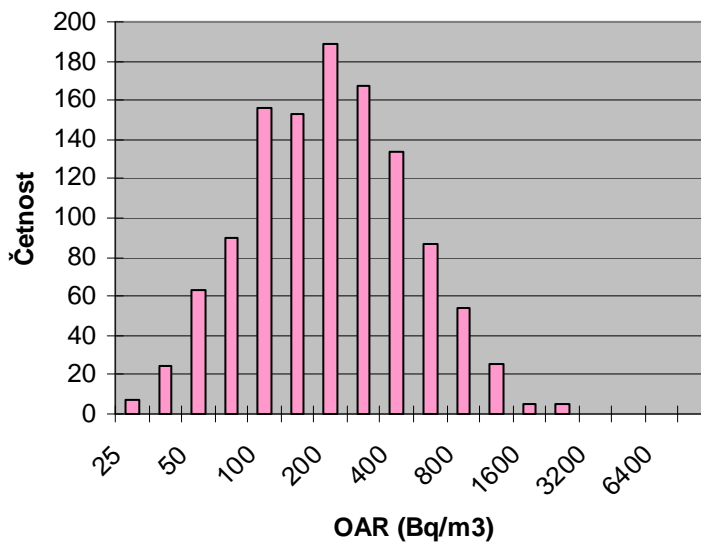
OAR [Bq.m <sup>-3</sup> ]	Četnost
0 - 25	0
26 - 35	13
36 - 50	82
51 - 70	225
71 - 100	393
101 - 140	472
141 - 200	573
201 - 280	611
281 - 400	420
401 - 560	240
561 - 800	170
801 - 1120	54
1121 - 1600	41
1601 - 2240	15
2241 - 3200	3
3201 - 4480	2
4481 - 6400	0



Průměrná hodnota je 261 Bq.m<sup>-3</sup>. Směrodatná odchylka je 269 Bq.m<sup>-3</sup>.

Tabulka 23, graf 23: Distribuce hodnot v objektech postavených v letech 1946-1960

OAR [Bq.m <sup>-3</sup> ]	Četnost
0 - 25	7
26 - 35	24
36 - 50	63
51 - 70	90
71 - 100	156
101 - 140	153
141 - 200	189
201 - 280	167
281 - 400	134
401 - 560	87
561 - 800	54
801 - 1120	26
1121 - 1600	5
1601 - 2240	5
2241 - 3200	0
3201 - 4480	0
4481 - 6400	0

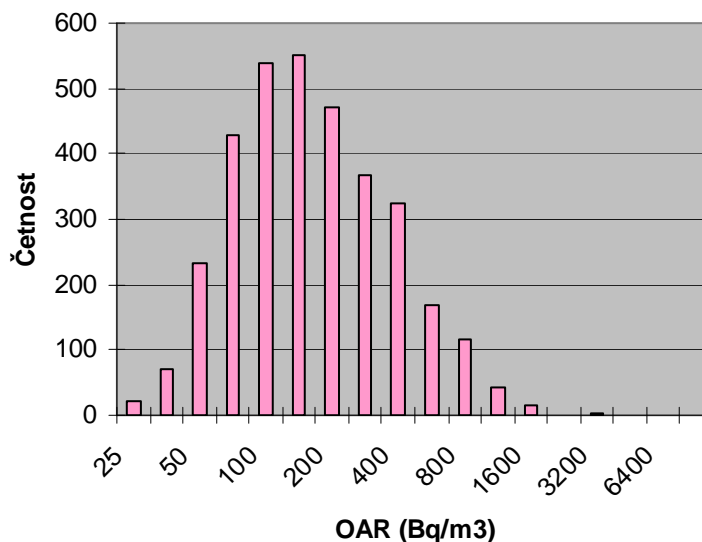


Průměrná hodnota je 237 Bq.m<sup>-3</sup>. Směrodatná odchylka je 238 Bq.m<sup>-3</sup>.



Tabulka 24, graf 24: Distribuce hodnot v domech postavených v letech 1961-1980

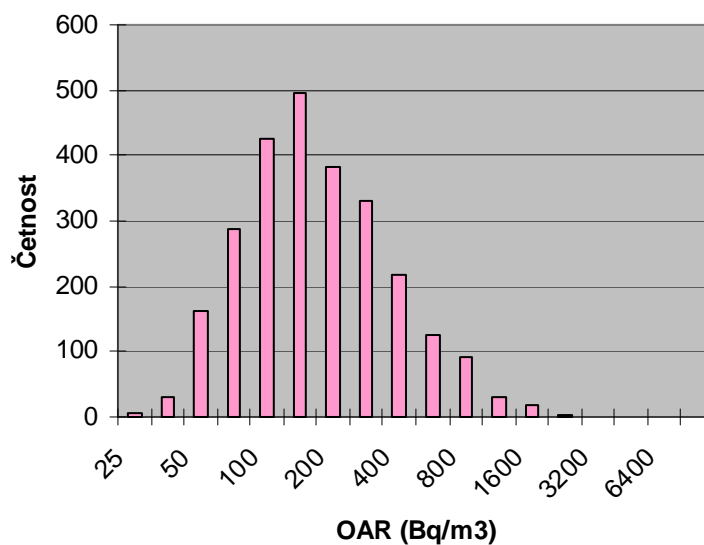
OAR [Bq.m <sup>-3</sup> ]	Četnost
0 - 25	21
26 - 35	70
36 - 50	232
51 - 70	428
71 - 100	540
101 - 140	551
141 - 200	472
201 - 280	367
281 - 400	324
401 - 560	169
561 - 800	117
801 - 1120	42
1121 - 1600	16
1601 - 2240	1
2241 - 3200	2
3201 - 4480	0
4481 - 6400	0



Průměrná hodnota je 193 Bq.m<sup>-3</sup>. Směrodatná odchylka je 193 Bq.m<sup>-3</sup>.

Tabulka 25, graf 25: Distribuce hodnot v objektech postavených v roce 1981 a mladších

OAR [Bq.m <sup>-3</sup> ]	Četnost
0 - 25	7
26 - 35	32
36 - 50	163
51 - 70	287
71 - 100	427
101 - 140	495
141 - 200	382
201 - 280	330
281 - 400	216
401 - 560	126
561 - 800	92
801 - 1120	31
1121 - 1600	17
1601 - 2240	3
2241 - 3200	1
3201 - 4480	0
4481 - 6400	0



Průměrná hodnota je 196 Bq.m<sup>-3</sup>. Směrodatná odchylka je 200 Bq.m<sup>-3</sup>.

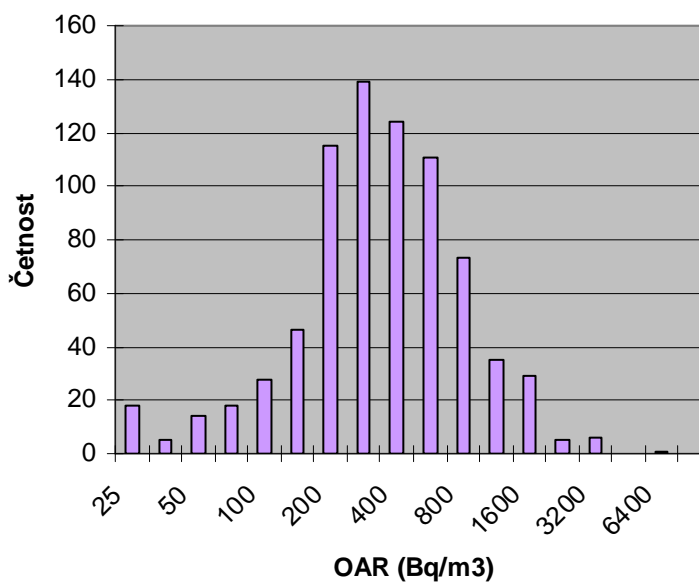
#### 4.2.6 Místnosti v jednotlivých okresech postavené z kamene

Tabulky a grafy 26 až 37 prezentují naměřené hodnoty v místnostech, kde byl jako stavební materiál použit kámen a frekvence výskytu těchto hodnot ve vymezených třídách.

Tabulka 26, graf 26: Distribuce hodnot v kamenných budovách v okrese

Benešov

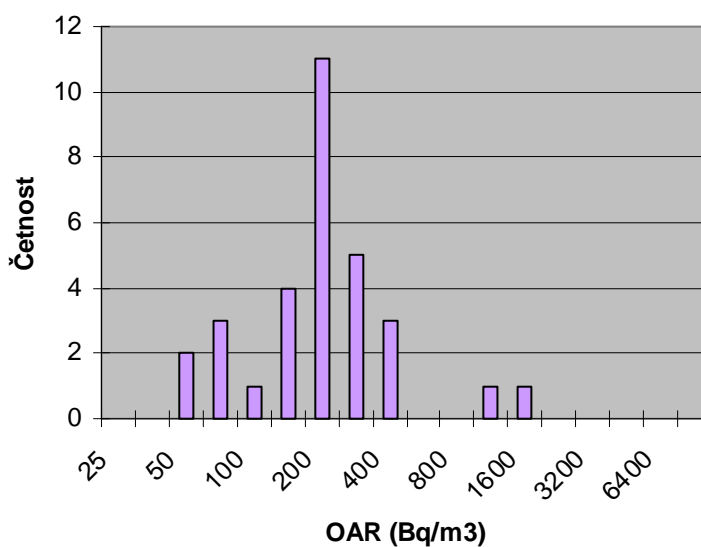
OAR [ $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	Četnost
0 - 25	18
26 - 35	5
36 - 50	14
51 - 70	18
71 - 100	28
101 - 140	46
141 - 200	115
201 - 280	139
281 - 400	124
401 - 560	111
561 - 800	73
801 - 1120	35
1121 - 1600	29
1601 - 2240	5
2241 - 3200	6
3201 - 4480	0
4481 - 6400	1



Průměrná hodnota je  $400 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ . Směrodatná odchylka je  $409 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Tabulka 27, graf 27: Distribuce hodnot v kamenných budovách v okrese Beroun

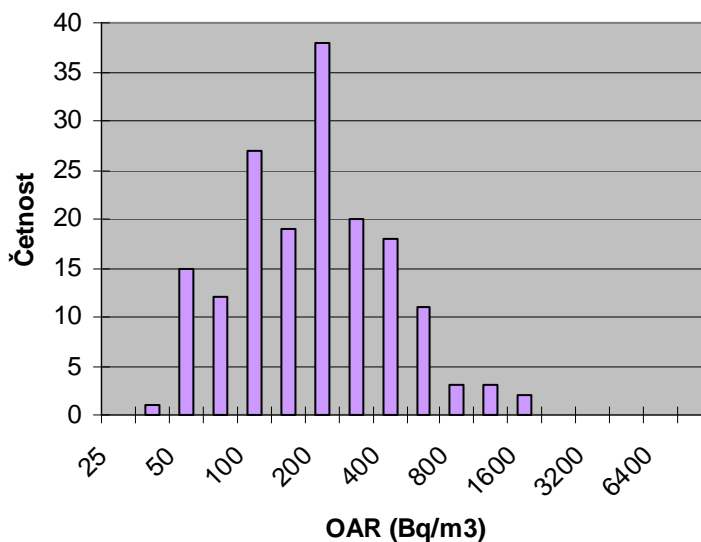
OAR [Bq.m <sup>-3</sup> ]	Četnost
0 - 25	0
26 - 35	0
36 - 50	2
51 - 70	3
71 - 100	1
101 - 140	4
141 - 200	11
201 - 280	5
281 - 400	3
401 - 560	0
561 - 800	0
801 - 1120	1
1121 - 1600	1
1601 - 2240	0
2241 - 3200	0
3201 - 4480	0
4481 - 6400	0



Průměrná hodnota je 231 Bq.m<sup>-3</sup>. Směrodatná odchylka je 248 Bq.m<sup>-3</sup>.

Tabulka 28, graf 28: Distribuce hodnot v kamenných budovách v okrese Kladno

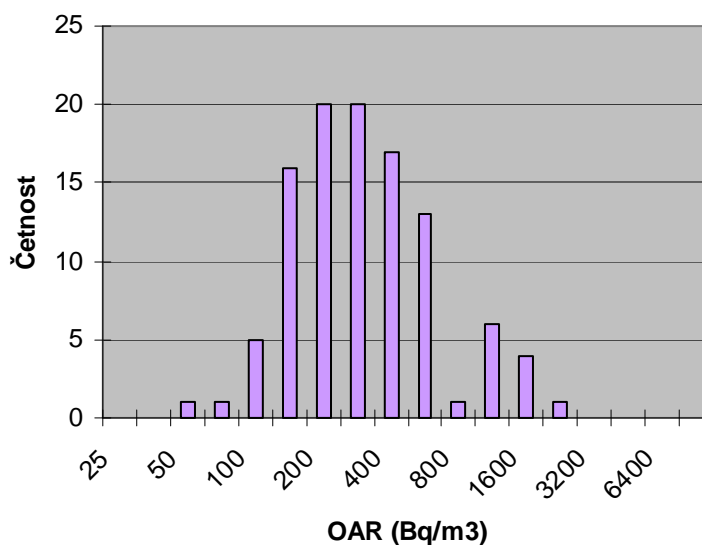
OAR [Bq.m <sup>-3</sup> ]	Četnost
0 - 25	0
26 - 35	1
36 - 50	15
51 - 70	12
71 - 100	27
101 - 140	19
141 - 200	38
201 - 280	20
281 - 400	18
401 - 560	11
561 - 800	3
801 - 1120	3
1121 - 1600	2
1601 - 2240	0
2241 - 3200	0
3201 - 4480	0
4481 - 6400	0



Průměrná hodnota je 207 Bq.m<sup>-3</sup>. Směrodatná odchylka je 194 Bq.m<sup>-3</sup>.

Tabulka 29, graf 29: Distribuce hodnot v kamenných budovách v okrese Kolín

OAR [Bq.m <sup>-3</sup> ]	Četnost
0 - 25	0
26 - 35	0
36 - 50	1
51 - 70	1
71 - 100	5
101 - 140	16
141 - 200	20
201 - 280	20
281 - 400	17
401 - 560	13
561 - 800	1
801 - 1120	6
1121 - 1600	4
1601 - 2240	1
2241 - 3200	0
3201 - 4480	0
4481 - 6400	0

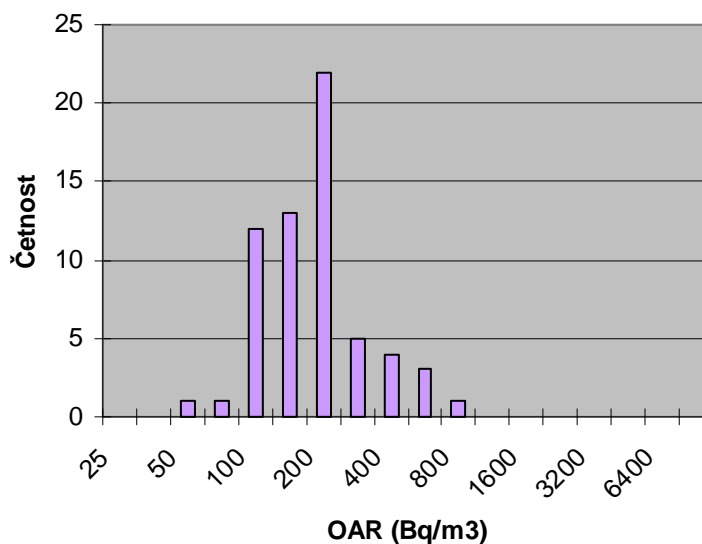


Průměrná hodnota je 338 Bq.m<sup>-3</sup>. Směrodatná odchylka je 319 Bq.m<sup>-3</sup>.

Tabulka 30, graf 30: Distribuce hodnot v kamenných budovách v okrese Kutná

Hora

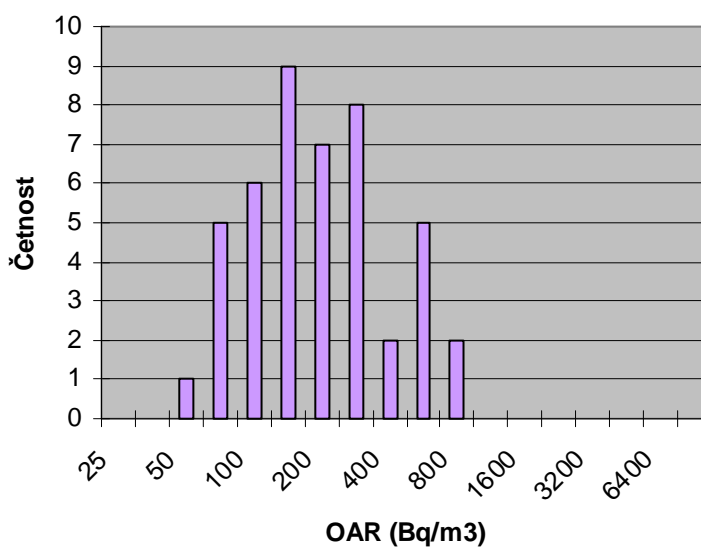
OAR [Bq.m <sup>-3</sup> ]	Četnost
0 - 25	0
26 - 35	0
36 - 50	1
51 - 70	1
71 - 100	12
101 - 140	13
141 - 200	22
201 - 280	5
281 - 400	4
401 - 560	3
561 - 800	1
801 - 1120	0
1121 - 1600	0
1601 - 2240	0
2241 - 3200	0
3201 - 4480	0
4481 - 6400	0



Průměrná hodnota je 175 Bq.m<sup>-3</sup>. Směrodatná odchylka je 109 Bq.m<sup>-3</sup>.

Tabulka 31, graf 31: Distribuce hodnot v kamenných budovách v okrese Mělník

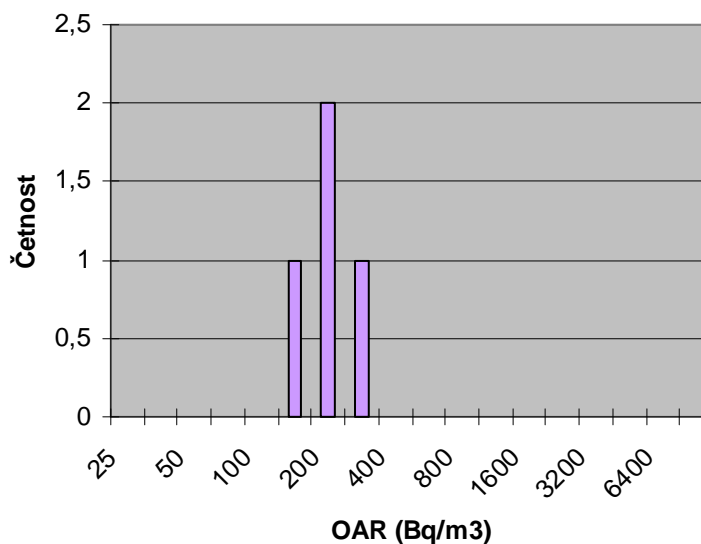
OAR [Bq.m <sup>-3</sup> ]	Četnost
0 - 25	0
26 - 35	0
36 - 50	1
51 - 70	5
71 - 100	6
101 - 140	9
141 - 200	7
201 - 280	8
281 - 400	2
401 - 560	5
561 - 800	2
801 - 1120	0
1121 - 1600	0
1601 - 2240	0
2241 - 3200	0
3201 - 4480	0
4481 - 6400	0



Průměrná hodnota je 201 Bq.m<sup>-3</sup>. Směrodatná odchylka je 160 Bq.m<sup>-3</sup>.

Tabulka 32, graf 32: Distribuce hodnot v kamenných budovách v okrese Mladá Boleslav

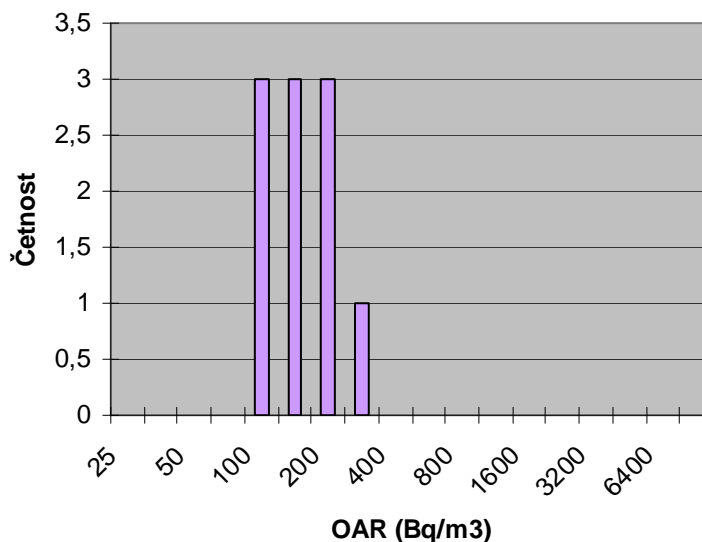
OAR [Bq.m <sup>-3</sup> ]	Četnost
0 - 25	0
26 - 35	0
36 - 50	0
51 - 70	0
71 - 100	0
101 - 140	1
141 - 200	2
201 - 280	1
281 - 400	0
401 - 560	0
561 - 800	0
801 - 1120	0
1121 - 1600	0
1601 - 2240	0
2241 - 3200	0
3201 - 4480	0
4481 - 6400	0



Průměrná hodnota je 152 Bq.m<sup>-3</sup>. Směrodatná odchylka je 51 Bq.m<sup>-3</sup>.

Tabulka 33, graf 33: Distribuce hodnot v kamenných budovách v okrese Nymburk

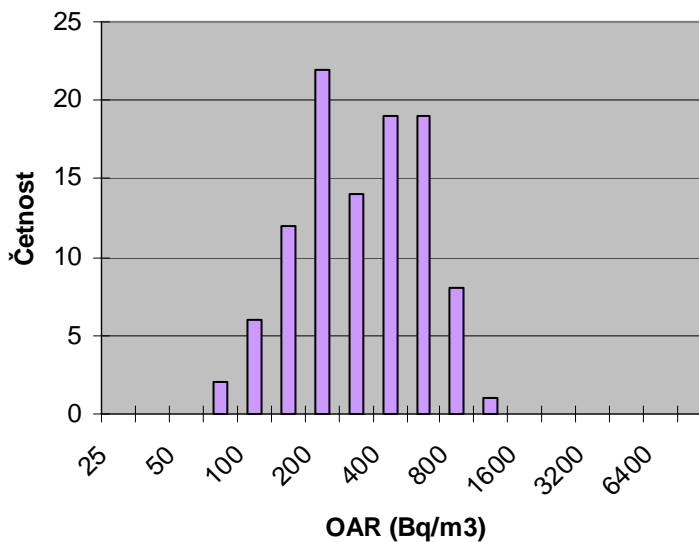
OAR [ $Bq \cdot m^{-3}$ ]	Četnost
0 - 25	0
26 - 35	0
36 - 50	0
51 - 70	0
71 - 100	3
101 - 140	3
141 - 200	3
201 - 280	1
281 - 400	0
401 - 560	0
561 - 800	0
801 - 1120	0
1121 - 1600	0
1601 - 2240	0
2241 - 3200	0
3201 - 4480	0
4481 - 6400	0



Průměrná hodnota je  $136 Bq \cdot m^{-3}$ . Směrodatná odchylka je  $63 Bq \cdot m^{-3}$ .

Tabulka 34, graf 34: Distribuce hodnot v kamenných budovách v okrese Praha-východ

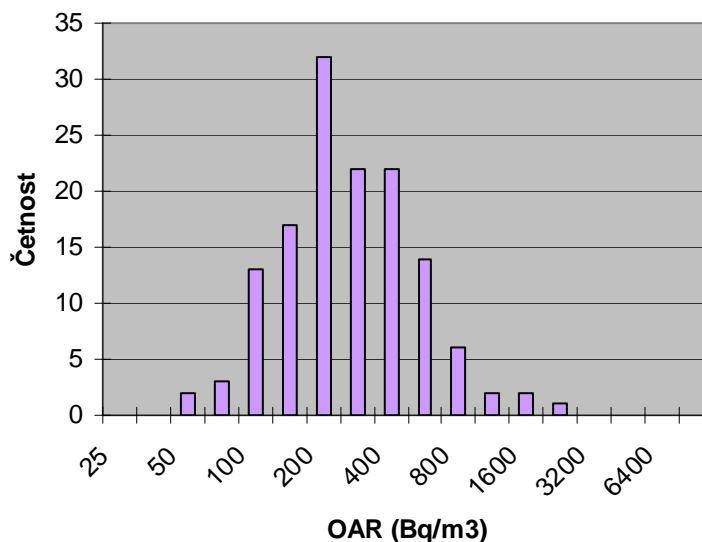
OAR [ $Bq \cdot m^{-3}$ ]	Četnost
0 - 25	0
26 - 35	0
36 - 50	0
51 - 70	2
71 - 100	6
101 - 140	12
141 - 200	22
201 - 280	14
281 - 400	19
401 - 560	19
561 - 800	8
801 - 1120	1
1121 - 1600	0
1601 - 2240	0
2241 - 3200	0
3201 - 4480	0
4481 - 6400	0



Průměrná hodnota je  $297 Bq \cdot m^{-3}$ . Směrodatná odchylka je  $177 Bq \cdot m^{-3}$ .

Tabulka 35, graf 35: Distribuce hodnot v kamenných budovách v okrese Praha-západ

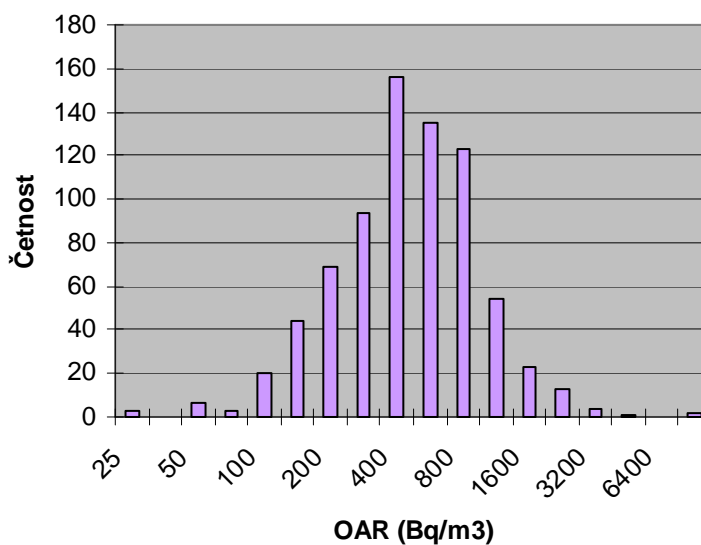
OAR [Bq.m <sup>-3</sup> ]	Četnost
0 - 25	0
26 - 35	0
36 - 50	2
51 - 70	3
71 - 100	13
101 - 140	17
141 - 200	32
201 - 280	22
281 - 400	22
401 - 560	14
561 - 800	6
801 - 1120	2
1121 - 1600	2
1601 - 2240	1
2241 - 3200	0
3201 - 4480	0
4481 - 6400	0



Průměrná hodnota je 279 Bq.m<sup>-3</sup>. Směrodatná odchylka je 244 Bq.m<sup>-3</sup>.

Tabulka 36, graf 36: Distribuce hodnot v kamenných budovách v okrese Příbram

OAR [Bq.m <sup>-3</sup> ]	Četnost
0 - 25	3
26 - 35	0
36 - 50	6
51 - 70	3
71 - 100	20
101 - 140	44
141 - 200	69
201 - 280	94
281 - 400	156
401 - 560	135
561 - 800	123
801 - 1120	54
1121 - 1600	23
1601 - 2240	13
2241 - 3200	4
3201 - 4480	1
4481 - 6400	0

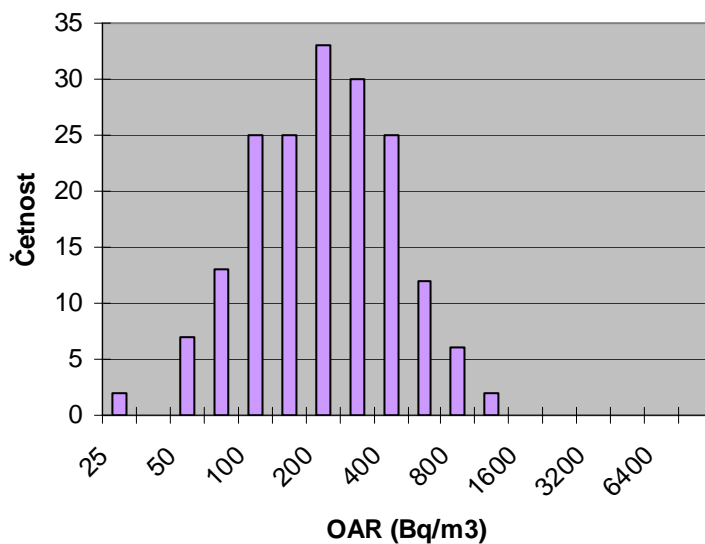


Průměrná hodnota je 501 Bq.m<sup>-3</sup>. Směrodatná odchylka je 563 Bq.m<sup>-3</sup>.

Tabulka 37, graf 37: Distribuce hodnot v kamenných budovách v okrese

Rakovník

OAR [Bq.m <sup>-3</sup> ]	Četnost
0 - 25	2
26 - 35	0
36 - 50	7
51 - 70	13
71 - 100	25
101 - 140	25
141 - 200	33
201 - 280	30
281 - 400	25
401 - 560	12
561 - 800	6
801 - 1120	2
1121 - 1600	0
1601 - 2240	0
2241 - 3200	0
3201 - 4480	0
4481 - 6400	0



Průměrná hodnota je 215 Bq.m<sup>-3</sup>. Směrodatná odchylka je 170 Bq.m<sup>-3</sup>.



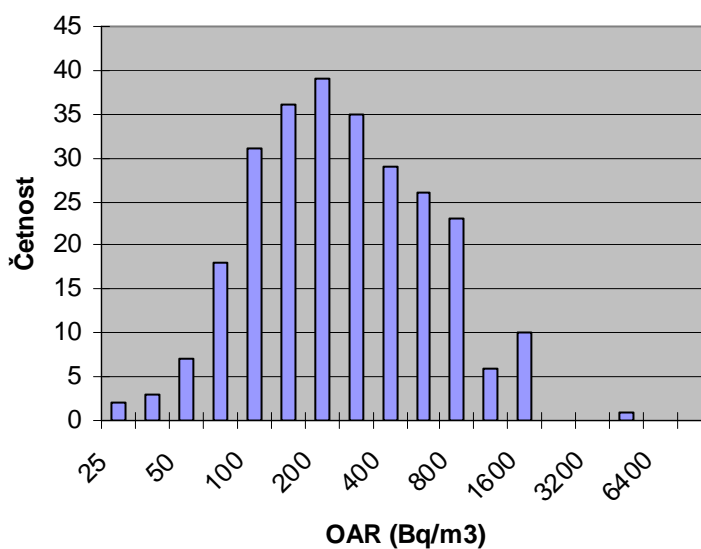
### 4.3 Způsob užívání objektů

#### 4.3.1 Větrání místností

Tabulky a grafy 38 až 40 představují naměřené hodnoty OAR v místnostech s nestejnou intenzitou větrání a četnost jejich výskytu v přidělených třídách.

Tabulka 38, graf 38: Distribuce hodnot v objektech s malým větráním

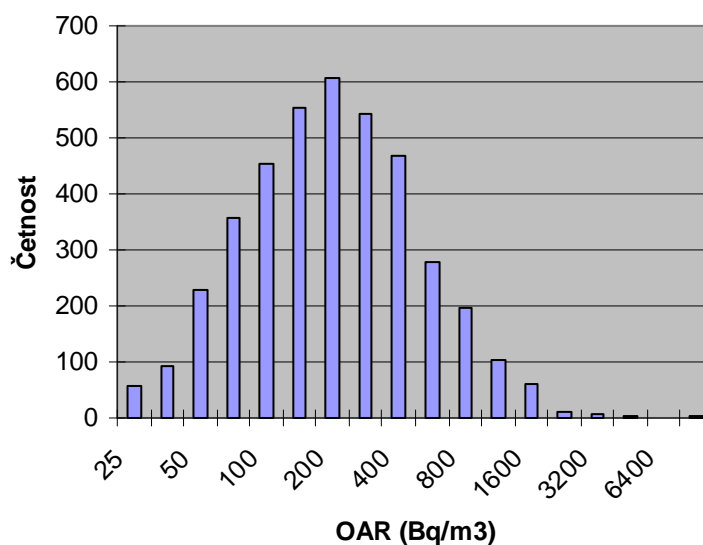
OAR [Bq.m <sup>-3</sup> ]	Četnost
0 - 25	2
26 - 35	3
36 - 50	7
51 - 70	18
71 - 100	31
101 - 140	36
141 - 200	39
201 - 280	35
281 - 400	29
401 - 560	26
561 - 800	23
801 - 1120	6
1121 - 1600	10
1601 - 2240	0
2241 - 3200	0
3201 - 4480	1
4481 - 6400	0



Průměrná hodnota je 310 Bq.m<sup>-3</sup>. Směrodatná odchylka je 242 Bq.m<sup>-3</sup>.

Tabulka 39, graf 39: Distribuce hodnot v objektech s běžným větráním

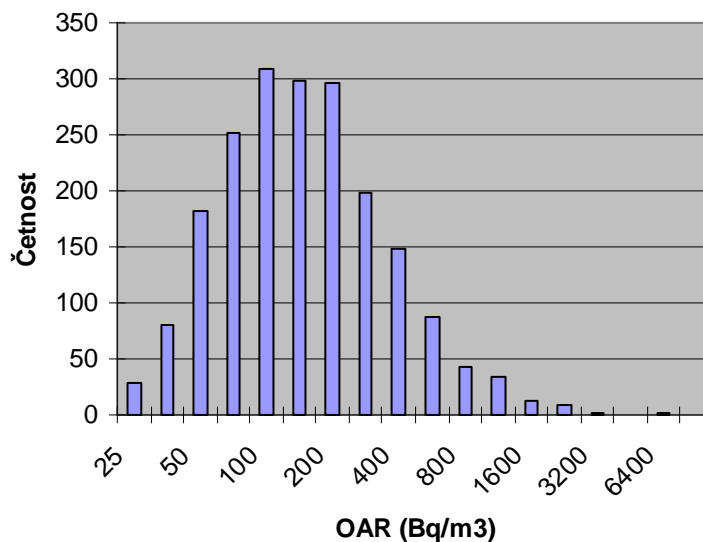
OAR [Bq.m <sup>-3</sup> ]	Četnost
0 - 25	57
26 - 35	94
36 - 50	227
51 - 70	357
71 - 100	454
101 - 140	553
141 - 200	606
201 - 280	544
281 - 400	469
401 - 560	279
561 - 800	195
801 - 1120	102
1121 - 1600	59
1601 - 2240	12
2241 - 3200	7
3201 - 4480	2
4481 - 6400	0



Průměrná hodnota je 255 Bq.m<sup>-3</sup>. Směrodatná odchylka je 336 Bq.m<sup>-3</sup>.

Tabulka 40, graf 40: Distribuce hodnot v objektech s intenzivním větráním

OAR [Bq.m <sup>-3</sup> ]	Četnost
0 - 25	29
26 - 35	80
36 - 50	183
51 - 70	251
71 - 100	309
101 - 140	299
141 - 200	297
201 - 280	199
281 - 400	148
401 - 560	88
561 - 800	43
801 - 1120	34
1121 - 1600	13
1601 - 2240	9
2241 - 3200	2
3201 - 4480	0
4481 - 6400	2



Průměrná hodnota je 193 Bq.m<sup>-3</sup>. Směrodatná odchylka je 280 Bq.m<sup>-3</sup>.

## 5 DISKUSE

Smyslem této práce bylo zjistit vzájemný vztah objemové aktivity radonu v objektech a v podloží. Ke zjištění této souvislosti jsem si stanovila hypotézu, kde jsem se zaměřila na jednotlivé ovlivňující faktory, kterými jsou koncentrace radonu v podloží, propustnost podloží, stav objektů a způsob jejich užívání.

Koncentraci radonu v podloží a propustnost podloží charakterizuje termín **radonový index podloží**.

K jednotlivým budovám jsem přiřadila kategorii radonového indexu podloží na základě map radonového indexu v měřítku 1:50 000. Každé geologické těleso je v mapách charakterizováno určitou kategorií radonového indexu na základě statisticky převažujícího radonového indexu v daném horninovém typu.

Jednotlivé kategorie radonového indexu geologického podloží představují tabulky 1 až 4 (*viz. 4 Výsledky*). V grafech 1 až 4 (*viz. 4 Výsledky*) je názorně zobrazena distribuce objemové aktivity radonu v budovách nacházejících se na nízkém, přechodném, středním a vysokém radonovém indexu. Při vzájemném porovnání průměrných hodnot objemové aktivity radonu vychází nejnižší průměrná hodnota pro objekty stojící na středním radonovém indexu podloží ( $259 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ), poté na nízkém ( $312 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ) a přechodném radonovém indexu podloží ( $337 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ) a nejvyšší hodnota se objevuje u objektů stojících na vysokém radonovém indexu podloží ( $487 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

Vertikální distribuce radonu v podloží není v dostatečném rozsahu zobrazena na mapách radonového indexu. Geologické podloží sestává z více vrstev s rozdílnou propustností pro radon. Pokud je svrchní partie půdy dobře propustná s nízkým obsahem radonu a pod ní se nalézá významný zdroj radonu, radon může snadno pronikat k povrchu a odtud do objektů. V případě, že je svrchní vrstva půdy nepropustná a hlubší části půdy jsou propustnější, radon může migrovat nikoliv směrem k povrchu, ale do stran. Proniká na povrch až v místech s vyšší propustností svrchní vrstvy. Lokální geologická tělesa tedy nemusí být určujícím zdrojem radonu.

Z mého srovnání vyplývá, že podloží s nízkým a přechodným radonovým indexem má vyšší průměrnou hodnotu OAR než podloží se středním radonovým

indexem. Tato analýza ukazuje, že k ověření, zda kategorie radonového indexu podloží ovlivňuje koncentraci radonu v objektech, není úplně vhodné odečítat radonový index podloží z map v měřítku 1: 50 000. Tyto radonové mapy slouží především k vyhledávání území, kde lze očekávat zvýšenou objemovou aktivitu radonu ve stavbách, pro předběžné umístování stopových detektorů v rámci vyhledávacího programu.

V analýze průměrných hodnot objemových aktivit radonu si byly hodnoty pro nízký, přechodný a střední radonový index podloží velice blízké, zatímco nejvyšší hodnota se objevila u objektů stojících na vysokém radonovém indexu podloží. Z toho vyplývá, že geologické podloží je významným zdrojem radonu, který ovlivňuje úroveň objemové aktivity radonu v objektu.

I vysoký radonový index geologického podloží však neznamena, že v budově na něm situované naměříme vysoké hodnoty objemové aktivity radonu. Velice záleží i na stavebně - technickém stavu objektu a způsobu jeho užívání.

Dalším faktorem, který podle mé hypotézy ovlivňuje koncentraci radonu v objektech je **stav objektů**.

Při zjišťování technického stavu budov v souvislosti se zvýšeným radonovým rizikem jsem se nejprve zaměřila na kontakt místností s podložím. V tabulkách a grafech 5 a 6 (viz. 4 Výsledky) jsou přehledně znázorněny naměřené hodnoty OAR pro místnosti, které jsou v kontaktu s podložím, a pro místnosti, které nejsou v kontaktu s podložím. Průměrná hodnota OAR místností, které jsou podsklepeny nebo jsou ve vyšších patrech budov, je téměř o  $100 \text{ Bq.m}^{-3}$  nižší než průměrná hodnota OAR místností, které jsou v přímém kontaktu s podložím. Je to způsobeno tím, že větší rozdíl tlaku je mezi objektem a podložím než mezi jednotlivými patry budovy. Pronikání radonu do vyšších podlaží objektu jsou obvykle postaveny překážky v podobě stropů, podlah a v prostorách schodiště – dveří. Než se radon dostane do vyšších pater budovy, často dojde k odvětrání velké části aktivity radonu do vnějšího prostředí. Tudiž po proniknutí vzduchu s příměsí radonu z podloží do budovy (difúzí a konvekci) největší koncentrace radonu zůstává v místnostech, které jsou v těsném kontaktu s podložím.

Toto tvrzení dokazuje i porovnání hodnot OAR v místnostech v jednotlivých podlažích domu, které jsou graficky zachyceny v tabulkách a grafech 7 až 11 (viz. 4 Výsledky). Nejvyšší průměrná hodnota OAR se nalézala v suterénech ( $318 \text{ Bq.m}^{-3}$ ), poté v přízemích ( $273 \text{ Bq.m}^{-3}$ ), dále v prvních patrech ( $185 \text{ Bq.m}^{-3}$ ) a nejnižší hodnoty byly naměřeny v podkrovních místnostech ( $142 \text{ Bq.m}^{-3}$ ), v druhých a vyšších patrech budov ( $135 \text{ Bq.m}^{-3}$ ).

Zvýšené hodnoty objemové aktivity radonu v objektech mohou být způsobeny i uvolňováním radonu ze stavebního materiálu. V tabulkách a grafech 12 až 17 (viz. 4 Výsledky) jsem se zaměřila na jednotlivé stavební materiály. Porovnáním průměrných hodnot OAR mi vyšla nejnižší hodnota ( $132 \text{ Bq.m}^{-3}$ ) v místnostech, kde bylo jako stavební materiál použito dřevo. Dřevo téměř neobsahuje uran a jeho rozpadové produkty, proto tento materiál nepřispívá ke zvýšení obsahu radonu v místnostech, a tedy je průměrná hodnota v těchto místnostech nejnižší.

Průměrné hodnoty objemové aktivity radonu v místnostech s použitým ostatním stavebním materiálem mi vyšly v pořadí od nejnižší hodnoty k nejvyšší takto: beton –  $156 \text{ Bq.m}^{-3}$ , plynosilikát –  $203 \text{ Bq.m}^{-3}$ , škvárobeton –  $205 \text{ Bq.m}^{-3}$ , cihla –  $255 \text{ Bq.m}^{-3}$ , kámen –  $376 \text{ Bq.m}^{-3}$ . Porovnáme-li naměřené hodnoty objemové aktivity radonu v místnostech s hodnotami hmotnostní aktivity obsahu  $^{226}\text{Ra}$  ve stavebních materiálech (viz. tabulka 1, str. 15), není vidět vzájemná souvislost těchto hodnot, protože kromě obsahu  $^{226}\text{Ra}$  ve stavebním materiálu záleží na struktuře materiálu, která ovlivňuje emanační vlastnosti daného materiálu a difúzi radonu.

Podle mých výpočtů měl beton nižší průměrnou hodnotu OAR místností než plynosilikát a škvárobeton. Plynosilikát je lehký, pórovitý beton a škvárobeton je beton, v němž je jako plnidlo použita škvára smíchaná s křemenným pískem, popř. struskou. Kromě nižší průměrné hmotnostní aktivity  $^{226}\text{Ra}$  je beton i méně porézní než plynosilikát a škvárobeton.

Z hlediska struktury stavebního materiálu je nejvíce členitým a porézním stavebním materiálem cihla. Je vyrobená formováním hlíny a následným vypálením v peci nebo sušením na slunci. Struktura cihel umožňuje snadnou emanaci a difúzi

radonu. Z tohoto důvodu byla v místnostech z cihel naměřena druhá nejvyšší průměrná hodnota OAR.

Nejvyšší průměrná hodnota OAR byla naměřena v místnostech, kde byl jako stavební materiál použit kámen. Kámen je jiný název pro horninu, tedy pro nerostnou surovinu. Ve dvacátém století je kámen postupně nahrazován jiným stavebním materiálem a koncem dvacátého století se kámen jako hlavní stavební materiál už nepoužívá vůbec. Vzhledem ke stáří většiny objektů z kamene se dá předpokládat, že tyto budovy nemají žádné protiradonové izolace a ani základní izolace s vodotěsně provedenými spoji a prostupy. Z tohoto důvodu je v místnostech, kde je hlavním stavebním materiálem kámen, naměřena mnohem vyšší průměrná hodnota OAR než v místnostech, kde byl použit jiný stavební materiál, i přesto, že kámen má hmotnostní aktivitu  $^{226}\text{Ra}$  srovnatelnou s betonem.

Toto mínění potvrzují i tabulky a grafy 26 až 37 (viz. 4 Výsledky), z nichž lze vyčíst nejvyšší průměrné hodnoty místností z kamene v okrese Příbram ( $501 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ) a v okrese Benešov ( $400 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Při srovnání těchto výsledků s mapou radonového rizika (viz. 9 Přílohy, příloha 2) je poznat souvislost. Na této mapě je znázorněn nejvyšší radonový index geologického podloží na území okresu Příbram a poté Benešov.

Ovlivňujícím faktorem objemové aktivity radonu v objektech může být i těsnost oken. Tabulky a grafy 18 až 20 (viz. 4 Výsledky) prezentují naměřené hodnoty OAR v místnostech s malou, běžnou a výbornou těsností oken. Předpokládala jsem, že v místnostech, kde jsou použita okna s výbornou těsnicí vlastností, bude docházet k nízké ventilaci vzduchu mezi místností a vnější atmosférou, proto tam budou naměřené vyšší výsledky než v místnostech s malou a běžnou těsností oken. Tato část hypotézy se však nepotvrdila. V místnostech s malou těsností oken byla průměrná hodnota OAR  $223 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ , v místnostech s běžnou těsností oken byla průměrná hodnota OAR  $244 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$  a v místnostech s výbornou těsností oken se naměřilo v průměru  $228 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ . Z těchto velice si blízkých hodnot vyplývá, že těsnost oken nemá na koncentraci radonu v objektech zásadní vliv. Domnívám se, že je to z větší části dáno tím, že osvěta lidí o radonovém riziku, jejichž domy byly do Radonového programu

zapojeny, je vyšší, než bych předpokládala. Stoupá povědomí této části populace o tom, že zateplování objektů včetně použití oken s dobrými izolačními vlastnostmi s sebou přináší zhoršování radiační situace. To má za následek záměrné častější větrání místností, kde jsou použita okna s výbornou těsnicí schopností.

Zvýšenou koncentraci radonu v obytných objektech z hlediska stavu budov jsem se pokusila ověřit také stářím jednotlivých staveb. Budovy jsem si rozdělila do kategorií podle doby, kdy byly postaveny (viz. 4 Výsledky – tabulky a grafy 21 až 25). V těchto budovách bylo naměřeno v průměru  $333 \text{ Bq.m}^{-3}$  v místnostech, které jsou z roku 1919 a starší,  $261 \text{ Bq.m}^{-3}$  v místnostech postavených v letech 1920 až 1945,  $237 \text{ Bq.m}^{-3}$  v místnostech, které vznikly v letech 1946 až 1960,  $193 \text{ Bq.m}^{-3}$  v místnostech pocházejících z let 1961 až 1980 a  $196 \text{ Bq.m}^{-3}$  v místnostech postavených po roce 1981. Tyto průměrné hodnoty postupně klesají od nejstarších staveb k nejmladším, kromě posledních dvou kategorií, které jsou takřka vyrovnané. Domnívám se, že rozdíl těchto hodnot úzce souvisí s přítomností izolace pod kontaktní konstrukcí, její kvalitou a provedením vzduchotěsných prostupů pro instalační vedení. Izolace se postupně vyvíjela v čase, stávala se kvalitnější a účinnější pro izolaci objektů nejen od vody, ale i od radonu. Dnes už se oproti minulosti izolace pokládá pod každou novostavbu. Podle mého názoru stáří budovy ovlivňuje technický stav objektu a má významný vliv na koncentraci radonu v objektu.

Všechny předchozí faktory ovlivňující koncentraci radonu ve stavbách zjišťovaly OAR z hlediska přísunu radonu do objektu. Objemovou aktivitu radonu v interiéru budov může dle mé hypotézy ovlivnit rovněž **způsob užívání objektů**.

Obsah radonu v místnostech, dle způsobu jejich užívání, závisí na výměně vzduchu mezi interiérem a exteriérem místnosti, čili na ventilaci. Intenzitu větrání ve změřených místnostech vyjadřují tabulky a grafy 38 až 40 (viz. 4 Výsledky). V místnostech, kde se málo větrá, byla průměrná hodnota OAR  $310 \text{ Bq.m}^{-3}$ , v místnostech s běžným režimem větráním byla průměrná hodnota OAR  $255 \text{ Bq.m}^{-3}$  a v místnostech s intenzivním větráním byla průměrná hodnota OAR  $193 \text{ Bq.m}^{-3}$ . Tyto

průměrné hodnoty OAR jasně ukazují zřejmé působení větrání na koncentraci radonu v místnosti.

Výsledky ukazují, že nejvyšší koncentrace radonu jsou v objektech situovaných na vysokém radonovém indexu podloží, které jsou nepodsklepené, jednopatrové, kamenné, postavené před rokem 1920, bez provedených izolací a málo větrané.



## 6 ZÁVĚR

V teoretické části této práce jsem nastínila současný stav radonové problematiky. Praktickou část jsem zaměřila na ověřování hypotézy, která byla stanovena v souvislosti s cílem práce.

Má hypotéza „*Zvýšená koncentrace radonu v obytných objektech je ovlivněna zvýšenou koncentrací radonu v podloží, jeho propustností, stavem objektů a způsobem jejich užívání.*“ byla na základě výzkumu z větší části potvrzena.

Cílem bakalářské práce bylo zjistit vztah mezi obsahem radonu v pobytových prostorách budov a podložím. Cíl práce byl splněn.

Výsledky bakalářské práce ukazují souvislost mezi obsahem radonu v geologickém podloží a obsahem radonu v objektu a znázorňují závislost objemové aktivity radonu na technickém stavu budovy. Výsledky také upozorňují na velký vliv větrání místností na koncentraci radonu v objektech.

Má práce by mohla být využita pro pracovníky obecní samosprávy k cílené organizaci lokálních programů na snížení zatížení obyvatelstva radonovým rizikem.

Využití spatřuji i v přiblížení radonové problematiky studentům Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích.

Bakalářská práce může být přínosem pro širokou veřejnost, protože rizika vyplývající z ozáření radonem jsou velice závažná. Myslím si, že každý člověk, bez ohledu na své vzdělání, by měl mít přinejmenším základní informace o radonu a jeho rizicích. Na druhou stranu psychický stres z radonu, který mohou vyvolat různé poplašné zprávy v médiích, může být příčinou více zdravotních problémů než radon sám.

Aby mohla být navržena řešení nepříznivé situace, musíme nejprve rozpoznat její příčiny. Proto byla tato práce směřována k diagnostice zdrojů radonu v objektech.

## 7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. BARNET, I., FOJTÍKOVÁ, I. Radonový index geologického podloží a jeho vliv na strategii vyhledávání rizikových objektů v České republice. In: *Zprávy o geologických výzkumech v roce 2005*. Praha: ČGS, 2006. 195 s. ISBN 80-7075-667-5. S. 128-132.
2. BARNET, I., MIKŠOVÁ, J., FOJTÍKOVÁ, I. Indoor - soil gas radon relationship in the Central Bohemian Plutonic Complex. In: HEINICKE, J., MARTINELLI, G. *Annals of Geophysics. 7th International Conference On Gas Geochemistry, Freiberg (Germany), September 2003*. 1. vyd. Prague: CGS, 2005, vol. 48, no. 1, s. 93-99. ISSN 1593-5213.
3. BARNET, I., MIKŠOVÁ, J. Radon a geologie. ČGS. (online). Platný <http://www.geology.cz>, březen 2, 2008.
4. BARNET, I., PACHEROVÁ, P., FOJTÍKOVÁ, I. Radon profile across the main granitoid bodies of the Bohemian Massif (Czech Republic). In: BARNET, I., NEZNAL, M., PACHEROVÁ, P. *Radon investigations in the Czech Republic XI and the 8th international workshop on the Geological Aspects of Radon Risk Mapping*. 1. vyd. Prague: CGS, 2006, s. 21-28. ISBN 80-7075-661-6.
5. BARNET, I., PACHEROVÁ, P., MATOLÍN, M. Radon v geologickém podloží České republiky – mapy radonového indexu. *Bezpečnost jaderné energie*. Praha: 2007, roč. 15, č. 3-4, s. 94-102. ISSN 1210-7085.
6. BARNET, I. aj. *Mapy radonového indexu geologického podloží 1:50 000* [CD-ROM]. Praha: ČGÚ, 2005.
7. BARNET, I. aj. *Regionální výzkum radonového rizika v České republice*. Praha: Ústřední ústav geologický, 1991. 134 s.
8. BARNET, I. *Radon v geologickém prostředí*. 1. vyd. Praha: ČGÚ, 1992. 33 s. ISBN 80-7075-112-6.
9. *Česká technická norma: Ochrana staveb proti radonu a záření gama ze stavebních materiálů*. Český normalizační institut. SÚJB, 2006. ČSN 730602.

10. Česká technická norma: Ochrana staveb proti radonu z podloží. Český normalizační institut. SÚJB, 2006. ČSN 730601.
11. FOJTÍKOVÁ, I. Nezastupitelná aktivita vlastníků nemovitostí. *Radon bulletin*. Praha: listopad 2006, s. 1–2.
12. FRONKA, A., MOUČKA, L., JÍLEK, K. Radonová diagnostika a význam měření radonu v budovách. *Bezpečnost jaderné energie*. Praha: 2007, roč. 15, č. 3-4, s. 94-102. ISSN 1210-7085.
13. GFÚ. *Středočeský plutonický komplex* (online). Platný <http://web.ig.cas.cz/cz/onas/popularizace/geopark-sporilov/stredocesky-pluton/>, duben 12, 2008.
14. HANSLÍK, E. Radionuklidy v podzemních vodách a možnosti jejich odstranění. *Bezpečnost jaderné energie*. Praha: 2007, roč. 15, č. 3-4, s. 94-102. ISSN 1210-7085.
15. HŮLKA, J. Otazníky v poločase. *Radon bulletin*. Praha: listopad 2004, s. 1–2.
16. JIRÁNEK, M. Izolace proti radonu. *Publikace SÚJB*. (online). Platný <http://www.suro.cz/cz/publikace/radon/kniha300.pdf>, březen 23, 2008.
17. JIRÁNEK, M. *Opatření proti radonu ve stávajících budovách*. 1. vyd. Praha: SÚJB, 2000. 45 s. ISBN 80-90-2884-3-x.
18. KLENER, V. aj. *Principy a praxe radiační ochrany*. 1. vyd. Praha: Azin CZ, 2000. 619 s. ISBN 80-238-3703-6.
19. MARTINČÍK, J., THINOVÁ, L. *5th Conference on Protection Against Radon at Home and at Work (Book of abstract), September 9–15, Czech Republic*. 1. vyd. Prague: CTU publishing, 2007. 105 s. ISBN 978-80-01-03783-6.
20. NEZNAL, M. *Nová metodika stanovení radonového indexu pozemku*. 1. vyd. Praha: ČGS, 2004. 48 s. ISBN 80-7075- 616-0.
21. NEZNAL, Matěj, NEZNAL, Martin. Vstupní měření radonového indexu před výstavbou nových budov. *Bezpečnost jaderné energie*. Praha: 2007, roč. 15, č. 3–4, s. 94-102. ISSN 1210-7085.
22. NEZNAL, Matěj. Jak snížit riziko ozáření z radonu. *Radon bulletin*. Praha: srpen 2005, s. 3–4.

23. *Radon* (online). Platný <http://www.vp-radon.cz/Image/1zdroje-radonu.jpg>, únor 19, 2008.
24. *Sbírka zákonů ČR: Vyhláška ministerstva zdravotnictví ČR č. 76/1991 Sb. o požadavcích na omezování ozáření z radonu a z dalších přírodních radionuklidů.* 1991. Částka 16. S. 365-366.
25. *Sbírka zákonů ČR: Vyhláška SÚJB č. 307/2002 Sb. o radiační ochraně.* 2002. Částka 113. S. 6362-6540.
26. *Sbírka zákonů ČR: Vyhláška SÚJB č. 499/2005 Sb. o radiační ochraně.* 2005. Částka 174. S. 9806-9830.
27. *Sbírka zákonů ČR: Vyhláška SÚJB č. 184/1997 o požadavcích na zajištění radiační ochrany.* 1997. Částka 66. S. 3962-4095.
28. *Sbírka zákonů ČR: Zákon č. 18/1997 Sb. o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů.* 1997. Částka 5. S. 82-106.
29. SÚJB. Metodika pro stanovení radonového indexu pozemku. *Metodické pokyny a doporučení SÚJB* (online). Platný [http://www.sujb.cz/docs/MP\\_metodikaBCAEF\\_04.pdf](http://www.sujb.cz/docs/MP_metodikaBCAEF_04.pdf), duben 9, 2008.
30. SÚRO. Radioaktivita stavebních materiálů. *Radon a přírodní ozáření.* (online). Platný <http://www.suro.cz/cz/prirodnioz/stavebnimaterialy>, duben. 4, 2008.
31. SÚRO. Radioaktivita vody a možná opatření. *Radon a přírodní ozáření.* (online). Platný <http://www.suro.cz/cz/prirodnioz/voda>, duben 4, 2008.
32. SÚRO. Radonový program. *Radon a přírodní ozáření.* (online). Platný <http://www.suro.cz/cz/prirodnioz/rnprogram>, duben 4, 2008.
33. VLČEK, J., HŮLKA, J. Přírodní radionuklidy ve stavebních materiálech. *Bezpečnost jaderné energie.* Praha: 2007, roč. 15, č. 3-4, s. 94-102. ISSN 1210-7085.

## **8 KLÍČOVÁ SLOVA**

Dceřiné produkty radonu

Objemová aktivita radonu

Protiradonová opatření

Radon

Radonový index pozemku

Radonový program

Zdroje radonu

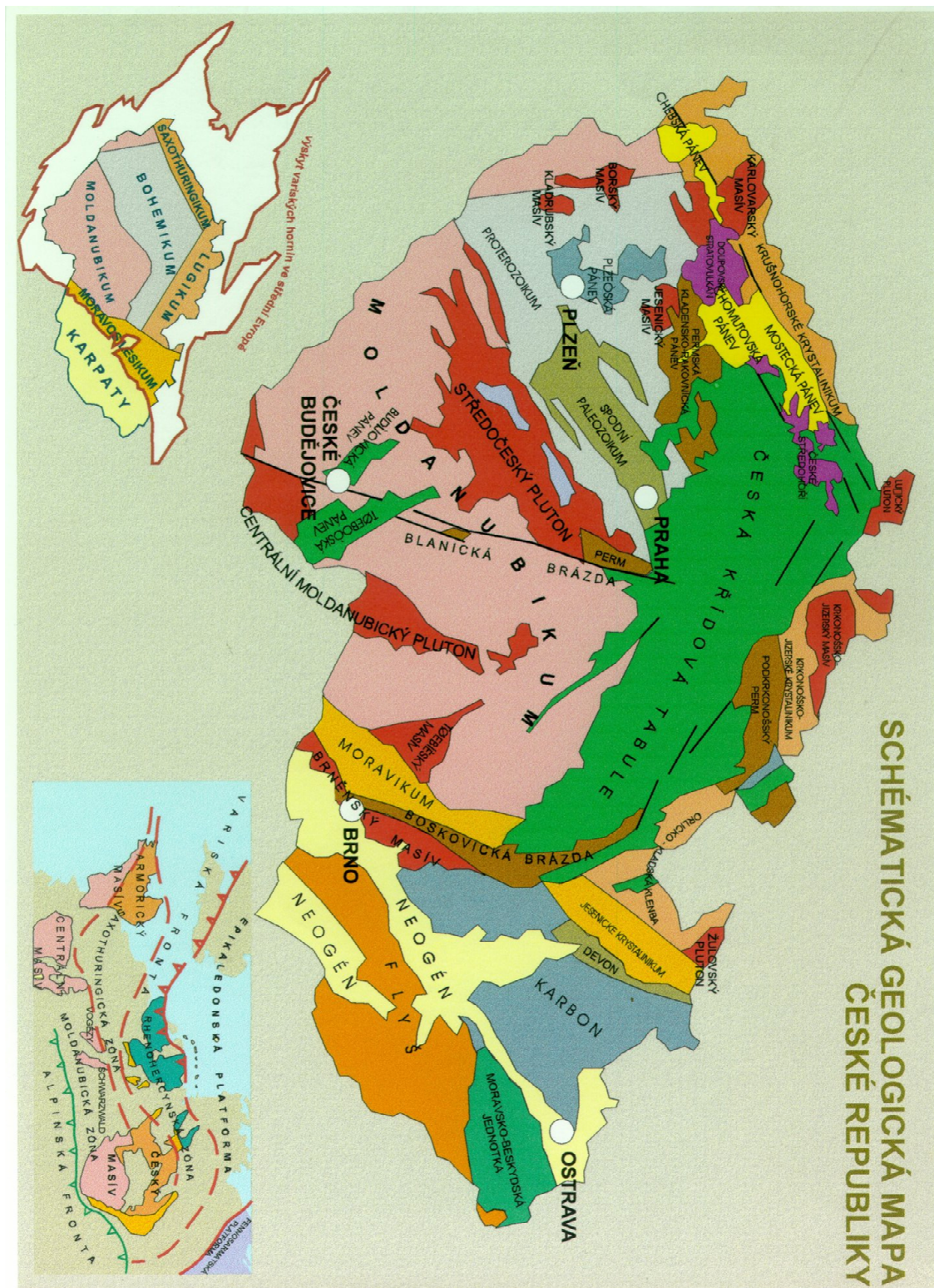
## **9 PŘÍLOHY**

Příloha 1: Schéma geologických jednotek na území České republiky

Příloha 2: Mapy radonového indexu geologického podloží

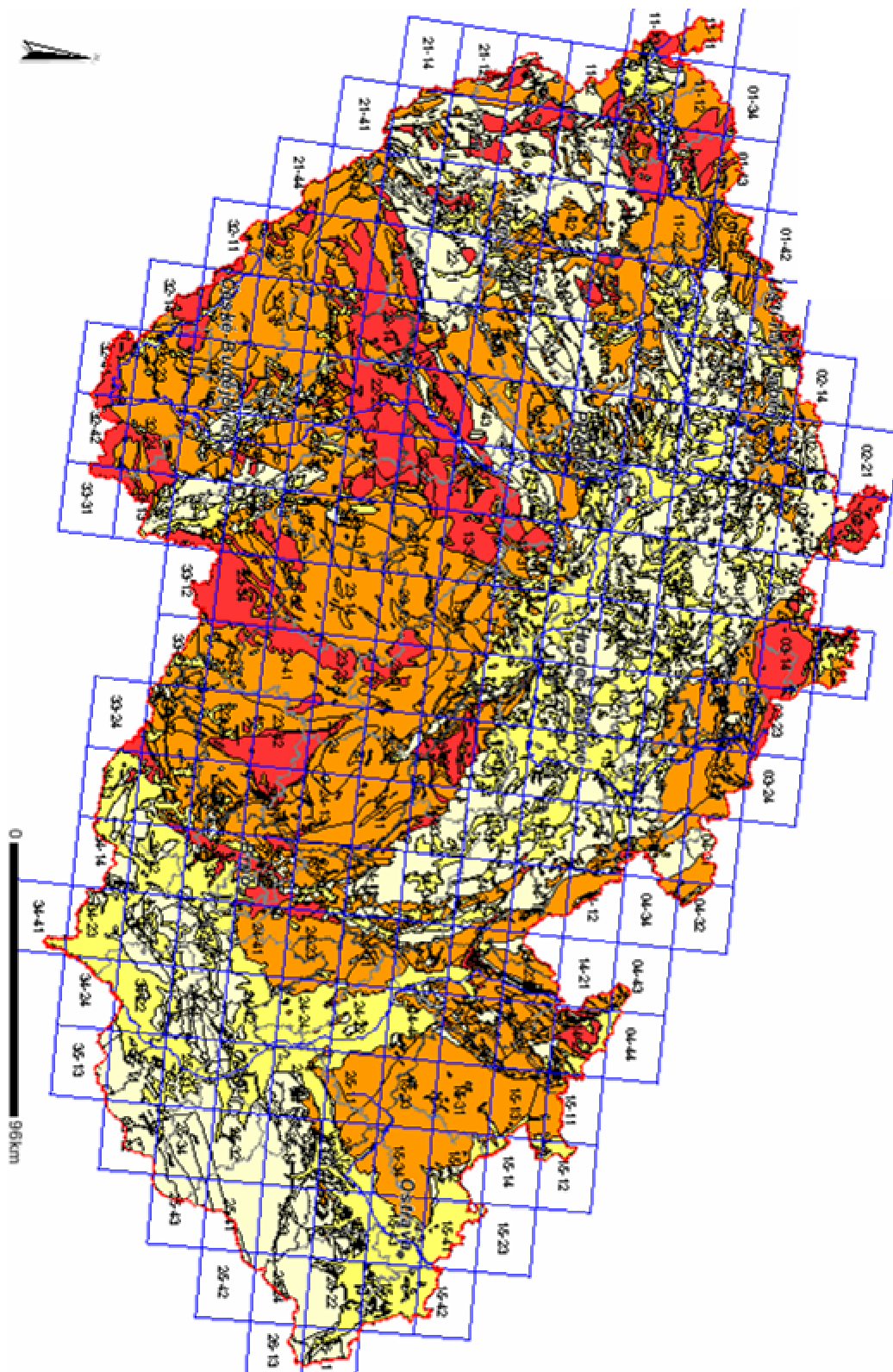
Příloha 3: Mapa radonového indexu geologického podloží a legenda k mapě

Příloha 1: Schéma geologických jednotek na území České republiky



(13)

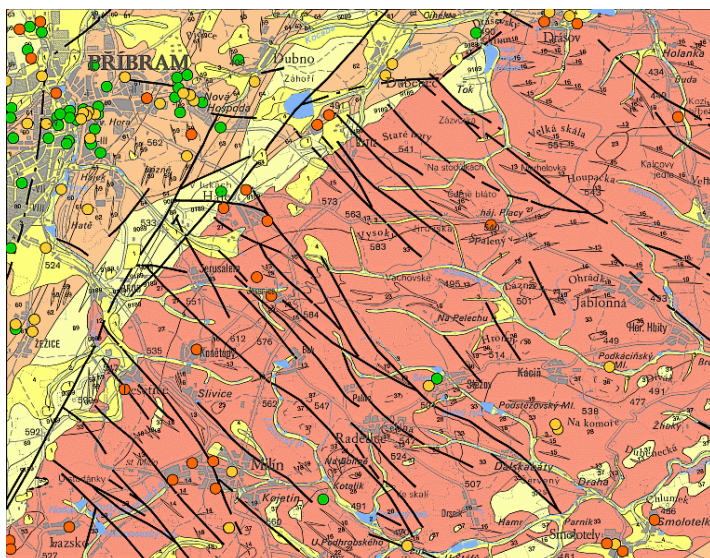
Příloha 2: Mapy radonového indexu geologického podloží



(3)



Příloha 3: Mapa radonového indexu geologického podloží a legenda k mapě



(3)

Převažující kategorie radonového rizika z geologického podloží:



Plochy měření radonového rizika z geologického podloží podle radonové databáze ÚGÚ a Asociace Radonové Riziko:



(3)