



Zdravotně
sociální fakulta
Faculty of Health
and Social Sciences

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

**Řešení radonu ve vybraných středních školách
v Jihočeském kraji**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studijní program: **VEŘEJNÉ ZDRAVOTNICTVÍ**

Autor: Bc. Irena Pichlová

Vedoucí práce: RNDr. Jana Krejsová

České Budějovice 2018

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci s názvem „*Řešení radonu ve vybraných středních školách v Jihočeském kraji*“ 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 diplomové práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejich internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby diplomové práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé diplomové práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne 14. 8. 2018

.....

Bc. Irena Pichlová

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala především vedoucí mé diplomové práce RNDr. Janě Krejsové za odborné vedení, cenné rady, trpělivost, ochotu kdykoli pomoci a podporu. Dále velké poděkování patří panu Ing. Františkovi Poppovi a firmě AZ-RADON s.r.o. za pomoc při měření radonu, ochotu, cenné rady a připomínky. Dále bych chtěla poděkovat ředitelům škol, kteří mi umožnili uskutečnit výzkum a podali mi cenné informace. A v neposlední řadě děkuji své rodině a blízkému okolí za pomoc a trpělivost při psaní této práce.

Řešení radonu ve vybraných středních školách v Jihočeském kraji

Abstrakt

Hlavním cílem zabývajícím se v této diplomové práci bylo sledování objemové aktivity radonu z podloží v objektech vybraných středních škol v Jihočeském kraji.

Teoretická část diplomové práce byla zpracována sekundární analýzou dat. Za pomoci odborné literatury, platné legislativy a internetových článků byla rozebrána radonová problematika. Zabývala jsem se pronikáním radonu z podloží, vody a stavebního materiálu do budov. Dále jeho biologickými účinky na lidské zdraví, radonovým programem, dotacemi a legislativou upravující radonovou problematiku.

Výzkum probíhal kvalitativním šetřením s použitím sekundární analýzy dat. Potřebná data pro vypracování výzkumné části diplomové práce jsem získala z vlastního měření objemové aktivity radonu v pěti středních školách v Jihočeském kraji, doplněné o měření oxidu uhličitého. Objemovou aktivitu radonu jsem měřila kontinuálním monitorem zvaným Radim 5B a koncentrace oxidu uhličitého jsem měřila přístrojem Wöhler KM 410 pro posouzení klimatu. Naměřené výsledné hodnoty byly zpracovány pomocí speciálních programů v počítači a výsledky byly zaznamenány v podobě grafů.

Z měření vyšlo najevo, že ve vybraných školách až na jednu nemají s radonem větší problém. Nýbrž z naměřených hodnot koncentrací oxidu uhličitého je evidentní, že se ve školách málo větrá, na to má zásadní vliv i zateplení budovy a výměna oken za plastová nebo dřevěná Eurookna. Z toho plyne, že i koncentrace radonu je potom vyšší, než by mohla být. Vzhledem k těmto skutečnostem by bylo vhodné provést ve školách realizaci vzduchotechniky s rekuperací nebo vytvořit průduchy do zdiva, které by zajistily přísávání čistého vzduchu do objektu.

Klíčová slova

radon; radonová problematika; střední školy; oxid uhličitý; koncentrace; objemová aktivita radonu

Radon solution in selected high schools in the South Bohemian Region

Abstract

The principal aim of this diploma thesis was to monitor radon volume activity from the ground at the buildings of selected high schools in the South Bohemian Region.

The theoretical part of the diploma thesis was processed by secondary data analysis. With the help of professional literature, valid legislation and Internet texts, radon problems were analyzed. I dealt with the penetration of radon from the subsoil, water and construction material into the buildings. Furthermore, its biological effects on human health, radon program, subsidies and legislation regulating radon problems.

The research was proceed through a qualitative search using secondary data analysis. The needful data for the research part of the diploma thesis I got from my own measurement of radon volume activity in five high schools in the South Bohemian Region, supplemented by the measurement of carbon dioxide. I measured the radon volume activity with the continual monitor Radim 5B and the carbon dioxide concentration with the Wöhler KM 410 for climate assessment. Measured result values were processed using special programs on the computer and the results were displayed in graphs.

The measurements made it clear that in selected schools up to one have not a greater problem with radon. From the measured values of carbon dioxide concentrations is evident that in schools is not enough ventilation, and the insulation of the building and the replacement of the windows on behalf of Eurowindows plastic or wooden has an fundamental effect. Consequently, the concentration of radon is then higher than it could be. In view of these facts, it would be advisable to carry out a ventilation system in schools or create vents in the masonry to ensure that clean air is drawn into the building.

Keywords

radon; radon problems; high schools; carbon dioxide; concentration; radon volume activity

OBSAH

ÚVOD.....	9
1 SOUČASNÝ STAV	10
1.1 Radioaktivita.....	10
1.1.1 Přirozená radioaktivita.....	10
1.1.2 Umělá radioaktivita	11
1.2 Ionizující záření	11
1.2.1 Záření α	12
1.2.2 Záření β	13
1.2.3 Záření γ	14
1.2.4 Rentgenové záření	15
1.2.5 Neutronové záření.....	16
1.3 Zdroje ionizujícího záření ohrožující zdraví organismu.....	16
1.3.1 Umělé zdroje ionizujícího záření.....	17
1.3.2 Přírodní zdroje ionizujícího záření	17
1.4 Biologické účinky ionizujícího záření	22
1.4.1 Stochastické a deterministické účinky ionizujícího záření.....	23
1.5 Radon.....	23
1.5.1 Veličiny a jednotky.....	25
1.5.2 Biologické účinky radonu na lidský organismus.....	28
1.5.3 Historie radonu	31
1.5.4 Radon v České republice	31
1.5.5 Legislativa	34
1.5.6 Radonový program	36
1.5.7 Radon ve světě.....	38
1.5.8 Radonový index pozemku	39

1.5.9	Radonový index stavby	40
1.5.10	Radonový štítek stavby.....	40
1.5.11	Zdroje radonu v budovách.....	41
1.5.12	Dotace.....	45
1.5.13	Měření radonu	47
1.5.14	Protiradonová opatření	48
2	CÍLE PRÁCE A VÝZKUMNÉ OTÁZKY	52
2.1	Cíle práce.....	52
2.2	Výzkumné otázky	52
2.3	Operacionalizace pojmů	53
3	METODIKA PRÁCE	54
3.1	Charakteristika výzkumného souboru	55
3.2	Realizace výzkumu.....	55
3.3	Metody zpracování dat	56
3.4	Geologické podloží Jižních Čech	57
3.5	Radonová diagnostika.....	59
3.6	Důvod měření CO ₂ a okolní teploty	62
3.7	Přístroj pro měření CO ₂ a okolní teploty	63
4	VÝSLEDKY	64
4.1	Střední odborná škola strojní a elektrotechnická Velešín	64
4.2	Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola Volyně	71
4.3	Střední škola rybářská a Vyšší odborná škola vodního hospodářství a ekologie, Vodňany	78
4.4	Vyšší odborná škola a Střední zemědělská škola Tábor.....	82
4.5	Vyšší odborná škola, střední škola, COP, Sezimovo Ústí.....	86
5	DISKUZE	92
6	ZÁVĚR.....	98

7	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	100
8	SEZNAM PŘÍLOH	111
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	CXXII

ÚVOD

Zdroje ionizujícího záření, které ohrožují zdraví člověka, se dělí na přírodní a umělé. Lidé se často mylně domnívají, že jsme z největší části ozařováni z umělých zdrojů ionizujícího záření, mezi které se řadí rentgenové záření z radiodiagnostických či radioterapeutických přístrojů využívaných ve zdravotnictví, jaderné elektrárny, radioaktivní spad po jaderných haváriích a v neposlední řadě i spotřební předměty s obsahem radioaktivních látek. Avšak opak je pravdou, nejčastěji je lidská populace ozařována ze zdrojů přírodních. A právě radon pronikající z podzemí na zemský povrch, zastupuje největší složku přírodních zdrojů ionizujícího záření.

Radon je bezbarvý, bezzápachový radioaktivní plyn a v tom tkví jeho nebezpečnost. Nikdo z nás neví bez kontroly budovy, ve které žijeme, pracujeme nebo studujeme, zda je ozařován alfa zářením z radonu a jeho dceřiných produktů nebo nikoli. Proto radonové problematice mnoho lidí nepřikládá takovou důležitost. Přitom podle prokázaných studií je tento plyn po kouření druhým největším rizikem pro vznik rakoviny plic. A po ingestci vody s radonem může dojít ke vzniku leukémie. Proto by tato problematika neměla být podceňována. Jeho účinky se neprojeví ihned, nýbrž po několika letech ozařování. Navíc radon není vidět, není cítit. Neuvědomujeme si jeho přítomnost a proto mnoho lidí ani nepomyslí, že by za příčinou vzniku takto vážných onemocnění mohl stát právě radioaktivní plyn radon.

Ve volném ovzduší je jeho koncentrace zanedbatelná, jelikož se radon rychle rozptyluje a mísí s ostatními plyny. Problém nastává v uzavřených budovách, kde se nebezpečný plyn kumuluje. Problematika radonu ve stavbách je velice závažné téma, obzvláště v České republice, která patří mezi země s vysokým radonovým rizikem podloží. Průměrná hodnota radonu u nás je 118 Bq/m^3 . Dále se může do staveb uvolňovat z vody nebo ze stavebního materiálu. Zhruba ve 2-3 % domů jsou koncentrace radonu vyšší, než 400 Bq/m^3 . Přitom směrná hodnota, která se nesmí překročit, je podle naší legislativy 300 Bq/m^3 .

1 SOUČASNÝ STAV

1.1 Radioaktivita

Radioaktivita byla objevena koncem 19. století francouzským fyzikem Antoinem Henrim Becquerelem. Při pokusech s fosforescencí minerálů a krystalů zjistil, že některé látky vysílají zvláštní neviditelné záření i bez předchozího ozáření viditelným světlem. Toto záření podobně jako světlo zapříčinilo zčernání fotografické emulze a A. H. Becquerel ho nazval „uranovým zářením“. Roku 1903 získal za svůj velkolepý objev Nobelovu cenu (Navrátil a Rosina, 2005).

Radioaktivita je samovolná přeměna nestabilních jader atomů daných prvků, obsahujících nadbytek energie na jádra jiných prvků. Některá jádra atomů se po dlouhou dobu i přes změny atomu nemění, proto jsou označovány jako jádra stabilní. Pokud mají jádra atomů přebytek energie, jsou tedy v čase nestabilní a nazýváme je radioaktivními atomy. Nově vzniklá jádra mohou být opět radioaktivní nebo již stabilní. Radioaktivní přeměna je doprovázena zachycením elektronu z elektronového obalu, kvanta elektromagnetického záření nebo emisí částice. Cílem radioaktivní přeměny je snížení energie jádra, a tím dosažení stability atomu. Rychlost přeměny jádra nemůžeme ničím ovlivnit, ani fyzikálním nebo chemickým procesem, jelikož veškeré procesy probíhají v jádře atomů. Pro přesné určení rychlosti přeměny jádra se používá termín poločas přeměny, nebo také častěji užívané označení poločas rozpadu ($T_{1/2}$). Radioaktivitu dělíme na dva typy a to na přirozenou a umělou (Rosina et al., 2006)

1.1.1 Přirozená radioaktivita

Objevitelem přirozené radioaktivity byl v roce 1896, jak již bylo výše zmíněno Antoine Henri Becquerel (Diehl, 2008).

Přirozená radioaktivita je charakterizována samovolným rozpadem jádra atomu prvku vyskytujícího se v přírodě. Hraničním prvkem pro udržení stability jádra je olovo a to konkrétně jeho izotopy ^{206}Pb , ^{207}Pb a ^{208}Pb . Všechna těžší jádra jsou nestabilní a přeměňují se na lehčí, které vedou ke stabilitě (Hobst, 2004).

1.1.2 Umělá radioaktivita

Objeviteli umělé radioaktivity jsou manželé Frédéric a Irene Joliot – Curieovi. K tomuto objevu dospěli v roce 1934 při pokusech s jadernými reakcemi v laboratoři. Ozařovali hliník částicemi α a získali radioaktivní izotop fosforu (Švec, 2005).

Nestabilní, tedy radioaktivní jádra jsou uměle vytvořena lidskou činností, pomocí jaderných reakcí v urychlovačích částic nebo v jaderných reaktorech. Umělé radionuklidy se vyrábějí nejčastěji dodáním neutronů a to z důvodu neutrálního elektrického náboje a dostatečně velké hmotnosti. Zdrojem neutronů jsou jaderné reaktory. Elektricky negativní elektron a jádro se přitahují, jelikož mají nesouhlasné náboje, ale elektron pro svou malou hmotnost je neúčinný. Elektricky pozitivní částice mají sice dostatečnou hmotnost, avšak u jádra by musely překonat odpudivé Coulombovy síly, čehož není možno dosáhnout bez podpory reakce kinetickou energií. Ale přeci jen se kladně nabitě částice využívají. Cyklotrony jsou urychlovače protonů, díky elektromagnetickým silám protony oběhnou několikrát kruhovou dráhu a zvýší tím mnohonásobně svou energii (Diehl, 2008).

1.2 Ionizující záření

Ionizace je děj, při kterém se s neutrálního atomu stává elektricky nabitá částice, tedy iont. Pokud se z atomu odtrhnou elektrony, vzniká kationt, když atom přijme elektrony, vzniká aniont. Ionizující záření je charakterizováno, jako tok hmotných částic nebo fotonů elektromagnetického záření, které mohou ionizovat atomy prostředí anebo excitovat jejich jádra. Tím, že se při jaderných procesech dostává jádro nebo obal atomu do excitovaného stavu, tak se stávají energeticky nestabilní. Požadované stability dosáhnou vyzářením energie buď ve formě fotonů elektromagnetického záření, nebo ve formě částic. Každé záření má určitou energii a intenzitu. Intenzita nám dává informaci o tom, jak je záření silné. Jednotkou intenzity neboli radiačního výkonu je Watt (Beneš et al., 2015a).

Ionizující záření dělíme na přímo ionizující a nepřímo ionizující záření. Podstatou přímo ionizujícího záření jsou nabitě částice (pozitrony, protony, elektrony a částice α , β) s takovou kinetickou energií, která jim postačuje k vyvolání ionizace. Nepřímo ionizující záření je naopak tvořeno nenabitými částicemi (neutrony, fotony),

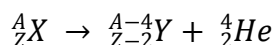
kteře nemají dostatečnou kinetickou energii k tomu, aby mohly samy ionizovat prostředí. Ionizace jsou však schopny při interakcích s prostředím, jelikož uvolňují sekundární přímo ionizující částice. Dále se ionizující záření dělí na dva druhy a to korpuskulární a fotonové ionizující záření (Rosina, 2013).

Charakteristickými znaky korpuskulárního ionizujícího záření je elektrický náboj, kinetická energie a klidová hmotnost. Do této skupiny řadíme částice podle hmotnosti, těžké jsou protony, neutrony a částice α , středně těžké jsou mezony a do skupiny lehkých částic patří pozitrony a elektrony. Poněvadž jde o částice pohybující se menší rychlostí, než je rychlost světla, hovoříme o záření α , β^- , β^+ , protonovém a neutronovém záření. Fotonové ionizující záření je proud kvant, která tvoří elektromagnetické vlny. Také má vlastnosti jak elektromagnetického vlnění, tak i částicové vlastnosti neboli má duální charakter. Kvanta čili fotony se pohybují rychlostí světla a mají nulovou klidovou hmotnost. Při zabrzdění předávají energii a zanikají. Rozlišujeme dva typy fotonového záření, jsou jimi γ a rentgenové záření. Vlnová délka záření γ je menší nežli vlnová délka rentgenového záření a vzniká v atomovém jádře. Rentgenové záření má větší vlnovou délku a vzniká interakcí elektronu z atomového obalu s těžkými atomy v rentgenovém přístroji, lineárním urychlovači nebo v betatronu (Beneš et al., 2015b).

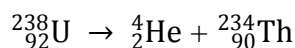
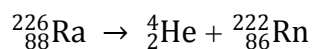
Jednotlivé druhy záření a jejich radioaktivní přeměny

1.2.1 Záření α

Je proud rychle letících heliových jader ${}^4_2\text{He}$ (kladné dvojmocné ionty helia). To znamená, že se částice α skládá ze dvou protonů a dvou neutronů. Uvolňují se pouze z rozpadajících se těžkých prvků přirozených radionuklidů. Emise částice α z daného prvku probíhá tak, že se přemění na prvek s nukleonovým číslem $A-4$ a s protonovým číslem $Z-2$ (Kusala, 2004). Přeměnu můžeme také vyjádřit vztahem



Příklady přeměny α :

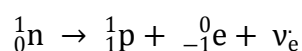


Energie těchto částic se pohybuje řádově v jednotkách megaelektronvoltů. Počáteční rychlost částic je tedy 10^7 m/s^{-1} . Emise α částic je doprovázena emisí kvant γ záření, protože kinetická energie emitovaného jádra a celková energie rozpadu sobě neodpovídají. Dosah záření alfa je značně omezen, ve vzduchu činí řádově několik centimetrů, protože částice alfa nesou dva elektrické náboje $2+$ a mají velkou hmotnost. Dochází při průchodu absorbujičím prostředím ke ztrátám ionizační energie. Záření α lze odstínit listem papíru, oděvem či tenkou folií z plexiskla a pro člověka není vnější ozáření nebezpečné, jelikož se vstřebává v horních vrstvách epidermis. Výjimkou je oko. Dosah částic α ve tkáni je maximálně desítky mikrometrů. Biologicky negativní je pro organismus požití radionuklidu, poněvadž z důvodu pohlcení energie malým objemem tkáně dochází k vnitřnímu ozáření. Nebezpečná je i inhalace α zářiče (radon), který vniká do plic a tam se rozpadá (Najarian a Splinter, 2016).

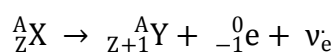
1.2.2 Záření β

Záření β je proud velmi rychlých elektronů nebo pozitronů (elektron s kladným nábojem) vylétujících zejména z lehkých jader přírodních radionuklidů, ale je součástí i přeměn umělých radionuklidů. K nestabilitě jádra dochází buď nadbytkem neutronů, nebo naopak nedostatkem neutronů. Jde o přebytek či nedostatek kladného náboje. Rozlišujeme dva typy β záření a to β^+ (pozitrony) a β^- (elektrony). Vznikají při přeměnách β^+ a β^- , kdy zůstává v jádře stále stejný počet nukleonů. Tento jev se nazývá izobarická transformace jádra (Navrátil a Rosina, 2005).

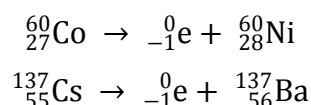
Při přeměně β^- je emitován z jádra mateřského radionuklidu elektron e^- , protože obsahuje nadbytek neutronů a má nedostatek kladného náboje. Avšak v jádře žádný elektron není, proto se přeměňuje neutron na proton, elektron a antineutrino (Rosina, 2013).



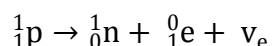
Společně s elektronem je také emitováno antineutrino. Radioaktivní přeměnu β^- lze vyjádřit rovnicí (Rosina, 2013)



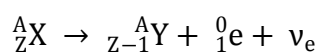
Příklady přeměny β^- :



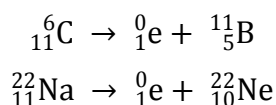
Při přeměně β^+ je naopak emitován z jádra mateřského radionuklidu pozitron, jelikož v tomto případě jádro nemá dostatek neutronů a tudíž převažuje kladný náboj. Pozitron vzniká v jádře přeměnou kladně nabitého protonu na neutron za současného vyzáření pozitronu a neutrina (Diehl, 2008).



Tato přeměna probíhá pouze u umělých radionuklidů a vyjadřujeme jí následující rovnicí (Švec, 2005).



Příklady přeměny β^+ :



Energie β záření se pohybuje v desítkách kiloelektronvoltů (keV) až v jednotkách megaelektronvoltů (MeV). Částice β jsou mnohem lehčí, než částice α , proto se pohybují podstatně rychleji až 10^8 m/s⁻¹. U obou typů záření β vzniká z mateřského jádra dceřiné, které je v excitovaném stavu a dostává se do základního stavu emisí γ záření. Záření β při průchodu prostředím málo ionizuje a excituje, a proto má větší dosah, než záření α . Ve vzduchu činí dolet částic β řádově několik metrů, ve vodě desítky milimetrů a v měkké tkáni je dosah v milimetrech až centimetrech. K odstínění se používají dvě vrstvy. Jedna je z lehkého materiálu s nízkým protonovým číslem (plexisklo, hliník), druhá je z materiálu s vysokým protonovým číslem (olovo) a slouží k pohlčení γ záření (Beneš et al., 2015a).

1.2.3 Záření γ

Záření γ je velice pronikavé elektromagnetické vlnění o značné energii a velmi krátkých vlnových délkách (10^{-13} – 10^{-16} m). Vzhledem k těmto vlastnostem má velkou pronikavost a je příbuzné jak rentgenovému záření, tak i světlu, pochopitelně s podstatně kratší vlnovou délkou. Vzniká při jaderných reakcích nebo častěji při radioaktivní přeměně α i β a je tedy součástí záření α a β . Záření γ je proud fotonů, které se uvolňují z jader přeskupováním nukleonů v radionuklidu. Energie γ záření se

pohybuje v řádech keV až MeV. Fotony se pohybují rychlostí světla $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}^{-1}$. Energii fotonů vyjadřujeme vztahem (Wagner, 2010):

$$E = h \frac{c}{\lambda}$$

h je Planckova konstanta ($6,64 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$), c je rychlost elektromagnetického záření ve vakuu ($3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) a λ nám udává vlnovou délku záření (Kusala, 2004).

Mezi nejvíce používané zdroje γ záření řadíme cesium, kobalt a iridium (^{137}Cs , ^{60}Co , ^{192}Ir). Fotony při průchodu prostředím narážejí do atomů a předávají energii elektronům, které jsou následně z atomů vyráženy a díky dostatečně velké energii mohou následně ionizovat prostředí. Záření γ je nepřímo ionizující a s prostředím vzájemně působí za pomoci Comptonova rozptylu, tvorby elektronpozitronových párů a fotoelektrického jevu. Dosah záření ve vzduchu je dokonce několik set metrů a v zemině, horninách či betonu je řádově v centimetrech. K stínění je potřeba použít železobetonový panel nebo olovo (Reichel a Všeticka, 2018).

1.2.4 Rentgenové záření

Roku 1895 objevil rentgenové záření německý profesor fyziky Wilhelm Conrad Röntgen. V té době to bylo jakési neviditelné záření, které vydávala výbojová trubice ležící vedle krystalků platnatokyanidu draselného pojmenoval „paprsky X“. Poté vznikl slavný první rentgenový snímek ruky jeho manželky. Švýcarský profesor anatomie a embryologie Alfred von Koelliker byl po spatření snímku objevem naprosto ohromen a navrhl, aby se paprsky X nazývaly Röntgenovy paprsky. Za svůj objev dostal W. C. Röntgen v roce 1901 Nobelovu cenu za fyziku (Seidl, 2012).

Rentgenové záření je možno definovat jako elektromagnetické vlnění o krátké vlnové délce ($10^{-10} - 10^{-12} \text{ m}$), čím kratší je jeho vlnová délka, tím větší je jeho pronikavost. Nevzniká v jádře, jako tomu bylo u předchozích typů záření, nýbrž v elektronovém obalu vzájemnou interakcí letících elektronů s hmotou. Rentgenové záření je především využíváno ve zdravotnictví a to v radiodiagnostice či v radioterapii. Má vlnovou délku mezi 10 nm – 50 pm. Při tvorbě rentgenových snímků se využívá jedné velice důležité vlastnosti tohoto záření a tou je míra absorpce pro různé hmoty. Velkou měrou je absorbováno kostmi a naopak málo měkkými tkáněmi (Newmann, 2018).

Jsou známy dva druhy rentgenového záření. Pokud letící elektron náhle změní rychlost, neboli zabrzdí, vzniká první typ rentgenového záření nazývané jako brzdné. Druhým typem rentgenového záření je charakteristické, které vzniká při dopadu elektronů s vysokou energií na kovovou anodu. Ke stínění záření vycházejícího z rentgenek se používají takzvané primární a sekundární clony. Primární clony snižují dávku záření před dopadem na pacienta a jsou vyrobené z několika párů olověných lamel. Nacházejí se na výstupním okénku rentgenky. Užitečnost sekundárních clon spočívá pouze v diagnostice. Slouží k pohlcování sekundárního záření, které vzniká v těle pacienta a zmenšuje kontrast obrazu. Sekundární clony se skládají z tenkých olověných lamel a jsou umístěny ve směru vysílání paprsků (Seidl, 2012).

1.2.5 Neutronové záření

Elektricky neutrální elementární částici zvanou neutron objevil v roce 1932 anglický fyzik James Chadwick (Beneš et al., 2015b).

Nachází-li se neutron mimo jádro, stane se velice nestabilním a jeho střední doba života činí 10^{-3} s. Hmotnost neutronu je přibližně stejná, jako hmotnost protonu. Jádra se zbavují velkého množství neutronů přeměnou β^- . Neutrony jsou částice nezpůsobující ionizaci prostředí, avšak dokážou porušit stabilitu atomu a tím vyvolat radioaktivitu u neradioaktivních látek. Reagují s nimi všechny stabilní nuklidy kromě helia. Díky tomu, že jsou neutrony elektricky neutrální, snadno pronikají do jádra, a proto jsou tyto procesy ze všech jaderných reakcí nejčastější. Neutrony nelze získat žádným jiným způsobem, než jadernými reakcemi z různých zdrojů, jakými jsou například neutronové generátory, jaderné reaktory, jaderné exploze radionuklidového zdroje (Pelclová, 2014).

1.3 Zdroje ionizujícího záření ohrožující zdraví organismu

Zdroje ionizujícího záření, které značnou měrou ohrožují zdraví ba dokonce život člověka, dělíme na přírodní a umělé. Lidé se často mylně domnívají, že jsme z největší části ozařováni z umělých zdrojů ionizujícího záření, mezi které se řadí rentgenové záření z radiodiagnostických či radioterapeutických přístrojů využívaných ve zdravotnictví, jaderné elektrárny a radioaktivní spad po jaderných haváriích a v neposlední řadě i spotřební předměty s obsahem radioaktivních látek. Avšak opak je

pravdou, nečastěji je lidská populace ozařována ze zdrojů přírodních, jako je kosmické záření a přírodní radionuklidy ze skal, půdy, vody a dokonce i našich vlastních těl. Největší složku přirozené radioaktivity zastupuje bezbarvý a bezzápachový plyn radon, pronikající z podzemí na zemský povrch. Průměrná efektivní dávka z přírodních zdrojů pro Evropskou unii činí 2,2 mSv a u nás v České republice se na této hodnotě významně projevuje právě radon a jeho dceřiné produkty, proto je hodnota efektivní dávky z přírodních zdrojů 3,4 mSv na rok. S výjimkou Francie a Japonska je největší podíl ozáření obyvatelstva způsoben právě radonem a jeho dceřinými produkty. V těchto státech se na expozici záření nejvíce podílí zdravotnické úkony (SÚRO, 2018a).

1.3.1 Umělé zdroje ionizujícího záření

Do umělých zdrojů zahrnujeme ozáření pracovníků, ale i obyvatelstva v souvislosti s profesním ozářením při nakládání se zdroji ionizujícího záření a s lékařským ozářením pacientů. Ionizující záření se ve zdravotnictví využívá hojně a to například při zmiňované radioterapii k zevnímu ozáření (kobaltové, cesiové ozařovače, leksellův gama nůž) nebo pro brachyterapii (automatické afterloadingové přístroje). Brachyterapie je léčivá metoda, při které se zavádí zářič do orgánů. Nejčastěji je k tomuto účelu využíván izotop cesia ^{137}Cs a iridia ^{192}Ir . V radiodiagnostice se k vyšetřování používá rentgenové záření (rentgenka, skiografie, skiaskopie, výpočetní tomografie, pozitronová emisní tomografie). Dalšími již podstatně méně významnými zdroji umělého záření jsou pro obyvatelstvo radionuklidy nacházející se v životním prostředí po jaderné havárii v Černobyli a také po zkouškách jaderných zbraní, které byly zastaveny v polovině 70. let. A nakonec zdroje ionizujícího záření využívaných v průmyslu, výpusti z atomových elektráren a výzkumných ústavů (Feltl a Cvek, 2008).

Vzhledem k tématu mé diplomové práce se budu již nadále zabývat jen přírodními zdroji ionizujícího záření.

1.3.2 Přírodní zdroje ionizujícího záření

Přírodnímu ozáření jsou odjakživa vystaveny všechny živé organismy bez výjimky. Z důvodu nerovnoměrnosti záření, jsou některé skupiny osob ozařovány dávkami o jeden až dva řády vyššími, než je světový průměr. Výjimečně mohou být dávky ještě

vyšší, pak jsou již na hranici dávek pro deterministické účinky záření. Přírodní záření má dva zdroje. Prvním je kosmické záření, které dopadá na Zeměkouli z vesmíru a ozařuje všechny živé organismy. Intenzita kosmického záření je různá v závislosti na nadmořské výšce a poloze člověka na Zemi. Druhým zdrojem je zemská kůra obsahující přírodní radionuklidy, které vznikly současně se zemí. Tyto dva zdroje záření vedou k dvěma typům ozáření, kterými jsou vnitřní ozáření způsobené příjmem radioaktivních prvků do organismu a zevní ozáření vyvolané působením záření pocházejícím z okolí člověka (SÚRO, 2018a).

Kosmické záření

Pochází z galaktického záření z mezihvězdného prostoru a z erupcí na Slunci a dopadá na zemský povrch. Jde o záření obsahující elektromagnetickou i částicovou složku a má z celého spektra největší energii ($10^{10} - 10^{18}$ eV). V případě, že by nás před škodlivými účinky kosmického záření nechránila atmosféra, bylo by působení přímého záření pro živé organismy velice nebezpečné (UNEP, 2016).

Jsou známy tři složky kosmického záření. Prvním je galaktické záření, které se skládá zejména z vysokoenergetických protonů, jader helia, elektronů a těžkých jader všech prvků periodické soustavy. Roční dávkový ekvivalent dělá 1 Sv. Druhou složkou je sluneční záření, jež pochází ze slunečních erupcí a je tvořeno z 99 % protony. Zbytek jsou těžší nabitě částice. Poslední třetí složku představují radiační (Van Allenovy - Vernonovy) pásy. Tvoří je protony a elektrony. Jde o dvě radiační pásma, přičemž vnější pás se zvýšeným množstvím protonů má střed kolem 20 000 km nad zemským povrchem a vnitřní pás se zvýšeným množstvím protonů a elektronů je ve vzdálenosti přibližně 3 000 km. Van Allenovy – Vernonovy pásy zabraňují pronikání částic s malou energií na Zemský povrch a vracejí je zpět do meziplanetárního prostoru (Navrátil, 2011).

Kosmické záření se ještě dělí na primární a sekundární. Primární záření letí přímo z kosmu a spadají do této skupiny tři výše zmiňované složky. Sekundární záření vzniká různými interakcemi primárního záření při průchodu atmosférou. Je tvořeno elektrony, pozitrony, fotony, které jsou měkkou složkou a v tvrdé složce se nacházejí protony, neutrony, mezony a jádra lehkých prvků (UNEP, 2016).

Biologické účinky kosmického záření jsou různé v závislosti na nadmořské výšce. Lidé obývající vysokohorské oblasti jsou ozařováni 2-3x více, než populace žijící na

úrovni hladiny moře. Intenzita kosmického záření stoupá plynule s nadmořskou výškou přibližně do vzdálenosti 20 km. Nepříznivé účinky kosmického záření se mohou projevit i u dlouhých letů nebo při kosmických letech. Intenzita je také závislá na zemské šířce. Magnetické pole Země způsobuje to, že v rozmezí 30°-60° severní a jižní šířky dosahuje záření zhruba o 10% vyšší intenzity, než na rovníku a magnetických pólech (Navrátil, 2011).

Přírodní radionuklidy

Přírodní radionuklidy vznikly čistě přírodní činností a zdrojem jsou horniny, půdy. Odtud se uvolňují do vod, ovzduší i rostlin. Podle vzniku je dělíme do dvou skupin a to na kosmogenní a terestrální radionuklidy. Terestrální lze ještě rozdělit na radionuklidy, které vznikají sekundárně z původních radionuklidů tvořících přeměnové řady a primordiální radionuklidy (Ulmann, 2015).

Kosmogenní radionuklidy

Kosmogenní radionuklidy vznikají při interakcích kosmického záření s prvky nacházejícími se ve vnějším obalu Země. Z hlediska ozáření lidské populace je nutno zmínit především dva prvky a to radiouhlík ^{14}C , tritium ^3H pak také berylium ^7Be , sodík ^{22}Na . Dalšími kosmogenními radionuklidy, které se však vyskytují, již ve velmi malých množstvích jsou berylium ^{10}Be , fosfor ^{32}P , chlor ^{36}Cl a síra ^{35}S (Ulmann, 2015).

Nejdůležitějším radionuklidem je tedy radiouhlík nebo také přírodní uhlík ^{14}C vzniká v atmosféře jadernou reakcí neutronů s dusíkem $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$. Vytváří se ho 55 % ve stratosféře a 45 % v troposféře. Izotop ^{14}C je značně reaktivní a rychle oxiduje na radioaktivní oxid uhličitý $^{14}\text{CO}_2$ přičemž se v atmosféře ještě mísí s oxidem uhličitým CO_2 . Odtud se dostává do oceánů 94 %, zbývající množství je v humusu 2,5 %, biosféře 2,0 % a 1,5 % zůstává v atmosféře. Ke zvýšenému obsahu ^{14}C v přírodě přispěla i lidská činnost za dob zkoušení jaderných zbraní, dále z jaderných elektráren, z používání radiouhlíku ve výzkumu a také ze závodů na přepracování vyhořelého jaderného paliva. Naopak snižování obsahu ^{14}C v prostředí způsobuje spalování fosilních paliv. Radioaktivní přeměna izotopu ^{14}C je jako uhlíková metoda datování využívána k určování stáří například archeologických nálezů. Tato metoda jinak také uhlíková chronometrie poskytla mnoho cenných informací i v geochemii, geologii, klimatologii či oceánografii (Hála, 2013).

Druhým nejvýznamnějším kosmogenním radionuklidem je přírodní tritium ^3H , které vzniká v atmosféře vyvoláním takzvané drolivé reakce v atomech kyslíku a dusíku. Dochází k odštěpování malých částic a také tritia. Uvolňují se i neutrony, pomocí nichž se vytváří další tritium těmito reakcemi $^{14}\text{N}(n,^3\text{H})^{12}\text{C}$ a $^{16}\text{O}(n,^3\text{H})^{14}\text{N}$. Dalším možným zdrojem tritia je stejně jako u radiouhlíku lidská činnost v podobě jaderných elektráren a výroby fosforeskujících barev. V Přírodě se tritium vyskytuje v 99 % v povrchových a podzemních vodách, odkud se dostává do lidského organismu (Hála, 2013).

Terestrální radionuklidy

Ozáření obyvatelstva těmito radionuklidy není na naší planetě kvůli geologickým procesům stejné. Jsou oblasti s nízkými dávkovými příkony a naopak místa s extrémními dávkovými příkony převyšující několikanásobně světový průměr (Reichel a Všeticka, 2018).

Primordiální radionuklidy

Primordiální radioaktivní izotopy vznikly v raných stádiích vesmíru v nitrech hvězd a dodnes v něm přetrvávají, jelikož mají dlouhý poločas rozpadu (přibližně 10^8 let). Mezi nejvýznamnější patří izotopy uranu ^{238}U , ^{235}U , thorium ^{232}Th , draslík ^{40}K . Teplo, které se uvolňuje při rozpadu těchto primordiálních radionuklidů, má geologický význam. Je zdrojem geotermální energie a zahřívá nitro Země (Podzimek, 2013).

Nejčastějším primordiálním radioizotopem v přírodě je draslík ^{40}K a jeho průměrná koncentrace v zemské kůře činí přibližně $3 \cdot 10^{-3}$ %. Poločas rozpadu dělá $1,27 \cdot 10^9$ roků. Rozpadem β^- vzniká argon ^{40}Ar (89 %) a vápník ^{40}Ca (11 %). Tyto dceřiné izotopy jsou stabilní a k dalšímu rozpadu již nedochází. ^{40}K se vyskytuje také ve všech živých organismech a pro člověka hraje velice důležitou roli. Tento biogenní prvek je v našem těle spolu se sodíkem (poměr Na^+ a K^+) důležitý pro správnou funkci a život buněk. Lidé přijímají draslík ^{40}K potravou a jeho roční ekvivalentní dávka v lidském těle činí 0,35 mSv. Na malé dávky ionizujícího záření je člověk adaptován. Tento izotop má význam v draslík-argonové metodě, využívá se k určování stáří nerostů (Friedmann, 2015).

Dalším radionuklidem, který se vyskytuje velice často v přírodě je thorium ^{232}Th a průměrný obsah v zemské kůře je asi $8\text{-}12 \cdot 10^{-6}$ %. Poločas rozpadu thoria činí dlouhých $1,39 \cdot 10^{10}$ let a díky tomu přetrvává po miliardu let od jeho vzniku ve vesmíru

až do teď. Alfa a beta rozpadem se přeměňuje na řadu radionuklidů thoriové řady, které se budu podrobněji věnovat později. Přeměna probíhá ze 78 % do základního stavu ^{228}Ra . Vyskytuje se z velké části v minerálu zvaném monazit (směs fosforečnanů, lanthanoidů s příměsí thoria a uranu) a ve stopovém množství se vyskytuje v mnoha horninách. Do budoucna se počítá s tím, že by tento izotop ^{232}Th mohl hrát důležitou roli v jaderné energetice vzhledem k rostoucí spotřebě elektrické energie a omezeným zásobám uranu. Zásoby thoria jsou šestinásobně větší (Reichel a Všeticka, 2018).

Z daleka nejvýznamnějšími primordiálními radionuklidy jsou izotopy uranu a to ^{238}U a ^{235}U . Průměrný obsah ^{238}U v zemské kůře činí $2-4 \cdot 10^{-6} \%$ a poločas rozpadu je $4,51 \cdot 10^9$ let. Průměrná koncentrace ^{235}U v zemské kůře dosahuje přibližně $2-3 \cdot 10^{-8} \%$ a poločas rozpadu $T_{1/2} = 7,1 \cdot 10^8$ let. Tyto radioizotopy se přeměňují stejně jako thorium kombinací α a β rozpadu na řadu radionuklidů uranových rozpadových řad. Uran nese svůj název podle planety sluneční soustavy a jeho objevitelem byl roku 1789 německý chemik Klaproth. Vyskytuje se v horninách a také v mnoha minerálech. Nejvýznamnějším z nich je smolnec, ze kterého byl i uran objeven. Současný provoz reaktorů jaderných elektráren a výroba radioaktivních izotopů jsou založeny na uvolňování energie štěpením izotopu ^{235}U . Přírodní uran je tvořen zejména izotopem ^{238}U . význam má v jaderné energetice jako palivo jaderných reaktorů. Využívá se i v geologii k určení stáří hornin a minerálů (Podzimek, 2013).

Z ^{238}U se dá získat takzvaný ochuzený uran (ochuzen o izotop ^{235}U). Používá se na výrobu stínících bloků ionizujícího záření a na vyvažovací závaží pro letadla. Ochuzený uran je středem zájmu zejména výrobců zbraní. Důvody jsou dva, prvním je snadná dostupnost a druhým důvodem je vysoká specifická hmotnost. Hlavní využití získal při výrobě protitankových střel. Vysoká hustota uranu dává projektilům zvýšenou kinetickou energii při malém objemu a větší průraznosti střely i vyšší účinnost ničení obrněných vozidel. Pro zdraví lidí a životní prostředí znamená použití zbraní s ochuzeným uranem jisté riziko (Friedmann, 2015).

Sekundární radionuklidy

Jsou to radionuklidy, které vznikají alfa a později i beta rozpadem těžkých primárních radionuklidů (^{232}Th , ^{238}U , ^{235}U) v přeměnových řadách. Také je můžeme nazvat dceřinými produkty, jejichž jádra emitují gama záření. Pokud je radioizotop

vzdálen od stabilních izotopů nemůže dojít jedinou přeměnou ke vzniku stability. Izotop, který vznikl z této jedné přeměny je sice blíže ke stabilitě, než předchodí, ale stále příliš daleko. To znamená, že ke stabilitě dojde až po několika přeměnách. V přírodě existují tři přeměnové řady. Je to řada thoriová, kdy mateřským izotopem je thorium ^{232}Th a tato řada končí stabilním izotopem olova ^{208}Pb . Další rozpadová řada se nazývá uran-radiová a mateřským radioizotopem je ^{238}U . Uran-radiová řada končí také izotopem olova ^{206}Pb . Třetí přeměnová řada je označována jako aktiniová a v tomto případě je mateřským izotopem ^{235}U a končí také izotopem olova ^{207}Pb . Ještě existuje jedna přeměnová řada, s kterou se však v přírodě nesetkáme, ale lze ji uměle vytvořit. Tato rozpadová řada se nazývá neptuniová. Vychází od neptunia ^{237}Np a končí vizmutem ^{209}Bi (Pohl, 2014).

1.4 Biologické účinky ionizujícího záření

Když prochází ionizující záření živou hmotou, dochází k ionizaci a excitaci molekul buněk. Částice s elektrickým nábojem ionizují přímo a neutrony s elektromagnetickým zářením nepřímo. Biologické účinky na lidský organismus jsou tím větší, čím více iontů v těle vzniká. Buňka je nejsenzitivnější vůči radioaktivnímu záření při dělení na konci fáze G_1 , protože v tuto chvíli dochází k duplikaci DNA. Naopak ve fázi S má radiosenzitivitu nejnižší, jelikož je buňka v klidu. Při ozáření buňky může dojít ke dvěma významným typům poškození, a to ke smrti buňky nebo ke změně genetické informace buňky, tedy k mutaci (National Research Council, c2006).

Rozlišujeme přímý a nepřímý účinek ionizujícího záření na lidský organismus. Při přímém účinku zasáhne záření přímo jádro buňky, poruší se chemické vazby a tím se vyvolají chemické změny v organismu. Poruchy chemických vazeb mají za následek inaktivaci až rozpad molekul. Jsou zasaženy nukleové kyseliny. Přímý účinek záření nastává zejména u tkání a orgánů s nízkým obsahem vody (Seidl, 2012).

Nepřímý účinek je naopak vázán na vodu. Přibližně 50 % vody může absorbovat ionizující záření a přitom dochází k radiolýze vody. Vytváří se škodlivé vysoce reaktivní volné radikály ($\text{H}\cdot$, $\text{OH}\cdot$), které poškozují biomolekuly. Jsou zasaženy především rozmnožovací schopnosti buňky. Čím má buňka větší schopnost k rozmnožování a čím méně je diferencovaná, tím je větší vliv ionizujícího záření.

Organismy jsou tedy citlivější na počátku vývoje. Během radiolýzy vody vznikají i její molekulární produkty, kterými jsou H_2 , O_2 , H_2O_2 (SÚRO, 2018b).

Z 20–30 % vzniká účinek přímý a 70-80 % připadá na účinek nepřímý (SÚRO, 2018b).

1.4.1 Stochastické a deterministické účinky ionizujícího záření

Stochastické neboli nahodilé účinky nemají prahovou hodnotu i minimální dávka může vyvolat onemocnění. Je to poškození malého počtu buněk i třeba jediné buňky. Objevují se po jednorázovém ozáření podprahovou dávkou z hlediska deterministických účinků anebo při chronickém ozařování malými dávkami. Poškození organismu se projevuje za dlouhou dobu od ozáření. Do stochastických účinků řadíme nádorová onemocnění, leukémie, genetická poškození i další generace (Friedmann, 2015).

Deterministické neboli nestochastické účinky jsou způsobené většinou velkou jednorázovou dávkou záření. Dávka záření musí mít určitou velikost, aby došlo ke vzniku deterministických účinků. Projevují se po ozáření celého těla nebo určité části. Je poškozeno mnoho buněk a nemohou nastat opravné procesy. Do deterministických účinků řadíme lokální poškození kůže (radiační dermatitida), akutní nemoc z ozáření (radiační syndrom), porucha plodnosti, poškození plodu a zákal oční čočky (SÚRO, 2018b).

1.5 Radon

Radonem rozumíme přírodní, radioaktivní plyn, který je bez chuti, barvy a zápachu. V periodické soustavě chemických prvků ho nalezneme v 6. periodě v 18. skupině. Má protonové číslo 86 a nukleonové číslo se pohybuje od 204 – 224. Pokud tento plyn zkapalníme, jeho barva bude intenzivně červeno-oranžová. V pevném skupenství připomíná vzhledově žlutě zbarvený diamant. Řadíme ho spolu s argonem, neonem, kryptonem a xenonem do skupiny vzácných plynů, přičemž radon je s hustotou 9, 73 $kg.m^{-3}$ nejtěžším členem této skupiny a plynným prvkem na Zemi vůbec. Je těžší, než vzduch, jeho hustota je 8x větší. Ve vodě je rozpustný a poměrně dobře se rozpouští

v některých organických látkách. Z chemického hlediska je netečný, jelikož jeho valenční elektrony plně zaplňují orbitály 6s a 6p, čímž téměř zabraňují vzniku reakcí s jinými prvky. Nejochotněji se slučuje s hexafluoroplaticitanem dioxynu. Je všudypřítomný a se svými dceřinými produkty je běžně součástí venkovního ovzduší. (Friis, 2012; Hála, 2013)

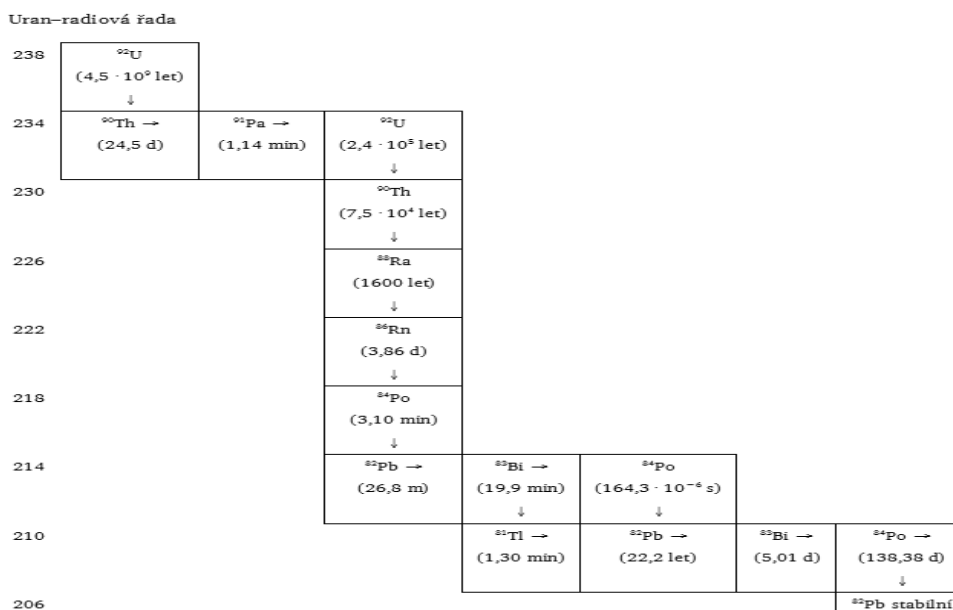
V různých koncentracích radon vzniká a následně difunduje z hornin a půd. Větší koncentrace nalezneme ve vyvěřelých, magmatických horninách (př. žuly), jelikož v době svého vzniku byly obohaceny uranem. S menšími koncentracemi se setkáváme v usazených, sedimentárních horninách, které vznikají usazením metamorfovaných a magmatických hornin. Avšak nemůžeme vyloučit, že i v sedimentárních horninách nebudou vyšší koncentrace uranu, jelikož mohlo dojít při jejich vzniku k lokálnímu nahromadění minerálů právě s vyšším obsahem uranu. V České republice je třeba věnovat pronikání radonu do objektů zvýšenou pozornost, poněvadž je geologické podloží naší vlasti z více jak dvou třetin tvořeno metamorfovanými a magmatickými horninami (SÚRO, 2018c).

Radon vzniká rozpadem uranu ^{238}U a je tedy součástí uran-radiové rozpadové řady. Přeměnami uranu ^{238}U vzniká izotop radia ^{226}Ra a z něj se teprve vytváří izotop radonu ^{222}Rn . V přírodě se nachází ve třech izotopech a to nejčastěji v 95 % jako radon ^{222}Rn , dále jako thoron ^{220}Rn a také jako aktinon ^{219}Rn . Thoron a aktinon mají velice krátký poločas přeměny, pouze v řádech sekund. Proto je jejich podíl na ozáření lidí malý a tudíž se jimi nebudu v této práci dále zabývat. Zmiňovaný radon ^{222}Rn má poločas přeměny 3, 825 dní a je se spolu se zbylými dvěma izotopy zdrojem alfa záření. ^{222}Rn byl objeven v roce 1900 německých chemikem F. E. Dornem (Gillmore et al., 2018).

Radon jako takový není pro člověka tolik nebezpečný. Z hlediska ozáření jsou spíše nebezpečné jeho dceřiné produkty. Nejprve se radon přeměňuje na radioaktivní atom polonia ^{218}Po , jehož poločas přeměny činí 3,1 minuty a rozpadá se na izotop olova ^{214}Pb , který má poločas rozpadu 26,8 minuty a dále z něj vzniká radioaktivní vizmut ^{214}Bi s poločasem přeměny 20 minut. Dochází k další přeměně a to opět na polonium, avšak na izotop ^{214}Po o poločasu přeměny $1,64 \cdot 10^{-4}$ sekundy (Hála, 2013). Vznikají ještě dceřiné produkty s dlouhými poločasy rozpadu a to jsou olovo ^{210}Pb , vizmut ^{210}Bi a polonium ^{210}Po . Na samotném konci uran-radiové řady stojí poslední rozpadový produkt a tím je olovo ^{206}Pb . Všechny tyto dceřiné produkty radonu jsou kovy, které

ulpívají na částicích prachu a jsou spolu s nimi vdechovány. Co se týká nebezpečnosti pro obyvatelstvo, jsou význačné především produkty o krátkém poločasu přeměny, jedná se tedy o ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi a ^{214}Po . Za nejškodlivější pro lidské zdraví jsou považovány oba izotopy polonia. K ozáření lidského organismu přispívá radon a další přírodní radionuklidy z 55 % (Susoeff, 2009).

Obrázek č. 1: Uran-radiová řada



Zdroj: Techmania Science Center, 2018

1.5.1 Veličiny a jednotky

Aby bylo možné stanovit účinek ionizujícího záření na lidský organismus, je třeba definovat veličiny a také jejich jednotky, které udávají míru účinku. Nejdůležitější veličiny a jednotky využívané pro stanovování radonu jsou absorbovaná dávka, objemová aktivita radonu, poločas rozpadu, efektivní dávka, ekvivalentní dávka, kerma a příjem (SÚJB, 2018).

Jak bylo výše zmíněno důležitou základní veličinou v radonové problematice je aktivita, která charakterizuje zdroj ionizujícího záření. Udává nám množství radonu v určitém prostředí podle počtu jeho radioaktivních přeměn za jednotku času (Štětina, 2014).

$$A = dN/dt$$

Aktivita je definována jako střední počet samovolných jaderných přeměn dN v daném množství látky, k nimž dochází za časovou jednotku dt . Jednotka aktivity je 1 s^{-1} a nese název po objeviteli radioaktivity, tedy becquerel [Bq]. Dříve byla používána jednotka 1 Curie [Ci] = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq se kterou se můžeme dnes ještě setkat na certifikátech zářičů. Aktivita nezůstává stálá, ale klesá s časem (ČVUT, 2011).

Pokud měříme radon v půdním vzduchu nebo v atmosféře je využívána veličina objemová aktivita radonu neboli OAR. Je charakterizována jako aktivita vztažená k objemu a je vyjadřována v jednotkách Bq/m^3 . Jestliže budeme mít například objemovou aktivitu radonu 100 Bq/m^3 znamená to, že v 1 m^3 vzduchu dochází za 1 s ke 100 radioaktivních přeměn. Objemovou aktivitu radonu můžeme měřit i ve vodě, ale používá se jednotka Bq/l. Dále se používá aktivita vztažená k celkové hmotnosti zářiče, takzvaná hmotnostní aktivita vyjadřovaná v Bq/kg. Tato veličina je využívána pro měření aktivity radonu ve stavebním materiálu, ovšem spíše je uplatňována pro ^{226}Ra . Také se můžeme setkat s plošnou aktivitou, kterou udáváme v jednotce Bq/m^2 (Navrátil a Rosina, 2005).

Dříve byla používána ještě ekvivalentní objemová aktivita radonu neboli EOAR, která se již od roku 2002 v České republice nevyužívá. Byla nahrazena objemovou aktivitou radonu. EOAR zohledňovala navíc negativní biologické účinky dceřiných produktů radonu a zavedla se proto, aby se nemuselo pokaždé uvádět zastoupení přeměnných produktů. Platila pro ni stejná jednotka, jako pro objemovou aktivitu radonu, tedy Bq/m^3 také se používala jednotka pCi/l a WL (working level) (ČVUT, 2011).

Další důležitou veličinou je poločas rozpadu. Je to doba, za kterou se přemění polovina jader dané radioaktivní látky a značí se $T_{1/2}$. Jednotkou je sekunda a λ je přeměnová konstanta. Tato veličina nám sice nevypráví nic o škodlivosti zářiče, ale stanoví nám v závislosti na čase pokles jeho aktivity (Rosina, 2013). Platí vztah

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$$

Pro působení ionizujícího záření na organismus je důležitá základní veličina dávka, nazývaná také jako absorbovaná dávka. Je charakterizována jako poměr střední energie

(dE_d) předané dané látce o určité hmotnosti (dm) ionizujícím zářením v malém prostoru. Jednotkou je gray [Gy]. Gray se rovná energii v joulech přijaté jedním kilogramem látky (Podzimek, 2013).

$$D = dE_d/dm$$

Další neopomenutelnou veličinou je kerma, což je zkratka z anglického Kinetic Energy Released in Material. Kerma K zdůrazňuje rozdíl mezi přímo a nepřímo ionizujícím zářením a udává nám vliv sekundárních částic na látku. Součet počátečních kinetických energií nabitých částic, které se uvolňují nepřímo ionizujícími částicemi v daném objemu látky, nám udává dE_k a dm vyjadřuje hmotnost. Jednotkou je opět gray [$Gy \cdot s^{-1}$] (SÚJB, 2018).

$$K = dE_k/dm$$

V ochraně před ionizujícím zářením jsou také používány veličiny zahrnující jeho biologický účinek. Biologický účinek ionizujícího záření se mění podle druhu záření a také podle dávky. Na základě čehož byla zavedena ekvivalentní dávka ($H_{T,R}$). Je charakterizována jako součin radiačního váhového faktoru w_R a střední absorbované dávky $D_{T,R}$. Radiační váhový faktor nám udává právě závislost mezi dávkou a druhem záření. Jednotkou je v tomto případě sievert [Sv] (Štětina, 2014). Ekvivalentní dávku ve tkáni určíme podle vztahu

$$H_{T,R} = w_r D_{T,R}$$

Dále byla zavedena veličina efektivní dávka, jelikož při rovnoměrném ozáření těla není biologický účinek ve všech tkáních a orgánech stejný. Efektivní dávka je součet vážených hodnot ekvivalentní dávky v jednotlivých orgánech a vynásobené tkáňovými váhovými faktory. Tyto váhové faktory vyjadřují radiosenzitivitu orgánů a tkání. Součet těchto hodnot se vždy rovná 1. Pro gonády platí hodnota 0,25, pro červenou kostní dřeň 0,12, plíce mají hodnotu také 0,12, tlusté střevo opět 0,12, štítná žláza 0,05 a játra 0,05 atd. Jednotkou je stejně jako u ekvivalentní dávky sievert [Sv] (Naranijan a Splinter, 2016). Pro efektivní dávku platí vztah

$$E = \sum_T w_T H_{T,R}$$

Aktivita radioaktivní látky, kterou přijme lidský organismus z okolí, především požitím nebo vdechnutím je označována jako příjem I . Je definován součinem koncentrace radonu a , dobou pobytu $v T$ a plicní ventilací Q (jakostní činitel). Jednotkou příjmu je becquerel [Bq] a je vyjádřen vztahem (Feltl a Cvek, 2008)

$$I = a \cdot T \cdot Q$$

1.5.2 Biologické účinky radonu na lidský organismus

Jak již bylo výše zmíněno radon, jako takový není pro lidský organismus tolik škodlivý. Problémem jsou produkty přeměny radonu (zejména izotopy polonia). Rozpadové radioizotopy radonu ulpívají v budovách na částicích prachu a na aerosolech a spolu s nimi jsou následně vdechovány. V plicích se tyto látky s krátkými poločasy rozpadu usazují a ozařují α zářením plicní sklípky a průdušky. Dochází k poškození matečných buněk, které svým dělením zajišťují obnovu tkáně. Avšak účinky záření jsou pro jedince velice individuální (Friis, 2012). Pokud ovšem záření s dostatečnou intenzitou zasáhne jádro buňky, dojde k jejímu odumření. Při nízké intenzitě nebo při částečném zasažení jádra nastává poškození buňky, která může buď zregenerovat, nebo odumřít. Buňky mohou vlivem záření také zmutovat a dojde k bujení rakovinotvorných buněk s jejich následným nekontrolovatelným dělením. V tuto chvíli se vytváří nádor, který může mít pro postiženého až fatální následky. Tyto skutečnosti jsou závislé na stavu organismu, na dávce ozáření a také na délce pobytu v ozařovaném prostředí. Podstatné je, že neexistuje žádná prahová hodnota, při které by se dalo s jistotou říct, že ke vzniku rakoviny (nejčastěji plic) nedojde (SÚRO, 2018b).

Jak jsem již uvedla, nejčastějším onemocněním vzniklým z působení radonu na organismus je rakovina plic a na druhém místě je další velice závažná nemoc, a to leukémie. Pokud je radon vdechován může dojít ke vzniku rakoviny plic, kdežto pro vznik leukémie je rizikovým faktorem pití vody s obsahem radonu. Voda s radioaktivním izotopem se vstřebává do krve a α záření poškozuje krvinky. Mechanismus poškození je podobný jako u rakoviny plic. Vliv radonu na vznik rakoviny plic je podložen statisticky z radonových map a zdravotnických informací. Podle studií světové zdravotnické organizace jsou účinky radonu na zdraví druhou nejčastější příčinou pro vznik rakoviny plic. U lidí, kteří kouří nebo kouřili, zvyšuje

radon pravděpodobnost vzniku karcinomu plic. V roce 1988 Cancer Research agentura (IARC) zařadila radon mezi prokázané lidské karcinogeny (Editor a Allin, 2011).

Od 15. století je známá takzvaná „hornická nemoc“, která byla blíže popsána až v 50. letech 20. století. Jedná se o rakovinu plic vyskytující se u pracovníků stříbrných dolů a také u horníků v uranových dolech. V 70. letech 20. století vyšlo najevo, že v některých objektech jsou koncentrace radonu opravdu alarmující, bývají dokonce vyšší než v uranových dolech (WHO, 2009).

Rakovina plic

Jedná se o nádor plic a průdušek. Nejčastěji začíná růst v oblasti průdušnice, v průdušinkách, v plicních sklípcích či v plicní tkáni. Nádory plic se řadí mezi nejčastější nádorové onemocnění dýchacího ústrojí. Zejména to je bronchogenní karcinom. Častěji se objevuje u mužů a to především ve věku od 55 do 65 let. Výskyt karcinomu plic má vzestupní trend, hlavně u žen. Bronchogenní karcinom má bohužel své prvenství v úmrtnosti na nádorové onemocnění. Zemře na něj asi 1/3 lidí (Mladosievičová, 2014).

Vznik karcinomu plic je z největší části zapříčiněn kouřením, ale hned dalším rizikovým faktorem je ionizující záření a tedy i radon. Projevuje se ztíženým dýcháním, dušností, únavou, bolestí svalů, chrapotem, změnou charakteru kašle (dráždivější s krví ve sputu), problémy s polykáním, neurologické poruchy, dochází k opakujícím se zánětům plic nebo dlouho trvajícím zánětům plic. Bohužel první příznaky karcinomu plic nejsou alarmující, takže obvykle se neprokáže v časném stadiu. Po zaznamenání příznaků je většinou již pozdě a rakovina plic je už v pokročilém stadiu (Mladosievičová, 2014).

Vyšetření se provádí objektivně jako je poslech hrudníku, prohmatání lymfatických uzlin atd. Dále se provede RTG a CT, magnetická rezonance a pozitronová emisní tomografie. Všechny typy nádorů dýchacích cest vyžadují chirurgickou léčbu, protože i nezhoubné nádory omezují průchodnost dýchacích cest. Radikální chirurgický zákrok u zhoubných nádorů není pokaždé možný, kvůli ohrožení života pacienta. K léčbě se používají i cytostatika, které mohou nádor vyléčit nebo alespoň zmenšit. K potlačení dušnosti a kašle se podávají opiáty nebo anxiolytika. Proti nevolnosti a ke zlepšení kvality života jsou předepisovány, antiemetika, kortikoidy a bisfosfonáty (Nejedlá, 2014).

Leukémie

Je to skupina zhoubných nádorových onemocnění krve. Existuje řada typů leukémie. Jednotlivé typy vycházejí z elementů hematopoézy a lymfopoézy. Leukemie jsou nejčastěji onemocněním dětí. U postiženého leukémií existují dvě populace buněk a to vycházející z normálních kmenových buněk a z maligně transformovaných kmenových buněk (Vorlíček et al., 2012).

Leukémie dělíme podle toho, jaké buňky jsou postiženy. Buď myeloidní (granulocyty, monocyty, erytrocyty, trombocyty) nebo lymfoidní (T a B lymfocyty, plasmocyty a NK buňky). Může ale také dojít k postižení pluripotentní kmenové buňky, z které vycházejí prekurzory jak myeloidní tak i lymfoidní řady a vznikne chronická myeloidní leukémie. Ta postihuje především dospělé, nejčastěji ve 30 a v 60 letech. Doba přežití jsou pouhé čtyři roky. Dále se myelomy a lymfadenomy ještě dělí na akutní a chronické. Je pravidlem, že pokud se akutní nezačnou včas léčit, končí smrtí během několika měsíců a u chronických pacienti přežívají několik let. Existují dva typy akutní leukémie, akutní lymfoblastická leukemie, kterou trpí z 80 % děti a akutní myeloidní leukémie vyskytující se v kterémkoli věku a spíše u starších lidí. Do chronické leukémie se řadí také dva typy a to chronická lymfatická leukémie vyskytující se nejčastěji u dospělých kolem 40 let s přežitím až 20 let a již zmiňovaná chronická myeloidní leukémie (Vorlíček et al., 2012).

Příčinou vzniku jsou nejčastěji ionizující záření, chemické látky (benzen, cytostatika, aromatické uhlovodíky, alkylační činidla), genetické choroby, viry (HTLV-1). Maligně transformované buňky vytlačují postupně populaci normálních buněk, a jelikož jsou funkčně méněcenné spouští určité klinické příznaky. Mezi nejčastější projevy patří zvýšená krvácivost a srážlivost krve, anémie, bledost, únava, náchylnost k infekcím, bolesti kostí, nechutenství a další (Vorlíček et al., 2012). Diagnóza se stanovuje provedením krevního obrazu, vyšetřením kostní dřeně sternální punkcí, ultrazvukovým vyšetřením dutiny břišní (posuzuje se stav jater, sleziny, uzlinových oblastí) a vyšetřením hrudníku, pánve a břicha počítačovou tomografií. Základem léčby je chemoterapie kombinovaná s léky. Provádí se i transplantace kostní dřeně od vhodného dárce (Nejedlá, 2014).

1.5.3 Historie radonu

Radon a další přírodní radioaktivní látky jsou na Zemi přítomny od jejího vzniku. V roce 1900 byl radon objeven německým fyzikem F. E. Dornem, který přišel na to, že ze soli radia vzniká radioaktivní plyn radon. Avšak již v 16. Století mineralog Georg Bauer, znám jako Georgius Agricola popsal nevídaně vysokou úmrtnost horníků pracujících ve stříbrných dolech v Sasku. Všichni umírali na rakovinu plic, ale nevědělo se z jakého důvodu. V 17. a 18. století se začalo více dolovat a tudíž rapidně vzrostla úmrtnost horníků. V tento moment se ještě více zvýšila pozornost o smrtící onemocnění později pojmenované jako „hornická choroba“. Dlouho však nebyla známá příčina nemoci. Po objevení radonu v roce 1900 začal být považován za rizikový faktor, avšak až v roce 1950 začaly být v dolech měřeny jeho koncentrace a po roce 1952 byla jeho nebezpečnost potvrzena. Biofyzik W. F. Bale a nezávisle na něm český akademik Běhounek objevili důvod vzniku rakoviny plic u horníků. Zjistili, že při vdechování produktů přeměny radonu s krátkým poločasem rozpadu (Po, Bi, Pb) dochází k usazování těchto látek v plicích a k následnému ozařování kmenových buněk výstelky dýchacích cest. Objev vedl k úsilí snižovat výskyt rakoviny plic u horníků v uranových dolech a ke snaze najít vztah mezi expozicí radonu a vznikem rakoviny plic. To bylo provedeno na základě epidemiologických studií rakovin plic u skupin horníků u nás pod vedením Dr. Švece. U horníků byl zaznamenán nárůst počtu rakoviny plic a tím se potvrdila karcinogenita radonu (SÚRO, 2018d).

Hultquist v roce 1956 našel v bytech ve Švédsku vysoké koncentrace radonu. Zjistil, že se uvolňuje z nového stavebního materiálu, pórobetonu a že je do domů nasáván z ledovcového podloží. Nebylo to ovšem dál řešeno, jelikož se mělo za to, že jde pouze o lokální problém. Až v 70. letech 20. století byly vysoké koncentrace radonu naměřeny i v dalších zemích. Tato skutečnost konečně vyvolala odezvu a byly zavedeny národní antiradonové programy (Radonový program České republiky, 2016).

1.5.4 Radon v České republice

V České republice byla příprava na radonový program zahájena v Jáchymově roku 1978. Jelikož právě zde je přirozeně vyšší radonové riziko z podloží a používal se k výstavbě budov stavební materiál obsahující vysoce radioaktivní odpad z místní výroby uranových barev a radia. V Jáchymově se kdysi těžila stříbrná ruda obsahující

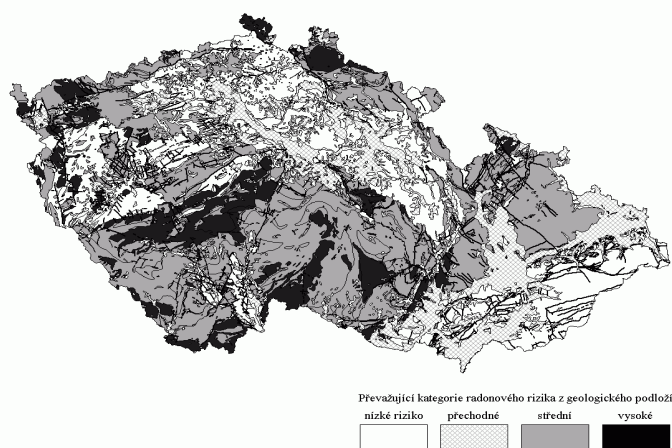
uran, čímž došlo k místní kontaminaci zbytky z těžby (Radonový program České republiky, 2016).

Mezi lety 1980-1982 byly odhaleny v pórobetonu vyráběném v Poříčí u Trutnova vysoké koncentrace radia a to řádově vyšší, než připouštěla norma. Na vině byl elektrárenský popílek z místní elektrárny v Poříčí u Trutnova, který byl přidáván do pórobetonu. V této elektrárně se spalovalo černé uhlí obohacené o uran ze žacléřsko-svatoňovické uhelné pánve. Z radioaktivního stavebního materiálu bylo vystavěno celkem přibližně 30 000 domů, ale koncentrace radonu v bytech, kterou povolovala norma, byla překročena pouze v několika procentech. I přes to bylo vydáno rozhodnutí snížit ve vyráběném stavebním materiálu obsah radia a byl zahájen výzkum protiradonových opatření se zaměřením na stavební materiály (SÚRO, 2018d).

Další případ výskytu vysoké koncentrace radonu ve stavebním materiálu bylo použití škváry z bývalé elektrárny v Rynholci u nového Strašecí. Škvára obsahovala dokonce čtyři krát více radia, než pórobeton vyrobený v Poříčí u Trutnova. Avšak uvolňování radonu z tohoto materiálu bylo nižší. Příčinou byla jako u předchozího případu uranonosná sloj ale z bývalého místního dolu Anna v rakovnické části kladenské uhelné pánve. Z tohoto škvárobetonového materiálu bylo mezi lety 1972-1983 vyrobeno přibližně 3 000 rodinných domů i montované rodinné domy typu START. V těchto domech byl kromě radonu naměřen i vyšší dávkový příkon gama záření. Vláda se začala problémem zabývat před rokem 1989 a majitelům těchto domů nabídla výkup nebo sanaci. Většina majitelů se rozhodla pro realizaci protiradonových opatření (Radonový program České republiky, 2016).

V 80. letech 20. století byly na území České republiky nalezeny domy s vysokými koncentracemi radonu a příčinou bylo jeho pronikání z podloží. Česká republika patří mezi země světa s nejvyššími koncentracemi radonu v budovách. Průměrná hodnota radonu u nás je 118 Bq/m^3 . Český geologický ústav se tímto problémem, pronikáním radonu do budov z podloží, začal zabývat a vytipoval oblasti s přepokládaným nízkým, středním a vysokým radonovým rizikem a připravil mapy s radonovým indexem.

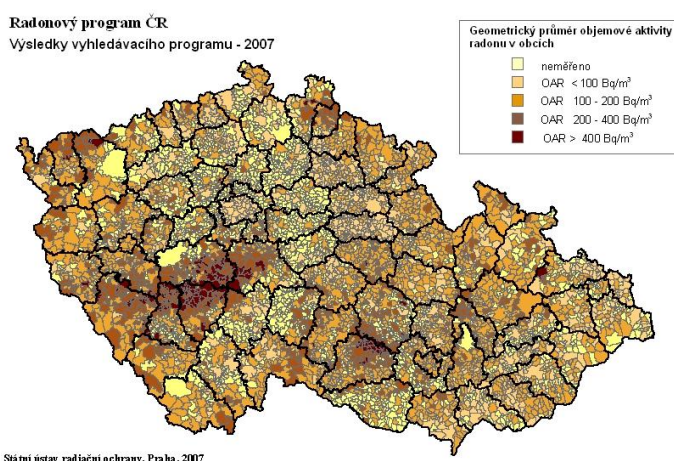
Obrázek 2: Geologická prognózní mapa



Zdroj: SÚRO, 2018h

Zhruba ve 2-3 % domů jsou koncentrace radonu vyšší, než 400 Bq/m^3 . Zpravidla to bývají sklepy a přízemní části staveb, jelikož radon stoupá z podloží komínovým efektem. Bylo zahájeno proměřování území České republiky. Proměřilo se více jak 150 000 objektů. Díky získaným hodnotám z těchto měření byla vytvořena grafická mapa zachycující výsledky koncentrace radonu v domech. Mapa znázorňuje každou měřenou obec (více jak 5 objektů v obci) a barvami je vyobrazena určitá průměrná koncentrace radonu v dané lokalitě (SÚRO, 2018d).

Obrázek 3: Grafická mapa měření radonu v obcích ČR



Zdroj: SÚRO, 2018i

Dále bylo zahájeno ověřování sanačních postupů a také jejich financování. Opatření bylo do této chvíle provedeno ve více jak 2 000 rodinných domů a dětských zařízeních (Radonový program České republiky, 2016).

1.5.5 Legislativa

V roce 1991 byla pro radonovou problematiku vydána první radonová vyhláška ministra zdravotnictví č. 76/1991 Sb. o požadavcích na omezování ozáření z radonu a z dalších přírodních radionuklidů. Poté byla vydána usnesení vlády k radonové problematice, která pojednávala o poskytnutí státních dotací na protiradonová opatření č. 150/1990 Sb. a č. 709/1993 Sb. Roku 1997 byl přijat atomový zákon č. 18/1997 Sb. o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření, ve znění pozdějších předpisů a vyhláška SÚJB (státní úřad pro jadernou bezpečnost) o radiační ochraně č. 184/1997 Sb. Tato legislativa ukládá povinnost změřit radonový index pozemku na místech výstavby nových objektů, výrobcům stavebních materiálů povinnost měřit jejich radioaktivitu a dodavatelům vody povinnost měřit radioaktivitu dodávané vody. Udává nám také směrné a mezní hodnoty pro určení radonového rizika a případné přijetí opatření. Byly ustanoveny i směrné hodnoty pro nové a stávající objekty (SÚRO, 2018c; Vyhláška č. 184/1997 Sb.).

Na atomový zákon navazovala vyhláška č. 146/1997 Sb., která pojednává o měření a hodnocení výskytu radonu a produktů přeměny ve stavbách a o stanovení radonového indexu pozemku. Byla novelizována vyhláškou č. 315/2002 Sb. na ně navazuje ještě vyhláška č. 132/2008 Sb., o systému jakosti při provádění a zajišťování činností souvisejících s využíváním jaderné energie a radiačních činností a o zabezpečování jakosti vybraných zařízení s ohledem na jejich zařazení do bezpečnějších tříd (SÚRO 2018c).

Problematiku radonu dále více rozpracovala novela vyhlášky o radiační ochraně 307/2002 Sb. ve znění vyhlášky 499/2005 Sb. Nově platí č. 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje. V této legislativě nalezneme i podrobnosti ke stanovení radonového indexu pozemku. Novelou prošel i atomový zákon, nyní 263/2016 Sb. Z počátku se radonovou problematikou mělo zabývat Ministerstvo životního prostředí. Až v roce 2000 dostal radonovou problematiku do gesce státní úřad pro jadernou bezpečnost (Vyhláška č. 307/2002 Sb.; Vyhláška č. 422/2016 Sb.; Zákon č. 263/2016 Sb.)

Veškerá kritéria pro hodnocení staveb, stavebního materiálu a vody jsou ukotvena v atomovém zákoně č. 263/2016 Sb. a ve vyhlášce o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje č. 422/2016 Sb. V této vyhlášce jsou ještě navíc ustanoveny směrné a mezní hodnoty, jak již bylo zmíněno výše (Vyhláška č. 422/2016 Sb.; Zákon č. 263/2016 Sb.).

Dále je problematika radonu regulovaná stavební legislativou. A to zákonem č. 183/2006 Sb., o územním plánování a stavebním řádu. Požadavky na stavební dokumentaci nalezneme ve vyhlášce č. 503/2006 Sb. a nutnost prokazování ochrany stavby před škodlivými vlivy je obsažena ve vyhlášce č. 499/2006 Sb. (SÚJB, 2018).

Stavby

Každý, kdo navrhuje postavení nové stavby nebo přístavby musí zajistit stanovení radonového indexu pozemku. Každý, kdo chce provést změnu před dokončením stavby, která bude obsahovat obytné místnosti anebo žádá o změnu v užívání stavby, která bude nově obsahovat obytné místnosti, musí zajistit měření úrovně objemové aktivity radonu ve stávající budově. Pokud dojde k překročení mezních hodnot je vlastník budovy povinen usilovat o to, aby ozáření osob žijících v budově bylo co nejnižší. Vlastník školy či školského zařízení je povinen zajistit měření objemové aktivity radonu ve vnitřním ovzduší před uvedením do provozu a vždy po provedení změn, které by mohly hodnoty objemové aktivity radonu ovlivnit. Jde především o zásahy do izolace stavby proti pronikání radonu z geologického podloží a úpravy vedoucí ke snížení účinnosti ventilace ve stavbě (Zákon č. 236/2016 Sb.; Vyhláška č. 422/2016 Sb.).

Dojde-li k překročení objemové aktivity radonu ve vnitřním ovzduší nebo stanovené hodnoty ročního průměru objemové aktivity radonu ve vzduchu, je vlastník budovy povinen provést protiradonová opatření (Vyhláška č. 422/2016 Sb.).

Směrné hodnoty pro stávající budovy jsou 300 Bq/m^3 pro objemovou aktivitu radonu ve vnitřním ovzduší obytné místnosti a $1 \text{ } \mu\text{SV/h}$ pro maximální příkon fotonového dávkového ekvivalentu v obytné místnosti ve výšce 1 m nad podlahou a vzdálenosti 0,5 m od stěny (Vyhláška č. 422/2016 Sb.).

Roční průměrná objemová aktivita radonu ve vzduchu v budově, při které je majitel budovy povinen provést ozdravná opatření je $3\,000 \text{ Bq/m}^3$ (Vyhláška č. 422/2016 Sb.).

Stavební materiály

Stavební materiál nesmí být podle atomového zákona dodáván na trh v České republice, jestliže by efektivní dávka ze zevního ozáření zářením gama mohla překročit referenční úroveň. Výrobci a dovozci jsou povinni měřit a hodnotit obsah radia ve stavebních materiálech. Opět jako u staveb jsou k hodnocení vymezeny směrné a mezní hodnoty. Obsah radia ve stavebních materiálech nesmí být vyšší, než mezní hodnoty, jinak nesmí být uveden do oběhu (Zákon č. 236/2016 Sb.; Vyhláška č. 422/2016 Sb.).

Nesmí být překročena mezní hodnota 150 Bq/kg pro materiály používané ve velkém množství, jako jsou cihly a beton. Dále 200 Bq/kg pro materiály používané v omezeném množství, což jsou například obkladačky a 100 Bq/kg pro materiály, které jsou využívány ke stavbě neobytných prostor (například silnice) (Vyhláška č. 422/2016 Sb.).

Voda

Dodavatelé vody do veřejných vodovodů musí jednou ročně provést systematické měření a hodnocení obsahu radonu ve vodě. Pitná voda nesmí být veřejnosti dodávána ani v podobě balené vody, pokud objemová aktivita radonu překročí nejvyšší přípustnou hodnotu nebo obsah přírodních radionuklidů překročí referenční úroveň a nebylo provedeno opatření. Objemová aktivita radonu nesmí být vyšší jak mezní hodnota 300 Bq/l, jinak nemůže být dodávána do veřejných vodovodů. V případě překročení této hodnoty musí být provedena vhodná opatření vedoucí ke snížení obsahu radonu ve vodě nebo je třeba nahradit zdroj vody. Jestliže je překročena směrná hodnota 50 Bq/l zvažuje se, zda i v tomto případě není vhodné radon z vody odstranit (Zákon č. 236/2016 Sb.; Vyhláška č. 422/2016 Sb.).

Zákon neukládá povinnost měřit obsah radonu ve vodě, která je používána k individuální potřebě. Nejsou stanoveny limity, pouze je doporučeno provést opatření při překročení směrné hodnoty (Zákon č. 236/2016 Sb.).

1.5.6 Radonový program

Na základě průzkumu provedeného v České republice v roce 1993, z kterého vyšlo najevo, že přibližně 35 000 domů je vystaveno vysokým koncentracím radonu. Naměřené hodnoty byly vyšší, než 400 Bq/m³. Byl usnesením vlády ČR č. 538 ze dne 31. května 1999 schválen radonový program na období od roku 2000 do 2009. Dne 7.

října 2002 bylo přijato druhé usnesení vlády ČR č. 970, které původní radonový program doplnilo (SÚJB, 2010).

Hlavním cílem programu je snížit koncentrace radonu v budovách (v nových i stávajících) a tím snížit ozáření obyvatel přírodními radionuklidy a zamezit tak vzniku rakoviny plic, čímž dojde i ke snížení počtu úmrtí. S tímto cíle souvisí řada úkolů. Těmito dílčími úkoly jsou například příprava radonových map, vyhledávání staveb s vysokými koncentracemi radonu, protiradonová opatření ve stavbách s vysokým obsahem radonu, úprava vod s obsahem radonu informovanost veřejnosti a v neposlední řadě i vývojová a výzkumná činnost (WHO, 2009). Cílovou skupinou všichni občané České republiky a zejména lidé plánující výstavbu nového domu v místě s vysokým radonovým rizikem nebo majitelé již postavených domů, ve kterých došlo k naměření vysoké objemové aktivity radonu. Radonový program má na starosti Státní úřad pro jadernou bezpečnost ve spolupráci se Státním ústavem radiační ochrany a krajskými úřady. Dále se na programu podílí Český geologický ústav, České vysoké učení technické v Praze, Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy a Asociace radonové riziko. Metrologie radonu se provádí v rámci tohoto průzkumu bezplatně a pomocí stopových detektorů umístěných do obytných částí budov na 1 rok. Po vyhodnocení výsledků jsou majiteli (případně uživateli) prostřednictvím krajského úřadu zaslány a nesmí být nikde zveřejněny (Lajčíková, 2010).

Na výsledky radonového programu pro období 2000-2009 navázal nový akční plán a to radonový program ČR 2010- 2019. Je zpracován podle současné legislativy ČR a zohledňuje aktuální trendy v členských státech. Dle nové směrnice Rady 96/ 29/ Euroatom jsou zdůrazňovány požadavky na regulaci ozáření z přírodních zdrojů. V tomto akčním plánu si každý členský stát zvolil cíle a strategie pro snížení rizika rakoviny plic z radonu, stanovení požadavků na pracoviště se zvýšeným rizikem přírodního ozáření, identifikace oblastí se zvýšeným radonovým rizikem, stanovení příslušných referenčních úrovní jak pro prevenci, tak i pro ozdravování stávajících budov. Dále byly určeny cíle a úkoly pro zpracování metod měření a ozdravování, rozdělení odpovědnosti mezi správní orgány a pro informovanost veřejnosti. Cílovou skupinou jsou opět všichni občané, ale klade se důraz na obyvatele žijící ve starých domech se zvýšenou objemovou aktivitou radonu a nově také na stavebníky nových bytů (WHO, 2009; SÚJB, 2010)

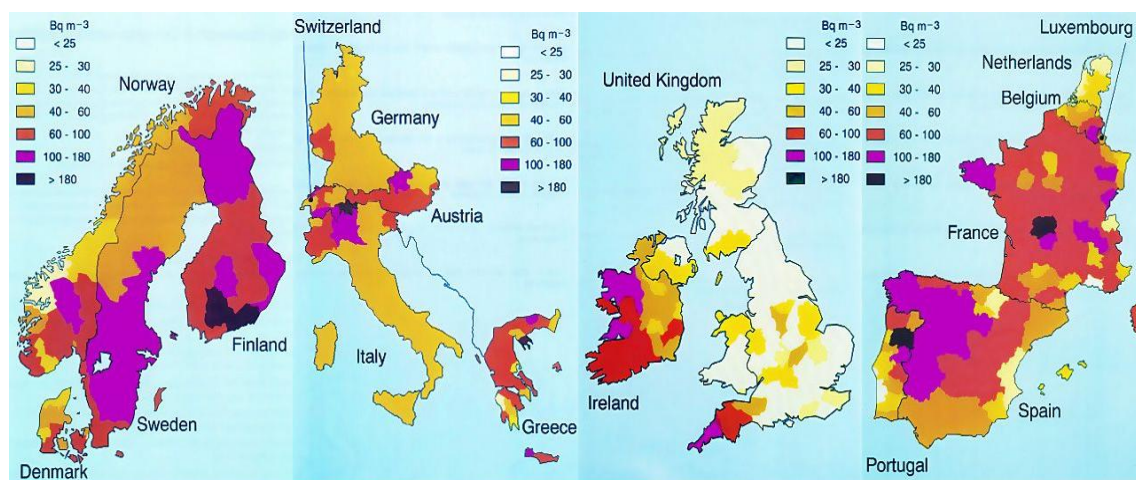
Financování akčních plánů je ze státního rozpočtu. Výše prostředků potřebných pro plnění úkolů akčního plánu je by měla odpovídat výdajům potřebným pro plnění radonového programu pro léta 200-2009. Státní dotace na ozdravná protiradonová opatření mohou být poskytována v souladu s § 103 atomového zákona č. 263/2016 a v souladu s vyhláškou státního úřadu pro jadernou bezpečnost č. 362/2016 Sb., o podmínkách poskytující dotace ze státního rozpočtu v některých existujících expozičních situacích (Lajčíková, 2010; Vyhláška 362/2016 Sb.).

Světová zdravotnická organizace WHO na základě nových poznatků o radonovém riziku vyhlásila celosvětový projekt International Radon Project a i nadále se hodlá radonovou problematikou intenzivně zabývat (WHO, 2009).

1.5.7 Radon ve světě

Problematika radonu v budovách je závažné téma, kterým se zabývají vědci, politici a experti po celém světě. Pro významnost rizika radonu a jeho dceřiných produktů dochází k organizovaným měřením v domácnostech téměř ve všech zemích Evropy. Radonový program je zaveden a rozvíjí se v Zemích s nejdelší zkušeností s radonovou problematikou. Jde o státy ležící tedy na geologickém podloží s vysokým radonovým rizikem. Jsou to země Skandinávského poloostrova, Irsko, jihozápadní výběžek Anglie, část Portugalska, Francie, Švýcarska, Řecka, části USA a Kanady, ale řadíme sem i Českou republiku. Naopak zemí s nízkým radonovým rizikem je Holandsko a proto nemají ani zavedený radonový program (RADONtest, a).

Obrázek 4: Koncentrace radonu v domech v Evropě



Zdroj: RADONtest, a

1.5.8 Radonový index pozemku

Popisuje míru rizika pronikání radonu z podloží do staveb. Radonový index pozemku se stanovuje z měření objemové aktivity radonu v půdním vzduchu, z posouzení plynopropustnosti a z dalších vlastností geologického podloží. Na základě těchto skutečností se určí, zda má pozemek nízký, střední nebo vysoký radonový index. Čím je vyšší koncentrace radonu v podloží a čím je vyšší propustnost půdních vrstev, tím vyšší je radonový index pozemku. Měření se provádí odběrem půdního vzduchu z pozemku, pomocí alespoň patnácti odběrových tyčí zatlučených do země do hloubky přibližně 0,8 m rovnoměrně rozmístěných po ploše půdorysu stavby a u ploch větších jak 800 m v rozmezí 10 x 10 m. Půdní vzduch se odsaje do sběrných komor a vyhodnocuje se v laboratoři. Dále se odebírají ještě vzorky půdy z vrtaných či kopaných sond z hloubky 0,8 m, které slouží ke stanovení plynopropustnosti (Barnet a Fojtíková, 2005).

Obrázek 5: Tabulka stanovení radonového indexu

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

Zdroj: Geopro, 2004

Žadatel o stavební povolení je ze zákona povinen nechat si provést posudek, který zpracuje autorizovaná osoba z výsledků měření a šetření. Vypracovaný protokol o stanovení radonového indexu stavebního pozemku musí žadatel předložit stavebnímu úřadu. Na pozemku se středním či vysokým radonovým indexem musí majitel budoucí stavby nechat provést protiradonová opatření podle podmínek stanovených stavebním úřadem. S radonovým indexem pozemku úzce souvisí radonový index stavby (SÚJB, 2004).

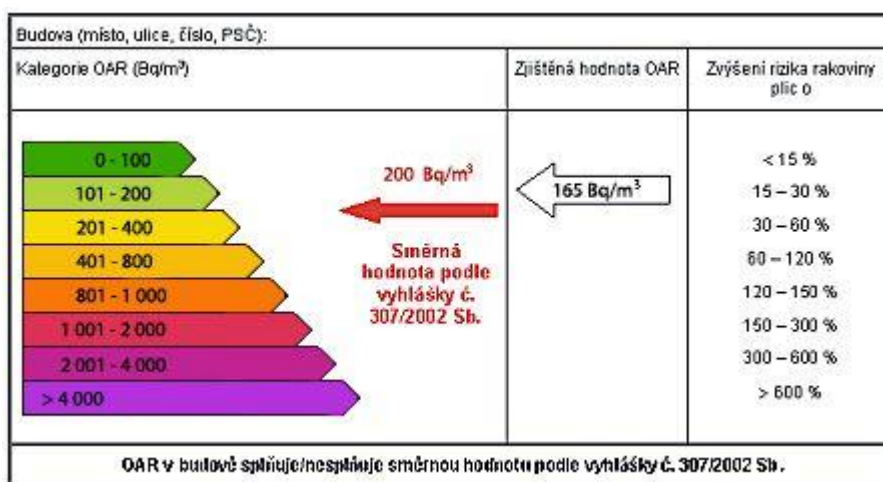
1.5.9 Radonový index stavby

Zpracovává ho projektant na základě radonového indexu podloží a dalších skutečností, jako jsou například výšková poloha základové spáry, úprava podloží mající vliv na propustnost plynu nebo podzemní vody. Radonový index může být nízký, střední a vysoký (Jiránek a Honzíková, 2013).

1.5.10 Radonový štítek stavby

V roce 2006 byla vydána norma ČSN 73 0601 – ochrana staveb proti radonu z podloží. Cílem bylo stanovit postupy při provádění protiradonových opatření a byl zaveden nový pojem radonový štítek budovy. Udává nám informaci o úrovni zdravotního rizika, kterému je člověk vystaven. Jeho úloha je pouze informativní. Radonový štítek mimo jiné obsahuje identifikační údaje o budově, jejím majiteli, o zpracovateli štítku, výsledky měřené objemové aktivity radonu, příkonu fotonového dávkového ekvivalentu v místnostech a další. Radonový štítek se vystavuje buď pro celou stavbu, nebo jen pro určitou část. Můžeme ho využít při prodeji stavby, prokázání naměřených hodnot radonu v budově, což je potřebné při kolaudačním řízení atd. (Neznal a Neznal, 2009).

Obrázek 6: Radonový štítek budovy

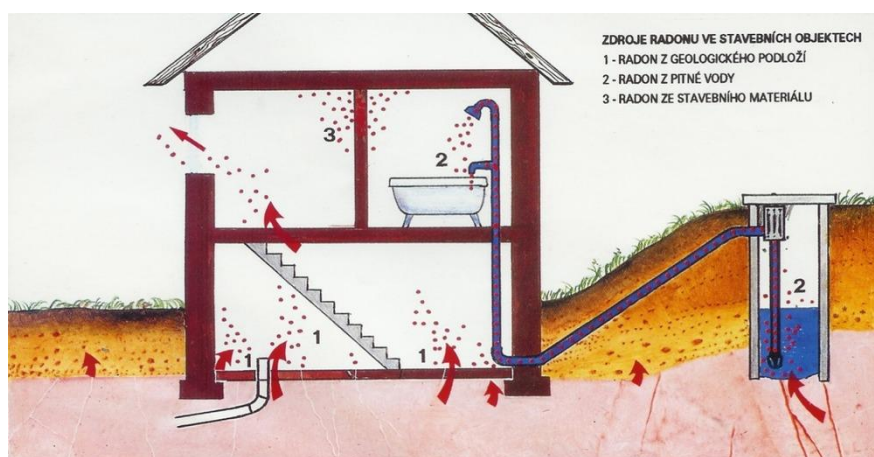


Zdroj: RADONtest, b

1.5.11 Zdroje radonu v budovách

Jsou známy tři základní zdroje radonu a to z geologického podloží, což je nejčastější zdroj, dále z dodávané vody a ze stavebního materiálu. Koncentrace radonu se ve stavbách mění v závislosti na ročním období, meteorologických vlivech a mění se i ve dne a v noci. Nejvyšší koncentrace radonu bývá v co nejbližší blízkosti se zeminou a ve vyšších podlažích klesá. S radonem se můžeme setkat i ve venkovním ovzduší nebo v zemním plynu. Nad povrchem země ve volném prostranství se radon mísí, a tedy ředí se vzduchem, proto jeho koncentrace nejsou tak alarmující jako v budovách. Uvnitř domů je rozptyl vzduchu omezený a radon odtud uniká pomalu (Jiránek, 2001).

Obrázek č. 7: Zdroje radonu v objektech



Zdroj: Sýkora, 2015

Z geologického podloží

Jak již bylo uvedeno výše, radon se dostává do atmosféry z horních vrstev půdy. Je součástí půdních plynů, které vyplňují póry v zemině. Uran se přemění podle rozpadové řady až na radium a z něj vzniká radon. V půdním vzduchu se jedná o směs Rn^{222} a Rn^{220} . Zabýváme se většinou pouze Rn^{222} , jelikož Rn^{220} se pro svůj krátký poločas rozpadu dostane do staveb v zanedbatelném množství (Rosario a Wichmann, 2006; Danihelka, 2009).

Radon se spolu s půdním vzduchem postupně dostává do mezivrstevních prostor hornin a postupuje až do rozvětraných částí hornin a k povrchu zemskému. Emanční rychlost radonu z půdy je přibližně 20 Bq/m^2 za sekundu. Přesná hodnota emanční rychlosti je závislá na typu půdy, teplotě, vlhkosti půdy a na rozdílu mezi tlakem atmosférickým a půdním. Koncentrace radonu v půdě 1 m pod povrchem bývá v České

republiky v rozmezí 1 – 100 kBq/m³ a v extrémních případech dokonce i více než 1 000 kBq/m³. Průměrná hodnota aktivity radonu v budovách je ve světě 40 Bq/m³ a v České republice je tato hodnota znatelně vyšší 58 Bq/m³. Vyšší hodnoty jsou měřeny na Příbramsku, v Západních Čechách a na Českomoravské vysočině. Vysoký obsah radia je obecně ve vyvřelých horninách, mezi které řadíme durbachity, žuly atd. Střední obsah radia nalezneme v metamorfovaných horninách, to jsou například pararuly. A nejnižší obsah bývá v sedimentárních horninách, to jsou jílovce a pískovce (Česká geologická služba, 2012; Hála, 2013).

Největší množství radonu se do objektů dostává tedy z geologického podloží. Je tomu tak, především v důsledku rozdílu mezi tlakem vzduchu v budově a tlakem půdního plynu. Vzduch uvnitř domu je teplejší, má tedy nižší hustotu i tlak než půdní plyn, proto v domě stoupá nahoru a je nasáván půdní plyn trhlinami v základových deskách a ve stěnách, konstrukčními spoji netěsnostmi kolem kabelů, potrubí, šachet a poklopů. Radon se může do budovy dostávat i takzvaným trativodem neboli odvodňovacím drenážním potrubím. Tomuto transportnímu mechanismu, kdy se uplatňuje rozdíl tlaků, říkáme konvekce, je zde vyvolán komínový efekt. Dalším mechanismem, jak se radon může dostat do budov je difuze plochou konstrukce v závislosti na rozdílu koncentrací v podloží a interiéru. Koncentrace radonu v budově je také závislá na intenzitě větrání (Vlček a Beneš, 2005).

Těsnost konstrukce domu je dána použitým stavebním materiálem, kvalitou provedení, technologií, ale také vznikem poruch za dobu užívání budovy. Zcela nevhodné jsou prkenné podlahy na škvárovém podsypu nebo suché dlažby kladené přímo do zeminy. Pro radon nepředstavují žádnou zábranu, jsou plně prodyšné. Popraskané a drolicí se betony bez hydroizolace také nezabrání prostupu radonu do objektu. Naopak kvalitní hutné betony, neporušené cihelné suterénní stěny a kontaktní konstrukce opatřené hydroizolací snižují pronikání radonu do domu. Do domů postavených na pilířích, radon vnikat nemůže, jelikož je budova od zeminy oddělen vrstvou proudícího vzduchu (Kolář a Reiterman, 2012; Svoboda, 2013).

Ze stavebního materiálu

Stavební materiál v současné době není tak významným zdrojem. Značné riziko pro obyvatele představoval v minulosti, proto je problémem spíše u stávajících starších budov. Z vysoce radioaktivního stavebního materiálu byly v 70. a 80. letech 20. století

stavěny domu typu START. Nejzávažnější překročení směrných hodnot radia ve stavebním materiálu bylo v Jáchymově (až 100 000 Bq/kg, přibližně tisíckrát více než připouští dnešní limity). Dále ve středočeském kraji (i některá sídliště v Praze, Kladně a ve Slaném), kde se používal materiál vyráběný z Prefy Hýskov z ryncholecké škváry (1 000 až 4 000 Bq/kg). Posledním závažným překročením směrných hodnot ve stavebním materiálu došlo v Poříčí u Trutnova, kde se vyráběly plynosilikátové tvárnice s obsahem radia do 900 Bq/kg. Významným zdrojem radonu mohly být v minulosti i po domácku vyráběné škvárobetonové nebo popílkové tvárnice. Dříve stavebníci ve snaze ušetřit peníze používali škváru a popílek z různých hald, proto není vyloučeno, že obsahovaly zvýšený obsahem radia (Jiránek, 2001; Šedivý, 2013).

V dnešní době musí být povinně všechny stavební materiály v ČR před uvedením na trh zkontrolovány státním úřadem pro jadernou bezpečnost. Je to dáno atomovým zákonem a vyhláškou č. 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje. Dříve byly problémem stavební materiály s obsahem radia. V ČR je obsah radia v stavebním materiálu v řadech desítek Bg/kg. Obsah radia ve stavebním materiálu záleží na zemi výroby (Vyhláška č. 422/2016 Sb.).

Avšak musíme brát v úvahu, že většina stavebních materiálů je vyrobena z přírodních surovin, jako je jíl, písek, šterky, popílek, cihlářské jíly a hlíny, struska a podobně. Tudíž obsahují určité množství radia. V roce 1999 byly naměřeny hodnoty ozáření ze stavebního materiálu 0,4- 0,6 mSV za rok. To je přibližně desetkrát méně než ozáření z radonu, který pronikl do budovy z podloží. Nicméně i přesto bychom měli radonu ze stavebního materiálu věnovat pozornost, jelikož se uplatňuje jak zevní ozáření pronikavým zářením gama tak i vnitřní ozáření inhalací produktů přeměny radonu. Poločas rozpadu radia je 1 600 let, takový stavební materiál obsahující radium se stává trvalým zdrojem radonu a gama záření. Z hlediska ozáření osob jsou významné stavební materiály, které se používají ve velké míře na výstavbu domu, jako jsou cihly, tvárnice nebo beton. Ve většině případů je v tomto materiálu malé množství radia (Rosario a Wichmann, 2006; SÚRO, 2018c).

Z vody

Posledním základním zdrojem radonu v budovách je voda. Radon je dobře rozpustný ve vodě, a proto se z hornin a zemin dostává do vody. Obecně je v podzemních vodách vyšší koncentrace radonu, než ve vědách povrchových, kvůli

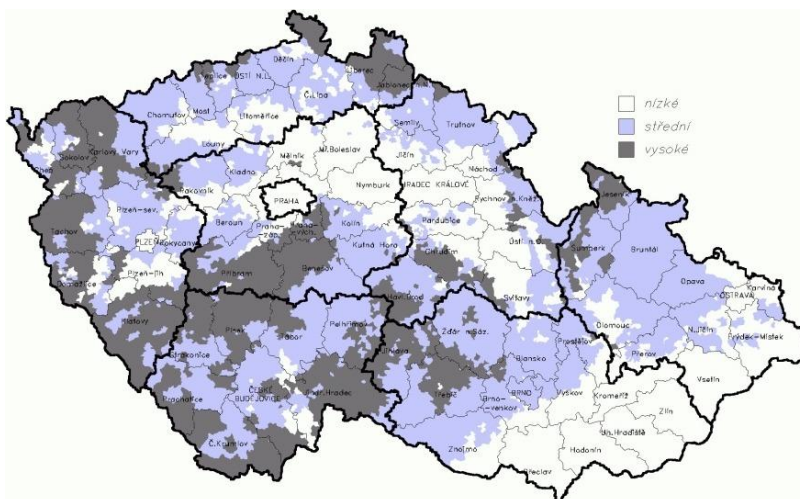
dlouhodobému kontaktu s podložím s vyšším obsahem radonu. Hodnoty objemové aktivity radonu v podzemních vodách se pohybují od 10 do 1 000 Bq/l. Jsou srovnatelné s hodnotami radonu v pórech hornin a půd. V Jáchymově, ale i na jiných místech ČR se setkáváme i s hodnotami 10 000 – 1 000 000 Bq/l (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, 2004; Sýkora, 2015).

Problémem je vedle ingesce radonové vody i vdechování uvolněného radonu do vnitřního vzduchu. K čemuž dochází při spotřebě vody, tedy při sprchování, koupání, vaření, praní, mytí. Při spotřebě této vody se radon rozptýlí do vnitřního ovzduší, objemová aktivita se zvýší a podle intenzity ventilace se postupně opět sníží. Nejrizikovějším místem jsou proto koupelny bez odvětrávání. V jakém množství se dostane radon z vody do ovzduší, záleží na velikosti a způsobu spotřeby. Průměrné ozáření radonem z vody je přibližně 0,05 mSv (Sýkora, 2015).

Voda dodávaná veřejnosti podléhá kontrole a případné úpravě. Kromě radonu mohou být ve vodě nalezeny i jiné přírodní radionuklidy, například radium nebo izotopy uranu. Zjišťování přítomnosti radionuklidů ve vodě je velice pracné, ale také nákladné. Z tohoto důvodu se používají dva skupinové ukazatele (celková objemová aktivita alfa a beta) a jsou pro ně stanoveny směrné hodnoty. Až pokud jsou tyto hodnoty překročeny, přistupuje se ke zjišťování obsahu jednotlivých radioaktivních izotopů. Měření provádějí dodavatelé vody jednou ročně a vedou si evidenci o výsledcích, kterou jsou povinni uchovat po dobu pěti let (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, 2004).

Velké riziko představuje individuální zásobování vodou, jelikož je měření pouze doporučeno. Je vhodné, aby si majitelé vlastního zásobování (studny apod.) také nechali ve svém vlastním zájmu přeměřit koncentrace radonu. Zejména pokud se vlastní zdroj vody nachází v oblasti s vysokým radonovým rizikem z geologického podloží. Voda, která překročí limit 2 Bq/l pro celkovou aktivitu alfa a 5 Bq/l pro beta nesmí být dále užívána jako pitná, nýbrž pouze jako voda užitková (Sýkora, 2015).

Obrázek č. 8: Mapa výskytu radonu v podzemní vodě



Zdroj: Sýkora, 2015

1.5.12 Dotace

Poskytování státních dotací vychází z atomového zákona č. 263/2016 Sb. a upravuje ho vyhláška č. 462/2005 Sb., o distribuci a sběru detektorů k vyhledávání staveb s vyšší úrovní ozáření z přírodních radionuklidů a stanovení podmínek pro poskytnutí dotace ze státního rozpočtu a z Metodického postupu Ministerstva financí ČR čj. 12/68 521/2009 – 124 (SÚRO, 2018e).

Jelikož se ve své práci zabývám radonem ve školách a školských zařízeních, budu dále rozebírat státní dotace pouze pro školy a školská zařízení. Avšak postup pro získání dotací pro majitele domů je v podstatě stejný (Radonový program České republiky, 2016).

Obsah radonu v ovzduší je možné zjistit měřením a to buď na základě radonového programu ČR, nebo měřením od komerční firmy. Pokud se dlouhodobým měřením zjistí, že je objemová aktivita radonu vyšší jak 400 Bq/m^3 za pobytu dětí, respektive $1\,000 \text{ Bq/m}^3$ a jsou splněny i další požadavky je možné požádat Státní úřad pro jadernou bezpečnost o vydání stanoviska. K žádosti musí být přiloženy výsledky měření, projektová dokumentace a rozpočet předpokládaných nákladů (SÚJB, 2009).

Žadatel musí vyplnit formulář, na kterém žádá o schválení dotace a předává ji příslušnému krajskému úřadu. Žádost musí obsahovat identifikační údaje majitele nemovitosti (jméno, příjmení, datum narození, adresa trvalého bydliště, adresa školy atd.), bankovní spojení pro případné vyplacení dotace, místo stavby. Dále údaj o

současném způsobu využití, o výsledcích měření objemové aktivity radonu a údaj o předpokládaných nákladech na provedení opatření. K žádosti musí žadatel ještě doložit doklad o vlastnictví stavby (nesmí být starší jak 3 měsíce), doklad o výsledcích měření objemové aktivity radonu (nesmí být starší jak 3 roky), stanovisko Státního úřadu pro jadernou bezpečnost. Dále pak rozpočet předpokládaných nákladů a čestné prohlášení, že je stavba používána k trvalému pobytu (SÚJB, 2009).

Po podání žádosti krajský úřad zkontroluje všechny náležitosti formuláře a posoudí, zda jsou splněny všechny podmínky pro schválení dotace. Vypracuje stanovisko a žádost je dále předána Ministerstvu financí, které uvede výši částky poskytnutou žadateli ze státního rozpočtu. Krajský úřad o tom jak bylo rozhodnuto, informuje vlastníka nemovitosti. Podle metodického postupu Ministerstva financí se protiradonovým opatřením myslí takové ozdravné opatření, které je navrženo a také provedené podle ČSN 73 0601 (SÚJB, 2009; SÚRO 2018e).

Vlastník nemovitosti si vybere firmu pro realizaci ozdravných opatření a účinnost je poté ověřena měřením. Za účinné se považuje takové opatření, díky kterému se snížila koncentrace radonu v budově pod 400 Bq/m^3 nebo o 75 % z původní naměřené hodnoty. Majitel nemovitosti po dokončení protiradonových opatření požádá Státní úřad pro jadernou bezpečnost o vydání stanoviska předložením žádosti s výsledky závěrečného měření, dokumentací provedeného opatření a s doklady o vynaložených nákladech. Tyto dokumenty spolu se stanoviskem od Státního úřadu pro jadernou bezpečnost musí být zaslány Ministerstvu financí a to nejlépe do 30. 11., aby byla dotace vyplacena ještě v roce podání žádosti (SÚJB, 2009).

Státní dotace jsou poskytovány majitelům bytů a rodinných domů, ve kterých je dlouhodobý průměr objemové aktivity radonu vyšší než $1\,000 \text{ Bq/m}^3$. Žádost o dotaci je schválena pouze tehdy, když žadatel doloží, že bylo provedeno účinné a nezbytné ozdravné opatření vedoucí ke snížení koncentrace radonu (SÚRO, 2018e)

O Poskytnutí dotace může být požádáno pouze jednou a vlastníků škol a školských zařízení je poskytnuta dotace v korunách maximální v maximální výši 100 000,- Euro (Radonový program České republiky, 2016).

1.5.13 Měření radonu

Všechna měření přírodních radionuklidů včetně radonu mohou podle atomového zákona č. 263/2016 Sb. provádět pouze autorizované osoby, které mají povolení od Státního úřadu pro jadernou bezpečnost. Přístroje k měření radonu fungují na principu detekce ionizujícího záření. Vznikající částice alfa a beta dokážou v určitých chemických látkách vyvolat světelné jevy nebo elektrický náboj, ty jsou následně zachycovány detektorem. Existuje spousta typů detektorů, o nichž se budu podrobněji zmiňovat dále. Patří mezi ně například scintilační, polovodičové nebo stopové detektory atd., které měří energii i počet fotonových záblesků vznikajících v detekční chemické látce. Tímto způsobem se po zadání veličin určených pro daný typ detektoru získá objemová aktivita radonu (Fukátko, 2007; Zákon č. 263/2016 Sb.).

Měření radioaktivity v budovách

V budovách měříme objemovou koncentraci radonu. Měření radonu v budovách je obtížné, jelikož jeho koncentrace není v domě konstantní, ale mění se v průběhu dne, roku. Pokud potřebujeme rozhodnout rychle, jaká je koncentrace radonu v domě musíme provést alespoň týdenní měření. To je minimální uznávaná délka měření pro kolaudační a stavební řízení. Týdenní měření se provádí většinou elektretovými detektory, kdy do každé měřené místnosti umístíme dvě elektretové komory. Dalším typem měření je dlouhodobé integrální měření prováděné stopovými detektory po dobu jednoho roku. Toto měření zohledňuje i roční období a proto by měření mělo být přesnější (SÚRO, 2018f).

Měření radonového rizika pozemku

Koncentraci radonu stanovujeme na konkrétním pozemku. V 15 různých bodech rozmístíme ocelové tyče do hloubky 0,8 m a odebereme skrze ně vzorky půdního plynu do Lucasovy komůrky. Komůrka je uvnitř potažena scintilačním materiálem vyrobeným z ZnS, který vydává záblesky, když na něj dopadne alfa částice. Tyto záblesky zaznamenává detektor a změří počet fotonových záblesků. Této metodě se říká metoda ztraceného hrotu. U plochy větší jak 800 m² se rozmisťují ocelové tyče v rozsahu 10x10 metrů (Příbylová, 2017).

Měření radioaktivity stavebních materiálů

Nevýznamnějším ukazatelem je pro nás aktivita radia. Ze stavebního materiálu se odebere 1-2 kg vzorku a rozdrť se na částičky o velikosti milimetrů. Tato drť se odesílá do laboratoře, kde je pomocí scintilační nebo polovodičovou spektrometrií analyzována. Pokud je naměřena vyšší hodnota radia musí se měření ještě doplnit o měření emanačního koeficientu. Aktivita radia ve stavebních materiálech vyrobených V České republice je v řádech desítek Bg/kg (Jiránek, 2001).

Měření radioaktivity vody

Pro stanovení obsahu radonu se odebírá do speciální nádoby vzorek vody (stačí nám necelý litr), který se odešle na analýzu do laboratoře. Měření se musí provést do čtyř dnů. Ke stanovení výsledku se používá měření pomocí elektretů, nebo převedení radonu do Lucasových komor, anebo měření emitovaného záření gama. V České republice činí průměr radonu ve vodě přibližně 15 Bq/l. Vyšší hodnoty radonu ve vodě jsou zaznamenány v Jižních Čechách (Písek, Prachatice, Strakonice a Jindřichův Hradec) a v okrese Plzeň, Tachov a Sokolov (SÚRO, 2018g).

1.5.14 Protiradonová opatření

Protiradonová opatření mají zajistit, aby koncentrace radonu v obytných místnostech nepřesáhla hodnoty, které jsou stanoveny vyhláškou o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje č. 422/2016 Sb. Směrná hodnota je 300 Bq/m³ pro vnitřní ovzduší. Protiradonová opatření musí být v souladu s ČSN 73 0601 a hydroizolace se řídí podle ČSN 73 0600 (Vyhláška č. 422/2016 sb.).

Můžeme je rozdělit na aktivní a pasivní. Pasivní opatření jsou ovlivněna transportem radonu a jsou součástí každé stavby (utěsnění šachet, konstrukce šachet a komínů). Neměli bychom kolem nové stavby navrhovat nepropustné povrchové úpravy, jakými jsou asfalt či beton. Naopak bychom měli použít materiál s vysokou plynopropustností. Aktivní opatření stojí na dvou principech a to na odstranění zdroje radonu a na přerušení transportu radonu od zdroje k obyvatelům budovy. Dále rozlišujeme protiradonová opatření u nových staveb a u stávajících staveb (Jiránek, 2005)

Nové stavby

Musíme zabránit vniku radonu do objektu ze všech třech základních zdrojů. Čehož docílíme kontrolou vody, vhodným výběrem stavebního materiálu, ale zejména ochranou proti pronikání radonu z geologického podloží. Pokud má být naše stavba na místě se středním nebo vysokým radonovým indexem jsme povinni provést protiradonová opatření. Je to dáno z atomového zákona a stavební úřad kontroluje, jestli projektová dokumentace stavby opravdu splňuje podmínky před pronikáním radonu do budovy. Pokud nesplňuje, může dojít až k zastavení stavebního řízení (Zákon 263/2016 Sb.).

Dříve se na pozemku s nízkým radonovým rizikem nemusela provádět žádná protiradonová opatření. Od roku 2016 platí, že provětraná vrstva se provádí bez ohledu na radonový index všude, kde je součástí kontaktní konstrukce podlahové topení. Dostatečnou ochranu vytváří běžná hydroizolace a doporučuje se oddělit schodišťový prostor dveřmi, dojde ke snížení účinku komínového efektu (Jiránek, 2014).

Na pozemku se středním radonovým rizikem se provádí kvalitní hydroizolace s dlouhou životností a se zaměřeným součinitelem difuze radonu. A musí být provedena protiradonová izolace, která se pokládá v celé ploše kontaktní konstrukce, dokonce i pod stěnami. Protiradonová izolace je nejčastěji vyrobena z oxidovaného nebo kaučukem modifikovaného asfaltu. Může to být i fólie na bázi PVC nebo různé šterkové hmoty (Jiránek a Honzíková, 2017; Neznal a Neznal, 2009).

Na pozemku s vysokým radonovým rizikem se také provádí protiradonová izolace a navíc se kombinuje buď s odvětrávacím drenážním systémem podloží pod objektem, nebo s odvětranou ventilační vrstvou v kontaktní konstrukci. Všechna protiradonová opatření musí být v souladu s ČSN 73 0601 Ochrana staveb proti radonu z podloží. (Jiránek a Honzíková, 2017). Drenážní systém by měl být doplněn o vertikální odvětrávací potrubí vedené až nad střechu stavby. Odvětrávací systém pod objektem je soustava plastových, keramických nebo kameninových trubek uložených do šterkové vrstvy pod základovou deskou. Dokážou fungovat jak aktivně (pomocí ventilátoru), tak i pasivně (díky tlaku vzduchu a teplotnímu rozdílu) (Vlček a Beneš, 2005).

Stávající stavby

V tomto případě musí dojít pomocí protiradonových opatření ke snížení radonu ve vnitřním ovzduší na přijatelnou hodnotu. Podle atomového zákona může být v budovách určených pro veřejnost s vysokým obsahem radonu nařízeno provedení protiradonových opatření. V rodinných domcích je instalace ozdravných opatření pouze na rozhodnutí majitele, v tomto případě nemůže být jejich provedení nařízeno. Všechna provedená protiradonová opatření musí být v souladu s ČSN 73 0601 Ochrana staveb proti radonu z podloží a s ČSN 73 0602 Ochrana staveb proti radonu a gama záření ze stavebních materiálů. Základem pro provedení ozdravných opatření jsou výsledky měření koncentrace radonu v budově a na základě toho se může přistoupit k aktivním či pasivním ochranným opatřením nebo k jejich kombinaci. Pokud je zapotřebí použít složitější opatření, kdy dochází k zásahu do konstrukce je nutné tuto skutečnost nahlásit stavebnímu úřadu nebo si vyžádat stavební povolení (Jiránek, 2014; Jiránek a Honzíková, 2017).

Před návrhem vhodného protiradonového opatření musí být proveden stavebně-technický průzkum, při kterém se odborník zaměřuje na polohu místností k podloží, na stav kontaktních konstrukcí a výskyt trhlin, vlhkost podlah a stěn, přítomnost trativodů, netěsných jímek, systém větrání atd. Hlavním kritériem pro volbu protiradonových opatření je výsledná objemová aktivita radonu. Směrná hodnota pro stávající stavby je 300 Bq/m^3 . Pokud jsou obytné místnosti odděleny od geologického podloží sklepem nebo pokud se objemová aktivita radonu pohybuje kolem 300 Bq/m^3 stačí většinou utěsnit vstupní cesty radonu do stavby (trhliny, prostupy v kontaktních konstrukcích, zakrytí šachet) a samozřejmě zvýšit výměnu vzduchu v budově. Pokud však objemová aktivita radonu značně převyšuje směrnou hodnotu 300 Bq/m^3 rozhoduje se podle stavebně-technického stavu budovy mezi instalací odvětrávání podloží nebo položením protiradonové izolace a použitím nucené ventilace. Velice účinným opatřením jsou odsávací místa, která nuceně odsávají půdní vzduch. Dalším ozdravným opatřením je výměna podlahových konstrukcí, pokud jsou podlahy ve špatném stavu a netěsní (ThermWet s.r.o., 2010; Jiránek, 2014).

Jestliže je zdrojem radonu stavební materiál provádí se jako ozdravná opatření odstranění materiálů o vysoké rychlosti plošné exhalace radonu a nucená ventilace. Odstranit můžeme pouze štuky, omítky, tepelně-izolační násypy podlah z popílků a

škvár a příčky. Za nejúčinnější protiradonové opatření je bráno aktivní odvětrání radonu (Jiránek a Honzíková, 2017).

Pokud je problémem voda, mělo by dojít k odstranění radonu z vody ještě před jejím přivedením do budovy. K tomu se využívají takzvané aerační věže a je to možné provést pouze u hromadného zásobování. U individuálního zásobování se jako ozdravné opatření provádí odvětrávání místností, kde se spotřebovává voda. Zabrání se tím šíření radonu do dalších obytných místností (Jiránek a Honzíková, 2017).

2 CÍLE PRÁCE A VÝZKUMNÉ OTÁZKY

2.1 Cíle práce

Cíl 1: Sledování objemové aktivity radonu z podloží v objektech vybraných středních škol v Jihočeském kraji.

Cíl 2: Srovnání koncentrací radonu ve školských objektech před zateplením a po zateplení včetně ohrožení zdraví.

Cíl 3: Navržení opatření v případě překročení povolených koncentrací radonu v objektech, které slouží výuce.

2.2 Výzkumné otázky

Výzkumná otázka 1: Jaké jsou naměřené koncentrace radonu z podloží ve vnitřním ovzduší vybraných středních škol v Jihočeském kraji?

Výzkumná otázka 2: Jaký vliv má zateplení objektů školských zařízení na množství radonu v ovzduší?

Výzkumná otázka 3: Jaké aspekty mají vliv na naměřené hodnoty objemové aktivity radonu z podloží v budovách vybraných středních škol v Jihočeském kraji?

2.3 Operacionalizace pojmů

Radon

Radonem (Rn) rozumíme přírodní, radioaktivní plyn, který je bez chuti, barvy a zápachu. Vzniká postupně rozpadem uranu. Radon se dále přeměňuje na dceřiné produkty a ty se zachycují v dýchacích cestách a ozařují je. Difunduje do objektů v různých koncentracích. Je po kouření druhou nejčastější příčinou vzniku rakoviny plic a může vyvolat i po ingesci vody s radonem leukemii (SÚRO, 2018c).

Střední škola

Následuje po dokončení 9. třídy základní školy. Ve většině případů jsou na ni žáci vybíráni na základě složení přijímací zkoušky v podobě testů, může být i ústní na jazykové školy nebo talentová na umělecké školy. Doba studia trvá 4 roky. Bývá zakončena zkouškou se získáním výučního listu nebo maturitním vysvědčením. Dělí se na všeobecné (gymnázium), odborné (střední odborná škola) a učiliště (střední odborné učiliště).

Objemová aktivita radonu

Je to množství radonu. Hodnota odpovídá počtu radioaktivních přeměn radonu v jednom metru kubickém vzduchu. (ČVUT, 2011) Udává se v jednotkách Bq/m^3 . Směrná hodnota daná legislativou 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zajištění radionuklidového zdroje je 300 Bq/m^3 (Vyhláška č. 422/2016).

Oxid uhličitý

Je to bezbarvý plyn, bez chuti a zápachu. Jeho vzorec je CO_2 . Je součástí zemské atmosféry, kde pohlcuje infračervené záření. Běžné koncentrace oxidu uhličitého jsou neškodné, avšak ve vyšších koncentracích způsobuje zdravotní obtíže. Jako jsou nesoustředěnost, letargie, bolesti hlavy, závratě, dýchací potíže, zmatenost, třes. Vyšší expozice po delší dobu může způsobit až křeče, kóma a smrt (Kleger a Válek, 2014).

3 METODIKA PRÁCE

Teoretická část diplomové práce byla zpracována sekundární analýzou dat. Za pomoci odborné literatury, platné legislativy a internetových článků bylo poukázáno na závažnost radonové problematiky.

Pro empirickou část mé diplomové práce bylo použito kvalitativní výzkumné šetření s použitím sekundární analýzy dat. Potřebná data pro vypracování výzkumné části diplomové práce jsem získala z vlastního měření objemové aktivity radonu v pěti středních školách v Jihočeském kraji, doplněné o měření oxidu uhličitého a teploty v budově ve vybraných školách. Měření probíhalo vždy za pobytu dětí. Jak již bylo řečeno, koncentrace radonu v obytných prostorech je z velké části závislá na výměně vzduchu v budově a závisí i na rozdílu teplot vnitřního a vnějšího prostředí. Proto jsem se zajímala i o hodnoty oxidu uhličitého a teploty okolí.

Nejprve probíhalo měření na Střední odborné škole strojní a elektrotechnické ve Velešíně, kde jsem měřila objemovou aktivitu radonu pomocí přístroje Radim 5B ve čtyřech třídách, přičemž v každé třídě byla objemová aktivita radonu měřena 24 hodin. V této škole jsem provedla navíc měření oxidu uhličitého a teploty v budově pomocí přístroje Wöhler 410 KM. Druhou měřenou školou byla Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola Volyně. Zde byla měřena v jedné třídě a ve dvou dílnách objemová aktivita radonu a také bylo provedeno doplňující měření oxidu uhličitého a teploty. Třetí vybranou školou byla Střední rybářská škola Vodňany. Zde došlo k měření pouze ve dvou třídách. A to z důvodu rozdílu mezi starou a novou částí školy. Měření radonu nebylo v tomto případě doplněno o hodnocení oxidu uhličitého a okolní teploty. Čtvrtou zkoumanou školou byla Vyšší odborná škola a střední zemědělská škola v Táboře. Měření proběhlo ve čtyřech třídách, avšak v poslední měřené třídě došlo k znehodnocení výsledku vypnutím měřicího přístroje. I v tomto případě nebyl měřen oxid uhličitý ani teplota. Poslední měřenou školou se stala Vyšší odborná škola, Střední odborná škola, Centrum odborné přípravy Sezimovo Ústí. Objemová aktivita radonu byla měřena v jedné třídě, v dílně a ve vzdělávací místnosti. V tomto případě došlo i k doměření koncentrace oxidu uhličitého a teploty.

3.1 Charakteristika výzkumného souboru

Bylo vybráno pět středních škol v Jihočeském kraji. Školy byly v podstatě rozdílné. Odlišnost spočívala v typu stavby, některé školy byly již někdy proměřovány a jiné nikoli, dále v typu měření (odlišná doba, jiný typ detektoru, jiný účel měření). Radonový index podloží je u všech škol střední, avšak odlišnosti v podloží jsou. Školy i jednotlivé proměřované místnosti se lišily dobou pobytu dětí a každá ze škol má jinou kapacitu studentů a pracovníků schválenou hygienickou službou a jinou skutečnou kapacitu. Tomu se budu blíže věnovat později.

Střední odborná škola strojní a elektrotechnická Velešín je novější panelová škola, postavená na podloží se středním radonovým indexem. V této škole proběhlo od roku 2001 do roku 2002 roční měření radonu od Státního ústavu radiační ochrany.

Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola Volyně je starší zděná škola, radonový index podloží je i v tomto případě střední. I zde proběhlo roční měření provedené státním ústavem radiační ochrany a to v letech 2008-2009.

Střední rybářská škola Vodňany má starou zděnou část a novou přístavbu. Radonový index podloží je v této oblasti opět střední a škola nebyla nikdy předtím na radon proměřována.

Vyšší odborná škola a střední zemědělská škola Tábor je opět stará škola, cihelná se středním radonovým indexem. Žádná předchozí měření v této škole neproběhla.

Vyšší odborná škola, střední škola, Centrum odborné přípravy Sezimovo Ústí se skládá ze tří objektů. Dvě budovy jsou poměrně starší zděné a jedna je nová panelová. Všechny tři stavby stojí na středním radonovém podloží a byly již dříve proměřovány na radon, avšak ne od státního ústavu radiační ochrany jako předchozí školy, ale na základě stavebního a kolaudačního řízení, jelikož probíhala v dvou budovách přestavba a jedna byla nově přistavěna.

3.2 Realizace výzkumu

Sběr dat se uskutečnil tedy v pěti středních školách v Jihočeském kraji. Jednáno bylo s řediteli školy, kteří mi poskytli veškeré potřebné informace a podklady ke zpracování mé diplomové práce. Dále mi umožnili měření radonu, případně i oxidu uhličitého na jejich škole.

Šetření na školách se uskutečnilo od 6. března do 6. dubna 2018. Na úvod jsem se vždy představila a seznámila ředitele škol s obsahem mé diplomové práce a s požadavky, které na ně mám. Ujistila jsem je, že výsledky měření budou sloužit výhradně pro účely zpracování mé diplomové práce a nebudou použity jinak. Dále jsem se doptala na potřebné informace a přistoupili jsme k samotnému měření. Vždy mi byl poskytnut pracovník školy, který se staral v době měření o přesun přístroje z jedné místnosti do druhé po uplynutí 24 hodin a zapisoval den a čas přemístění. Ve většině případů byl měřicí přístroj přenášen po výuce, pouze v jednom případě docházelo k přesunu ráno před výukou a to z důvodu pracovního zaneprázdnění pověřené osoby. Ředitelům i pověřeným pracovníkům školy bylo vysvětleno, jak přístroj funguje, jak se s ním má zacházet a jak samotné měření probíhá. Co se týká měření oxidu uhličitého, bylo opět vše potřebné vysvětleno. Avšak v tomto případě nebyla potřeba pověřené osoby, jelikož se přístroj nikam nepřenáší, zůstává po celou dobu v jedné místnosti.

Do jednotlivých škol jsem jezdila vždy v ranních hodinách. Na Střední odborné škole strojní a elektrotechnické Velešín probíhalo měření od 6. března do 12. března 2018, na Vyšší odborné škole a Střední průmyslové škole Volyně od 12. března do 20. března 2018. Současně se střední průmyslovou školou ve Volyni byla díky poskytnutí druhého stejného měřicího přístroje měřena i Střední rybářská škola Vodňany, měření proběhlo od 12. března do 17. března 2018. Na Vyšší odborné škole a střední zemědělské škole Tábor proběhl výzkum od 19. března do 23. března 2018. A na Vyšší odborné škole, střední škole, Centrum odborné přípravy Sezimovo Ústí se šetření uskutečnilo od 3. dubna do 6. dubna 2018.

3.3 Metody zpracování dat

Zjištěná data, která byla získána měřením pomocí přístrojů, byla přenesena do počítače. K vyhodnocení výsledků radonu byl použit speciální program v počítači, nazývaný stejně jako měřicí přístroj Radim 5B, který dokáže zpracovat výsledky z měřicího přístroje. Vytvořila jsem pomocí tohoto programu grafy pro každou školu a místnost zvlášť. V každém grafu je vidět den a čas měření a objemová aktivita radonu v Bq/m^3 .

Ke zpracování výsledků koncentrace oxidu uhličitého a teploty byl použit také speciální počítačový program Wöhler CDL-Series PC INT, díky kterému je možné z výsledků vytvořit grafy. Pro každou měřenou školu byl vytvořen jeden graf, ve kterém je vidět také den a čas měření, teplota ve stupních celsia (°C) a koncentrace oxidu uhličitého v parts per milion (ppm).

3.4 Geologické podloží Jižních Čech

Pro zpracování výsledků empirické části diplomové práce je velice důležité znát horninové typy, jelikož jak již bylo zmiňováno v teoretické části této práce, množství radonu v podloží závisí na obsahu uranu v horninách a půdách. Každý horninový typ má svá specifika a obsahuje rozdílné množství uranu i jiných látek.

Uranová ložiska jsou charakteristická pro západoevropské a středoevropské variscidy a vznikala ve svrchním karbonu, v permu a v mezozoiku. Nejvýznamnější uranonosné oblasti jsou Armorický, Centrální a Česká masiv. Největší uranonosnou oblastí v Evropě je Český masiv. Základní dělení hornin je na magmatické (vyvřelé), sedimentární neboli usazené a metamorfované jinak řečeno překrytalizované nebo přeměněné (Barnet, 1992).

Magmatické horniny vznikají krystalizací magmatu a řadíme do nich granit (žula), syenit, diorit, gabro, granodiority atd. Metamorfované horniny vznikají přeměnou již existujících hornin za působení teploty a tlaku. Přeměňovány bývají magmatity a sedimenty. Mezi ně řadíme ortoruly, pararuly, granulity, amfibolit, serpentinit, krystalický vápenec a další. Sedimentární horniny se vyskytují ve svrchní části zemské kůry a tvoří je pískovce, jílovce a břidlice. Vznikly zvětráváním (Petránek, 2007).

Žula neboli granit je nejznámější horninou obsahující vysoké množství uranu. Průměrná hodnota objemové aktivity radonu je $51,9 \text{ kBq/m}^3$. Skládá se z křemene, z draselných živců, z biotitu, amfibolu a vzácně obsahují i rombický pyroxen. V České republice je žula častou horninou, vyskytuje se zejména v centrálním masivu Českomoravské vysočiny, na Šumavě, v Krušných horách, v Krkonoších, brněnském masivu, středočeském plutonu, třebečsko-meziríčském masivu atd. Obsah radonu se v jednotlivých krajích mění (Kolář a Reitermann, 2012).

Syenit patří mezi horniny bez křemene. Je tvořen draselným živcem plagioklasy, biotitem, amfibolem a pyroxeny. Syenit společně s durbachity obsahují největší množství radonu. Průměrná objemová aktivita radonu je $98,7 \text{ kBq/m}^3$. Vyskytují se na

Vodňansku, ve střeđočeském plutonu, třebičsko-meziříčském masívu (Kolář a Reitermann, 2012; Petránek, 2011).

Diority obsahují plagioklasy, biotit, amfibol, občas pyroxen. Gabro se skládá z plagioklasů, amfibolu a výjimečně biotitu. Objemová aktivita radonu je podobná jako u granitů. V České republice se vyskytuje nejčastěji v brněnském masívu, ve střeđočeském plutonu, kdyňském masívu atd. (Petránek, 2011).

Ortoruly a pararuly jsou z metamorfovaných hornin nejčastěji se vyskytující. Jejich objemová aktivita radonu činí 29,9 kBq/m³. Ortoruly vznikly přeměnou granitoidních plutonických hornin za vysokých teplot. Skládají se z křemene, draselného živce, plagioklasu, biotitu a muskovitu. Nalezneme je v oblasti kolem Jindřichova Hradce, ve střeđočeském plutonu, v Krkonoších, v Krušných horách, okolo Kutné Hory atd. Pararuly obsahují o něco málo méně uranu, jelikož vznikaly spíše přeměnou sedimentárních hornin. Skládají se z křemene, živce, biotitu, granátu, cordieritu a silimanitu. Nacházejí se v Českomoravské vysočině, v oblasti Jihlavska, Českého Krumlova, Týna nad Vltavou a Prachaticka (Chlupáč, 2011; Petránek, 2011).

Svory jsou metamorfované horniny vznikající středně silnou regionální metamorfózou a nejčastěji z jílovitých sedimentů. Skládají se z křemene, slídy (muskovit), plagioklasu. Většinou neobsahují živec a tím se liší od rul. Běžně je k nalezení v Českém masívu, v domažlickém krystaliniku, v oblasti Kaplice, Velešín.

Migmatity jsou metamorfované horniny, tvořené granitovou a rulovou složkou. Obsahují křemen, živec a slídu. Nacházejí se v moldanubiku, v Krušných horách a Orlických horách (Chlupáč, 2011; Petránek, 2011).

Sedimentární horniny obsahují nejméně radonu ze všech typů hornin. Avšak černé břidlice jsou výjimkou, protože obsahují organickou hmotu, která váže uran. Nalezneme je v Českém masívu. Naopak křídové pískovce, písky (paleogenní, neogenní) nebo jílovce obsahují nízké hodnoty objemové aktivity radonu (Chlupáč, 2011; Petránek, 2011).

Obecně můžeme říct, že do kategorie vysokého radonového indexu spadají durbachity, syenity a černé břidlice. Granitoidy, diority a fonolity jsou řazeny do středního až vysokého radonového indexu. Do středního radonového indexu se řadí převážně ortoruly, pararuly, ordovické, permské a karbonské sedimenty. Říční terasy, devonské a neogenní sedimenty jsou řazeny do nízkého až středního radonového indexu. A do nízkého radonového indexu zahrnujeme paleogenní a křídové sedimenty.

Jižní Čechy jsou tvořeny především moldanubikem, to znamená, že převážná většina hornin jsou granulity, ortoruly, pararuly atd. Proto je tato část bohatá na uran a radon je zde, větším problémem než v jiných částech České republiky (Chlupáč, 2011; Petránek, 2011).

3.5 Radonová diagnostika

Pro měření radonu se využívají tři základní druhy detektorů.

Stopové detektory

Prvním z nich jsou takzvané stopové detektory. Používají se k dlouhodobým integrálním měřením trvajícím rok. Své využití mají v rámci radonového programu s názvem RamaRn. Jsou nejlevnější a nejjednodušší. Avšak nevýhodou je, že snadno může dojít k jejich znehodnocení. Do každé měřené obytné místnosti se umístí dva stopové detektory mající vzhled kelímku s víčkem. Uvnitř této komůrky je na dně uložen detektor v podobě červené fólie. Detektory fungují na principu detekce stop. V této látce dojde po dopadu α záření k vyvolání mikroskopických poruch, takzvaných radiačních stop. Nejčastěji se pro detekci používá slída, různá skla či organické polymery. Radiační stopy můžeme následně zviditelnit leptáním, použitá chemická látka jako detektor je náchylná k chemické korozi. Pod mikroskopem se spočítá počet stop, který je přímo úměrný počtu zachycených α částic (SÚRO, 2018g).

Obrázek č. 8: Stopové detektory



Zdroj: SÚRO, 2018

Elektretové detektory

Dalším druhem detektoru radonu jsou elektrety. Využívají se ke střednědobým měřením, maximálně na dobu několika týdnů. Fungují na principu ionizace vzduchu α částicemi. Kladně nabitý elektretový disk situovaný v plastové vodivé ionizační komoře se postupně α částicemi ze vzduchu vybíjí. Do ionizační komory vstoupí radon a přemění se následně na dceřiné produkty a tím se vyzáří α částice, které zapříčiní vybití. Výsledek se určuje z rozdílu napětí před a po měření. Elektretové detektory se používají k měření pro kolaudační a stavební řízení (Fukátko, 2007).

Obrázek č. 9: Elektretové detektory



Zdroj: vlastní fotografie

Obrázek č. 10: Elektretové disky a Reader pro elektrety



Zdroj: vlastní fotografie

Kontinuální monitory

Posledním druhem detektorů radonu jsou kontinuální monitory. Tyto přístroje dokážou měřit objemovou aktivitu radonu a produkty přeměny radonu. Může být využit i k měření rychlosti přísunu radonu do budovy nebo ke kontrole účinnosti realizovaných ozdravných opatření (Jiránek, 2001).

Přístroj využívaný ke sběru dat pro mou diplomovou práci měří pouze objemovou aktivitu radonu. Samy si určujeme, jak dlouho bude přístroj měřit. Fungují na principu pronikání radonu do detekční komory, kterou překrývá vrstva látky. V látce se zachytávají produkty přeměny radonu. Objemová aktivita radonu je stanovena měřením α aktivity dceřiných produktů, sejmutých z detekční komory na polovodičový (křemíkový) povrch přístroje. Jsou jimi ^{218}Po (RaA) a ^{214}Po (RaC'). Naměřená data jsou zpracována pomocí počítače. Přístroj Radim 5B musí být k počítači připojen USB portem. Výhodou kontinuálních monitorů je relativní přesnost měření, avšak nevýhoda tkví v pořizovací ceně, jsou poměrně dosti drahé (Plh, 2015).

Obrázek č. 11: Kontinuální detektor Radim 5B



Zdroj: vlastní fotografie

3.6 Důvod měření CO₂ a okolní teploty

Pro mou diplomovou práci bylo podstatné změřit oxidu uhličitého a teplotu okolního prostředí. Jak již bylo napsáno rozdíl venkovní a vnitřní teploty má vliv na množství radonu přiváděného do objektu. Čím větší rozdíl, tím více radonu je nasáváno komínovým efektem do budovy (Novotný, 2017).

Na množství radonu v obytném prostoru má významný vliv větrání, proto jsem měřila i oxid uhličitého. Problémem dnešní doby je, že ve snaze ušetřit co nejvíce finančních prostředků za energie realizujeme zateplování fasád a výměnu oken. Ale neuvědomujeme si, že tato opatření pro maximální úsporu peněz má negativní vliv na naše zdraví. V takto utěsněném domě bez řádného větrání dochází k nárůstu vlhkosti, CO₂, toxiny z nábytku (formaldehyd) ale i radonu. Po omezení přirozeného větrání v takto utěsněném domě může být nárůst radonu větší až více než 60 %, což je dost markantní nárůst. Z výsledků, které zveřejnilo SÚRO vyplývá, že po výměně oken za nové těsnější došlo ke tří až šestinásobnému snížení výměny vzduchu v budovách a tudíž lze předpokládat, že nárůst radonu ve vnitřním prostředí bude 3x až 6x vyšší. Proto bychom se měli před zateplením řádně informovat o radonové situaci v našem objektu a případně zvážit nucené větrání. Z praxe se ukazuje, že v mnoha případech nestačí ke snížení koncentrace radonu vzduchotechnika a musí se stejně přistoupit i k protiradonovým opatřením (Beam ČR s.r.o., 2018).

Navíc oxid uhličitého je ukazatelem čistoty prostředí a jeho koncentrace nesmí překročit hodnotu 1 500 ppm. Při hodnotách vyšších jak 1 500 ppm se objevují příznaky únavy a snížené pozornosti a při hodnotách nad 2 500 ppm se dostavuje ospalost, letargie a bolest hlavy. Pokud jsou hodnoty vyšší, jak 5 000 ppm nedoporučuje se delší pobyt v místnosti. Podle vyhlášky č. 410/2005 Sb., o požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých je stanoveno požadované množství vzduchu na jednoho žáka 20-30 m³/h a 50-70 m³/h pro učitele. V každé třídě máme 1 učitele a přibližně 20 žáků někdy i 30, není v podstatě možné držet se na těchto hodnotách. Do škol se doporučuje přirozené větrání doplnit nuceným větráním. Vhodné je řízené větrání s rekuperací (se zpětným získáváním tepla) (Novotný, 2017; Vyhláška č. 410/2005 Sb.)

3.7 Přístroj pro měření CO₂ a okolní teploty

Wöhler KM 410 je přístroj pro posouzení klimatu a jeho kontrolu v obytných místnostech. Umí měřit oxid uhličitý, teplotu vzduchu, vlhkost a dokáže i stanovit hodnoty oxidu uhelnatého, rosného bodu a teploty mokrého teploměru. Pro zpracování dat se připojí pomocí USB kabelu k počítači a vyhodnotí se pomocí grafů výsledky (Popp, ústní sdělení).

Obrázek č. 12: Přístroj k Měření CO₂ Wöhler KM 410



Zdroj: vlastní fotografie

4 VÝSLEDKY

V této části diplomové práce jsou znázorněny a popsány výsledky výzkumného šetření. Výsledky z měření jsou prezentovány formou grafů, které byly zpracovány v programech Radim 5B pro objemovou aktivitu radonu a v programu Wöhler CDL-Series PC INT pro koncentrace oxidu uhličitého.

Výsledky měření jsou rozpracovány pro každou školu zvlášť a jsou rozčleněny do pěti podkapitol. U Každé školy zvlášť jsou popsány podmínky měření, geologické podloží a měření. Poté jsou již popisovány grafy.

4.1 Střední odborná škola strojní a elektrotechnická Velešín

Podmínky měření

První měřenou školou byla Střední odborná škola strojní a elektrotechnická Velešín. Nacházející se na okraji města Velešín. Skutečný stav kapacity školy k roku 2018 činí 483 žáků i zaměstnanců.

Tato škola byla vystavěna v roce 1987, je to tedy nová panelová škola. Stavební typ této školy je MS 71, pro který je typický montovaný beztrámový sloupový skelet. Jde o systém s deskovými průvlaky stavěný v 70. -90. letech 20. století. Škola je po zateplení a výměně oken na plastová od roku 2015. Zatepleno je polystyrenem. Výhodou polystyrenu je cena a je odolný vůči vodě a vlhku. Nevýhodou je však nižší schopnost zvukové izolace objektů, menší požární odolnost a hlavně částečné snížení prodyšnosti stěn. Poslední nevýhoda je zásadní pro množství radonu v objektu, který se po zateplení a nedostatečném větrání může v objektu kumulovat a koncentrace radonu je potom vyšší (Cifrain, 2008).

Vnitřní teplota objektu byla přes týden měření od 21°C do 23°C. Průměrné venkovní teploty kolísaly v ranních hodinách od -2°C do 1°C a v odpoledních hodinách od 1°C do 12°C. Rozdíl vnitřních a venkovních teplot je značný, proto můžeme předpokládat zvýšené působení komínového efektu.

Geologické podloží

Celé město Velešín včetně školy leží ve středním radonovém indexu, jak můžeme vidět z radonové mapy v příloze č. 1 a č. 6, červeným puntíkem je v mapě zakreslena

škola. Podloží v oblasti Velešína je tvořeno převážně rulami a svory. Oba typy hornin patří mezi metamorfované. Místy se objevují ostrůvky s nízkým radonovým indexem, které jsou tvořeny neogenními sedimenty (Petránek, 2011).

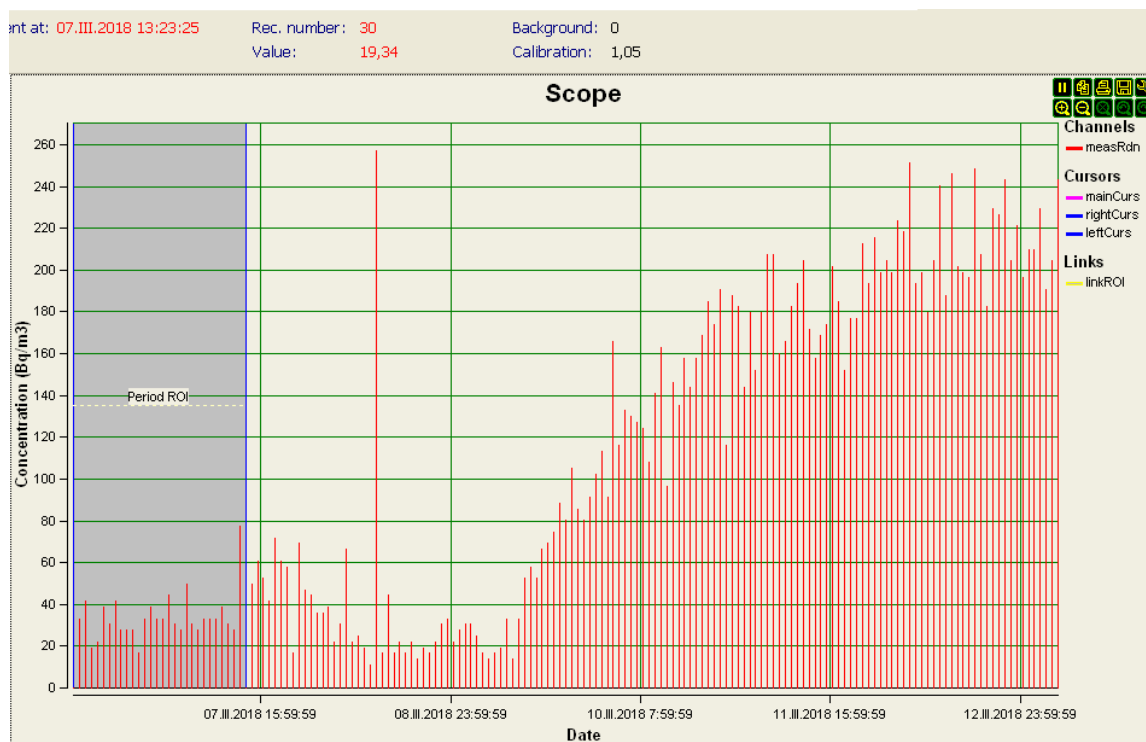
Měření

Na Střední odborné škole strojní a elektrotechnické ve Velešíně proběhlo roční měření od Státního úřadu radiační ochrany v rámci radonového programu. Měření probíhalo od 13. srpna 2001 do 29. října 2002. U většiny stopových detektorů došlo buď ke ztrátám, nebo k znehodnocení, tudíž nebyly naměřeny žádné hodnoty. U těch stopových detektorů, které naměřily hodnoty, nedošlo k překročení směrné hodnoty 400 Bq/m^3 stanovenou v té době platnou vyhláškou č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně. (Vyhláška 307/2002 Sb.) Ani podle dnešní platné legislativy 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje by nedošlo k překročení hodnoty 300 Bq/m^3 . (Vyhláška 422/ 2016 Sb.) Maximální hodnota objemové aktivity byla 155 Bq/m^3 ve třídě č. 16 ve 2. poschodí, kterou jsem posléze i já přeměřovala. Naopak nejnižší hodnota byla 46 Bq/m^3 ve třídě č. 4 překvapivě je to třída v suterénu. Také došlo k jejímu přeměření. Průměrně se naměřené roční hodnoty pohybovaly kolem 100 Bq/m^3 .

Vlastní měření jsem provedla v této škole od 6. března do 12. března 2018. Byly vybrány 4 třídy k měření denních průměrů objemové aktivity radonu kontinuálním přístrojem Radim 5B. Do třídy č. 4 v suterénu byl dán kontinuální monitor 6. března 2018 v 10:00 hodin, přendán byl do třídy č. 3 v suterénu 7. března 2018 v 14:00 hodin. Dále 8. března 2018 v 14:00 hodin byl umístěn do počítačové třídy č. 9 v 1. poschodí a nakonec byl přenesen do třídy č. 16 ve 2. poschodí a to 9. března v 14:00 a byl zde přes víkend a celé pondělí 12. března. Kontinuální monitor byl přesouván vždy po skončení výuky na škole, což bývá v 14:00 hodin. V měřených prostorách byl obvyklý provoz, tím je výuka ve třídách.

Objemová aktivita radonu naměřená stopovými detektory v rámci radonového programu ve třídě č. 4 byla 46 Bq/m^3 . Jak můžeme vidět z grafu č. 1, po přeměření vyšla objemová aktivita radonu 30 Bq/m^3 , což je ještě méně, než před zateplením. Vliv na hodnoty mohlo mít právě větrání, klimatické podmínky, tlak nebo také odlišný typ měření (roční versus denní průměry). Avšak hodnoty vyšly téměř stejné. U radonu se nikdy nenaměří úplně stejná hodnota dvakrát, má na to vliv mnoho aspektů (klimatické podmínky, organizační v budově atd.) (graf č. 1).

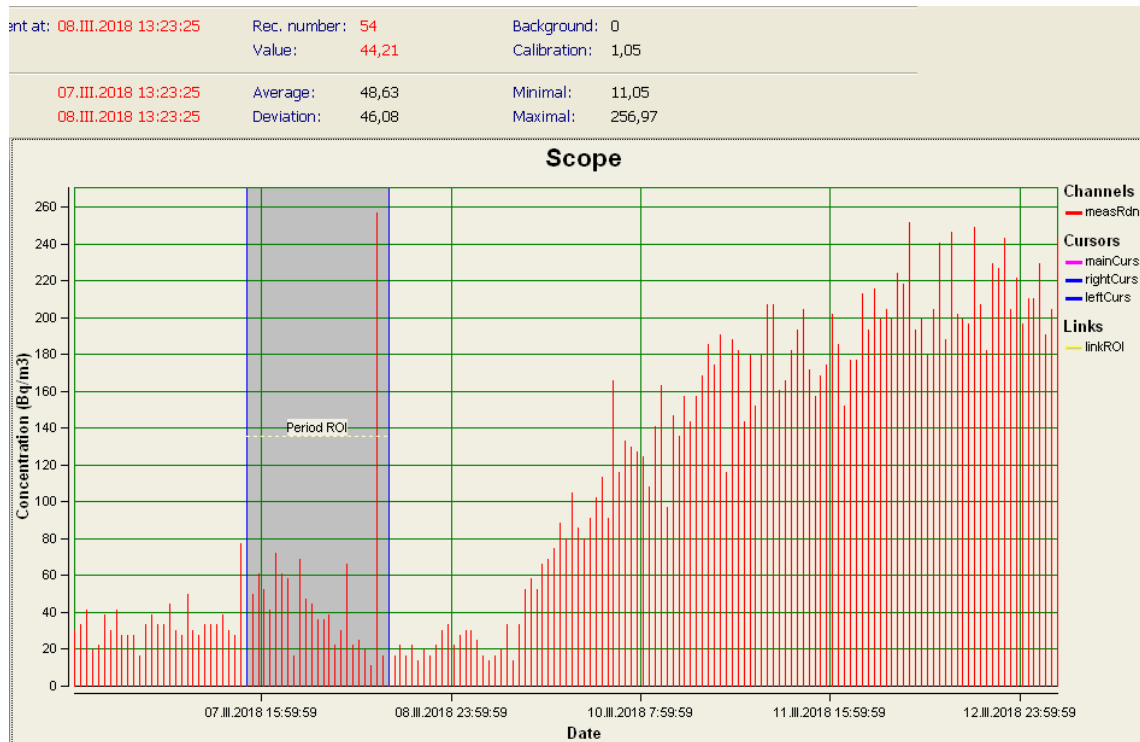
Graf č. 1 Třída č. 4 (suterén) - OAR



Zdroj: vlastní výzkum

Ve třídě č. 3 v suterénu byla v rámci radonového programu státním úřadem radiační ochrany naměřena roční průměrná aktivita radonu 76 Bq/m^3 . Což je opět nižší hodnota na to, že je třída umístěna v suterénu, který je nejbližší geologickému podloží. Z grafu č. 2 vidíme, že námi naměřená objemová aktivita radonu je 49 Bq/m^3 , což je opět i v tomto případě méně, než bylo naměřeno stopovými detektory. Rozdíl hodnot může být zapříčiněn vícero faktory. Mohou to být opět klimatické podmínky, jako je teplota vlhkost vzduchu, srážky, ale i výměna vzduchu v budově. Na grafu vidíme, že se nám jedna hodnota dostala až na 257 Bq/m^3 to mohlo být způsobeno manipulací s kontinuálním monitorem nebo jeho přesunem (graf č. 2).

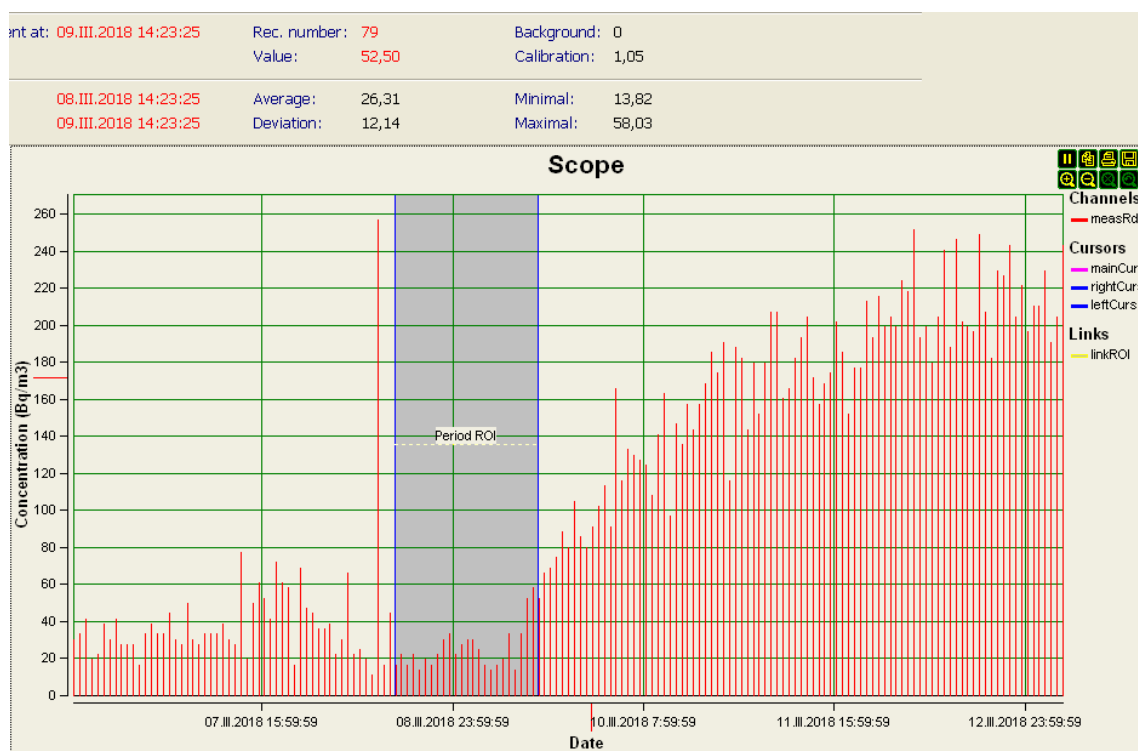
Graf č. 2 Třída č. 3 (suterén) - OAR



Zdroj: Vlastní výzkum

Státní ústav radiální ochrany naměřil v této třídě 109 Bq/m^3 , což bylo oproti výsledkům z jiných tříd poměrně vysoké číslo, navíc je třída již v 1. poschodí a proto byla vybrána k přeměření. Z grafu č. 3 je evidentní, že naše hodnota je mnohem nižší. Objemová aktivita radonu z kontinuálního přístroje činí 26 Bq/m^3 . Rozdíl hodnot může být opět zapříčiněn klimatickými podmínkami, ale i tím, že kdokoli nechat v této třídě přes noc otevřené okno a byl vítr, který zvýšil výměnu vzduchu a vyfoukal radon z budovy. Dále to může být i typem měření. Naše měření je pouze informativní, jelikož je jednodenní. Pro přesnější výsledky radonu je třeba měřit déle, alespoň týden jednu třídu. Jak již bylo uvedeno, jeho koncentrace se mění každý den podle klimatických podmínek, ale i organizačních. (graf č. 3).

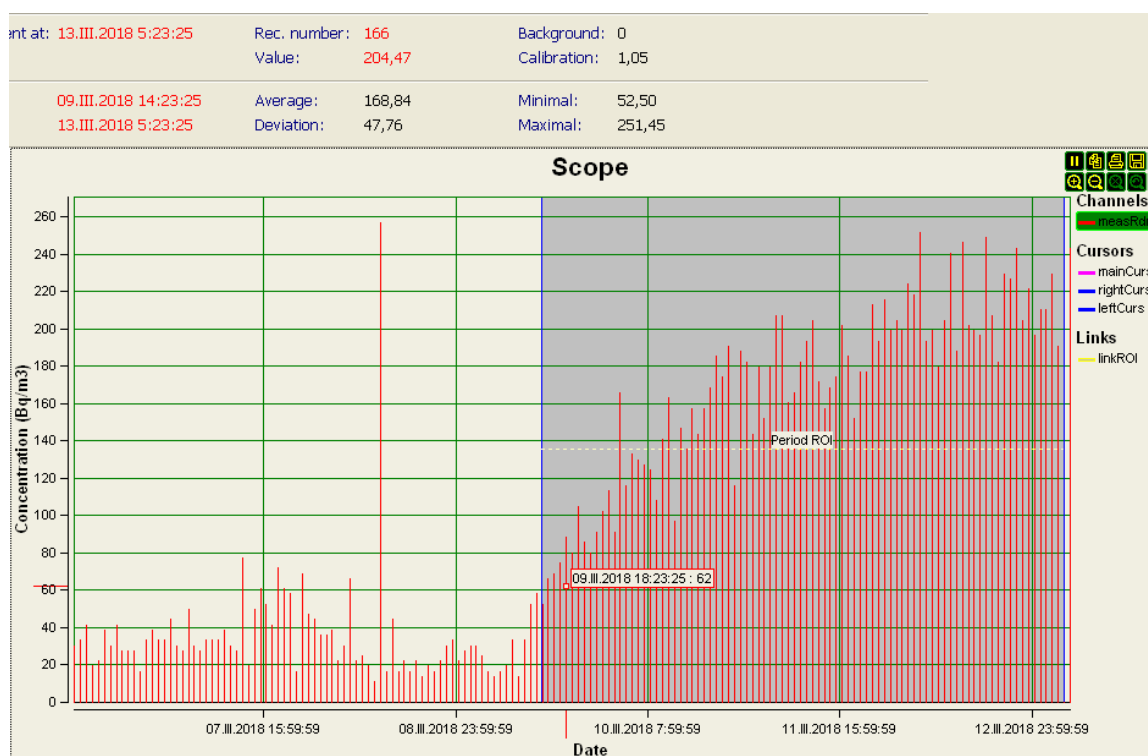
Graf č. 3 Počítačová třída č. 9 (1. podlaží) - OAR



Zdroj: vlastní výzkum

Poslední měřenou třídou byla ve 2. podlaží třída č. 16, ve které byl v letech 2001-2002 naměřen roční průměr nejvyšší ze všech tříd a to 155 Bq/m^3 . Po našem měření vyšla objemová aktivita radonu 169 Bq/m^3 . To je dokonce vyšší hodnota, než byla naměřena státním ústavem radiační ochrany. Může to být zapříčiněno tím, že měření v této třídě začalo v pátek 9. března ve 14:00 hodin tedy po výuce, kdy se škola celá uzavře a nedochází k výměně vzduchu. Tudíž se radon ve škole za víkend naakumuloval a objemová aktivita od pátku 9. března do pondělí 12. března rostla. Hodnoty se moc neliší. I tak je ale evidentní, že v této třídě je s radonem větší problém, než kdekoli jinde ve škole. Zdrojem radonu můžou být netěsnosti kolem potrubí, nebo trhliny ve zdivu a v konstrukcích, či netěsné vstupy kolektorů nebo topných kanálů. Je možné, že jsme narazili i na zdroj radonu v podloží (graf č. 4).

Graf č. 4 Třída č. 16 (2. podlaží) - OAR

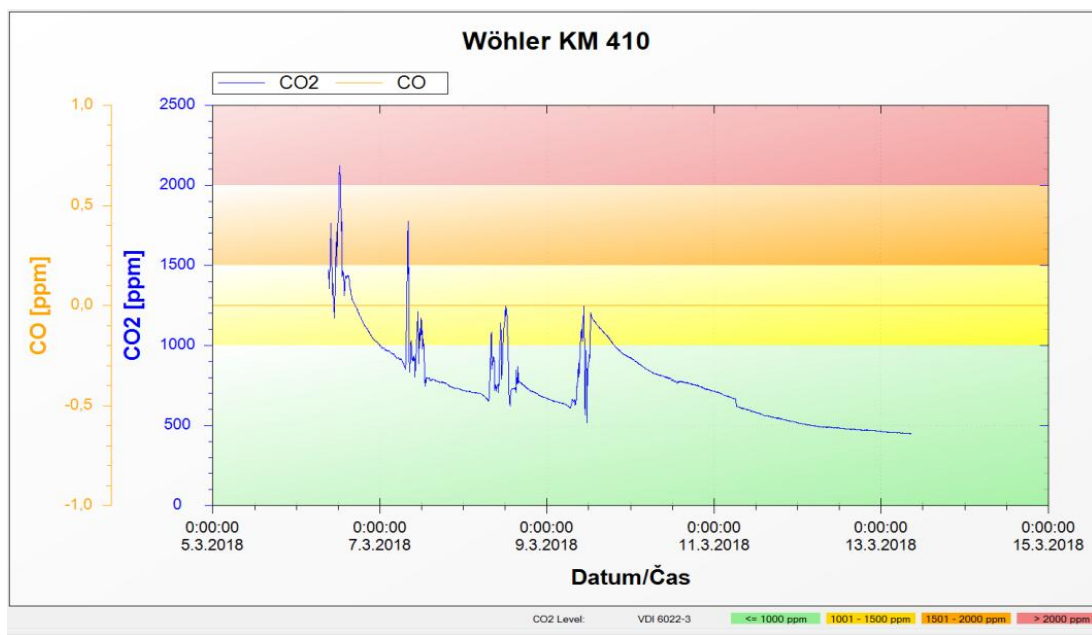


Zdroj: Vlastní výzkum

Měření CO₂

Z grafu č. 5 je vidět, že za přítomnosti žáků ve škole je koncentrace CO₂ vyšší. V zimních měsících je větrání omezeno. Od poloviny týdne hodnoty klesaly a dostaly se na tolerovatelnou hodnotu 1 000 – 1 500 ppm. V tomto případě oxid uhličitý neměl na koncentrace radonu až takový vliv. Avšak nucená ventilace s rekuperací nebo průduchy ve zdech by dokázaly hodnoty oxidu uhličitého i radonu ještě snížit (graf č. 5).

Graf č. 5 Koncentrace CO₂ - SOŠ strojní a elektrotechnická Velešín



Zdroj: Vlastní výzkum

4.2 Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola Volyně

Podmínky měření

Druhou přeměřovanou školou byla Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola Volyně, která se nachází na okraji města. Kapacita školy schválená hygienickou službou je 560 žáků a zaměstnanců a v současnosti k roku 2018 je na škole dohromady 380 žáků a zaměstnanců.

Škola byla postavena v roce 1933. Má dlouholetou tradici ve výrobě nábytku a navrhování interiérů. Je to historická, funkcionalistická budova. Škola je zděná se železo-betonovým skeletem a vyzdívkami. Je také podsklepená. V roce 2009 prošla škola celkovou rekonstrukcí, při níž došlo k zateplení a i k výměně oken za nová hliníková okna. V roce 2011 byla v rukodílně 1, rukodílně 2 a strojovně provedená protiradonová opatření. Jedná se o železobetonové haly. Podklad podlah v těchto prostorách tvoří původní beton. V podlaze rukodílen jsou poklopy do kanalizace a v podlaze strojovny jsou vzduchotechnické kanály pro odvod prachu od strojů. Větrání v místnostech bylo do doby, než se provedla protiradonová opatření přirozené okenními otvory a ve strojovně s občasným spuštěním odtahové vzduchotechniky. Lze se domnívat, že hlavními zdroji radonu v této škole je podloží, odkud radon proniká netěsnostmi v podlahových konstrukcích, revizními šachtami v podlahách a ze vzduchotechnických kanálů v podlaze strojovny (Jiránek, 2011).

Jako ozdravná opatření byla zvolena metoda nuceného odvětrání radonu z podloží bez výměny podlah zkombinované se zajištěním výměny vzduchu podzemních podlaží. Bylo realizováno odtahové odvětrání skládající se ze sekce 1, která odvádí vzduch ze sklepa a chodby, a sekce 2 odvádějící vzduch z chodby pod strojovnou a sklepa pod skladem. Vzduch je odváděn pomocí plastového potrubí zavěšeného pod stropem. Do potrubí je vzduch nasáván plastovými talířovými ventily a každá sekce je osazena ventilátorem. Každá sekce má navíc i kryté vyústění do venkovního prostředí. Vzduch je nasáván do odvětrávaných podzemních podlaží přirozeně netěsnostmi a i pomocí vzduchotechnickým potrubím dodávajícím vzduch do sklepa. Vypíná se na prázdniny. Pod rukodílnou 1 je nainstalováno 5 odsávacích vrtů, pod rukodílnou 2 je také 5 odsávacích vrtů a pod strojovnou je dokonce podloží odvětráno pomocí 10 odsávacích vrtů. Vrty jsou napojeny na horizontální sběrné plastové potrubí (Jiránek, 2011).

Vnitřní teplota byla přibližně 23°C – 25°C. Průměrné venkovní teploty kolísaly v ranních hodinách od 0°C do 5°C a v odpoledních hodinách od 8°C do 14°C. Vidíme, že rozdíl mezi vnitřními teplotami a vnějšími je poměrně velký. Komínový efekt může být uplatňován ve velké míře. Do objektu mohou z podloží pronikat vyšší koncentrace radonu.

Geologické podloží

Povšimněme si z radonové mapy v příloze č. 2 a č. 6 (škola je v mapě zakreslena červeným puntíkem), že město Volyně leží na středním radonovém indexu podloží. Místy se objevují části s vysokým nebo naopak nízkým radonovým indexem. V této oblasti jsou převážně ruly, místy alkalicko-živcové muskovitické granity (Chlupáč, 2011).

Měření

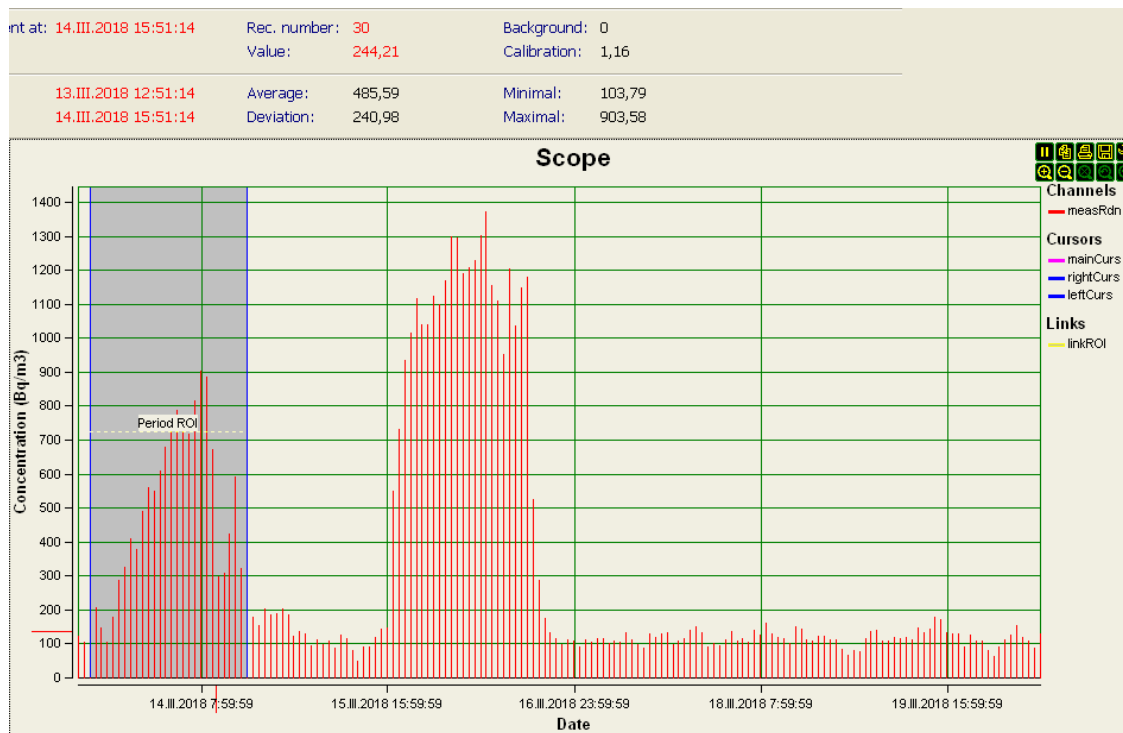
Na škole Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola Volyně proběhlo v rámci radonového programu od Státního ústavu radiační ochrany měření od 13. října 2008 do 2. října 2009. U téměř poloviny stopových detektorů došlo ke ztrátám nebo k znehodnocení. Takže nemohly být v těchto prostorech naměřeny jakékoli hodnoty. U stopových detektorů, které naměřily výsledné hodnoty, došlo podle tehdejší legislativy (vyhláška č. 307/2002 sb.) k překročení limitu 400 Bq/m³ došlo ve dvou případech. V dílně v přízemí byla naměřená hodnota 462 Bq/m³ a v jiné dílně také v přízemí bylo naměřeno 758 Bq/m³. Podle dnešní legislativy by došlo k překročení ještě v jednom případě a to ve třídě v přízemí, kde byla hodnota radonu 386 Bq/m³. Státní ústav radiační ochrany vyrozuměl vedení školy s problémem radonu u nich na škole. A oznámil jim, že na základě překročení směrné hodnoty ve dvou případech, je třeba provést další 2 měsíční měření ve více místnostech za pobytu dětí. Další přesnější měření od Státního ústavu radiační ochrany proběhlo od 8. ledna 2010 do 8. března 2010 a tentokrát byly měřeny čtyři třídy a ve všech došlo k překročení limitu 400 Bq/m³. Bylo měřeno pomocí integrálních detektorů Radim 3, Radim 3A, Radim 2P a Radim 5. V dílně- sklad byla objemová aktivita radonu 501 Bq/m³, v rukodílně 1 dokonce 1 021 Bq/m³, v rukodílně 2 byla koncentrace radonu 990 Bq/m³ a v poslední místnosti strojovně byla výsledná hodnota 971 Bq/m³. Vedení školy bylo opět vyrozuměno a seznámeno s výsledky druhého měření a bylo oznámeno, že je potřeba

provést ještě další měření v místnostech za pobytu dětí. A do doby než se situace vyřeší, státní ústav radiační ochrany doporučil ve škole zvýšit větrání. Poslední měření bylo realizováno v období od 25. listopadu do 2. prosince 2010 pod vedením Státního ústavu jaderné, chemické a biologické ochrany (SÚJCHBO). K přeměření tří místností byly použity kontinuální monitory radonu. Měřilo se v rukodílně 1 s výslednou objemovou aktivitou 920 Bq/m^3 , v rukodílně 2 s výsledkem $1\,100 \text{ Bq/m}^3$ a ve strojovně, které vyšla objemová aktivita radonu 900 Bq/m^3 . Na základě těchto výsledků, jež dokládají, že je v uvedených třídách problém s radonem a hodnota objemové aktivity je za pobytu dětí neustále překračována, doporučil státní úřad pro jadernou bezpečnost podle atomového zákona 18/1997 Sb. přezkoumat, zda jsou splněny všechny požadavky pro získání dotace a následně o ni zažádat. Dotace byly schváleny a na realizaci protiradonových opatření se celkem vynaložilo 523 336 Korun českých (Zákon 18/1997 Sb.; Jiránek, 2011).

Vlastní měření bylo provedeno od 13. března do 20. března 2018. K přeměření byly vybrány obě rukodílny 1, 2, které již mají nainstalována protiradonová opatření. Dále byla zvolena třída VT1 v suterénu, což je počítačová učebna, která nemá ozdravná opatření. Nejprve byl kontinuální monitor Radim 5B umístěn 13. března v 12:00 hodin do počítačové učebny VT1 v suterénu a přemístěn byl 14. března v 16:00 hodin do rukodílny 1. Následně 15. března v 16:00 hodin byl přístroj přesunut do kabinetu externistů a nakonec 16. března v 16:00 hodin byl umístěn do rukodílny 2 a zůstal zde do úterý 20. března. Prostory byly měřeny za normálního provozu, za pobytu dětí. A kontinuální monitor byl přemísťován po skončení výuky, což je v 16:00 hodin. Kabinet externistů byl z diplomové mé práce vyškrtnut, jelikož není prostorem třídy a nezdržují se zde děti. I tak je tento prostor využíván minimálně. Pouze pár hodin v měsíci pro externí učitele.

Z grafu č. 6 vidíme, že v počítačové třídě VT1 byla naměřená objemová aktivita radonu 486 Bq/m³. To znamená, že je překročena směrná hodnota 300 Bq/m³ dána vyhláškou č. 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje. V letech 2008-2009 v této třídě SÚRO naměřilo stopovými detektory hodnotu 232 Bq/m³. Námí naměřená hodnota je o poznání vyšší. Tato škola má problémy s vysokými koncentracemi radonu z podloží. Jelikož limit nebyl o tolik překročen, pomohlo by v tomto případě řádné větrání a popřípadě realizace nuceného větrání s rekuperací. Nebo udělat průduchy do zdiva, kterými by byl přísáván čistý vzduch do objektu (graf č. 6).

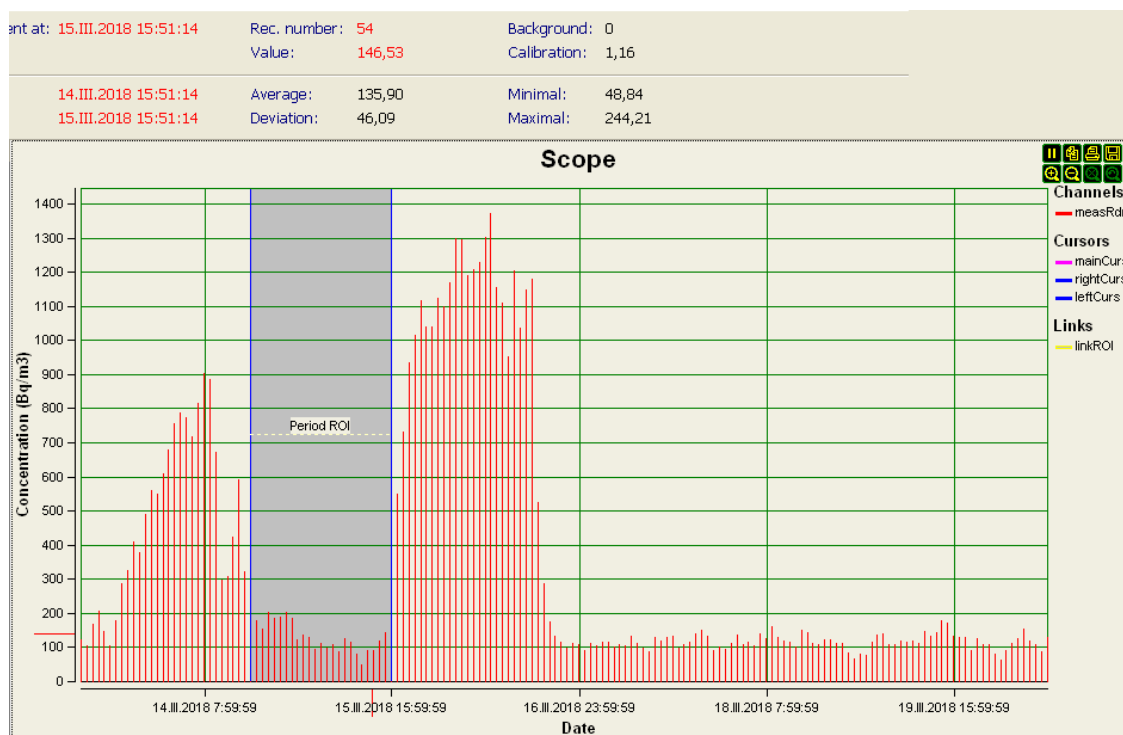
Graf č. 6 Počítačová třída VT1 (suterén) - OAR



Zdroj: Vlastní výzkum

Na grafu č. 7 máme rukodílno 1 ve které jsou již od roku 2011 provedena protiradonová opatření. Před nainstalováním ozdravných opatření byla poslední naměřená hodnota objemové aktivity radonu 920 Bq/m^3 . Nyní po rekonstrukci hodnoty objemové aktivity klesly na 136 Bq/m^3 . Je evidentní, že protiradonová opatření jsou účinná (graf č. 7).

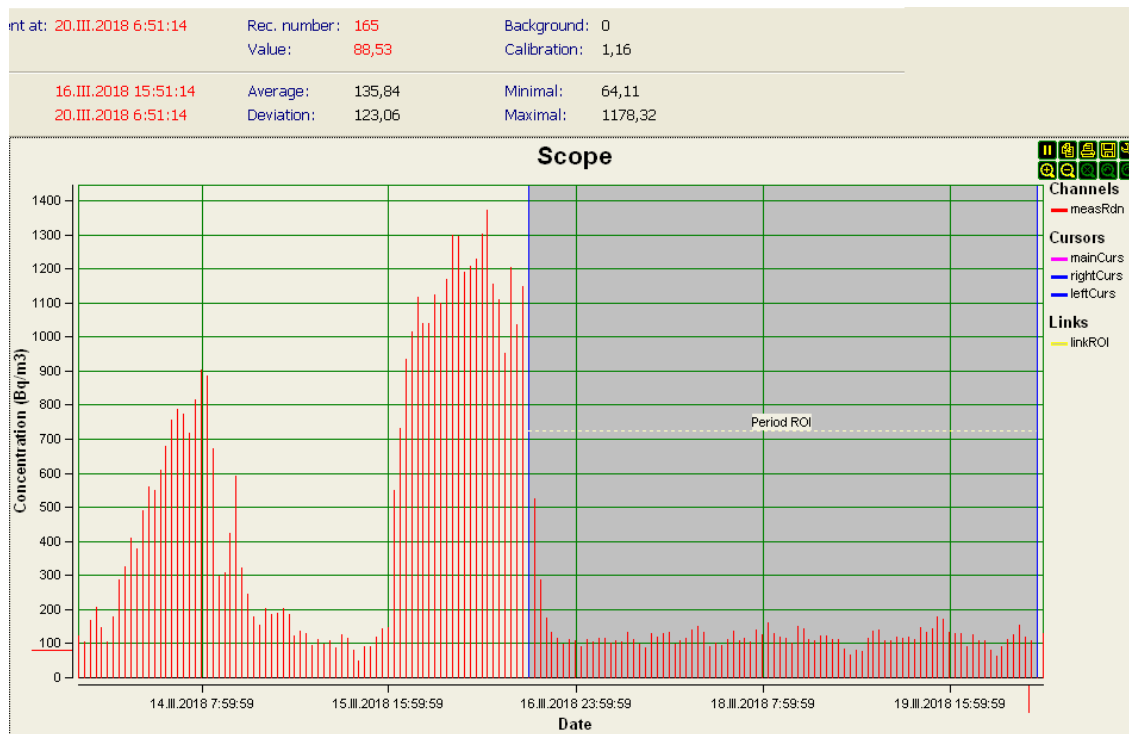
Graf č. 7 Rukodílno 1 (přízemí) – OAR



Zdroj: Vlastní výzkum

Na grafu č. 8 je zobrazena rukodílina 2, která je také již po realizaci protiradonových opatření z roku 2011. Poslední naměřená hodnota před rekonstrukcí byla $1\,100\text{ Bq/m}^3$. V současnosti po zavedení ozdravných opatření z mého měření vyšlo najevo, že jsou účinná. Jelikož objemová aktivita radonu je nyní 136 Bq/m^3 (graf č. 8).

Graf č. 8 Rukodílina 2 (přízemí) - OAR

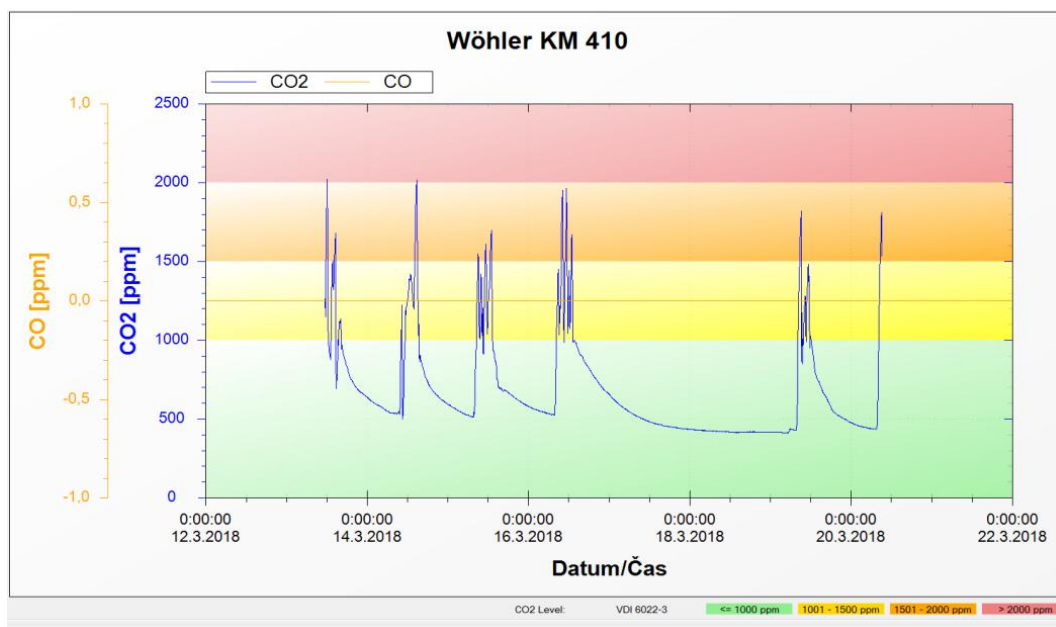


Zdroj: Vlastní výzkum

Měření CO₂

Z grafu č. 9 je zřejmé, že za přítomnosti žáků ve škole je koncentrace CO₂ mnohem vyšší. V zimních měsících je větrání omezeno a proto se koncentrace CO₂ v budovách zvyšuje. Za pobytu dětí se hodnoty dostávají až na 2 000 ppm. Což je více, než nám povoluje vyhláška č. 410/2005 Sb., o požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých. Ta nám udává maximálně 1 500 ppm. (Vyhláška č. 410/2005 Sb.). V tomto případě oxid uhličitý má jistě vliv na objemovou aktivitu radonu v budově. Intenzivní větrání, nucená ventilace s rekuperací nebo průduchy ve zdech by dokázaly hodnoty oxidu uhličitého i radonu snížit (graf č. 5).

Graf č. 9 Koncentrace CO₂ - Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola Volyně



Zdroj: Vlastní výzkum

4.3 Střední škola rybářská a Vyšší odborná škola vodního hospodářství a ekologie, Vodňany

Podmínky měření

Další měřenou školou byla Střední škola rybářská a Vyšší odborná škola vodního hospodářství a ekologie, Vodňany, která je situována na okraji města, ležící v blízkosti rybníků. Kapacita školy je k letošnímu roku 232 žáků a zaměstnanců.

Škola byla postavena v roce 1920. Je to historická cihelná stavba. Typické pro staré stavby je, že bývají podsklepené, jsou postaveny z cihel a mají široké zdi. Uvnitř takových to budov bývá vlhko. V roce 2009 začala přístavba nové části, k jejímu dokončení došlo v následujícím roce. V budově proběhly různé stavební úpravy. V roce 1966 bylo nainstalováno ústřední topení a v roce 1967 – 1969 byla přistavěna tělocvična a odborné kabinety. Roku 1994 proběhla plynofikace školy, přívod vysokotlakého plynovodu a vybudování nízkotlakého rozvodu. Okna jsou vyměněna za dřevěná Eurookna, k čemuž došlo v roce 2001. V roce 2004 byla provedena kompletní rekonstrukce elektrorozvodů a roku 2009 se vybuďovala hydroizolace obvodových zdí v historické budově školy.

Vnitřní teplota budovy byla přibližně 20°C – 22°C. Průměrné venkovní teploty kolísaly v ranních hodinách od -3°C do 7°C a v odpoledních hodinách od 2°C do 13°C. Rozdíly vnitřních a venkovních teplot jsou stále poměrně velké. Opět i v tomto případě se může více uplatňovat komínový efekt.

Geologické podloží

Město Vodňany leží v nízkém radonovém indexu, až na cíp středního radonového indexu na okraji města, ve kterém zrovna leží i střední rybářská škola. Jak můžeme vidět z radonové mapy v příloze č. 3 a č. 6, škola je opět zakreslena v mapě červeným puntíkem. Převážně je geologické podloží města složeno z písků, štěrku a nivního sedimentu. V místech, kde je postavena škola se nachází pararuly a migmatity (Chlupáč, 2011). Proto tato oblast okolo školy spadá do středního radonového indexu (obr. č. 13, přílohy)

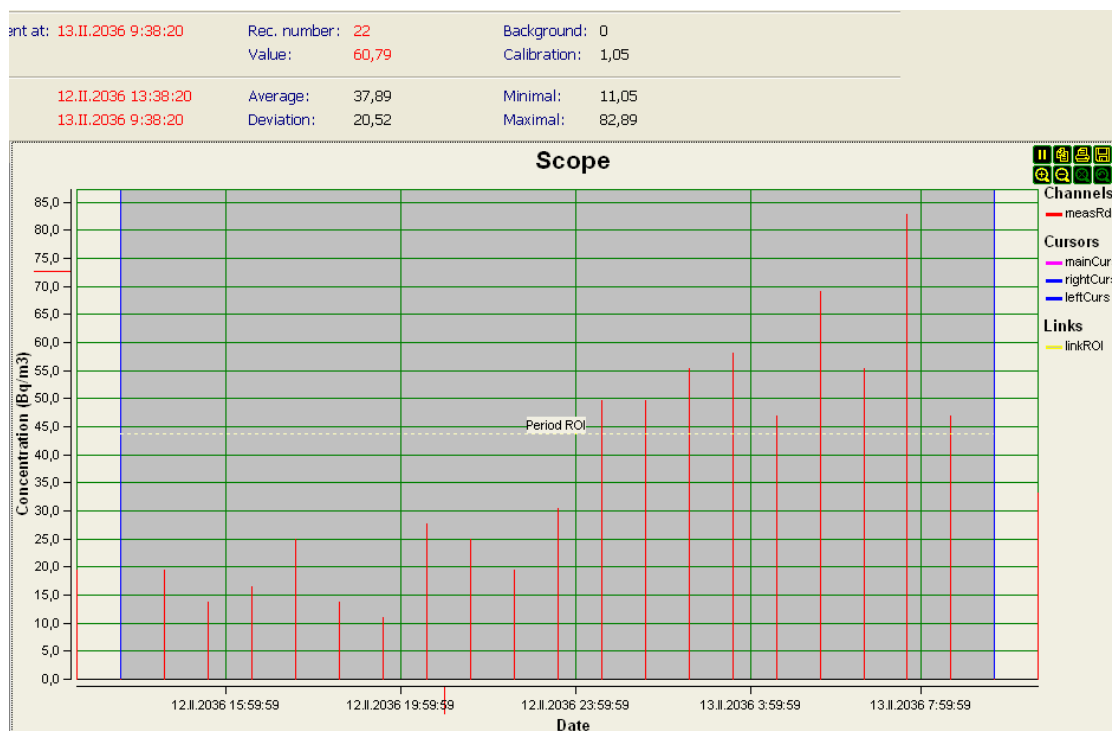
Měření

Na Střední rybářské škole ve Vodňanech neproběhlo nikdy měření radonu v rámci radonového programu od Státního ústavu radiační ochrany. Vlastní měření bylo na této škole provedeno od 12. března do 17. března 2018. Cílem měření bylo srovnat výsledné hodnoty naměřené ve staré budově a v nové budově. Proto byly vybrány dvě třídy, přičemž jedna je z 1. podlaží staré části a druhá také z 1. podlaží avšak z nové části. Opět byla měřena objemová aktivita radonu kontinuálním přístrojem Radim 5B. Nejprve byl dán přístroj do třídy 4B v 1. podlaží nové budovy v 14:00 hodin. Přenesen byl 13. března v 14:00 hodin do třídy 1A v 1. podlaží staré budovy. Prostory byly měřeny za obvyklého provozu, za pobytu žáků.

V této škole nedošlo k měření oxidu uhličitého a to z důvodu současného měření na střední škole ve Volyni. K dispozici byl pouze jeden přístroj k měření CO₂, který byl tou dobou využíván právě na Vyšší odborné škole a Střední průmyslové škole ve Volyni.

Z grafu č. 10 je patrné, že průměrná objemová aktivita radonu je 38 Bq/m^3 a nejvyšší hodnota dosahovala 83 Bq/m^3 , tudíž nebyla překročena hodnota 300 Bq/m^3 pro stávající budovy daná vyhláškou 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje (Vyhláška č. 422/ 2016 Sb.). Je zřejmé, že nová část je ze stavebního hlediska v pořádku a je proti radonu dobře ošetřena (graf č. 10).

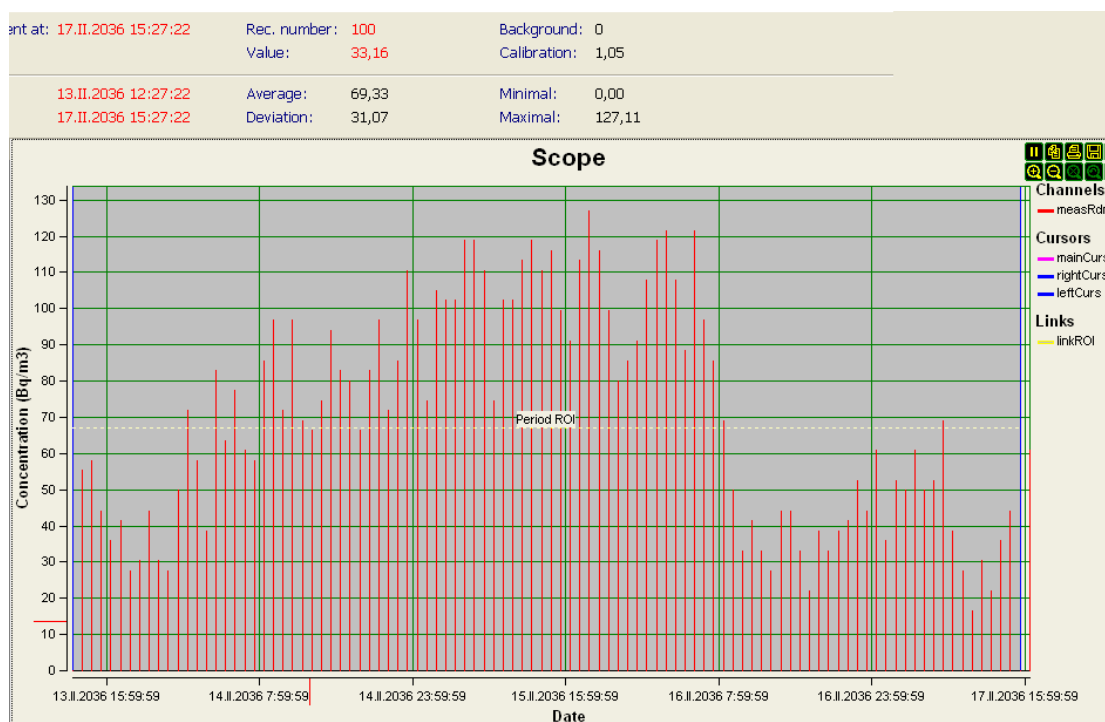
Graf č. 10 Třída 4B (1. podlaží) nová budova - OAR



Zdroj: Vlastní výzkum

Ve třídě 1A ve staré budově byly naměřeny hodnoty o poznání vyšší. Z grafu č. 11 můžeme vyčíst, že objemová aktivita radonu byla 69 Bq/m^3 . S tím, že hodnoty 13. března do 16. března postupně stoupaly. Maximální naměřená hodnota byla 127 Bq/m^3 . Přesto také nebyla překročena hodnota 300 Bq/m^3 . Tento prostor je využíván k příležitostnému používání na 6 hodin týdně. Postačilo by zde více větrat a koncentrace radonu by se jistě snížila. Problémem v této učebně ve staré části jsou vlhké zdi a přímý kontakt s podlahou, které je díky nedalekým rybníkům také značně vlhké (graf č. 11).

Graf č. 11 Třída 1A (1. podlaží) stará budova – OAR



Zdroj: Vlastní výzkum

4.4 Vyšší odborná škola a Střední zemědělská škola Tábor

Podmínky pro měření

Čtvrtou v pořadí měřenou školou byla Vyšší odborná škola a Střední zemědělská škola v Táboře. Nachází přímo v centru Tábora, nedaleko vodní nádrže zvané Jordán. Obklopuje ji z jedné strany botanická zahrada a z druhé strany náměstí T. G. Masaryka a hlavní třída 9. května, na které se nachází řada obchodů a prochází tudy silnice. Kapacita školy k tomuto roku 2018 je 296 žáků a zaměstnanců.

Škola byla postavena v roce 1904. Je to historická cihelná stavba postavená ve stylu novorenesance se secesními prvky. V roce 200 byla prohlášena za kulturní památku. Tato škola je podsklepená, má široké zdivo a je postavena do tvaru písmene U. V těchto starých budovách bývá problémem vlhkost. V roce 2009 byla měněna okna za dřevěná Eurookna. Škola není zateplená.

Vnitřní teplota budovy byla přibližně 20°C – 22°C. Průměrné venkovní teploty kolísaly v ranních hodinách od -5°C do 0°C a v odpoledních hodinách 1°C do 13°C. Rozdíl teplot je obdobný jako v předchozích případech. V ranních hodinách je teplotní rozdíl mezi vnitřní a vnější teplotou větší, než v odpoledních.

Geologické podloží

Povšimněme si z radonové mapy v příloze č. 4 a č. 6, jak je geologické podloží Tábora pravidelně rozděleno na část s vysokým radonovým indexem, které se skládá ze syenitů a granitů. A na část se středním radonovým indexem složenou z pararul až migmatitů (Petránek, 2007). Jak můžeme vidět, ke škole, která je zakreslena v radonové mapě červeným puntíkem, zasahuje cípek s vysokým radonovým indexem, který je složen z křemenných syenitů (obr č. 16, přílohy).

Měření

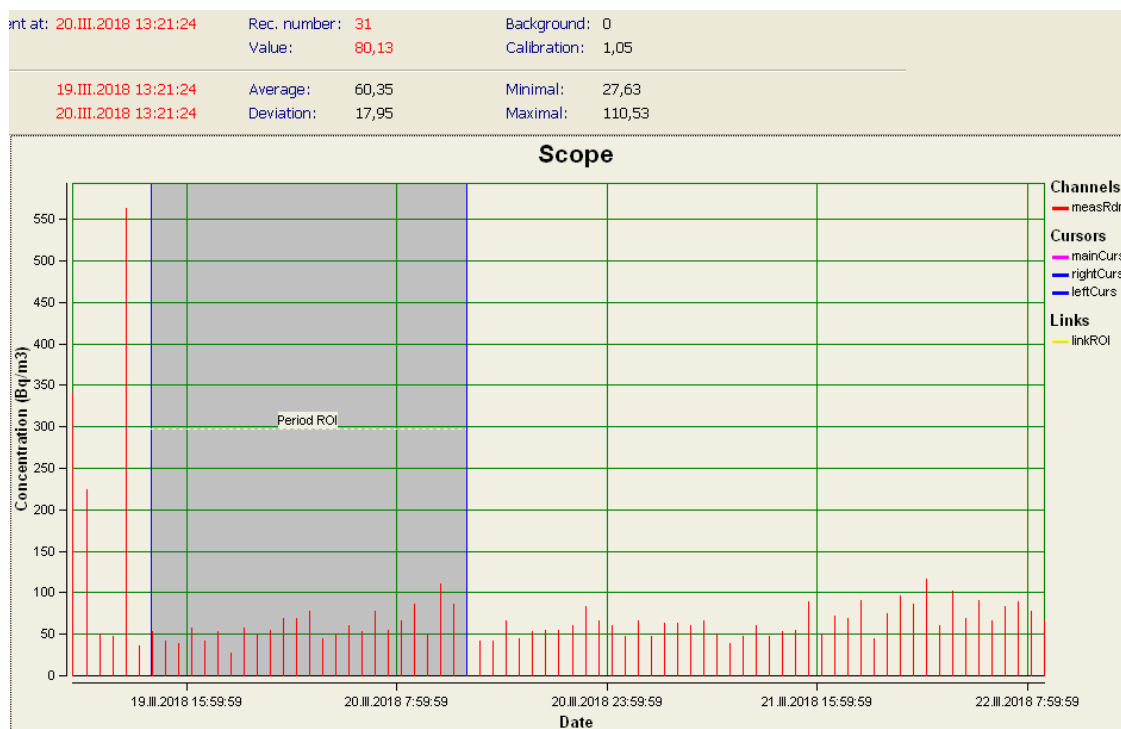
Na Vyšší odborná škola a střední zemědělská škola v Táboře neproběhlo roční měření v rámci radonového programu od Státního ústavu radiační ochrany. Vlastní měření bylo provedeno od 19. března do 23. března 2018. Jelikož nebylo na této škole nikdy prováděno měření radonu, vybrala jsem si sama 4 třídy. Zvolila jsem dvě třídy v přízemí, jednu v 1. podlaží a jednu ve 2. podlaží. Volila jsem takto z hlediska komínového efektu. Předpokládala jsem tedy, že v přízemí budou koncentrace radonu

nejvyšší a ve 2. podlaží nejnižší. Byla měřena objemová aktivita radonu kontinuálním přístrojem Radim 5B. Do třídy 34 v přízemí byl dán přístroj 19. března 2018 v 13:00 hodin, přenesen byl 20. března v 13:00 do třídy č. 41 také v přízemí, avšak na druhé straně školy. Přístroj byl dále přesunut 21. března opět v 13:00 hodin do učebny č. 56 v 1. podlaží a nakonec byl naposledy přemístěn 22. března v 13:00 hodin do třídy č. 94 ve 2. podlaží. I na této škole byly prostory měřeny za pobytu dětí. Kontinuální monitor byl přenášen těsně před skončením výuky v daných třídách, což bývá kolem 13:30 hodin.

Na této škole nebyl měřen oxid uhličitý, jelikož nemohl být zapůjčen měřicí přístroj. Tou dobou sloužil k zakázkovým účelům.

První měřeným prostorem byla přízemní učebna č. 34, kde byla naměřená objemová aktivita radonu 60 Bq/m^3 , což samozřejmě splňuje hodnotu danou legislativou. V přízemní části jsem vzhledem ke střednímu až vyššímu radonovému indexu očekávala vyšší hodnoty radonu. Je patrné, že škola má dostatečnou izolaci proti radonu a větrání ve třídách bude také přijatelné (graf č. 12).

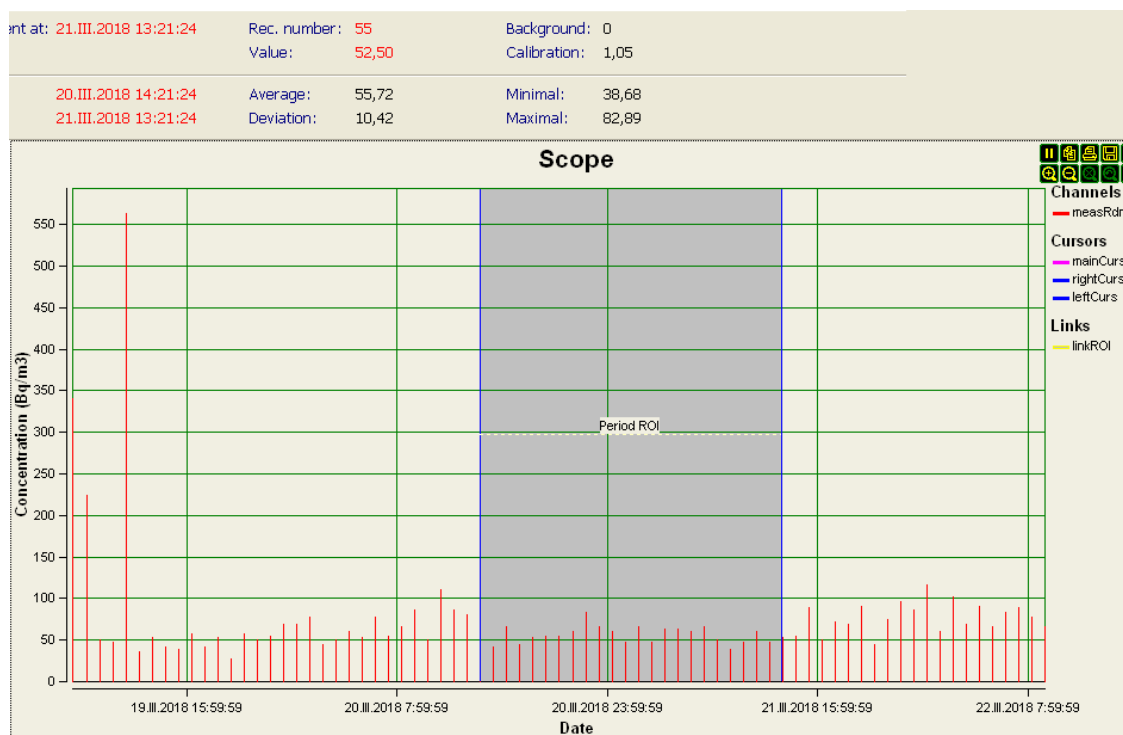
Graf č. 12 Třída č. 34 (přízemí) – OAR



Zdroj: Vlastní výzkum

Na grafu č. 13 je zobrazena druhá měřená třída č. 41 opět v přízemí, ale na druhém konci školy. Zde byla objemová aktivita naměřená kontinuálním monitorem dokonce ještě o něco nižší, než ve třídě č. 34 a to 56Bq/m^3 . Tato škola má sice nová okna, ale není zateplená, takže nedochází k úplnému snížení výměny vzduchu na minimum. Očividně je v této škole i dostatečně větráno (graf č. 13).

Graf č. 13 Třída č. 41 (přízemí) – OAR

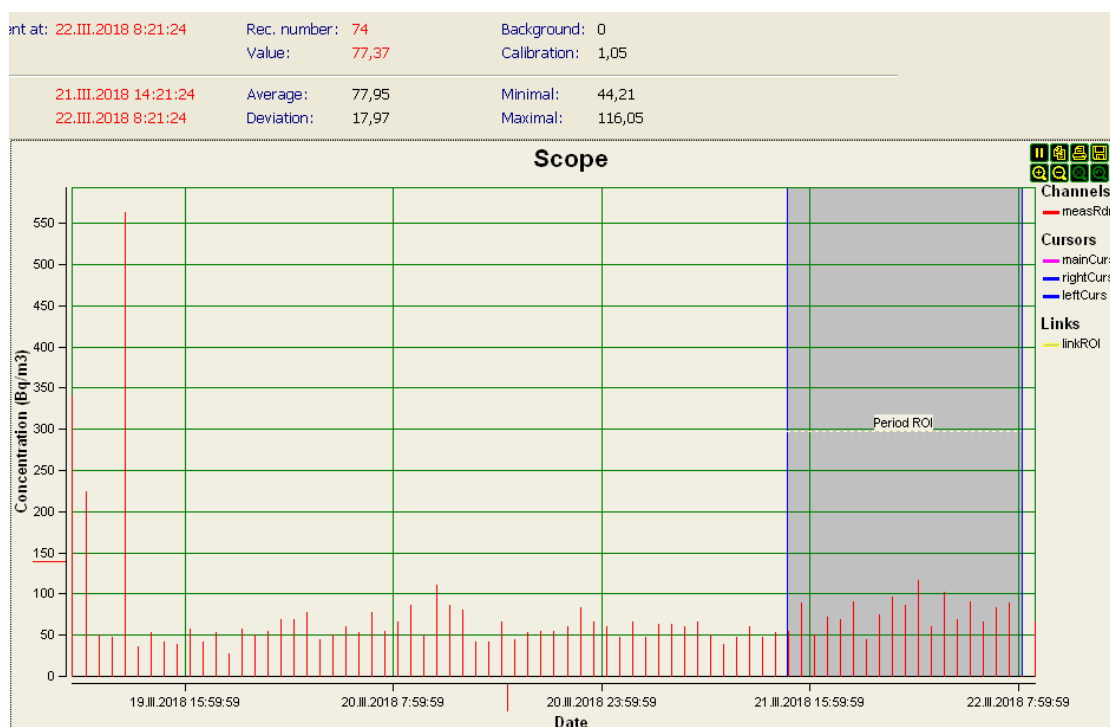


Zdroj: Vlastní výzkum

Jak můžeme vidět z grafu č. 14, v učebně číslo 56 v 1. podlaží byla pomocí přístroje naměřena objemová aktivita radonu 78 Bq/m^3 , což je naopak vyšší, než tomu bylo v přízemí. Může to být dáno právě méně častou výměnou vzduchu a menší využitelností třídy. I tak jsou hodnoty dosti nízké a je zřejmé že tato škola s radonem problém nemá (graf č. 14).

Další měřenou třídou měla být učebna č. 94 ve 2. podlaží, kde však během měření došlo k neočekávanému vypnutí přístroje. Tudíž hodnoty radonu naměřeny nebyly. Jelikož jsou hodnoty objemové aktivity radonu na Vyšší odborná škola a střední zemědělské škole v Táboře více než uspokojivé, dá se předpokládat, že ani v poslední třídě č. 94 by nebyla naměřena vysoká koncentrace radonu.

Graf č. 14 Třída č. 56 (1. podlaží) – OAR



Zdroj: Vlastní výzkum

4.5 Vyšší odborná škola, střední škola, COP, Sezimovo Ústí

Podmínky měření

Poslední měřenou školou byla Vyšší odborná škola, střední škola, Centrum odborné přípravy, Sezimovo Ústí, která je rozčleněna do třech oddělených budov. Hlavní budova je na okraji Sezimova Ústí II. a další dvě budovy jsou v centru Sezimova Ústí II. Kapacita školy k tomuto roku 2018 je 820 žáků a zaměstnanců.

Hlavní budova Centrum odborné přípravy v Sezimově Ústí byla postavena v roce 1940. V roce 1998 proběhla rekonstrukce budovy, došlo k zateplení, výměně oken za plastová a proběhla výměna střechy. Budova je čtyřpodlažní, cihelná a je částečně podsklepena. Obvodové zdivo je provedeno tradiční technologií. Podlahová konstrukce je provedena z betonu na něm jsou položeny podlahy z PVC a dlažby. Jsou zde provedeny hydroizolace z asfaltové lepenky. Stropy jsou provedeny jako ztracené bednění a střecha je sedlová s pálenou taškovou krytinou. Vytápění budovy je ústřední (Cícha, 2004a).

Další budovou školy bylo IVS (informačně vzdělávací středisko). IVS bylo postaveno v roce 2012. Je to patrová zděná budova. V přízemí se nacházejí garáže s uzavřeným schodištěm. IVS je postaveno z thermobloků porotherm a betonu. Základy jsou betonové a nosné sloupy jsou postaveny z železobetonu. Obvodové a nosné zdivo je opět z thermobloku porotherm. Fasáda je zateplena polystyrenem. Podlahy jsou z betonu pokryté dlažbou. Stropy jsou z železobetonu se stropními podhledy v 1. podlaží. Okna jsou plastová s izolačním dvojsklem. Objekt je vytápěn centrálně. V 1. podlaží je nainstalována vzduchotechnika s rekuperací. Jsou zde provedena jednostupňová protiradonová opatření (izolační folie) (Kusý, 2012).

Třetí budovou školy je takzvaná budova F., která byla postavena v roce 1955. K její rekonstrukci došlo v roce 2005, byla zateplena a proběhla i výměna oken za plastová. Jedná se o dvoupodlažní objekt, který není podsklepen. Obvodové zdivo je provedeno tradiční technologií. A jsou již patrné drobné trhliny ve zdivu. Podlahová konstrukce je provedena z betonu a dlažby. Hydroizolace je zhotovena z asfaltové lepenky. Stropy jsou železobetonové a střecha je rovná s živičnou krytinou. Prostor je vytápěn ústředním topením (Cícha, 2004b).

Vnitřní teplota budovy kolísala od 20°C do 24°C. Průměrné venkovní teploty kolísaly v ranních hodinách od 4°C do 8°C a v odpoledních hodinách 14°C do 20°C.

Rozdíl teplot v ranních hodinách je mezi vnitřní a vnější teplotou větší, v odpoledních už není tak markantní.

Geologické podloží

Z radonové mapy v příloze č. 5 a č. 6 vidíme, že je geologické podloží Sezimova Ústí na středním radonovém indexu. Skládá se z pararul, ortorul až migmatitů (Petránek, 2007; Chlupáč, 2011). V mapě radonového podloží jsem červenými puntíky zakreslila polohu škol. (obr č. 16, přílohy).

Měření

V Hlavní budově došlo dříve k měření radonu a to za účelem modernizace školy, zejména stravovací části. Měření prováděla místní komerční firma BEKEREL v únoru 2003. Prostory byly měřeny dozimetrickým systémem RM-1. Nebyly překročeny směrné hodnoty objemové aktivity radonu platné pro dřívější legislativu, tedy 400 Bq/m^3 . Hodnoty se pohybovaly okolo 250 Bq/m^3 . Nejvyšší hodnota byla naměřena v suterénu a to 385 Bq/m^3 . V těchto prostorách se však žáci vůbec nezdržují. Dále bylo proměřováno pouze 1. podlaží, ve kterém byla nejvyšší hodnota objemové aktivity radonu 277 Bq/m^3 . Tuto místnost jsem přeměřovala (třída fyziky) (Cícha, 2004a).

V budově IVS proběhlo měření radonu září 2012, za účelem předkolaudačního měření. Měření bylo objednáno u firmy KUSÝ. Objekt byl proměřován integrálním dozimetrickým systémem RM-1. Hodnoty nepřevyšovaly hodnotu 200 Bq/m^3 pro dřívější legislativu 307/200 Sb. Průměrná objemová aktivita radonu se pohybovala okolo 50 Bq/m^3 jak v přízemí, tak i v prvním patře. Já jsem přeměřovala 1. podlaží, protože se zde žáci zdržují více (Kusý, 2012).

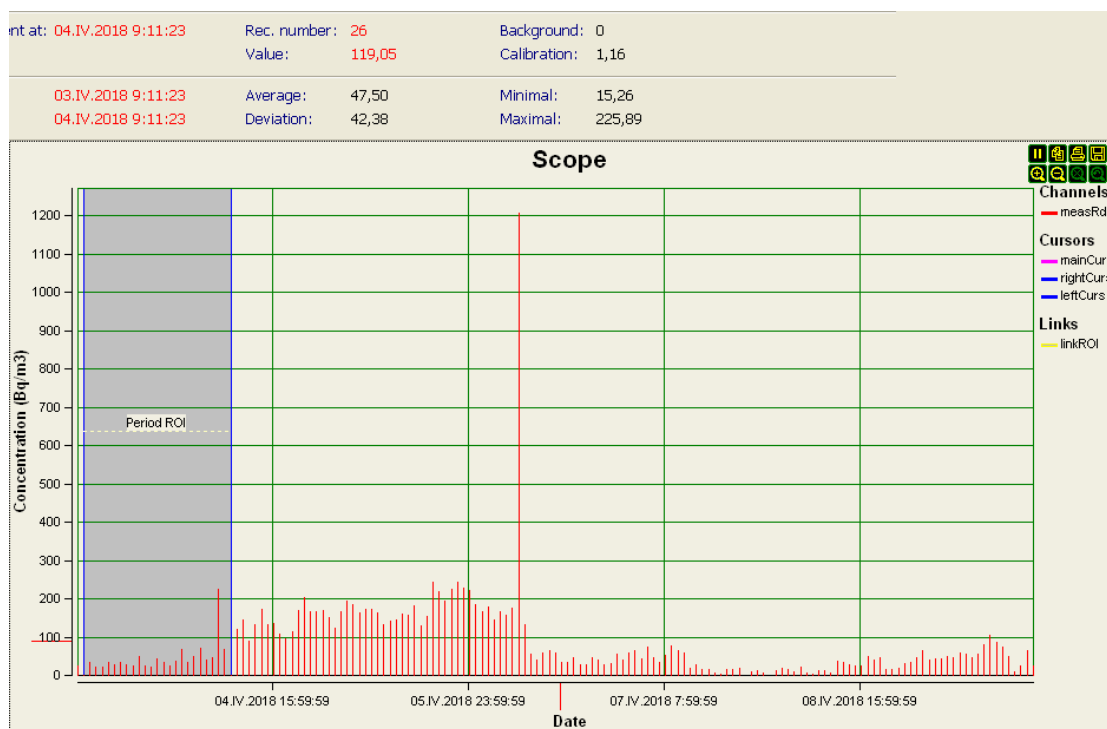
V budově F došlo k měření radonu také v únoru 2003 a to z důvodu provedení úprav budovy se změnou využití charakteru budovy. Dříve stravovna, dnes dílny pro žáky. Měření prováděla opět místní komerční firma BEKEREL. Prostory byly měřeny pomocí dozimetrického systému RM-1. Nebyly překročeny směrné hodnoty objemové aktivity radonu platné pro dřívější legislativu, tedy 400 Bq/m^3 . Hodnoty se pohybovaly okolo 300 Bq/m^3 . Nejvyšší hodnota byla naměřena v přízemí a to 368 Bq/m^3 . Tuto místnost jsem přeměřovala, byla to dílna pro praktickou výuku studentů (Cícha, 2004b).

Vlastní měření bylo provedeno od 3. dubna do 6. dubna 2018. Prostory k přeměření jsem si zvolila tak, jak bylo popsáno výše. Zvolila jsem si tedy třídu fyziky v 1. podlaží

v hlavní budově, dále přízemní dílnu v budově F a v budově IVS 1. Podloží. Byla měřena objemová aktivita radonu kontinuálním přístrojem Radim 5B. Nejprve byl přístroj umístěn do učebny fyziky v hlavní budově a to 3. Dubna 2018 v 8:30 hodin, dále byl přesunut do budovy informačně vzdělávacího střediska 4. dubna v 9:00 hodin a na závěr byl 5. Dubna v 9:00 hodin přemístěn do přízemní dílny v budově F. I na této škole byly prostory měřeny vždy za pobytu dětí. Kontinuální monitor byl přenášěn ráno před výukou v daných třídách.

Při prvním měření této třídy firmou BEKEREL vyšla objemová aktivita radonu 277 Bq/m³. Z grafu č. 15 můžeme vyčíst, že mnou naměřená hodnota objemové aktivity radonu je 48 Bq/m³, což je znatelně nižší hodnota. Je vidět, že s radonem v této třídě problém není, protože z grafu č. 18 je evidentní, že se ve škole větrá málo. Takže nízká hodnota nemohla být zapříčiněna výměnou vzduchu (graf č. 15; Cícha, 2004a).

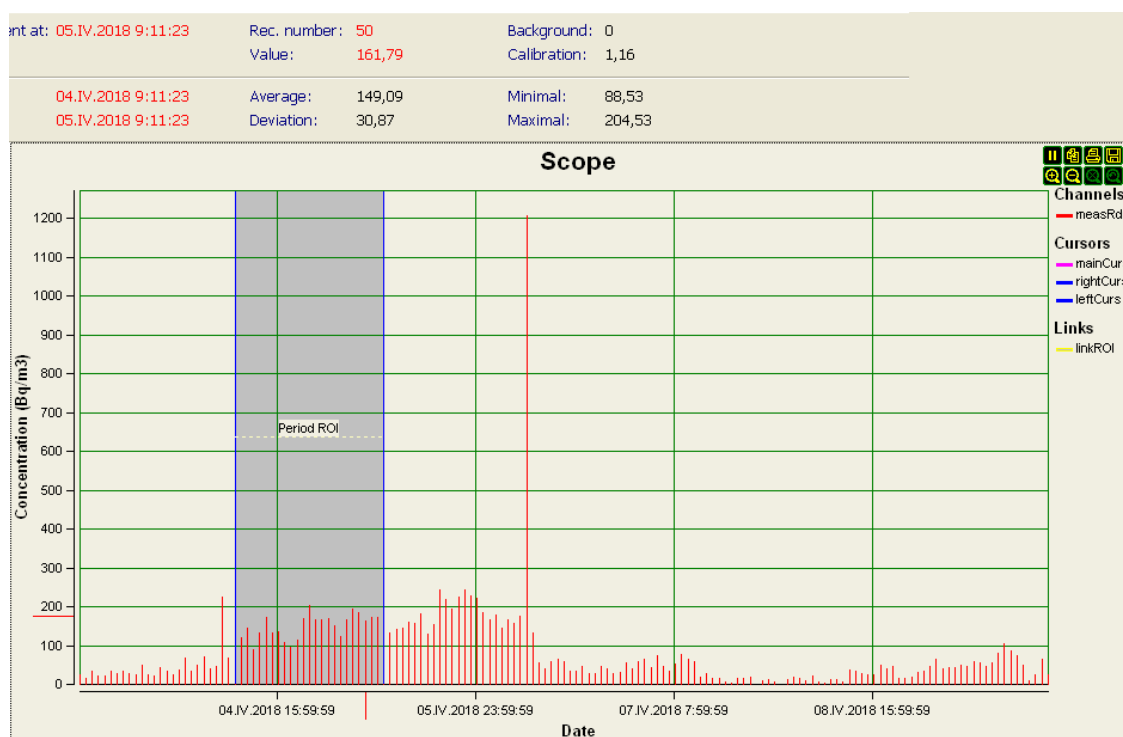
Graf č. 15 Učebna fyziky (1. podlaží) - OAR



Zdroj: Vlastní výzkum

Po prvním měření firmou KUSÝ vyšla objemová aktivita radonu v 1. podlaží 50 Bq/m³. Po mém měření jak je vidět v grafu č. 16 vyšla 149 Bq/m³. I v tomto případě je rozdíl markantní, avšak pro tentokrát byla prvně naměřena mnohem menší koncentrace radonu oproti tomu, jaká hodnota vyšla nám. Může to být dáno nedostatečným větráním, nebo používáním stavby došlo k poruchám ve stavbě, kudy může radon pronikat (například trhliny ve zdivu atd.), může to být dáno i klimatickými podmínkami i rozdílem teplot vnitřního a venkovního prostředí (graf č. 16; Kusý, 2012).

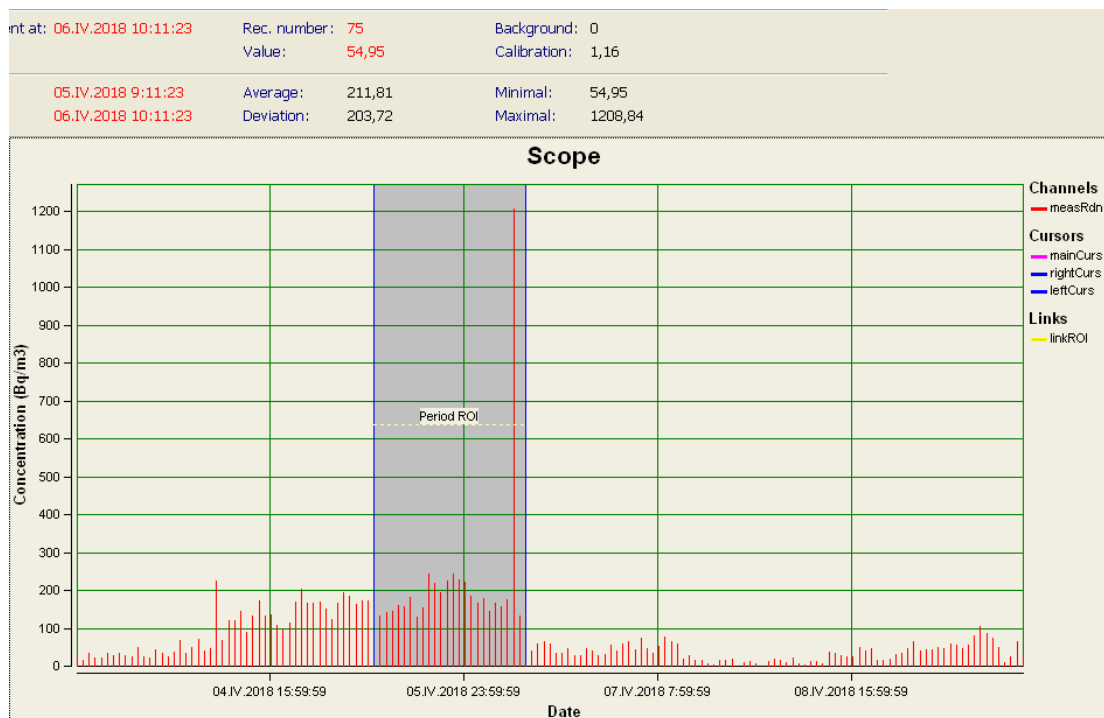
Graf č. 16 IVS (1. podlaží) - OAR



Zdroj: Vlastní výzkum

Po měření objemové aktivity firmou BEKEREL byla naměřena hodnota 368 Bq/m³. Z grafu si povšimněme, že naše hodnota je 211 Bq/m³. Což je tedy méně, než při prvním měření, ale rozdíl není až tak velký. Směrná hodnota 300 Bq/m³ daná vyhláškou č. 422/2016 Sb. překročena nebyla. Ke snížení koncentrace radonu bychom mohli dospět větráním. Na grafu je vidět jedna maximální hodnota 1 208 Bq/m³ nenadálý nárůst mohl být zapříčiněn manipulací s kontinuálním monitorem nebo jeho přemístění (graf č. 17; Cícha, 2004b).

Graf č. 17 Dílna F (přízemí) – OAR

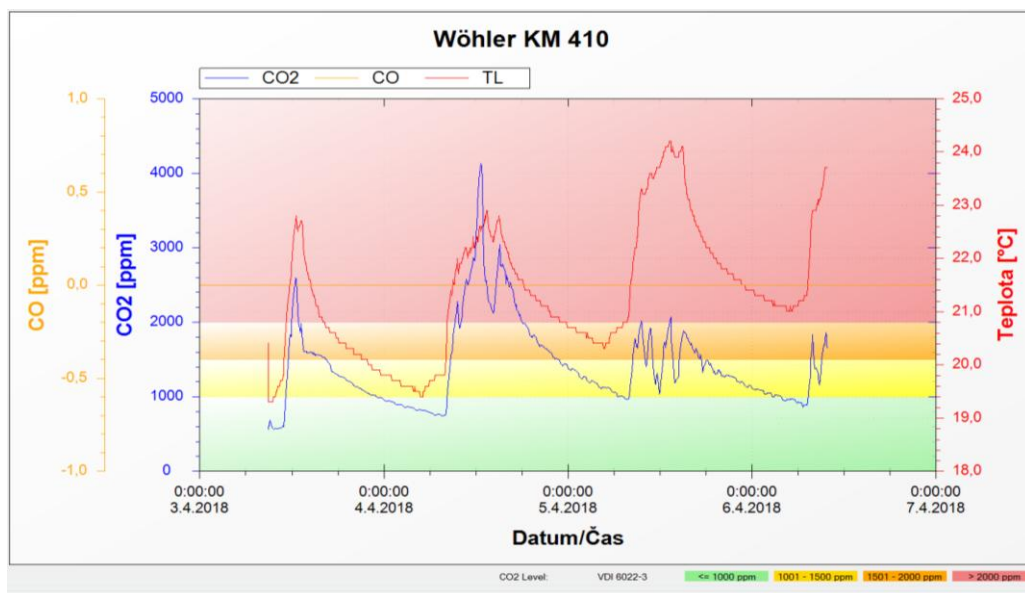


Zdroj: Vlastní výzkum

Měření CO₂

Z grafu č. 18 je zřejmé, že za přítomnosti žáků ve škole je koncentrace CO₂ mnohem vyšší. Za pobytu dětí se hodnoty dostávají až na kritických 3 000 – 4 000 ppm. Tato čísla jsou opravdu alarmující. Je to podstatně větší koncentrace, než nám povoluje vyhláška č. 410/2005 Sb., o požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých. Ta nám udává maximálně 1 500 ppm. Za takových to podmínek se nemohou děti soustředit. (Vyhláška č. 410/2005 Sb.). V tomto případě oxid uhličitý má jistě vliv na objemovou aktivitu radonu v budově. Intenzivní větrání, nucená ventilace s rekuperací nebo průduchy ve zdech by dokázaly hodnoty oxidu uhličitého i radonu snížit (graf č. 5).

Graf č. 18 Koncentrace CO₂ – Vyšší odborná škola, střední škola, COP, Sezimovo Ústí



Zdroj: Vlastní výzkum

5 DISKUZE

Radon je radioaktivní plyn, který se v přírodě běžně vyskytuje v půdním vzduchu hornin. Odtud se dostává komínovým efektem nebo difuzí do budov a ohrožuje tak zdraví zde žijících osob. Může se do budov dostat i z vody nebo ze stavebního materiálu. Jelikož je bezbarvý a bezzápachový nemůžeme ho detekovat jinak, než pomocí speciálních přístrojů. Proto je pro nás tolik nebezpečný, neuvědomujeme si jeho přítomnost (SÚRO, 2018b). Podle světové zdravotnické organizace je právě radon, hned po kouření, druhým nejčastějším rizikem pro vznik rakoviny plic. Po ingesci vody s radonem. Může vyvolat i jinou velice závažnou nemoc a tou je leukémie (WHO, 2009).

Hlavní cíl

Hlavním cílem výzkumné části mé diplomové práce bylo sledování objemové aktivity radonu z podloží v objektech vybraných středních škol v Jihočeském kraji. Výzkum byl prováděn v budovách pěti středních škol. A objemová aktivita byla sledována pomocí zapůjčeného kontinuálního přístroje Radim 5B od firmy AZ – Radon s.r.o. Měření probíhalo v každé škole přibližně týden, s tím, že vždy byla daná třída měřena pouze den. Proto výsledné hodnoty, které vyšly, jsou pouze informativní. Koncentrace radonu v budovách ovlivňuje spousta faktorů, a proto můžeme naměřit každý den naprosto odlišné koncentrace. Pro přesnější hodnoty objemové aktivity radonu se tedy doporučuje nejlépe roční měření nebo alespoň týdenní (Popp, ústní sdělení).

Z důvodu častého zatížení výsledků chybou různého druhu, je pro uznání dotace povinné provést vícero měření. Nepostačí pouze jedno roční měření, které ukáže nadlimitní hodnoty objemové aktivity radonu (362/2012 Sb.). Poté se přistupuje k dvouměsíčnímu měření integrálními detektory. Pokud opět vyjdou nadlimitní hodnoty, provádí se ještě jedno týdenní měření kontinuálními monitory (Zákon č. 263/2016 Sb.; Vyhláška 422/2016 Sb.). Jelikož jsou přesnější, ale hlavní výhodou je možnost zobrazení výsledků v podrobných grafech (Fukátko, 2007). Pokud i výsledky třetího měření přesáhnou směrnou hodnotu a splňujeme další požadavky dané legislativou, máme právo zažádat o dotaci (362/2012 Sb.).

Pro účely získání výsledků k mé diplomové práci postačí měření informativní. Týdenní a roční měření jsou mnohem více finančně i časově nákladnější.

Výzkumná otázka č. 1

S Hlavním cílem byla spojena výzkumná otázka č. 1, která zní „*Jaké jsou naměřené koncentrace radonu z podloží ve vnitřním ovzduší vybraných středních škol v Jihočeském kraji?*“

V empirické části jsem rozebrala každou školu zvlášť. Popsala jsem podmínky měření, včetně stavebního profilu školy, teploty v budově i venku a také geologické podloží v okolí školy. Dále jsem rozebrala měření, které předcházelo mému výzkumu, pokud nějaké v minulosti ovšem proběhlo. Poté jsem přistoupila k popisu vlastního měření a na závěr jsem rozpracovala výsledky do jednotlivých grafů podle tříd a opatřila je komentářem s vysvětlením výsledků.

Z výsledků získaných měření na Střední odborné škole strojní a elektrotechnické Velešín je zřejmé, že s radonem nemají větší problémy, jelikož hodnoty objemové aktivity se pohybovaly v rozmezí od 48 do 168 Bq/m³, přičemž legislativou je dána směrná hodnota 300 Bq/m³ (Vyhláška 422/2016 Sb.). Avšak musíme počítat s tím, že měření mohlo být ovlivněno klimatickými vlivy nebo organizačními vlivy. To znamená, že některý z pracovníků školy nebo studentů mohl nechat otevřené okno přes noc a radon se ve větší míře a rychleji dostal z budovy ven. Také jsme nemuseli narazit na zdroj radonu. Jelikož je tato škola novější, bývají spíše zdrojem radonu rozvody kolektorů, různé netěsnosti a šachty (Popp, ústní sdělení). Na této škole proběhlo v minulosti měření od státního ústavu radiační ochrany. Naše naměřené hodnoty byly pro porovnání.

Na Vyšší odborné škole a Střední průmyslové škole ve Volyni jsem prováděla měření ve 2 dílnách, které byly již po provedených ozdravných opatřeních. Zajímalo nás především, zda jsou účinná. Což se prokázalo, hodnoty vyšly v pořádku. Nepřesahovaly směrnou hodnotu 300 Bq/m³ (Vyhláška 422/2016 Sb.). Hodnoty objemové aktivity radonu byly v těchto dílnách téměř stejné a to 136 Bq/m³. Třetí měřenou třídou byla počítačová učebna v suterénu, která nemá protiradonová opatření, a její hodnoty byly poněkud vyšší. Hodnota objemové aktivity se dostala na 486 Bq/m³. Tato koncentrace převyšuje směrnou hodnotu 300 Bq/m³ (Vyhláška 422/2016 Sb.). Měření však mohlo být ovlivněno různými vlivy, opět jak klimatickými tak organizačními. Nicméně se doporučuje při těchto koncentracích radonu intenzivně větrat (Jiránek 2014; Vlček a Beneš, 2005).

Na Střední škole rybářské a Vyšší odborné škole vodního hospodářství a ekologie, Vodňany došlo k měření dvou tříd z odlišných částí školy. Jedna se nalézá ve staré části a druhá v nové části. Bylo předpokládáno, že ve staré části dojde k naměření vyšších hodnot objemové aktivity radonu, nežli v nové části. Jelikož nové budovy nemívají ze stavebního hlediska s radonem problém (Jiránek a Honzíková, 2013). Z výsledků je evidentní, že nová stavba je opravdu v pořádku. Ve staré části byly hodnoty sice vyšší, ale nepřekročily směrnou hodnotu 300 Bq/m^3 (422/2016 Sb.). V nové části vyšla hodnota 38 Bq/m^3 a ve staré části 69 Bq/m^3 .

Z výsledků získaných měření ve třech třídách na Vyšší odborné škole a Střední zemědělské škole v Táboře je evidentní, že také nemají problém s radonem. Hodnoty objemové aktivity se pohybovaly od 56 Bq/m^3 do 78 Bq/m^3 . Což jsou velice nízké hodnoty. Zajímavostí je, že tato škola leží na takovém geologickém podloží, které má středně až vysoké radonové riziko a i přesto nebyly naměřeny vyšší hodnoty (Chlupáč 2011; Česká geologická služba, 2012). Mohlo to být opět ovlivněno klimatickými či organizačními podmínkami. Můžeme se domnívat, že svojí roli zde hraje i fakt, že škola jako jediná není zateplená (Jiránek a Honzíková, 2017). Avšak má vyměněná okna za těsná dřevěná Eurookna. Je dosti pravděpodobné, že se na této škole intenzivně větrá.

Poslední měřenou školou byla Vyšší odborná škola, Střední škola, Centrum odborné přípravy, Sezimovo Ústí. Zde jsem prováděla měření ve třech budovách. A to v hlavní budově školy ve třídě fyziky, dále v budově F v přízemní dílně a v budově IVS (Informačně vzdělávací středisko). Ve všech třech objektech bylo dříve prováděné měření avšak v rámci rekonstrukcí školy a v případě IVS to bylo předkolaudační měření. Opět i u této soustavy budov vyšly všechny hodnoty v pořádku, pohybovaly se od 48 Bq/m^3 do 212 Bq/m^3 . Sice jsou koncentrace v pořádku, ale maximální koncentrace se již blíží směrné hodnotě, proto bych doporučila intenzivně větrat, či provést instalaci nuceného větrání s rekuperací.

Cíl č. 2 a Výzkumná otázka č. 2

Druhým cílem mé diplomové práce bylo srovnání koncentrací radonu ve školských objektech před zateplením a po zateplení včetně ohrožení zdraví. A s tímto cílem souvisí výzkumná otázka č. 2, která zní: „*Jaký vliv má zateplení objektů školských zařízení na množství radonu v ovzduší?*“

Na žádné z proměřovaných škol neproběhlo měření radonu před zateplením, tudíž nemáme k dispozici pro porovnání hodnoty, které by nám ukazovaly objemovou aktivitu před a po zateplení. Zatím není tato problematika středem vědeckých studií. Proto nemáme důkazy o vlivu zateplení budov na koncentraci radonu ve vnitřním prostředí. Avšak odborníci předpokládají, že zateplením se objemová aktivita radonu v budovách zvýší. Důvodem je utěsnění obvodových zdí, které nemohou propouštět plyny z vnitřního prostředí do vnějšího a naopak (Popp, ústní sdělení).

Naprosto evidentní, je ovšem fakt, že výměna oken za nová, těsná plastová či dřevěná Eurookna přispívá významně k vyšším hodnotám radonu v budovách. U starých netěsných oken docházelo i přes zavření k výměně vzduchu. U nových oken je při zavření výměna nulová. Ve školách by se mělo proto intenzivně větrat (Novotný, 2017).

Navíc si uvědomme, že v místnosti třídy je přibližně 30 lidí, kteří vydechují oxid uhličitý, není proto divu, že koncentrace oxidu uhličitého jsou alarmující. Je jasné, že roste i koncentrace radonu, jelikož CO_2 je ukazatelem pro míru větrání, která má vliv na hodnoty radonu. Sice se nám sníží náklady na energie, ale zároveň se sníží i výměna vzduchu a vzrostou hodnoty škodlivých plynů (radon, CO_2) (Beam ČR s.r.o., 2018). Proto jsem měřila i oxid uhličitý, o čemž se zmíním později.

Navíc záleží i na tom, jakým způsobem je zatepleno. Například zateplení polystyrenem je velice časté, jelikož má své výhody a je i cenově méně nákladné, ale bohužel jeho nevýhodou je snížení prodyšnosti stěn (Cifrain, 2008).

Každá ze škol, kterou jsem měřila, byla zateplená. Kromě vyšší odborné a střední zemědělské škole školy v Táboře. Vyměněná okna měli však všechny. Jednalo se buď o plastová, hliníková nebo dřevěná Eurookna. Každá škola, která projde takovouto rekonstrukcí, by měla ještě vynaložit finanční prostředky do kvalitní vzduchotechniky s rekuperací. Žádná škola v současné době by již neměla být bez vzduchotechniky. Řešením je i stavební úprava v podobě provedení průduch do zdiva, které přivádí do budovy čistý vzduch (Popp, ústní sdělení; Jiránek, 2005).

Cíl č. 3 a Výzkumná otázka č. 3

Posledním třetím cílem této práce bylo Navrzení opatření v případě překročení povolených koncentrací radonu v objektech, které slouží výuce. A s tímto cílem souvisela výzkumná otázka č. 3, která zní: „*Jaké aspekty mají vliv na naměřené hodnoty objemové aktivity radonu z podloží v budovách vybraných středních škol v Jihočeském kraji?*“

V našem případě nedošlo k překročení směrných hodnot u čtyř z pěti škol. Pouze v jednom případě a to na Vyšší odborné škole a Střední průmyslové škole ve Volyni došlo v jedné třídě k překročení směrné hodnoty 300 Bq/m^3 (Vyhláška č. 422/2016 Sb.). Objemová aktivita radonu byla 486 Bq/m^3 . Jako ozdravné opatření můžeme uvést intenzivní větrání, což je pasivní typ protiradonových opatření, které je velice účinné. A také instalaci vzduchotechniky s rekuperací nebo provedení průduchů do zdiva, což je aktivní typ opatření. Nejúčinnější je kombinace obou těchto typů. Pokud jsou problémem netěsnosti, stačí většinou utěsnit vstupní cesty radonu do stavby (trhliny, prostupy v kontaktních konstrukcích, zakrytí šachet) a samozřejmě zvýšit výměnu vzduchu v budově (Jiránek, 2001; Popp, ústní sdělení). Tato opatření by měla být při této hodnotě, která není až tak vysoká dostačující. Příkladem je základní škola v Písku, kde byla, jako ozdravné opatření provedena vzduchotechnika v tělocvičně a po jejím spuštění klesají hodnoty radonu z $800 - 1\,000 \text{ Bq/m}^3$ na hodnoty od 50 Bq/m^3 do maximálně 150 Bq/m^3 . Když se vzduchotechnika na noc vypne, hodnoty opět šplhají až k $1\,000 \text{ Bq/m}^3$. Ráno je spuštěna a hodnoty okamžitě klesají. Toto ozdravné opatření je velice účinné (Popp, 2017)

Při vyšších hodnotách se provádění podvrty pod školou, pokud je podsklepená. U nových staveb se provádějí protiradonové izolace. Nejčastěji jsou vyrobeny z oxidovaného nebo kaučukem modifikovaného asfaltu. Může to být i fólie na bázi PVC nebo různé štěrkové hmoty (Jiránek a Honzíková, 2017).

Mezi aspekty mající vliv na naměřené hodnoty objemové aktivity radonu patří zejména klimatické podmínky. V létě bývají hodnoty radonu spíše nižší a v zimě spíše vyšší. V noci hodnoty radonu stoupají a naopak přes den jsou nižší. Větší rozdíl vnitřních a vnějších teplot přispívá k vyšším hodnotám radonu v budovách, jelikož se může více uplatnit komínový efekt. Vliv na radon má i vítr, nebo déšť (Neznal a Neznal, 2009).

Na radon mají vliv i organizační aspekty, což znamená, že mohl někdo ve škole nechat otevřené okno přes noc a radon se odfoukal nebo došlo k odpadnutí výuky a ve třídě žáci nebyli (Jiránek, 2001).

Mezi aspekty ovlivňující hodnoty radonu patří i stavební stránka školy. Ve starých budovách je problémem spíše izolace, u panelových škol to jsou potom rozvody a nové budovy bývají v pořádku (Popp, ústní sdělení).

Posledním důležitým aspektem je tedy mnoho krát zmiňované větrání, které značnou měrou přispívá ke snížení koncentrace radonu v objektu. Proto jsem tedy měřila ve třech školách i oxid uhličitý. Ten je ukazatel vydýchaného vzduchu a tedy nevětrání. Nejhuře na tom byla Vyšší odborná škola, Střední škola, Centrum odborné přípravy, Sezimovo Ústí, kde se hodnoty oxidu uhličitého dostaly až ke kritickým 4 000 ppm. Při čemž maximální hodnota daná vyhláškou 410/2005 Sb., o hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých je 1500 ppm (Vyhláška 410/ 2005 Sb.). Nejlepší hodnoty byly na Střední odborné škole strojní a elektrotechnické ve Velešíně. Kde od poloviny týdne hodnoty klesaly a dostaly se na tolerovatelnou hodnotu 1 000 – 1 500 ppm. I tak by mohly být koncentrace radonu nižší. Oxid uhličitý byl ještě měřen ve Volyni na Vyšší odborné škole a Střední průmyslové škole, kde hodnoty koncentrace oxidu uhličitého za pobytu dětí pohybovaly okolo 2 000 ppm. Což je opět nad limitní. Z těchto měření je naprosto evidentní, že by každá škola měla mít vzduchotechniku s rekuperací (Vyhláška 410/2015 Sb.).

6 ZÁVĚR

V mé diplomové práci jsem se zabývala řešením radonu ve vybraných středních školách v Jihočeském kraji. Práce byla rozdělena na část teoretickou, kterou jsem zpracovala pomocí sekundární analýzy dat. Věnovala jsem se v této části podrobně ionizujícímu záření, jelikož radon vyzařuje alfa záření. Dále jsem se snažila přehledně utřídit informace vztahující se k radonové problematice, legislativě spojené s ním a ke způsobům jeho detekce v prostředí. Za důležitou kapitolu také považuji biologické účinky ionizujícího záření a přímo i radonu na lidské zdraví.

Druhou částí mé diplomové práce bylo zpracování výsledků výzkumu. Hlavním cílem bylo sledování objemové aktivity radonu z podloží v objektech vybraných středních škol v Jihočeském kraji. V pěti školách jsem pomocí kontinuálního přístroje naměřila hodnoty, které byly dále zpracovány do podoby grafů, a vyhodnotila jsem je pro každou školu zvlášť v empirické části práce. S tímto cílem souvisela 1. výzkumná otázka „*Jaké jsou naměřené koncentrace radonu z podloží ve vnitřním ovzduší vybraných středních škol v Jihočeském kraji?*“. Naměřené koncentrace radonu jsem podrobně zpracovala v praktické části práce. Obecně mohu říci, že žádná ze středních škol neměla větší problém s radonem až na jednu školu, ve které byla provedena protiradonová opatření.

Druhým cílem diplomové práce bylo srovnání koncentrací radonu ve školských objektech před zateplením a po zateplení včetně ohrožení zdraví. A s tímto cílem souvisela 2. výzkumná otázka „*Jaký vliv má zateplení objektů školských zařízení na množství radonu v ovzduší?*“. V námi vybraných školách byla měření radonu prováděna již po zateplení, tudíž nemáme přesné hodnoty z dob před zateplením. Ovšem velkým problémem škol je zejména výměna starých netěsných a tudíž vzdušných oken za těsná plastová nebo dřevěná Eurookna. Pokud jsou tyto okna zavřená, výměna vzduchu ve třídách je nulová a radon se kumuluje v budově. Jestli i zateplení má větší vliv na koncentrace radonu v budově, není zatím vědecky podloženo, ale odborníci předpokládají, že vliv má a značný. Stavba je utěsněna a nemůže „dýchat“.

Třetím a posledním cílem bylo navržení opatření v případě překročení povolených koncentrací radonu v objektech, které slouží výuce. V našem případě nedošlo u žádné školy k překročení směrných hodnot objemové aktivity radonu, pouze v jedné škole, která měla již v minulosti problém s radonem v jiných třídách, ve kterých už jsou

zavedena protiradonová opatření. Nicméně bych doporučila i školám, které nemají s radonem problém více větrat a nechat si nainstalovat vzduchotechniku s rekuperací nebo provést zavedení průduchů do zdiva. Díky těmto opatřením se sníží jak koncentrace radonu, tak i oxidu uhličitého. S tímto cílem souvisela 3. Výzkumná otázka „Jaké aspekty mají vliv na naměřené hodnoty objemové aktivity radonu z podloží v budovách vybraných středních škol v Jihočeském kraji?“ Jsou to zejména klimatické vlivy, jako je tlak, teplota, vlhkost, vítr atd. V letních měsících jsou obecně zaznamenávány hodnoty spíše nižší a v zimních měsících spíše vyšší. Významný je i rozdíl teplot uvnitř budovy a venku. Dalšími aspekty je stavební stránka školy (stavební materiál) a jestli je, jak už bylo zmiňováno zateplena nebo nikoli a zdali jsou vyměněna okna nebo nikoli.

Při zpracovávání mé diplomové práce jsem si uvědomila závažnost radonové problematiky a působení tohoto radioaktivního plynu na naše zdraví. Také jsem si povšimla, že mnoho lidí podceňuje či zlehčuje nebezpečí spojené s radonem. Domnívám se, že je tomu tak, protože není vidět ani cítit a také proto, že je tato problematika málo diskutovaná.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BARNET, I. 1992. *Radon v geologickém prostředí*. 1. vyd. Praha: ČGÚ, 33 s. ISBN 80-7075-112-6.
2. BARNET, I., a FOJTÍKOVÁ, I., 2005. *Radonový index geologického podloží a jeho vliv na strategii vyhledávání rizikových objektů v České republice*. In: *Zprávy o geologických výzkumech v roce*. Praha: ČGS, 2006. 195 s. ISBN 80-7075-667- 5.
3. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, 2004. *Radon Auswirkungen auf den Menschen* [online]. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz [cit. 2018-07-14]. Dostupné z: <http://www.gesundheitsamt.de/alle/umwelt/physik/strahl/ion/ra/rn/stmugv/men.htm>
4. Beam ČR s.r.o., 2018. *Řízené větrání: V českých školách se dusí žáci* [online]. Praha: tzb-info [cit. 2018-08-02]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vetrani-skol/17561-rizene-vetrani-v-ceskych-skolach-se-dusi-zaci>
5. BENEŠ, J., JIRÁK, D., a VÍTEK, F., 2015a. *Základy lékařské fyziky*. 4. vyd. Praha: Univerzita Karlova, nakladatelství Karolinum, 322 s. ISBN 978-80-246-2645-1.
6. BENEŠ, J., KYMPLOVÁ, J., a VÍTEK, F., 2015b. *Základy fyziky pro lékařské a zdravotnické obory: pro studium i praxi*. Praha: Grada, 228 s. ISBN 978-80-247-4712-5.
7. CIFRAIN, J., 2008. *Polystyren versus vata strážlivě* [online]. Tepelné izolace [cit. 2018-07-25]. Dostupné z: <http://www.tepelna-izolace.cz/polystyren-versus-vata-strizlive.html>
8. CÍCHA, P., 2004a. *Posouzení objektu dle zákona č. 18/1997 Sb. (atomový zákon) v platném znění*. Tábor, 6 s.

9. CÍCHA, P., 2004b. *Posouzení objektu dle zákona č. 18/1997 Sb. (atomový zákon) v platném znění*. Tábor, 4 s.
10. Česká geologická služba, 2012. *Radonové riziko* [online]. Praha: Česká geologická služba [cit. 2018-07-14]. Dostupné z:
<http://www.geology.cz/extranet/vav/geologicka-rizika/radon>
11. ČVUT, 2011. *Kurzy pro pracovníky laboratoří provádějících měření a hodnocení výskytu radonu a produktů přeměny radonu ve stavbách, měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve vodě a stavebních materiálech*. Praha: FJFI ČVUT, 130 s.
12. DANIHELKA, P., 2009. *Radon, neviditelné nebezpečí našich domácností*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU, 2009, 43 s. ISBN 978-80-248-2128-3.
13. DIEHL, F., J., 2008. *Radioaktivität in Lebensmitteln*. Weinheim: Wiley-VCH, 256 s. ISBN 9783527623747.
14. EDITOR, a ALLIN, W., C., 2011. *Atmosphere and air pollution*. Ipswich, Mass: Salem Press, 157 s. ISBN 9781429836708.
15. FELTL, D., a CVEK, J., 2008. *Klinická radiobiologie*. Havlíčkův Brod: Tobiáš, 105 s. ISBN 978-80-7311-103-8.
16. FRIEDMANN, H., 2015. *Einführung in die Kernphysik*. Weinheim: John Wiley & Sons, 494 s. ISBN 9783527677412.
17. FRIIS, R. H., c2012. *The Praeger handbook of environmental health*. Santa Barbara, Calif.: Praeger, 2 361 s. ISBN 9780313386015.
18. FUKÁTKO, T., 2007. *Detekce a měření různých druhů záření*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura. Senzory neelektrických veličin, 189 s. ISBN 978-80-7300-193-3.

19. GILLMORE, G. K., PERRIER F. E., a CROCKETT, R. G. M., 2018. *Radon, health and natural hazards*. London: The Geological Society, Geological Society special publication, no. 451, 256 s. ISBN 9781786203083.
20. HÁLA, J., 2013. *Radioaktivní izotopy*. Tišnov: Sursum, 374 s. ISBN 978-80-7323-248-1.
21. HOBST, L., 2004. *Využití ionizujícího záření ve stavebnictví a rozbor možností dalšího rozvoje radiačních metod: The use of ionising radiation in civil engineering and the analysis of possibilities for the next development in radiation methods : zkrácená verze habilitační práce*. Brno: VUTIUM, 31 s. ISBN 80-214-2755-8.
22. CHLUPÁČ, I., 2011. *Geologická minulost České republiky*. Vyd. 2., opr. Praha: Academia, 440 s. Neživá příroda. ISBN 9788020019615.
23. JIRÁNEK, M., c2001. *Dům bez radonu*. 1. vyd. Brno: ERA, 114 s. ISBN 80-86517-12-8.
24. JIRÁNEK, M., 2005. *Navrhování a provádění nuceného odvětrání radonu z podloží stávajících staveb: Design and application of sub-slab depressurization systems in existing buildings*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 23 s. ISBN 80-01-03198-5.
25. JIRÁNEK, M., 2011. *Technický popis, výkresová dokumentace a rozpočet ochrany stavby proti průniku radonu z podloží*. Velké přítočno, 18 s.
26. JIRÁNEK, M., 2014. *Úvod do navrhování a provádění protiradonových opatření* [online]. Praha: tzb-info, [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/izolace-proti-vode-a-radonu/12090-uvod-do-navrhovani-a-provadeni-protiradonovych-opatreni>

27. JIRÁNEK, M., a HONZÍKOVÁ M., 2013. *Radon - stavební souvislosti*. Praha: České vysoké učení technické, 29 s. ISBN 978-80-01-05023-1.
28. JIRÁNEK, M., a HONZÍKOVÁ M., 2017. *Protiradonové izolace*. Praha: Stavební fakulta ČVUT v Praze, 28 s. ISBN 978-80-01-05023-1.
29. KLEGER, L. a VÁLEK, P., 2014. *Oxid uhličitý* [online]. Arnika [cit. 2018-07-23]. Dostupné z: <http://arnika.org/oxid-uhlicity>
30. KOLÁŘ, K., a REITERMAN, P., 2012. *Stavební materiály: pro SPŠ stavební*. Praha: Grada, 208 s. Studium (Grada). ISBN 978-80-247-4070-6.
31. KUSALA, J., 2004. Ionizující záření [online]. In: *Jaderná energetika* [cit. 2018-07-11]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/nuklearni/k22.htm>
32. KUSÝ, V., 2012. *Protokol předkolaudačního měření objemové aktivity radonu*. Tábor, 9 s.
33. LAJČÍKOVÁ, A., 2010. *Radon, radonový program ochrany zdraví obyvatel* [online]. Praha: Státní zdravotní ústav, [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: http://www.szu.cz/uploads/Radonovy_program.pdf
34. *Měření radonu pro stavební povolení, geologické průzkumy: Tabulka stanovení radonového indexu* [online]. Geopro, 2004 [cit. 2018-07-16]. Dostupné z: <http://www.geopro.cz/tabulka-stanoveni-radonoveho-indexu/>
35. MLADOSIEVIČOVÁ, B., et al., 2014. *Kardioonkologie: 2., přepracované a doplněné vydání*. Praha: Grada Publishing a.s., 208 s. ISBN 9788024792316.
36. NAJARIAN, K., a SPLINTER, R., 2016. *Biomedical Signal and Image Processing*. 2. vyd. Boca Raton: CRC Press, 411 s. ISBN 978-1-4398-7034-1.

37. National Research Council, c2006. *Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR VII Phase 2*. Washington, D.C.: National Academies Press, 422 s. ISBN 9780309091565.
38. NAVRÁTIL, L. a ROSINA, J., 2005. *Medicínská biofyzika*. Praha: Grada, 524 s. ISBN 80-247-1152-4.
39. NAVRÁTIL, L., et al., 2011. Zdroje ionizujícího záření ve vztahu k ohrožení živého organismu. In: *Radiobiologie* [online]. [cit. 2018-07-18]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/4-kapitola.html>
40. NEJEDLÁ, M., 2015. *Klinická propedeutika pro studenty zdravotnických oborů*. Praha: Grada Publishing, Sestra (Grada), 240 s. ISBN 978-80-247-4402-5.
41. NEWMANN, T., 2018. *Are X-rays really safe?* [online]. [cit. 2018-07-14]. Dostupné z: <https://www.medicalnewstoday.com/articles/219970.php>
42. NEZNAL, M., a NEZNAL M., 2009. *Ochrana staveb proti radonu*. 1. vyd. Praha: Grada, 104 s. ISBN 978-80-247-3065-3.
43. NOVOTNÝ, P., 2017. *Vliv oxidu uhličitého (CO₂) na kvalitu vnitřního prostředí*. [online]. Praha: Praha: tzb-info, [cit. 2018-07-23]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vetrani-skol/15831-vliv-oxidu-uhliciteho-co2-na-kvalitu-vnitriho-prostredi>
44. PELCLOVÁ, D., 2014. *Nemoci z povolání a intoxikace*. 3., dopl. vyd. Praha: Karolinum, 318 s. ISBN 9788024625973.
45. PETRÁNEK, J., 2007. *Magmatické horniny*. [online]. Geologická encyklopedie [cit. 2018-07-23]. Dostupné z: http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?magmaticke_horniny
46. PETRÁNEK, J., 2011. *Za tajemstvím kamenů: příručka pro mladé sběratele hornin, minerálů a zkamenělin*. Praha: Grada, 200 s. ISBN 978-80-7075-749-9

47. Plh, J., 2015. *Návod k Obsluze*. Praha 8, 6 s.
48. PODZIMEK, F., 2013. *Radiologická fyzika: fyzika ionizujícího záření*. Praha: České vysoké učení technické, 334 s. ISBN 978-80-01-05319-5.
49. POHL, M., 2014. *Physik für Alle*. 2nd ed. Hoboken: Wiley, 282s. ISBN 9783527674688.
50. POPP, F., Osobní sdělení (AZ – radon s.r.o., Rudolfovska 88, České Budějovice).
51. POPP, F., 2017. *Protokol o měření a hodnocení ozáření z přírodních radionuklidů (stanovení objemové aktivity OAR) Po realizaci ozdravných opatření ZŠ E. Beneše Písek*. České Budějovice, 20 s.
52. PŘIBYLOVÁ, G., 2017. *Jak se zjišťuje radon z podloží a co je radonový index* [online]. [cit. 2018-07-23]. Dostupné z: <https://www.estav.cz/cz/5543.jak-se-zjistuje-radon-z-podlozi-a-co-je-radonovy-index>
53. Radonový program České republiky, 2016. *Historie radonové problematiky* [online]. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, [cit. 2018-07-20]. Dostupné z: <https://www.radonovyprogram.cz/historie-radonove-problematiky/>
54. RADONtest, a. *Radon ve světě* [online]. Praha: RADONtest [cit. 2017-03-29]. Dostupné z: <http://www.iradontest.cz/radon-ve-svete.html>
55. RADONtest, b. *Radonový štítek budovy* [online]. Praha: RADONtest [cit. 2018-07-16]. Dostupné z: <http://www.iradontest.cz/>
56. REICHEL, J., a VŠETIČKA, M., 2018. *Jaderná fyzika*. In: *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2018-07-12]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/796-jaderna-fyzika>

57. ROSARIO, A. S., WICHMANN, H. E., 2006. Environmental pollutants Radon [online]. In: *Encyclopedia of Respiratory Medicine*. Elsevier, 120 [cit. 2018-07-18]. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B0123708796001356>
58. ROSINA, J., 2013. *Biofyzika: pro zdravotnické a biomedicínské obory*. Praha: Grada, 224 s. ISBN 978-80-247-4237-3.
59. ROSINA, J., KOLÁŘOVÁ, H. a STANEK, J., 2006. *Biofyzika pro studenty zdravotnických oborů*. Praha: Grada, 232 s. ISBN 80-247-1383-7.
60. SEIDL, Z., 2012. *Radiologie pro studium i praxi*. Praha: Grada, 368. ISBN 9788024741086.
61. Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB), 2004. *Metodika pro stanovení radonového indexu pozemku* [online]. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/publikace/MP_metodikaBCAE_F_04.pdf
62. Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB), 2009. *Státní dotace na ozdravná protiradonová opatření*. [online]. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/radiacni-ochrana/Dotace-ozdravna-protiradonova-opatreni-1.pdf>
63. Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB), 2010. *Radonový program ČR 2010 až 2019 – Akční plán* [online]. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/radiacni-ochrana/radonovy_program_akcni_plan.pdf

64. Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB), 2018. *Měření a hodnocení ozáření z přírodních zdrojů záření ve stavbách s obytnými nebo pobytovými místnostmi* [online]. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, [cit. 2018-07-20]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/publikace/DR-RO-5-0-Rev-2-0.pdf>
65. Státní ústav radiační ochrany v.v.i. (SÚRO), 2018a. *Přírodní zdroje* [online]. Praha: Státní ústav radiační ochrany, [cit. 2018-07-16]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/radiacni-ochrana/prirodni-zdroje>
66. Státní ústav radiační ochrany v.v.i. (SÚRO), 2018b. *Biologické účinky ionizujícího záření* [online]. Praha: Státní ústav radiační ochrany, [cit. 2018-07-19]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/radiacni-ochrana/biologicke-ucinky-ionizujiciho-zareni>
67. Státní ústav radiační ochrany v.v.i. (SÚRO), 2018c. *Radon v domě* [online]. Praha: Státní ústav radiační ochrany, [cit. 2018-07-19]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/faq/radon-v-dome#faq1>
68. Státní ústav radiační ochrany v.v.i. (SÚRO), 2018d. *Radon včera a dnes* [online]. Praha: Státní ústav radiační ochrany [cit. 2018-07-26]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/prirodnioz/obecne-informace/historie-radonove-problematiky/radon-vcera-a-dnes>
69. Státní ústav radiační ochrany v.v.i. (SÚRO), 2018e. *Státní příspěvek na provedení protiradonového ozdravného opatření*. [online]. Praha: Státní ústav radiační ochrany [cit. 2018-07-26]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/prirodnioz/prakticke-informace/prestavuji-existujici-dum-nebo-byt/statni-prispevek-na-provedeni-protiradonoveho-ozdravneho-opatreni>
70. Státní ústav radiační ochrany v.v.i. (SÚRO), 2018f. *Jak se radon měří a které firmy měření provádějí* [online]. Praha: Státní ústav radiační ochrany [cit. 2018-07-26]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/prirodnioz/prakticke-informace/jak-se-meri-radon>

71. Státní ústav radiační ochrany v.v.i. (SÚRO), 2018g. *Podrobné informace o radonu v používané vodě* [online]. Praha: Státní ústav radiační ochrany [cit. 2018-07-26]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/prirodnioz/obecne-informace/radon-ve-vode/podrobne-informace-o-radonu-v-pouzivane-vode>
72. Státní ústav radiační ochrany v.v.i (SÚRO), 2018h. *Geologická prognózní mapa radonového rizika* [online]. Praha: Státní ústav radiační ochrany, [cit. 2018-07-19]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/prirodnioz/radonove-mapy/geologicka-prognozni-mapa-radonoveho-rizika>
73. Státní ústav radiační ochrany v.v.i (SÚRO), 2018i. *v jednotlivých obcích v ČR* [online]. Praha: Státní ústav radiační ochrany, [cit. 2018-07-15]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/prirodnioz/obecne-informace/vyskyt-radonu-v-ceske-republice/mapamereni.jpg/view>
74. Státní ústav radiační ochrany v.v.i (SÚRO), 2018j. *Stopový detektor RamaRn* [online]. Praha: Státní ústav radiační ochrany, [cit. 2018-07-15]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/prirodnioz/obecne-informace/mereni-radonu/rama.jpg/view>
75. SUSOEFF, A., 2009. *Radon- Nuclear Fallout in Your Home*. Digital Developments, 161 s. ISBN 9780557084081.
76. SVOBODA, L. 2013. *Stavební hmoty* [online]. Praha. [cit. 2018-07-15]. ISBN 978-80-260-4972-2. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodah/sh/SH3v1.pdf>
77. SÝKORA, D., 2015. *Radon – nebezpečí výskytu ve vodě* [online]. Praha: Praha: tzb-info, [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/vlastnosti-a-zdroje-vody/13337-radon-nebezpeci-vyskytu-ve-vode>
78. ŠEDIVÝ, J., 2013. *Stavební materiály a konstrukce*. 1. vyd. Vodňany: Střední rybářská škola a Vyšší odborná škola vodního hospodářství a ekologie, 83 s. ISBN 978-80-87096-16-1.

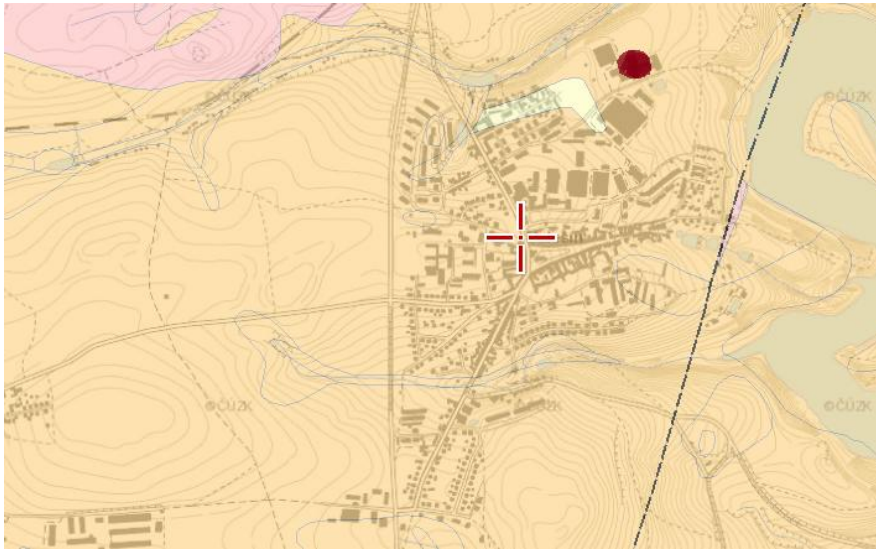
79. ŠTĚTINA, J., 2014. *Zdravotnictví a integrovaný záchranný systém při hromadných neštěstích a katastrofách*. Praha: Grada, 584 s. ISBN 9788024745787.
80. ŠVEC, J., 2005. *Radioaktivita a ionizující záření: doplňující učební text pro předměty Bakalářská fyzika, Aplikovaná fyzika, Ochrana před zářením*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 36 s. ISBN 8086634620.
81. Techmania Science Center, 2018. *Uran-radiová řada* [online]. [cit. 2018-07-15]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/atomy-castice/prirozena-radioaktivita/rozpadove-rady>
82. ThermWet s.r.o., 2010. *Řízené větrání a radon v budovách* [online]. Praha: Praha: tzb-info, [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vetrani-s-rekuperaci/6942-rizene-vetrani-a-radon-v-budovach>
83. ULMANN, V., 2015. Radionuklidy. In: *Jaderná fyzika*. [online]. [cit. 2018-07-14]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika4.htm>
84. UNEP, 2016. *Radiation: effects and sources*. Vienna: Unsear. 64 s. ISBN 978-92-807-3600-7.
85. VLČEK, M., a BENEŠ, P., 2005. *Poruchy a rekonstrukce staveb*. Brno: ERA group, Technická knihovna (ERA), 129 s. ISBN 80-7366-013-x.
86. VORLÍČEK, J., ABRAHÁMOVÁ, J., a VORLÍČKOVÁ, H., 2012. *Klinická onkologie pro sestry. 2., přeprac. a dopl. vyd.* Praha: Grada, Sestra (Grada), 450 s. ISBN 978-80-247-3742-3.
87. Vyhláška č. 184/1997 Sb., o požadavcích na zajištění radiační ochrany. In: *Sbírka zákonů*. 19. 8. 1997. ISSN 1211-1244.

88. Vyhláška č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně. In: *Sbírka zákonů*. 12. 7. 2002. ISSN 1211-1244.
89. Vyhláška č. 410/2005 Sb., o hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých. In: *Sbírka zákonů*. 17. 10. 2005. ISSN 1211-1244.
90. Vyhláška č. 362/2016 Sb., o podmínkách poskytnutí dotace ze státního rozpočtu v některých existujících expozičních situacích. In: *Sbírka zákonů*. 9. 11. 2016 ISSN 1211-1244.
91. Vyhláška č. 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje. In: *Sbírka zákonů*. 23. 12. 2016. ISSN 1211-1244.
92. WAGNER, V., 2010. Záření gama - okno do nejenergetičtějších částí vesmíru. *Detekce vesmírného záření gama* [online]. [cit. 2018-07-12]. Dostupné z: <https://ojs.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/neutrina/gamaastropis.htm>
93. World Health Organization WHO, 2009. *WHO handbook on indoor radon: a public health perspective*. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 94 s. ISBN 9789241547673.
94. Zákon č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů. In: *Sbírka zákonů*. 26. 2. 1997. ISSN 1211-1244.
95. Zákon č. 236/2016 Sb., Zákon atomový zákon. In: *Sbírka zákonů*. 10. 8. 2016. ISSN 1211-1244.

8 SEZNAM PŘÍLOH

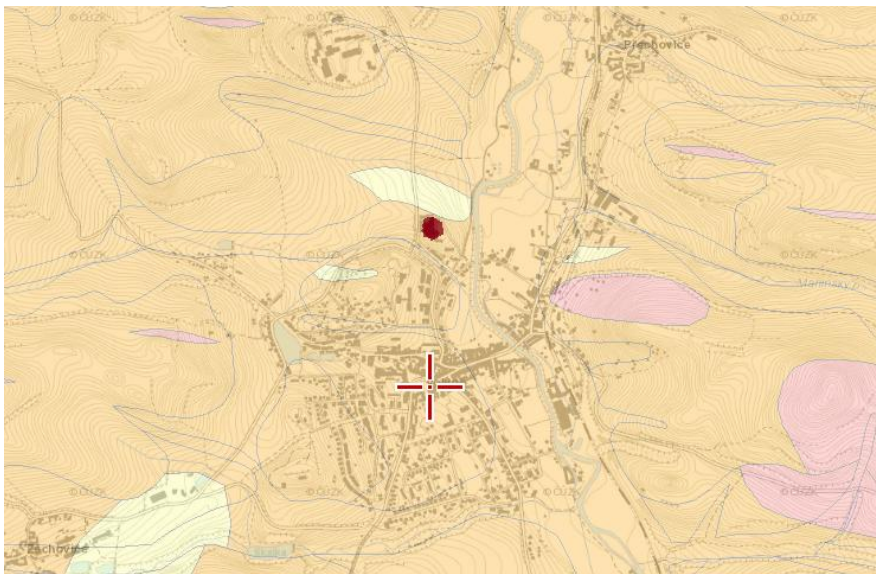
- Příloha č. 1: Radonové mapy geologického podloží Velešín
- Příloha č.2: Radonová mapa geologického podloží Volyně
- Příloha č. 3: Radonová mapa geologického podloží Vodňany
- Příloha č. 4: Radonová mapa geologického podloží Tábor
- Příloha č. 5: Radonová mapa geologického podloží Sezimovo Ústí
- Příloha č. 6: Legenda k radonovým mapám geologického podloží
- Příloha č. 7: Střední odborná škola strojní a elektrotechnická Velešín
- Příloha č. 8: Střední odborná škola strojní a elektrotechnická Velešín - Třída č. 4
- Příloha č. 9: Střední odborná škola strojní a elektrotechnická Velešín – Třída č. 9
- Příloha č. 10: Střední odborná škola strojní a elektrotechnická Velešín – Třída č. 16
- Příloha č. 11: Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola Volyně
- Příloha č. 12: Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola Volyně – VT1
- Příloha č. 13: Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola Volyně – rukodílna 1
- Příloha č. 14: Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola Volyně – rukodílna 2
- Příloha č. 15: Střední škola rybářská a Vyšší odborná škola vodního hospodářství a ekologie, Vodňany
- Příloha č. 16: Střední škola rybářská a Vyšší odborná škola vodního hospodářství a ekologie, Vodňany - Třída 4B nová budova
- Příloha č. 17: Vyšší odborná škola a Střední zemědělská škola v Táboře
- Příloha č. 18: Vyšší odborná škola a Střední zemědělská škola v Táboře – Třída č. 34
- Příloha č. 19: Vyšší odborná škola a Střední zemědělská škola v Táboře – Třída č. 41
- Příloha č. 20: Vyšší odborná škola a Střední zemědělská škola v Táboře – Třída č. 56
- Příloha č. 21: Vyšší odborná škola, střední škola, COP, Sezimovo Ústí – Hlavní budova
- Příloha č. 22: Vyšší odborná škola, střední škola, COP, Sezimovo Ústí – učebna fyziky
- Příloha č. 23: Vyšší odborná škola, střední škola, COP, Sezimovo Ústí – budova IVS
- Příloha č. 24: Vyšší odborná škola, střední škola, COP, Sezimovo Ústí – IVS
- Příloha č. 25: Vyšší odborná škola, střední škola, COP, Sezimovo Ústí – F
- Příloha č. 26: Vyšší odborná škola, střední škola, COP, Sezimovo Ústí – Dílna F

Příloha č. 1: Radonová mapa geologického podloží Velešín



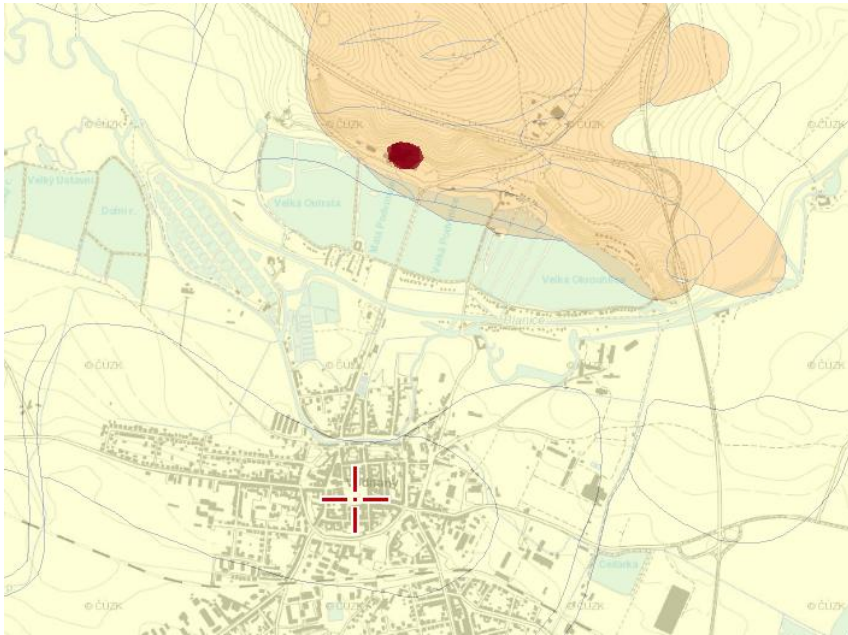
Zdroj: www.geologicke-mapy.cz , vlastní zakreslení

Příloha č. 2: Radonová mapa geologického podloží Volyně



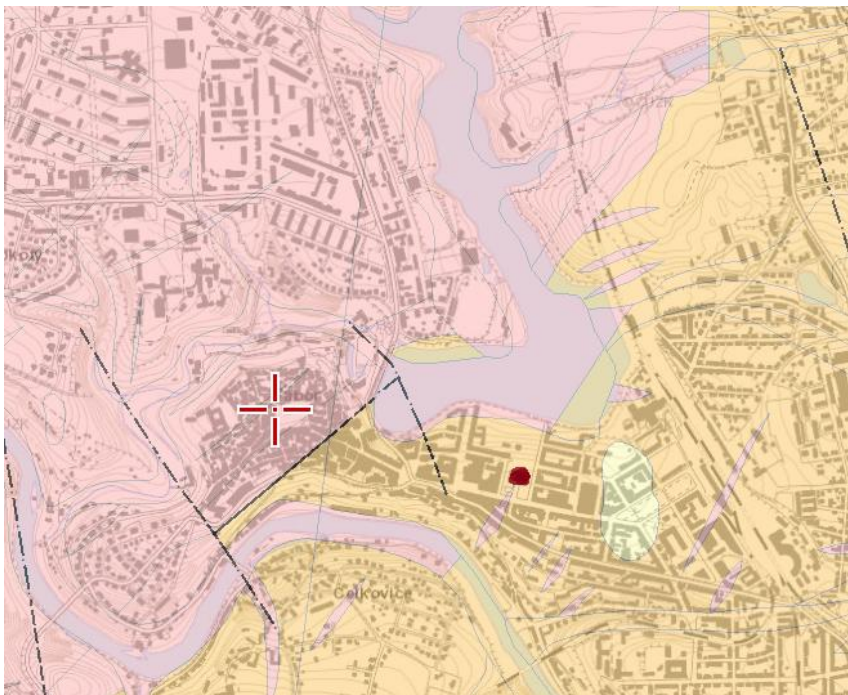
Zdroj: www.geologicke-mapy.cz , vlastní zakreslení

Příloha č. 3: Radonová mapa geologického podloží Vodňany



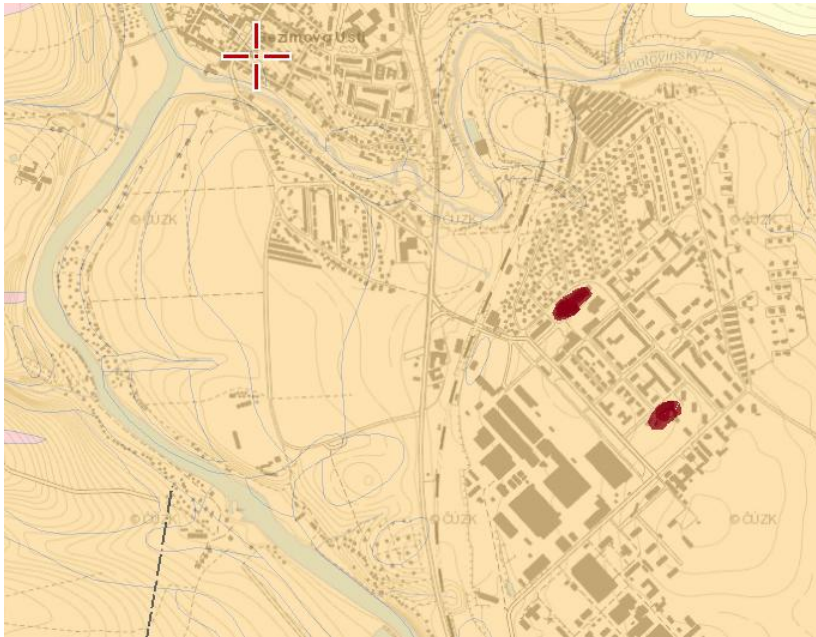
Zdroj: www.geologicke-mapy.cz ,vlastní zakreslení

Příloha č. 4: Radonová mapa geologického podloží Tábor









Zdroj: www.geologicke-mapy.cz ,vlastní zakreslení

Příloha č. 5: Radonová mapa geologického podloží Sezimovo Ústí



Zdroj: www.geologicke-mapy.cz, vlastní zakreslení

Příloha č. 6: Legenda k radonovým mapám geologického podloží

Radonový index 1 : 50 000	Bodové měření Rn indexu
 vysoký	 vysoký
 střední	 střední
 nízký	 nízký
 kvartér, hlubší podloží vysoký	 neklasifikováno
 kvartér, hlubší podloží střední	
 kvartér, hlubší podloží nízký	
 nestanoven	

Zdroj: www.geologicke-mapy.cz

Příloha č. 7: Střední odborná škola strojní a elektrotechnická Velešín



Zdroj: Vlastní fotografie

Příloha č. 8: Střední odborná škola strojní a elektrotechnická Velešín - Třída č. 4



Zdroj: Vlastní fotografie

Příloha č. 9: Střední odborná škola strojní a elektrotechnická Velešín – Třída č. 9



Zdroj: Vlastní fotografie

Příloha č. 10: Střední odborná škola strojní a elektrotechnická Velešín – Třída č. 16



Zdroj: Vlastní fotografie

Příloha č. 11: Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola Volyně



Zdroj: Vlastní fotografie

Příloha č. 12: Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola Volyně – VT1



Zdroj: Vlastní fotografie

Příloha č. 13: Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola Volyně – rukodílna 1



Zdroj: Vlastní fotografie

Příloha č. 14: Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola Volyně – rukodílna 2



Zdroj: Vlastní fotografie

Příloha č. 15: Střední škola rybářská a Vyšší odborná škola vodního hospodářství a ekologie, Vodňany



Zdroj: www.srs-vodnany.cz

Příloha č. 16: Střední škola rybářská a Vyšší odborná škola vodního hospodářství a ekologie, Vodňany - Třída 4B nová budova



Zdroj: Vlastní fotografie

Příloha č. 17: Vyšší odborná škola a Střední zemědělská škola v Táboře



Zdroj: Vlastní fotografie

Příloha č. 18: Vyšší odborná škola a Střední zemědělská škola v Táboře – Třída č. 34



Zdroj: Vlastní fotografie

Příloha č. 19: Vyšší odborná škola a Střední zemědělská škola v Táboře – Třída č. 41



Zdroj: Vlastní fotografie

Příloha č. 20: Vyšší odborná škola a Střední zemědělská škola v Táboře – Třída č. 56



Zdroj: Vlastní fotografie

Příloha č. 21: Vyšší odborná škola, střední škola, COP, Sezimovo Ústí – Hlavní budova



Zdroj: Vlastní fotografie

Příloha č. 22: Vyšší odborná škola, střední škola, COP, Sezimovo Ústí – učebna fyziky



Zdroj: Vlastní fotografie

Příloha č. 23: Vyšší odborná škola, střední škola, COP, Sezimovo Ústí – budova IVS



Zdroj: Vlastní fotografie

Příloha č. 24: Vyšší odborná škola, střední škola, COP, Sezimovo Ústí – IVS



Zdroj: Vlastní fotografie

Příloha č. 25: Vyšší odborná škola, střední škola, COP, Sezimovo Ústí – F



Zdroj: Vlastní výzkum

Příloha č. 26: Vyšší odborná škola, střední škola, COP, Sezimovo Ústí – Dílna F



Zdroj: Vlastní výzkum

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ČR – Česká republika

SÚRO – Státní ústav radiační ochrany

OAR – objemová aktivita radonu

EOAR - ekvivalentní objemová aktivita radonu

WHO – World Health Organization

IARC – Cancer Research Agency

SÚJB – Státní úřad pro jadernou bezpečnost

SÚJCHBO – Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany

RTG – rentgenové vyšetření

CT – počítačová tomografie

COP – Centrum odborné přípravy

PVC – Polyvinylchlorid (plastové)

IVS – Informačně vzdělávací středisko

CO₂ – Oxid uhličitý

ZnS – Sulfid zinečnatý

atd – a tak dále