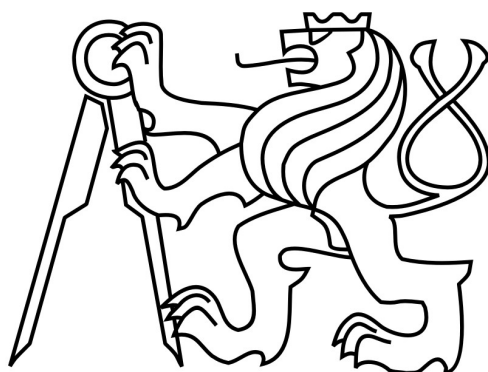


České vysoké učení technické
v Praze
Fakulta stavební

Katedra materiálového inženýrství a chemie



Diplomová práce



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Pommer	Jméno: Vojtěch	Osobní číslo: 410085
Zadávací katedra: K 123		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Materiálové inženýrství		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Betony pro sekundární ochrana radioaktivního odpadu	
Název diplomové práce anglicky: Concretes as a secondary protection of radioactive waste	
Pokyny pro vypracování: <ul style="list-style-type: none">- podrobná rešerše- nastudování experimentálních metod- příprava vzorků- provedení experimentů- vyhodnocení a diskuse výsledků- stanovení závěrů	
Seznam doporučené literatury: Pytlík, P., Technologie betonu, VUT v Brně, VUTIUM, 2000 Svoboda, L., a kol., Stavební hmoty, JAGA Bratislava 2004 Aitcin, P., C., High Performance Concrete (Modern Concrete Technology), CRC Press 1998, ISBN-13: 978-0419192701 Šauman, Z.: Maltoviny I. Vysoké učení technické v Brně, 1993 Speciální betony, Svaz výrobců betonu ČR, PRAHA 2001	
Jméno vedoucího diplomové práce: doc. ing. Eva Vejmelková, Ph.D.	
Datum zadání diplomové práce: 4.10.2018	Termín odevzdání diplomové práce: 6.1.2019
<i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>	
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

5.10.2018	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení doc. Ing. Evy Vejmelkové, Ph.D.

Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

.....

podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval všem, kteří se nějakým způsobem podíleli na řešení mé diplomové práce. Především bych rád poděkoval vedoucí mé práce doc. Ing. Evě Vejmelkové, Ph.D za její cenné rady, trpělivé a odborné vedení a gramatické i formální úpravy. Dále bych také rád poděkoval RNDr. Kláře Kobetičové, Ph.D za její cenné rady a odborné vedení při práci v laboratoři.

V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině, všem svým blízkým a přátelům, za jejich podporu a přízeň.

Betony pro sekundární ochranu
radioaktivního odpadu

Concretes as a secondary protection of
radioactive waste

Anotace:

Práce je zaměřena na studii betonů, s obsahem 3 typů minerálních příměsí, použitelných jako sekundární ochrana radioaktivního odpadu. Tyto betony by měly být použity především pro účely stabilizace jaderných odpadů a následné uložení v úložištích jaderného odpadu. Byly zkoumány tři různé typy betonů, lišící se použitým druhem a množstvím příměsí. Zároveň jsou na těchto betonech studovány fyzikální a chemické vlastnosti. Z dosažených výsledků byl vytipován perspektivní materiál (příměs), který pozitivním způsobem ovlivnil studované vlastnosti z hlediska imobilizace radionuklidů a mohl by plnit tuto funkci.

Klíčová slova: *radionuklidy, příměsi do betonu, materiálové charakteristiky, sorpce cesia a stroncia*

Abstract:

The thesis is focused on the study of concrete, containing 3 types of mineral admixtures, useful as secondary protection of radioactive waste. These concretes should be used primarily for the purpose of stabilizing nuclear waste and subsequent storage in nuclear waste repositories. Three different types of concrete have been studied, different is in the type and amount of the additive used. At the same time, physical and chemical properties are studied on these concrete. From the obtained results, was chosen a perspective material (admixture) that positively influenced the studied properties in terms of immobilization of radionuclides and could by fulfill this function.

Keywords: *radionuclides, admixtures in concrete, material characteristics, cesium and strontium sorption*

Obsah

Seznam použitých symbolů	4
Úvod.....	6
1 Radioaktivita	7
1.1 Ionizující záření	3
1.1.1 Vliv ionizačního záření na látku	4
1.1.2 Vliv ionizačního záření na živou tkáň	4
1.2 Radioaktivní odpad	2
1.2.1 Vznik odpadu.....	2
1.2.2 Rozdělení radioaktivního odpadu	2
1.3 Měření radioaktivity	4
1.3.1 Fotografická detekce.....	4
1.3.2 Ionizace plynu.....	5
1.3.3 Scintilační zařízení.....	6
1.3.4 Polovodičové detektory	7
2 Aktuální stav problematiky	8
2.1 Nakládání s jaderným odpadem.....	8
2.1.1 Ukládání jaderného odpadu v úložištích.....	8
2.1.2 Likvidace za pomoci urychlovačem řízených transmutačních systémů.....	11
2.2 Principy ochrany radioaktivního odpadu.....	12
2.2.1 Stínění ionizujícího záření	12
2.2.2 Adsorpce radionuklidů.....	13
2.3 Inženýrské bariéry.....	14
2.3.1 Stabilizace radioaktivního odpadu.....	14
2.3.2 Vnitřní bariéry.....	15
2.3.3 Vnější bariéra.....	16
2.4 Hostitelská hornina	16
3 Použití betonu pro ukládání.....	18
3.1 Imobilizace radionuklidů	18
3.1.1 Cementová matrice	18
3.1.2 Používané sorbenty	19
3.1.2.1 Reaktivní příměsi.....	19
3.1.2.2 Inertní příměsi.....	20
3.2 Stínění ionizujícího záření	21
4 Použité experimentální metody	22
4.1 Základní materiálové charakteristiky.....	22
4.1.1 Vakuové nasycení vodou	22
4.1.1.1 Heliová pyknometrie.....	23
4.1.1.2 Porozimetrie.....	24

4.2	Mechanické vlastnosti.....	24
4.2.1	Tah ohybem	24
4.2.2	Tlaková zkouška	25
4.3	Transport vody	26
4.3.1	Transport vodní páry.....	26
4.3.2	Transport kapalně vlhkosti.....	27
4.4	Tepelné vlastnosti	27
4.5	Vsádková metoda (batch testy).....	28
5	Studované materiály	32
5.1	Složení studovaných betonů	32
5.2	Charakterizace vstupních surovin.....	33
5.2.1	Charakterizace cementu	33
5.2.2	Charakterizace křemenné moučky.....	34
5.2.3	Charakterizace cihelného prachu	35
5.2.4	Charakterizace zeolitu.....	36
5.2.5	Charakterizace bentonitu	37
5.3	Beton s cihelným prachem.....	38
5.3.1	Experimentální výsledky	38
5.3.1.1	Základní materiálové charakteristiky.....	38
5.3.1.2	Mechanické vlastnosti.....	40
5.3.1.3	Tepelné vlastnosti	41
5.3.1.4	Transport vlhkosti	42
5.3.1.5	Sorpční parametry	43
5.4	Beton se zeolitem.....	46
5.4.1	Experimentální výsledky	46
5.4.1.1	Základní materiálové charakteristiky.....	46
5.4.1.2	Mechanické vlastnosti.....	48
5.4.1.3	Tepelné vlastnosti	49
5.4.1.4	Transport vlhkosti	50
5.4.1.5	Sorpční parametry	51
5.5	Beton s bentonitem	53
5.5.1	Experimentální výsledky	53
5.5.1.1	Základní materiálové charakteristiky.....	53
5.5.1.2	Mechanické vlastnosti.....	56
5.5.1.3	Tepelné vlastnosti	56
5.5.1.4	Transport vlhkosti	57
5.5.1.5	Sorpční parametry	58
5.6	Porovnání vybraných výsledků studovaných materiálů	61
5.6.1	Základní materiálové charakteristiky.....	61
5.6.2	Mechanické vlastnosti.....	65
5.6.3	Jednoosý transport vlhkosti	67
5.6.4	Sorpční parametry	70
6	Závěr	73
7	Bibliografie	75

Seznam obrázků	78
Seznam tabulek	80

Seznam použitých symbolů

m_d	[kg]	Hmotnost vysušeného materiálu
m_w	[kg]	Hmotnost plně saturovaného materiálu
m_a	[kg]	Archimédova hmotnost
V	[m ³]	Objem
ρ	[kg/m ³]	Objemová hmotnost materiálu
ρ_{mat}	[kg/m ³]	Hustota matrice
ψ	[%]	Pórovitost
d_p	[m]	Průměr pórů
p	[Pa]	Tlak
γ	[N/m]	Povrchové napětí
θ	[°]	Kontaktní úhel
F	[N]	Síla
L	[m]	Rozpětí
f_t	[Pa]	Pevnost v tahu
f_c	[Pa]	Pevnost v tlaku
S	[m ²]	Plocha
δ	[s]	Součinitel difúzní propustnosti vodní páry
Δm	[kg]	Rozdíl hmotností
d	[m]	Tloušťka materiálu
t	[s]	Čas
Δp	[Pa]	Rozdíl tlaků
D	[m ² /s]	Součinitel difúze vodní páry
μ	[-]	Faktor difúzního odporu
R	[J/mol.K]	Univerzální plynová konstanta
T	[K]	Termodynamická teplota
M	[kg/mol]	Molární hmotnost
D_{vz}	[m ² /s]	Difúze vodní páry ve vzduchu
A	[kg/m ² .s ^{1/2}]	Absorpční koeficient
κ	[m ² /s]	Součinitel vlhkostní vodivosti
w_{sat}	[kg/m ³]	Obsah nasycené vlhkosti
λ	[W/m.K]	Součinitel tepelné vodivosti

c	[J/m ³ .K]	Měrná tepelná kapacita
a	[m ² /s]	Součinitel teplotní vodivosti
K _d	[ml/g]	Distribuční koeficient
C	[mg/l]	Koncentrace

Úvod

Radioaktivní rozpad a s tím spojené doprovodné jevy nás provází každodenním životem, a není důležité, zda jde o radioaktivitu přírodní nebo uměle vyvolanou činností člověka. V případě přírodní radioaktivity je jejím účinkům vystaven každý člověk. Jedná se o relativně malé dávky ionizujícího záření, a pokud nejsme vystaveni extrémním podmínkám, tak se náš organismus s jeho účinky umí vcelku dobře vyrovnat. Nejnebezpečnějším příkladem přírodní radioaktivity, se kterým se můžeme běžně ve stavebnictví setkat, je radon, jenž je produktem přírodní radioaktivity. V dnešní době jsme pomocí izolací a dalších technických řešení schopni snížit jeho koncentraci v obytných prostorech na přijatelnou hodnotu. Větším problémem bývá radioaktivita umělá, jelikož je dnes používána v mnoha odvětvích (zdravotnictví, energetika, zbrojní průmysl). S jejím využitím samozřejmě přichází i rostoucí množství odpadu, který stále obsahuje velké množství radioaktivních látek.

Radioaktivní odpad je nebezpečný nejen pro člověka, ale i pro prostředí, ve kterém žije. Bohužel, při momentálním stavu poznání není možné, aby v dohledné době mohl být tento odpad efektivně recyklován. V dnešní době již ale existují koncepty, které předpokládají efektivní recyklaci odpadu. Z těchto důvodů je nutné takto nebezpečný odpad bezpečně uložit mimo dosah biosféry. Pro co nejefektivnější odstínění radioaktivního záření zmíněného odpadu je podstatné, aby tuto funkci plnily i nosné konstrukce úložiště. A proto je velmi důležité zkoumat a vyvíjet materiály vhodné ke konstrukčním účelům a zároveň vhodné pro odstínění záření a sorpci radionuklidů.

Tato práce je zaměřena na studii betonů použitelných jako sekundární ochrana radioaktivního odpadu. Jsou zde studovány tři typy betonů, lišící se použitím rozdílných příměsí. Příměsi jsou aplikovány v různých množstvích jako částečná náhrada cementu. Konkrétně se jedná o bentonit, zeolit a cihelný prach. Každá z těchto příměsí má perspektivní předpoklady pro použití do betonů vhodných pro ochranu radioaktivního odpadu. Zároveň jsou na těchto betonech studovány základní materiálové charakteristiky, mechanické vlhkostní a tepelné vlastnosti, a dále sorpční vlastnosti jednotlivých betonů pro vybrané neaktivní formy cesia a stroncia.

1 Radioaktivita

Objev radioaktivity

Do konce 19. století panoval ve světě názor, že atomy jsou neměnné a věčné. Již v roce 1896 si H. Becquerel všiml, že některé minerály (uranové sloučeniny) vysílají neviditelné záření pronikající i světlotěsným obalem fotografických desek. M. Curie-Sklodovská, P. Curie a G. Bémont se zabývali tímto jevem a objevili v uranové rudě další prvky vyzařující neviditelné záření (polonium a radium). Tento jev byl nazván radioaktivitou. Později se zjistilo, že prvky při tomto jevu mění svou chemickou povahu (transmutace) [1, 2].

Později bylo toto záření rozděleno na různé složky. Z počátku pouze na dvě složky - α a β záření. Následně bylo identifikováno ještě γ záření. Záření α se vzduchem dokáže šířit pouhých pár centimetrů. Jedná se o proud dvojnásobně ionizovaných atomů helia. Záření β je asi 100 krát pronikavější než α záření a projde tenkým hliníkovým plechem. Zjistilo se, že má záporný elektrický náboj. Jedná se o proud elektronů. Záření γ pronikne i několika desítkami centimetrů betonu. Jedná se o elektromagnetické záření s vlnovou délkou kratší než rentgenové záření [1, 2].

Přírodní radioaktivita

Velká část záření působící na lidskou populaci je přírodního původu. Vzniká rozpadem přírodních radionuklidů. Tyto radionuklidy podle jejich vzniku dělíme do dvou skupin:

- a) **Kosmogenní** – vznikají díky kosmickému záření za pomoci jaderných reakcí se stabilními prvky především ve vnějším obalu země (^{14}C). Část kosmického záření také dopadá na povrch země, kde se jeho intenzita mění především s nadmořskou výškou [1, 3].
- b) **Terestrální** – jsou to radionuklidy, které vznikly v raných stádiích vesmíru a mívají velmi dlouhý poločas rozpadu (^{40}K). Dále sem patří i sekundární radionuklidy vznikající z rozpadových řad (uran-radiové, thoriové a aktiniové) [1, 3]

Umělá radioaktivita

V roce 1934 vyvolali radioaktivitu uměle manželé F. Joliot-Curie a I. Joliot-Curie, když ozařovali hliník paprsky α . Ve svých pokusech zjistili, že i po ukončení ozařování vysílá hliník záření, které postupně slábne. Za pomoci jaderné reakce se hliník měnil na radioaktivní fosfor ^{30}P , u kterého pozorovali nový druh radioaktivního záření β^+ , kde kromě záporně nabitých elektronů jsou emitovány i kladně nabitě pozitrony. V případě, že je ^{30}P vystaven pozitronu e^+ rozpadne se na křemík [1].

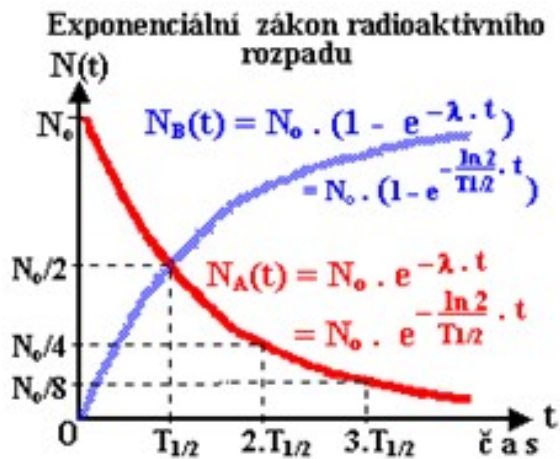
Zákonitosti přeměny atomových jader

Jaderná přeměna je změna složení nebo energetická změna stavu jádra. Při této přeměně se uvolní část energie jádra ve formě kinetické energie produktu rozpadu, většinou je tento jev spojen i s uvolňováním energie ve formě elektromagnetického záření (Obrázek 1) [1].

Radioaktivní rozklad prvku je závislý na jeho koncentraci, což způsobuje, že rychlost rozpadu v čase exponenciálně klesá (Obrázek 2) [1].



Obrázek 1: Radioaktivní rozpad [1]



Obrázek 2: Vliv koncentrace na radioaktivní rozpad [1]

Na obrázku 1 je vidět, jak probíhá radioaktivní rozpad, kdy se jádro A spontánně (bez vnějšího zásahu) rozpadne na nové jádro B a částici C. Při rozpadu je uvolněn rozdíl energie, který odpovídá rozdílnému složení mezi jádry A a B. Musí být při tom splněn zákon o zachování energie ($A = B + C$) a zároveň musí být splněna i hmotnostně-energetická podmínka $m(A) > m(B) + m(C)$ [1].

Příčiny jednotlivých druhů radioaktivity

- a) **α radioaktivita** – je způsobena rozpadem příliš těžkých jader, která se díky velkému objemu a hmotnosti mají problém udržet pohromadě a na okrajích těchto jader se formují velice stabilní jádra helia [1].
- b) **β radioaktivita** – je daleko složitější, probíhá hluboko v submolekulární oblasti, kde slabá interakce v kvarkové struktuře způsobuje přeměny protonů a neutronů [1].
- c) **γ radioaktivita** – je pouhá reorganizace nukleonů při deexcitaci energeticky vzbuzeného jádra, kdy jádro vyzáří foton [1].

1.1 Ionizující záření

Různé druhy záření vznikající při radioaktivním rozpadu mají zpravidla velmi vysokou energii, mnohem větší než běžné světlo. Ionizujícím zářením se nazývá proto, že díky své vysoké energii je schopno “vyrážet“ elektrony z atomového obalu, čímž látku ionizuje (mění se na kladně nabitě ionty) [1, 4].

1.1.1 Vliv ionizačního záření na látku

Pokud je ozářen prvek se stejným složením, tak nedochází k téměř žádným chemickým a fyzikálním změnám (pokud jde o záření α , β , γ), jelikož elektrony, které jsou zářením “vyraženy“ reagují s nově vytvořenými kationty daného prvku. V případě ozáření chemické sloučeniny vzniká řada chemických změn a reakcí, při kterých dochází k uvolňování chemických vazeb (radiolýza) [1].

1.1.2 Vliv ionizačního záření na živou tkáň

Stejně tak jako u ostatních látek, i zde dochází k “vyražení“ elektronů a k následným chemickým změnám a reakcím, které mohou vést až k zániku organismu. Z pohledu organismu lze účinky záření rozdělit na následující etapy [1, 5]:

- a) **Fyzikální** – dochází k “vyražení“ elektronů v důsledku záření. Jedná se o velmi rychlý proces (10^{-14} až 10^{-10} s) [1].
- b) **Fyzikálně-chemická** – dochází k narušení vazeb mezi molekulami a atomy. Vznikají sekundární fyzikálně-chemické procesy, při kterých dochází ke vzniku volných radikálů a disociaci molekul (10^{-14} až 10^{-10} s) [1].
- c) **Chemická** – v důsledků reakcí vzniklých produktů (ionty, volné radikály) s organickými molekulami dochází k poškozování (změně složení a funkcí) těchto molekul, což má za následky poruchy v enzymech, proteinech a řetězcích DNA [1]
- d) **Biologická** – změny v enzymech, proteinech a řetězcích DNA se mohou projevit funkčními a morfologickými změnami v buňkách, orgánech, ale i v organismu jako celku. Délka trvání těchto změn je závislá na dávce záření a délce trvání záření. V případě silných dávek se změna může projevit v řádu desítek minut. Při středních dávkách v řádu dní a při nízkých dávkách mohou změny trvat roky i desítky let [1].

1.2 Radioaktivní odpad

Radioaktivní odpad je materiál, který má příliš vysokou úroveň radioaktivity a z hlediska bezpečnosti, nemá vyhovující hladinu radioaktivity pro bezpečné rozptýlení v životním prostředí. Takové látky jsou považovány za radioaktivní odpad, který musí být bezpečně uložen tak, aby neohrožoval biosféru [1, 6].

1.2.1 Vznik odpadu

Původ radioaktivního odpadu je různý:

- a) **Z přírodních zdrojů** – jedná se především o radionuklidy, které vznikají reakcí stabilních prvků s kosmickým zářením nebo které vznikly v raných stádiích vesmíru. Hojně se vyskytují v životním prostředí i zemské kůře, a některé z nich, díky velkému poločasu rozpadu, bývají používány pro datování stáří hornin a fosílií. V nízkých koncentracích je můžeme nalézt i ve stavebních materiálech.[1, 5, 7].
- b) **Z jaderných reaktorů** – jedná se asi o nejvýznamnější skupinu odpadů. Jde o vyhořelé palivové články a také o konstrukce, které byly vystaveny záření [1].
- c) **Z vyřazených jaderných zbraní**
- d) **Z ukončené těžby a průmyslové výroby** – jde především o materiály, které byly po dlouhou dobu vystaveny záření.
- e) **Ze zdravotnictví a laboratoří**

1.2.2 Rozdělení radioaktivního odpadu

Radioaktivní odpad se dá rozdělit do tří skupin podle radioaktivity. Dle mezinárodních bezpečnostních standardů, lze radioaktivní odpad dělit až do pěti skupin [8].

- a) Nízkoaktivní odpad** – jde o největší skupinu radioaktivního odpadu. Jedná se především o stavební odpad, obaly, ochranné oděvy atd., obsahující poměrně malé množství radionuklidů, a proto je lze ukládat do povrchových úložišť. Před uložením bývají zpopelněny. Podle mezinárodních standardů se nízkoaktivní odpad rozděluje ještě do dalších tří skupin [1]:
- I. Odpady s velmi krátkým poločasem rozpadu (medicína a výzkum).
 - II. Odpady s velmi nízkou hladinou koncentrace (zeminy).
 - III. Odpady s nízkou hladinou koncentrace – s omezenou koncentrací radionuklidů s dlouhým poločasem rozpadu.
- b) Středně aktivní odpad** – při manipulaci se středně aktivním odpadem je již nutné stínění. Jde zejména o konstrukční materiály palivových souborů a zařízení na úpravu vyhořelých paliv. Některé středně aktivní odpady vyžadují uložení v hlubinných úložištích [1].
- c) Vysoce aktivní odpad** – více jak 90 % tohoto odpadu tvoří vyhořelé palivové články jaderných reaktorů. Tento odpad vyzařuje velké množství tepla, proto je nutné ho nejen stínit, ale i chladit. U těchto odpadů je vysoká koncentrace radionuklidů s dlouhým poločasem rozpadu, řádově až stovky tisíc let. Tvoří méně než 1 % z celkového množství radioaktivního odpadu [1].

Tabulka 1: Tabulka klasifikace radioaktivních odpadů podle MAAE [9]

KATEGORIE	CHARAKTERISTIKA	DOPORUČENÝ TYP ÚLOŽIŠTĚ
1. odpady potenciálně uváděné do životního prostředí	roční dávka připadající na vrub ozáření jednotlivce z obyvatelstva musí být nižší nebo rovna efektivní dávce 0,01 mSv	žádné omezení
2. nízko a středně aktivní odpady	aktivita radionuklidů je natolik nízká, že při jejich ukládání není nutno brát v úvahu vznik rozpadového tepla	přípovrchové
2a. nízko a středně aktivní odpady krátkodobé	obsahují radionuklidy o poločasu přeměny menším než 30 let a měrná aktivita dlouhodobých nuklidů nepřesahuje 4000 Bq/g v jednotlivé obalové jednotce, resp. 400 Bq/g jako průměr pro celé úložiště	přípovrchové
2b. nízko a středně aktivní odpady dlouhodobé	měrná aktivita dlouhodobých radionuklidů přesahuje limity uvedené v 2a.	hlubinné
3. vysoce aktivní odpad	aktivita radionuklidů je tak vysoká, že při jejich ukládání je třeba brát v úvahu vznik přeměnového tepla. Hranicí je hodnota tepelného výkonu 2 kW/m ³	hlubinné

1.3 Měření radioaktivity

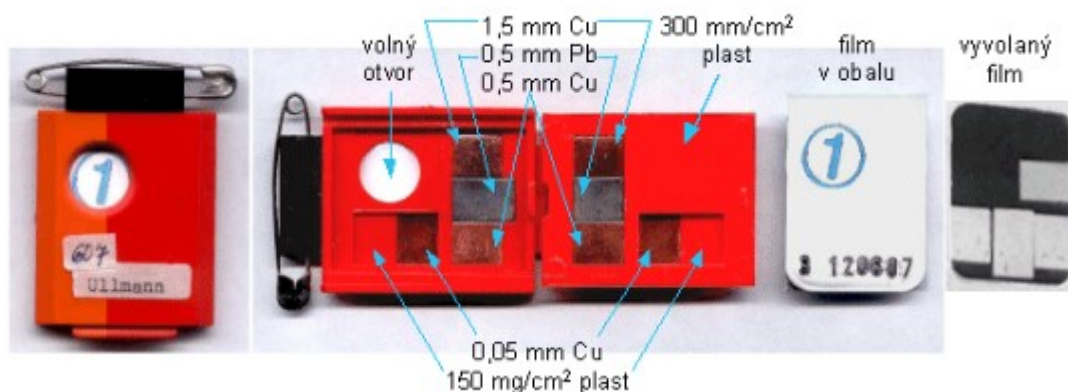
Měření míry radioaktivity je velice důležité, jelikož ionizující záření může mít velký dopad na živé organismy, toto záření není pouhým okem viditelné, a proto máme různé způsoby jak toto záření měřit.

1.3.1 Fotografická detekce

Fotografická detekce je nejrozšířenější a zároveň nejstarší metoda detekce ionizujícího záření. Ionizující záření proniká do detektoru, kde je umístěn fotografický materiál, a v místech vniknutí ionizujícího záření do tohoto materiálu dochází k fotochemické reakci. Po vyvolání fotografického materiálu jsou na snímku jasně viditelná místa dopadu ionizujícího záření a lze z těchto informací dopočítat intenzitu ionizujícího záření. Díky této metodě H. Becquerel objevil radioaktivitu uranové rudy [1, 10].

Nejběžnějším používaným zařízením na principu fotografické detekce jsou osobní filmové dozimetry (Obrázek 3). Používají se k odhadu, jak velkému množství záření byl pracovník vystaven. Tyto zařízení lze poměrně spolehlivě používat při nižších dávkách.

Při vyšších dávkách záření dochází ke zkreslení informací díky zaplnění fotografického materiálu [1, 10].



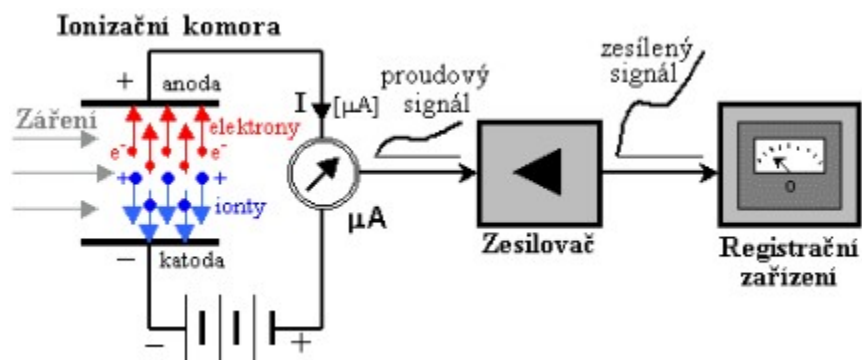
Obrázek 3: Filmový dozimetr [1]

Jak je vidět na obrázku 3, dozimetr je vybaven měděnými a olověnými plíškami o různých tloušťkách. Ty slouží jako filtry pohlcující γ záření. Pomocí informací získaných z těchto filtrů lze odhadnout druh a energii záření, která na pracovníka působila [1].

1.3.2 Ionizace plynu

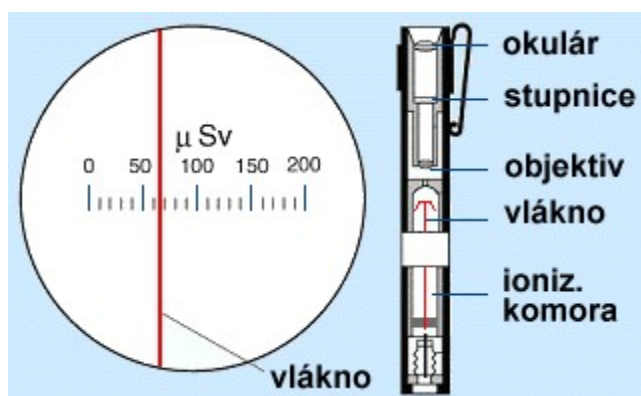
V této metodě se využívá iontové vodivosti. V ionizační komoře s plynem¹ jsou umístěny dvě elektrody (anoda a katoda), které jsou zapojeny v elektrickém obvodu. V případě, že plyn není vystaven ionizujícímu záření, tak v něm neprochází žádný proud. V případě přítomnosti ionizujícího záření, začne docházet k vyrážení elektronů z atomů plynů, a tím vznikají kladně nabití ionty. Kladně nabití ionty začnou okamžitě putovat k záporně nabitě anodě a elektrony ke kladně nabitě katodě. V tu chvíli začne systémem protékat slabý elektrický proud, který je přímo úměrný intenzitě ionizujícího záření. Schéma principu zařízení je na obrázku 4 [1, 10].

¹ Může se jednat o jakýkoli plyn, ale většinou jsou využívány inertní a chemicky stabilní plyny (xenon, argon).



Obrázek 4: Schéma principu ionizační komory [1]

Princip ionizace plynu se využívá například u tužkových dozimetrů (Obrázek 5), kde je tenké pokovené křemenné vlákno připojeno k jedné z elektrod. Při plném nabití dozimetru je vlákno v poloze 0. Při vystavení ionizujícímu záření dochází postupně k vybíjení dozimetru a vlákno se vychyluje, podle toho, jak velké množství záření je pohlceno [10].



Obrázek 5: Tužkový dozimetr [10]

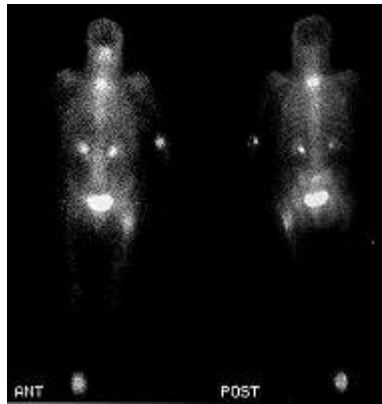
1.3.3 Scintilační zařízení

Scintilační² zařízení jsou založena na radioluminiscenci³ některých látek. Tyto látky jsou nazývány scintilátory. V zařízení je ve světlotěsném obalu scintilátor, který při vystavení ionizujícímu záření začne vydávat záblesky. Tyto záblesky se zachycují na

² lat. scintilla = jiskra, záblesk

³ Schopnost látek reagovat na ionizující záření světelnými záblesky

fotonásobič, který je zesiluje a převádí na elektrické impulsy. Tato metoda se používá například v medicíně, kdy je do těla pacienta vpraven vhodný radionuklid [1, 10].



Obrázek 6: Scintigrafický obraz pacienta [10]

1.3.4 Polovodičové detektory

Princip polovodičových detektorů je podobný jako u detektorů využívajících ionizovaný plyn. Polovodič je připojen na elektrický obvod přes odpor. V normálním stavu, kdy není polovodič vystaven záření, obvodem neprotéká proud. V případě kdy je polovodič vystaven záření, tak obvodem projde krátký impuls. Při vhodném uspořádání velkého počtu polovodičových vrstev, lze získat informace o pohybu částice [1, 10].

2 Aktuální stav problematiky

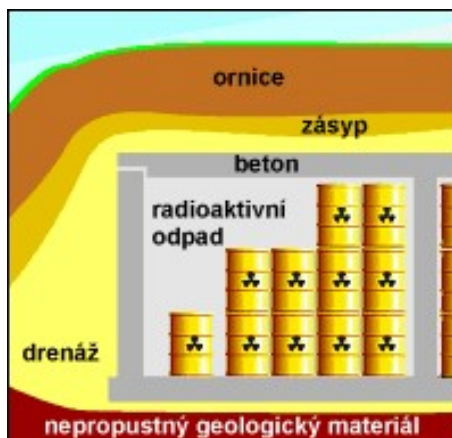
2.1 Nakládání s jaderným odpadem

2.1.1 Ukládání jaderného odpadu v úložištích

Ukládání radioaktivního odpadu spočívá v úpravě a následném uložení radioaktivního odpadu na skládky do té doby, dokud se samovolně nerozpadne na již bezpečné nuklidy, nebo do doby než budou dostupné technologie pro efektivní likvidaci [1, 10].

Povrchová úložiště

Povrchová úložiště jsou budována na povrchu, nebo mělce pod povrchem v dosahu biosféry. Využívají se především opuštěné doly, případně stavby, účelově budovány pro uložení radioaktivního odpadu. Bývají snadno dostupná a předpokládá se pozdější využití území i k jiným účelům. Z tohoto důvodu na území nelze skladovat vysoce aktivní odpady. Povětšinou jsou tato úložiště využívána pro umístění odpadu s nízkou aktivitou, výjimečně se střední aktivitou. Především jde o uložení odpadu s krátkým poločasem rozpadu, případně s velmi nízkou koncentrací radionuklidů. Odpad před uložením bývá nejdříve zpopelněn [1, 6].



Obrázek 7: Schéma povrchového úložiště [1]

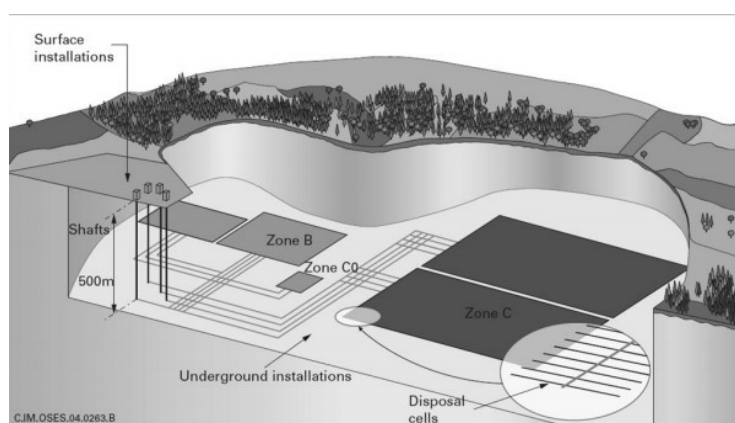
Hlubinné úložiště

Jde o umělé úložiště hluboko pod povrchem, kde se předpokládá trvalé uložení radioaktivního odpadu na velmi dlouhou dobu (stovky až tisíce let). Zde se ukládají středně a vysoce aktivní odpady s dlouhým poločasem rozpadu.

Konstrukce těchto úložišť jsou založeny na multibariérovém principu, který se skládá především ze dvou typů bariér [1, 11]:

- a) **Přírodní bariéra** – zahrnuje geologický profil a sorpční vlastnosti vlastní horniny (hostitelskou horninu).
- b) **Inženýrské bariéry** – obsahují všechna technologická a konstrukční opatření použitá pro zbudování, případně sorpci radionuklidů úložiště.

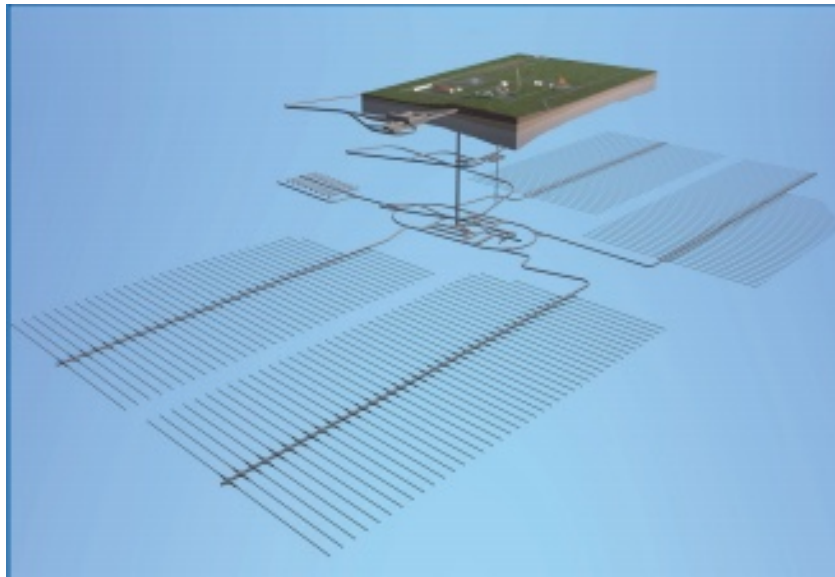
Jednotlivé bariéry jsou navrhovány s ohledem na funkčnost a životnost úložiště jako celku. Zároveň multibariérový systém zaručuje, že při selhání jedné z bariér, nedojde k selhání systému jako celku (Obrázek 8) [1, 11].



Obrázek 8: Schéma hlubinného úložiště [1]

V České republice je monetárně projekt počítající s vybudováním podzemního úložiště, které by podle plánů mělo začít fungovat v roce 2065. V současné době jsou vypracovány předběžně dvě varianty, u kterých zatím není známa lokalita, a proto byly pro návrh uvažovány jen obecné parametry. Předpokládá se vytvoření dvou areálů. Jeden bude podpovrchový a druhý povrchový. Povrchový areál by měl sloužit především pro dopravu a převzetí odpadu. V podpovrchovém areálu mají být přechodná

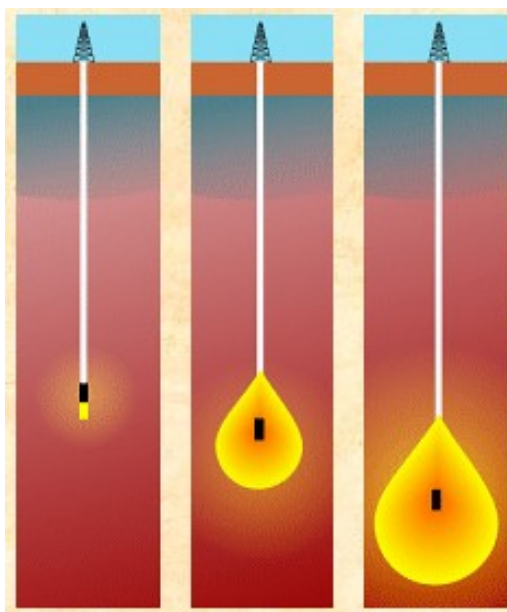
úložiště odpadu, administrativa a další nezbytné objekty pro provoz úložiště (Obrázek 9) [12].



Obrázek 9: Schéma navrhovaného úložiště [3]

Ukládání do síry

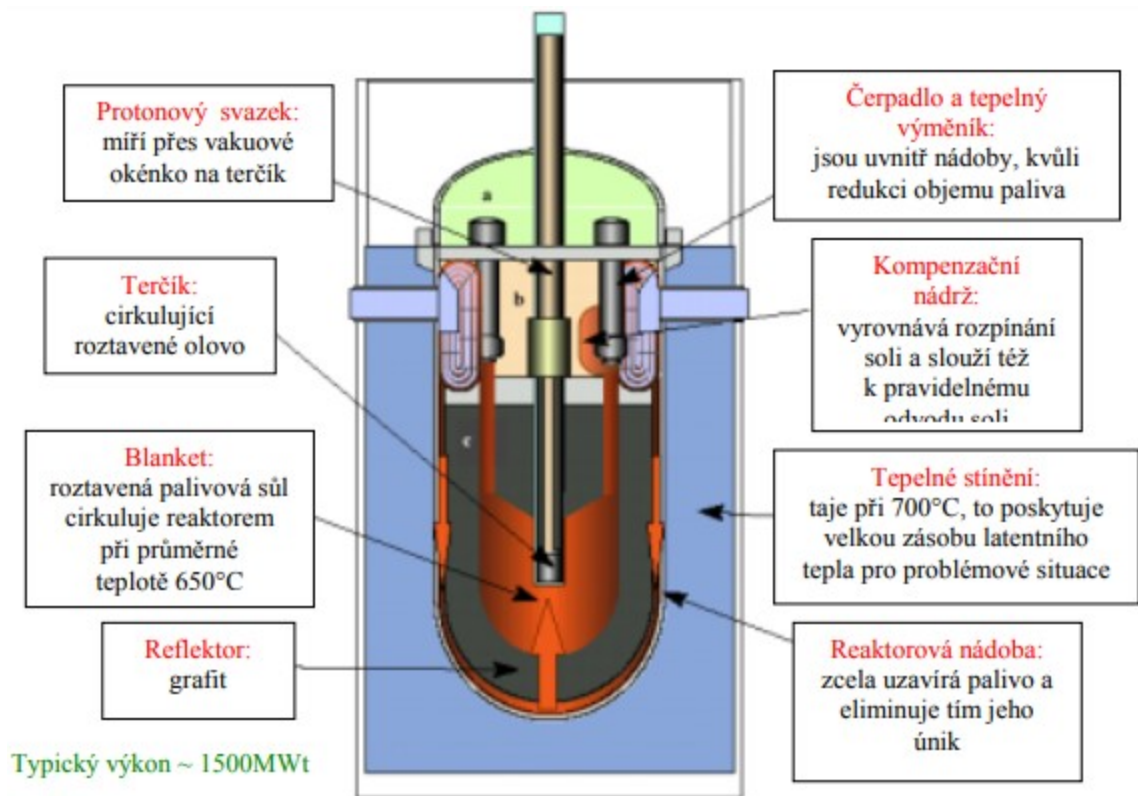
Dalším možným způsobem ukládání radioaktivního odpadu je ukládání do síry (Obrázek 10). V tomto případě je v zemi vytvořen hluboký vrt naplněný nízkotavitelným materiálem (např. sírou), který je ve vodě nerozpustný. Po té se do vrtu uloží vysoko aktivní odpad, jenž vytváří teplo, čímž roztaví síru, která dosáhne teploty až 1800 °C. Díky tepelné roztažnosti hornin a působení síry vznikne kapka, ve které je odpad, a ta může klesat až do hloubky 10 km. Pokles odpadu se postupně zpomaluje díky jeho rozpadu. Jeden vrt lze opakovaně využít až třikrát [13]



Obrázek 10: Zneškodnění jaderných odpadů v hlubinném vrtu za pomoci síry [13]

2.1.2 Likvidace za pomoci urychlovačem řízených transmutačních systémů

Likvidace za pomoci urychlovačem řízených transmutačních procesů je nejmodernější koncept pro nakládání s jaderným odpadem, který je v současné době ve fázi vývoje. Princip spočívá v ostřelování radioaktivního odpadu (ve formě taveniny nebo v roztoku s těžkou vodou) neutrony z urychlovače částic. Během procesu vznikají prvky s krátkým poločasem rozpadu. Při tomto procesu je vytvářeno velké množství energie, která by se při vhodném zabudování zařízení v elektrárně dala využít i pro výrobu energie elektrické. Bohužel potřebné urychlovače jsou příliš nákladná zařízení, a proto bude trvat delší dobu, než se tato technologie stane běžným vybavením jaderných elektráren [13, 14].



Obrázek 11: Návrh zařízení pro likvidaci odpadu [14]

2.2 Principy ochrany radioaktivního odpadu

2.2.1 Stínění ionizujícího záření

U tohoto druhu ochrany je důležitá objemová hmotnost materiálu, jelikož čím více a větších (stabilních) atomů materiál obsahuje, tím větší je jeho schopnost pohlcení energie vyzařujícího záření aniž by se zásadně změnila jeho chemická struktura. Samozřejmě záleží na typu záření a době jeho trvání. Tloušťka i hustota materiálu potřebná pro odstínění jednotlivých druhů záření se liší [1]:

- a) Na odstínění α -záření stačí papír
- b) Na odstínění β -záření 10mm plexiskla
- c) Na odstínění γ -záření je už zapotřebí materiál s velkou hustotou (olovo) případně větší vrstva materiálu (beton)

2.2.2 Adsorpce radionuklidů

Sorpční vlastnosti materiálů jsou závislé na mnoha podmínkách systému především na fyzikálně-chemických poměrech na rozhraní fází (teplotě, tlaku, iontové síle roztoku, pH, vlastnostech rozpouštědla, složení sorbentu atd.). Zároveň každý sorbent je určen pro sorbování jiných iontů, tudíž jeho sorpční vlastnosti při použití na různé druhy iontů jsou odlišné [15].

Běžně jsou rozlišovány 3 druhy adsorpce:

- a) **Fyzikální** – částice jsou přitahovány k povrchu slabými přitažlivými silami, podobné van der Waalovým silám. Na povrchu absorbentu se může z adsorbovaných částic tvořit až několik vrstev. Díky tomu se dosahuje poměrně velké sorpční kapacity.
- b) **Chemická** – dochází ke sdílení elektronového páru, což má za následek pevnější vazbu. Vytvořit lze jen jednu vrstvu adsorbovaných částic.
- c) **Elektrostatická** – uplatňují se zde síly coulombovské.

Jako sorbenty mohou být využívány nejrůznější materiály. Jedním z nejčastěji používaných sorbentů jsou například zeolity.

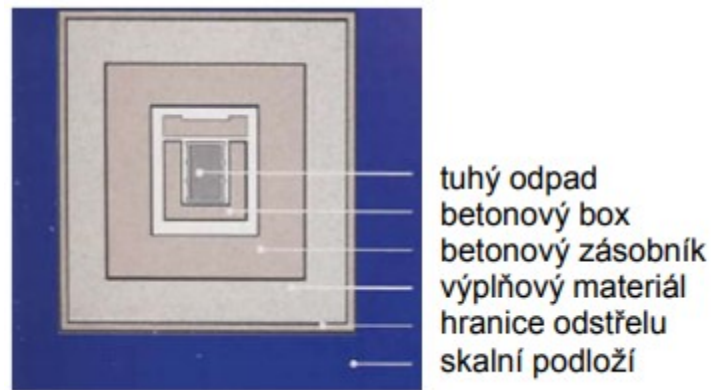
Studium sorpčních procesů je z velké části založeno na empirii. Nejméně náročným testem na speciální aparaturu jsou tzv. batch testy, které se provádějí na malých rozdrcených vzorcích, kde se měří sorpční vlastnosti při různých koncentracích [15].

V důsledku sorpčních vlastností materiálu dochází k imobilizaci kationtů ve struktuře sorbentu a tudíž zabránění reakce kladně nabitých iontů s ostatními látkami a změně chemických a vazebných vlastností molekul [15].

S problematikou sorpce je úzce spojena i desorpce, která probíhá především, pokud koncentrace sorbovaného iontu poklesne. V tuto chvíli dochází k uvolňování sorbovaných iontů zpět do roztoku. Desorpce neprobíhá stejně jako sorpce a to hlavně díky mezimolekulárním silám. V důsledku těchto sil vzniká tzv. hystereze [16].

2.3 Inženýrské bariéry

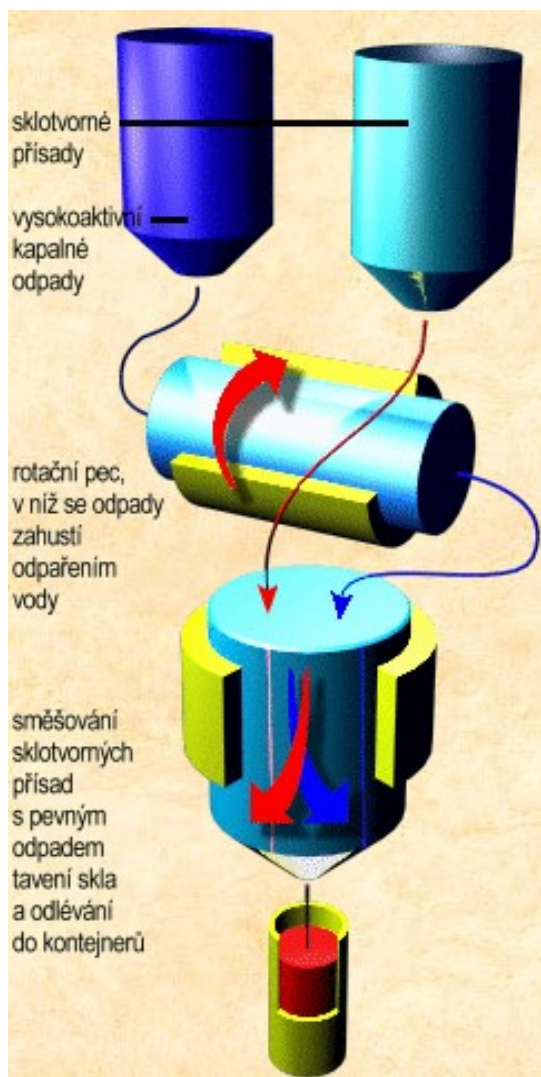
Inženýrské bariéry jsou všechny technické i konstrukční způsoby, kterými se brání únikům radioaktivních odpadů a záření do biosféry v takovém množství, které by mohlo být škodlivé (obrázek 12).



Obrázek 12: Schéma skladby inženýrských bariér [17]

2.3.1 Stabilizace radioaktivního odpadu

První důležitou bariérou je forma, ve které je odpad uložen. U pevných odpadů většinou postačí uzavření odpadu do skladovacího boxu. Pro kapalné odpady je volena skelná forma. Do této formy se odpad dostává pomocí procesu vitifikace, kdy se odpad a další materiály potřebné pro výrobu skla zahřejí na vysokou teplotu a následně se nechají ztuhnout. Výhodou takto stabilizovaných odpadů je nízká vyluhovatelnost, dobrá tepelná vodivost a mechanická pevnost. Tento proces je volen převážně u vysoce aktivních odpadů. Pro stabilizaci nízkoaktivních a středně aktivních odpadů je většinou využíván beton [13].



Obrázek 13: Systém vitrifikace odpadu [13]

2.3.2 Vnitřní bariéry

Další důležitou bariérou je obal, do kterého je odpad ukládán. Bývá vyroben z korozi-vzdorných kovů (měď, hliník, titan, různé slitiny), betonu nebo polyethylenu. Volbu vhodného materiálu samozřejmě ovlivňuje chemické prostředí a volba ostatních inženýrských bariér [1, 17].



Obrázek 14: Odpad v barelech ukládaný do boxů [17]

Prostor, mezi jednotlivými kontejnery, je po finálním uložení vyplněn tmelem. Tento tmel má za úkol mechanicky podpořit úložiště a zamezit průtoku podzemních vod. Nejčastěji se pro své vlastnosti (reologickou stálost a těsnicí vlastnosti) využívá bentonit.

Další velice důležitou bariérou je ostění úložiště, které má především nosnou funkci [1, 17].

2.3.3 Vnější bariéra

Jedná se především o konstrukci úložiště, u které je hlavním úkolem, aby nedošlo ke zhroucení hostitelské horniny. Zároveň je ale dobré, aby i tato bariéra plnila funkci chránící biosféru před únikem škodlivých produktů vznikajících při radioaktivním rozpadu [1].

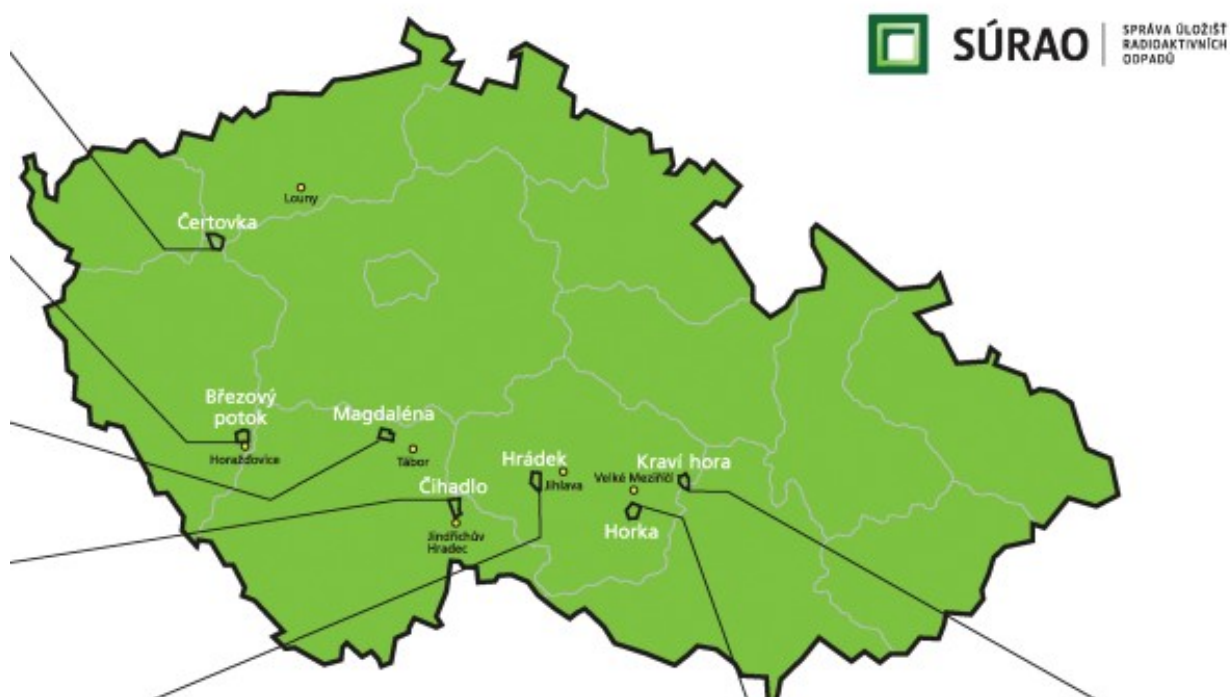
2.4 Hostitelská hornina

Nalezení vhodné hostitelské horniny je zásadní. Důležité je, aby byl masiv s velkou mocností v dostatečné hloubce pod povrchem (500 m), kde je minimální proudění podzemních vod a nachází se v seizmicky klidné oblasti. Masiv musí vykazovat dostatečnou homogenitu a zároveň musí být dostatečně tepelně, chemicky i mechanicky odolný. V současné době se jeví jako nejvhodnější materiály žula, kamenná sůl a jílovce [6, 11, 18].

Nedílnou součástí hledání úložiště je geologický průzkum, u kterého je nejdříve nutné vytipovat určité lokality. V první fázi se musí provést ověření celistvosti podloží.

Následně jsou zhotoveny hlubinné vrty, které ověří geologické poměry v lokalitě. Po výběru lokality se postaví podzemní laboratoř, ve které se prověřuje vhodnost podloží a dopad na biosféru [11, 18].

V současné době v České republice probíhá výběr lokality pro hlubinné úložiště, které by mělo zahájit provoz v roce 2025. Momentálně se projekt nachází teprve v první fázi a probíhá hodnocení 7 vybraných lokalit (informace k 7. 11. 2018), kde dojde k zúžení na 4 lokality. Tam bude proveden hloubkový průzkum. Vybrané lokality jsou na obrázku 11 [11].



Obrázek 15: Mapa ČR s vybranými lokalitami [11]

3 Použití betonu pro ukládání

Betony mají díky svým sorpčním vlastnostem, variabilitě, velké objemové hmotnosti (těžké betony $> 3500 \text{ kg/m}^3$) a relativně nízké ceně, výborné předpoklady k využívání na stínění záření a sorpci radionuklidů. Pro již zabudované konstrukce lze využít i injektážní cementové malty, které mohou posloužit i pro zpevnění hostitelské horniny [19, 22].

3.1 Imobilizace radionuklidů

Pro imobilizaci radionuklidů je využíváno především sorpčních vlastností materiálů, kdy dochází k sorpci radioaktivních atomů ve struktuře materiálu. Tím se brání migraci těchto atomů a zároveň dochází ke snížení koncentrace radionuklidů. U kompozitů na bázi cementu dochází k imobilizaci radionuklidů především díky cementové matici a příměsím, které se do betonu přidávají. Kamenivo používané v běžných konstrukčních betonech většinou nemá výraznější vliv na sorpční vlastnosti betonu [20].

3.1.1 Cementová matrice

Cementová matrice v imobilizačních procesech působí jednak fyzikálně (povrchová sorpce), tak i chemicky (iontová výměna, tvorba charakteristické fáze Ca-U-OH, metastabilní srážení- $\text{Cr}(\text{OH})_3$). CSH gely, vzhledem ke své nanostruktuře, nabízí spoustu míst vhodných pro sorpci aniontů a kationtů. V případě použití pucolánově aktivních příměsí vznikají podobné produkty jako při hydrataci cementu, které mají větší povrch pro sorpci a vyšší kapacitu pro výměnu iontů než je tomu u portlanditu. Zásadní vliv na to, jaký způsob imobilizace převládá, má koncentrace radionuklidů (při nižších koncentracích převládá povrchová sorpce) [20].

Dalším důležitým parametrem při sorpci iontů je pH. Z experimentů na kamenné soli, betonu na bázi Portlandského cementu a betonu s nízkým pH vyšel nejlépe beton s nízkým pH [19].

3.1.2 Používané sorbenty

Další nedílnou složkou betonu jsou příměsi, které se přidávají pro zlepšení určitých vlastností čerstvého nebo ztvrdlého betonu. Primárně rozlišujeme dva typy příměsí:

- a) **Inertní** – nezúčastňují se procesu hydratace

- b) **Reaktivní** – zúčastňují se hydratačních procesů

V tomto případě jsou zajímavé především příměsi, které mají dobré sorpční vlastnosti pro využití k sorpci radionuklidů. Mezi takové patří pucolánově aktivní příměsi, kdy dochází k reakcím, jejichž výsledkem jsou podobné produkty, jako při hydrataci cementu, které mají velmi dobré sorpční vlastnosti.

3.1.2.1 Reaktivní příměsi

Zeolity

Zeolity jsou krystalické aluminosilikáty alkalických kovů. V současné době je známo více než 50 přírodních a 150 umělých zeolitů. Chování a vlastnosti jsou především ovlivňovány krystalickou strukturou zeolitů. Struktura zeolitů obsahuje velké množství otevřených kanálků a dutin, které bývají vyplněny vodou nebo kladně nabitými ionty, které nejsou pevně vázány do struktury zeolitu. Velikost kanálků umožňuje průchod příbuzných látek, aniž by se porušila jeho struktura. Z tohoto důvodu jsou výbornými sorbenty. Při teplotách (pod 400 °C) dochází k dehydrataci zeolitů, většinou se jedná o vratnou reakci, kdy zeolity jsou schopné uvolnit a následně navázat vodu v množství větším než 30 % jejich hmotnosti. Zároveň jsou zeolity oblíbené i díky svým pucolánovým vlastnostem. Z tohoto důvodu se jeví jako výborná volba pro využití při sorpci radionuklidů [21, 22].

Cihla (cihelný prach)

Cihelný prach je odpadní materiál, který vzniká především při broušení cihel. V betonu je využíván především pro své pucolánové vlastnosti jako částečná náhrada cementu. Zároveň se zde nabízí možnost využít cihelný prach jako příměs do betonů určených k sorpci radionuklidů, jelikož se cihelná drť využívá pro neutralizace vysoce

kyselých vod, sorpci radionuklidů a těžkých kovů z vody. Z tohoto důvodu se použití cihelných odpadů jeví jako vhodné [19, 23].

3.1.2.2 Inertní příměsi

Bentonit

Bentonit je důležitá jílovitá hornina, která má široké uplatnění v mnoha průmyslových oblastech. Vznikla především zvětráváním vulkanických hornin (tufy, popel). Největším producentem bentonitu je USA. Má velmi dobré sorpční vlastnosti a vysokou schopnost výměny kationtů. Z těchto důvodů se také používá k zalévání odpadu v hlubinných úložištích. Rozlišují se 3 druhy bentonitu [6]:

- a) **Sodný (Na)** – vysoce bobtnající
- b) **Vápenaté (Ca)** – jsou méně bobtnavé jak sodné bentonity
- c) **Draselné (K)** – v průmyslu nemají větší význam

Méně bobtnavé bentonity lze obohacovat sodíkem, ale bobtnací schopnosti takovýchto bentonitů nedosáhnou kvality sodných bentonitů. Z mineralogického hlediska obsahuje velké množství smektitu, který nejvíce ovlivňuje jeho vlastnosti, dále illit a kaolinit. Jeden z hlavních parametrů, který určuje rozdílné chemické a fyzikální parametry jednotlivých bentonitů, je velikost jejich pórů. Kationtová výměna je závislá především na měrném povrchu jednotlivých bentonitů. Čím větší je měrný povrch tím větší by měla být i kationová výměna. Bentonity také lze používat jako plastifikační příměsi, nebo k čištění odpadních vod. [6, 24].

Bentonite sample	Mineral composition, %							Chemical composition, %					Granulometric composition, %	
	smectites		carbonates		hydromica	kaolinite	zeolite	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	fractions	
	Na	Ca-Mg	calcite	dolomite									<0.01	<0.001
B1	83	-	-	-	1	-	13	2.66	1.45	1.58	3.16	4.36	92.2	59
	83						4.11		4.71					
B2	70	-	-	-	4	13.5	9	0.94	0.24	1.58	2.39	1.13	73	43
	70						1.18		3.97					
B3	-	70	4.7	3.9	2	-	-	0.59	3.14	1.23	3.38	6.10	87	74
	70							3.73		4.61				
B4	38	29	-	4.5	-	4.5	-	1.40	1.75	1.40	1.75	6.90	88	71
	67							3.15		3.15				
B5	48	24	-	2	-	2	-	4.38	0.18	1.40	1.25	6.55	95	86
	72							4.56		2.65				

Obrázek 16: Minerologické a chemické složení bentonitů [25]

Bentonites	Cs		Sr	
	sorption, mEq/g	desorption, %	sorption, mEq/g	desorption, %
B1	0.29	12	0.63	8
B2	0.25	18	0.48	23
B3	0.27	20	0.42	15
B4	0.22	49	0.48	43
B5	0.34	15	1.24	2.5

Obrázek 17: Sorpce a desorpce stroncia a cesia na bentonitech [25]

Jak je vidět z obrázku 16 a 17, tak různé druhy bentonitů jsou schopny absorbovat rozdílné množství cesia a stroncia.

3.2 Stínění ionizujícího záření

Pro stínění ionizujícího záření pomocí betonu je zapotřebí vysoká objemová hmotnost. Nejběžnějším způsobem jak docílit co největší objemové hmotnosti betonu, je použití kameniva s velkou objemovou hmotností (nad 3000 kg/m³). V případě přírodních kameniv se jedná především o železnaté horniny jako je magnetit a hematit. Pokud jde o kameniva umělá, tak se využívá litinový odpad nebo ocelové broky [26].

4 Použité experimentální metody

4.1 Základní materiálové charakteristiky

4.1.1 Vakuové nasycení vodou

Základní materiálové charakteristiky byly stanoveny pomocí vakuového nasycení vodou. Při použití této metody se vzorky nejdříve vysuší v sušičce, aby se zbavily fyzikálně vázané vody. Následně se změří a zváží m_d [kg]. Po zvážení byly vzorky umístěny do exsikátoru, ze kterého byl pomocí vakuové pumpy vysát vzduch. Po odsátí vzduchu musí vzorky v exsikátoru zůstat ještě minimálně po dobu 24 hodin. Následně jsou vzorky vyjmuty z exsikátoru a zváženy. Poprvé po vyjmutí na vzduchu m_w [kg] a podruhé pod vodou m_a [kg]. Z těchto hmotností lze vypočítat objem pórů V [m³], kde ρ_w [kg/m³] je hustota vody při dané teplotě [27, 28].

Metoda je založena na principu Archimédovy hmotnosti, kdy jsou póry materiálu plně nasycené vodou. Tuto metodu nelze použít pro hydrofobizované materiály [27].

$$V = \frac{m_w - m_a}{\rho_w} \quad (1)$$

Z naměřených hodnot lze dopočítat otevřenou pórovitost ψ_0 [-], objemovou hmotnost ρ [kg/m³] a hustotu matrice ρ_{mat} [kg/m³].

$$\psi_0 = \frac{m_w - m_a}{V\rho_w} \quad (2)$$

$$\rho = \frac{m_d}{V} \quad (3)$$

$$\rho_{mat} = \frac{m_d}{(1 - \psi_0)V} \quad (4)$$



Obrázek 18: Vzorky v exsikátoru



Obrázek 19: Vážení vzorku pod vodou

4.1.1.1 Heliová pyknometrie

Pomocí pyknometrie lze stanovit hustotu pevných látek a kapalin. Klasická pyknometrie se provádí pomocí skleněné nádoby s přesně daným objemem a zátkou s kanálkem pro odvod přebytečné kapaliny. Je vždy zapotřebí zajistit, aby zkoumaný materiál nereagoval s použitým médiem pro měření [27].

Helium se v pyknetrii používá hlavně kvůli velikosti atomů, které jsou velmi malé, a proto dokážou snadno a rychle proniknout i do velmi malých pórů. Vysušený vzorek je vložen do nádoby o známém objemu. Po spuštění je vypuštěno helium o stejném tlaku jak do komory se vzorkem, tak do referenční komory. V obou komorách je následně změřen tlak a z rozdílů tlaků se dopočítá objem matrice. Následně díky

hmotnosti vzorku m_d [kg] a objemu matrice V_{mat} [m³] lze dopočítat hustotu matrice ρ_{mat} [kg/m³] [27].

$$\rho_{mat} = \frac{m_d}{V_{mat}} \quad (5)$$

4.1.1.2 Porozimetrie

Pro studium a pochopení chování stavebních materiálů je důležité znát velikost a objemové zastoupení pórů ve zkoumaném vzorku. Ke zjištění tohoto zastoupení se využívá rtuťová porozimetrie. Výhodou rtuti je velké povrchové napětí, díky čemu nesmáčí většinu stavebních materiálů. Rtuť je vtlačována do materiálu pod tlakem. Díky tomuto tlaku lze určit velikost a objem pórů v rozmezí. Vztah mezi tlakem velikostí pórů je popsán Washburnovou rovnicí [27, 29]:

$$d_p = -\frac{4\gamma \cos \theta}{p} \quad (6)$$

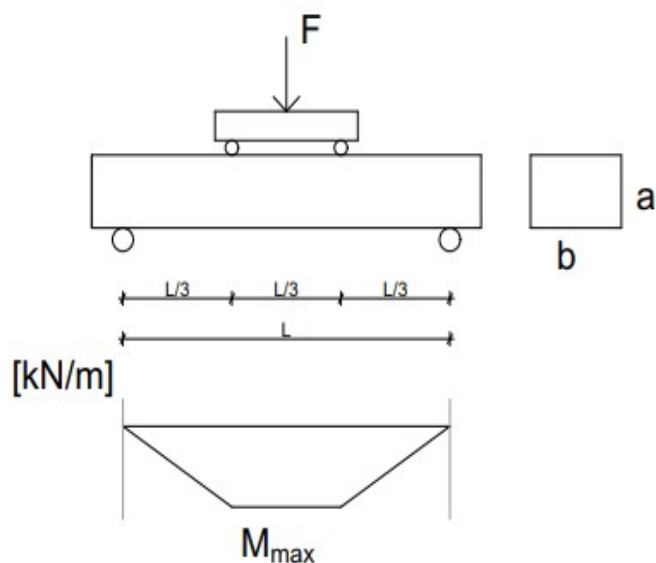
kde p [Pa] je tlak, d_p [m] průměr pórů, γ [N/m] povrchové napětí rtuti a θ [°] kontaktní úhel. Při nižších tlacích lze zaznamenat póry mezi 4 - 100 μ m, u tlaků kolem 400 MPa až 3 nm.

4.2 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti byly studovány na vzorcích po 28 dnech, podle normy ČSN EN 12390-3 a normy ČSN EN 12390-5 [30, 31].

4.2.1 Tah ohybem

Využívá se především pro získání tahové pevnosti materiálu. Běžně se používají 2 typy zkoušek tříbodová a čtyřbodová. Pro tuto práci byla zvolena zkouška čtyřbodová, jelikož vzorek se poruší v nejslabším místě, nikoliv v místě kde je vneseno zatížení (nevýhoda tří bodové ohybové zkoušky). Schéma zkoušky a průběh momentů je vidět na obrázku 20 [27].



Obrázek 20: Čtyřbodová ohybová zkouška

Jak je vidět z obrázku č. 20, tak L [m] je délka mezi podporami, F [kN] je zatěžovací síla, a [m] je výška vzorku a b [m] šířka vzorku. Výsledná tahová pevnost f_t [MPa] se dopočítá z rovnice (7).

$$f_t = \frac{FL}{ba^2} \quad (7)$$

4.2.2 Tlaková zkouška

Jedná se pravděpodobně o nejrozšířenější způsob pro získání tlakové pevnosti materiálů. Statická tlaková zkouška se provádí pomocí hydraulického lisu na krychlích pro získání krychelné pevnosti. Pro tuto práci byly použity krychle o rozměru 100 x 100 x 100 mm. Zkušební tělesa jsou lineárně zatěžována až do porušení vzorku [27].

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (8)$$

Kde f_c [MPa] je pevnost betonu v tlaku, F [kN] je zatěžovací síla a A [m²] je plocha vzorku.

4.3 Transport vody

4.3.1 Transport vodní páry

Prostup vodní páry vzorkem byl zjišťován tzv. „cup metodou“, která byla měřena bez teplotního spádu a jde o jednoosé šíření vodní páry vzorkem. Pro naše měření byly použity dvě různé metody a to „wet cup“ a „dry cup“. Obě metody jsou postavené na znalosti parciálních tlaků nad a pod vzorkem. V případě metody „wet cup“ je na dně misky voda a simuluje 95 % relativní vlhkost. V případě metody „dry cup“ je na dně misky silikagel, který simuluje relativní vlhkost 5 % [27, 32].

Vzorek byl vždy uložen v kontrolovaném prostředí s konstantní teplotou a vlhkostí (25 °C a 50 % relativní vlhkost). V závislosti na zvolené metodě docházelo k prostupu vodní páry vzorkem buďto ven do kontrolovaného prostředí („wet cup“) nebo směrem dovnitř do misky, kde ji absorboval silikagel. U obou metod jsou pravidelně měřeny změny hmotnosti, kdy v závislosti na měřeném materiálu se časové intervaly potřebné pro měření mohou lišit. Výsledkem měření je součinitel difúzní propustnosti δ [s], který se dopočítá dle následujícího vzorce [27, 31]:

$$\delta = \frac{\Delta m d}{S \tau \Delta p_p} \quad (9)$$

kde Δm [kg] je hmotnost vodní páry, která prošla materiálem, d [m] je tloušťka vzorku, S [m] je plocha vzorku, kterým může vodní pára prostoupit, τ [s] je doba, po kterou byl vzorek měřen a Δp_p [Pa] je rozdíl parciálních tlaků. Dále pak lze dopočítat součinitel difúze vodní páry D [m²/s], který je potřebný pro získání ve stavebnictví často používaného faktoru difúzního odporu μ [-] [27].

$$D = \frac{\delta R T}{M} \quad (10)$$

$$\mu = \frac{D_{vz}}{D} \quad (11)$$

kde R [J/mol.K] je univerzální plynová konstanta, T [K] je termodynamická teplota, M [kg/mol] molární hmotnost vody a D_{vz} [m²/s] je difúze vodní páry ve vzduchu.

4.3.2 Transport kapalné vlhkosti

Parametry charakterizující transport kapalné vlhkosti lze určit pomocí jednoduché zkoušky s použitím digitální váhy, na které je vzorek zavěšený. Vzorek je dán do nádoby s vodou a je ponořený zhruba 2-3 mm pod hladinu vody. Pomocí softwaru je vzorek v předem nastavených intervalech pravidelně vážen a jsou zaznamenávány přírůstky hmotnosti. Aby bylo zajištěno, že se voda do vzorku bude dostávat jen spodní plochou vzorku, je celý vzorek po stranách natřen epoxidovým lepidlem. Z naměřených hodnot pak lze vypočítat absorpční koeficient A [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$] a průměrnou hodnotu součinitele vlhkostní vodivosti κ [m^2/s] [27, 33].

$$A = \frac{\Delta m}{S\sqrt{t}} \quad (12)$$

$$\kappa = \left(\frac{A}{w_{sat}} \right)^2 \quad (13)$$

kde S [m^2] je plocha vzorku, t [s] je čas, Δm [kg] je hmotnostní přírůstek a w_{sat} [kg/m^3] je obsah nasycené vlhkosti.

4.4 Tepelné vlastnosti

Tepelné vlastnosti se dají měřit pomocí metod stacionárních a nestacionárních. Při stacionárních metodách je zapotřebí znát tloušťku vzorku a teplotu na obou povrchích. Přitom jeden povrch je zahříván. Základním předpokladem je, že všechno teplo bude procházet vzorkem bez tepelných ztrát. Nestacionární metody jsou založeny na principu krátkých impulsů, kdy je měřena odezva materiálu na tyto impulsy.

Při měření tepelných vlastností zjišťujeme součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$], součinitel teplotní vodivosti a [m^2/s] a objemovou tepelnou kapacitu c [$\text{J}/\text{m}^3 \cdot \text{K}$] [27],

$$\alpha = \frac{\lambda}{c\rho} \quad (14)$$

kde ρ [kg/m^3] je objemová hmotnost materiálu.

U stavebních materiálů také závisí na stupni nasycení vzorku vodou, jelikož voda v porovnání se vzduchem je schopna vést velké množství tepla a tím dochází ke zhoršení tepelných vlastností materiálů. Proto je zapotřebí provést dostatek měření pro různé vlhkosti mezi vysušeným a plně nasyceným vzorkem [27].

Isomet

Isomet je přístroj, který pro stanovení tepelných vlastností materiálu využívá nestacionárních metod. Přístroj je schopný v krátkém čase (10-16 minut) změřit a vyhodnotit tepelné vlastnosti stavebních materiálů. Funguje na principu měření teplotní odezvy na impuls tepelného toku do vzorku a lze s ním měřit i vlhké materiály. Přístroj je vybaven různými druhy sond, kde každá sonda je kalibrována na určitý rozsah hodnot. Součástí vybavení přístroje jsou plošné sondy na pevné materiály a jehlové sondy na sypké nebo vláknité materiály [27].

4.5 Vsádková metoda (batch testy)

Pro zjištění sorpčních vlastností jednotlivých vzorků při vystavení roztokům obsahující neaktivní formy zkoumaných radionuklidů v různých koncentracích, byla použita vsádková metoda. Princip metody spočívá v tom, že se rozdrtí malé množství zkoumaného materiálu (Obrázek 21). Ten se následně v malém množství 0,1 g smíchá s 50 ml roztoku (Obrázek 22) [34].



Obrázek 21: Achátová třecí miska se vzorkem



Obrázek 22: Příprava vzorků

Vzorky byly měřeny vždy v pěti koncentracích a to 100, 200, 400, 800 a 1000 mg/l. Roztoky byly vždy připravovány ze základního roztoku (ZR), který byl připraven v koncentraci 1000 mg/l a destilované vody (DV) dle tabulky 2.

Tabulka 2: Koncentrace roztoku

Koncentrace [mg/l]	ZR [ml]	DV [ml]
100	5	45
200	10	40
400	20	30
800	40	10
1000	50	0

Základní roztok pro cesium byl připraven z 1,24 g CsCl a 1 litr destilované vody, pro stroncium bylo použito 3,04 g SrCl₂.6H₂O na 1 litr destilované vody.

Po smíchání se vzorkem se roztoky protřepaly a umístily na laboratorní třepačku (Obrázek 23), kde zůstaly po dobu 3 dní. Po třech dnech se roztok přefiltroval (Obrázek 24) a provedla se atomová absorpční spektrometrie (AAS), kde byla stanovena zbývající koncentrace zkoumaných prvků.



Obrázek 23: Vzorke umístěné v třepačce



Obrázek 24: Filtrování vzorků

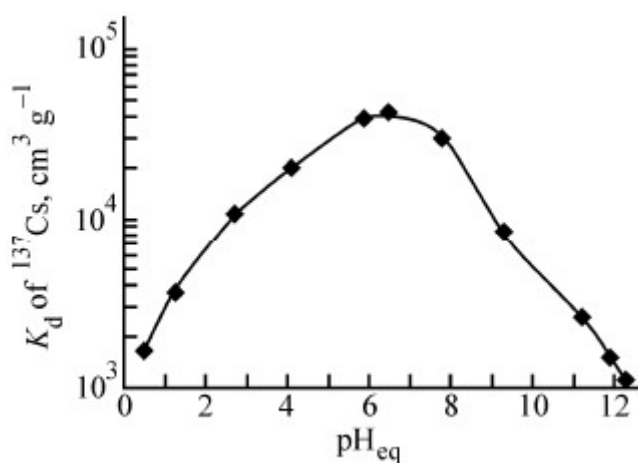
Z výsledků byly sestrojeny sorpční izotermy a vypočítány distribuční koeficienty K_d [ml/g]

$$K_d = \frac{(C_0 + C_1)V}{C_0 m} \quad (15)$$

kde C_0 [mg/l] je počáteční koncentrace, C_1 [mg/l] je koncentrace zjištěná pomocí AAS, V [ml] je objem roztoku a m [kg] je hmotnost vzorku.

Sledovanými prvky byly zvoleny neaktivní formy těchto radionuklidů:

- a) **Cesium** - Radioaktivní nuklid ^{137}Cs vzniká při štěpení a vyzařuje vysokoenergetické gama záření. Poločas rozpadu je 30,08 let. Nejčastěji se používá v lékařských zařízeních pro léčbu rakoviny a také pro kalibraci zařízení na detekci radioaktivity. Je také jedním z vedlejších produktů jaderného štěpení v reaktorech a jaderných zbraních. ^{137}Cs se nejčastěji váže s chloridy do podoby krystalického prášku. Při vystavení vysoké koncentraci může způsobit vážné popáleniny, nemoc z ozáření a smrt. Při nižších koncentracích zvyšuje riziko rakoviny zejména po požití [35].



Obrázek 25: Distribuční koeficient pro ^{137}Cs na syntetický ivanyukit⁴ [36]

- b) **Stroncium** - Radioaktivní nuklid ^{90}Sr je nejběžnější chemicky vyrobená forma Sr. Poločas rozpadu je 28,79 let. Největší množství ^{90}Sr se do prostředí rozptýlilo při jaderných testech a haváriích jaderných elektráren Černobyl a Fukušima. Největším zdravotním rizikem je požití stroncia, kdy v těle působí jako vápník a snadno se začleňuje do kostní dřeně a měkkých tkání kolem kosti, kde následně může způsobovat rakovinu kostí [35].

⁴ Ivanyukit je skupina krystalických mikroporézních titanokřemičitanových minerálů

5 Studované materiály

Všechny studované materiály byly vyrobeny ve formě trámečku 100 x 100 x 400 mm a 100 x 100 x 300 mm. Trámečky o rozměrech 100 x 100 x 400 mm byly následně rozřezány na potřebné rozměry pro určení vlastností materiálu. Pro tuto práci byly zvoleny 3 typy betonů s různými příměsmi, které se aplikovaly v různých poměrech k cementu (1/4, 3/8, 1/2 a 5/8).

5.1 Složení studovaných betonů

Složení betonů je uvedeno v tabulce 3. Pro výrobu byl použit cement 42,5R, kamenivo z Dobřína (frakce 0-4) a Zbraslavi (frakce 4-8 a 8-16), křemenná moučka ST6, použitá příměs, plastifikační přísada Stachement 2000 a voda.

Tabulka 3: Složení studovaných betonů

Materiál	RXR	RX1	RX2	RX3	RX4
CEM 42,5 R	400	320	320	320	320
Dobříň 0-4	760	760	760	760	760
Zbraslav 4-8	455	455	455	455	455
Zbraslav 8-16	483	483	483	483	483
Křemenná moučka ST6	120	120	80	40	-
Příměs	-	80	120	160	200
Stachement 2000	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9
Voda	110	130	147	152	133

Pro studium sorpčních vlastností byly vyrobeny pouze odpovídající pasty, bez použití kameniva. Sorpční zkoušky probíhaly na velmi malém vzorku, a proto by kamenivo mohlo výrazně zkreslit naměřené hodnoty.

5.2 Charakterizace vstupních surovin

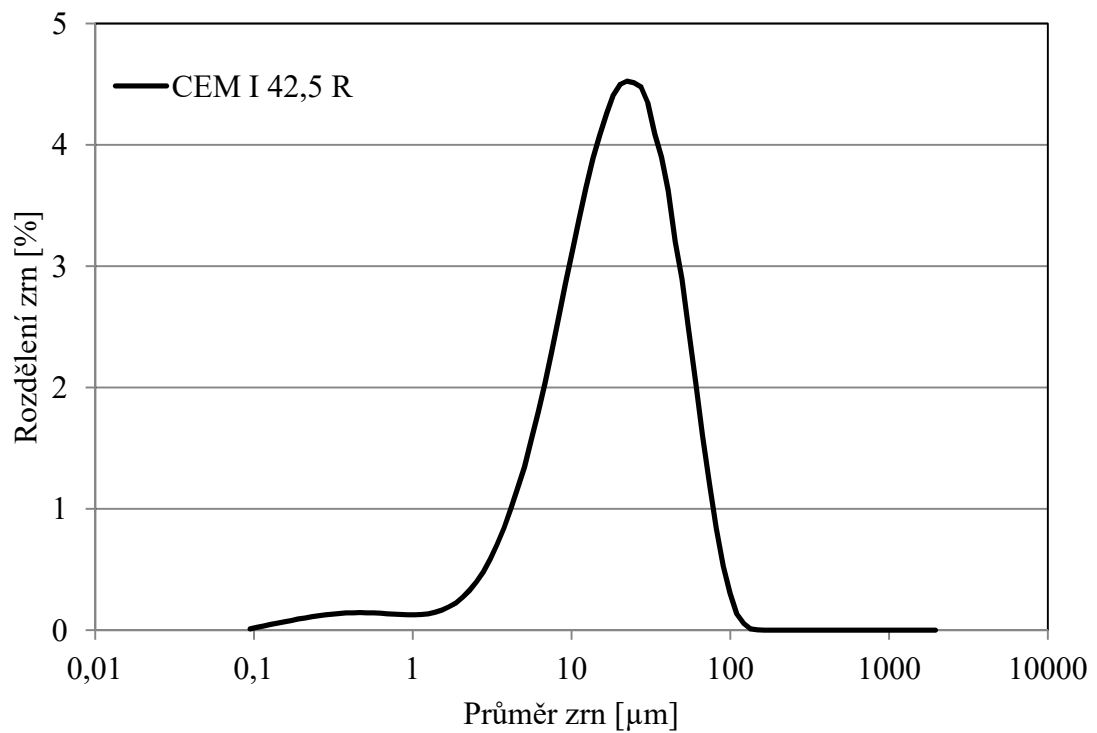
Zde je uvedena krátká specifikace použitých surovin.

5.2.1 Charakterizace cementu

Pro výrobu betonů byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R (ČMC a.s. závod Mokrý - Horákov). Složení cementu je v tabulce 4 a granulometrie je zobrazena na obrázku 26.

Tabulka 4: Chemické složení použitého cementu

Složka	Množství [%]
SiO ₂	18,7
Al ₂ O ₃	4,2
Fe ₂ O ₃	3,4
CaO	65,9
MgO	1,3
K ₂ O	0,8
Na ₂ O	0,2
TiO ₂	0,3
SO ₃	4,3
PbO	0,05
Cl	0,06



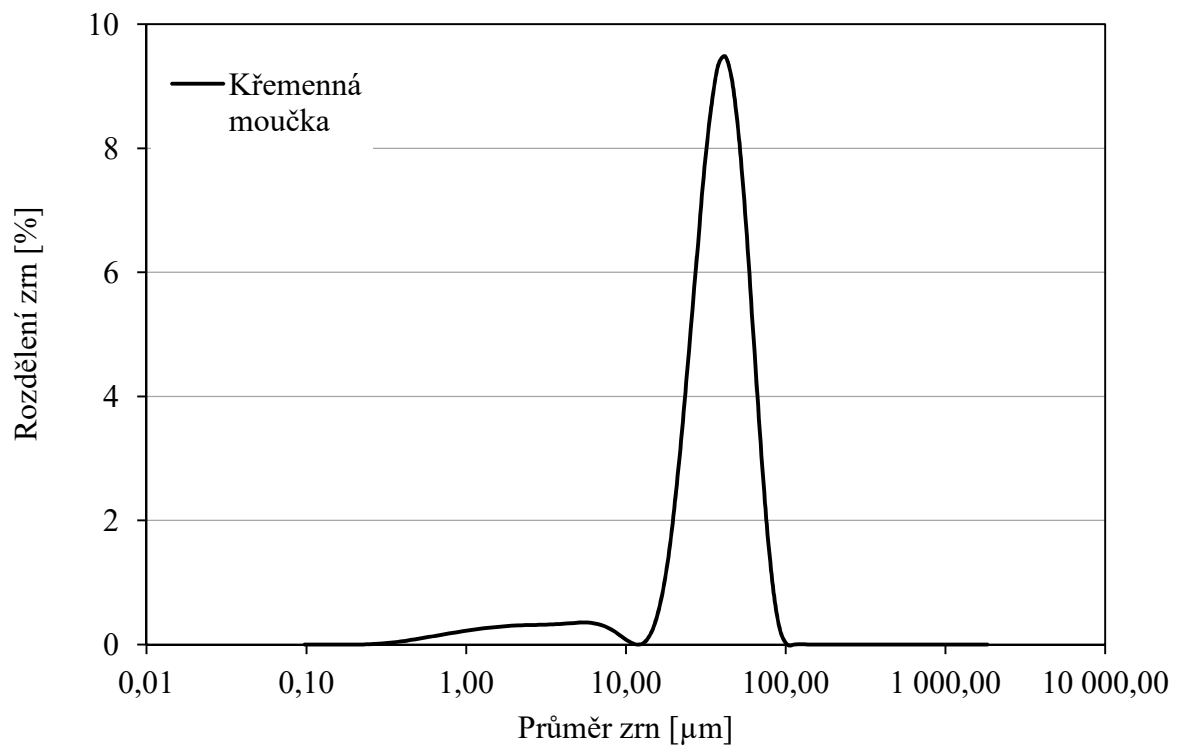
Obrázek 26: Granulometrie použitého cementu

5.2.2 Charakterizace křemenné moučky

Do většiny betonů byla použita křemenná moučka, jejíž složení je v tabulce 5 a granulometrie vyobrazena na grafu (Obrázek 27).

Tabulka 5: Chemické složení křemenné moučky

Složka	Množství [%]
SiO ₂	99,7
Al ₂ O ₃	0,2



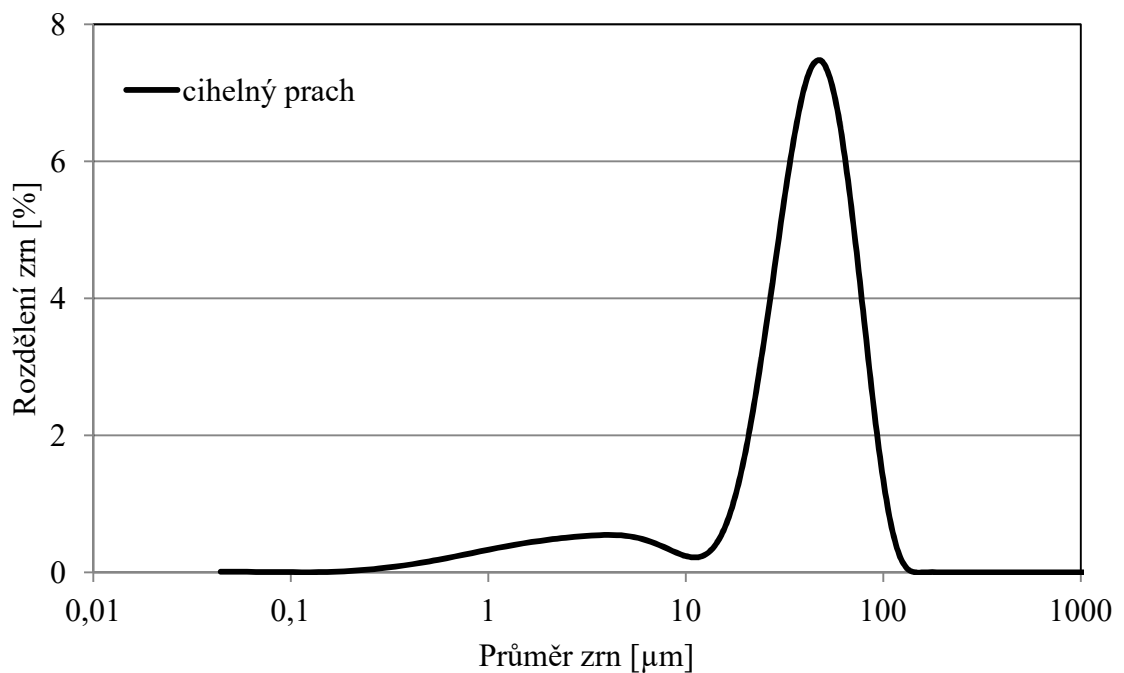
Obrázek 27: Granulometrie křemenné moučky

5.2.3 Charakterizace cihelného prachu

Pro výrobu některých betonů byl použit cihelný prach (Heluz s.r.o., pobočka Hevlín), který je odpadním materiálem z broušení cihel. Mineralogie cihelného prachu je v tabulce 6 a jeho granulometrie na obrázku 28.

Tabulka 6: Mineralogické složení cihelného prachu

Složka	Množství [%]
Amorfní fáze	46,7
Kvarcit	23,6
Albit	6,5
Mikroklin	7,2
Ortoklas	2,8
Muskovit	2,6
Biotit	0,9
Hematit	1,4
Akermanit	4,4
Hedenbergit	3,8



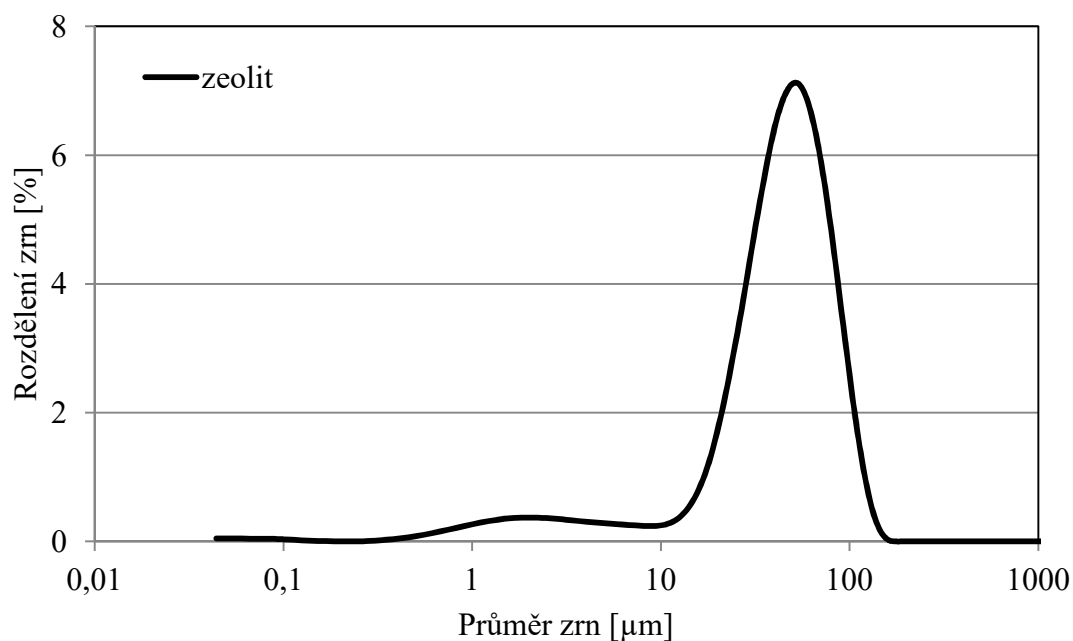
Obrázek 28: Granulometrie použitého cihelného prachu

5.2.4 Charakterizace zeolitu

Pro výrobu byl použit přírodní zeolit ZEOBAU z lokality Nižný Hrabovec. Složení zeolitu je v tabulce 7, granulometrie na obrázku 29.

Tabulka 7: Složení používaného zeolitu

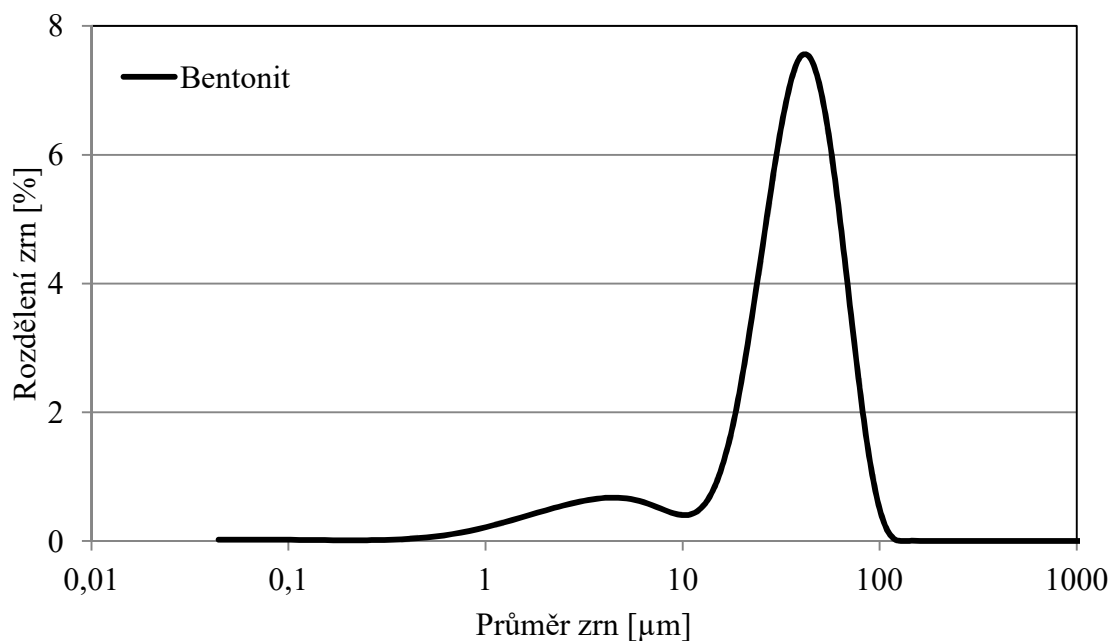
Složka	Množství [%]
SiO ₂	74,5
Al ₂ O ₃	15,4
Fe ₂ O ₃	1,6
CaO	3,3
MgO	0,7
K ₂ O	3,5
Na ₂ O	0,6
TiO ₂	0,2



Obrázek 29: Granulometrie použitého zeolitu

5.2.5 Charakterizace bentonitu

Pro výrobu betonů byl použit sodný bentonit (Keramost a.s., Most). Hlavní složkou tohoto bentonitu je montmorillonit (65 - 80 %), jako další složka s nejvyšším zastoupením (do 7 %) je Na₂CO₃. Granulometrie bentonitu je na obrázku 30.



Obrázek 30: Granulometrie použitého bentonitu

5.3 Beton s cihelným prachem

5.3.1 Experimentální výsledky

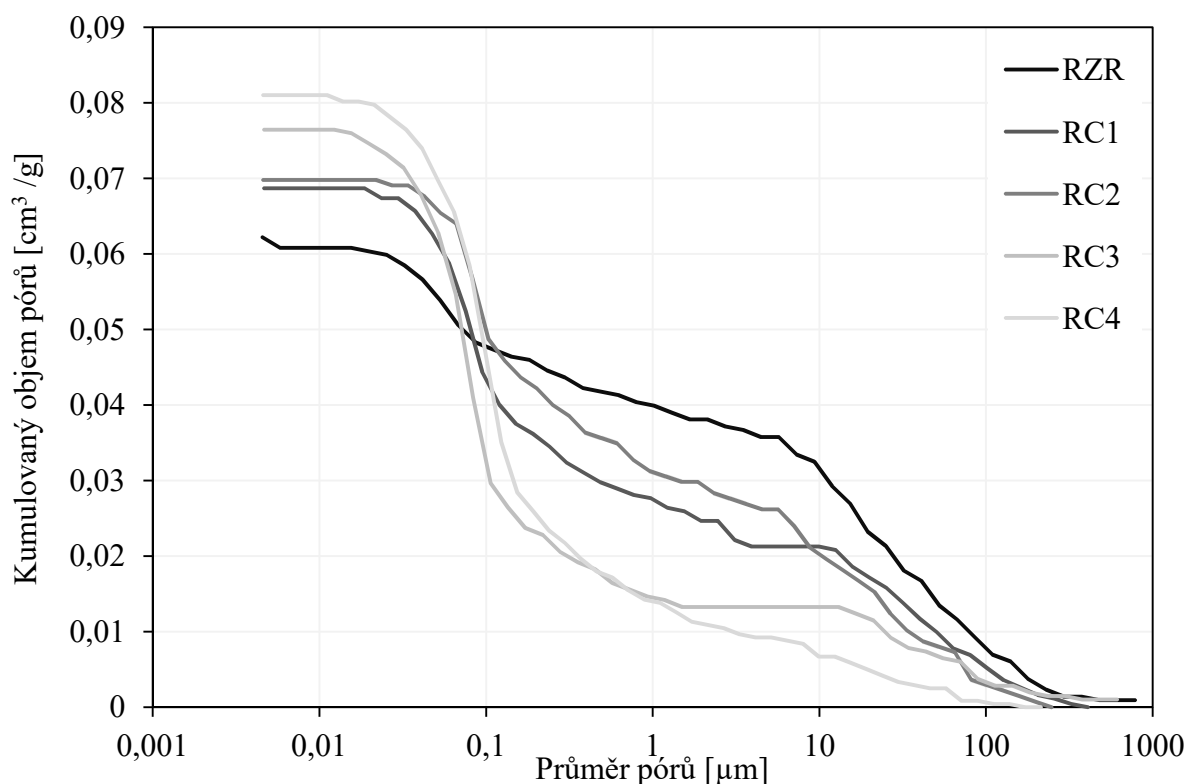
5.3.1.1 Základní materiálové charakteristiky

Základní materiálové charakteristiky, jako je objemová hmotnost, hustota matrice a otevřená pórovitost byly studovány dvěma různými metodami. V tabulce 8 je vidět, že s vyšším množstvím cihelného prachu klesá objemová hmotnost (až o 5 %), zároveň se v souladu s tím zvyšuje pórovitost téměř o 37 % v případě pyknometrické metody. V případě použití vakuové saturace je toto navýšení skoro 12 %. Hustota matrice je ve všech případech velice podobná a rozdíly mezi jednotlivými metodami i materiály se pohybují do 5 %.

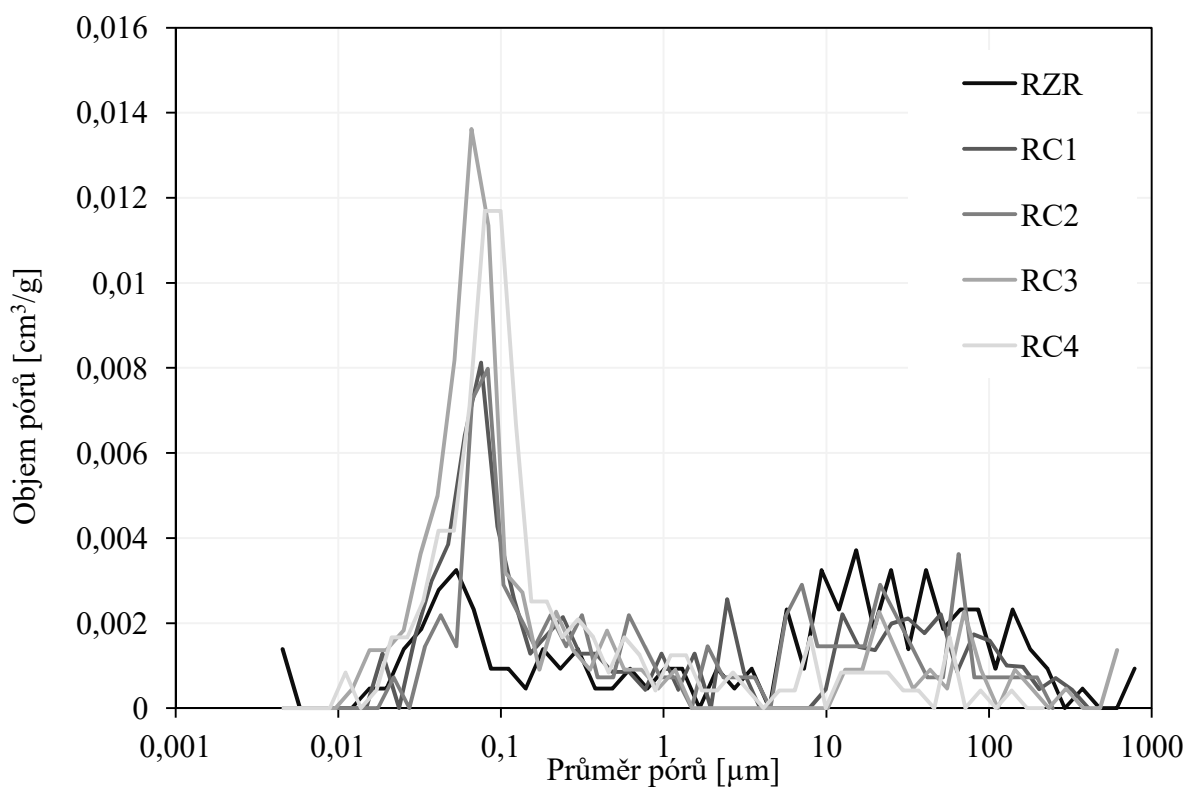
Tabulka 8: Základní materiálové charakteristiky RCR - RC4

	Pyknometrie			Vakuová saturace		
	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Hustota matrice [kg/m ³]	Otevřená pórovitost [%]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Hustota matrice [kg/m ³]	Otevřená pórovitost [%]
RCR	2 319	2 579	10,1	2 361	2 638	10,5
RC1	2 288	2 587	11,6	2 327	2 612	10,9
RC2	2 269	2 587	12,3	2 310	2 596	11,0
RC3	2 240	2 586	13,4	2 302	2 595	11,3
RC4	2 200	2 553	13,8	2 289	2 593	11,7

Charakteristika pórového systému je zobrazena pomocí kumulativní a distribuční křivky pórů (Obrázek 31 a Obrázek 32). Na všech křivkách je patrné, že největší objemové zastoupení u všech betonů s cihelným prachem mají póry o průměru kolem 0,1 μm , u referenčního materiálu je vidět rovnoměrnější rozložení pórů. Na obrázku 31 je také vidět zvyšující se objem pórů s rostoucím množstvím cihelného prachu v betonu, to je v souladu s rostoucí pórovitostí betonů.



Obrázek 31: Kumulativní křivka pórů pro materiály RC1-RC4



Obrázek 32: Distribuční křivka pórů pro materiály RC1-RC4

5.3.1.2 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti byly studovány u vyzrálých betonů po 28 dnech. Výsledné pevnosti jak tahové, tak tlakové jsou uvedeny v tabulce 9. Z tabulky je vidět, že betony s vyšším obsahem cihelného prachu vykazují nižší hodnoty jak u pevností tlakových, tak i tahových. U betonů s nejvyšším obsahem cihelného prachu, je v porovnání s referenčním betonem pokles pevnosti v tahu kolem 12 % a v tlaku až 20 %.

Tabulka 9: Pevnost v tahu a v tlaku u betonů RC1-RC4

	Tlaková pevnost	Tahová pevnost
	[MPa]	[MPa]
RCR	165,7	8,9
RC1	160,5	8,5
RC2	142,0	8,3
RC3	135,5	8,1
RC4	131,8	7,9

5.3.1.3 Tepelné vlastnosti

Tepelné vlastnosti byly naměřeny pomocí přístroje Isomet. Hodnoty byly měřeny na vysušeném materiálu a při jeho plném nasycení. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 10. U všech materiálů je jasně viditelný klesající trend součinitele tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity s narůstajícím obsahem cihelného prachu. Součinitel tepelné vodivosti mezi RCR a RC4 v suchém stavu poklesne až o 35 % a při plném nasycení je rozdíl okolo 20 %. Snížení měrné tepelné kapacity u těchto materiálů je v suchém stavu okolo 17 % a v nasyceném do 12 %. Rozdíl součinitele tepelné vodivosti u betonu RCR mezi vysušeným a nasyceným stavem je přibližně 10%, měrná tepelná kapacita se pro RCR mezi jednotlivými stavy liší téměř o 12 %. U betonu RC4 je rozdíl mezi vysušeným a nasyceným stavem u součinitele tepelné vodivosti až 35 % a měrná tepelná kapacita se mezi jednotlivými stavy liší skoro o 20 %.

Tabulka 10: Tepelné vlastnosti betonů RC1-RC4

	Stupeň nasycení	Vlhkost	Součinitel tepelné vodivosti	Měrná tepelná kapacita	Součinitel teplotní vodivosti
		[kg ³ /kg ³]	[W/m.K]	[J/kg.K]	[10 ⁻⁶ m ² /s]
RCR	0	0,000	2,755	938	1,267
	max	0,014	3,023	1052	1,239
RC1	0	0,000	2,065	789	1,082
	max	0,048	2,639	949	1,182
RC2	0	0,000	2,033	789	1,135
	max	0,043	2,618	931	1,203
RC3	0	0,000	1,996	783	1,160
	max	0,048	2,591	924	1,267
RC4	0	0,000	1,789	779	1,038
	max	0,040	2,408	926	1,145

5.3.1.4 Transport vlhkosti

Transport vodní páry

Z tabulky 11 je zřejmé, že faktor difúzního odporu s rostoucím obsahem příměsi u obou použitých metod klesá, což koresponduje s rostoucím trendem pórovitosti (Tabulka 8). U betonové směsi s nejvyšším obsahem cihelného prachu (RC4) je pokles faktoru difúzního odporu nižší oproti referenčnímu betonu, až o 17 %. Rozdíl hodnot faktoru difúzního odporu studovaných betonů naměřených pomocí metod dry cup a wet cup se liší přibližně o 30 %.

Tabulka 11: Difúze vodní páry pro betony RC1-RC4

	DRY CUP			WET CUP		
	δ [s]	D [m ² /s]	μ [-]	δ [s]	D [m ² /s]	μ [-]
RCR	1,89E-12	2,59E-07	118,65	2,58E-12	3,54E-07	82,24
RC1	1,50E-12	2,06E-07	112,78	2,11E-12	2,89E-07	79,49
RC2	1,60E-12	2,20E-07	105,43	2,31E-12	3,18E-07	74,89
RC3	1,70E-12	2,34E-07	98,46	2,33E-12	3,20E-07	71,87
RC4	1,70E-12	2,34E-07	98,62	2,36E-12	3,25E-07	71,12

Transport kapaln  vlhkosti

Hodnoty absorpčního koeficientu vykazují rostoucí trend se zvyšujícím se množstvím cihelného prachu, jak je vidět v tabulce 12. Absorpční koeficient RCR je téměř o 45 % nižší než u RC4.

Tabulka 12: Absorpční koeficient a součinitel vlhkostní vodivosti pro betony RC1-RC4

	Absorpční koeficient [kg/m ² s ^{1/2}]	Součinitel vlhkostní vodivosti [m ² /s]
RCR	0,0095	5,93E-09
RC1	0,0101	1,20E-08
RC2	0,0158	1,33E-08
RC3	0,0176	1,39E-08
RC4	0,0169	1,62E-08

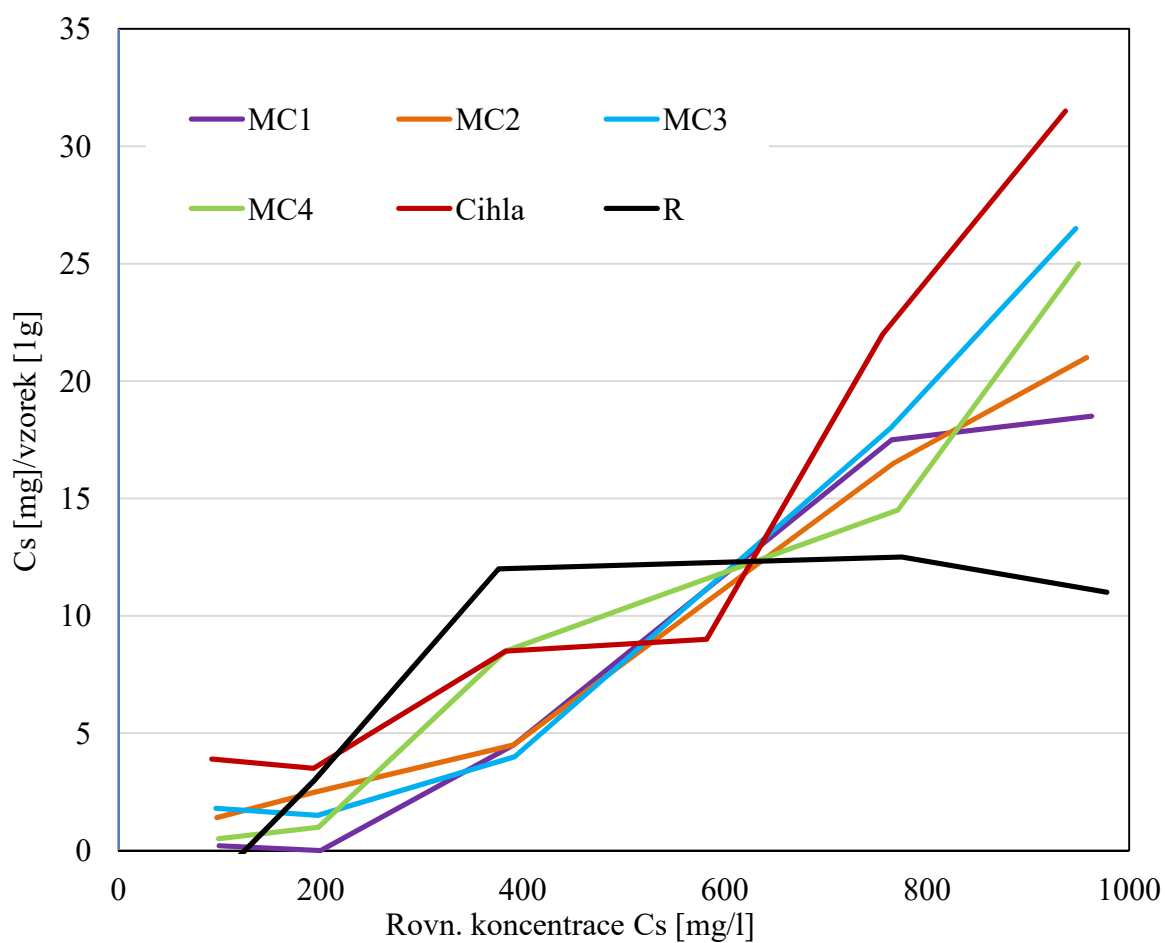
5.3.1.5 Sorpční parametry

Hodnoty distribučního koeficientu (cesium) pro referenční pastu (R), cihelný prach (C) a jednotlivé pasty, jsou uvedeny v tabulce 13. Vzhledem k časové a finanční náročnosti, byla měření provedena pouze jednou. Z tohoto důvodu je velmi omezený soubor a tyto hodnoty lze brát pouze jako orientační. Slouží jen k předběžnému zhodnocení, má-li další studium tohoto materiálu pro tyto účely smysl.

Tabulka 13: Distribuční koeficient (cesium) pro pasty s cihelným prachem

Hodnoty Kd pro jednotlivé koncentrace [mg/l]	R	C	MC1	MC2	MC3	MC4
100	0	42,30	2,0	14,4	18,7	5,1
200	15,46	18,13	0,0	12,8	7,6	5,1
400	31,91	22,19	11,5	11,5	10,2	22,2
800	16,13	29,10	22,9	57,9	23,6	18,8
1000	11,25	16,00	19,2	21,9	28,0	26,3

Na obrázku 33 jsou vyobrazeny sorpční izotermy, na kterých je vidět, že s rostoucí koncentrací cesia v roztoku se zvyšuje i jeho sorbované množství. Izotermy jednotlivých past, jak je na obrázku vidět, tak ne všechny izotermy leží mezi referenční cementovou pastou a cihelného prachu.



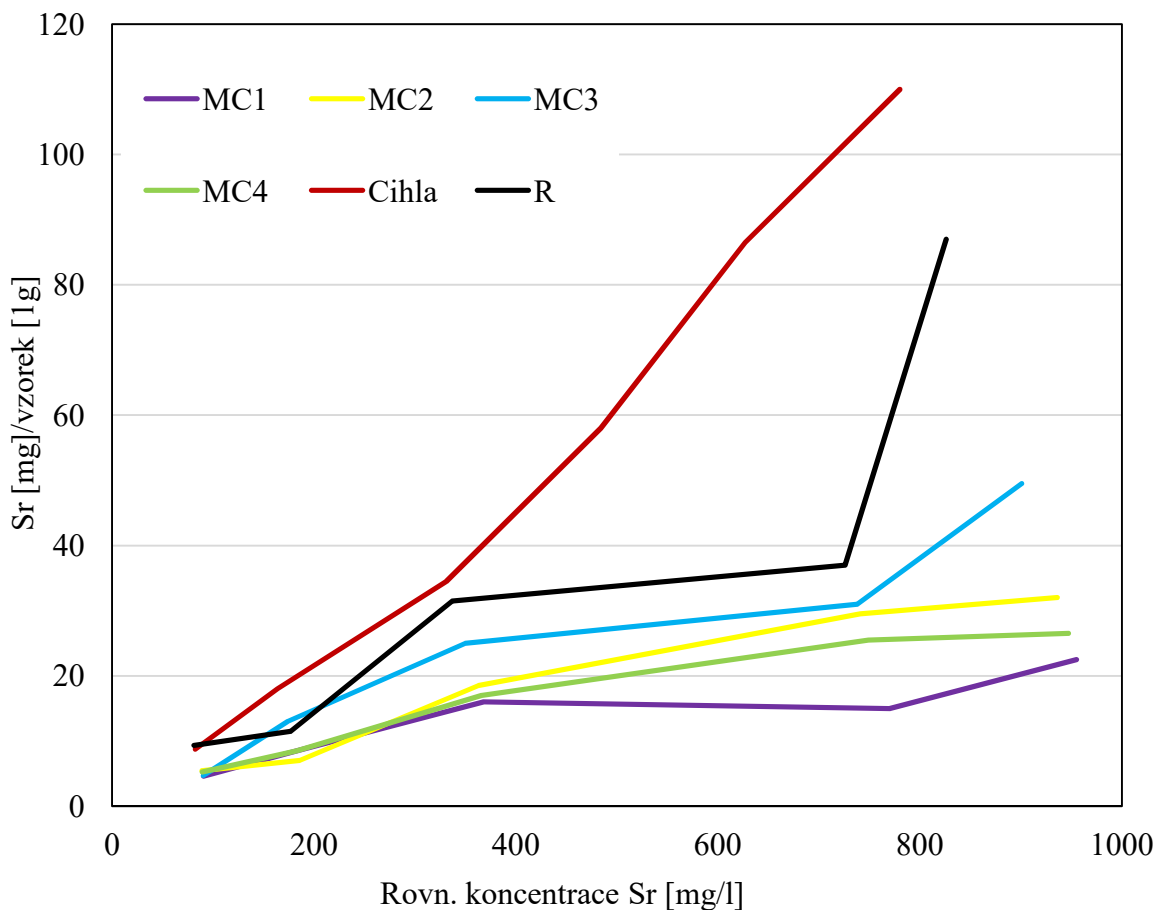
Obrázek 33: Sorpční izoterma pro cesium na pastách s cihelným prachem

Hodnoty distribučního koeficientu (stroncium) pro referenční pastu (R), cihelný prach (C) a jednotlivé pasty jsou uvedeny v tabulce 14.

Tabulka 14: Distribuční koeficient (stroncium) pro pasty s cihelným prachem

Hodnoty Kd pro jednotlivé koncentrace [mg/l]	R	C	MC1	MC2	MC3	MC4
100	115,0	106,1	50,7	61,2	51,9	58,7
200	65,0	109,8	46,4	37,6	74,7	46,4
400	93,5	104,2	43,5	51,0	71,4	46,4
800	51,0	326,4	19,5	39,8	42,0	34,0
1000	105,3	297,4	23,6	34,2	54,9	28,0

Z výsledků je patrné, že pro sorpci stroncia při nižších koncentracích má referenční pasta a cihelný prach podobné hodnoty. Pro vyšší koncentrace vykazuje cihelný prach lepší sorpční schopnosti. Skoro všechny pasty dopadly hůře než oba referenční vzorky (R a C), což naznačuje, že pro sorpci stroncia je beton s cihelným prachem nevhodný. Sorpční izotermy jsou vyneseny na obrázku 34. Je jasně viditelné, že pasty mají horší sorpční vlastnosti než referenční pasta a cihelný prach.



Obrázek 34: Sorpční izoterma pro stroncium na pastách s cihelným prachem

5.4 Beton se zeolitem

5.4.1 Experimentální výsledky

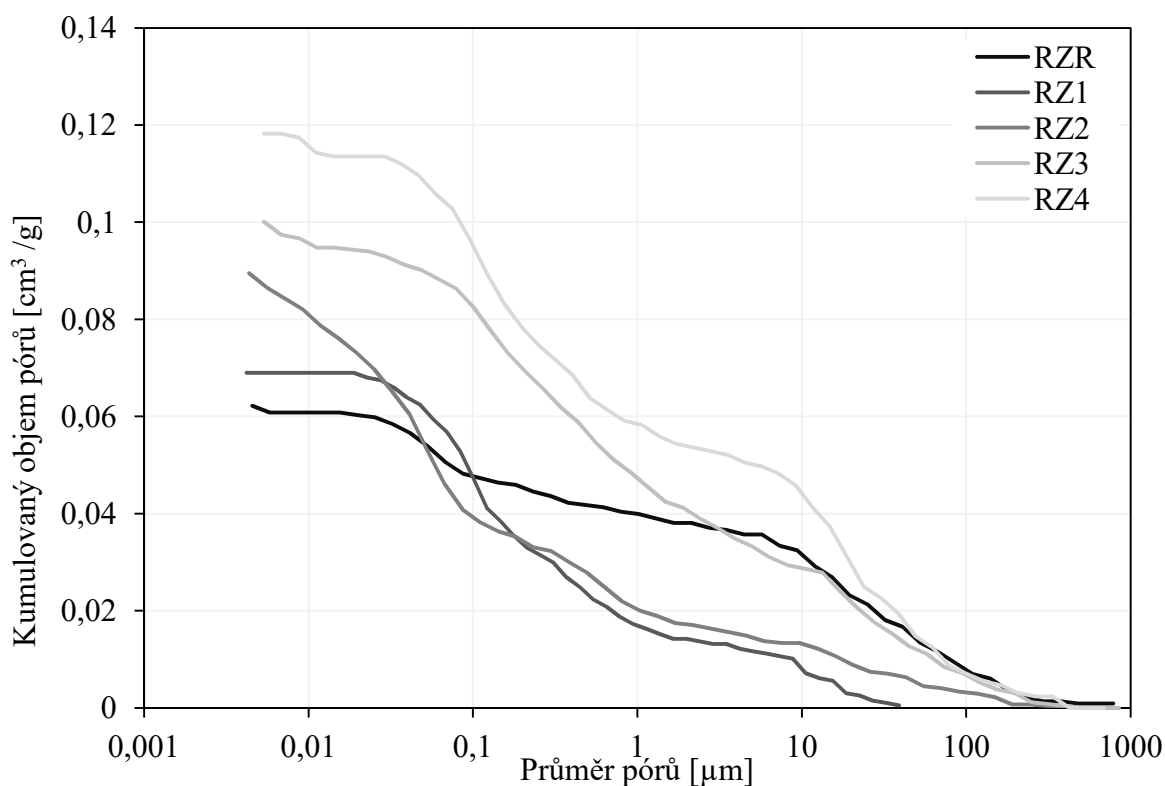
5.4.1.1 Základní materiálové charakteristiky

Základní materiálové charakteristiky, jako je objemová hmotnost, hustota matrice a otevřená pórovitost byly studovány dvěma různými metodami. V tabulce 15 je vidět, že s vyšším obsahem zeolitu klesá objemová hmotnost (až o 14 %), zároveň se v souladu s tím zvyšuje pórovitost téměř o 80 % v případě pyknometrické metody. V případě použití vakuové saturace je navýšení pórovitosti téměř 91 % a objemová hmotnost se sníží o 12 %. Hustota matrice je ve všech případech velice podobná a rozdíly mezi jednotlivými metodami i materiály se pohybují v rozmezí do 5 %.

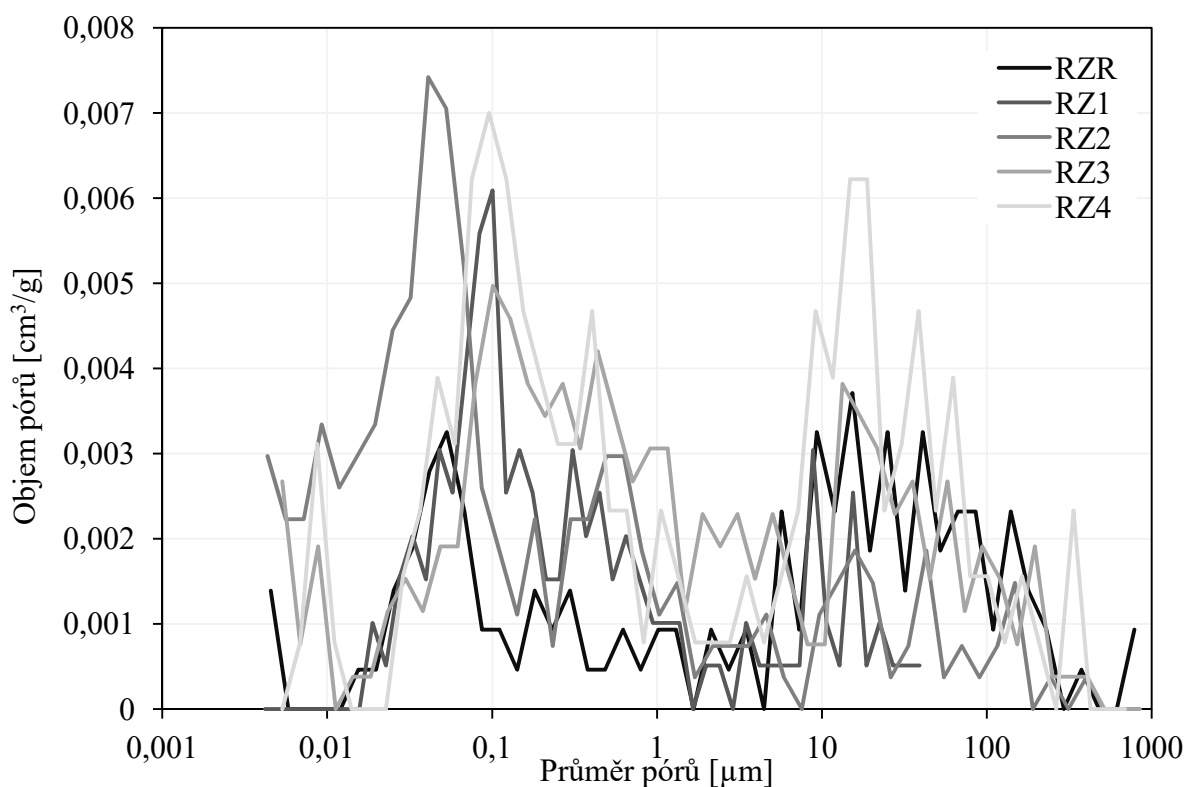
Tabulka 15: Základní materiálové charakteristiky materiálů RZR-RZ4

	Pyknometrie			Vakuová saturace		
	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Hustota matrice [kg/m ³]	Otevřená pórovitost [%]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Hustota matrice [kg/m ³]	Otevřená pórovitost [%]
RZR	2 319	2 579	10,1	2 361	2 638	10,5
RZ1	2 111	2 514	16,0	2 166	2 595	16,5
RZ2	2 097	2 505	16,3	2 157	2 594	16,8
RZ3	2 046	2 456	16,7	2 152	2 595	17,1
RZ4	2 002	2 448	18,2	2 082	2 606	20,1

Charakteristika pórového systému je zobrazena pomocí kumulativní a distribuční křivky pórů (Obrázek 35 a Obrázek 36). Na všech křivkách je patrné, že největší objemové zastoupení u všech betonů se zeolitem mají póry o průměru kolem 0,1 μm a póry v rozmezí 10-100 μm . Na obrázku 35 je vidět zvyšující se objem pórů s rostoucím množstvím zeolitu v betonu, to je v souladu s rostoucí pórovitostí betonů.



Obrázek 35: Kumulativní křivka pórů pro betony RZ1-RZ4



Obrázek 36: Distribuční křivka pórů pro betony RZ1-RZ4

5.4.1.2 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti byly studovány u vyzrálých betonů po 28 dnech. Výsledné pevnosti jak tahové, tak tlakové jsou uvedeny v tabulce 16. Z tabulky je vidět, že betony s vyšším obsahem zeolitu vykazují nižší hodnoty u pevností tlakových i tahových. U betonu s nejvyšším obsahem zeolitu, je v porovnání s referenčním betonem pokles pevnosti v tahu téměř 53 % a v tlaku až 50 %.

Tabulka 16: Pevnost v tahu a v tlaku u betonů se zeolity

	Tlaková pevnost	Tahová pevnost
	[MPa]	[MPa]
RZR	165,7	8,9
RZ1	107,7	7,1
RZ2	101,7	6,0
RZ3	87,5	4,3
RZ4	85,8	4,2

5.4.1.3 Tepelné vlastnosti

Tepelné vlastnosti byly naměřeny pomocí přístroje Isomet. Hodnoty byly měřeny na vysušeném betonu a při jeho plném nasycení. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 17. U všech betonů je jasně viditelný klesající trend součinitele tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity s narůstajícím obsahem zeolitu. Kdy součinitel tepelné vodivosti mezi RZR a RZ4 v suchém stavu poklesne až o 40 % a v plně nasyceném stavu je rozdíl okolo 33 %. Snížení měrné tepelné kapacity u těchto betonů je v suchém stavu okolo 35 % a v nasyceném do 20 %. Rozdíl součinitele tepelné vodivosti u betonu RZR mezi vysušeným a nasyceným stavem je přibližně 10%, měrná tepelná kapacita se pro RZR mezi jednotlivými stavy liší téměř o 12 %. U betonu RZ4 je rozdíl mezi vysušeným a nasyceným stavem u součinitele tepelné vodivosti až 40 % a měrná tepelná kapacita se mezi jednotlivými stavy liší skoro o 27 %.

Tabulka 17: Tepelné vlastnosti betonů RZ1-RZ4

	Stupeň nasycení	Vlhkost	Součinitel tepelné vodivosti	Měrná tepelná kapacita	součinitel teplotní vodivosti
		[kg ³ /kg ³]	[W/mK]	[J/kgK]	[10 ⁻⁶ m ² /s]
RZR	0	0,000	2,755	938	1,267
	max	0,014	3,023	1052	1,239
RZ1	0	0,000	1,940	828	1,109
	max	0,038	2,324	946	1,163
RZ2	0	0,000	1,938	773	1,196
	max	0,040	2,291	931	1,173
RZ3	0	0,000	1,925	784	1,000
	max	0,025	2,325	928	1,022
RZ4	0	0,000	1,655	615	1,100
	max	0,040	2,031	842	0,998

5.4.1.4 Transport vlhkosti

Transport vodní páry

Z tabulky 18 je zřejmé, že faktor difúzního odporu s rostoucím obsahem příměsí u obou použitých metod klesá, což koresponduje s rostoucím trendem pórovitosti (Tabulka 15). U betonové směsi s nejvyšším obsahem zeolitu (RZ4) je pokles faktoru difúzního odporu nižší oproti referenčnímu betonu, až o 53 %.

Tabulka 18: Difúze vodní páry pro betony RZ1-RZ4

	DRY CUP			WET CUP		
	δ[s]	D[m ² /s]	μ[-]	δ[s]	D[m ² /s]	μ[-]
RZR	1,89E-12	2,59E-07	118,65	2,58E-12	3,54E-07	82,24
RZ1	1,78E-12	2,44E-07	94,14	5,10E-12	7,00E-07	33,45
RZ2	4,95E-12	6,81E-07	77,77	7,83E-12	1,08E-06	22,87
RZ3	2,49E-12	3,42E-07	71,06	1,40E-11	1,85E-06	12,46
RZ4	2,99E-12	4,10E-07	56,08	1,57E-11	2,16E-06	10,68

Transport kapalné vlhkosti

Hodnoty absorpčního koeficientu vykazují rostoucí trend se zvyšujícím se množstvím zeolitu, jak je vidět v tabulce 19. Součinitel vlhkostní vodivosti má také rostoucí trend. Absorpční koeficient RZR je téměř o 65 % nižší než u RZ4.

Tabulka 19: Absorpční koeficient a součinitel vlhkostní vodivosti pro betony se zeolity

	Absorpční koeficient [kg/m ² s ^{1/2}]	Součinitel vlhkostní vodivosti [m ² /s]
RZR	0,0095	5,93E-09
RZ1	0,0162	1,02E-08
RZ2	0,0198	1,33E-08
RZ3	0,0218	1,72E-08
RZ4	0,0259	1,81E-08

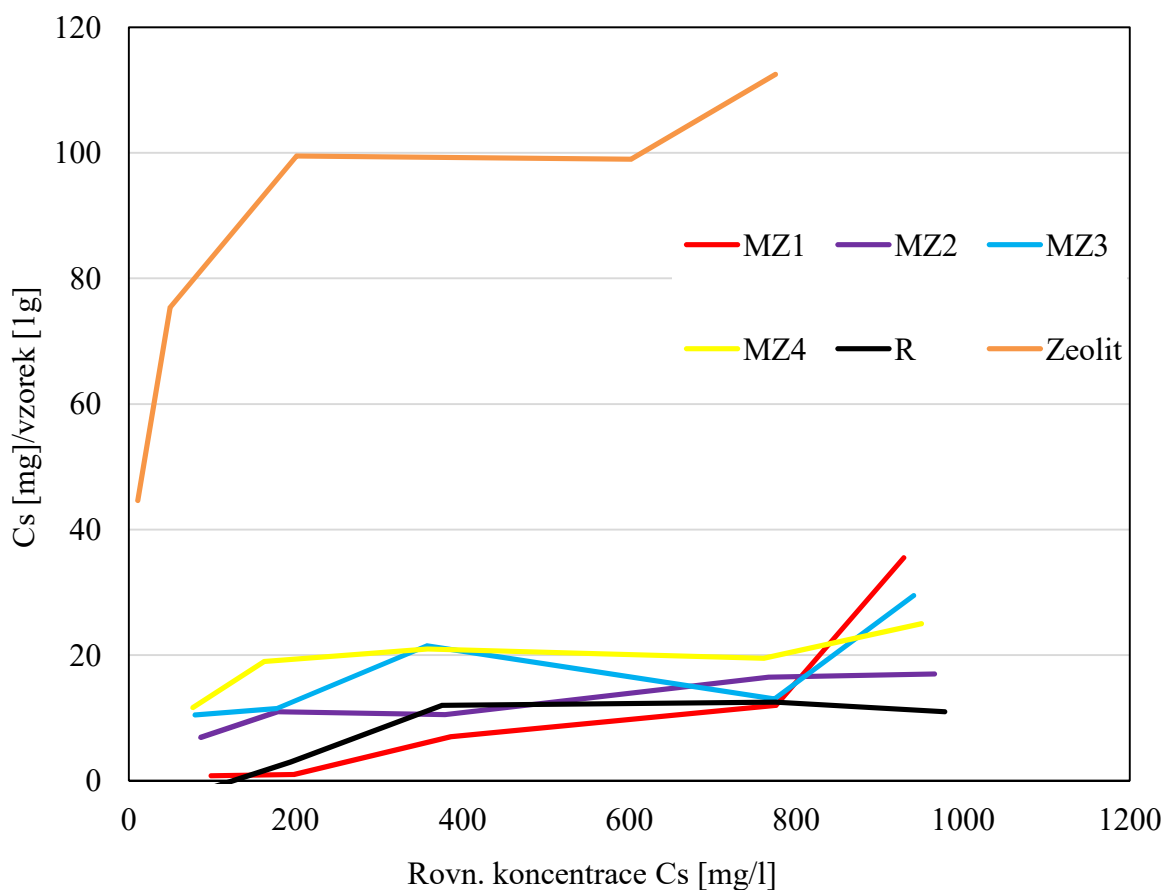
5.4.1.5 Sorpční parametry

Hodnoty distribučního koeficientu (cesium) pro referenční pastu (R), Zeolit (Z) a jednotlivé malty jsou uvedeny v tabulce 20.

Tabulka 20: Distribuční koeficient (cesium) pro pasty se zeolitem

Hodnoty Kd pro jednotlivé koncentrace [mg/l]	R	MZ1	MZ2	MZ3	MZ4	Z
100	0	8,1	70,1	132,1	151,9	4172,9
200	15,5	5,1	55,6	65,0	117,3	1532,5
400	31,9	18,1	27,2	60,2	58,7	495,0
800	16,1	15,5	21,5	16,8	25,6	164,5
1000	11,2	38,2	17,6	31,3	26,3	145,2

Na obrázku 37 jsou vyobrazeny sorpční izotermie, na kterých je vidět, že s rostoucí koncentrací cesia v roztoku se zvyšuje i jeho sorbované množství. Izotermie jednotlivých past. Z výsledků je patrné, že izotermie všech past leží blízko referenční pasty, zatímco samotný zeolit dosahuje mnohem lepších výsledků.



Obrázek 37: Sorpční izoterma pro cesium na pastách se zeolity

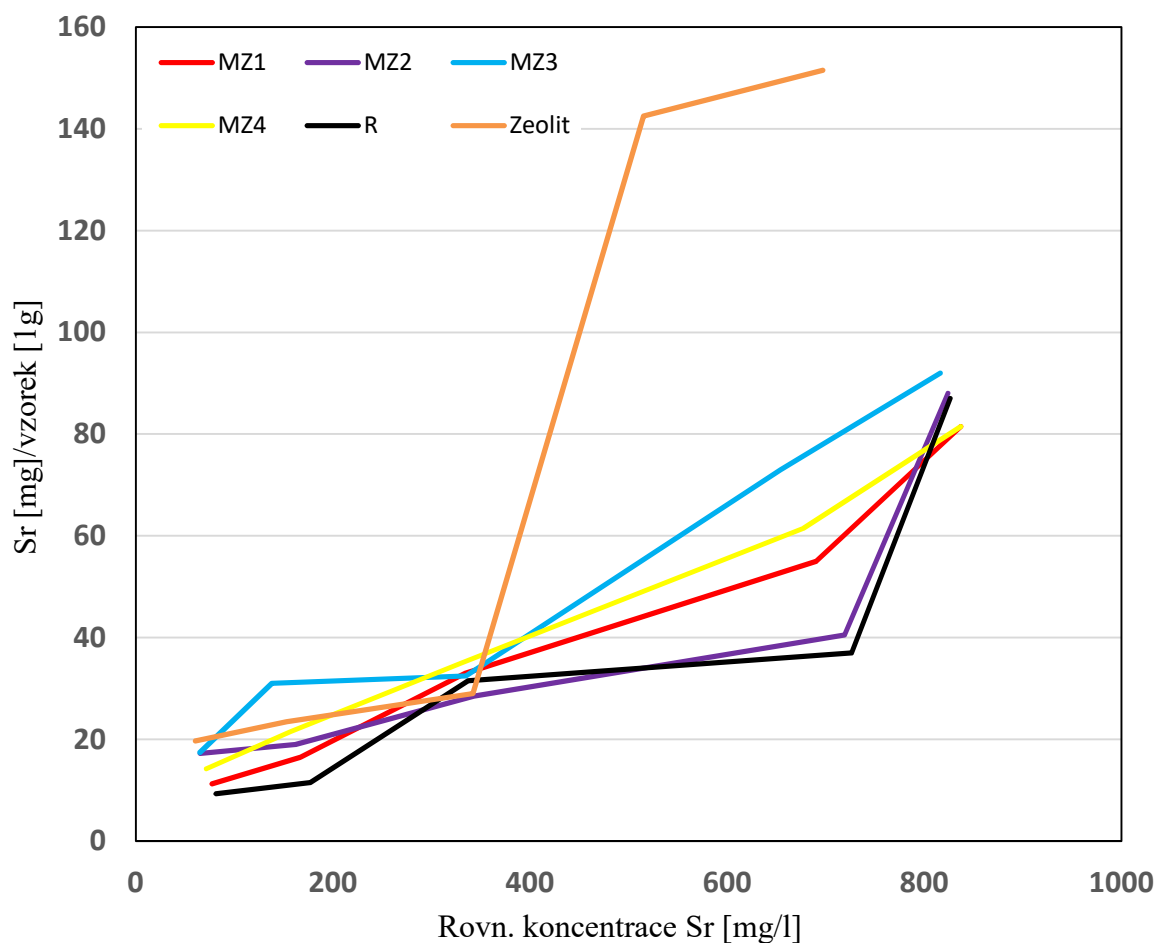
Hodnoty distribučního koeficientu (stroncium) pro referenční pastu (R), Zeolit (Z) a jednotlivé pasty jsou uvedeny v tabulce 21.

Tabulka 21: Distribuční koeficient (stroncium) pro pasty se zeolitem

Hodnoty Kd pro jednotlivé koncentrace [mg/l]	R	MZ1	MZ2	MZ3	MZ4	Z
100	115,01	145,16	198,32	263,36	268,05	326,45
200	70,00	98,80	136,94	117,28	224,64	153,59
400	93,47	98,80	106,06	83,09	97,01	84,80
800	50,96	79,71	90,84	56,33	111,62	73,89
1000	105,33	97,37	97,37	106,80	112,75	154,45

Z tabulky je patrné, že distribuční koeficient se u past se zeolitem zvyšuje s narůstajícím obsahem zeolitu. Především při nízkých koncentracích dosahuje zhruba 2x větších hodnot

než u referenčního betonu. Sorpční izotermy jsou vyobrazeny na obrázku 38, je zde vidět, že sorpční vlastnosti se zlepšují především u vyšších koncentrací stroncia.



Obrázek 38: Sorpční izoterma pro stroncium na pastách se zeolity

5.5 Beton s bentonitem

5.5.1 Experimentální výsledky

5.5.1.1 Základní materiálové charakteristiky

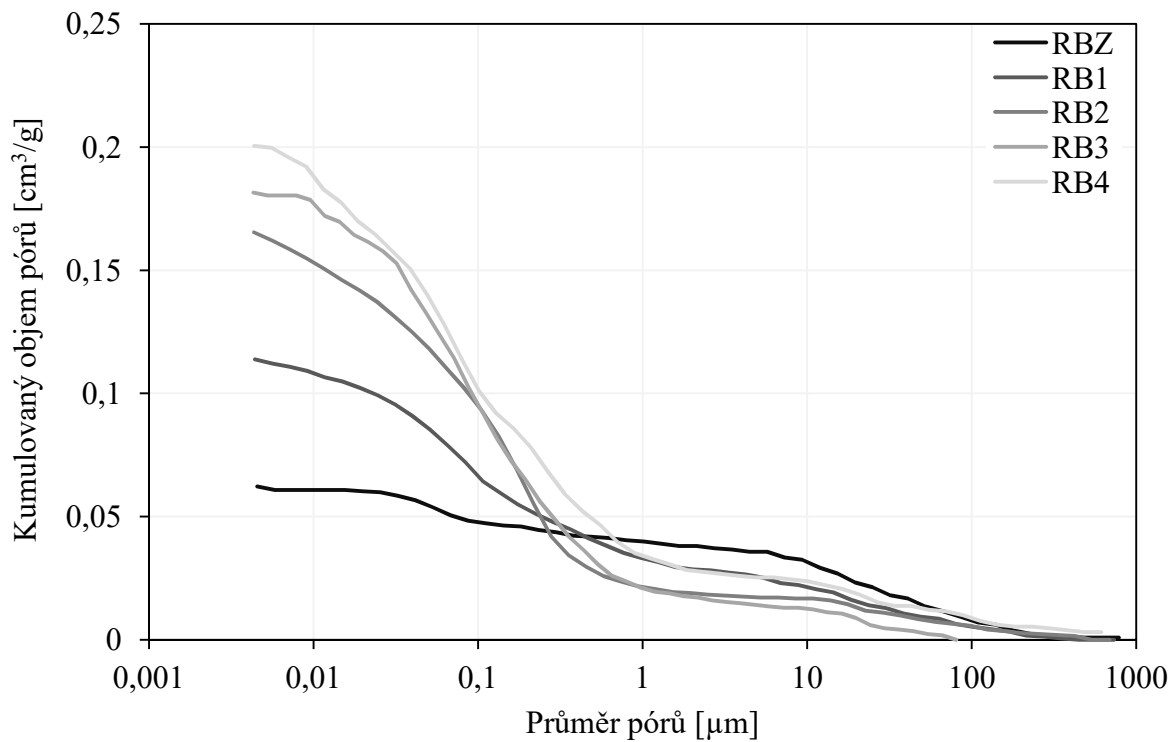
Základní materiálové charakteristiky jako je objemová hmotnost, hustota matrice a otevřená pórovitost byly studovány různými metodami. V tabulce 22 je vidět, že s vyšším množstvím bentonitu klesá objemová hmotnost (až o 24 %), zároveň se v souladu s tím zvyšuje pórovitost téměř o 3 krát v případě pyknometrické metody. V případě použití vakuové saturace je navýšení pórovitosti téměř o trojnásobek

a objemová hmotnost se sníží přibližně o 31 %. Hustota matrice je ve všech případech velice podobná a rozdíly mezi jednotlivými metodami i materiály se pohybují do 5 %.

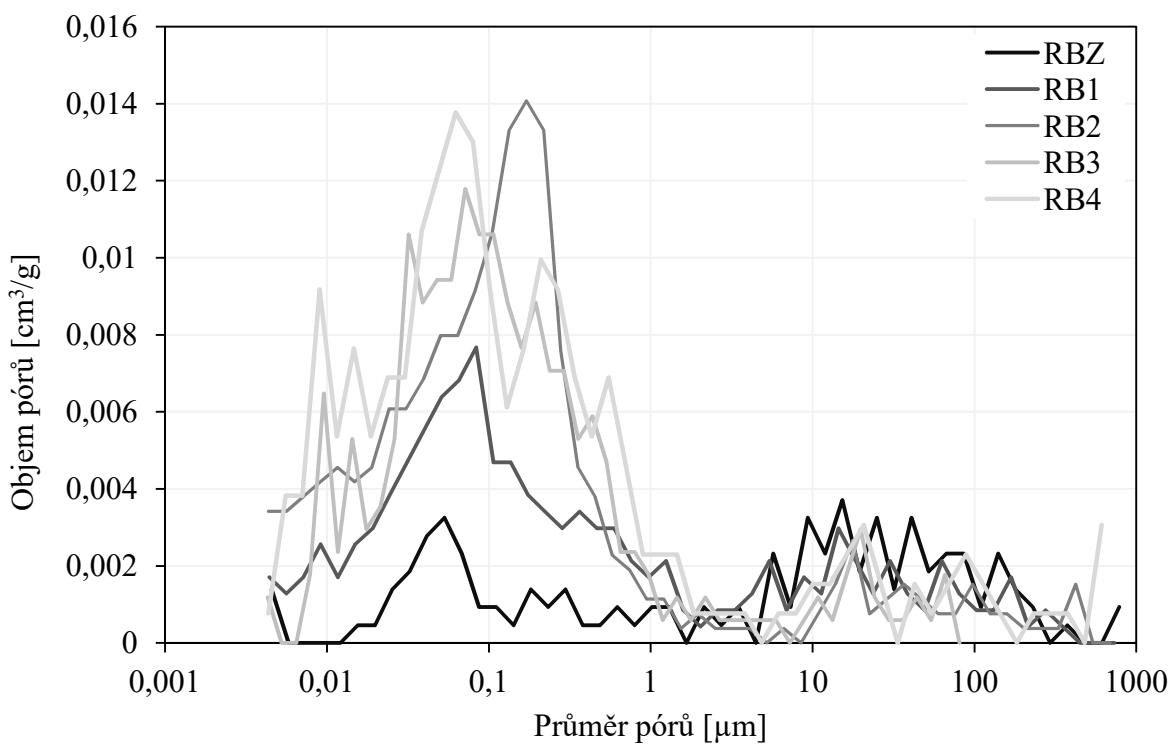
Tabulka 22: Základní materiálové charakteristiky materiálů RB1-RB4

	Pyknometrie			Vakuová saturace		
	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Hustota matrice [kg/m ³]	Otevřená pórovitost [%]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Hustota matrice [kg/m ³]	Otevřená pórovitost [%]
RBR	2 319	2 579	10,1	2 361	2 638	10,5
RB1	2 024	2 593	22,0	2 068	2 594	20,3
RB2	1 901	2 583	26,4	1 980	2 615	24,3
RB3	1 822	2 580	29,4	1 921	2 630	27,0
RB4	1 775	2 597	31,7	1 869	2 635	29,1

Charakteristika pórového systému je zobrazena pomocí kumulativní a distribuční křivky pórů (Obrázek 39 a Obrázek 40). Na všech křivkách je patrné, že největší objemové zastoupení u všech betonů s bentonitem mají póry o průměru kolem 0,1 μm, u referenčního betonu je vidět rovnoměrnější rozložení pórů. Na obrázku 39 je také vidět zvyšující se objem pórů s rostoucím množstvím bentonitu v betonu, to je v souladu s rostoucí pórovitostí betonů.



Obrázek 39: Kumulativní křivka pro betony RB1-RB4



Obrázek 40: Distribuční křivka pro betony RB1-RB4

5.5.1.2 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti byly studovány u vyzrálých betonů po 28 dnech. Výsledné pevnosti jak tahové, tak tlakové jsou uvedeny v tabulce 23. Z tabulky je vidět, že betony s vyšším obsahem bentonitu vykazují nižší hodnoty jak u pevností tlakových, tak u tahových. U vzorku s nejvyšším obsahem bentonitu, je v porovnání s referenčním betonem pokles pevnosti v tahu kolem 80 % a v tlaku až 85 %.

Tabulka 23: Pevnost v tahu a v tlaku u vzorků s bentonitem

	Tlaková pevnost	Tahová pevnost
	[MPa]	[MPa]
RBR	165,7	8,9
RB1	49,8	3,2
RB2	38,6	2,8
RB3	29,7	2,3
RB4	23,6	1,8

5.5.1.3 Tepelné vlastnosti

Tepelné vlastnosti byly naměřeny pomocí přístroje Isomet. Hodnoty byly měřeny na vysušeném materiálu a při jeho plném nasycení. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 24. U všech betonů je jasně viditelný klesající trend součinitele tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity s narůstajícím obsahem bentonitu. Kdy součinitel tepelné vodivosti mezi RBR a RB4 v suchém stavu poklesne až o 65 % a v plně nasyceném je rozdíl přibližně 40 %. Snížení měrné tepelné kapacity u těchto betonů je v suchém stavu zhruba 13 % a v nasyceném do 4 %. Rozdíl součinitele tepelné vodivosti u vzorku RBR mezi vysušeným a nasyceným stavem je přibližně 10%, měrná tepelná kapacita se pro RBR mezi jednotlivými stavy liší téměř o 12 %. U betonu RB4 je rozdíl mezi vysušeným a nasyceným stavem u součinitele tepelné vodivosti až 45 % a měrná tepelná kapacita se mezi jednotlivými stavy liší skoro o 20 %.

Tabulka 24: Tepelné vlastnosti betonů RB1-RB4

	Stupeň nasycení	Vlhkost	Součinitel tepelné vodivosti	Měrná tepelná kapacita	součinitel teplotní vodivosti
		[kg ³ /kg ³]	[W/mK]	[J/kgK]	[10 ⁻⁶ m ² /s]
RBR	0	0,000	2,755	938	1,267
	max	0,014	3,023	1052	1,239
RB1	0	0,000	1,791	889	0,951
	max	0,0622	2,427	1038	1,150
RB2	0	0,000	1,466	854	0,903
	max	0,085	1,938	1033	0,986
RB3	0	0,000	1,444	809	0,979
	max	0,041	2,056	1030	1,095
RB4	0	0,000	0,982	818	0,674
	max	0,111	1,791	1017	0,992

5.5.1.4 Transport vlhkosti

Transport vodní páry

Z tabulky 25 je zřejmé, že faktor difúzního odporu s rostoucím obsahem příměsí u obou použitých metod klesá, což koresponduje s rostoucím trendem pórovitosti (Tabulka 22). U betonové směsi s nejvyšším obsahem bentonitu (RB4) je pokles faktoru difúzního odporu nižší oproti referenčnímu betonu, až o 70 % u metody dry cup a téměř 94 % u metody wet cup.

Tabulka 25: Difúze vodní páry pro betony RB1-RB4

	DRY CUP			WET CUP		
	δ [s]	D [m ² /s]	μ [-]	δ [s]	D [m ² /s]	μ [-]
RBR	1,89E-12	2,59E-07	118,65	2,58E-12	3,54E-07	82,24
RB1	2,53E-12	3,47E-07	73,67	1,09E-11	1,49E-06	15,42
RB2	2,72E-12	3,73E-07	70,26	1,94E-11	2,67E-06	9,21
RB3	4,11E-12	5,65E-07	43,62	2,19E-11	3,01E-06	7,69
RB4	5,12E-12	7,04E-07	33,21	3,34E-11	4,59E-06	5,27

V tabulce 26 jsou hodnoty absorpčního koeficientu a součinitele vlhkostní vodivosti. Všechny tyto hodnoty vykazují rostoucí trend se zvyšujícím se obsahem bentonitu. Absorpční koeficient RBR je téměř o 90% nižší než pro RB4.

Tabulka 26: Absorpční koeficient a součinitel vlhkostní vodivosti pro betony s bentonitem

	Absorpční koeficient [kg/m ² s ^{1/2}]	Součinitel vlhkostní vodivosti [m ² /s]
RBR	0,0095	5,93E-09
RB1	0,0341	3,08E-08
RB2	0,0506	4,82E-08
RB3	0,0614	5,88E-08
RB4	0,0912	1,11E-07

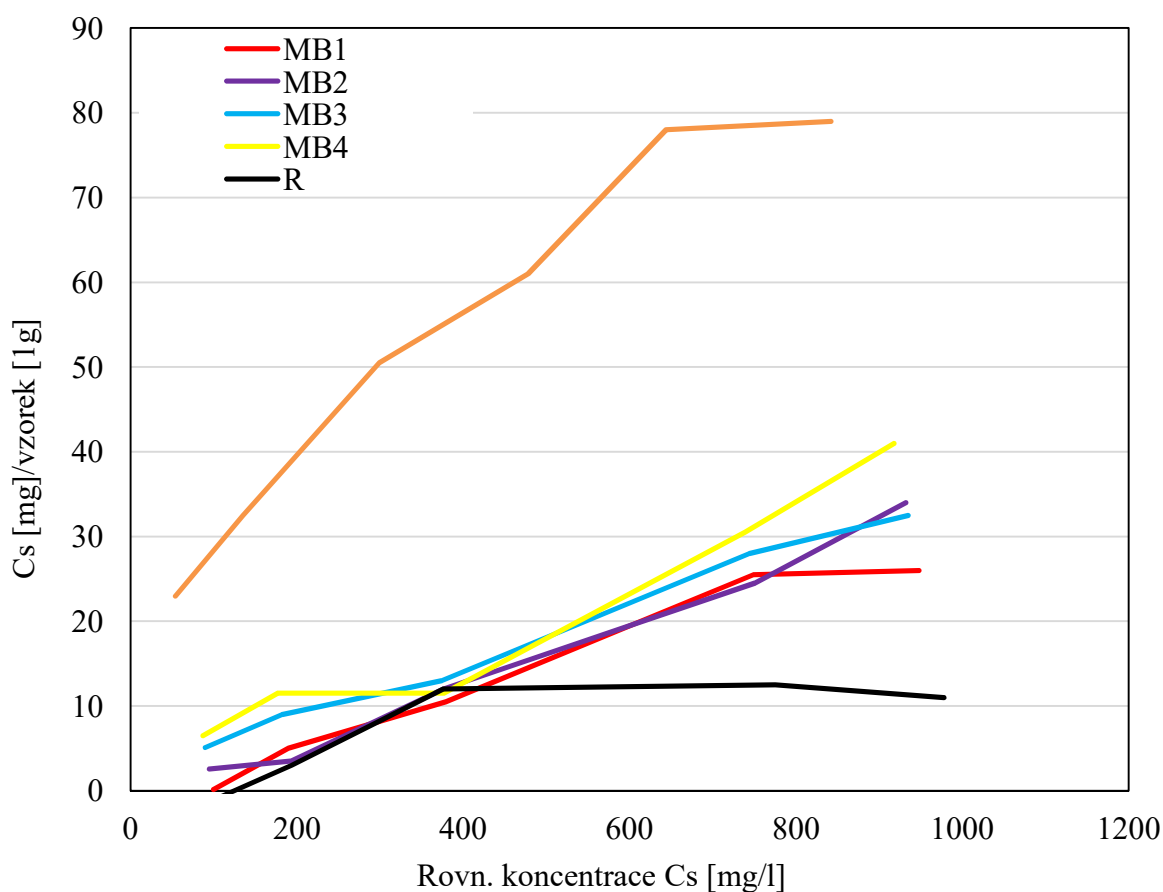
5.5.1.5 Sorpční parametry

Hodnoty distribučního koeficientu (cesium) pro referenční pasta (R), bentonit (B) a jednotlivé pasty jsou uvedeny v tabulce 27. Z výsledků je patrné, že pro sorpci cesia je bentonit výhodnější především v nižších koncentracích.

Tabulka 27: Distribuční koeficient (cesium) pro pasty s bentonitem

Hodnoty Kd pro jednotlivé koncentrace [mg/l]	R	B	MB1	MB2	MB3	MB4
100	0	424,21	1,5	26,9	56,8	74,7
200	15,46	240,74	26,3	18,1	49,5	65,0
400	31,91	168,90	27,7	31,9	34,8	30,5
800	16,13	121,12	34,0	32,6	37,6	41,3
1000	11,25	93,82	27,4	36,5	34,8	44,7

Na obrázku 41 je graficky znázorněna sorpční izoterma pro cesium, kde je vidět, že u všech past došlo ke zlepšení sorpčních vlastností oproti referenční pastě.



Obrázek 41: Sorpční izoterma pro cesium na pastách s bentonitem

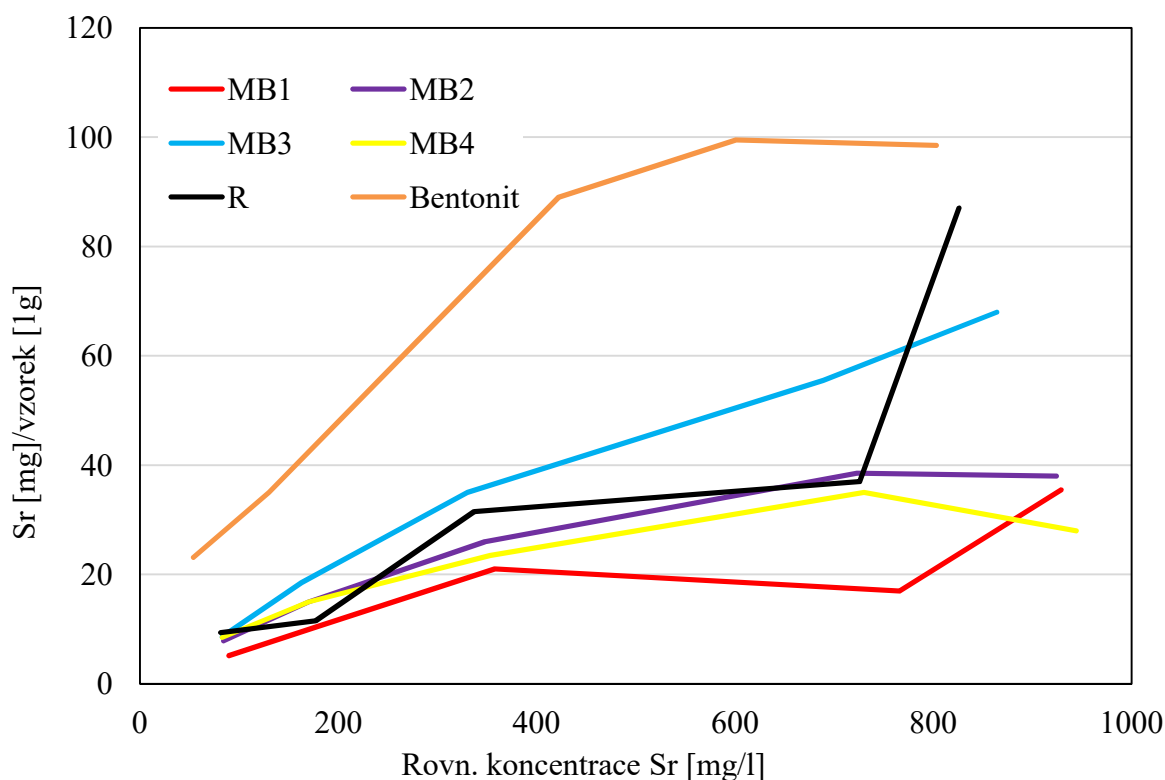
Hodnoty distribučního koeficientu (stroncium) pro referenční pastu (R), bentonit (B) a jednotlivé pasty, jsou uvedeny v tabulce 28. Jak je vidět, tak pro sorpci stroncia je

bentonit lepší než referenční pasta, ale pasty s bentonitem vykazují podobné hodnoty jako referenční pasta. Z tohoto důvodu nemá přidání bentonitu do betonů větší význam pro sorpci stroncia.

Tabulka 28: Distribuční koeficient (stroncium) pro pasty bentonitem

Hodnoty Kd pro jednotlivé koncentrace [mg/l]	R	B	MB1	MB2	MB3	MB4
100	115,0	429,4	57,4	93,1	103,9	102,4
200	65,0	269,2	58,7	88,2	113,5	88,2
400	93,5	224,6	58,7	74,7	106,1	66,6
800	51,0	447,9	22,2	53,3	80,6	47,9
1000	105,3	331,9	38,2	41,1	78,7	29,7

Jak je vidět na obrázku 42, tak téměř všechny sorpční izotermy studovaných past jsou pod referenční pastou, jediné pasta s nejvyšším obsahem bentonitu sorbuje více stroncia než referenční pasta.



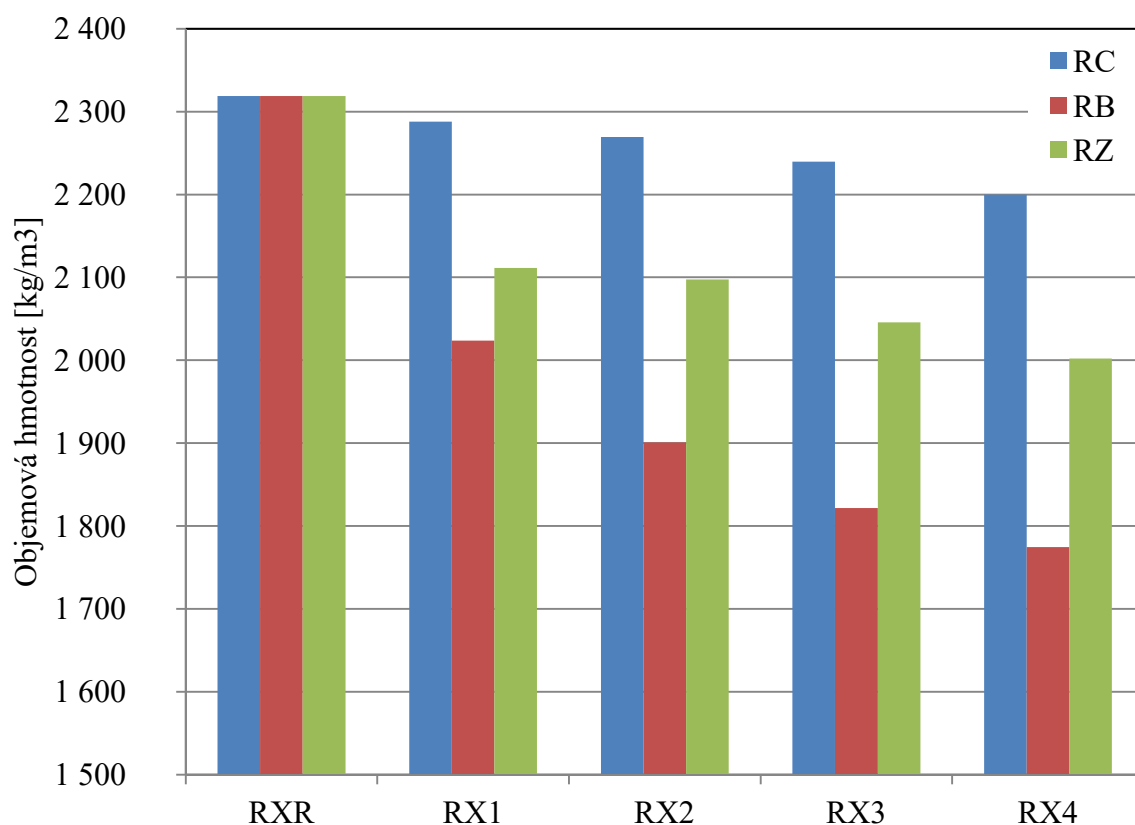
Obrázek 42: Sorpční izoterma pro stroncium na pastách s bentonitem

5.6 Porovnání vybraných výsledků studovaných materiálů

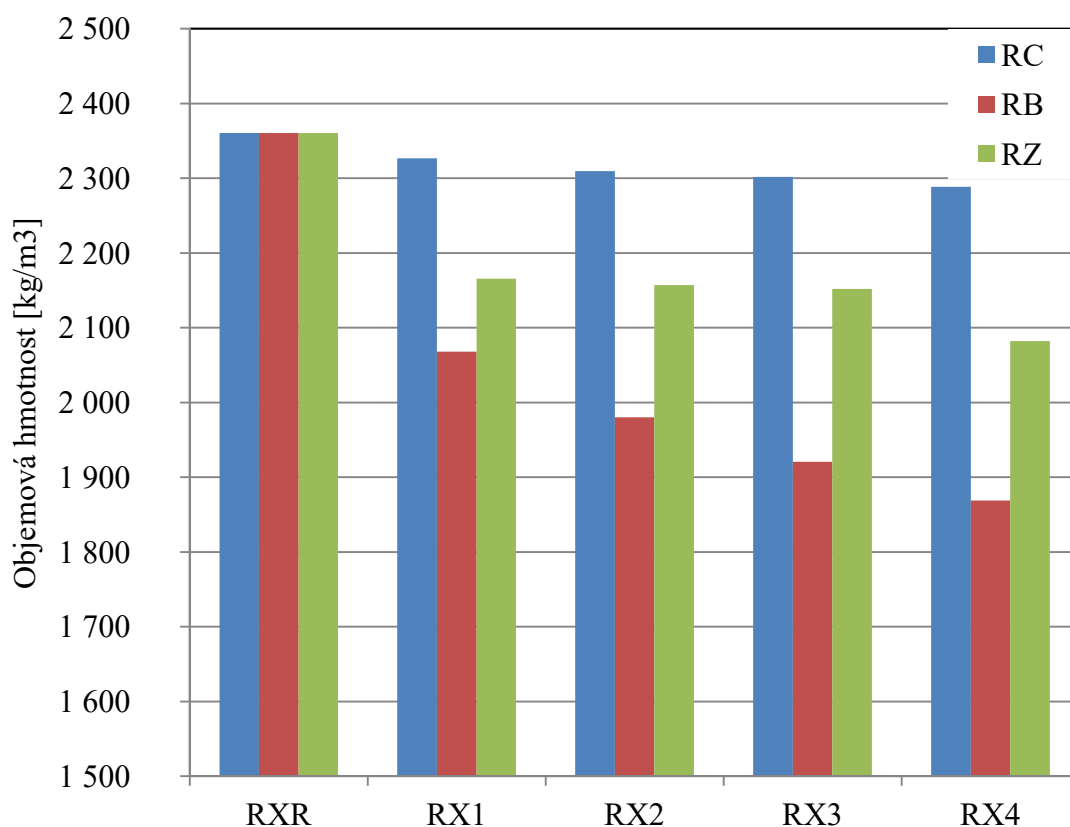
Na základě naměřených dat byly sestaveny následující grafy, ve kterých jsou porovnávány jednotlivé betony mezi sebou, a zároveň je zde zobrazeno porovnání s referenčním betonem.

5.6.1 Základní materiálové charakteristiky

Na následujících grafech (Obrázek 43 a 44) je srovnání objemových hmotností všech studovaných betonů, kde je jasně viditelné, že nejnižších hodnot dosahují betony s bentonitem a nejvyšších betony s cihelným prachem. Při jejich vzájemném porovnání je rozdíl mezi betony RC1 a RB1 kolem 12%, v případě betonů s nejvyšším obsahem příměsí (RC4 a RB4) je až 20 %. Rozdíly mezi jednotlivými použitými metodami jsou minimální a mají podobný klesající trend.

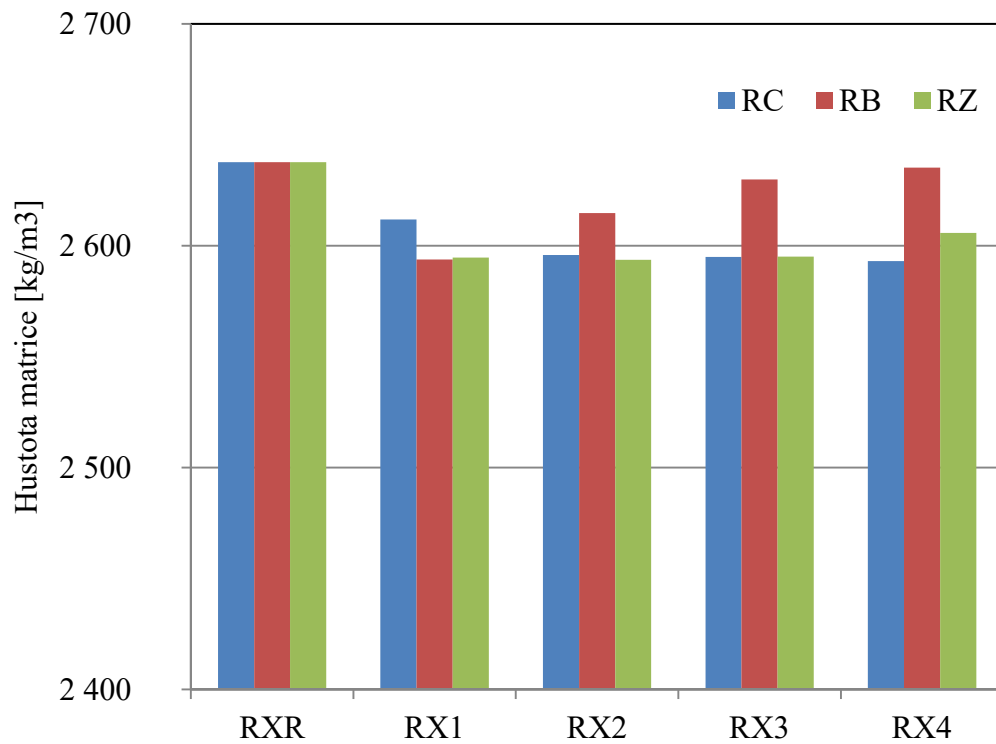


Obrázek 43: Srovnání - Objemová hmotnost – Pyknometrie

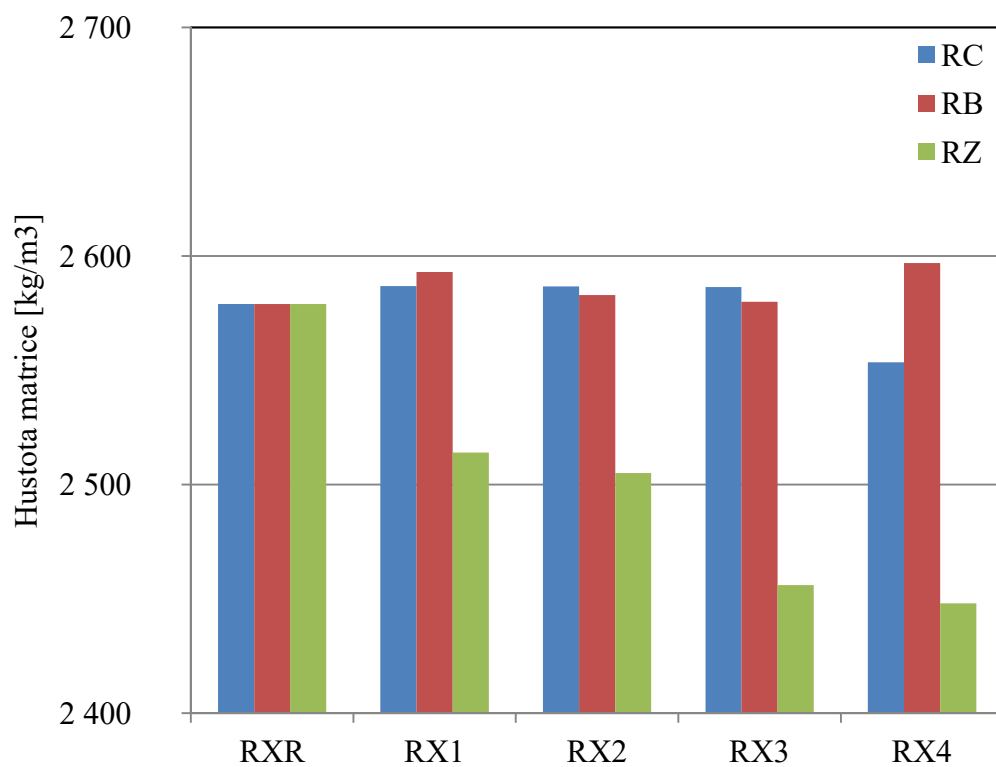


Obrázek 44: Srovnání - Objemová hmotnost - Vakuová saturace

Hustota matrice, vyobrazena na obrázcích 45 a 46, je u betonů s cihelným prachem a bentonitem, bez ohledu na obsah použité příměsi, podobná jako u referenčního. Drobné odchylky, které byly naměřeny, jsou minimální a pohybují se v rozmezí 2 %. V případě betonů se zeolity, je vidět menší odchylka při použití vakuové saturace, která se pohybuje v rozmezí 4 – 6 %. Tato odchylka může být způsobena strukturou zeolitů a velikostí molekuly vody a atomů helia.

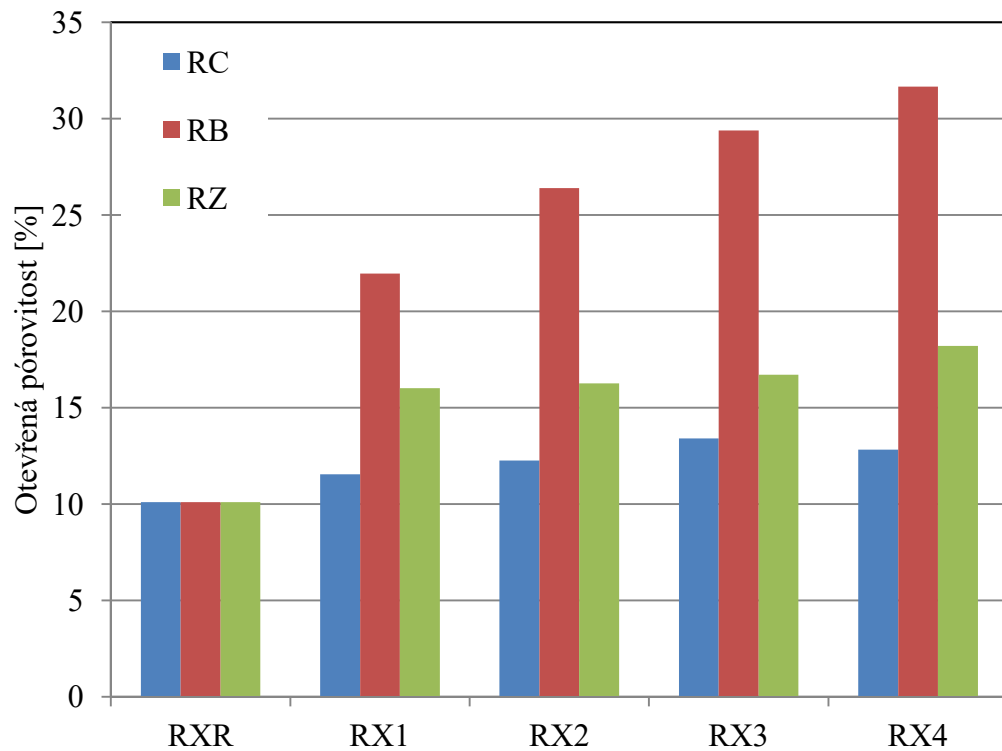


Obrázek 45: Srovnání - Hustota matrice - Pyknometrie

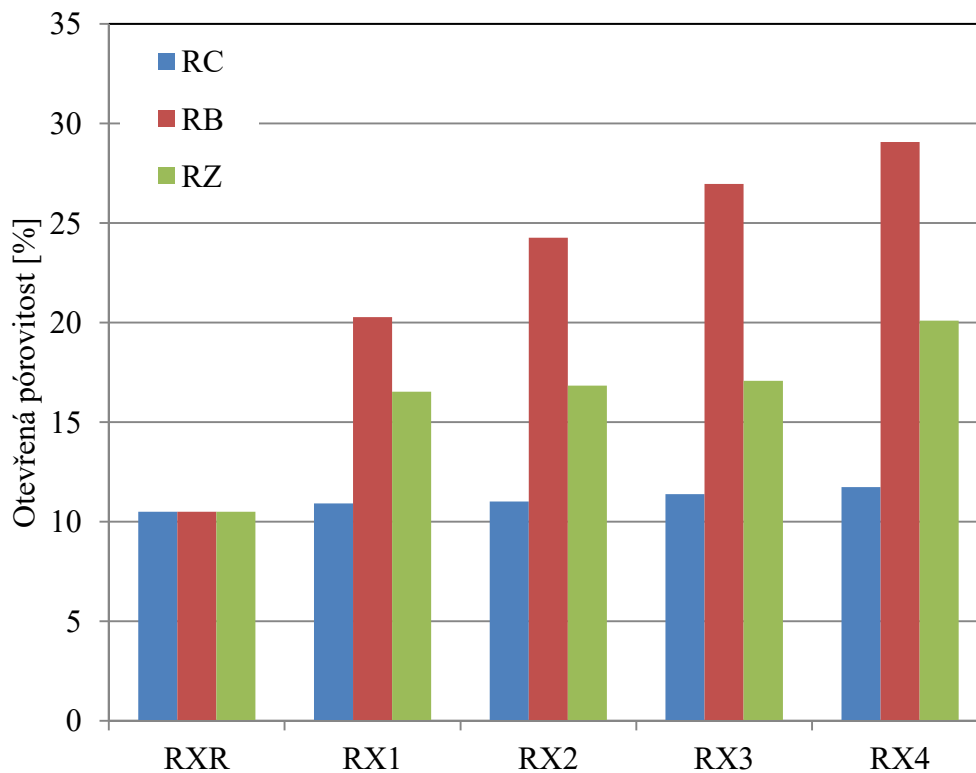


Obrázek 46: Srovnání - Hustota matrice – Vakuová saturace

Otevřená pórovitost (Obrázek 47 a Obrázek 48), v souladu s výsledky objemové hmotnosti a hustoty matrice dosahuje nejvyšších hodnot v případě betonů s bentonitem a nejnižších u betonů s cihelným prachem v porovnání s referenčním materiálem. Při porovnání betonů s nejnižším obsahem příměsi je u cihelného prachu o 50 % nižší pórovitost než u bentonitu, u betonu s největším obsahem příměsi je tento rozdíl až 60 %.



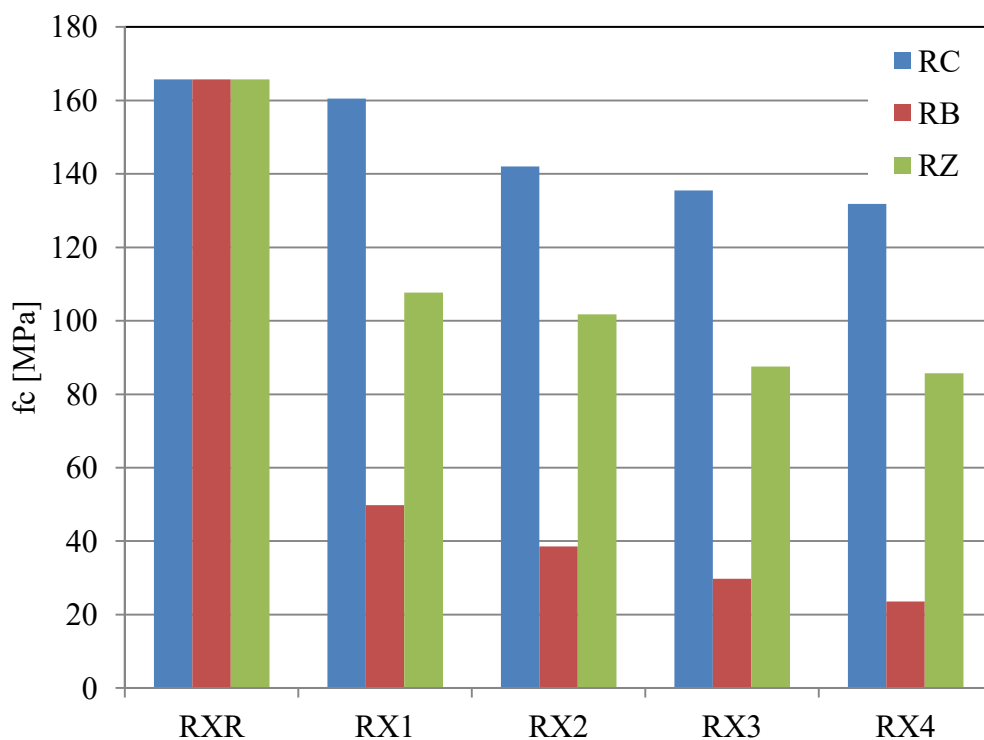
Obrázek 47: Srovnání - Otevřená pórovitost - Pyknometrie



Obrázek 48: Srovnání - Otevřená pórovitost- Vakuová saturace

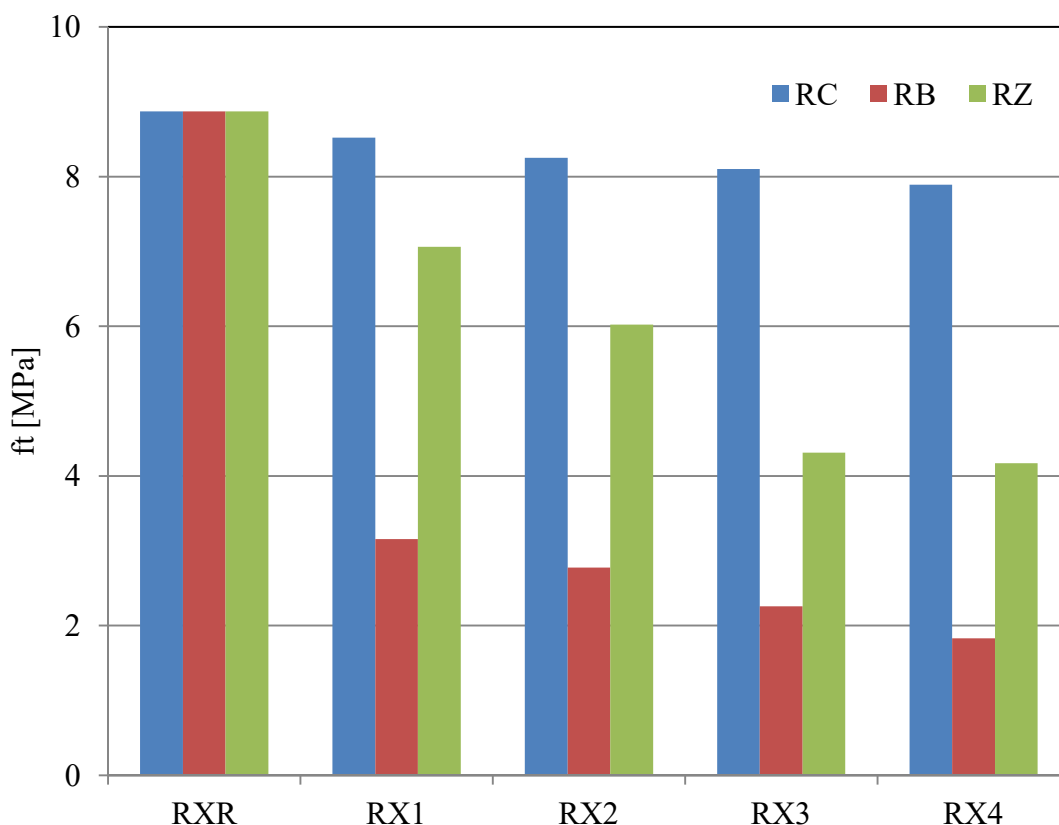
5.6.2 Mechanické vlastnosti

U pevnosti v tlaku (Obrázek 49) je vidět, že všechny studované materiály dosahují nižších hodnoty pevnosti v tlaku než referenční materiál (beton s cihelným prachem RC1 - RC4 o 4 – 20 %, beton se zeolitem RZ1 - RZ4 o 35 – 50 % a beton s bentonitem RB1 - RB4 o 70 – 85 %). Při porovnání betonu RC1 a RB1 činí rozdíl jejich pevností téměř 70 %, u betonů RC4 a RB4 je to až 82 %.



Obrázek 49: Srovnání - Pevnost v tlaku studovaných betonů

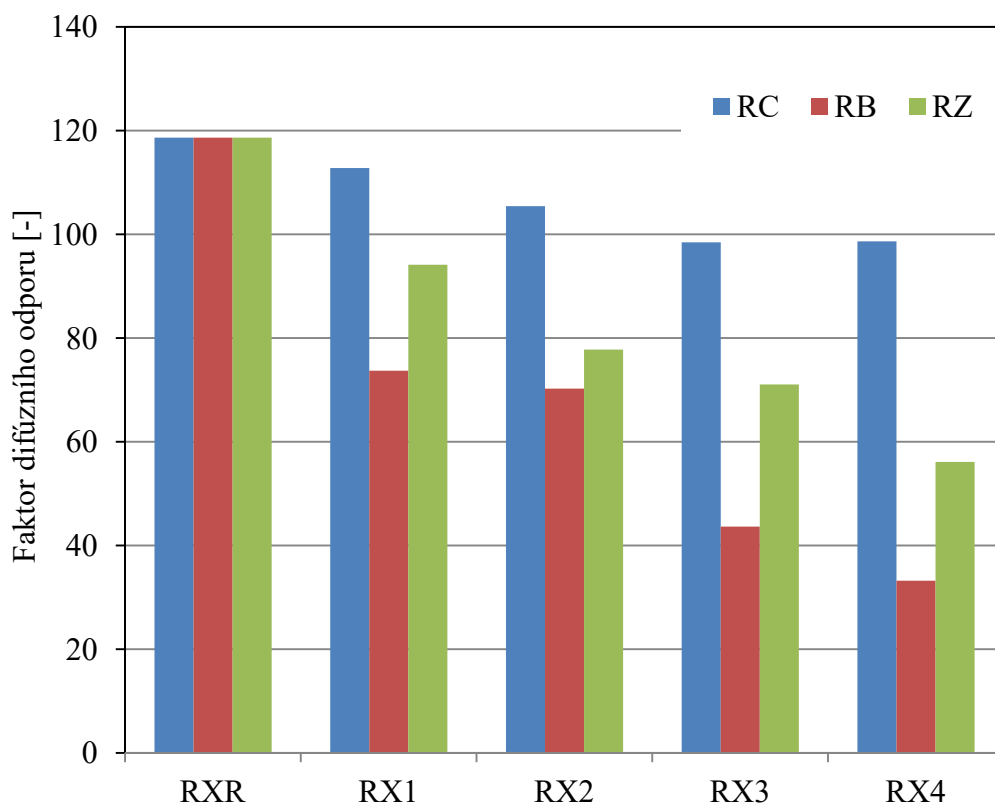
U pevnosti v tahu (Obrázek 50) je vidět, že všechny studované materiály dosahují nižších hodnoty pevnosti v tahu než referenční materiál (beton s cihelným prachem RC1 - RC4 o 5 – 12 %, beton se zeolitem RZ1 - RZ4 o 20 – 53 % a beton s bentonitem RB1 - RB4 o 65 – 80 %). Při porovnání betonu RC1 a RB1 činí rozdíl jejich pevností téměř 65 %, u betonů RC4 a RB4 je to až 76 %.



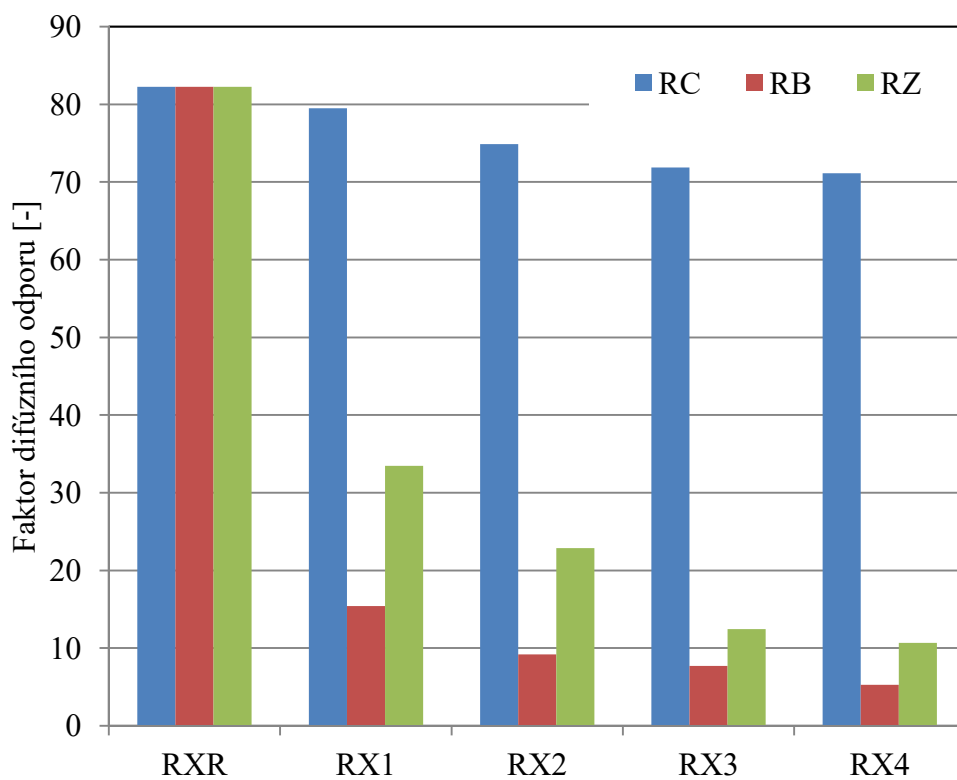
Obrázek 50: Srovnání - Pevnost v tahu studovaných betonů

5.6.3 Jednoosý transport vlhkosti

Faktor difúzního odporu, který byl studován metodou dry cup (Obrázek 51) a metodou wet cup (Obrázek 52), vykazuje u všech studovaných materiálů nižší hodnoty oproti referenčnímu materiálu. Nejnižších hodnot nabývají betony s největším obsahem příměsí u obou metod, což koresponduje s trendem zvyšující se pórovitosti těchto betonů. Naměřené hodnoty mezi jednotlivými metodami se liší v případě referenčního betonu a betonu s cihelným prachem v průměru o 30 %, v případě betonů se zeolitem a bentonitem průměrně o 80 %.

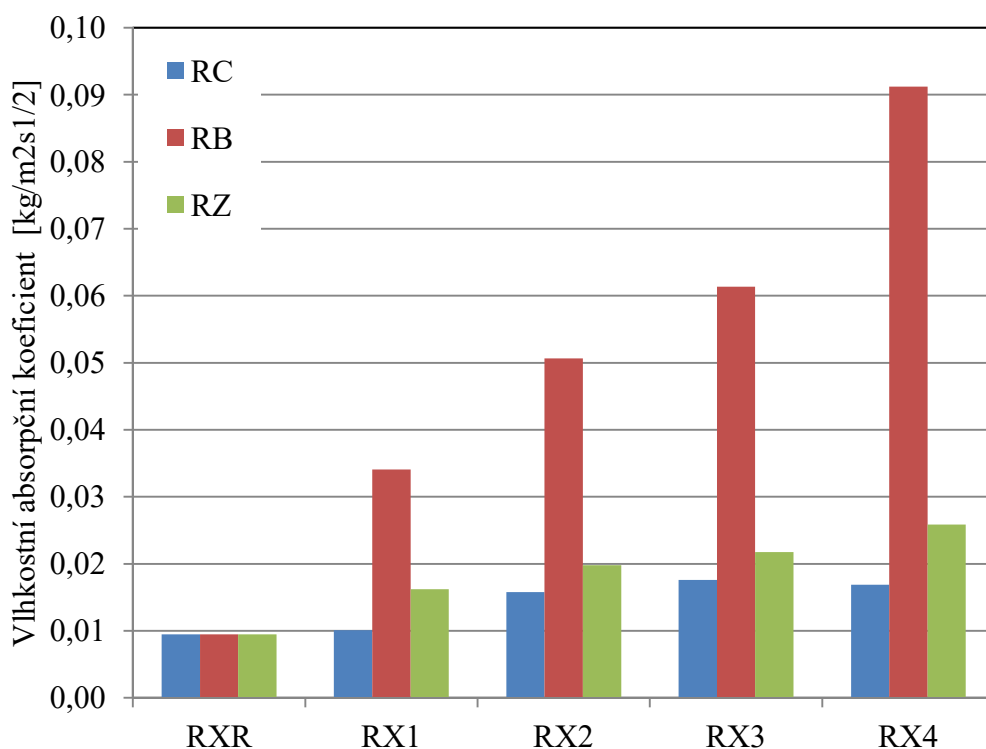


Obrázek 51: Srovnání - Dry cup

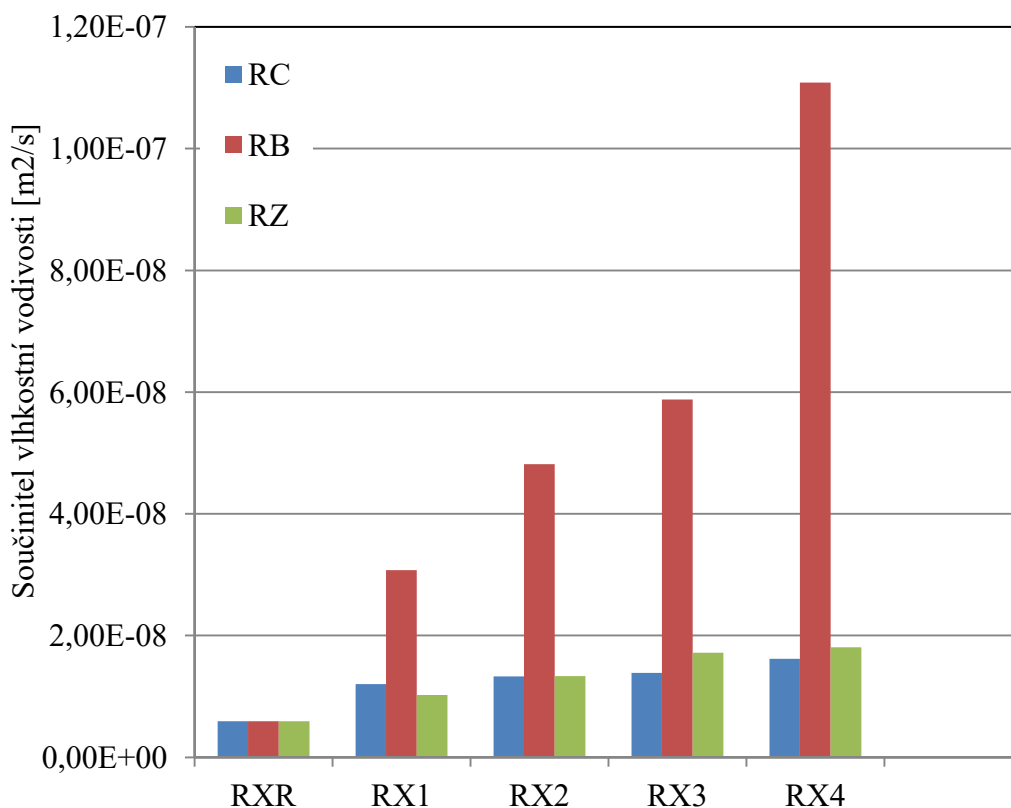


Obrázek 52: Srovnání - Wet cup

Na obrázku 53 je zobrazen vlhkostní absorpční koeficient pro všechny studované materiály. V porovnání s referenčním betonem mají všechny studované betony absorpční koeficient vyšší, v průměru se u betonů se zeolitem a cihelným prachem zvyšuje o 40 %, u betonu s bentonitem je tento nárůst až 65 %. Na grafu je vidět, že nejvyšších hodnot tento koeficient nabývá v případě betonu s bentonitem a nejnižších u betonu s cihelným prachem, u kterého je až o 80 % nižší. Na obrázku 54 je zobrazen součinitel vlhkostní vodivosti, který vykazuje obdobný trend, jaký můžeme pozorovat na obrázku 53.



Obrázek 53: Srovnání - Vlhkostní absorpční koeficient

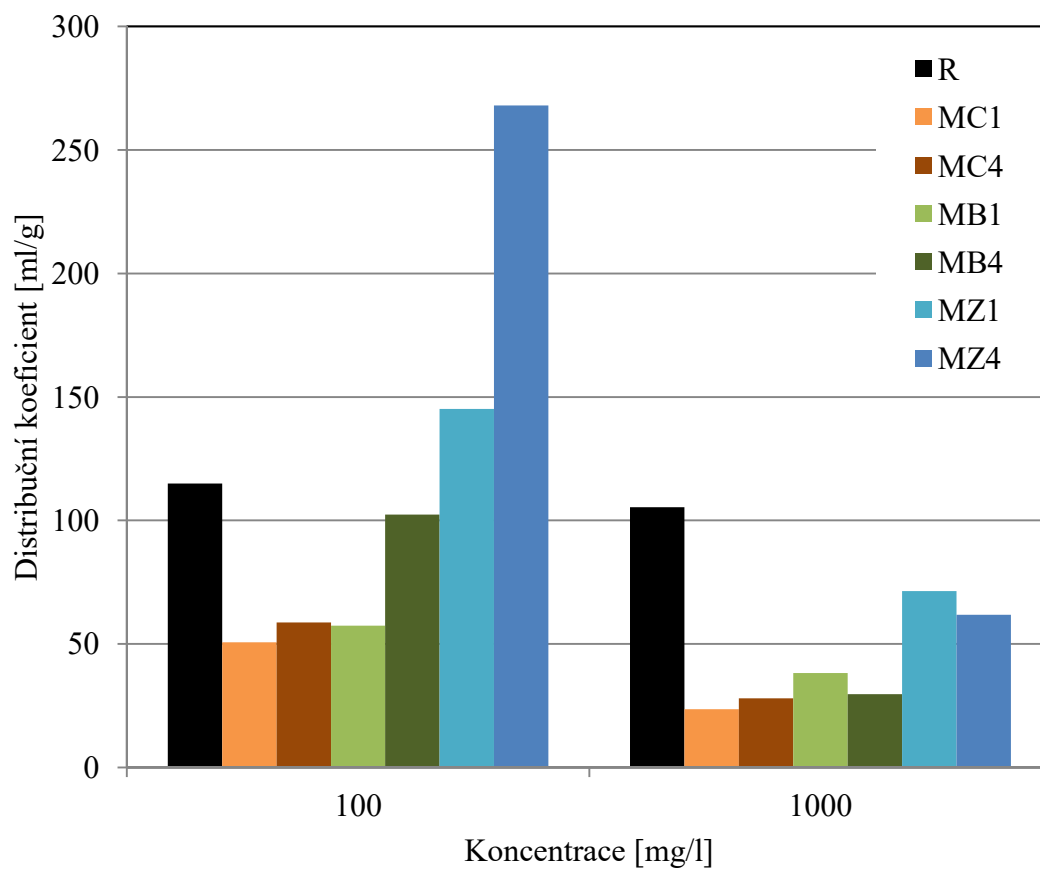


Obrázek 54: Srovnání - Součinitel vlhkostní vodivosti

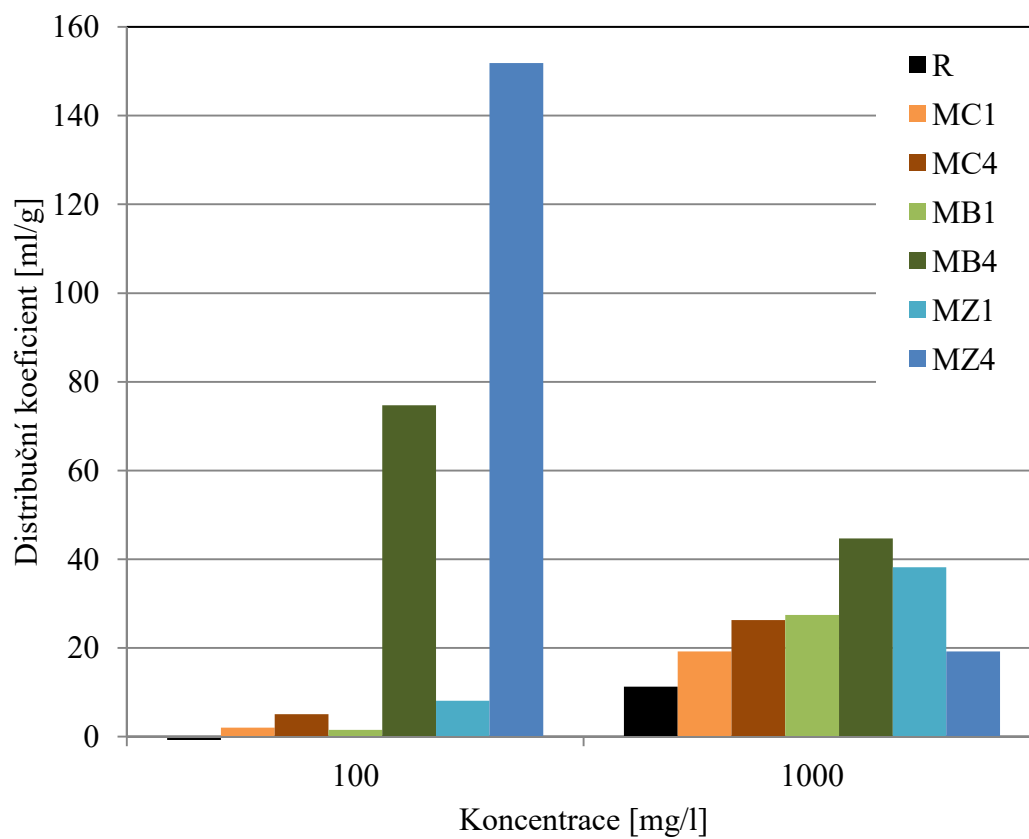
5.6.4 Sorpční parametry

Distribuční koeficient, který byl vyhodnocen pro sorpci studovaných radionuklidů, je zobrazen na obrázku 55 a 56. V grafu jsou vyneseny hodnoty z past s nejvyšším a nejnižším obsahem příměsí pro nejnižší a nejvyšší koncentraci studovaných radionuklidů v roztoku. Jak je z obrázku 55 vidět, tak při nižších koncentracích je tento koeficient vyšší oproti referenční pastě pouze v případě zeolitů (až o 35 % v případě MZ1 a přibližně 2,5 krát více u MZ4). Při nejvyšších koncentracích distribuční koeficient značně klesá a u všech malt byly naměřeny nižší hodnoty než u referenční pasty. Na obrázku 56 je vidět, že pro nízké koncentrace je tento koeficient nejvyšší u pasty MZ4, zároveň u referenční pasty dosahuje záporných hodnot, jedná se o statistickou chybu, která vznikla malým souborem dat, je ale pravděpodobné, že v případě opakovaných řešení by se hodnota distribučního koeficientu pohybovala v podobných hodnotách jako pasta s cihelným prachem. U nejvyšší studované koncentrace (1000 mg/l) dosahuje nejvyšších hodnot pasta MB4, která v porovnání

s MZ4 vykazuje téměř o 55 % vyšší hodnoty, ale při nižší koncentraci je tato hodnota u pasty MB4 skoro o 50 % nižší, než u MZ4.



Obrázek 55: Srovnání - Distribuční koeficient pro Sr



Obrázek 56: Srovnání - Distribuční koeficient pro Cs

6 Závěr

Tato práce se zabývala studiem betonů s různými druhy příměsí, které by bylo možné využít jako sekundární ochrana radioaktivního odpadu a imobilizaci radionuklidů v betonu. Pro tento účel byly zvoleny tři různé druhy příměsí, které se přidávaly do betonu jako částečná náhrada cementu v různých poměrech. Příměsí byly zvoleny tak, aby zlepšily sorpční vlastnosti betonu a došlo ke zvýšení schopnosti imobilizace radionuklidů a zabránění jejich následného uvolňování do životního prostředí. Všechny betony byly srovnávány jak mezi sebou, tak i s referenčním materiálem, ve kterém byly tyto příměsí nahrazeny cementem a křemennou moučkou.

Beton s cihelným prachem (RZ1), kde byl nejnižší obsah cihelného prachu vykazoval velice podobné vlastnosti jako referenční beton. Většina studovaných parametrů nevykazovala větší odchylky od referenčního betonu než 5 %, ale jeho sorpční parametry pro použité nuklidy nevykazovaly výrazné zlepšení. Díky ušetření 20 % cementu oproti RCR ho činí zajímavou alternativou pro toto využití. U betonu s největším obsahem cihelného prachu došlo již k viditelným změnám ve vlastnostech materiálu, například ke snížení pevnostní až o 20 %, zároveň nedošlo k výraznému zlepšení sorpčních schopností vybraných nuklidů, tudíž se použití většího obsahu cihelného prachu nejeví jako efektivní.

Beton s bentonitem, vykazoval oproti referenčnímu materiálu, výrazně větší pórovitost (až o trojnásobek) a velké pevnostní ztráty (až 80 %). Sorpční testy, provedené na těchto betonech ukázaly, že přidání bentonitu do betonu má výraznější vliv jen pro sorpci cesia, u kterého (v případě MB4) dosahoval velmi dobrých hodnot (Obrázek 56). Pro sorpci stroncia dopadly pasty připravené s bentonitem hůře než referenční pasta.

Beton se zeolitem, vykazoval ze všech tří studovaných betonů asi nejlepší schopnost sorpce cesia i stroncia. U obou vybraných radionuklidů dosahovaly pasty se zeolitem perspektivních výsledku. Další studované materiálové charakteristiky nevykazovaly takové výkyvy oproti referenčnímu betonu jako v případě bentonitu a například pokles pevností nebyl větší než 55 %.

Po vyhodnocení všech naměřených charakteristik u jednotlivých betonů je zřejmé, že největší potenciál pro imobilizaci radionuklidů má beton s obsahem zeolitů, jelikož jako

jediný vykazoval ucházející parametry jak pro sorpci stroncia, tak pro sorpci cesia. Zároveň zhoršení ostatních vlastností nebylo tak výrazné. Jako nejméně vhodný, pro sorpci stroncia a cesia se jeví beton s cihelným prachem. Nelze ale přehlédnout, že v jeho případě, při snížení obsahu cementu o 20 %, nedochází k téměř žádným změnám ve vlastnostech betonu, ale přispívá ke značnému ušetření portlandského cementu. Beton s bentonitem vykazuje zajímavé sorpční schopnosti pro cesium, ale značná ztráta pevnosti je jeho velkou nevýhodou. Zároveň zde dochází i ke zhoršení zpracovatelnosti díky velkému obsahu bentonitu.

Na závěr této práce bych rád zhodnotil použitelnost jednotlivých betonů. Z výsledků je patrné, že beton s cihelným prachem pro zvýšení schopnosti imobilizace radionuklidů není příliš vhodný. Sorpční parametry toho betonu pro zkoumané radionuklidy vycházely většinou hůře než u referenčního betonu a ani referenční vzorek cihelného prachu nevykazoval výrazně lepší sorpční schopnosti. Z tohoto důvodu bych studium betonu s cihelným prachem pro sekundární ochranu radioaktivního odpadu mohl doporučit jen z důvodu snížení obsahu cementu a využití odpadních materiálů. V případě přidání bentonitu do betonu, byla většina výsledků neuspokojivá, i když došlo v některých případech k výrazně lepší sorpci cesia. Výzkum tohoto betonu nedoporučuji s ohledem na špatnou zpracovatelnost směsi a výrazné zhoršení výsledných mechanických vlastností. S přihlédnutím k tomuto zhoršení se domnívám, že bentonit je pro tyto účely účinnější samotný. Nejlepší vlastnosti z testovaných betonů má pro vybrané účely beton se zeolity. Díky přidání zeolitů došlo ke zlepšení sorpčních vlastností betonu a nedošlo k tak velkým pevnostním ztrátám. Ze studovaných materiálů se tento beton jeví jako nejlepší volba a doporučil bych jeho další zkoumání pro potvrzení výsledků, které byly naměřeny v této práci.

7 Bibliografie

1. Ullman, Vojtěch. *JADERNÁ FYZIKA a FYZIKA IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ* [Online] 2010. [cit. 2018-10-25] Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/Fyzika-NuklMed.htm>.
2. H. Cídllová, B. Kohoutková, P. Křivánková, K. Štěpánek, B. Valová, *Historie chemie*. [Online] PdF MU 2011. [cit. 2018-11-29] Dostupné z: <https://www.ped.muni.cz/wchem/sm/hc/hist/19/elektronaradioaktivita.html>.
3. *Státní úřad radiální ochrany*. [Online]. SÚRO. [cit. 2018-11-15] Dostupné z: <https://www.suro.cz>.
4. *PRAVIDLA RADIAČNÍ OCHRANY* [Online] ČEZ. Dostupné [cit. 2018-12-27] z: https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/skoleni/kp/pravidla_ro-prirucka_e-kurzu.pdf.
5. Procházka, Vít. *Atomová a jaderná fyzika*. [Online] UPOL 2012. [cit. 2018-10-25] Dostupné z: http://mofy.upol.cz/vystupy/02_texty/modul_ajfu.pdf.
6. *Centrum experimentální geotechniky* [Online] ČVUT [cit. 2018-10-25] Dostupné z: <http://ceg.fsv.cvut.cz/vyzkum>.
7. Mehmet Altun et al. Natural radioactivity and hazard-level assessment of Portland cements in Turkey. *JOURNAL OF RADIOANALYTICAL AND NUCLEAR CHEMISTRY*. Vol. 314, Issue 2, November 2017, pp. 941-948
8. *Safety standards* [Online] IAEA Dostupné [cit. 2018-11-23] z: <https://www.iaea.org/resources/safety-standards>
9. Dlouhý, Z. *Nakládání s radioaktivním odpadem a vyhořelým jaderným palivem*. Vutium, Brno 2009, ISBN 978-80-214-3629-9.
10. *DETEKTORY* [Online] ČEZ Dostupné [cit. 2018-12-5] z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/urychl/k22.htm>.
11. *Správa úložišť radioaktivního odpadu* [Online]. SÚRAO. [cit. 2018-11-7] Dostupné z: <https://www.surao.cz>.
12. RNDr. Jiří Slovák Výběr lokality pro hlubinné úložiště vyhořelého jaderného paliva a radioaktivních odpadů vstupuje do nové fáze [Online]. Novinky z JE HANHIKIV. Srpen 2015. [cit. 2018-11-7] Dostupné z: http://www.nuclearforum.cz/PDF/BULLETIN_CJF_2015_03.pdf

13. *Konečná likvidace*. [Online] ČEZ [cit. 2018-11-15] Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/likvidace_4.html.
14. David Brychta, Josef Fischer, Jan Kallay *Urychlovačem řízené transmutační systémy*. [Online] [cit. 2018-11-15] ČVUT 2001. Dostupné z: <http://tydenvedy.fjfi.cvut.cz/2001/web/sbornik/pdf/adtt.pdf>
15. Pitter, P. *Hydrochemie*. 4. vydání. VŠCHT Praha, 2009, ISBN 978-80-7080-701-9
16. Adsorpční hystereze [Online] VŠCHT [cit. 2018-12-27] Dostupné z: https://vydavatelstvi-old.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/adsorpcni_hystereze.html.
17. Lemfeld, František. *Úložiště jaderného odpadu*. [Online prezentace] Technická univerzita v Liberci, Strojní fakulta, Katedra energetických zařízení. Dostupné z: <http://www.kez.tul.cz/files/radioaktivni-odpady.pdf>
18. Bo Pang, Héctor Saurí Suárez, Frank Becker. Monte Carlo based study of radiation field in a deep geological repository for high-level nuclear waste with different host rock types. *NUCLEAR ENGINEERING AND DESIGN*. Vol. 325, December 2017, pp. 44-48.
19. Ivana Jelić et al. The applicability of construction and demolition waste components for radionuclide sorption. *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*. Vol. 171, January 2018, pp. 322-332.
20. Jaroslava Kořátková, Jan Zatloukal, Pavel Reiterman, Karel Kolář. Concrete and cement composites used for radioactive waste deposition. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY*. Vol. 178, November 2017, pp. 147-155
21. Babak Ahmadi, Mohammad Shekarchi Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material. *Cement & Concrete Composites*. Vol 32, 2010, pp. 134-141
22. MAKRLÍK, E., VAŇURA, P. *Zeolity a iontová výměna*. 1. vyd. Praha: vydali autoři vlastním nákladem, 2003, 52 s. ISBN: 80-239-0967-3.
23. Multifunkční stavební materiál s příměsí cihelného prachu. [Online] Uceeb [cit. 2018-11-29] Dostupné z: http://www.uceeb.cz/system/files/souboryredakce/letak_cihelny_prach_0.pdf.
24. KERAMOST [Online] KERAMOST [cit. 2018-12-22] Dostupné z: <http://www.keramost.cz/cz/produkty/bentonity/charakteristika-bentonity>.
25. M. L. Kuleshova, N. N. Danchenko, V. L. Kosorukov, V. I. Sergeev, T. G. Shimko. A Study of Strontium and Cesium Sorption-Desorption on Bentonites of

Different Composition. *MOSCOW UNIVERSITY GEOLOGY BULLETIN*. Vol. 72, Issue 4, July 20017, pp.290-298

26. EBETON [Online] Svaz výrobců betonu ČR. [cit. 2018-11-29] Dostupné z: e-beton.cz.

27. Robert Černý et al. *Complex System of Methods for Directed Design and Assessment of Functional Properties of Building Materials and Its Applications*. ČVUT Praha, 2013, ISBN 978-80-01-05208-2

28. Roels S. et al, Interlaboratory Comparison of Hygric Properties of Porous Building Materials. *ournal of THERMAL ENV.&BLDG.SCI.*, Vol. 27, No. 4, April 2004

29. Michal Dudák, Marek Václavík, Rtuťová porozimetrie [Online] VŠCHT [cit. 2018-12-27] Dostupné z: <https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010367/RP.pdf?redirected>.

30. ČSN EN 12390-3 2002 – Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku. ČNI, Praha

31. ČSN EN 12390-5 2007 – Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem. ČNI, Praha

32. ČSN 72 7031 - Měření součinitele difúze vodní páry stavebních materiálů metodou bez teplotního spádu. ČNI, Praha

33. Vejmelková E. et. al. Free water intake as means of material characterization. *JOURNAL OF BUILDING PHYSICS*. Vol. 33, Issue 1, July 2009, pp. 29-44

34. Jakub, Šindelář. *Adsorpce radionuklidů na žulové materiály*. [online] Přírodovědecká fakulta UK. [cit. 2018-11-29] Dostupné z: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/42/039/42039994.pdf

35. *United States Environmental Protection Agency*. [Online] EPA [cit. 2018-11-15] Dostupné z: www.epa.gov.

36. V. V. Milyutin et al. Sorption of Cesium and Strontium Radionuclides on to Crystalline Alkali Metal Titanosilicates. *RADIOCHEMISTRY*. Vol. 59, Issue 1, January 2017, pp 65-69.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Radioaktivní rozpad [1].....	2
Obrázek 2: Vliv koncentrace na radioaktivní rozpad [1].....	3
Obrázek 3: Filmový dozimetr [1].....	5
Obrázek 4: Schéma principu ionizační komory [1]	6
Obrázek 5: Tužkový dozimetr [10].....	6
Obrázek 6: Scintigrafický obraz pacienta [10].....	7
Obrázek 7: Schéma povrchového úložiště [1]	8
Obrázek 8: Schéma hlubinného úložiště [1]	9
Obrázek 9: Schéma navrhovaného úložiště [3].....	10
Obrázek 10: Zneškodnění jaderných odpadů v hlubinném vrtu za pomoci síry [13]	11
Obrázek 11: Návrh zařízení pro likvidaci odpadu [14].....	12
Obrázek 12: Schéma skladby inženýrských bariér [17].....	14
Obrázek 13: Systém vitrifikace odpadu [13]	15
Obrázek 14: Odpad v barelech ukládaný do boxů [17].....	16
Obrázek 15: Mapa ČR s vybranými lokalitami [11].....	17
Obrázek 16: Mineralogické a chemické složení bentonitů [25].....	21
Obrázek 17: Sorpce a desorpce stroncia a cesia na bentonitech [25]	21
Obrázek 18: Vzorky v exsikátoru	23
Obrázek 19: Vážení vzorku pod vodou.....	23
Obrázek 20: Čtyřbodová ohybová zkouška	25
Obrázek 21: Achátová třecí miska se vzorkem.....	28
Obrázek 22: Příprava vzorků	29
Obrázek 23: Vzorky umístěné v třepačce	30
Obrázek 24: Filtrování vzorků	30
Obrázek 25: Distribuční koeficient pro ¹³⁷ Cs na syntetický ivanyukit [36].....	31
Obrázek 26: Granulometrie použitého cementu	34
Obrázek 27: Granulometrie křemenné moučky	35
Obrázek 28: Granulometrie použitého cihelného prachu.....	36
Obrázek 29: Granulometrie použitého zeolitu	37
Obrázek 30: Granulometrie použitého bentonitu.....	38

Obrázek 31: Kumulativní křivka pórů pro materiály RC1-RC4.....	39
Obrázek 32: Distribuční křivka pórů pro materiály RC1-RC4	40
Obrázek 33: Sorpční izoterma pro cesium na pastách s cihelným prachem	44
Obrázek 34: Sorpční izoterma pro stroncium na pastách s cihelným prachem	46
Obrázek 35: Kumulativní křivka pórů pro betony RZ1-RZ4.....	47
Obrázek 36: Distribuční křivka pórů pro betony RZ1-RZ4.....	48
Obrázek 37: Sorpční izoterma pro cesium na pastách se zeolity	52
Obrázek 38: Sorpční izoterma pro stroncium na pastách se zeolity	53
Obrázek 39: Kumulativní křivka pro betony RB1-RB4	55
Obrázek 40: Distribuční křivka pro betony RB1-RB4.....	55
Obrázek 41: Sorpční izoterma pro cesium na pastách s bentonitem.....	59
Obrázek 42: Sorpční izoterma pro stroncium na pastách s bentonitem.....	60
Obrázek 43: Srovnání - Objemová hmotnost – Pyknometrie	61
Obrázek 44: Srovnání - Objemová hmotnost - Vakuová saturace.....	62
Obrázek 45: Srovnání - Hustota matrice - Pyknometrie	63
Obrázek 46: Srovnání - Hustota matrice – Vakuová saturace	63
Obrázek 47: Srovnání - Otevřená pórovitost - Pyknometrie.....	64
Obrázek 48: Srovnání - Otevřená pórovitost- Vakuová saturace.....	65
Obrázek 49: Srovnání - Pevnost v tlaku studovaných betonů	66
Obrázek 50: Srovnání - Pevnost v tahu studovaných betonů.....	67
Obrázek 51: Srovnání - Dry cup	68
Obrázek 52: Srovnání - Wet cup.....	68
Obrázek 53: Srovnání - Vlhkostní absorpční koeficient.....	69
Obrázek 54: Srovnání - Součinitel vlhkostní vodivosti	70
Obrázek 55: Srovnání - Distribuční koeficient pro Sr	71
Obrázek 56: Srovnání - Distribuční koeficient pro Cs.....	72

Seznam tabulek

Tabulka 1: Tabulka klasifikace radioaktivních odpadů podle MAAE [9].....	4
Tabulka 2: Koncentrace roztoku	29
Tabulka 3: Složení studovaných betonů	32
Tabulka 4: Chemické složení použitého cementu.....	33
Tabulka 5: Chemické složení křemenné moučky	34
Tabulka 6: Mineralogické složení cihelného prachu	36
Tabulka 7: Složení používaného zeolitu	37
Tabulka 8: Základní materiálové charakteristiky RCR - RC4.....	39
Tabulka 9: Pevnost v tahu a v tlaku u betonů RC1-RC4	41
Tabulka 10: Tepelné vlastnosti betonů RC1-RC4	42
Tabulka 11: Difúze vodní páry pro betony RC1-RC4	43
Tabulka 12: Absorpční koeficient a součinitel vlhkostní vodivosti pro betony RC1-RC4	43
Tabulka 13: Distribuční koeficient (cesium) pro pasty s cihelným prachem.....	44
Tabulka 14: Distribuční koeficient (stroncium) pro pasty s cihelným prachem.....	45
Tabulka 15: Základní materiálové charakteristiky materiálů RZR-RZ4	47
Tabulka 16: Pevnost v tahu a v tlaku u betonů se zeolity	49
Tabulka 17: Tepelné vlastnosti betonů RZ1-RZ4.....	50
Tabulka 18: Difúze vodní páry pro betony RZ1-RZ4.....	50
Tabulka 19: Absorpční koeficient a součinitel vlhkostní vodivosti pro betony se zeolity.....	51
Tabulka 20: Distribuční koeficient (cesium) pro pasty se zeolitem.....	51
Tabulka 21: Distribuční koeficient (stroncium) pro pasty se zeolitem	52
Tabulka 22: Základní materiálové charakteristiky materiálů RB1-RB4.....	54
Tabulka 23: Pevnost v tahu a v tlaku u vzorků s bentonitem.....	56
Tabulka 24: Tepelné vlastnosti betonů RB1-RB4	57
Tabulka 25: Difúze vodní páry pro betony RB1-RB4	58
Tabulka 26: Absorpční koeficient a součinitel vlhkostní vodivosti pro betony s bentonitem.....	58
Tabulka 27: Distribuční koeficient (cesium) pro pasty s bentonitem	59

Tabulka 28: Distribuční koeficient (stroncium) pro pasty bentonitem 60