



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta stavební**

**Katedra betonových a zděných konstrukcí**

**Návrh uspořádání a provádění laboratorních zkoušek betonu  
v neobvyklých podmínkách**

**Design and Realization of Experimental Investigation of Concrete  
under Rare Condition**

**DISERTAČNÍ PRÁCE**

**Ing. Jakub Žák**

Doktorský studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Školitel: prof. Ing. Petr Štemberk, Ph.D., D.Eng.

**Praha, 2022**



## PROHLÁŠENÍ

Jméno doktoranda: Ing. Jakub Žák

Název disertační práce: Návrh uspořádání a provádění laboratorních zkoušek betonu v neobvyklých podmínkách

Prohlašuji, že jsem uvedenou disertační práci vypracoval/a samostatně pod vedením školitele prof. Ing. Petra Štemberka, Ph.D., D.Eng. a školitelů specialistů Mgr. Yulie Khmurovské, Ph.D. a Ing. Martina Petříka, Ph.D..

Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

Disertační práce vznikla v souvislosti s řešením projektu:

SGS14/034/OHK1/1T/11 – Komplexní analýza betonových konstrukcí v extrémních podmínkách

SGS15/035/OHK1/1T/11 – Alternativní popis procesů v cementových kompozitech

SGS16/043/OHK1/1T/11 – Vývoj pokročilých technologií pro výrobu a ověřování betonových konstrukcí

GA15-11753S – Intuitivní materiálové modelování pomocí fuzzy logiky

SGS17/048/OHK1/1T/11 – Vývoj inovativních metod pro vyšetřování klimatických vlivů na cementové kompozity

SGS18/041/OHK1/1T/11 – Vývoj nových metod pro výzkum vlivu kombinací vnějších účinků na odezvu betonu

SGS19/038/OHK1/1T/11 – Vývoj a výroba cementových kompozitů s využitím robotiky

TJ04000186 – Vývoj spojovacích detailů pro betonové kontejnery úložišť vysokoaktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva a modelování jejich dlouhodobého chování

V Praze dne .....

.....  
podpis





# Poděkování

Rád bych poděkoval svému školiteli prof. Ing. Petru Štemberkovi, Ph.D., D.Eng. a školitelům specialistům Mgr. Yuliiy Khmurovské, Ph.D. a Ing. Martinovi Petříkovi, Ph.D. za spolupráci, konzultace, cenné rady i konstruktivní kritiku. Velké poděkování patří také celé mojí rodině za jejich podporu.



# Abstrakt

V této disertační práci je prezentováno experimentální vyšetřování materiálů v neobvyklých podmínkách z pohledu přípravy vzorků, pomůcek a potřebných zkušebních zařízení, která je třeba buď výrazně modifikovat oproti jejich původní komerčně dostupné verzi, nebo sestrojít zcela nová zařízení s ohledem na snížení požadavků na těžko dostupné součástky a celkovou minimalizaci nákladů. Vývoj nových zkušebních metod je spjatý s vývojem testování nového materiálu, kterým je textilní beton s netkanou polypropylenovou textilií, a se získáváním dat potřebných k validaci simulací, výpočetních modelů a zkušebních nedestruktivních metod v oblasti výzkumu vlivu ionizujícího záření na beton. Vyvinutý textilní beton byl zkoumán z hlediska technologie výroby a mechanických vlastností. Pro svou schopnost tvořit velké množství mikrotrhlin byl úspěšně využit v oblasti zkoumání zacelování trhlin autogenním hojením, pro které byl navržen experiment s automatizovaným vyhodnocováním výsledků. Ve výzkumu vlivu ionizujícího záření na beton vznikají nové výpočetní modely, aby bylo možné predikovat stav betonových konstrukcí bez nutnosti použití destruktivního testování. Pro ověření vyvíjených nedestruktivních metod vyšetřování betonu byla vyrobena zkušební tělesa, kde vnitřní struktura betonu odpovídá různým úrovním degradace betonu vlivem ionizujícího záření. Dále byla navržena zkušební zařízení a pomůcky pro zjištění vlivu ionizujícího záření na smršťování a dotvarování cementové malty a na soudržnost výztuže a betonu. Také byl stanoven postup výroby vzorků pro zkoumání objemových změn kameniva vlivem ozáření. K ověření vlastností betonové směsi byl vyroben 4,6 m vysoký funkční vzorek, který byl zhotoven v bedně s plexisklovou stěnou pro vizuální kontrolu zatékání směsi. Též je prezentována výroba elektronického kontrolního systému vysokoteplotní pece a vývoj klimatického větrného tunelu. V závěru je konstatováno, že výzkumná práce v rámci této disertace, vedle získání aplikovatelných výsledků, posloužila jako motivace pro pochopení hlubších souvislostí nezbytných pro definování nových zkušebních metod a při návrhu původních zkušebních zařízení pro zvláštní použití.

## Klíčová slova

Textilní beton, TRC, netkaná textilie, autogenní hojení, experimentální testování, smršťování, dotvarování, automatizace zkoušení, ionizující záření



# **Abstract**

In this dissertation, an experimental investigation of materials under unusual conditions is presented from the point of view of the preparation of samples, tools, and the necessary test equipment, which must either be significantly modified compared to their original commercially available version, or completely new equipment must be constructed with regard to reduction of requirements for hard-to-find components and with regard to the overall cost minimization. The development of new test methods is related to the development and testing of a new material, which is the textile concrete with non-woven polypropylene fabric, and with the acquisition of data needed for the validation of simulations, numerical models, and non-destructive testing methods in the field of research of the effect of ionizing radiation on concrete. The developed textile concrete was investigated in terms of production technology and mechanical properties. Due to its tendency to create multiple microcracks, it was used successfully in the field of research of the crack self-healing. An automated evaluation of the results for the experiment was also designed. The research of the effect of ionizing radiation on concrete focuses mainly on the new numerical models for predicting the quality of concrete structures without the use of destructive testing. In order to verify and validate the currently being developed non-destructive methods for concrete evaluation, test samples were produced when microstructure of concrete corresponds to different levels of concrete degradation due to irradiation. In addition, test equipment and tools were designed to determine the effect of ionizing radiation on the creep and shrinkage of cement mortar and for assessment of the bond between reinforcing bar and irradiated concrete. A production technology for rock samples intended for the examination of volumetric changes of aggregates due to irradiation was also developed. In order to verify the properties of the concrete mixture, a 4.6meter high functional sample was made. The formwork was made with a plexiglas wall for visual inspection of the mixture homogeneity. The design of a electronic control system of the high-temperature furnace and the development of the climatic wind tunnel are also presented. It can be stated that the research work within this dissertation served, besides providing applicable results, as a motivation for understanding the deeper context whose comprehension is necessary for defining new testing methods and designing new testing equipment intended for application in rare conditions.

## **Keywords**

Textile reinforced concrete, TRC, non-woven fabric, autogenous healing, experimental testing, shrinkage, creep, testing automation, ionizing radiation

# Obsah

ÚVOD.....	13
1.1    Cíl práce .....	14
1    ZKOUŠENÍ TRC VZORKŮ.....	15
1.1    Současný stav výzkumu textilních betonů .....	15
1.1.1    Možnosti použití textilních betonů.....	16
1.1.2    Běžné postupy výroby TRC vzorků.....	19
1.1.3    Nejčastější zkoušky TCR kompozitu .....	19
1.2    Vývoj textilního betonu s netkanou textilií.....	23
1.2.1    Infiltrace malty do netkané textilie .....	23
1.2.2    Mechanické vlastnosti materiálu.....	25
1.2.3    Výsledky vývoje kompozitního materiálu a diskuse .....	36
1.3    Výzkum zacelování trhlin v betonu pomocí TRC s netkanou textilií .....	37
1.3.1    Zkušební tělesa .....	37
1.3.2    Automatizace vyhodnocování experimentů .....	40
1.3.3    Diskuse výsledků experimentu.....	41
2    VÝZKUM VLIVU IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ NA BETONOVÉ KONSTRUKCE .....	43
2.1    Zkušební tělesa pro nedestruktivní testování betonu v okolí ionizačních kanálů reaktorů typu VVER.....	43
2.1.1    Požadavky na zkušební tělesa.....	45
2.1.2    Návrh výroby poškozeného betonu .....	46
2.1.3    Výroba zkušebních těles.....	50
2.1.4    Diskuse výsledků.....	51
2.2    Vliv gama záření na smršťování a dotvarování cementové malty .....	53
2.2.1    Požadavky na zatěžovací zařízení.....	53
2.2.2    Návrh zatěžovacího zařízení .....	54
2.2.3    Realizace .....	55
2.2.4    Výsledky experimentu a diskuse.....	57
2.3    Zkoušení soudržnosti výztuže a betonu při ozáření .....	59
2.3.1    Zkouška soudržnosti .....	59
2.3.2    Výroba zkušebních těles.....	60
2.3.3    Rámový stojan pro ozařování vzorků .....	61
2.3.4    Úprava vzorků před testováním .....	64
2.3.5    Výsledek zkoušek .....	67

2.4	Jádrové vývrty průměru 10 mm .....	69
2.4.1	<i>Požadavky na kvalitu zkušebních těles</i> .....	70
2.4.2	<i>Výroba zkušebních těles z nerostů</i> .....	71
2.4.3	<i>Výroba zkušebních těles z betonu</i> .....	75
2.4.4	<i>Diskuse výsledků</i> .....	77
2.5	Ověření vlastností betonové směsi pro vyplnění kontejnerů pro ukládání radioaktivního odpadu .....	79
2.5.1	<i>Požadavky na funkční vzorek a průběh experimentu</i> .....	80
2.5.2	<i>Návrh experimentu</i> .....	80
2.5.3	<i>Ověření vlastností použitých materiálů</i> .....	82
2.5.4	<i>Výroba bednění</i> .....	85
2.5.5	<i>Průběh experimentu</i> .....	88
2.5.6	<i>Výsledky experimentu a diskuse</i> .....	89
2.6	Kontrolní systém pro vysokoteplotní pec .....	91
2.6.1	<i>Návrh kontrolního systému</i> .....	92
2.6.2	<i>Výsledné zařízení</i> .....	96
2.6.3	<i>Diskuse výsledku</i> .....	98
2.7	Klimatický větrný tunel .....	99
2.7.1	<i>Požadované funkce</i> .....	99
2.7.2	<i>Kontrolní systém</i> .....	100
2.7.3	<i>Vývoj návrhu klimatického tunelu</i> .....	101
2.7.4	<i>Další vývoj zařízení</i> .....	103
	ZÁVĚR .....	105
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	111
	SEZNAM VLASTNÍCH PUBLIKACÍ .....	117
	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	119
	SEZNAM TABULEK .....	123





# Úvod

Tato disertační práce se věnuje experimentálnímu vyšetřování materiálů v neobvyklých podmínkách z pohledu přípravy vzorků, pomůcek a potřebných zkušebních zařízení, která je třeba buď výrazně modifikovat oproti jejich původní komerčně dostupné verzi, nebo sestrojít zcela nová zařízení s ohledem na snížení požadavků na těžko dostupné součástky a celkovou minimalizaci nákladů.

Vývoj nových materiálů a výpočetních modelů je spjatý s vývojem nových zkušebních metod. Příkladem může být textilní beton, u něhož dosud neexistuje jednotný způsob zkoušení [1]. V jednotlivých výzkumech se liší nejen velikosti a tvary vzorků, ale i vzdálenosti podpor, nebo způsoby upevnění vzorků během testování [2-7]. Moderní výpočetní modely zase vyžadují velké množství těžko měřitelných vstupních parametrů, aby jejich vypovídací schopnost byla dostatečná. To lze vidět v případě výzkumu vlivu ionizujícího záření na beton, kdy je potřeba získat data potřebná k validaci simulací, modelů a zkušebních nedestruktivních metod, aby bylo možné predikovat stav betonových konstrukcí bez nutnosti použití destruktivního testování [8].

Vzhledem ke společnému průsečíku ve formě vývoje nových způsobů testování materiálů jsou obě zmíněná témata součástí této práce a dělí ji na dvě části. První část je věnována návrhu zkušebních postupů pro vzorky z textilního betonu s netkanou textilií a druhá je věnována problematice výzkumu vlivu ionizujícího záření na betonové konstrukce.

Textilní beton je kompozitní tenkostěnný materiál, který se skládá z cementové matrice a výztužných nekovových tkanin. Jedná se o materiál vhodný pro skořepinové konstrukce, jako součást sendvičových panelů, pro ochranné vrstvy konstrukcí nebo dokonce pro solitérní interiérové doplňky [9-21].

V současné době je celosvětově v provozu přibližně 400 jaderných reaktorů [22]. Mnohé reaktorové bloky jsou již na hranici své projektové životnosti a výstavba nových není dostatečná [23]. Je to důsledek odporu společnosti k této technologii po několika závažných haváriích, které negativně ovlivnily celý svět. Vývoj v oblasti energetiky si ovšem žádá, aby provoz současných elektráren nadále pokračoval. Logickým možným krokem je prodlužování životnosti těchto elektráren, které je ale podmíněno tím, že dojde k vyhodnocení stavu a zbytkové životnosti všech součástí zařízení [8]. Ovšem používané referenční hodnoty pro hodnocení kvality betonu vystavenému

ionizujícímu záření [24] jsou nedostatečné, poněvadž v době výstavby se s prodlužováním životnosti neuvažovalo, a je potřeba získat co nejvíce nových dat v co nejkratší době.

## **1.1 Cíl práce**

Cílem práce je návrh a realizace experimentů, zkušebních těles a zkušebních zařízení takovým způsobem, aby došlo k maximalizaci získaných dat při současné minimalizaci nákladů a úsilí. Oblastmi zkoumání jsou:

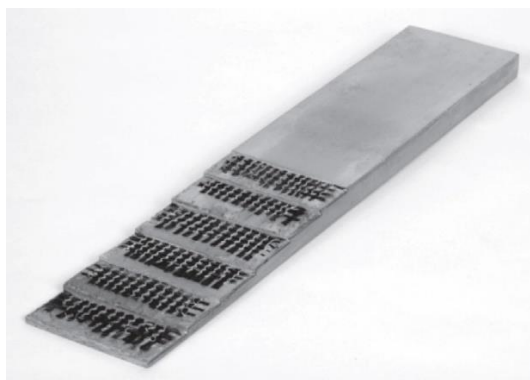
- Mechanické vlastnosti textilního betonu
- Zacelování trhlin v betonu
- Automatizace experimentů
- Vzorky pro nedestruktivní testování
- Smršťování a dotvarování betonu
- Soudržnost výztuže a betonu
- Vzorky hornin pro ozařování ionizujícím zářením
- Ověřování zpracovatelnosti betonu
- Externí řídicí systémy komerčních zařízení
- Klimatický větrný tunel

# 1 Zkoušení TRC vzorků

## 1.1 Současný stav výzkumu textilních betonů

Textilní beton (TRC = textile reinforced concrete) je detailněji zkoumán přibližně posledních 25 let, přičemž informací, vědeckých publikací i realizací konstrukcí z tohoto materiálu stále přibývá [1-7, 9-21]. Textilní beton je kompozitní materiál skládající se z jemnozrnné cementové matrice a textilní nekovové výztuže (Obrázek 1). Nejčastěji se používají výztužné textilie s orientovanými vlákny z alkalivzdorného skla nebo uhlíkových vláken. Z tohoto materiálu lze vyrábět tenkostěnné konstrukce, nebo je možné textilní beton kombinovat s dalšími materiály a vyrábět sendvičové konstrukce se specifickými vlastnostmi. Je také zkoumána možnost opravování povrchových vrstev a zesilování stávajících konstrukcí. Konstrukce z textilního betonu totiž vykazují dobré tahové vlastnosti a zvýšenou odolnost proti dynamickému zatěžování. Předpokládá se, že využitím nekovové výztuže dojde k prodloužení životnosti konstrukcí.

Skořepinové konstrukce z textilního betonu vykazují komplexní nelineární a anizotropní chování. Vzhledem ke kompozitnímu charakteru materiálu je obtížné stanovit jednoznačné materiálové charakteristiky. Nejběžnějšími zkouškami TRC jsou jednoosá tahová zkouška a zkouška pevnosti v tahu za ohybu. Dosud ovšem není stanoven jednotný způsob zkoušení a tvary a velikosti vzorků se výrazně liší. U konstrukcí složitějších tvarů je obtížné dobře kontrolovat rozmístění výztužných vrstev, a právě rozmístění výztužných vrstev hraje významnou roli při stanovení pevnosti materiálu v tahu za ohybu, zatímco na pevnost v jednoosém tahu tak velký vliv nemá. I proto je stanovení přepočtu mezi těmito zkoušenými vlastnostmi obtížné.



Obrázek 1 Vzorek textilního betonu se šesti výztužnými vrstvami [9]

### 1.1.1 Možnosti použití textilních betonů

Textilní beton je vhodný k výrobě tenkostěnných skořepinových konstrukcí. Tvar konstrukce lze navrhnout libovolně prostorově zakřivený a tloušťka skořepiny může být i pouhé 2-3 centimetry (Obrázek 2). Tyto konstrukce mají obvykle zvýšenou únosnost a přetvárnost oproti konstrukcím z běžného betonu. Materiál ovšem vykazuje i různé mechanismy porušení, které způsobují velmi nelineární odezvu konstrukce. Popis chování je ovlivněn mnoha faktory (vrstevnatost, heterogenita, soudržnost betonu s vlákny atd.). Je proto velice důležité stanovení vhodného výpočtového modelu a jeho kalibrace pomocí experimentálních zkoušek konkrétního materiálu [9].



Obrázek 2 Ukázka realizovaných konstrukcí z TRC [9]

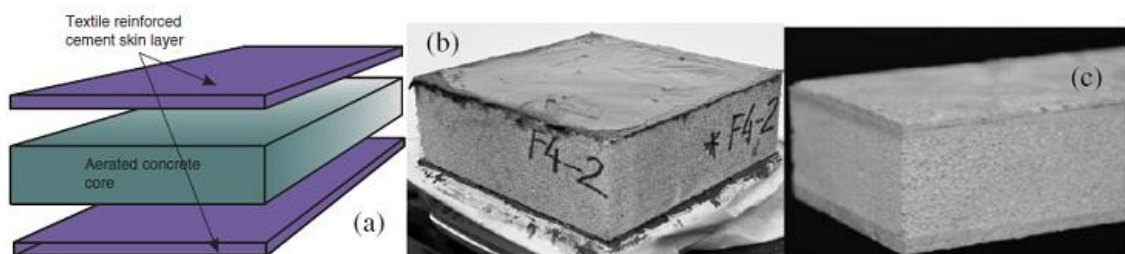
Z textilního betonu lze navrhnout dokonce obloukové zastřešení haly s rozpětím až 15 metrů. Model takové konstrukce s rozpětím 10 metrů a vzepětím oblouku 3 metry byl postaven v RWTH Aachen University v Německu (Obrázek 3). Konstrukce je složena z prefabrikátů kosočtvercového tvaru, které jsou spojené pomocí šroubů. Nosná konstrukce zastřešení je díky použití TRC lehká a dokáže přenést návrhové zatížení. Možnost prefabrikace a rychlého smontování na stavbě je taky velkou výhodou. Návrh stejné konstrukce z železobetonu by byl neekonomický, protože by při použití kovové výztuže muselo dojít ke zvětšení průřezů dílců. Tím by došlo ke zvýšení stálého zatížení, zvýšení spotřeby materiálu a ztížení manipulace s těžšími dílci.



Obrázek 3 Model konstrukce zastřešení haly s kosočtvercovou příhradovinou s rozpětím 3 metry [2]

Další možností využití TRC je výroba tenkých a lehkých sendvičových panelů. Jednou z možností je výroba fasádních panelů ze souvrství TRC-tvrzená pěna-TRC [10-12]. Povrchové vrstvy poskytují dostatečnou odolnost proti povětrnostním podmínkám a zatížení, zatímco tvrzená pěna konstrukci vylehčuje a dodá jí tepelně izolační vlastnosti. Tvrzená pěna může být vyrobena z expandovaného nebo extrudovaného polystyrenu nebo z polyuretanu. Jedním z hlavních problémů sendvičových panelů s tvrzenými pěnami je zajištění smykové soudržnosti mezi betonem a pěnou.

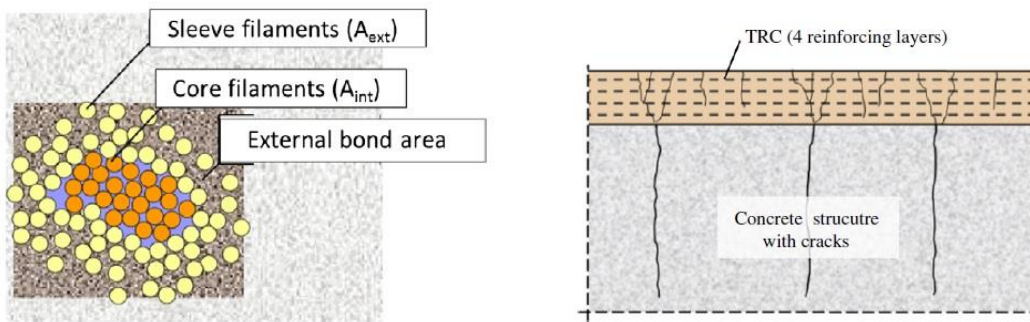
Tvrzená pěna může být zaměněna za další materiály, jako je např. trapézový plech [13] nebo pórobeton (Obrázek 4) [14]. Vytvoření takového souvrství dojde k navýšení únosnosti bez výrazného navýšení vlastní tíhy. Takováto souvrství navíc dokážou účinně absorbovat energii při nárazu cizího objektu [15].



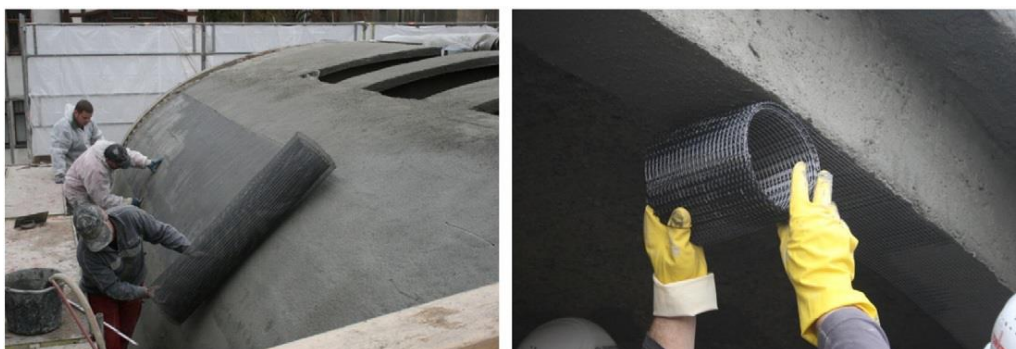
Obrázek 4 Souvrství TRC-pórobeton-TRC [14]

Nadměrným namáháním textilního betonu dojde k rozvoji mnoha malých mikrotrhlin. Toho lze využít v případech, kdy je potřeba omezit kapilární transport vody do betonu [16]. Textilní beton je tedy možné použít jako ochrannou vrstvu, která chrání železobetonovou konstrukci před působením povětrnostních podmínek. Při využití textilního betonu jako ztraceného bednění dokáže dobrá soudržnost zmenšit šířky trhlin, resp. makrotrhlina v železobetonu se rozdělí na několik menších trhlin v TRC (Obrázek 5) [3, 16]. Vrstvu textilního betonu lze aplikovat i na stávající konstrukci (Obrázek 6). Je však zapotřebí zajistit řádnou soudržnost TRC se stávající konstrukcí. Dobrá soudržnost mezi starým betonem a novou vrstvou je výhodná i při obnovení krycí vrstvy mostních pilířů, protože v případě dobré soudržnosti dokáže vrstva TRC zvýšit odolnost pilíře v kroucení. V případě špatné aplikace na stávající konstrukci je ale možné, že dojde k delaminaci (Obrázek 7)

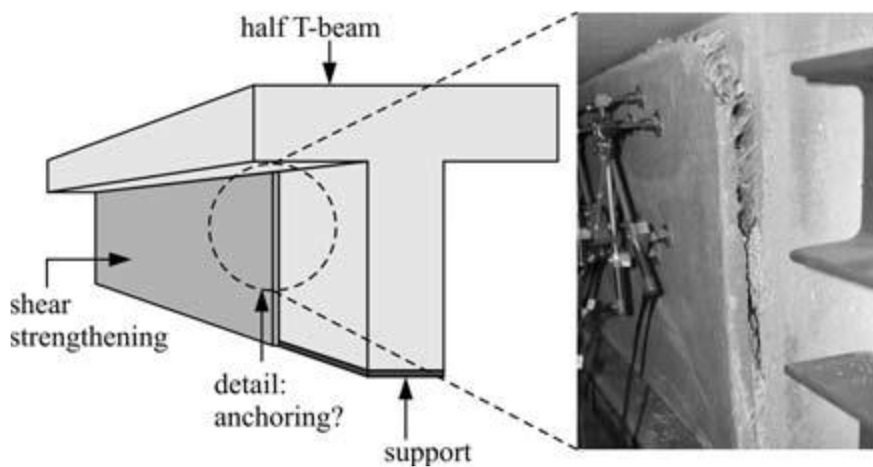
Při provádění ochranné vrstvy z textilního betonu na stávající konstrukci je třeba dbát řádných technologických postupů, protože soudržnost mezi betonem a výztužnými vlákny rozhoduje o výsledných vlastnostech materiálu. Při užití orientované výztuže se ukazuje, že dobrá soudržnost nemusí být zaručena pro všechna vlákna v průřezu (Obrázek 5) [2, 4-6].



Obrázek 5 Soudržnost vlákna s betonem [6] a tvorba mikrotrhlin při soudržnosti TRC s podkladem [3]



Obrázek 6 Zesilování stávající konstrukce vrstvou TRC [16]



Obrázek 7 Delaminace výztužné vrstvy [17]

Textilní beton je zkoumán i z hlediska požární bezpečnosti [1, 18]. Jeho využití by mohlo dočasně ochránit důležité konstrukční prvky a tím prodloužit dobu možné evakuace.



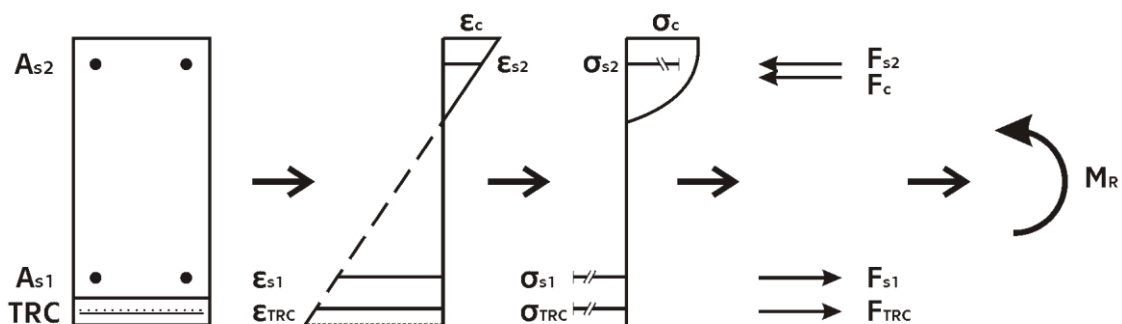
### 1.1.2 Běžné postupy výroby TRC vzorků

Existují dva nejběžnější postupy výroby. Jedním je využití stříkaného betonu, kdy se do bednění nanese 3-5 mm tlustá vrstva betonu a následně se do ní vtlačí výztužná textilie z uhlíkových vláken nebo z alkalivzdorného skla. Tento postup se opakuje, dokud není docíleno požadované tloušťky konstrukce. Druhou možností je příprava výztužných textilií v bednění a následné probetonování všech vrstev současně.

První postup má nevýhodu v nepřesném umístění výztužných vrstev. Tímto způsobem je ale možné betonovat i všesměrně zakřivené konstrukce bez rozsáhlých příprav. Druhý postup umožňuje kvalitnější provedení, ale je potřeba předem zafixovat výztuž v předepsaných polohách. U konstrukcí alespoň v jednom směru přímých lze výztuž natáhnout a zafixovat k bokům bednění. U všesměrně zakřivených konstrukcí je nutné předem přichystat trojrozměrnou výztužnou vložku, která je v bednění fixována pomocí distančních podložek.

### 1.1.3 Nejčastější zkoušky TCR kompozitu

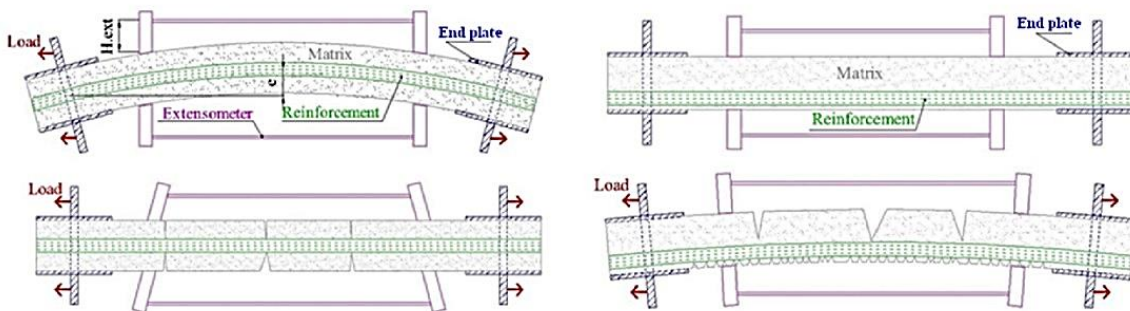
Často se uvažuje, že tenkostěnná vrstva bude součástí většího průřezu a bude tvořit taženou povrchovou vrstvu, např. jako ztracené bednění nebo jako dodatečná ochranná či výztužná vrstva. Aby bylo možné započítat účinek této vrstvy (Obrázek 8), je tedy potřeba znát pracovní diagram pevnosti v jednoosém tahu.



Obrázek 8 Výpočet momentu s uvažováním spolupůsobení TRC

### Zkouška pevnosti v jednoosém tahu

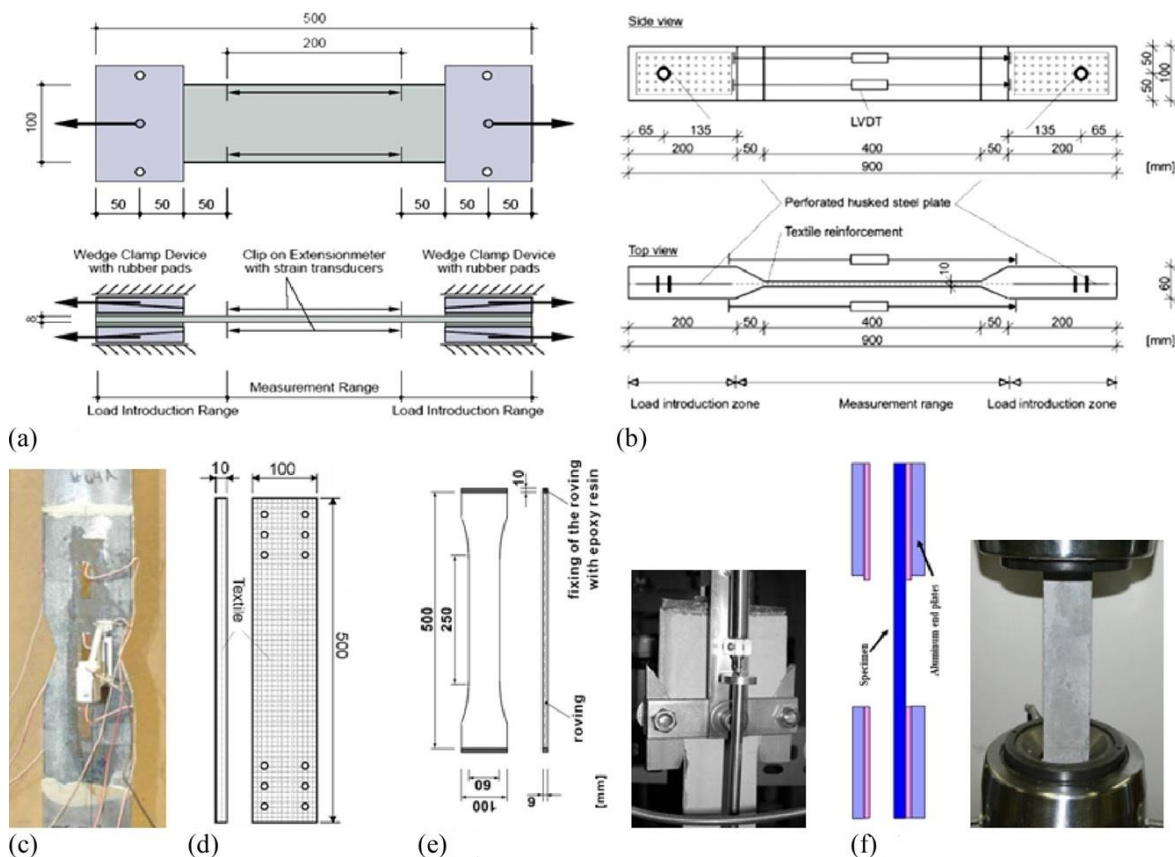
Nejčastější zkouškou textilního betonu je zkouška v jednoosém tahu [1, 4-7, 9, 18]. Při zkouškách jednoosého tahu může docházet ke zkreslování výsledků vlivem působením přidavného momentu. Ten může být způsoben nedokonalostmi zkušebních vzorků. Hlavními příčinami můžou být zakřivený tvar nebo nerovnoměrné vyztužení (Obrázek 9) [1].



Obrázek 9 Přídavné namáhání vzorků

Zleva: zakřivený tvar vzorku; nerovnoměrně vyztužený vzorek [1]

Dalším podstatným problémem v současné době je nestejnoroďnost zkoušených vzorků. Jednotlivé typy užívaných vzorků se dají rozdělit podle 4 tvarů (Obrázek 10). Nejrozšířenějším je využívání obdélííkových desek (Obrázek 10 a, d, f). Uchycení vzorků ve zkušebníím lise je tedy řešeno využitím samosvorných čelistí, uchycením vzorků mezi ocelové desky s otvorem pomocí šroubu a zdrsňného povrchu, nebo lepením ocelových desek ke vzorku pomocí pryskyřicových lepidel.



Obrázek 10 Různé druhy vzorků pro zkoušku pevnosti v jednoosém tahu [1]



Druhý typ vzorku je obdélníkového půdorysu, ale je upravena tloušťka konců (Obrázek 10 b). Uchytení vzorku je opět řešeno pomocí šroubového spojení s ocelovou deskou.

I v případě třetího typu vzorku je tvar upraven, jen s tím rozdílem, že není upravena tloušťka vzorku, ale půdorysný tvar (Obrázek 10 e). Tvar zakončení vzorku je zhotoven podle využitých uchycovacích čelistí. Takto zhotovené vzorky mají velké výhody při zkoušení, ale jejich výroba vyžaduje nákladnější formy a zvláštní péči při výrobě.

Posledním typem je vzorek s dvojitým V-vrubem (Obrázek 10 c). Tento typ vzorku má nevýhodu především v tom, že nezachycuje chování celého vzorku, ale jen nejslabšího předem definovaného průřezu v oblasti vrubu.

Porovnávání výsledků zkoušek ovlivňuje kromě tvaru vzorku i jeho celková velikost nebo velikost zkoumané oblasti v případě užití dalších měřících technik (např. tenzometrické měření). Textilní beton je schopen velkých deformací a pro podrobné zjištění materiálových vlastností je vhodné zaznamenávat celý průběh zkoušky. S možností velkých deformací je ovšem spojena časová náročnost zkoušek. Proto se často přistupuje k upravení rychlosti zatěžování, které opět vede ke zhoršení porovnatelnosti výsledků.

### **Zkouška pevnosti v tahu za ohybu**

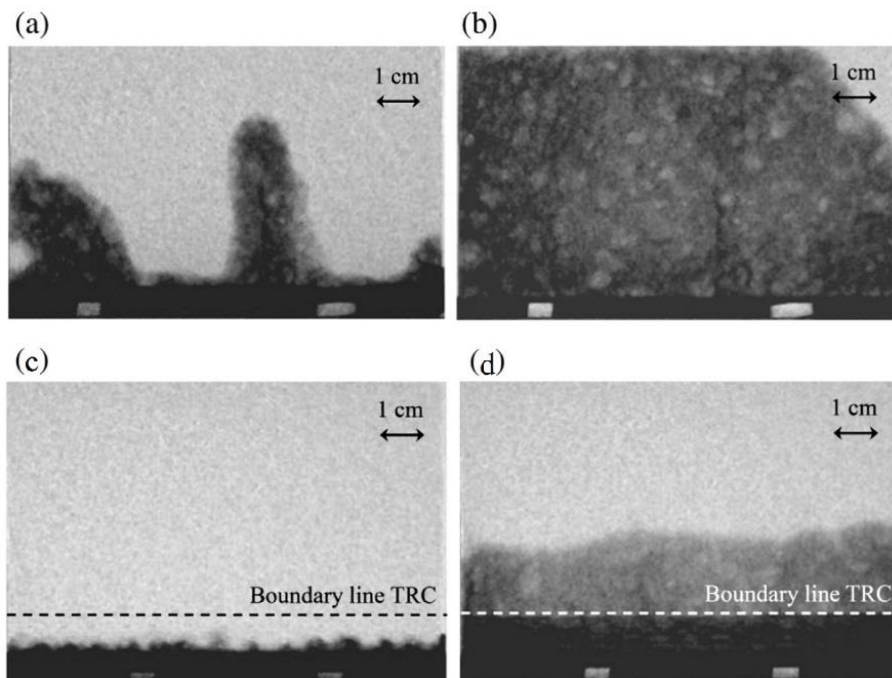
Druhou nejčastější zkouškou je stanovení pevnosti v tahu za ohybu [10, 17, 19]. Zkoušky jsou prováděné jak na samotném textilním betonu, tak především na vrstvených konstrukcích (Obr. 13). Ke zpřesnění popisu chování (porušování) materiálu lze současně s ohybovou zkouškou užít i nedestruktivní metody [20]. Převod pevností mezi ohybem a tahem je komplikovaný a postup, který v jednom případě může vykazovat 100% shodu převedené pevnosti s naměřenou, může v jiném případě určit hodnotu pevnosti i o 300 % odlišnou [21].



Obrázek 11 4-bodová zkouška tahu za ohybu vrstvené konstrukce s tvrzenou pěnou [10]

## Další typy zkoušek

Dalšími zkouškami se zjišťuje odolnost materiálů proti dynamickému zatěžování (především proti nárazu tělesa) [25], nasákavost (Obrázek 12) [16], nebo odolnost TRC proti vysokým teplotám [7].



Obrázek 12 Zkouška průsaku tlakovou vodou [16]

*a), b) běžný beton s trhlinami po 30 minutách (resp. 23 hodinách) od zahájení zkoušky; c), d) běžný beton s trhlinami dodatečně opatřený vrstvou TRC po 30 minutách (resp. 23 hodinách) od zahájení zkoušky*

## 1.2 Vývoj textilního betonu s netkanou textilií

V rámci této disertační práce byl vyvinut materiál tvořený souvrstvím netkaných polypropylenových geotextilií, výztužných textilií z alkalivzdorného skla a cementové malty. Materiály je možné vrstvit v různém pořadí a tím lze definovat výsledné vlastnosti. Výroba konstrukce spočívá ve vrstvení výplňových vrstev s netkanou textilií, do kterých je infiltrována cementová malta, a mezivrstev malty s výztužnou tkaninou. Výplňová vrstva je tvořena netkanou polypropylenovou geotextilií geoNETEX S 200g/m<sup>2</sup> (Obrázek 13). V mezivrstvě je použita tkanina z orientovaných alkalivzdorných skelných vláken s velikostí oka 4 mm. Polypropylen má menší pevnost a modul pružnosti než alkalivzdorné sklo, ale je lépe tvarově přizpůsobivý. Díky použití polypropylenové tkaniny je technologie výroby odlišná od klasických TRC, protože zde je možné infiltrovanou tkaninu lepit na připravené bednění nebo stávající konstrukci.



Obrázek 13 Geotextilie geoNETEX S 200g/m<sup>2</sup> [26]

### 1.2.1 Infiltrace malty do netkané textilie

Homogenní a plná infiltrace malty je zásadní pro dokonalé působení navrženého kompozitu. Proto bylo nejprve nutné stanovit, jak velké kamenivo je schopno infiltrovat netkanou textilií. V první fázi experimentu byly připraveny tři druhy malt, v nichž bylo použito kamenivo s maximální velikostí zrna 1 mm, 0,5 mm a 0,25 mm (Obrázek 14).



Obrázek 14 Výroba prvních vzorků [26]

Z experimentu vyšlo, že směsi s kamenivem větším jak 0,25 mm nejsou schopny infiltrovat textilii. U těchto směsí dojde k infiltraci jemných částic a kamenivo větší jak 0,25 mm zůstávají na povrchu bez dostatečného množství cementového pojiva (Obrázek 15 a Obrázek 16). Kvůli tomuto nedostatku pojiva pak nedošlo ke spojení jednotlivých vrstev (Obrázek 17) a docházelo k delaminaci jednotlivých vrstev.



Obrázek 15 Vzorek z malty s kamenivem 0-0,5 mm [26]



Obrázek 16 Vzorek z malty s kamenivem 0-1 mm [26]



Obrázek 17 Nepropojení vrstev [26]



Malta s velikostí kameniva do 0,25 mm byla vyhodnocena jako vhodná k infiltraci netkané textilie. Vzorek byl dobře probetonován a povrch byl hladký bez uvolněného kameniva (Obrázek 18). Zároveň nedocházelo k delaminaci vrstev (Obrázek 19). Využití takto malého kameniva pro celý materiál by nebylo udržitelné, proto byla v dalším výzkumu směs v kamenivem 0-0,25 mm využívána jen k infiltraci netkané textilie. Pro mezivrstvy a povrchové vrstvy byla použita směs s hrubším kamenivem.



Obrázek 18 Vzorek z malty s kamenivem 0-0,25 mm [26]



Obrázek 19 Soudržnost vrstev vzorku z malty s kamenivem 0-0,25 mm [26]

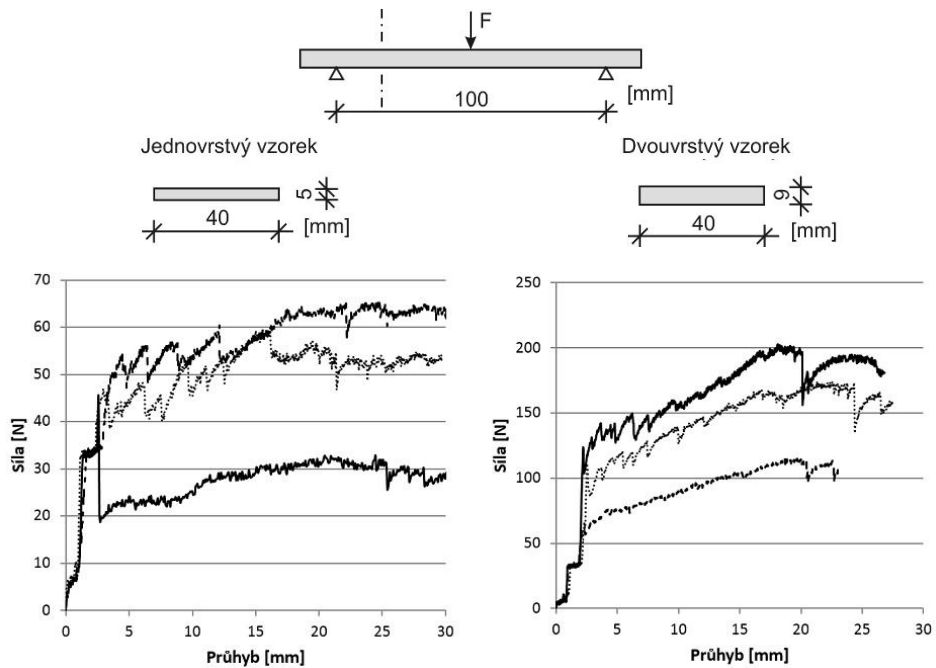
### 1.2.2 Mechanické vlastnosti materiálu

S ohledem na možnou budoucí standardizaci zjišťování a ověřování mechanických vlastností TRC betonu je vhodné vycházet z běžně užívaných uspořádání zkoušek a pro ně potřebných zařízení, která jsou součástí současných akreditovaných laboratoří. Tedy zejména byly ověřovány a dále dle potřeby upravovány postupy pro tříbodovou a čtyřbodovou zkoušku pevnosti v tahu za ohybu a zkoušku pevnosti v jednoosém tahu. Dále byly vyvinuty a definovány i zcela nové zkušební postupy.

#### **Tříbodová zkouška pevnosti v tahu za ohybu**

Na prvních vyrobených vzorcích byla provedena zkouška pevnosti v tahu za ohybu. Vzhledem k tomu, že není pevně stanoveno, jakým způsobem textilní beton testovat, byly vyrobeny malé vzorky 40x120 mm. Vzorky byly zatěžovány uprostřed rozpětí, které měřilo 100 mm. Testování bylo prováděno na jednovrstvých a dvouvrstvých vzorkách. Z výsledků je patrné, že se jedná o materiál se zpevněním. Současně je ale

nutné konstatovat, že materiál vykazuje značný rozptyl výsledků (Obrázek 20). U jednovrstvých vzorků bylo možné pozorovat vznik hlavní trhliny, zatímco u dvouvrstvých vzorků došlo k rozvoji většího množství mikrotrhlin (Obrázek 21 a Obrázek 22). Z chování vzorků lze konstatovat, že jednovrstvý materiál je vhodný na ochranné nebo zesilující vrstvy stávajících konstrukcí a je pro něj vhodná spíše zkouška pevnosti v jednoosém tahu.



Obrázek 20 Výsledky tříbodové zkoušky pevnosti v tahu za ohybu [26]



Obrázek 21 Řez zkušebním tělesem [26]



Obrázek 22 Trhliny v porušených vzorcích (vlevo: jednovrstvý, vpravo: dvouvrstvý) [26]

### Čtyřbodová zkouška pevnosti v tahu za ohybu

V dalším testování došlo ke změně typu zkoušky i k úpravě velikosti vzorků. Zatímco první vzorky byly vyrobeny především ručním vtěsnáním malty do netkané geotextilie, tak výroba dalších vzorků již respektuje požadavek na technologii vhodnou pro průmyslovou výrobu (Obrázek 23). Jednotlivé typy vzorků byly vyhotoveny v rozměru 1,0x0,5 metru a následně byly nařezány na rozměry 100x400 mm (Obrázek 24).



Obrázek 23 Proces výroby zkušebních vzorků

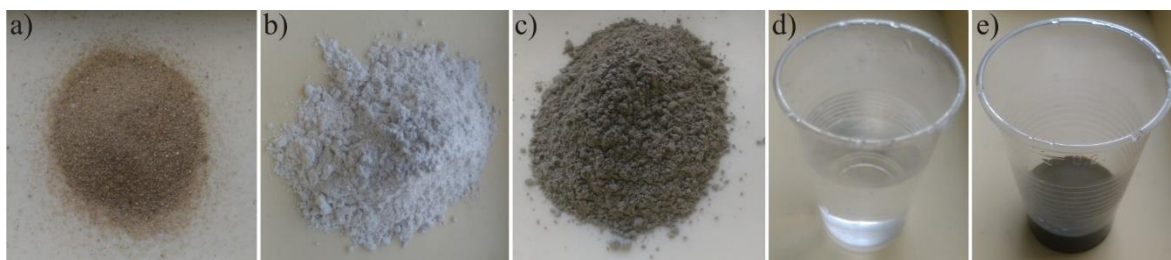


Obrázek 24 Řezání vzorků

K infiltraci netkané geotextílie byla využita malta s maximální velikostí zrna 0,25 mm, vodním součinitelem 0,5 a s využitím superplastifikační přísady (Obrázek 25). Vysoký vodní součinitel měl negativní dopad na kvalitu vzorků. Upravením technologie bylo docíleno snížení vodního součinitele až na 0,35. Mezivrstva s výztužnou tkaninou je tvořena maltou s maximální velikostí zrna 2 mm (Obrázek 26). Přestože byla malta

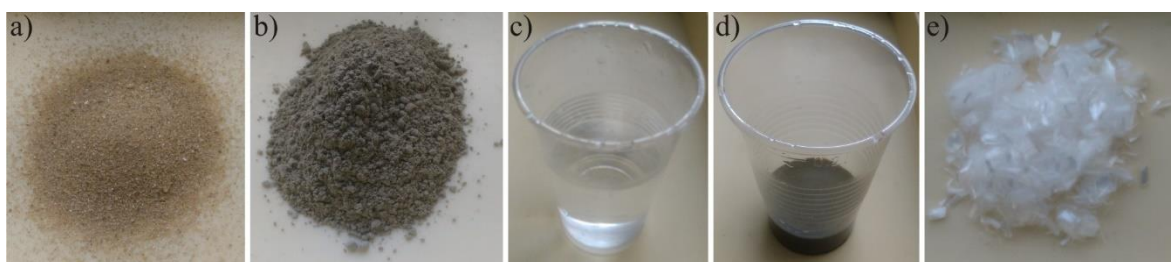


nanášena pouze z jedné strany, došlo k probetonování netkané geotextílie a spodní povrch vzorků při řádném zhutnění nevykazuje vážné nedostatky (Obrázek 27)



Obrázek 25 Složky směsi pro infiltraci netkané textilie [27]

a) kamenivo (0-0,25 mm); b) mikromletý křemičitý písek; c) cement; d) voda; e) superplastifikační přísada



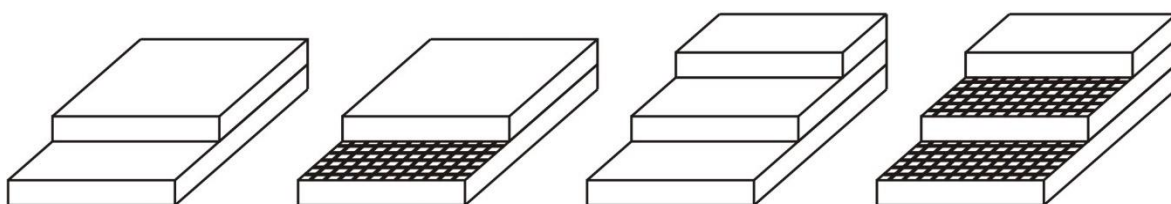
Obrázek 26 Složky směsi mezivrstvy [27]

a) kamenivo (0-2 mm); b) cement; c) voda; d) superplastifikační přísada; e) polypropylenová vlákna



Obrázek 27 Spodní povrch vzorků (zleva: dobře zhutněný vzorek; nedostatečně zhutněný vzorek)

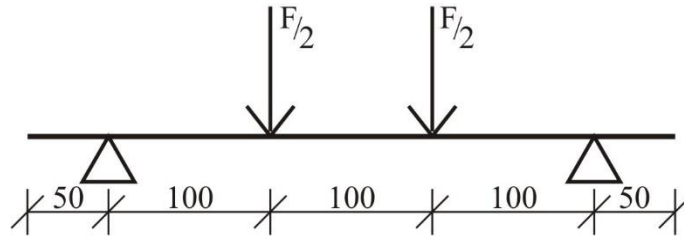
Pro experiment byly vyrobeny vzorky se dvěma a třemi vrstvami netkané textilie a s využitím a bez vyžití výztužné tkaniny v mezivrstvách (Obrázek 28).



Obrázek 28 Typy vyrobených vzorků [27]



Chování materiálu bylo zjišťováno pomocí čtyřbodové zkoušky pevnosti v tahu za ohybu s rozpětím podpor 300 mm. Ztížení bylo místěno sil ve třetinách rozpětí (Obrázek 29). Vzhledem k předpokladu velké deformovatelnosti vzorků byla rychlost zatěžování, resp. rychlost posunu příčnicku lisu, stanovena na 5 mm/min. Maximální průhyb vzorku byl stanoven na 45 mm. Tato hodnota vyplývá z konstrukce použitého přípravku zkušebního lisu (Obrázek 30).

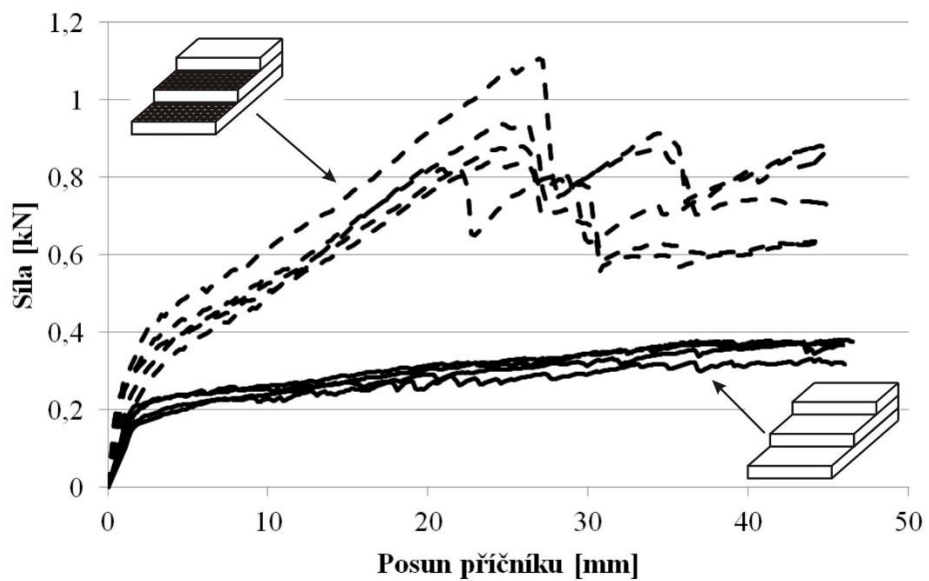


Obrázek 29 Konfigurace 4-bodové zkoušky pevnosti v tahu za ohybu [28]



Obrázek 30 Maximální průhyb vzorku [27]

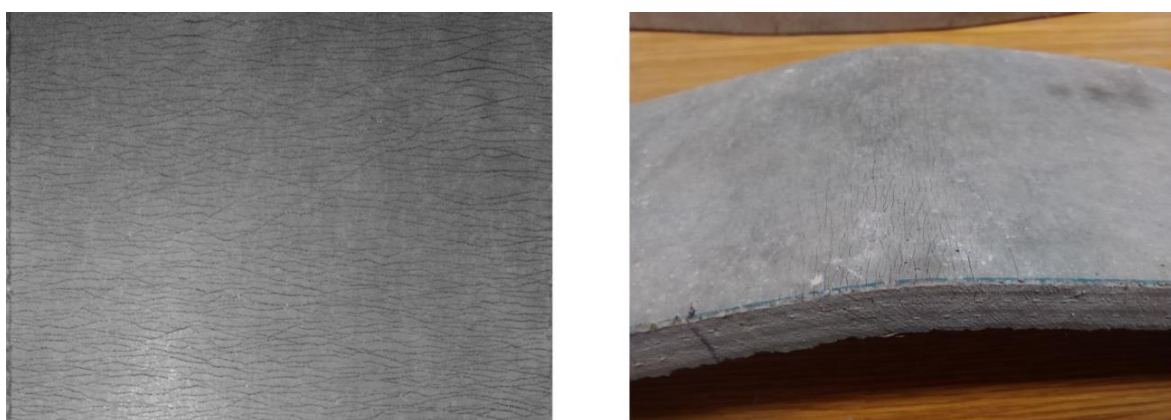
Materiál prokázal velkou deformovatelnost, aniž by zkoušky končily celkovým porušením vzorku. Z výsledků zkoušky (Obrázek 31) je patrné, že výrobou větších vzorků došlo k odstranění rozptylu výsledků. U vzorků bez skleněné výztužné tkaniny docházelo až do konce zkoušky ke zpevňování materiálu. Materiál vyztužený skleněnou tkaninou vykazoval výrazně zlepšené vlastnosti. Při větších deformacích však docházelo ke snižování přenesené síly, což bylo způsobeno přetržením výztužných vláken nebo částečnou delaminací materiálu v úrovni výztužné vrstvy. Velká část deformace vzorku je nevratná (Obrázek 32) a vzniká při ní velké množství mirkotrhlín (Obrázek 33).



Obrázek 31 Výsledky 4-bodové zkoušky pevnosti v tahu za ohybu [28]



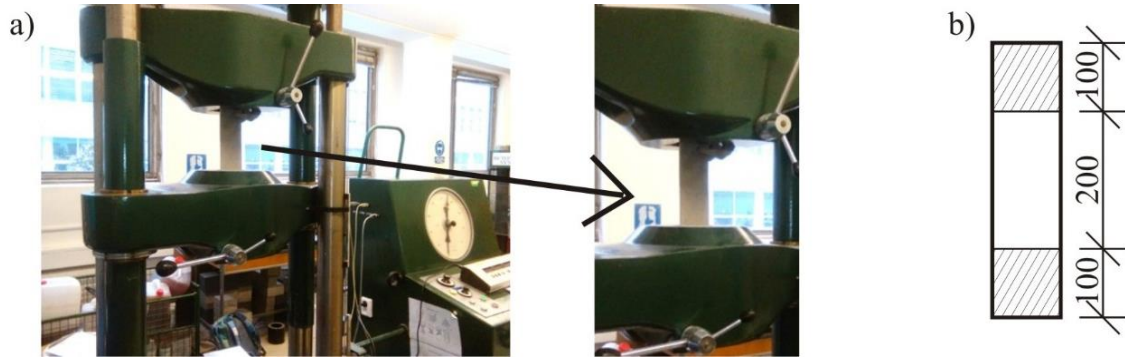
Obrázek 32 Nevratná deformace vzorku [28]



Obrázek 33 Mikrotrhliny [29]

## Zkouška pevnosti v jednoosém tahu

Chování materiálu při tahovém zatížení bylo zkoumáno na dvouvrstvých vzorkách. K testování byly vyrobeny obdélníkové vzorky velikosti 100x400 mm. Vzorky byly ve zkušebním lisu uchyceny pomocí samosvorných čelistí. Zkoušená oblast vzorku měla velikost 200 mm (Obrázek 34). Rychlost zatěžování, resp. rychlost posunu příčnicku, byla stanovena na 5 mm/min.

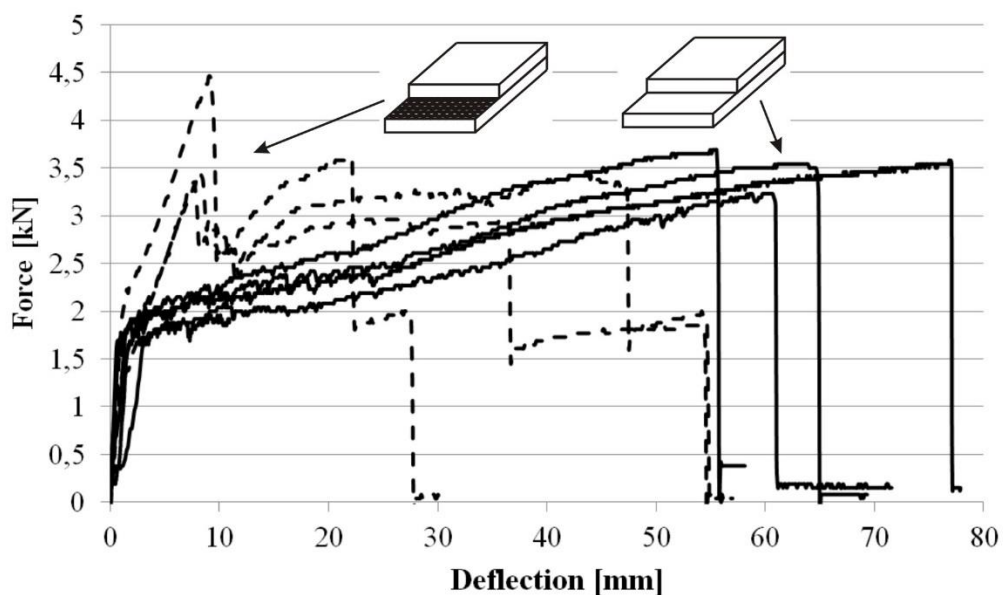


Obrázek 34 Zkouška pevnosti v jednoosém tahu [28]

a) vzorek ve zkušebním lisu; b) konfigurace zkoušky

Vlastnosti a chování vzorků bez skelné výztuže byly dle výsledků velmi podobné (Obrázek 35). Nejprve došlo k rozvoji počátečních trhlin, potom došlo k aktivaci polypropylenových vláken textilie, a nakonec došlo k přetržení vzorku. K přetržení docházelo při protažení nejméně o 50 mm, což odpovídá poměrnému přetvoření 25 %.

Vzorky vyztužené skelnou výztuží vykazovaly větší rozptyl výsledků. Ten byl způsoben delaminací jednotlivých vrstev, přičemž hlavní příčinou byla přítomnost výztužné textilie (Obrázek 36). Při poměrném přetvoření do 5 % ale k delaminaci nedocházelo.



Obrázek 35 Výsledky zkoušky pevnosti v jednoosém tahu [28]



Obrázek 36 Delaminace dvouvrstvého vzorku se skelnou výztužnou tkaninou [28]

### **Zkouška odolnosti materiálu proti vysokým teplotám**

Provedené zkoušky odhalily, že využití polypropylenové textilie výrazně omezuje únosnost materiálu a vyztužení tužší výztužnou tkaninou není vzhledem k delaminaci vrstev nejvhodnějším řešením. Materiál však dokáže díky velké deformovatelnosti a vývoji mikrotrhlin plnit funkci ochranné vrstvy.

Vzhledem k hořlavosti polypropylenu byla provedena doplňující zkouška odolnosti proti extrémním teplotám. Pomocí plynového hořáku byl povrch dvouvrstvého materiálu zahříván na teplotu 1200 °C po dobu 10 minut (Obrázek 37). Během zkoušky se vzorek rozžhvil a uniklo z něj malé množství dýmu. Z výsledku testu je patrný potenciál k využití materiálu pro ochranné vrstvy i s ohledem na požární odolnost stávajících konstrukcí.

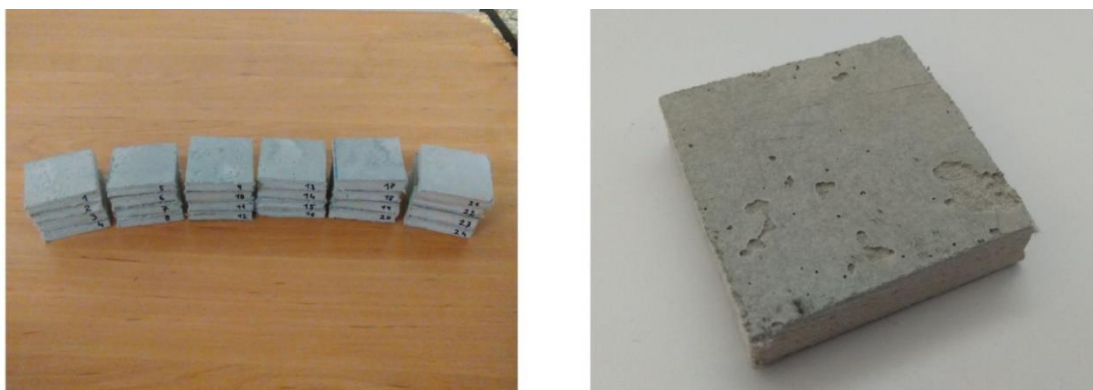


Obrázek 37 Zahřívání zkušebního tělesa teplotu 1200 °C

Zleva: průběh zkoušky; horní povrch po vychladnutí; spodní povrch po vychladnutí



Druhou zkouškou odolnosti vyvíjeného materiálu bylo dlouhodobé zatížení vzorků vysokou teplotou. Pro tento experiment byla vytvořena zkušební tělesa o rozměrech 50 x 50 mm (Obrázek 38). Zkušební tělesa byla vyrobena z jedné velké desky, aby byly vlastnosti všech těles shodné. Vzorky byly vyrobeny ze dvou vrstev polypropylenové textilie a mezivrstvou s výztužnou tkaninou z alkalivzdorného skla.



Obrázek 38 Testovací vzorky [30]

Bylo vytvořeno sedm sad po čtyřech vzorkách. Jedna sada byla určena jako referenční pro zjištění počáteční vlhkosti ve materiálu. Ostatní sady byly vystaveny různým teplotám. Vlhkost byla zjišťována gravimetrickou metodou. Referenční tělesa byla nejprve zvážena a následně vysušována při teplotě 115 °C. Po vysušení byla tělesa opět zvážena a byla zjištěna průměrná počáteční vlhkost materiálu 9,1 % hm. Podle ČSN 1992-1-2 se má brát v potaz, že při vlhkostech materiálu přesahujících 3 % hm. dochází za požáru u běžných betonů k odštěpování krycí vrstvy. Před zahájením experimentu byla zvážena i ostatní zkušební tělesa. U měřeného hmotnostního úbytku vlivem vysokých teplot je potřeba počítat s tím, že úbytek souvisí nejen s únikem vody z materiálu, ale i s vypařováním polypropylenové tkaniny.

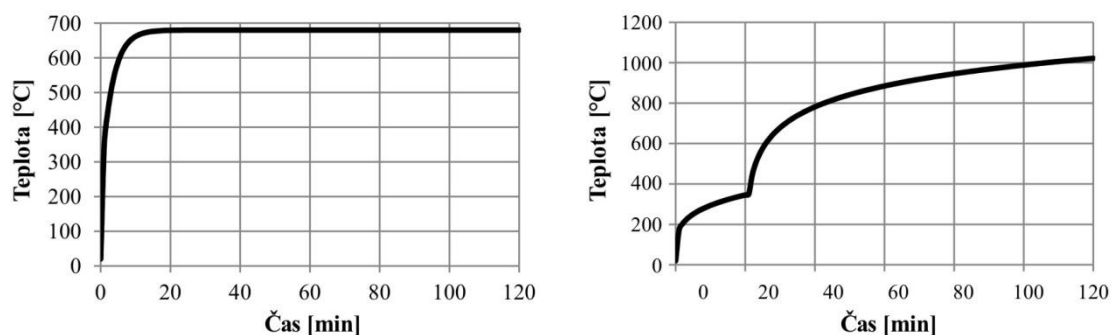
Vystavování stavebních konstrukcí vysokým teplotám má negativní vliv na mechanické vlastnosti bez ohledu na materiál, ze kterého je konstrukce zhotovena. U běžného betonu dochází k výrazným změnám mechanických vlastností kolem teploty 200 °C. To souvisí se změnami, které v materiálu probíhají (Tabulka 1).

Tabulka 1 Dopad vysokých teplot na beton [31]

Teplota [°C]	Dopad teploty na beton
100	Ztráta vody vázané v pórech
100-850	Dehydratace hydrátů
400-600	Dehydratace Ca(OH) <sub>2</sub>
574	Krystalická transformace křemíku
600-900	Rozklad CaCO <sub>3</sub>
1200-1500	Tavení Portlandského cementu

Textilie použitá ve zkušebních tělesech byla vyrobena ze 100% isotaktického polypropylenu. U polypropylenu se uvádí, že k měknutí materiálu dochází při teplotách v rozmezí 140 – 150 °C. K tavení pak dochází při teplotách mezi 160 – 170 °C [32].

Během experimentu byly jednotlivé sady vzorků vystavovány teplotám 100 °C, 150 °C, 200 °C, 350 °C, 500 °C a 650 °C po dobu 60 minut. Zvolené teploty přibližně odpovídají teplotám na normové křivce působení vnějšího požáru (Obrázek 39). Křivka prezentuje vystavení vnějšího líce obvodové stěny požáru vystupujícímu z okna nebo volně hořícímu vnějšímu požáru. Zjištěné výsledky lze aplikovat i na normovou křivku pomalého zahřívání pro doutnající požár v prvních 30 minutách jejího průběhu. Křivku se používá pro prvky, jejichž vlastnosti závisí na vysoké intenzitě zahřívání cca pod 500°C., jako jsou např. zateplené fasády.



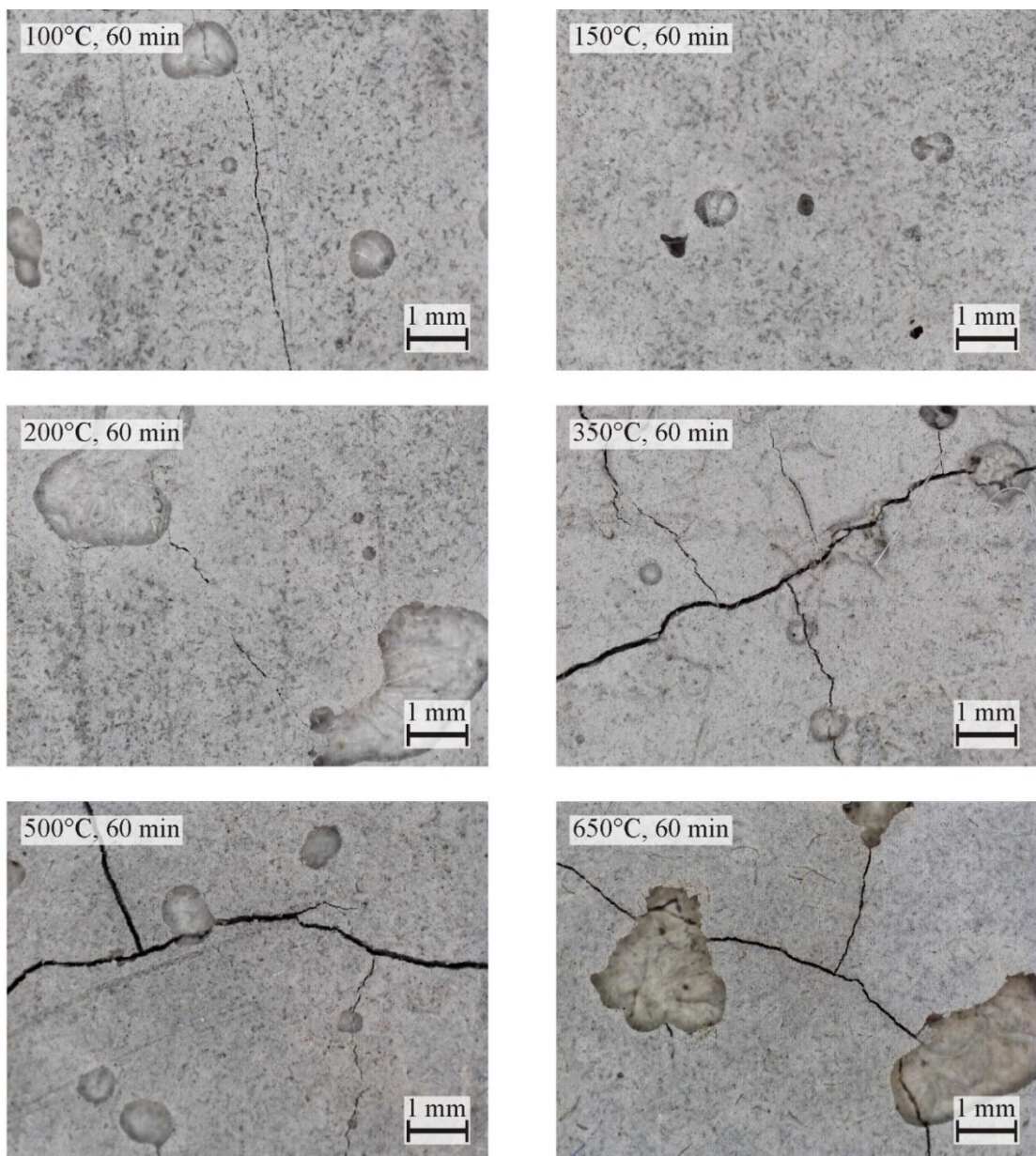
Obrázek 39 Normová křivka působení vnějšího požáru (vlevo) a pomalého zahřívání [33]

Tabulka 2 Hmotnostní vývoj zkušebních těles před zahřátím a po zahřátí na konkrétní teplotu [33]

Č.	T [°C]	Hmotnost [g]		Hmotnostní úbytek [%]	Č.	T [°C]	Hmotnost [g]		Hmotnostní úbytek [%]
		Před	Po				Před	Po	
1	100	31.14	30.56	1.9	13	350	28.16	27.92	0.9
2		32.36	30.12	7.4	14		30.18	29.98	0.7
3		29.88	28.12	6.3	15		35.98	34.02	5.8
4		30.10	27.98	7.6	16		29.92	28.14	6.3
5	150	28.12	27.94	0.6	17	500	36.14	32.00	12.9
6		30.14	28.08	7.3	18		28.14	25.86	8.8
7		27.86	26.12	6.7	19		30.28	28.06	7.9
8		27.14	25.68	5.7	20		39.82	33.92	17.4
9	200	34.16	34.02	0.4	21	650	31.96	29.96	6.7
10		34.44	31.88	8.0	22		32.12	29.88	7.5
11		31.78	29.62	7.3	23		31.88	28.02	13.8
12		30.02	28.06	7.0	24		31.28	28.02	11.6

U zkušebních těles byl zjišťován hmotnostní úbytek zapříčiněný vysokými teplotami v průběhu experimentu (Tabulka 2). Při vyšších teplotách byl úbytek způsoben nejen úbytkem vody, ale i polypropylenu.

U zkoumaných vzorků nedocházelo k odštěpování, přestože byla vlhkost vyšší jak 3 % hm. Při teplotách do 200 °C docházelo ve vzorcích pouze k vývoji mikrotrhlin v šířce maximálně 0,02 mm. Vlákna polypropylenové textilie viditelná v pórech a lunkrech po mikroskopem nevykazovala výrazné změny. U vzorků zahříváných na 350 °C došlo po přibližné 30 minutách k tvorbě trhlin, které měly na konci experimentu šířku do 0,1 mm. Při teplotách nad 500 °C docházelo u vzorků k tvorbě trhlin s šířkou 0,1 mm již po 5 minutách. Do konce experimentu se ovšem trhliny nezvětšovaly (Obrázek 40). Prvních minutách ale docházelo k úniku kouře ze vzorků.



Obrázek 40 Povrch betonů pod mikroskopem DigiMicro Profi II [30]

### 1.2.3 Výsledky vývoje kompozitního materiálu a diskuse

Vedle ověření a navržení nových zkušebních postupů byl v rámci tohoto procesu vyvinut kompozitní TRC materiál, který sám o sobě je vhodný pro různé specifické aplikace.

Byl tedy vyvinut materiál, který vzniká vrstvením probetonované netkané textilie s mezisvrstvami s výztužnou tkaninou z alkalivzdorného skla. Během vývoje materiálu byl stanoven výrobní postup a byly zjištěny základní mechanické vlastnosti a odezva na vysoké teploty. Mezi výhody materiálu patří lepší možnosti nanášení textilie na stávající konstrukci. Nevýhodou pak je velikost kameniva v maltě na probetonování textilie, která nesmí překročit 0,25 mm.

Materiál je schopen při zatížení velkými deformacemi, které jsou doprovázeny vznikem velkého množství mikrotrhlin. Při využití výztužných tkanin v mezivrstvách sice narůstají hodnoty pevností, ale výztužná tkanina zhoršuje soudržnost vrstev a napomáhá delaminaci. Možnosti využití TRC s netkanou textilií tedy jsou:

- Ztracené bednění  
Desky nebo tvarovky sloužící jako ztracené bednění.
- Deskový materiál na příčky, podhledy...  
Lehké, snadno dělitelné desky, použitelné i ve vlhkých provozech.
- Tlumiče nárazu/svodidla  
Prostorová konstrukce určená k pohlcení energie při nárazu např. automobilu.
- Protihluková stěna  
Stěnu by v případě nehody mělo být možné snadno překonat pomocí běžného vybavení hasičských vozů.
- Obrubníky  
TRC s netkanou textilií je možné použít na vnější obal, který bude vyplněn méně kvalitním betonem, např. s recyklovaným kamenivem.
- Rekonstrukce a ochranné vrstvy  
Obnova poškozené krycí vrstvy nanesením vyvíjeného materiálu in-situ.
- Výzkum zacelování trhlin

Ukázalo se, že velký potenciál materiálu je ve výzkumu zacelování trhlin, protože v materiálu je možné vytvořit velké množství trhlin na malé ploše vzorku a povrchová vrstva s trhlinami může být zhotovena z malty vyšetřovaného betonu. Další výzkum TRC se proto zaměřil na stanovení postupů a automatizaci experimentů spojených s výzkumem zacelování trhlin



## **1.3 Výzkum zacelování trhlin v betonu pomocí TRC s netkanou textilií**

Betonové konstrukce obsahují trhliny prakticky vždy. U konstrukcí podzemní stavby jsou trhliny častý problém. V případě vysoké hladiny podzemní vody může v souvislosti s trhlínami docházet k degradaci betonu a ke snižování životnosti celé stavby. Omezit množství a velikost trhlin je možné vhodným návrhem konstrukce. V případech nepříliš vhodného návrhu a rozvoje mnoha velkých trhlin se přistupuje k různým sanačním opatřením.

Jedním z častých způsobů řešení problému s trhlínami je použití přísad nebo nátěrů způsobujících sekundární krystalizaci. Primárním účelem těchto příměsí je podpoření autogenního hojení trhlin v betonu [34-39]. V poslední se výzkum zaměřuje i na využívání mikroorganismů jako je *bacillus pseudofirmus* [40-41]. Tyto mikroorganismy se ale zatím v praxi běžně neužívají.

Přísady způsobující sekundární krystalizaci jsou podle výzkumů funkční. V případě využití v reálných konstrukcích výsledky tak přesvědčivé nejsou. To může být zapříčiněno rozdílnými okrajovými podmínkami v laboratoři a na stavbě. Stanovení optimálních okrajových podmínek je vzhledem k množství kombinací různých parametrů (teplota, vlhkost, šířka trhlin atd.) zdoluhavý proces. Pro výzkum je nutné vyrobit co nejmenší vzorky s co největším počtem trhlin různých velikostí. Výroba vzorků z textilního betonu s netkanou textilií se ukázala jako dobré řešení.

### **1.3.1 Zkušební tělesa**

Pro výzkum vývoje a zacelování trhlin se často používá standardní zkušební krychle o délce hrany 150 mm nebo 100 mm, která je vyrobena se zkoumané směsi s přídavkem vláken. Použití vláken umožňuje vytvořit na krychli trhlínu, ani by hrozilo rozlomení vzorku. Výhodou je především to, že je vzorek vyroben téměř z totožné směsi, jako skutečná konstrukce. Nevýhodou ovšem je malé množství trhlin vzhledem k velkému množství použitého materiálu.

Při využití textilního betonu sice není možné použít větší frakce kameniva, ale povrchová vrstva, ve které vzniknou trhliny, může být z malty s kamenivem velikosti v řádu jednotek milimetrů. Přestože směs není totožná, tak vzorky z TRC umožňují při malém objemu vzorků získat velké množství dat, na kterých se dají pozorovat určité vlastnosti a trendy. Výhody u zkušebních těles z TRC převažují (Tabulka 3 a Obrázek 41).

Tabulka 3 Porovnání zkušebních těles [42]

Zkušební krychle	Zkušební tělesa z TRC
+ Shodná směs betonu s reálnou konstrukcí	– Rozdílná směs betonu s reálnou konstrukcí
– Potřeba větších skladovacích prostor	+ Potřeba menších skladovacích prostor
– Jedna trhлина v jednom zkušebním tělese	+ Mnoho trhlin v jednom zkušebním tělese
– Problematické vytváření trhliny	+ Jednoduché vytváření trhlin
– Větší trhliny (0,1 – 0,6 mm)	+ Menší trhliny (0,05 – 0,15 mm)
– Obtížnější manipulace se zkušebními tělesy	+ Jednoduchá manipulace se zkušebními tělesy
– Větší spotřeba materiálu	+ Menší spotřeba materiálu
+ Snadné zkoušení propustnosti	– Těžší zkoušení propustnosti



Obrázek 41 Porovnání zkušebních těles [42]

### Výroba zkušebních těles

Zkušební vzorky z TRC je možné vyrobit rovnou v požadované velikosti, nebo je možné vyrobit velký kus, ze kterého se nařežou menší vzorky. Řezání vzorků z větších kusů lze doporučit ze dvou důvodů. Jednak je kvalita zhotovení vzorků shodná a řezaná hrana je oproti betonované hraně rovnější a čistší (Obrázek 42). Během betonáže je nutné použít pro infiltraci textilie kamenivo maximální velikosti 0,25 mm, ale pro povrchové vrstvy a mezivrstvy lze použít cementovou maltu směsi betonu.

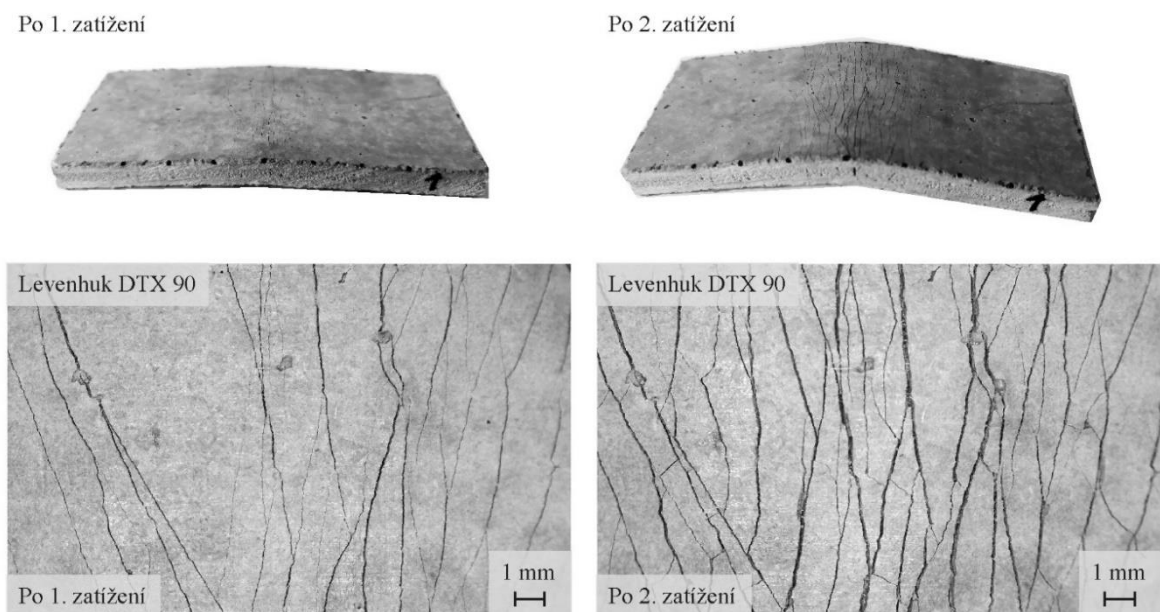


Obrázek 42 Zkušebních tělesa [43]

## Tvorba trhlin ve vzorcích z textilního betonu

Trhliny je možné ve vzorku vytvořit pomocí tahového nebo ohybového namáhání. Při využití tahového namáhání vzniknou trhliny v celé oblasti mezi samosvornými kleštinami. Po odtížení se trhliny uzavírají a celý vzorek je náchylný na deformace při pouhé manipulaci. Takový vzorek by bylo nutné zafixovat. V opačném případě by hrozilo znehodnocení výsledků experimentu.

V případě využití ohybového namáhání vícevrstvých vzorků dochází k trvalé deformaci a při manipulaci nedochází deformacím vzorku. Velikostí deformace lze definovat šířku trhlin (Obrázek 43). Zakřivení vzorku je hlavní nevýhodou při vyhodnocování experimentu.



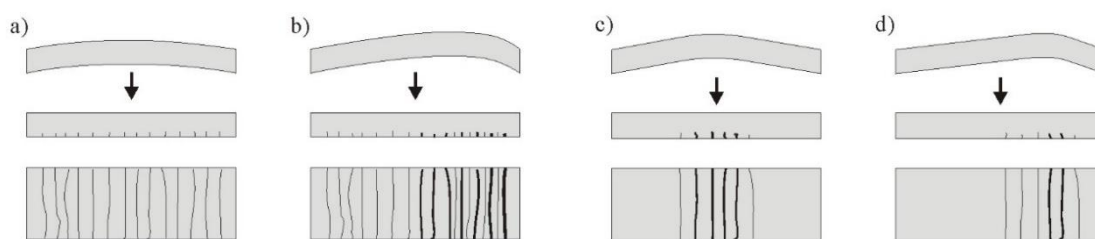
Obrázek 43 Rozvoj trhlin po opakovaném zatěžování zkušební vzorku [44]



Obrázek 44 Vyhodnocování zakřiveného vzorku [44]

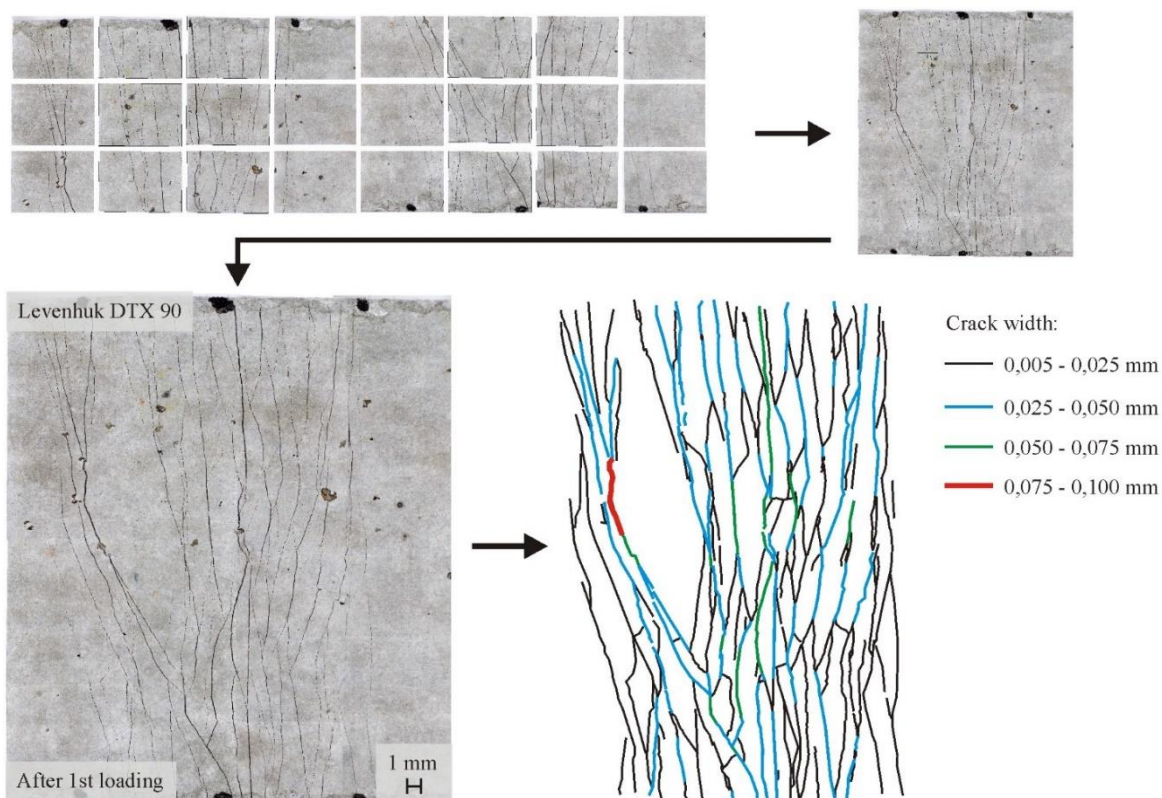
### 1.3.2 Automatizace vyhodnocování experimentů

Při vyhodnocování vzorků je potřeba mikroskopem nafotit celý povrch vzorku a analyzovat množství trhlin. Měření se v čase opakuje a porovnává se zužování a zacelování trhlin. Při velkém množství vzorků je vhodné vyřešit automatizaci celého procesu. Pro automatizovaný sběr dat je nutné zajistit pohyb mikroskopu nad vyšetřovanou plochou. Ideální je rovný povrch vzorku. Pak je možné pohyb zajistit posunem mikroskopu nebo vzorku ve dvou osách. Rovný vzorek s trhlinami se vyrobí jako zakřivený a při narovnání vzniknou trhliny (Obrázek 45). Celé vyhodnocování se tím zjednoduší na výměnu vzorku pod mikroskopem, protože algoritmus v počítači nafotí sérii snímků, složí je dohromady, vyhodnotí množství různě velkých trhlin a data uloží (Obrázek 46).



Obrázek 45 Vhodné tvary zkušebních těles [44]

a) tvar pro užší rozmezí šířek trhlin; b) tvar pro široké rozmezí šířek trhlin; c-d) tvar pro lokální vznik trhlin

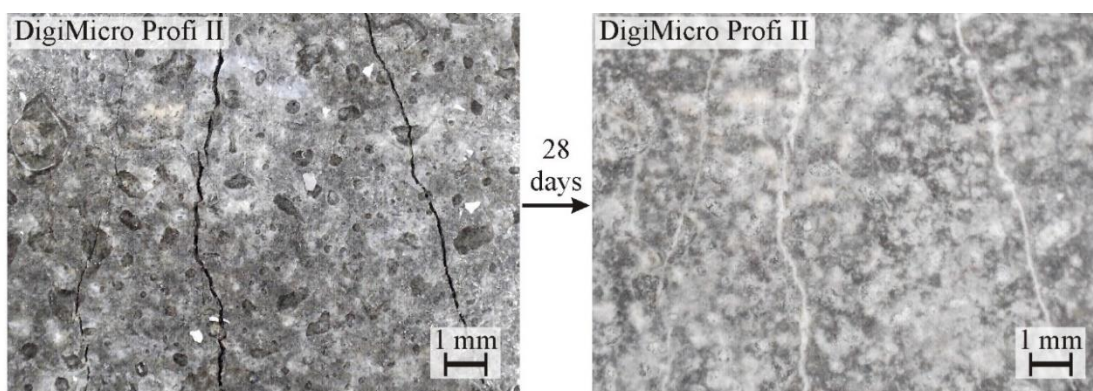


Obrázek 46 Postup automatizované vyhodnocování vzorků [44]

### 1.3.3 Diskuse výsledků experimentu

Navržená metoda vyhodnocování dat byla ověřena na dvouvrstvých vzorkách o rozměrech 100x40 mm, ve kterých byly trhliny vytvořeny v prostřední části. Z celkové plochy 40 cm<sup>2</sup> byly trhliny na přibližně 16 cm<sup>2</sup>. Krajní části mohly být odstraněny, ale byly ponechány pro lepší manipulaci se vzorky. Analýzou trhlín bylo zjištěno, že na ploše 16 cm<sup>2</sup> bylo celkem 1,2 metru trhlín s šířkou pohybující se od 0,005 mm do 0,1 mm. V porovnání s výzkumem na krychlích se jedná o velkou úsporu materiálu a místa, protože při použití 1 m<sup>3</sup> materiálu je možné v krychelných vzorkách vytvořit přibližně 178 metrů trhlín, zatímco ve vzorkách z TRC i více jak 30 000 metrů.

Na vzorkách bylo zkoumáno i zacelování trh a bylo ověřeno, že zacelování probíhá v případě vzorků z TRC stejně jako u vzorků krychlových (Obrázek 47). Navržená metoda testování pomocí TRC s netkanou textilí byla natolik úspěšná, že na jejím základě Hana Žáková zpracovala data pro svou disertační práci zabývající se metodami sanací s využitím krystalizačních materiálů [45].



Obrázek 47 Vývoj trhlín na vzorkách z TRC [29]

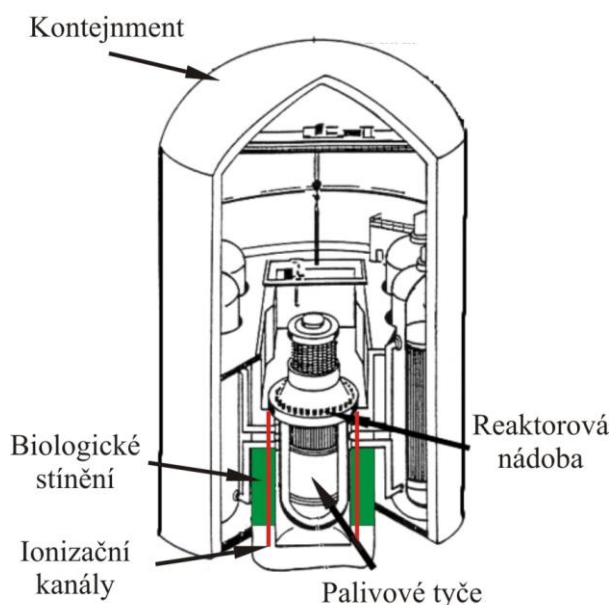




## 2 Výzkum vlivu ionizujícího záření na betonové konstrukce

### 2.1 Zkušební tělesa pro nedestruktivní testování betonu v okolí ionizačních kanálů reaktorů typu VVER

Návrhová životnost jaderných elektráren, vyrobených v minulém století, byla stanovena na 40 let. Provoz mnoha těchto elektráren byl již zastaven a celá zařízení byla rozebrána. Zjistilo se ale, že poškození nejzatíženějších součástí elektráren nebylo zdaleka tak velké, jak se předpokládalo. Proto se začaly hledat způsoby, jak dokázat zjistit míru poškození konstrukcí, přičemž destruktivní zkoušky téměř nepřicházejí v úvahu. Jaderný reaktor lze velmi dobře kontrolovat pomocí ultrazvukové defektoskopie [46]. Otázkou však zůstávají betonové konstrukce, které se nacházejí v blízkosti jaderného reaktoru (Obrázek 48).



Obrázek 48 Kontejnment jaderné elektrárny

Na tyto betony působí kromě běžného zatížení i ionizující záření či teploty přesahující 100°C. Betonové konstrukce jsou opatřeny ocelovou vystýlkou, která má zajistit hermetičnost a v případě jakýchkoliv úniků radioaktivních látek i snadnější dekontaminaci. Tato vystýlka v kombinaci s velkým stupněm vyztužení ovšem zamezuje použití většiny nedestruktivních metod.

Jednou z vhodných metod je právě ultrazvuková defektoskopie. Její použití ale pro nehomogenní materiál, jako je beton, není příliš vhodné. Signál se na každém rozhraní dvou materiálů rozdělí. Část signálu se odrazí a část projde skrz. Tento jev lze pro beton potlačit vhodně zvolenou frekvencí, ale tím by se snížila i citlivost měření a bylo by možné detekovat jen velké poruchy. Navíc pro tak masivní konstrukce, jako je stěna biologického stínění, by bylo zapotřebí velmi výkonných zařízení, aby signál prošel skrz.

Vědci z Ústavu jaderného výzkumu v Řeži se zabývají možností zkoumat kvalitu betonu pomocí metody zvané „Impact Echo“ [47]. Při ní se spustí ionizačním kanálem piezoelektrický měnič pro zachycení vlnění, které je emitováno úderem kladívka do ocelového povrchu kanálu. Různé tuhosti degradovaných betonů na styku s ionizačním kanálem způsobují rozdílný útlum vlnění. Metoda byla zkoumána na vzorcích vyrobených autorem práce v roce 2013 (Obrázek 49).

Pro ověření funkčnosti zkoumané metody byla domluvena výroba sady čtyř vzorků, která měla simulovat různé úrovně poškození betonů v jaderném zařízení.



Obrázek 49 Vzorky biologického stínění vyrobené pro Ústav jaderného výzkumu v Řeži v roce 2013 [46]

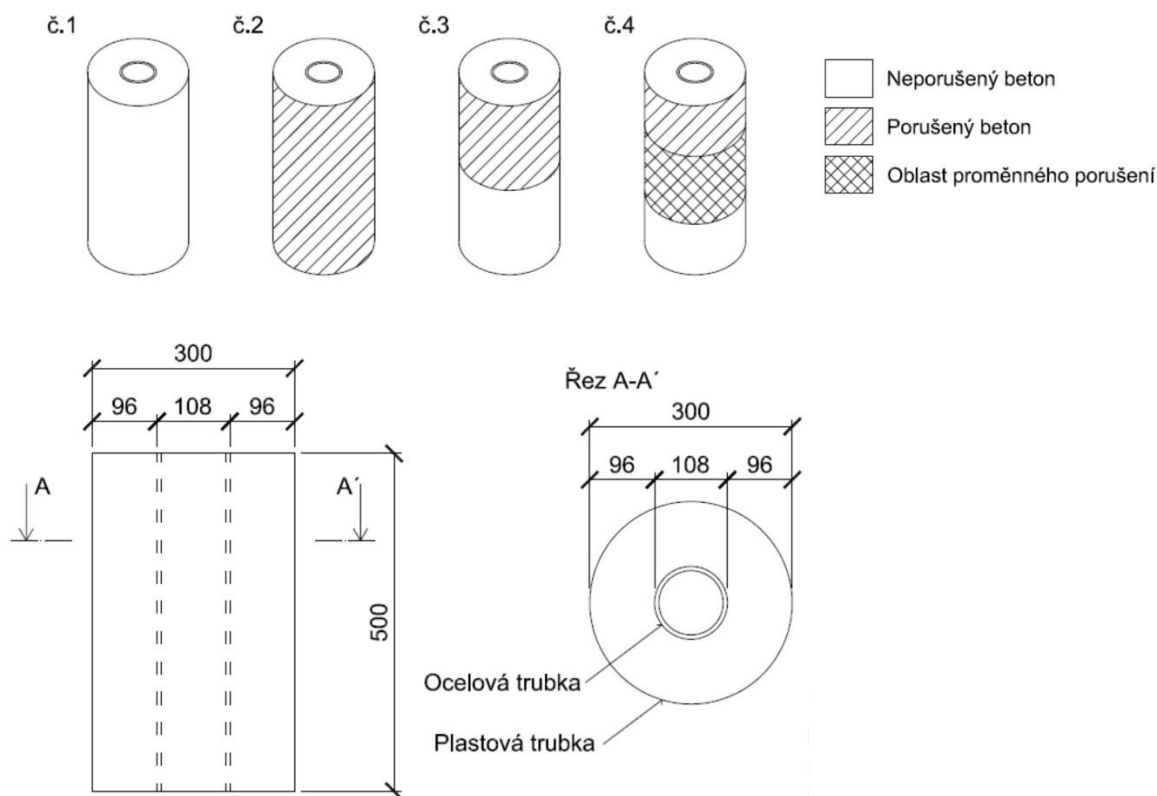
Vzorek 1 – Spodní část je vyrobena z těžkého serpentinitového betonu s litinovými broky a smaltěřskou fritou, který byl použit při výstavbě Jaderné elektrárny Temelín; horní část vzorku neobsahuje litinové broky;

Vzorek 2 – Celý vzorek je vyroben z konstrukčního betonu



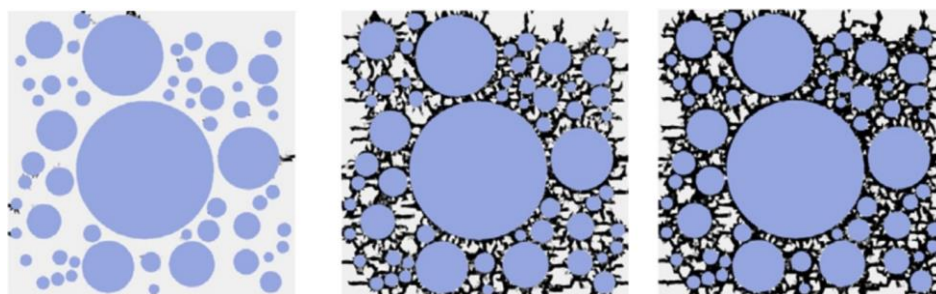
## 2.1.1 Požadavky na zkušební tělesa

Testovací sada byla složena ze čtyř zkušebních těles s různými stupni poškození, přičemž poškození mělo odpovídat vystavení betonu ionizujícímu záření. Jedno těleso mělo být z neporušeného betonu, jedno z maximálně porušeného betonu a dvě tělesa s proměnnou úrovní porušení (Obrázek 50).

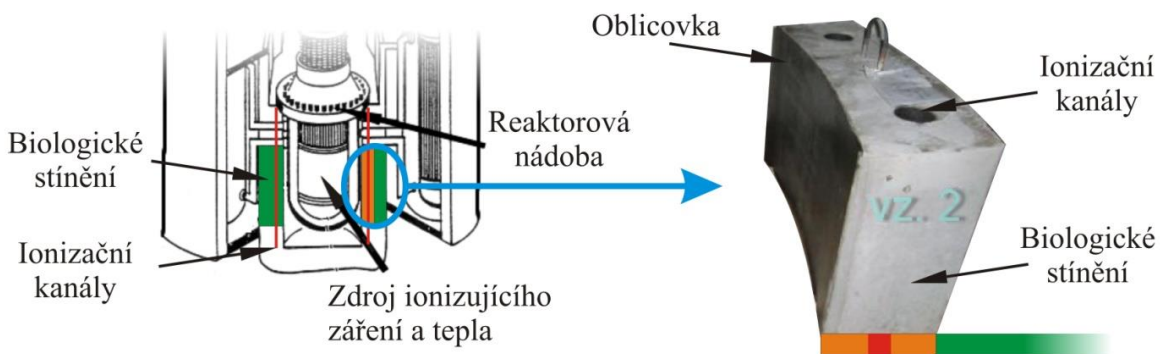


Obrázek 50 Návrh sady zkušebních těles

Při vystavení betonu ionizujícímu záření dochází k objemovým změnám kameniva, což má za následek oddělování kameniva od cementové malty a tvorbě radiálních trhlin (Obrázek 51). Neutronové záření navíc z jader atomů vyráží heliová jádra a v materiálu se dokonce mění prvky a tvoří se plyn. Vrstvy nejbližší k reaktorové nádobě jsou poškozovány teplotou přesahující 100°C. A ionizační kanály se nacházejí právě v této oblasti (Obrázek 52).



Obrázek 51 Postupné poškozování betonu ionizujícím zářením [48]



Obrázek 52 Umístění ionizačních kanálů v konstrukci biologického stínění

## 2.1.2 Návrh výroby poškozeného betonu

Typ poškození ozařovaných betonů se nejvíce podobá poškození od alkalicko-křemičité reakce (ASR), což je chemická reakce vznikající za přítomnosti alkálií, vody a amorfního křemíku. Alkálie se do betonu dostávají s cementem nebo z okolního prostředí. Voda je v betonu přítomna téměř vždy a amorfní křemík je součástí kameniva některých kamenolomů. Produktem této reakce jsou gely, které expandují a narušují vnitřní strukturu podobným způsobem jako ionizující záření.

Poškození pomocí ASR je nejčastějším způsobem simulování ozařovaných betonů. Výroba vzorků je ovšem náročná finančně a časově. Běžně jsou vzorky udržovány v kontrolovaném prostředí při zvýšené teplotě po dobu několika měsíců.

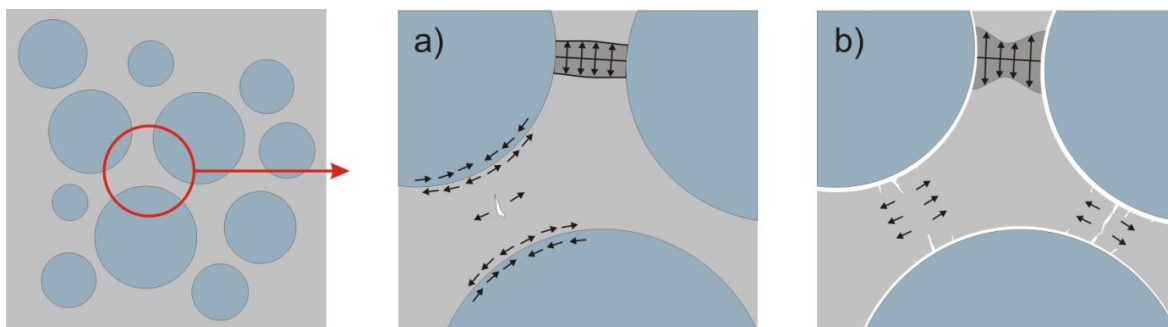
Bylo zvažováno několik dalších metod poškozování betonu, přičemž byl kladen důraz na záruku definované kvality. U většiny zvažovaných metod nemohla být garantována kvalita v případě těles s proměnným poškozením betonu. Mezi tyto metody patřilo:

- mražení tělesa v průběhu hydratace,
- nahrazení části čerstvého cementu cementem zhydratovaným,
- mechanické narušování struktury betonu vibracemi v průběhu hydratace,
- využití recyklátu.

Nakonec bylo využito smršťování betonu. Smršťování je důsledek chemické reakce mezi vodou a cementem, kdy výsledný cementový tmel má menší objem než původní složky. Dalším důvodem je vysychání betonu, kdy se tvoří jemné kapiláry.

Během hydratace se mění objem cementového tmele, nikoliv kameniva. Kamenivo ovšem smršťování tmele zabraňuje soudržností s tmelem. Bylo tedy nutné kamenivo od cementového tmele separovat (Obrázek 53). Separace zároveň simuluje typ porušení betonu při objemových změnách kameniva během ozařování ionizujícím zářením. Separace kameniva byla uvažována pomocí několika vodu odpuzujících látek

(Obrázek 54), přičemž jako neúčinnější se ukázal být obyčejný olej. Bylo uvažováno i vytvoření krusty na kamenivu z parafínu či vosku, ale účinnost separace olejem byla dostatečná.



Obrázek 53 Smršťování cementového tmelu

a) se soudržností s kamenivem; b) bez soudržnosti s kamenivem



Obrázek 54 Separace kameniva

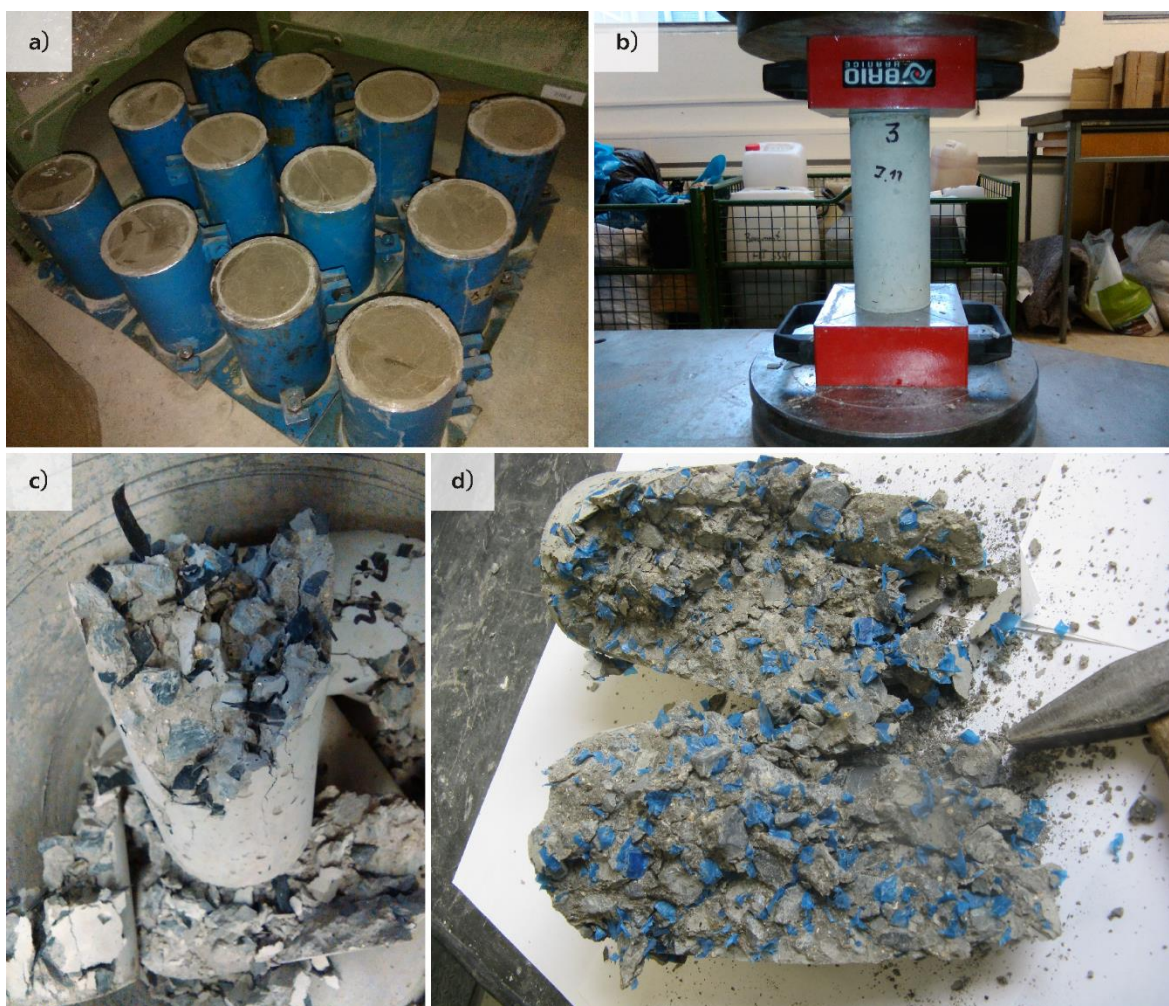
Byla vyzkoušena separace hrubého i jemného kameniva a ukázalo se, že separace hrubého kameniva snižuje pevnost betonu. Při separaci jemného kameniva docházelo k oddělování oleje od kameniva. Některé vzorky vykazovaly zhoršené vlastnosti, ale některé měly téměř shodné vlastnosti s referenčními vzorky z kvalitního betonu. Kvůli této nestabilitě se od separace jemného kameniva upustilo.

Postup výroby betonu se ukázal jako velice důležitý, protože separované kamenivo je nutné přimíchávat až do rozmíchané cementové malty. V případě smíchání separovaného kameniva se suchými jemnými složkami docházelo k nalepení cementu na separované kamenivo, a tím docházelo ke snižování účinnosti separace.



Kvalita betonu byla zkoumána pomocí zkoušky betonu v tlaku. Byla zjišťována pevnost a modul pružnosti betonu. Z důvodu nedostatečného projevu snižování modulu pružnosti betonu při pouhém separování kameniva se přistoupilo na možnost přidávat do směsi měkčí materiál. Jednalo se o malé kousky plastové fólie, které simulují větší trhliny a zároveň snižují tuhost betonu. Bylo vyzkoušeno několik tlouštěk fólií. Tlustší fólie vykazovaly chování rozptýlené tahové výztuže. Velmi tenké fólie při míchání vytvářely shluky a kousky nebyly rovnoměrně rozptýleny.

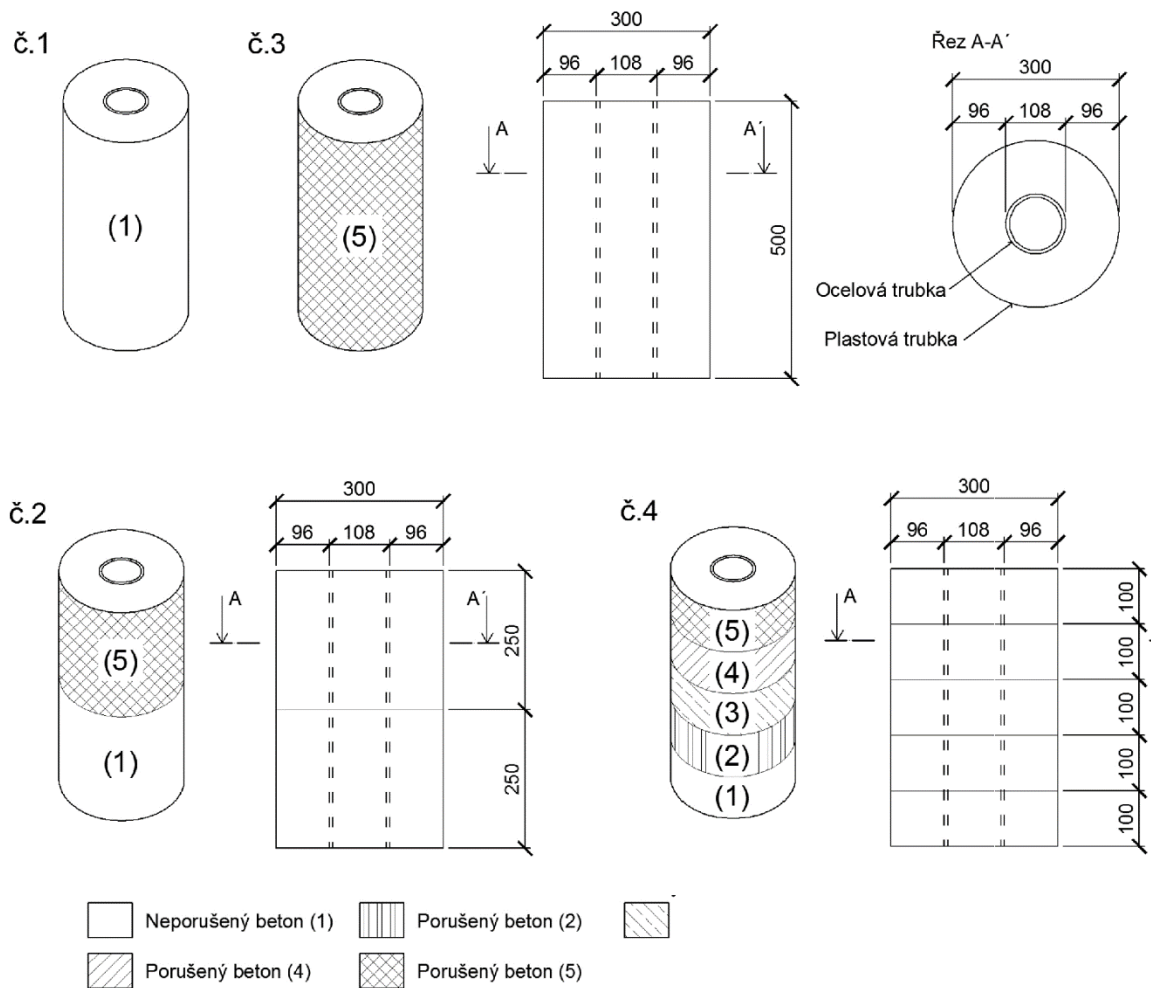
Ukázalo se, že zdánlivě nepodstatný parametr, jako je barva fólie, může hrát významnou roli při vizuální kontrole rozmístění kousků fólie ve výsledném betonu. Pro výslednou směs byla zvolena modrá barva, která byla dobře viditelná jak v čerstvé směsi, tak při analýze betonu po destruktivních zkouškách (Obrázek 55).



Obrázek 55 Zkoušení „poškozeného“ betonu

a) Zkušební tělesa; b) tlaková zkouška; c) vzorek s černou folií; d) vzorek s modrou folií

Výsledný návrh specifikace zkušebních těles a receptur směsí byly stanoveny viz Obrázek 56 a Tabulka 4.



Obrázek 56 Specifikace zkušebních těles

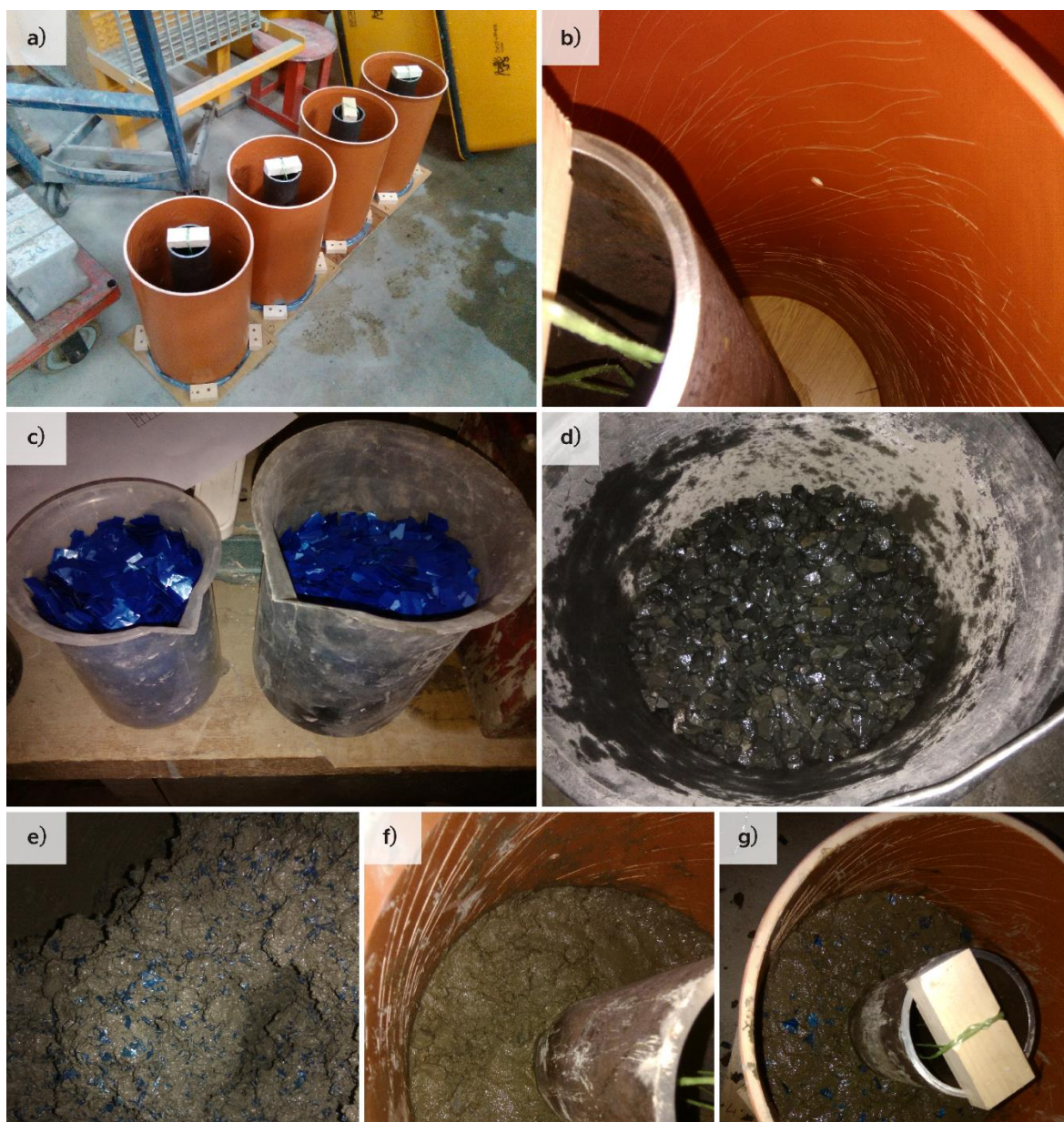
Tabulka 4 Směsi použitých betonů

		Množství [kg/m <sup>3</sup> ]				
		Neporušený	Porušený beton			
			Směs (1)	Směs (2)	Směs (3)	Směs (4)
Cement CEM I 42,5		499	499	499	499	499
Voda		190	190	190	190	190
Kamenivo	0-4	800	800	800	800	800
	4-8	100	100	100	100	100
	8-16	776	776	776	776	776
Plastifikátor		4,1	4,1	4,1	4,1	4,1
Kousky plastové fólie		0,0	1,0	3,0	3,0	5,0
Separace kameniva 8-16		ne	ne	ne	ano	ano



### 2.1.3 Výroba zkušebních těles

Bednění bylo tvořeno ocelovou trubkou dodanou kolegou z ÚJV v Řeži, plastovou KGEM trubkou s DN(OD) = 315 mm a spodní deskou. Trubky slouží jako ztracené bednění, proto byl povrch plastové trubky zdrsňen a bylo do nej vyvrtáno několik prohlubní průměru 10 mm s hloubkou 5 mm (Obrázek 57b). Betonáž proběhla kontinuálně, aby nedošlo k tvorbě pracovních spár, ale zároveň tak, aby nedošlo promísení směsí. Separované kamenivo bylo do směsí přidáváno až po vizuální kontrole rovnoměrného rozmístění kousků fólie.



Obrázek 57 Výroba zkušebních těles

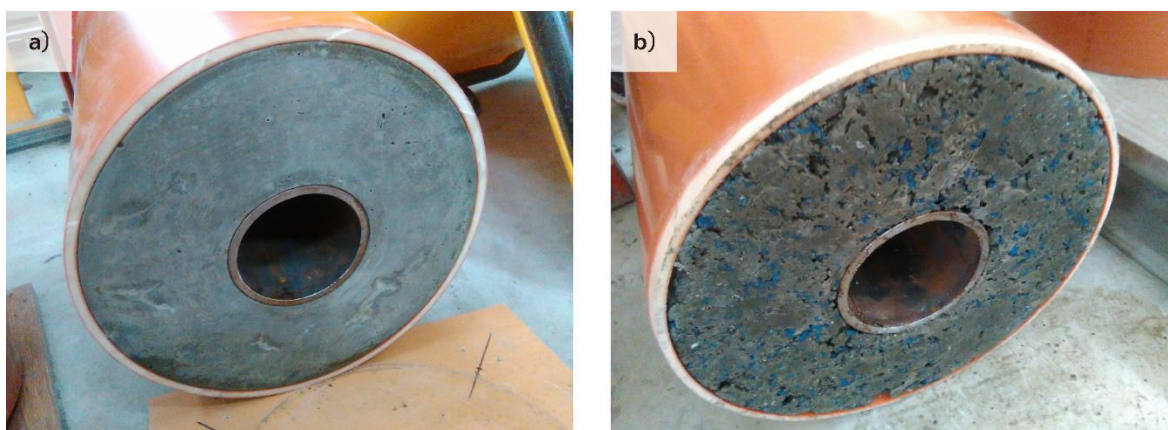
a) Bednění; b) povrchová úprava trubky; c) kousky fólie; d) separované kamenivo; e) čerstvá směs porušeného betonu; f) betonáž směsí 1; g) betonáž směsí 4



## 2.1.4 Diskuse výsledků

V rámci spolupráce s Ústavem jaderného výzkumu v Řeži byla vyrobena betonová zkušební tělesa reprezentující oblast v okolí ionizačních kanálů (Obrázek 59). Na těchto tělesech kolegové v Řeži zkoumají, jakými nedestruktivními způsoby lze zjišťovat kvalitu, resp. míru porušení betonových konstrukcí za ocelovou vystýlkou. Zkušební tělesa jsou vyrobena z betonů pěti různých kvalit. Poškození odpovídající účinkům ionizujícího záření bylo simulováno separováním hrubého kameniva olejovým separátorem a přimícháním kousků plastové fólie, která simuluje větší trhliny. Zhoršení kvalit betonů bylo prokázáno snižováním tlakových pevností i modulů pružnosti.

Zkušební tělesa jsou vyrobena v souladu se navrženou specifikací (Obrázek 56). Vzhledem k tomu, že se jednalo o navazující experiment, který má potvrdit zkoumané možnosti, byl experiment navržen jako slepý, tudíž byla specifikace předána pouze vedoucímu pracovníkovi v ÚJV (Obrázek 60). Jedinou nedokonalostí byl spodní povrch tělesa č. 3, kde byla rozeznatelná směs poškozeného betonu (Obrázek 58).



Obrázek 58 Kvalita betonu ve spodní části zkušebních těles; a) směs 1; b) směs 5



Obrázek 59 Výsledná zkušební tělesa



*Obrázek 60 Předání zkušebních těles pracovníkům ÚJV v Řeži*

## **2.2 Vliv gama záření na smršťování a dotvarování cementové malty**

V rámci zkoumání vlivu ionizujícího záření bylo experimentálně zjišťováno smršťování a dotvarování cementové malty při působení gama záření a následně bylo porovnáváno s vypočtenými hodnotami pomocí existujících modelů [49-59]. Zároveň byl zkoumán pokles pevnosti [60-62]. Pro experiment bylo potřeba navrhnout rozměry zkušebních těles a samotné zatěžovací zařízení.

### **2.2.1 Požadavky na zatěžovací zařízení**

Dotvarování betonu je způsobeno plastickým přetvořením betonu vlivem dlouhodobého zatížení. Pro zkoušení se obvykle využívá tuhý rám, ve kterém je zkušební těleso zatíženo pomocí stlačené pružiny. Dotvarování způsobuje objemovou změnu a stlačení pružiny je nutné korigovat v průběhu experimentu, aby zatěžovací síla byla nejlépe konstantní po celou dobu experimentu.

Vzhledem k tomu, že se jedná o dlouhodobý experiment, který má být současně ozařován gama zářením, a tudíž se bude nacházet v prostorách ozařovny, bylo potřeba celý experiment minimalizovat, ale zároveň z něj získat maximum dat. Základní požadavky pro návrh a realizaci experimentu byly:

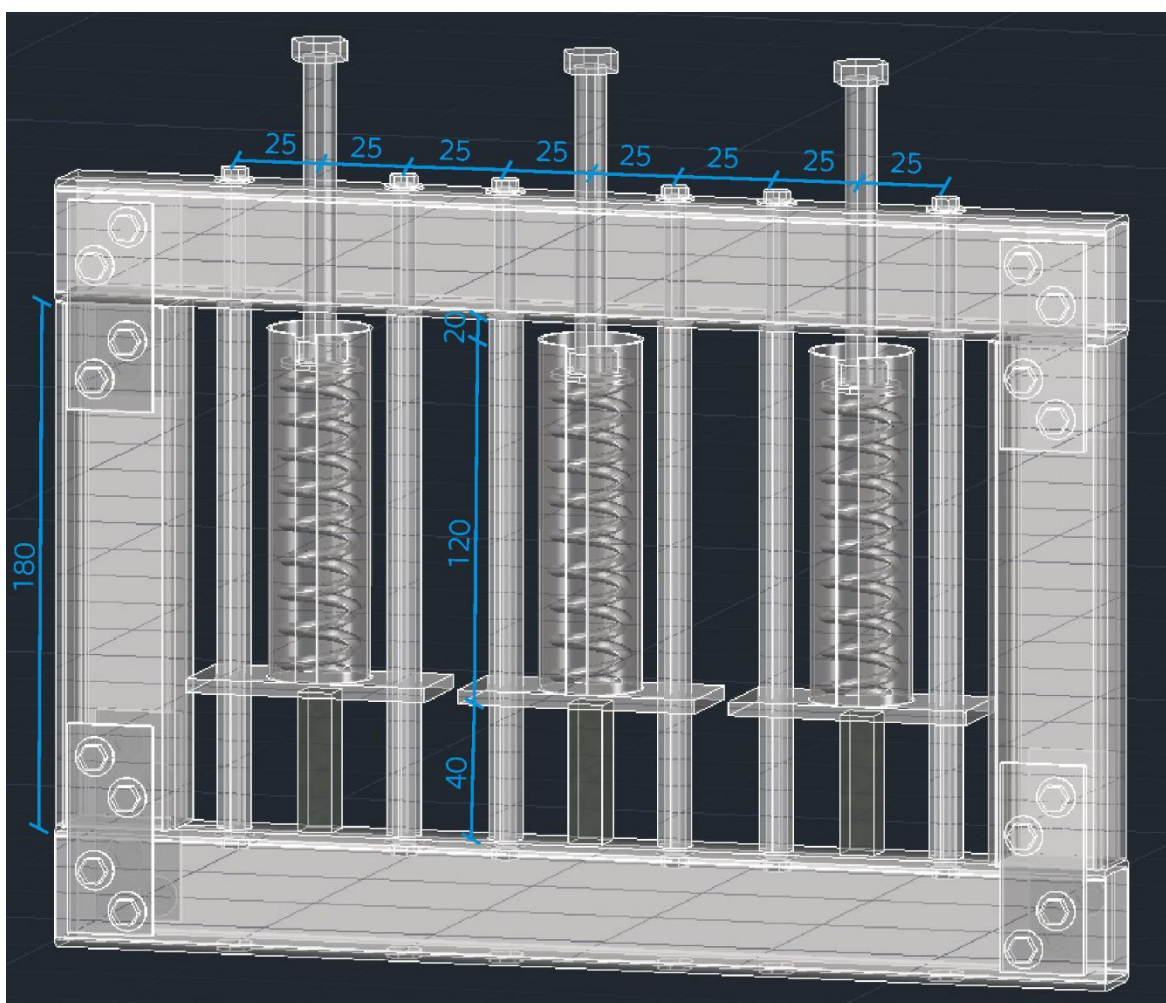
- 1) Stanovit nejmenší možný rozměr zkušebních těles, které poskytnou dostatečné množství dat.
- 2) Stanovit potřebnou sílu, která bude dostatečně velká, aby bylo dotvarování měřitelné.
- 3) Navrhnout co nejmenší variantu zatěžovacího rámu se třemi pozicemi pro vzorky.
- 4) Vyrobit šest zatěžovacích rámců.

## 2.2.2 Návrh zatěžovacího zařízení

Jako první byl stanoven průřez zkušebního tělesa. Kvůli jednoduché výrobě byl vybrán čtvercový průřez. Největší zrno kameniva v použité maltě mělo velikost 4 mm, proto byla strana čtvercového průřezu stanovena na 10 mm. Výška zkušebního tělesa byla stanovena experimentálně formou zkoušky pevnosti betonu v tlaku. Nejvhodnější chování vykazovaly vzorky s výškou 40 mm.

Ve druhé fázi bylo rozhodnuto o maximální velikosti zatěžovací síly, která definovala rozměry pružiny. Bylo určeno maximální napětí 20 MPa, které při průřezové ploše 10x10 mm odpovídá zatěžovací síle 2 kN. Odpovídající pružina měla vnější průměr 30,5 mm a výšku 115 mm.

Na základě získaných rozměrů byl vypracován první návrh zatěžovacího zařízení (Obrázek 61). Návrh byl následně upraven kvůli redukci nadbytečného množství materiálu (Obrázek 62).



Obrázek 61 První návrh zatěžovacího zařízení





*Obrázek 62 Upravený návrh zatěžovacího zařízení*

### **2.2.3 Realizace**

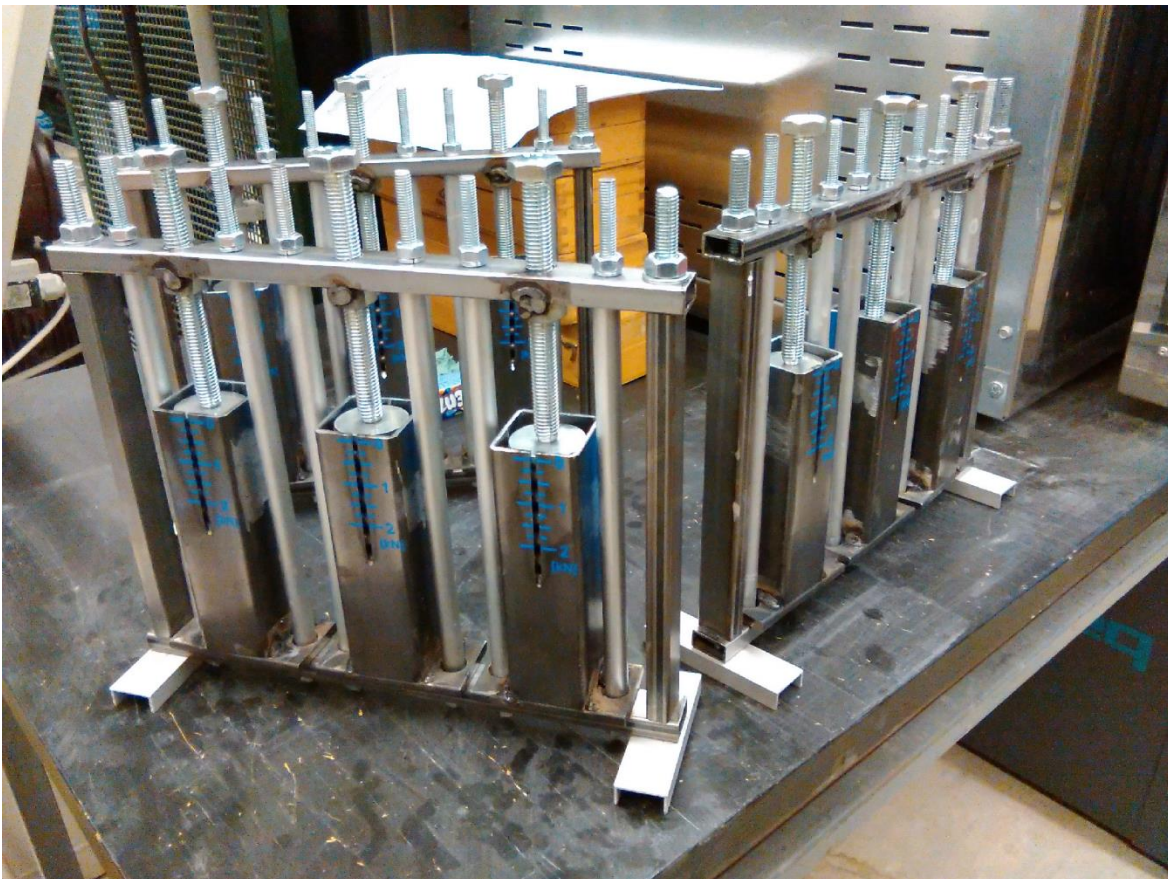
Vnější rám je vyroben z jeklu 20x10x1 mm z oceli S235 bez povrchové úpravy. Rám je spojen pozinkovanými závitovými tyčemi a maticemi M8 s pevností oceli 8.8. Povolování matic bylo zabráněno pérovými podložkami. Díky přesné výrobě komponent nebylo třeba dalšího ztužení rohů rámu.

Na zatěžovacím zařízení byla vytvořena tři zkušební místa. Každé zkušební místo bylo opatřeno dvojicí pozinkovaných závitových tyčí M6 s pevností oceli 8.8. Tyče měly dvě funkce. První funkcí bylo zmenšení rozpětí nosníku z jeklu, který byl vzhledem k potřebě minimalizace použitého materiálu a nevhodnému natočení průřezu málo tuhý. Druhou funkcí tyčí bylo vedení zatěžovací pružiny a zamezení jejího vybočení.

K tomuto účelu byly tyče zasunuty do hliníkových trubek rozměru 10x1 mm slitiny AW6060 s povrchovou úpravou „elox“ (anodická oxidace povrchu).

Zatěžovací pružina vnějšího průměru 30,5 mm a délky 115 mm byla uložena do jeklu 35x35x2 mm přivařeného k pásové oceli 35x5 mm s vyvrtanými otvory pro využití vedení pomocí závitových tyčí. Obě části byly z oceli S235 bez povrchové úpravy. Do přední strany jeklu byl vytvořen zářez, který umožňoval vizuální kontrolu stlačení pružiny. Dále byla akrylátovým lakem vytvořena stupnice pro odečítání síly, kterou pružina zmáčknutím vyvozuje.

Pružina byla stlačována pozinkovaným šroubem M10 s pevností oceli 8.8 s šestihrannou hlavou. Matice, přes kterou byl šroub utahován, byla přivařena k horní části rámu. Po přivaření bylo potřeba některé matice znovu proříznout závitníkem, kvůli částečné deformaci matice způsobené reziduálním pnutím po svařování. Stlačení pružiny pomocí šroubu bylo realizováno přes velkoplošnou podložku M6x30x1,5 mm z pozinkované oceli.



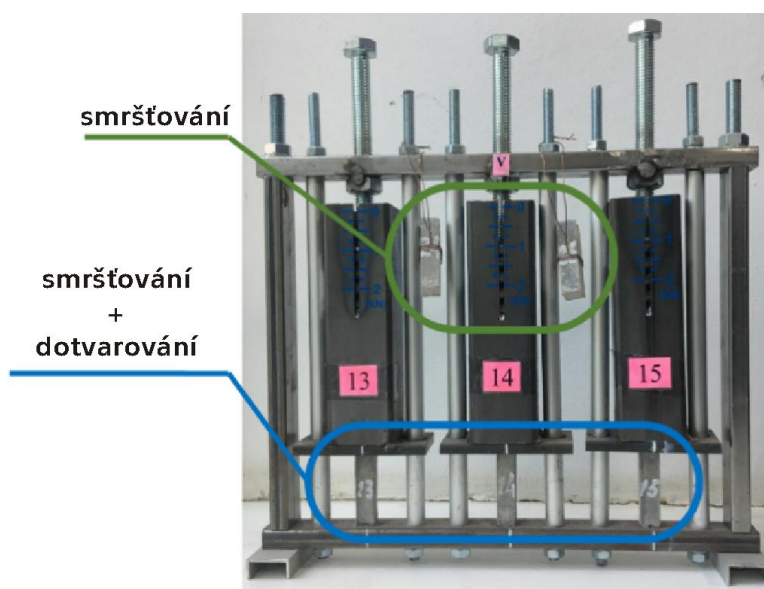
Obrázek 63 Hotová zatěžovací zařízení



## 2.2.4 Výsledky experimentu a diskuse

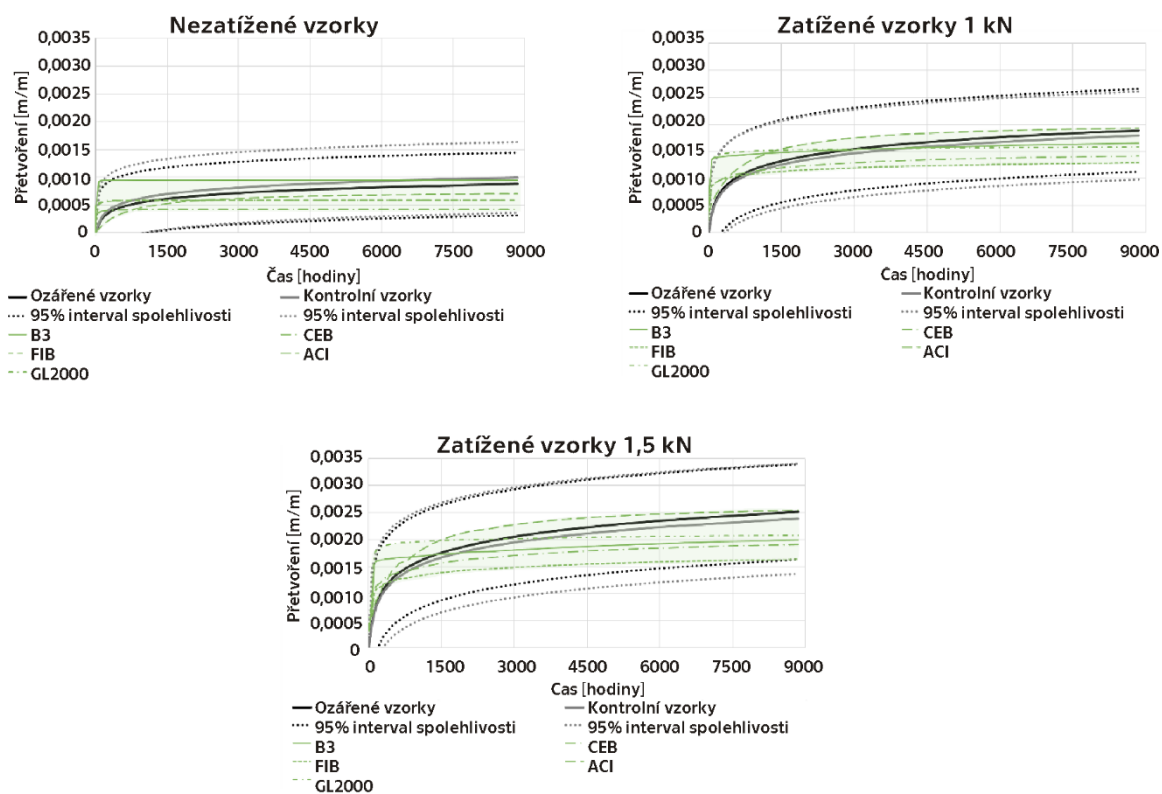
Pro experiment byly vyrobeny vzorky z cementové malty z CEM I 42,5R s vodním součinitelem 0,38, křemičitým kamenivem frakce 0-4 mm a superplastifikátorem Glenium ACE 442. Vzorky byly prvních 10 dní uloženy ve vodě a následujících 62 dní před započítí experimentu byly vodonepropustně zabaleny.

Byly připraveny dvě sady 14 vzorků, přičemž 4 vzorky byly zatíženy silou 1 kN, 5 vzorků bylo zatíženo silou 1,5 kN a zbylých 5 vzorků bylo nezatíženo (Obrázek 64). Jedna sada byla vystavená gama záření, zatímco druhá sada byla v kontrolovaných podmínkách bez přítomnosti gama záření. Celková integrální dávka jednotlivých vzorků po skončení 369 dní trvajícího experimentu se pohybovala v rozmezí 12-15 MGy.



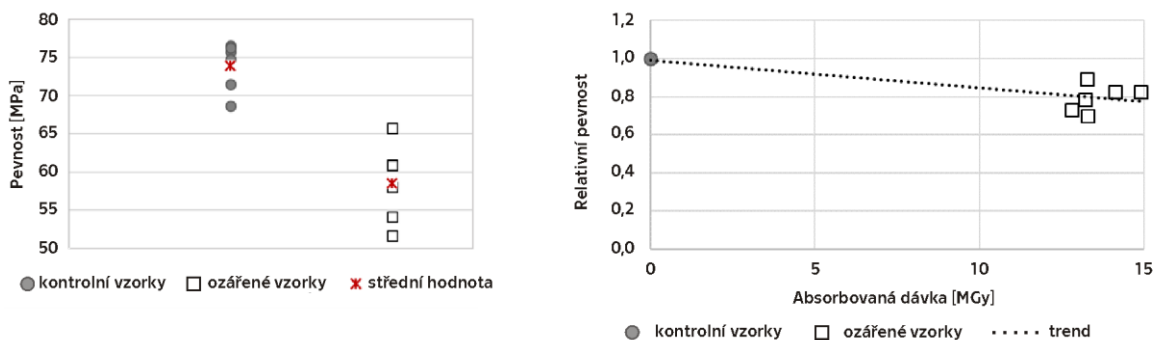
Obrázek 64 Uspořádání experimentu [49]

V průběhu experimentu byly měřeny hodnoty přetvoření jednotlivých vzorků. Naměřené hodnoty přetvoření způsobené smršťováním a dotvarováním pak byly porovnány s výpočetními hodnotami běžných modelů. Konkrétně byly porovnány s modelem B3 [63], modelem CEB podle „CEB-FIP model code 1990“ [64], modelem FIB [65], modelem ACI a GL2000 uvedených v příručce ACI 209.2R-08 [66-67]. Z porovnání je vidět, že gama záření nemělo výrazný vliv na smršťování a dotvarování zkušebních vzorků (Obrázek 65)



Obrázek 65 Porovnání naměřeného a vypočteného přetvoření vzorků [49]

Na závěr experimentu byly vzorky podrobeny destruktivní zkoušce pevnosti betonu v tlaku, ze které vyplynulo, že vzorky ozářené gama zářením vykazují snížení tlakové pevnosti přibližně o 20 % (Obrázek 66). Na základně získaných informací byl další výzkum směřován na mechanické vlastnosti cementové malty [68-69]



Obrázek 66 Tlaková pevnost a relativní pevnosti v závislosti na absorbované dávce záření [49]

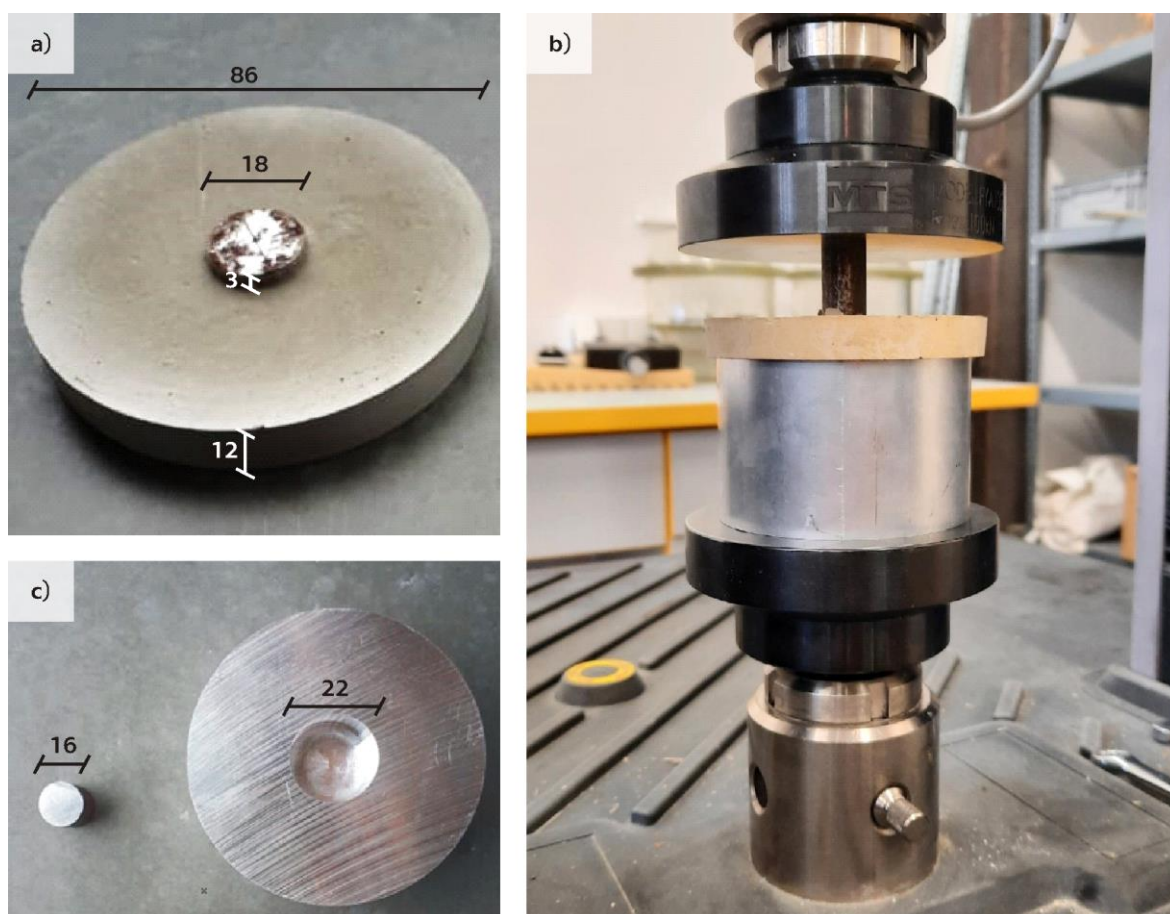
Tento dlouhodobý experiment mohl být uskutečněn především díky malým rozměrům navrženého a vyrobeného zkušebního zařízení. Zároveň byla stanovena dostatečná velikost vzorku, aby mohly být měřeny hodnoty přetvoření.

## 2.3 Zkoušení soudržnosti výztuže a betonu při ozáření

V rámci zkoumání účinků ionizujícího záření je potřeba zkoumat, jak je ovlivněna soudržnost mezi výztuží a betonem. Pro tyto účely se využívá experiment soudržnosti navržený Denisou Kavanovou [70]. Soudržnost je pak ovlivněna i ionizujícím zářením, které způsobuje korozi výztuže [71]. V rámci projektu TJ04000186 byly zkoumány sady neozářených vzorků a vzorků ozářených gama zářením. Příprava vzorků proběhla dle předepsaných parametrů experimentu. Byl ovšem potřeba vyřešit způsob uložení vzorků při ozařování a neočekávaný problém s praskáním vzorků v průběhu experimentu.

### 2.3.1 Zkouška soudržnosti

Během experimentu je vytlačován hladký ocelový válec bez žebírek průměru 18 mm a výšky 15 mm z betonové vrstvy o tloušťce 12 mm rychlostí 2 mm/min (Obrázek 67). Výsledkem experimentu je pracovní diagram.

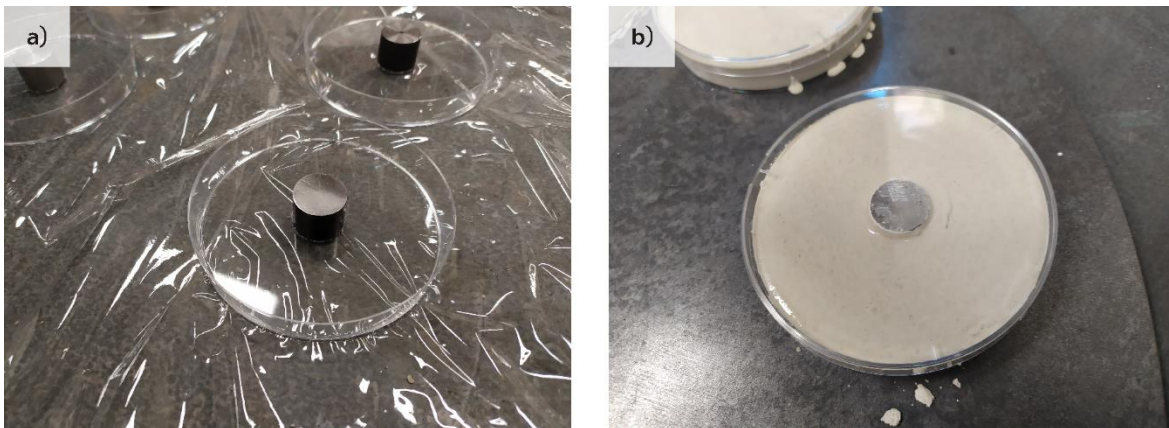


Obrázek 67 Uspořádání experimentu soudržnosti mezi výztuží a betonem

a) zkušební vzorek; b) průběh zkoušky; c) přípravek pro vytlačení válce

### 2.3.2 Výroba zkušebních těles

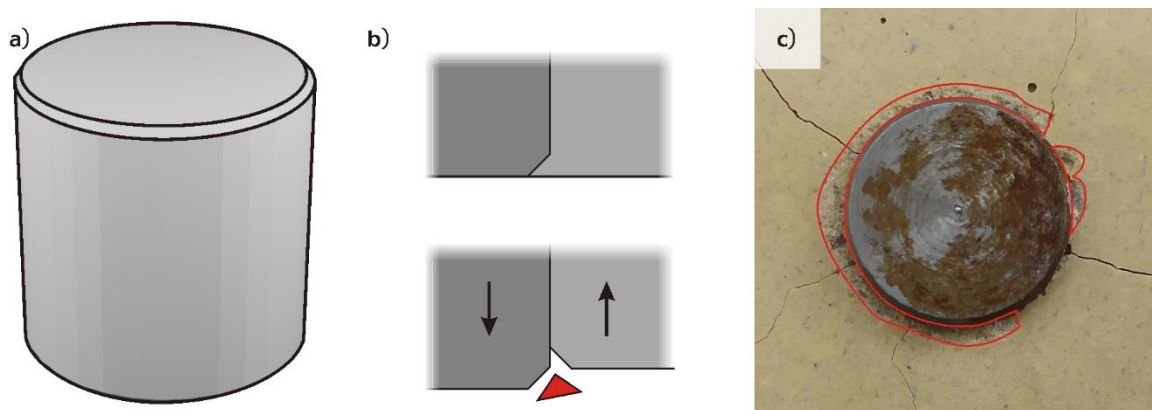
Výroba zkušebních vzorků je navržena tak, že se ocelový váleček připevní uprostřed plastové Petriho misky 90x15 mm a miska se vyplní betonem (Obrázek 68). Fixace válečku byla realizována vodou nerozpustitelným lepidlem, které bylo zvoleno, aby při odbedňování nedošlo k destrukci misky. Ta následně sloužila jako ochrana při transportu a manipulaci se vzorky.



Obrázek 68 Betonáž vzorků

a) Forma; b) vybetonovaný vzorek

Při vytlačování výztuže ve směru osy válce je zásadní, aby osa válce byla kolmá k podstavě. Kolmost podstavy byla zajištěna dělením tyčové oceli tzv. upíchnutím na soustruhu. První objednané válce měly zkosenou hranu po odjehlení, což způsobovalo poškození vzorku při experimentu (Obrázek 69). Poškození bylo natolik významné, že byly vzorky vyrobeny znovu s válci bez zkosené hrany.



Obrázek 69 Poškození vzorku vlivem zkosení hrany válce

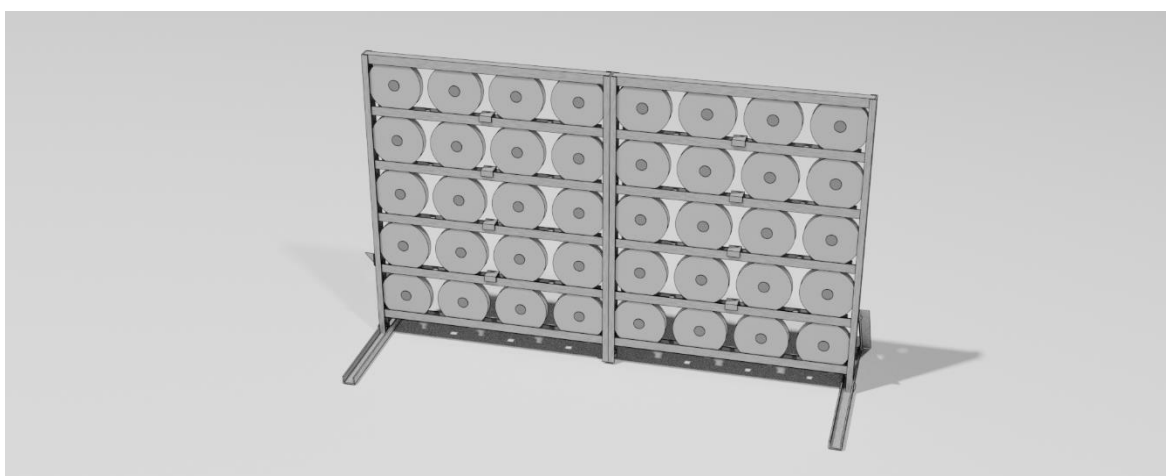
a) Zkosení hrany válce; b) smykové odtržení části vzorku; c) poškozená oblast

### 2.3.3 Rámový stojan pro ozařování vzorků

Vzorky byly ozařovány v gama ozařovně UGU-420 v areálu JIPNR-Sosny (Minsk, Bělorusko). Směr toku gama záření v komoře je horizontální. Bylo proto potřeba sestavit rámový stojan pro uložení vzorků do vertikální polohy tak, aby byly vystaveny rovnoměrnému ozáření. Na rámový stojan bylo několik požadavků:

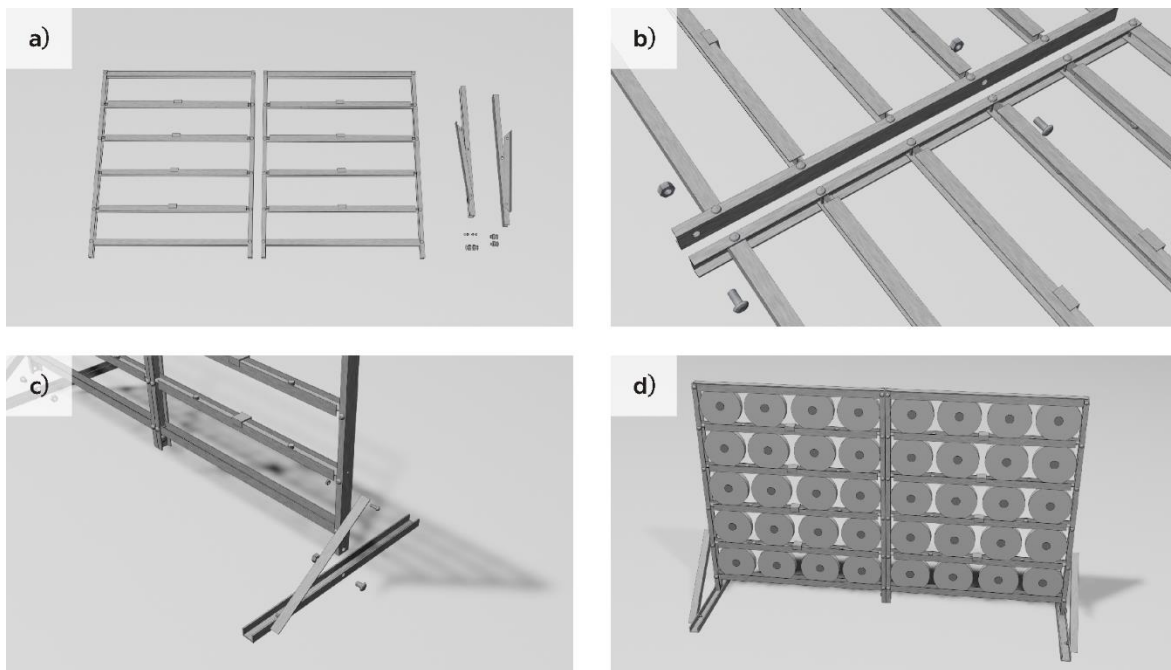
- 1) Stojan se musel vejít do ozařované plochy 1000x500 mm.
- 2) Stojan musel pojmout 40 vzorků.
- 3) Konstrukce nesměla stínit ozařované vzorky.
- 4) Vzhledem k přepravě stojanu z Prahy do Minsku leteckou dopravou byla požadována minimální hmotnost a jednotlivé komponenty se musely vyskládat do cestovního zavazadla.
- 5) Díky pandemii Covid-19 a omezeným možnostem cestování byl požadavek na co nejjednodušší sestavení.

Pro snížení hmotnosti a zamezení koroze vlivem gama záření byl rámový stojan navržen ze slitiny hliníku. Byly použity U-profily, L-profily a T-profily, za kterých byly navrženy dva oddělitelné rámečky (každý pro 20 vzorků - 5 řad ve 4 sloupcích) a podstavce zajišťující svislou polohu (Obrázek 70). Stojan byl přepravován rozdělený na čtyři části a k jeho sestavení probíhalo pomocí pouhých šesti šroubů (Obrázek 71). Pro sestavení byl vyhotoven animovaný videonávod. Pro vkládání vzorků měla každá příčka z jedné strany odnímatelný T-profil, který byl aretován sponou z U-profilu. Pro manipulaci se vzorky tudíž nebylo potřeba žádné nářadí.



Obrázek 70 Navržený rámový stojan





Obrázek 71 Sestavení navrženého rámového stojanu

a) Základní komponenty; b) spojení hlavních částí; c) připojení podstavce; d) sestavený stojan

Rámový stojan byl vyhotoven ve dvou exemplářích (Obrázek 72). Jeden pro byl použit pro ozařování vzorků. Ve druhém byly umístěny neozařované vzorky, které byly taktéž podrobeny dozimetrickému měření. Přeprava byla realizována letecky a v zavazadle byl dostatek prostoru i pro samotné vzorky (Obrázek 73).



Obrázek 72 Hotové rámové stojany

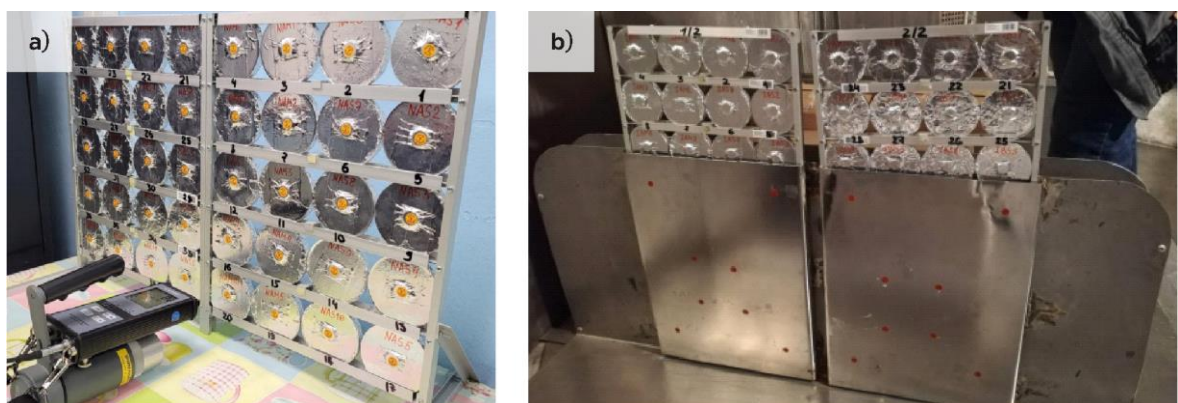




Obrázek 73 Přeprava rámových stojanů

V experimentu bylo použito celkem 80 betonových vzorků (Obrázek 74). Polovina vzorků byla ozařována gama zářením. Byly zkoumány dvě betonové směsi. Vliv gama záření byl zároveň zkoumán pro vysušený a pro plně saturovaný beton.

Vzorky byly během ozařování izolované několika vrstvami samolepící hliníkové fólie, která simulovala reálnou izolaci kontejneru vyhořelého paliva. Z měření vyšlo, že absorbovaná integrální dávka gama záření ozářených vzorků přesáhla 9 MGy, což je hodnota, která odpovídá uskladnění vyhořelého jaderného paliva v betonových kontejnerech po dobu 300 let [72-73]. Naopak absorbovaná dávka neozářených vzorků se pohybovala v hodnotách  $0,10 \pm 0,02 \mu\text{Gy}$ , odpovídá běžnému záření pozadí.

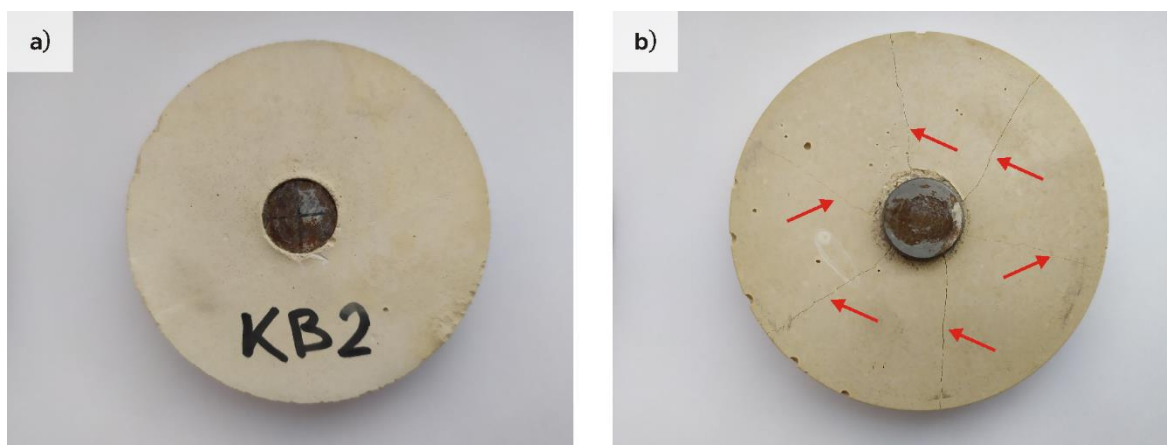


Obrázek 74 Umístění vzorků v areálu ozařovny

a) Umístění neozářených vzorků; b) umístění ozářených vzorků

### 2.3.4 Úprava vzorků před testováním

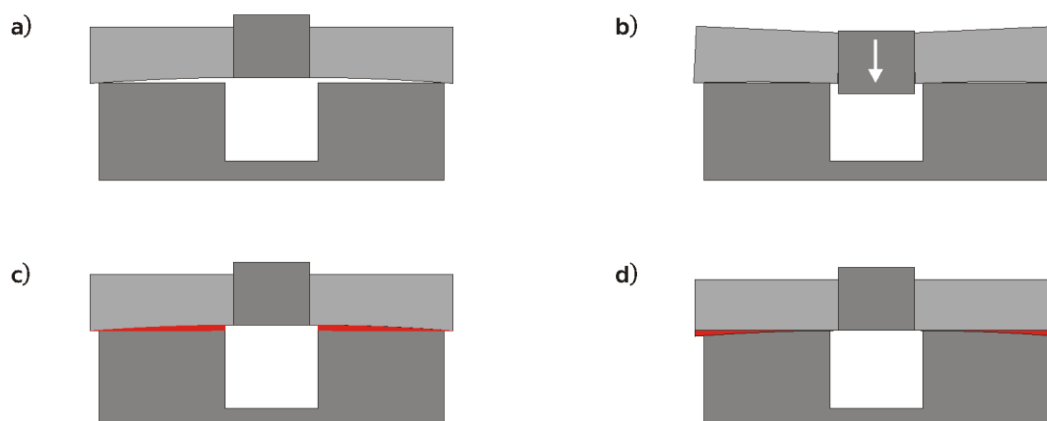
Před započítím testování ozářených vzorků byl postup experimentu soudržnosti zkoušen na nezávislých testovacích vzorcích a ukázalo se, že u některých vzorků dochází v průběhu experimentu k porušení s radiálními trhlinami (Obrázek 75). Výsledky experimentu s touto poruchou jsou neplané a bylo tedy nutné tento jev odstranit před započítím testování ozářených vzorků.



Obrázek 75 Porušení zkušebního vzorku

a) Horní strana; b) ohybové trhliny na spodní straně

Z několika hypotéz, které byly zkoumány, se potvrdila ta o tvarové nedokonalosti vzorků. Ukázalo se, že nová várka zakoupených Petriho misek má vypouklé dno. Byly definovány dvě možnosti úpravy experimentu. Prvním bylo podložení vzorku přípravkem s vypouklým dnem. Druhou možností bylo zbrúšení vzorků (Obrázek 76).



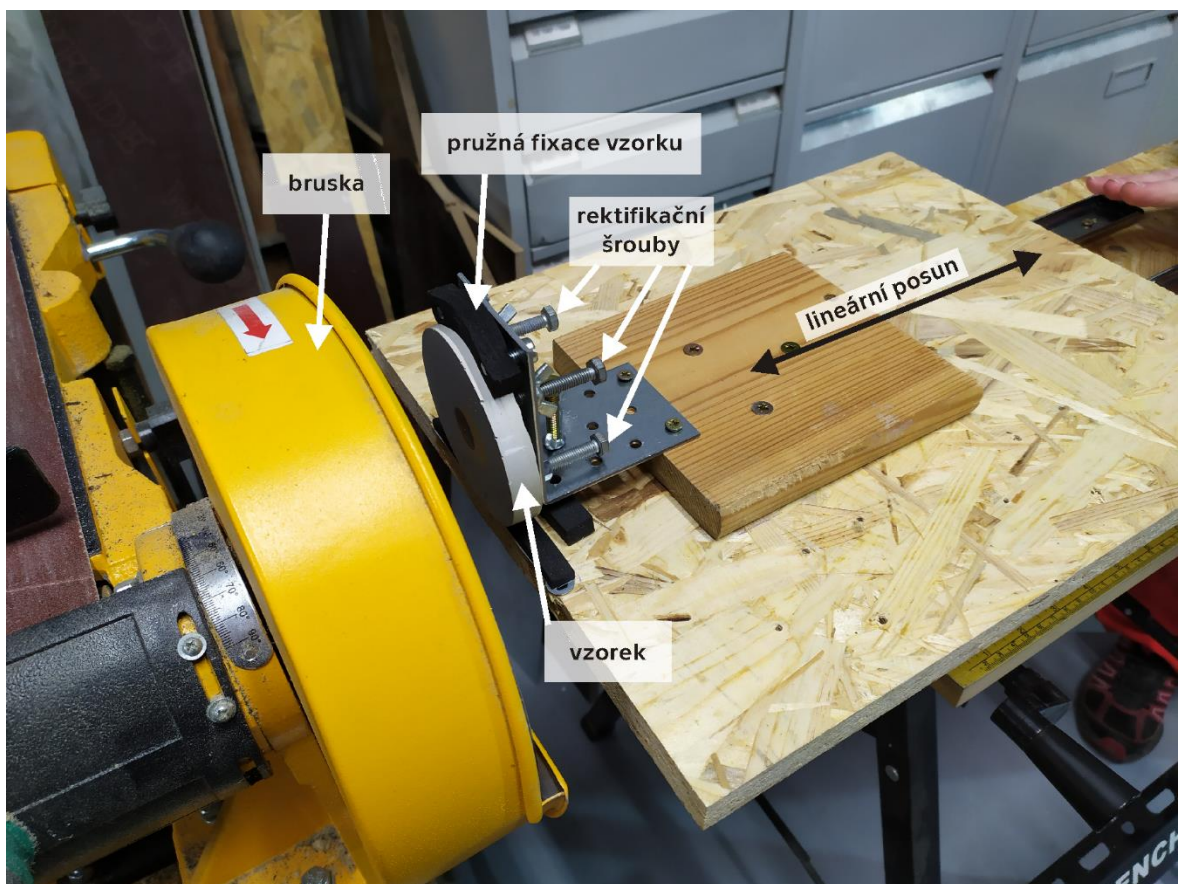
Obrázek 76 Řez experimentem soudržnosti

a) Vzorek s konkávní dosedací plochou; b) způsob tvorby ohybových trhlin; c) možnost vypořádání plochy; d) možnost zbrúšení vzorku

Podložení vzorků přípravkem s vypouklým dnem by bylo výhodné za předpokladu, že by zakřivení dosedací plochy bylo totožné u všech vzorků, ale to nebyl tento případ. Proto bylo rozhodnuto o zbrúšení dosedací plochy vzorků. S broušením vzorků byly spojeny následující požadavky:

- 1) Zbrúšená plocha musí být rovnoběžná s podstavou ocelového válce, aby bylo umožněno vytlačování válce ve směru osy.
- 2) Při broušení není možné použít vodní chlazení vzhledem k předpokladu, že změna soudržnosti souvisí s korozí výztuže.
- 3) Tepelné zatížení vzorků nesmí ovlivnit soudržnost ani chemické složení betonu.

Nejprve bylo nutné vyřešit, jakým způsobem bude zajištěna rovnoběžnost dosedací plochy s podstavou válce. Při broušení ručním nářadím se ukázalo, že není možné dodržet požadovanou přesnost. Proto bylo zhotoveno uchycení vzorku s rektifikačními šrouby, které je uloženo na ložiskách umožňující lineární posun. Tento aparát pak byl připevněn ke kombinované brusce BDS-9A.



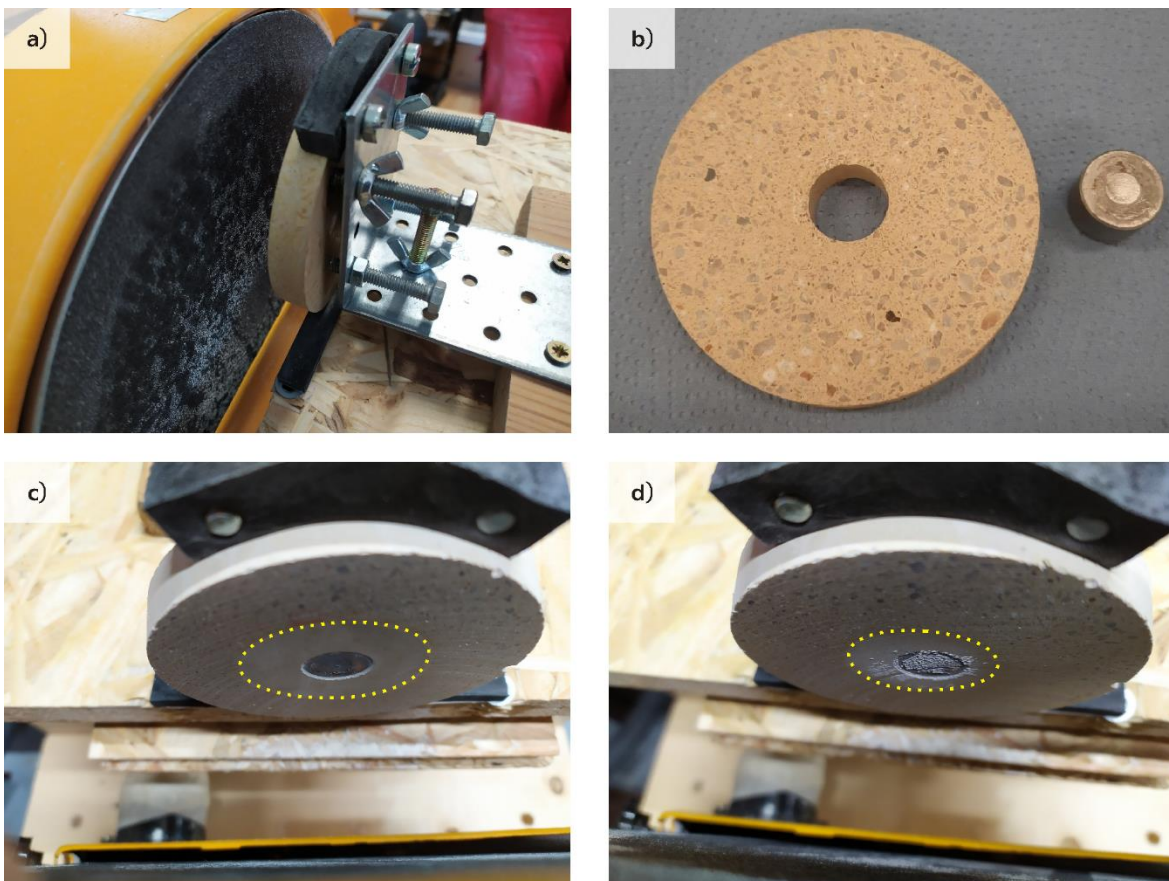
Obrázek 77 Aparát na broušení vzorků



Po základním uchycení vzorku se pomocí lineárního posunu dotlačí vzorek na brusné plátno, kde se rektifikačními šrouby aretuje náklon vzorku (Obrázek 78). Následné broušení je pak jen otázka přitlaku na lineární posun.

Vzhledem k tomu, že nebylo možné využít vodní chlazení vzorků během broušení, vystalo několik problémů. Prvním byla potřeba výkonného odsávání jemného prachu. Další problémy souvisely se zahříváním vzorku a brusného plátna. Korundové brusné plátno se při zahřátí nadměrně opotřebovává. I přes časté přestávky jedno plátno vydrželo broušení maximálně dvou vzorků. Jemný prach z broušení se pak usazoval uprostřed broušeného vzorku i na brusném plátně, čímž snižoval účinnost brusného plátna a zvyšoval množství vzniklého tepla.

Nakonec se osvědčila metoda rychlého intenzivního broušení s velkým přitlakem a přestávkami na vychladnutí. Touto metodou pak vznikla hrubší struktura broušeného povrchu, která byla odstraněna ručním dobroušením krouživým pohybem vzorku po brusném plátně připevněném na rovné desce.

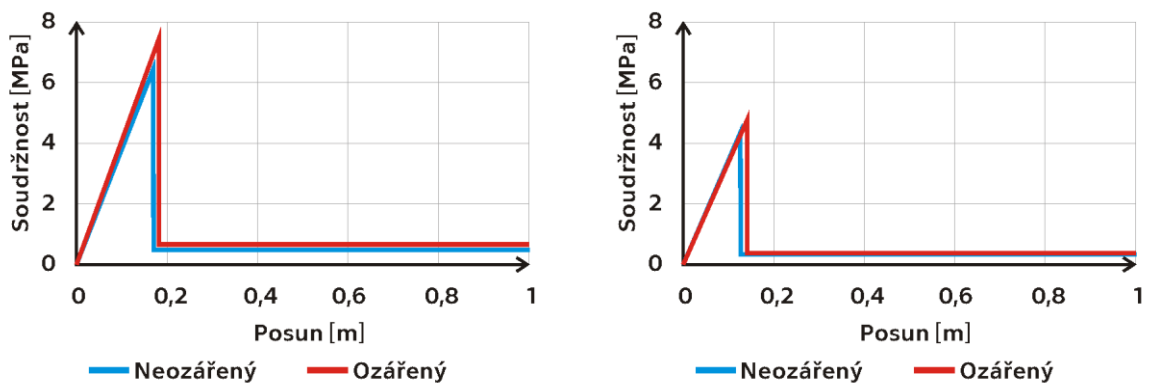


Obrázek 78 Broušení vzorků

a) rektifikace vzorku před broušením; b) povrch zbroušeného vzorku po experimentu (bez trhlin);  
c-d) postup při broušení

### 2.3.5 Výsledek zkoušek

Zkoušením mechanických vlastností soudržnosti oceli a betonu byly stanoveny zjednodušené pracovní diagramy (Obrázek 79). Z výsledků je patrné, že vzorky vystavené gama záření odpovídajícímu 300 letům působení vyhořelého paliva vykazují zvýšenou soudržnost mezi ocelí a betonem. Předpokládaným důvodem je vznik koroze ocelové výztuže, který byl patrný ihned po vybalení vzorků z ochranné hliníkové fólie (Obrázek 80).



Obrázek 79 Výsledný pracovní diagram saturovaných (vlevo) a vysušených vzorků



Obrázek 80 Koroze výztuže neozářeného (vlevo) a ozářeného vzorku





## 2.4 Jádrové vývrty průměru 10 mm

Při zkoumání vlivu ionizujícího záření byly pozorovány objemové změny betonu [74-75]. Výzkum dospěl do bodu, kdy je potřeba zkoumat každou součást betonu zvlášť. Bylo prokázáno, že kamenivo při ozařování ionizujícím zářením zvětšuje objem a tím narušuje celistvost cementové malty [76]. Zkušební tělesa z kameniva jsou vystavena nejen gama záření, ale i neutronovému záření, tudíž musí být jejich následné zkoušení prováděno v horkých komorách (Obrázek 81). ČVUT spolupracuje na těchto experimentech s ÚJV v Řeži, kde probíhá jak ozařování, tak testování zkušebních těles. Příprava zkušebních těles je zajištěna ČVUT dle požadavků ÚJV.

Ozáření zkušebních těles probíhá v reaktoru, kam jsou vzorky umístěny v kapslích vytvořených z palivových tyčí. Velikost a tvar zkušebních těles je tedy definován velikostí prostoru v palivové tyči. Jedná se o válečky průměru maximálně 10 mm. Výška válečku se je dle možností buď 10 mm nebo 20 mm. Od každého kameniva byly požadovány i disky průměru 10 mm s výškou 1 mm.

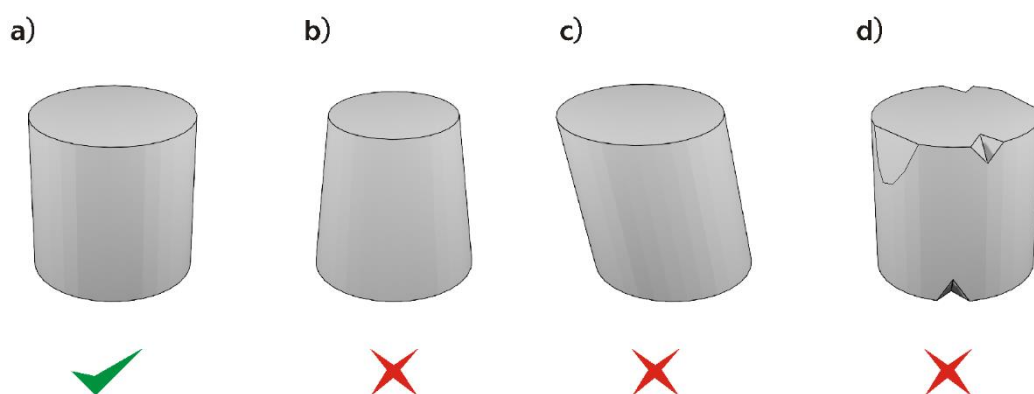
Zkušební tělesa jsou vyrobena z kameniva použitého v konkrétních jaderných elektrárnách. Vzhledem k rozměrům vzorků je totiž možná jejich výroba i z kameniva odebraného vývrtem betonu.



Obrázek 81 Horká komora (Foto: CV Řež)

## 2.4.1 Požadavky na kvalitu zkušebních těles

Průměr zkušebního tělesa byl stanoven v souladu s velikostí palivových pelet, pro které je palivová tyč navržena, a s ohledem na skutečnost, že ozářené kamenivo zvětšuje objem. Průměr nesměl překročit 10,0 mm. Délka vzorku byla požadována  $10,0 \pm 0,3$  mm nebo  $20,0 \pm 0,3$  mm. Pro zjišťování objemových změn bylo každé zkušební těleso přeměřeno před experimentem a po experimentu. Vzhledem k následnému zjišťování mechanických vlastností bylo požadováno dodržení co nejpřesnějšího tvaru rotačního válce (Obrázek 82). Z dodaného kameniva pak byly sestaveny různé kombinace velikostí tak, aby byly naplněny dvě kapsle (Obrázek 83).



Obrázek 82 Zkušební tělesa

a) Rotační válec; b) komolý kužel; c) kosý válec; d) poškození hran

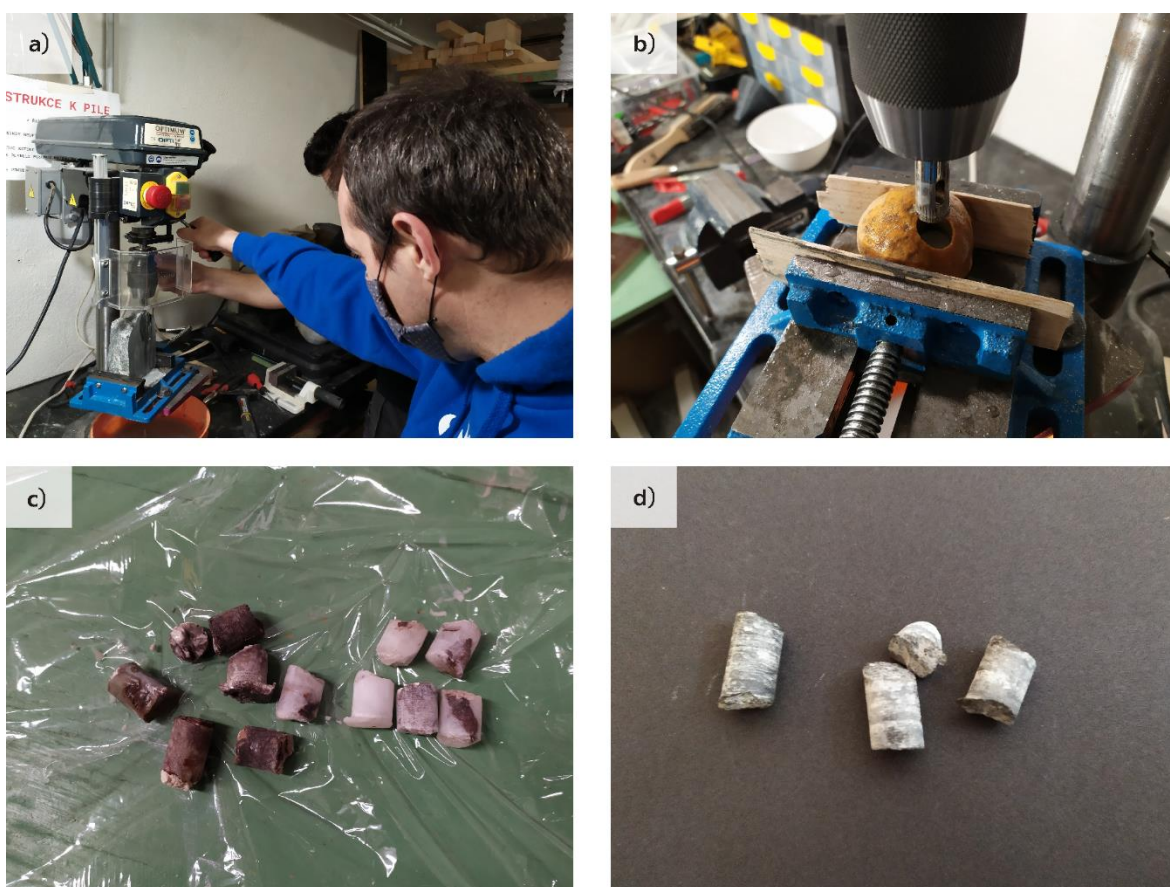
#	Název	Barevné označení	Kapsle 1 (nízká dávka)			Kapsle 2 (vysoká dávka)		
			Délka [cm]			délka [cm]		
			Vzorek 1	Vzorek 2	vzorek 3	Vzorek 1	Vzorek 2	vzorek 3
1	Serpentenite CZ	[červená]	2	2	1	2	1	1
2	Serpentenite Fortum	[červená]	2	2	1	2	1	1
3	Granite Fortum	[žlutá]	2	2	1	2	1	1
4	Granite TVO	[žlutá]	2	2	1	2	1	1
5	EDF A1	[zelená]	1	1	1	1	1	1
6	EDF A2 (šedivý)	[zelená]	<del>1</del>	<del>1</del>	<del>1</del>	1	1	1
7	EDF A2 (černý)	[modrá]	<del>1</del>	<del>1</del>	<del>1</del>	1	1	1
8	EDF A6	[modrá]	1	1	1	1	<del>1</del>	<del>1</del>
9	Barite CZ (bílý)	[tmavě modrá]	1	<del>1</del>	<del>1</del>	1	1	<del>1</del>
10	Barite CZ (tmavý)	[fialová]	1	1	<del>1</del>	1	<del>1</del>	<del>1</del>
11	Disk (jeden od každého)	[černá]	1			1		
Total			30			30		

Obrázek 83 Rozmístění zkušebních těles v kapslích

## 2.4.2 Výroba zkušebních těles z nerostů

Pro výrobu zkušebních těles byly k dispozici buď velké kusy nerostů nebo malé kamínky. Pro velké kusy nerostů byl zvolen postup, kdy v první fázi byly odvrtny válečky nerostů diamantovou vykrúžovací korunkou. Následně byly válečky zkráceny na požadovanou délku, a nakonec byly dobroušeny pomocí diamantových pilníků a brusného papíru. Pro malé kamínky byl zvažován jiný postup opracování, ale díky fixaci kamínků v sádře bylo možné využít shodný postup (Obrázek 85 e-f).

Odvrtání válečků bylo provedeno stolní vrtačkou OPTIMUM Opti Drill B14 (Obrázek 84) a diamantovou korunkou s vnějším průměrem 14 mm. Během vrtání bylo nutné použít chlazení vodou, jednak aby se korunka nadměrně neopotřebovala, ale také kvůli odplavování odvrtného prachu. V případě špatného odplavování prachu docházelo k lámání nedovrtných vzorků. Vzhledem k nedostatku některých materiálů bylo nutné postupovat pomalu. U velkých kusů nerostu bylo potřeba po zhotovení vývrty o celé délce korunky váleček vylomit.

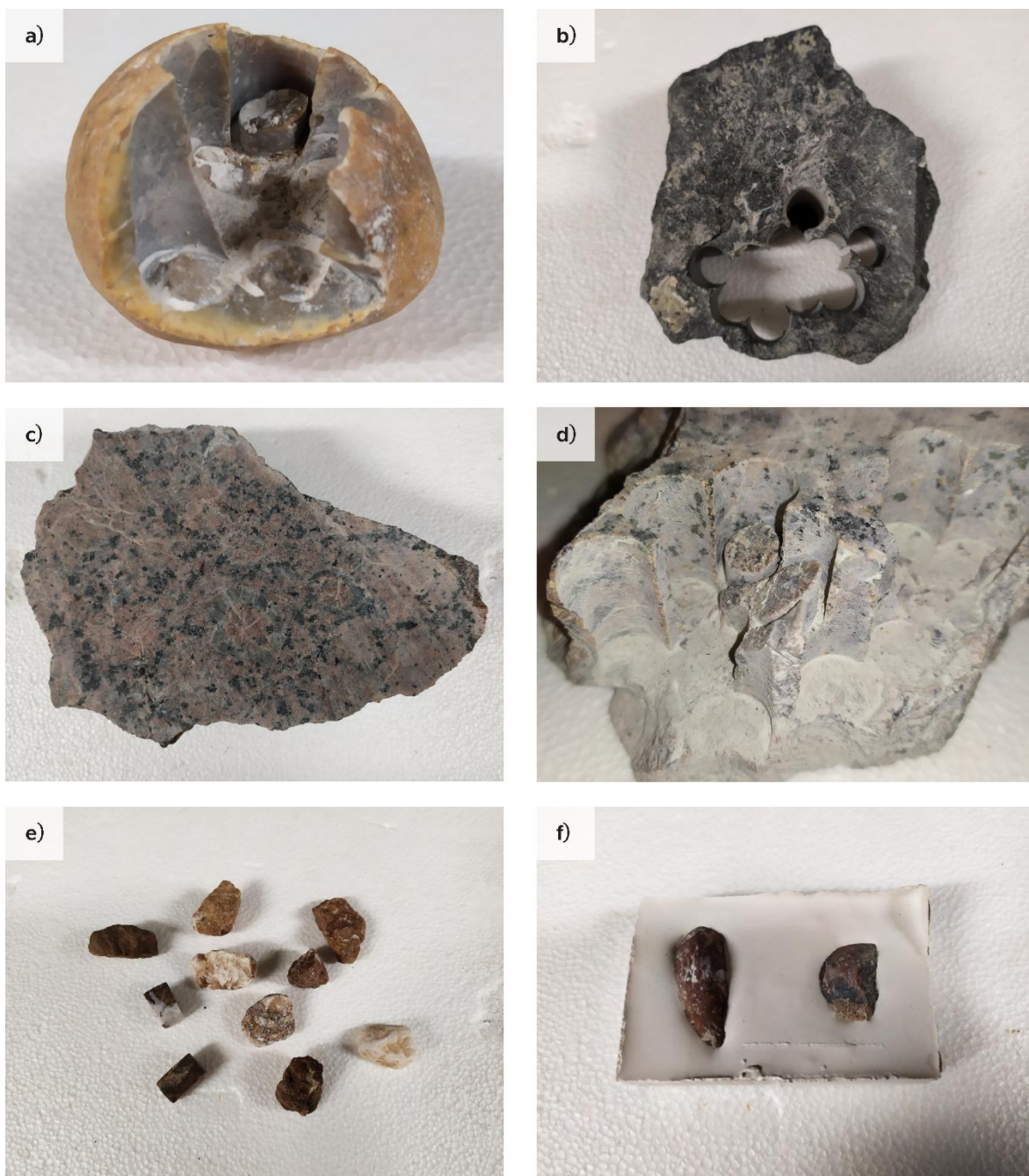


Obrázek 84 Vrtání zkušebních těles

a) Vrtání nerostu; b) upevnění nerostu; c) vývrty barytu; d) vývrty serpentinitu



Při vylamování vyvrtaného válečku z větších kusů hornin docházelo k praskání vzorků v místech trhlin (Obrázek 85 a). V případě tenčích vzorků docházelo k odtržení vývrtu před úplným provrtáním. Odtržená část pouze zkracovala maximální délku vzorku a byla odříznuta při zkracování vzorku (Obrázek 86 c). Umístění vrtů bylo proto pečlivě voleno v ohledem na výše popsané skutečnosti. Přesto bylo u některých hornin pro zhotovení požadovaného množství zkušebních těles provedeno i několikanásobné množství vývrtů (např. pro žulu, viz Obrázek 85 c-d).



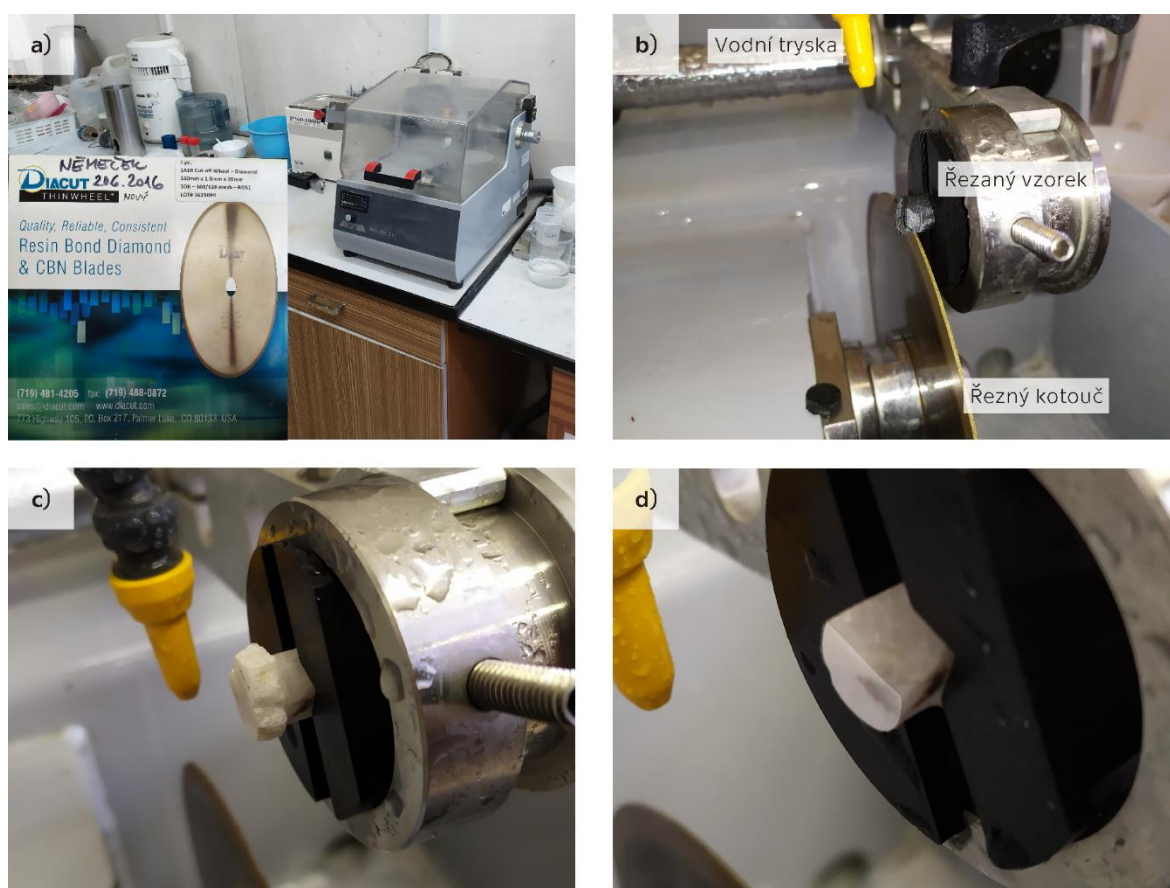
Obrázek 85 Vrtané kusy nerostů

a) Vzorek EDF A1; b) serpentinit; c) žula; d) žula – trhliny ve vývrtech; e) baryt; f) fixace barytu

Ke zkrácení vzorků byla použita řezačka Brillant 210 s diamantovým řezným kotoučem (Obrázek 86), která kromě precizní kvality řezané plochy zajistila i kolmost řezu k ose vzorku. Řezačka disponuje vodním chlazením, nastavitelnými otáčkami a ručním přítlakem. Pro uchycení vzorku byla na 3D tiskárně zhotovena redukce.

Po upnutí vzorku a nastavení vzdálenosti řezu se řezačka zavře, spustí se vodní chlazení a nastaví se rychlost kotouče. Pak se vzorek spustí a nechá se vlastní vahou dosedat na kotouč. U tvrdých minerálů je možné ručně zvýšit přítlak.

Díky přesnému zpracování řezačky je také možné vzorek otáčet, aniž by se změnila poloha řezu. U tvrdých minerálů se otáčením vzorku výrazně snižuje potřebná doba na jeden řez. U měkkých minerálů se v průběhu řezání musí vzorek několikrát otočit, aby nedošlo k odlomení hrany na konci řezu (Obrázek 86 d).



Obrázek 86 Zpracování vzorků

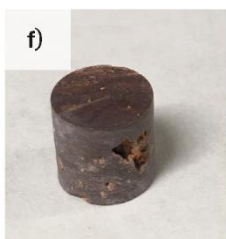
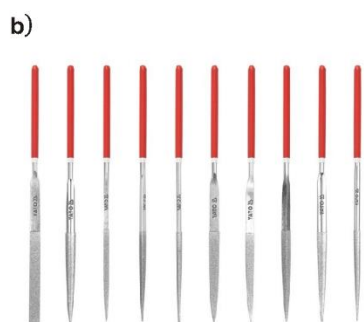
a) Řezačka Brillant 210; b) uchycení vzorku; c) vzorek před řezáním; d) poškozený vzorek po řezání

Odvrtaná zkušební tělesa měla průměr podle opotřebování diamantové vykrúžovací korunky 10,3 - 10,9 mm. Pro úpravu průměru pod 10,0 mm byl zhotoven jednoduchý přístroj připomínající soustruh (Obrázek 87). Přístroj byl vyroben z několika úhelníků,



dvou ložisek a spojovacího materiálu. Byl poháněn nejprve vrtačkou, ale následně byla připojena bruska s regulovatelnými otáčkami.

Vzorek byl upnut mezi ložisky. Dosedací plocha byla opatřena lepidlem z tavné pistole, aby nedocházelo k posunu vzorku při broušení. Zároveň měkká dosedací plocha zabraňovala poškození hran vzorku. Hrubé zbroušení bylo na rotujícím vzorku provedeno diamantovým pilníkem, jemné dobroušení pak korundovým brusným papírem G120.



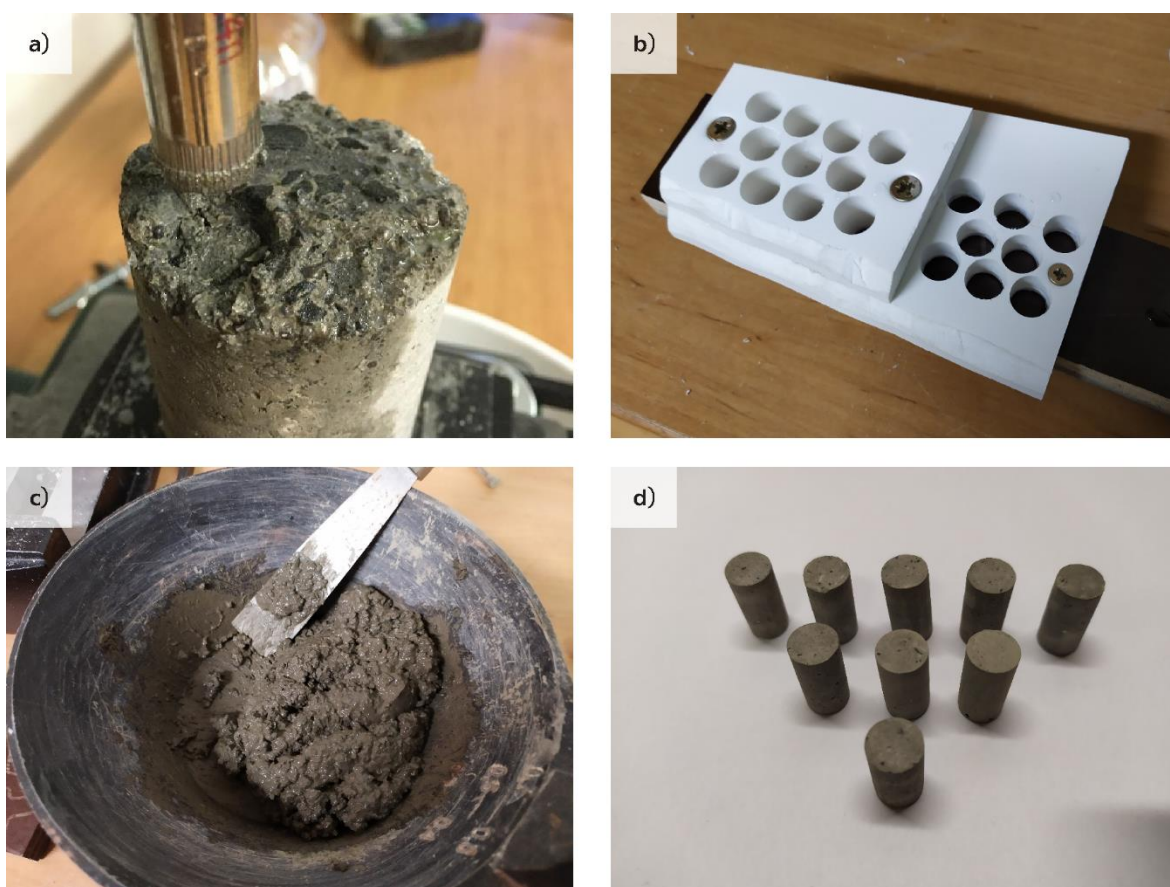
Obrázek 87 Broušení vzorků

a) Stroj na dobroušení vzorku; b) diamantové pilníky; c) brusný papír; d-g) výsledná zkušební tělesa

### 2.4.3 Výroba zkušebních těles z betonu

Další zkušební tělesa měla být vyrobena z betonů použitých v jaderné elektrárně Temelín. Z těžkého betonu byly požadovány válečky výšky 20,0 mm a z konstrukčního betonu válečky výšky 10,0 mm s otvorem uprostřed pro zavedení sondy.

Těžký beton obsahuje jako plnivo setpentinitové kamenivo, smaltěřskou fritu a litinové broky. Při vrtání těles docházelo k vytrhávání litinových broků ze struktury betonu a tím k destrukci vzorku (Obrázek 88). Vzorky proto byly zhotoveny betonáží do bednění z pěnových PVC desek KÖMATEX s vyvrtanými otvory průměru 9,8 mm. Ze směsi muselo být odebráno hrubé kamenivo.



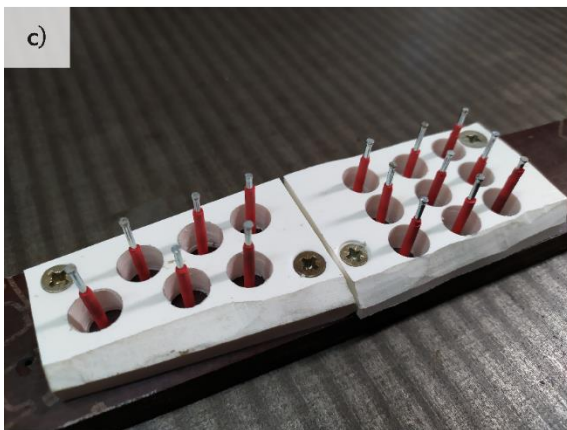
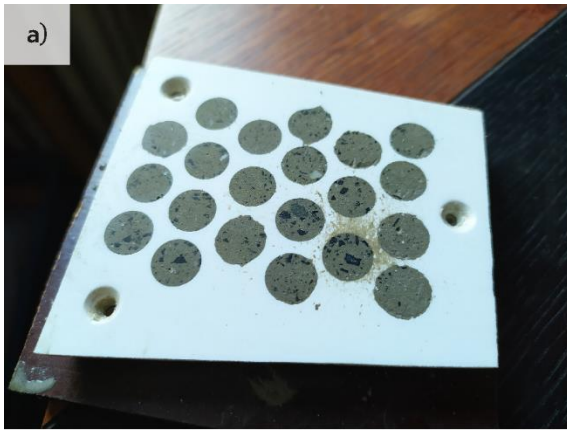
Obrázek 88 Zkušební tělesa z těžkého betonu JE Temelín

a) Neúspěšné vrtání vzorku; b) forma; c) směs betonu; d) výsledná zkušební tělesa

U vzorků z konstrukčního betonu byl požadován otvor průměru 2 mm uprostřed podstavy. Nejprve byly vzorky vybetonovány do PVC bednění a otvor byl realizován diamantovým vrtákem průměru 2 mm. Při vrtání ovšem docházelo k odštěpování a praskání zkušebních těles (Obrázek 89 b).



Při druhé betonáži vzorků byly otvory definované hřebíkem. Hřebík byl vsunut do předvrtané díry v bedně, čímž byla zajištěna poloha a kolmost v podstavě. Na hřebících byla realizována pružná vrstva ze dvou teplem smršťovací bužírek, které zajistily bezproblémové odbednění vzorků (Obrázek 89 c-f).














Obrázek 89 Zkušební tělesa z konstrukčního betonu JE Temelín

- a) Vybetonované vzorky; b) porušení vyvrtaných vzorků; c) bedně s předem definovanými otvory; d) vybetonované vzorky s otvory; e) odbednění; f) výsledná zkušební tělesa












## 2.4.4 Diskuse výsledků

Výroba zkušebních těles z dodaných minerálů byla úspěšná (Obrázek 90). Jediný neúspěch byl u zkušebních těles z tmavého barytu. Dodané kamenivo mělo malé rozměry a velké množství trhlin a přes veškerou snahu se nepodařilo vyrobit víc těles. U betonových vzorků pak bylo přistoupeno ke kompromisu a tělesa byla vybetonována. Ze směsi tedy muselo být vyjmuta hrubé kamenivo.

Zkušební tělesa byla předána kolegům z Centra výzkumu v Řeži. V době odevzdání této závěrečné práce probíhá analýza již ozářených zkušebních těles. Výsledky zatím nebyly publikovány.

#	Název	Barevné označení	Kapsle 1 (nízká dávka)		
			Délka [cm]		
			Vzorek 1	Vzorek 2	vzorek 3
1	Serpentenite CZ		2	2	1
2	Serpentenite Fortum		2	2	1
3	Granite Fortum		2	2	1
4	Granite TVO		2	2	1
5	EDF A1		1	1	1
6	EDF A2 (šedivý)		<del>1</del>	<del>1</del>	<del>1</del>
7	EDF A2 (černý)		<del>1</del>	<del>1</del>	<del>1</del>
8	EDF A6		1	1	1
9	Barite CZ (bílý)		1	<del>1</del>	<del>1</del>
10	Barite CZ (tmavý)		1	<del>1</del>	<del>1</del>
11	Disk (jeden od každého)		1		
Total			30		



#	Název	Barevné označení	Kapsle 2 (vysoká dávka)		
			délka [cm]		
			Vzorek 1	Vzorek 2	vzorek 3
1	Serpentenite CZ		2	1	1
2	Serpentenite Fortum		2	1	1
3	Granite Fortum		2	1	1
4	Granite TVO		2	1	1
5	EDF A1		1	1	1
6	EDF A2 (šedivý)		1	1	1
7	EDF A2 (černý)		1	1	1
8	EDF A6		1	<del>1</del>	<del>1</del>
9	Barite CZ (bílý)		1	1	<del>1</del>
10	Barite CZ (tmavý)		1	<del>1</del>	<del>1</del>
11	Disk (jeden od každého)		1		
Total			30		



Obrázek 90 Zkušební tělesa z minerálů

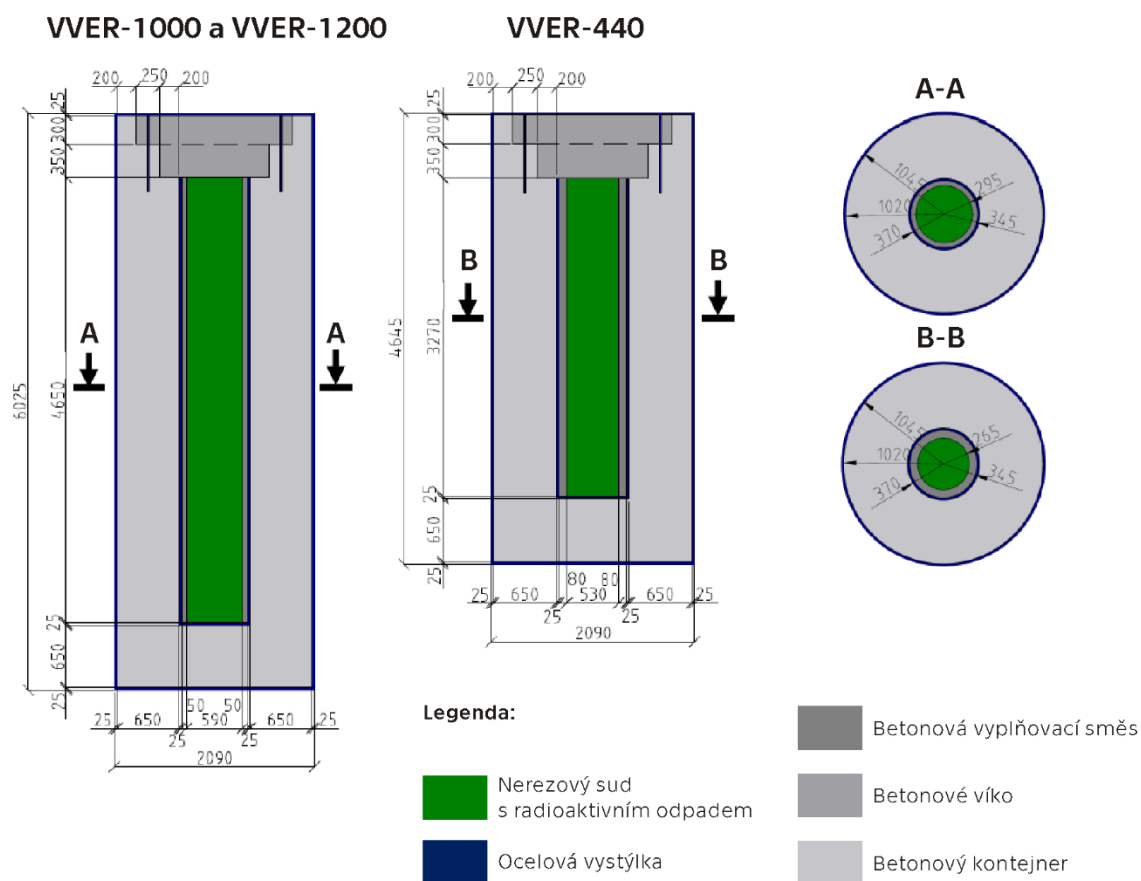




## 2.5 Ověření vlastností betonové směsi pro vyplnění kontejnerů pro ukládání radioaktivního odpadu

V rámci projektu TJ04000186 byla navržena betonová směs k vyplnění prostoru mezi sudem s radioaktivním odpadem a prefabrikovanou betonovou nádobou kontejneru pro ukládání radioaktivního odpadu. Kontejnery byly navrženy pro sudy s vyhořelým palivem z jaderných elektráren s reaktory VVER-440 a VVER-1000 resp. VVER-1200 (Obrázek 91), které se vyskytují na území České republiky. Navržené kontejnery jsou vertikální a liší se pouze výškou a vzhledem k rozdílné velikosti sudu na vyhořelé palivo i tloušťkou spáry mezi sudem a kontejnerem.

K ověření vhodných vlastností navržené směsi bylo naplánováno zhotovení funkčního vzorku v měřítku 1:1.



Obrázek 91 Rozměry kontejnerů pro ukládání radioaktivního odpadu

### **2.5.1 Požadavky na funkční vzorek a průběh experimentu**

K vyplňování prostoru mezi sudem a kontejnerem má docházet ve chvíli, kdy ze sudu bude vyzařovat ionizující záření. Aby nedošlo ke kontaminaci vybavení neutronovým zářením, tak byla směs navržena jako samozhutnitelná. Technologie betonáže se tím výrazně zjednodušila na umíchání směsi a její distribuci do bednění. Bylo však nutné vyřešit další požadavky na bednění:

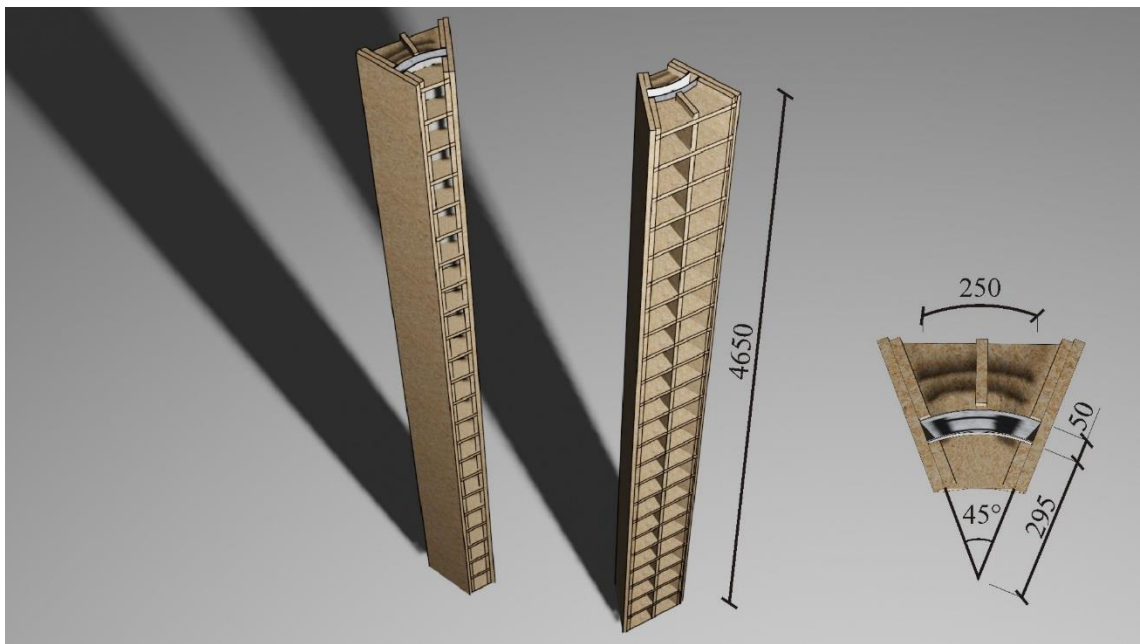
- 1) Funkční vzorek měl být vyroben v měřítku 1:1. Vzhledem ke dvěma variantám kontejnerů byla zvolena méně příznivá varianta kontejneru pro VVER-1000. U této varianty kontejneru je navržena tenčí vrstva vyvíjené betonové zálivky a zároveň je větší výška zalévané mezery oproti variantě kontejneru pro palivo z reaktoru VVER-440
- 2) Výška bednění a tloušťka spáry zůstaly nezměněny, ale bylo rozhodnuto, že půdorysně bude betonována pouze výseč. Betonáž výseče poskytne všechna potřebná data a dojde k výrazné úspoře materiálu. Velikost výseče byla nejprve stanovena na 45°, následně však byla zmenšena na 30° kvůli redukci celkové hmotnosti funkčního vzorku.
- 3) Bednění mělo být zhotoveno ve dvou exemplářích pro dvě různé směsi. Jedna směs byla navržena s minimem vody a druhá s minimem chemických přísad.
- 4) Pro ověřování chování směsi byl požadavek na optickou kontrolu v průběhu betonáže. Jedna ze stěn bednění byla proto navržena po celé výšce 4,65 m z plexiskla.
- 5) Do bednění měla být zabudována čidla pro měření teploty během hydratace betonu.

### **2.5.2 Návrh experimentu**

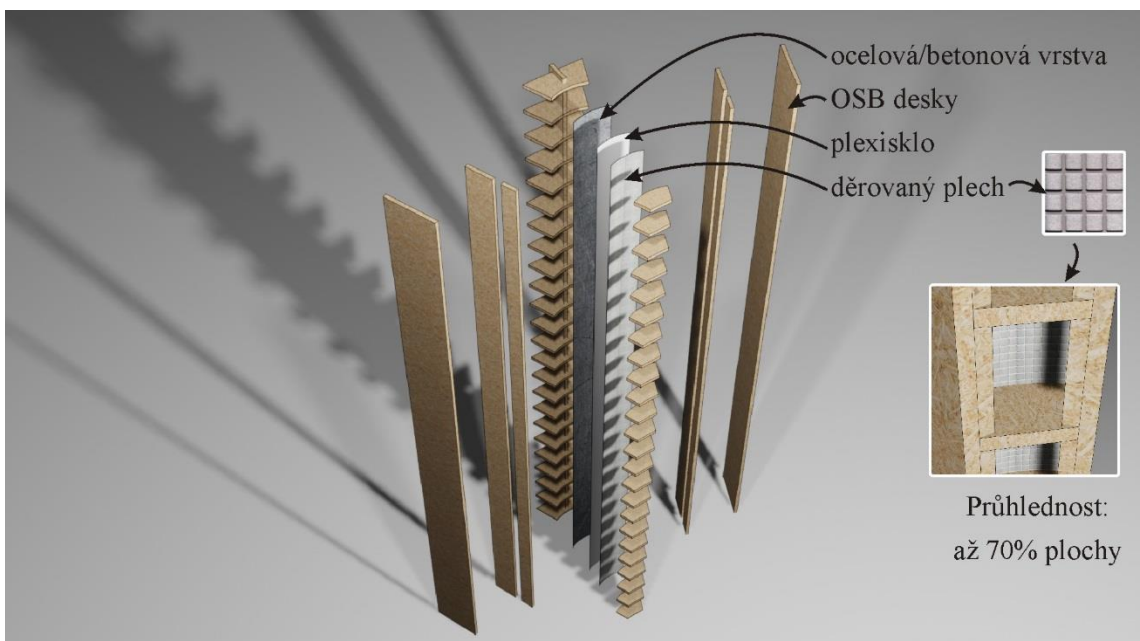
Nosná konstrukce bednění byla navržena z OSB desek tloušťky 25 mm (Obrázek 92). Ze strany kontejneru bylo bednění navrženo z ocelového pozinkovaného plechu tloušťky 1 mm, který simuloval ocelovou vystýlku. Výseč byla na krajích vymezena vodovzdornou foliovanou překližkou a na straně nádoby s vyhořelým palivem byl nerezový plech nahrazen vrstvou plexiskla s tloušťkou 2 mm. Pro zajištění tvaru byly navrženy příčné výztuhy z OSB desek, ale samotné plexisklo muselo být zesíleno tak, aby nedošlo během experimentu k poškození. Uvažovalo se o dvou variantách ztužení.

První varianta obnášela nanesení průhledné neprůstřelné bezpečnostní fólie. Fólie by umožnila pozorování celé plochy, ale pro ztužení by bylo potřeba více příčných výztuh. Druhou možností bylo vyztužení děrovaným plechem se čtvercovými oky. Děrovaný plech sice zakryje přibližně 30 % pozorované plochy, ale výrazně ztuhí plexisklo.

V návrhu byl nakonec použit děrovaný plech. Vizualní kontrola měla v experimentu jen podpůrnou roli, takže zakrytí 30 % bylo akceptovatelné. Navíc plech byl finančně i časově výhodnější.



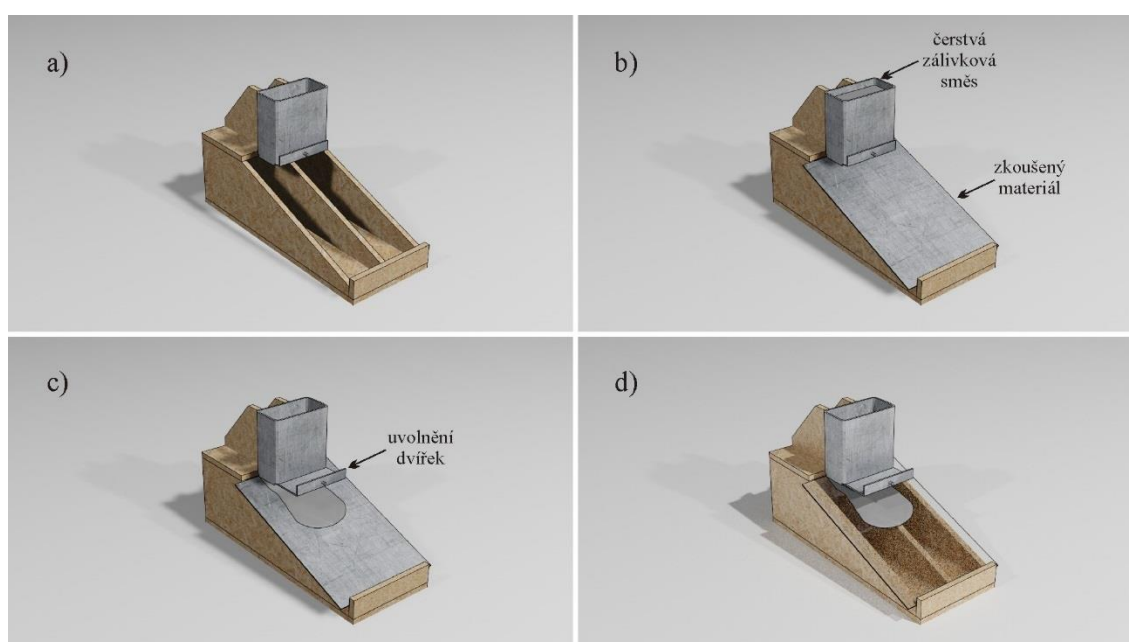
Obrázek 92 Základní rozměry navrženého bednění



Obrázek 93 Součásti navrženého bednění

### 2.5.3 Ověření vlastností použitých materiálů

Možnost nahrazení ocelového povrchu nádoby s vyhořelým palivem za plexisklo bylo ověřeno na základě zkoušky povrchových vlastností materiálů [77]. Během zkoušky byl stejný objem čerstvého betonu aplikován na různé povrchy. Povrchy byly nakloněny pod úhlem 0°, 30° a 60° od vodorovné roviny. Po aplikaci čerstvého betonu na vyšetřovanou plochu bednění bylo sledováno chování čerstvého betonu. Výsledné tvary steklého betonu byly vzájemně porovnány (Obrázek 94). Experiment umožňuje zkoumat i chování směsi s vlivem vibrací, ale pro samozhutnitelný beton nebyly vibrace použity.



Obrázek 94 Zkouška povrchových vlastností různých materiálů

a) Zkušební přístroj; b) vložení zkoušeného materiálu a naplnění nádoby vyvíjenou směsí; c) uvolnění spodních dvířek; d) porovnání rozlití směsi na různých materiálech.

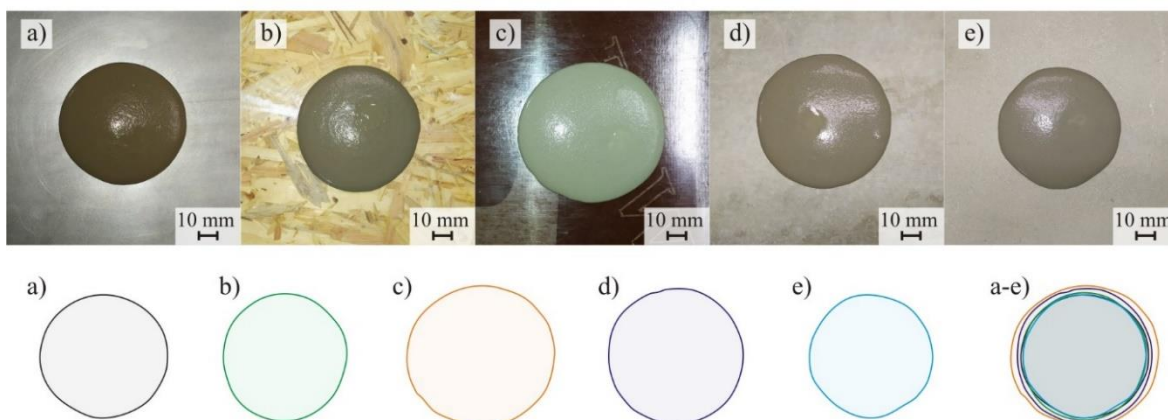
V experimentu šlo primárně o prokázání, že je možné použít plexisklo místo ocelového plechu. Zkoumány ale byly i další materiály (Obrázek 95). Jednalo se o voděodolnou překližku a betonový povrch. Překližka byla použita při výrobě bednění funkčního vzorku. Betonový povrch byl zvažován pro případ, kdy by vnitřní strana kontejneru byla navržena bez ocelové vystýlky. Zkoumán byl beton hladkým a hrubým povrchem.



Obrázek 95 Testované materiály [77]

a) ocelový plech; b) plexisklo; c) voděodolná překližka; d) hladký beton; e) hrubý beton

Při nanášení betonu na vodorovnou plochu byly výsledky zkoušek téměř totožné pro všechny vzorky. Nejlepší vlastnosti roztékání betonové zálivky byly opakovaně zaznamenány na vodovzdorné překližce (Obrázek 96). Povrchový efekt ocelového plechu a plexiskla byl prakticky identický.

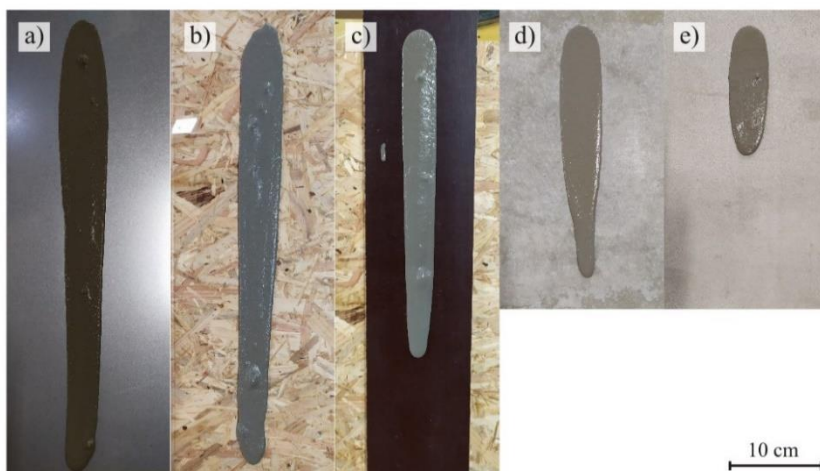


Obrázek 96 Výsledky zkoušek pro úhel  $0^\circ$  [77]

a) ocelový plech; b) plexisklo; c) voděodolná překližka; d) hladký beton; e) hrubý beton

Při zkoušení vlastností pod úhlem  $30^\circ$  se výsledky pro různé materiály lišily výrazněji (Obrázek 97). Nejhorše dopadl hrubý beton, na kterém betonová zálivka stekla pouze 14 cm, zatímco na hladkém betonovém povrchu stekla 28 cm. U voděodolné překližky byla délka toku 36 cm. Výsledky pro ocelový plech a plexisklo byly velmi podobné, konkrétně 48 cm a 46 cm.

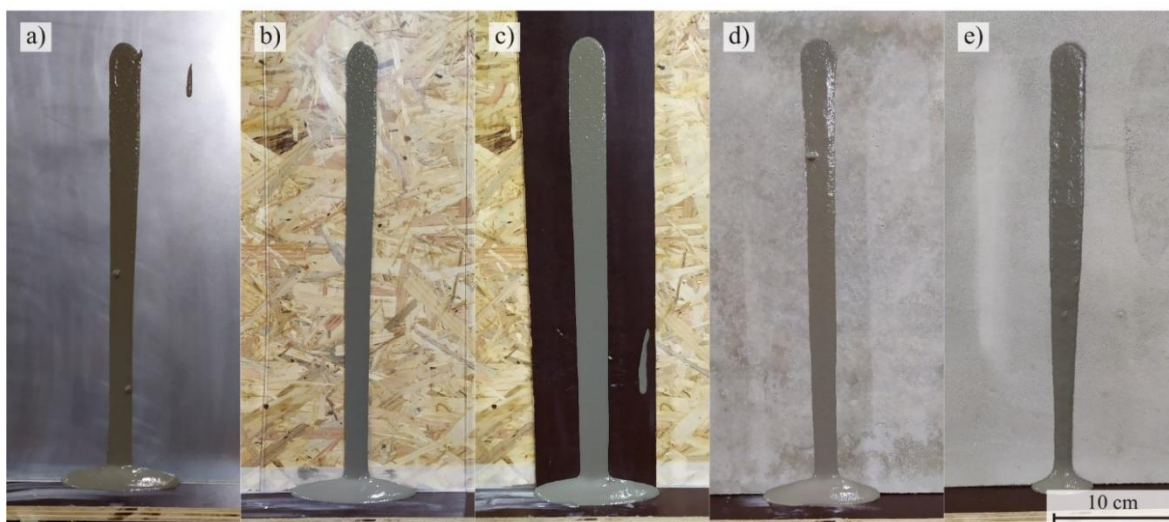




Obrázek 97 Výsledky zkoušek pro úhel 30° [77]

a) ocelový plech; b) plexisklo; c) voděodolná překližka; d) hladký beton; e) hrubý beton

Při zkoušení povrchu pod úhlem 60° bylo zatékání na příliš výrazné (Obrázek 98). Betonová zálivka byla proto nanášena ve výšce 40 cm nad spodním koncem plochy. Přesto ve všech případech betonová zálivka dosáhla dna. Proto byly porovnány doprovodné znaky. Jedním byla šířka průtokové dráhy, která se u betonových povrchů zužovala. Dalším pak bylo množství malty, která dosáhla spodní podložky a podle které lze zjistit, kolik malty ulpělo na povrchu bednění. Z měření lze konstatovat, že chování betonové zálivky bylo na ocelové plechu, plexiskle, voděodolné překližce a hladkém betonovém povrchu téměř totožné. Z toho byl vyvozen závěr, že ocelový plech může být nahrazen plexisklem.

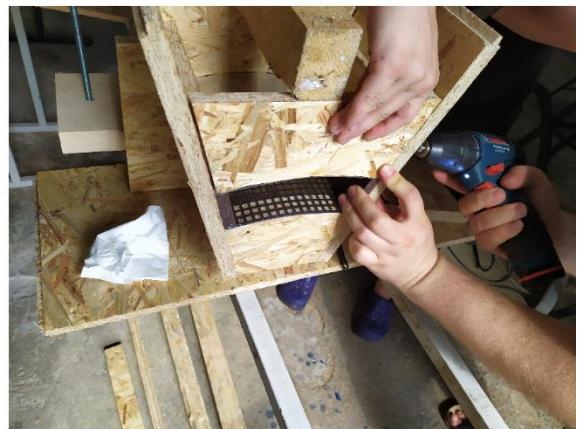


Obrázek 98 Výsledky zkoušek pro úhel 60° [77]

a) ocelový plech; b) plexisklo; c) voděodolná překližka; d) hladký beton; e) hrubý beton

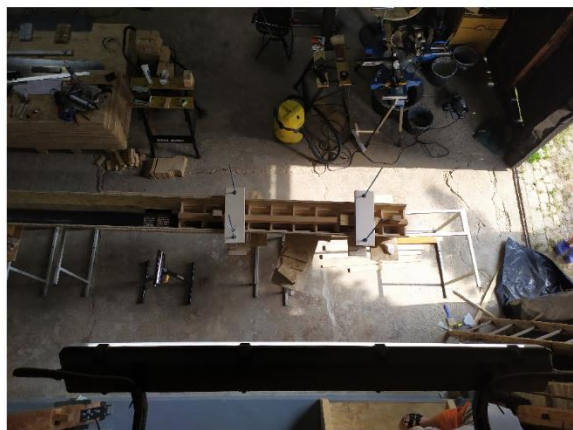
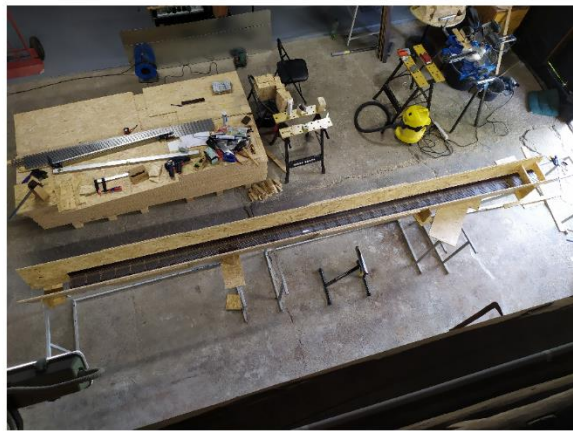
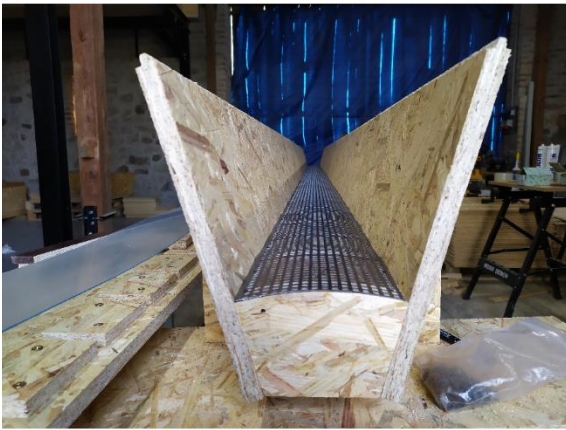
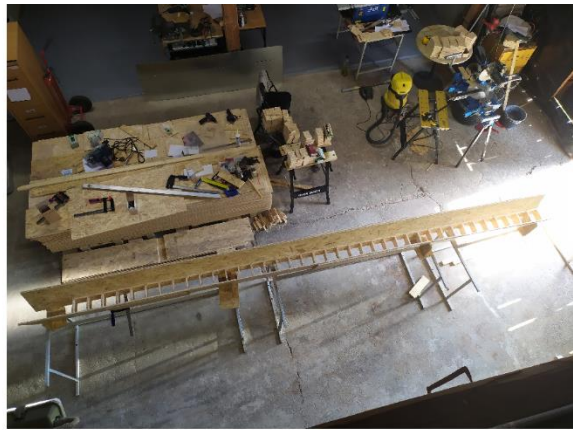
## 2.5.4 Výroba bednění

Všechny komponenty bednění byly vyrobeny za pomoci ručních nástrojů bez použití CNC strojů. Malé obdélníkové rozpěry byly nařezány pokosovou pilou. Příčné výztuhy se zaoblenou stranou byly zhotoveny na spodní frézce podle vyrobeného kopírovacího vzorku. Postupným spojováním jednotlivých komponent vznikly dvě totožné formy (Obrázek 99 a Obrázek 100). Jejich spojením v jeden celek bylo dosaženo vyšší tuhosti bednění.



Obrázek 99 Výroba bednění

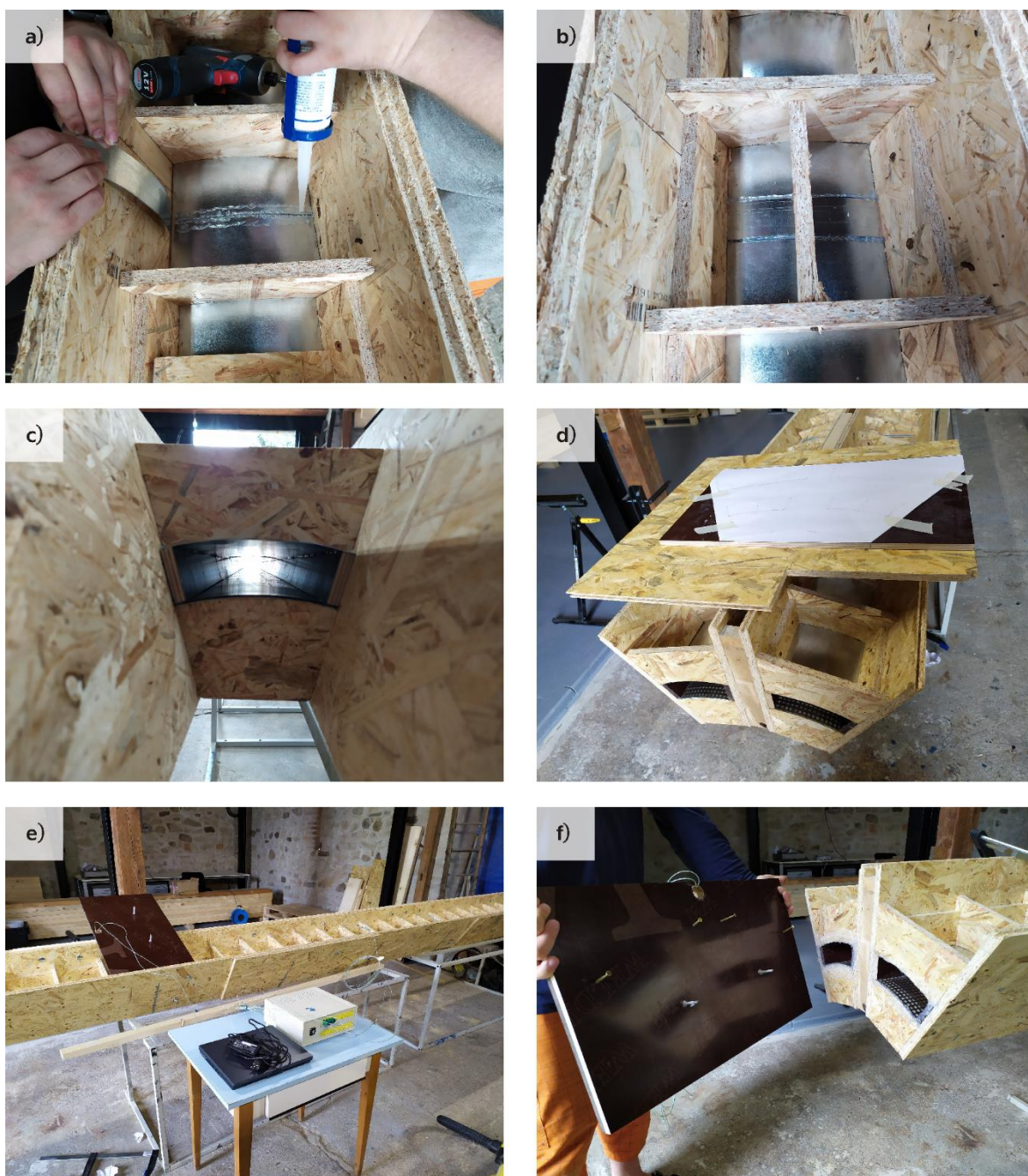




Obrázek 100 Výroba bednění



Veškeré spoje byly zaizolovány sanitárním silikonem (Obrázek 101). Jelikož byl plech uložený na sraz, bylo zhotoveno přeplátování. Po celé výšce pak byl silikon aplikován mezi překližkou a plechem, resp. mezi překližkou a plexisklem. Před dokončením byla osazena teplotní čidla do dna bedně a ve dvou metrech výšky. Jedno čidlo bylo připevnění v zadní části bedně, aby byla zaznamenána i teplota okolního vzduchu v průběhu betonáže. Před připevněním dna bylo bednění pročištěno stlačeným vzduchem.



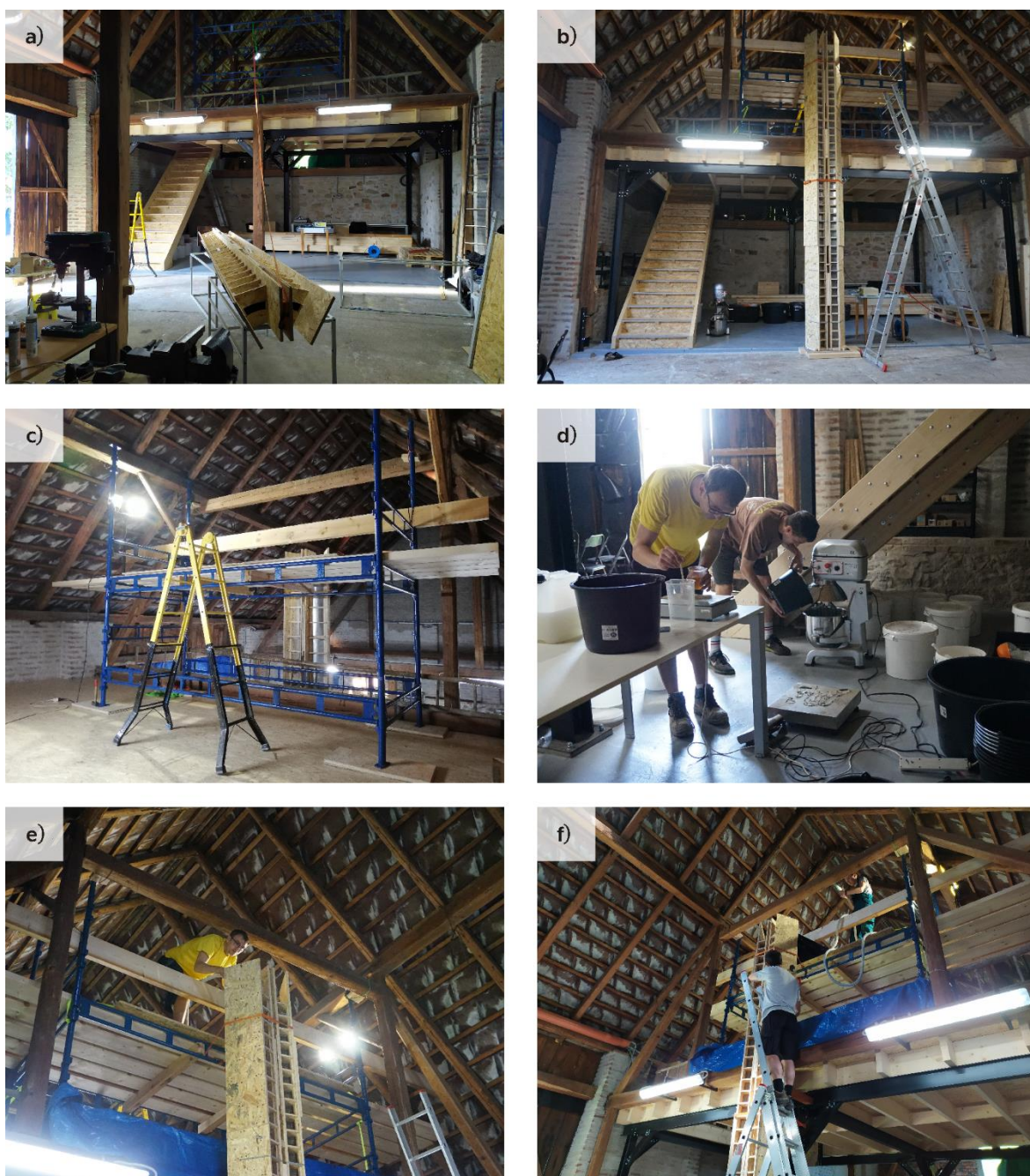
Obrázek 101 Výroba bedně

a-c) Silikonování spojů; d-f) připevnění teplotních čidel do dna formy



## 2.5.5 Průběh experimentu

Forma byla vztyčena za pomoci kladky, vyrovnána do svislé polohy a řádně zafixována. Betonáž proběhla bez komplikací, jen z formy se směsí s minimem chemických přísad byl zaznamenán mírný únik vody kolem teplotní čidla. V průběhu experimentu probíhala vizuální kontrola zatékání směsi (Obrázek 102).



Obrázek 102 Průběh experimentu

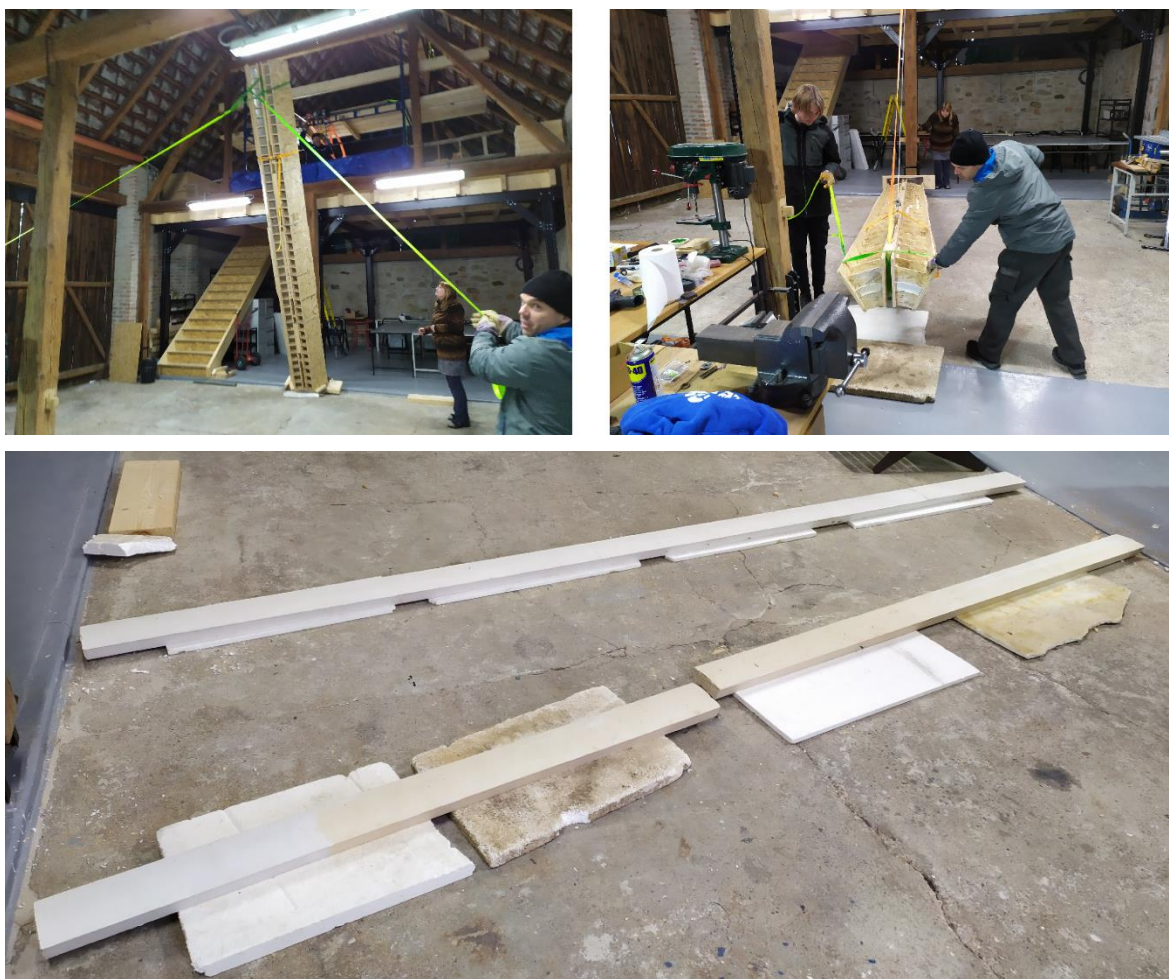
a-b) Vztyčení formy; c) přístup k formě; d-e) betonáž; f) vizuální kontrola



## 2.5.6 Výsledky experimentu a diskuse

Při snesení a odbednění vzorků došlo k prasknutí jednoho z nich (Obrázek 103). Lom vznikl přesně 2 m odspodu, tedy v místě spoje dvou plechů. Vzhledem k následnému rozřezání vzorků po 0,5 m vznikl lom v ideálním místě (Obrázek 104). K rozřezání bylo přistoupeno, neboť při vizuální kontrole povrchu vzorků byly objeveny jen občasné nedokonalosti, zatímco pomocí změřené objemové hmotnosti bylo možné zjistit množství vzduchu zachyceného uvnitř materiálu. Objem jednotlivých kusů byl zjišťován ponořením do vody. Z výsledků měření (Obrázek 105) je patrné, že směs B měla objemovou hmotnost po výšce přibližně stejnou, ale směs A měla objemovou hmotnost dole mírně vyšší. U obou směsí pak měl horní kus výrazně nižší hmotnost.

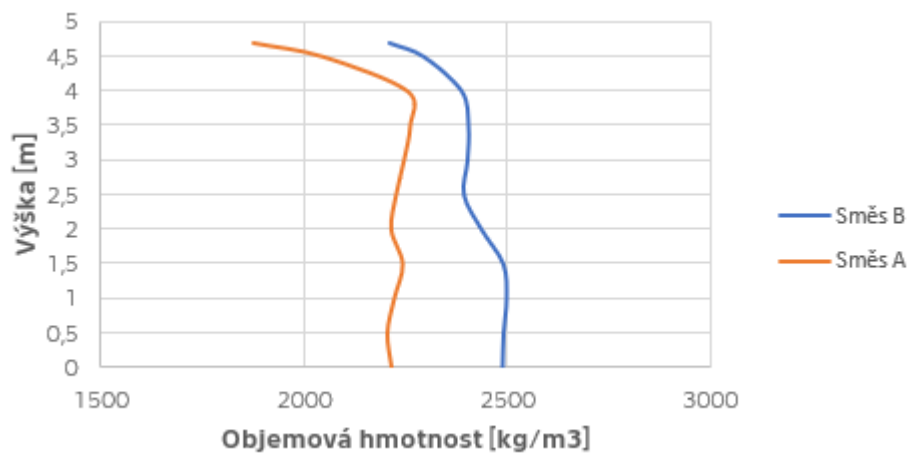
Experiment prokázal, že navržené směsi jsou schopné účinně vyplnit spáru mezi sudem s radioaktivním odpadem a stěnou kontejneru.



Obrázek 103 Snesení a odbednění vzorků



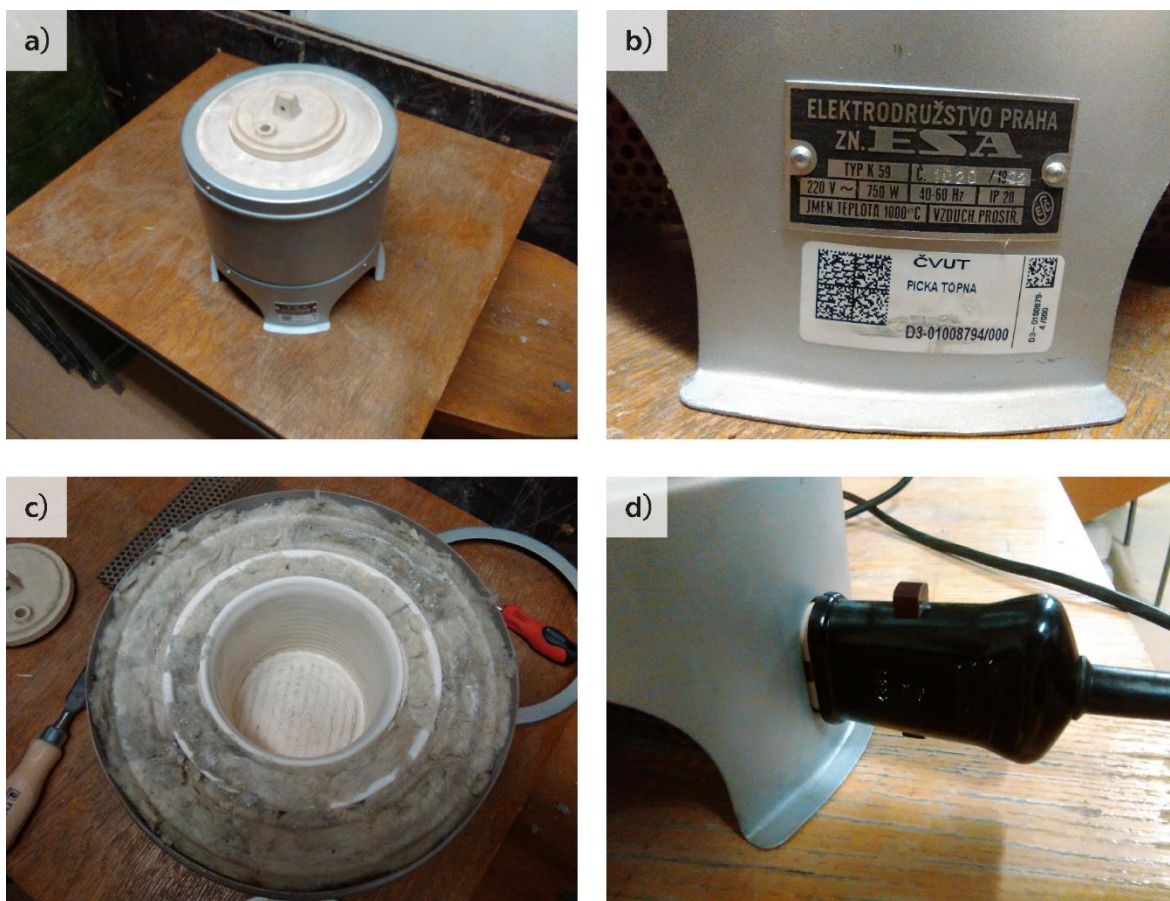
Obrázek 104 Nařezané vzorky



Obrázek 105 Objemová hmotnost směsí po výšce

## 2.6 Kontrolní systém pro vysokoteplotní pec

Při provozu jaderných elektráren jsou betonové konstrukce vystaveny extrémním podmínkám. Kromě ionizujícího záření může být konstrukce zatížena vysokou teplotou. V rámci analýzy možností experimentů byla tato skutečnost zkoumána pomocí topné pece (Obrázek 106), kterou katedra betonových a zděných konstrukcí disponuje. Jednalo se o malou vysokoteplotní pec s vnitřním válcovým prostorem průměru 8 cm a výškou 10 cm. Pec je schopna vyvinout teplotu až 1000 °C, ale konstrukčně se jedná pouze o tepelně izolovaný prostor vyhříváný topnou spirálou, která nemá žádnou regulaci. Bylo proto nutné zhotovit kontrolní systém, který zajistí v průběhu zkoušení požadované teploty. Zároveň však nesmělo dojít k zásahu do konstrukce samotné pece.



Obrázek 106 Topná pec

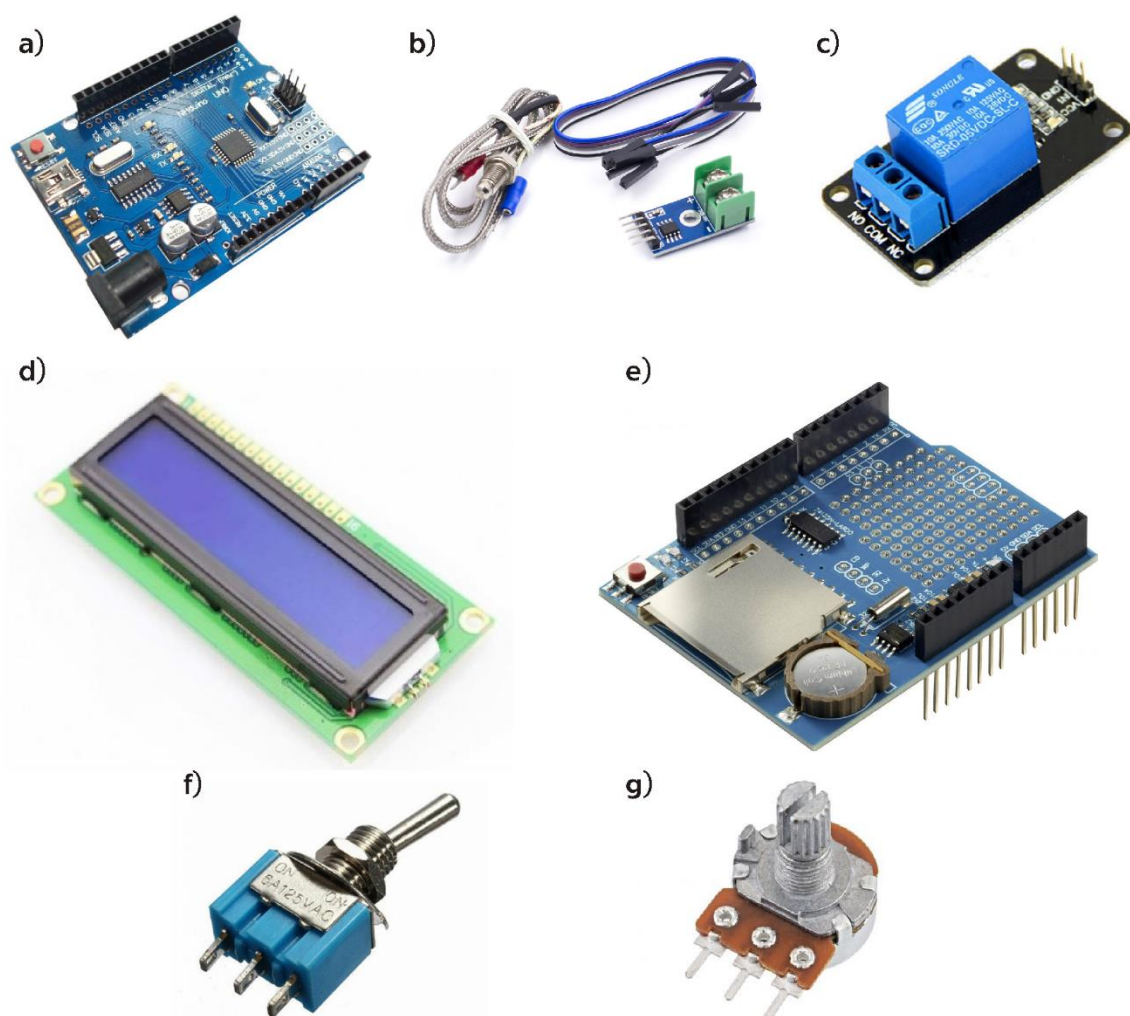
a) Topná pec; b) technické údaje; c) konstrukce pece; d) napájení pomocí NZU remos koncovky



## 2.6.1 Návrh kontrolního systému

Původní ovládání topné pece bylo triviální. Po připojení do jednofázové zásuvky se pec zapíná pomocí spínače na NZU remos koncovce. Na peci pak je přepínač, který spouští buď jednu nebo dvě topné spirály. Spuštění obou topných spirál současně je ovšem možné pouze po omezenou dobu, jinak hrozí poškození pece. K ovládání teploty v peci lze tedy využít spínání zdrojové zásuvky v závislosti na vnitřní teplotě.

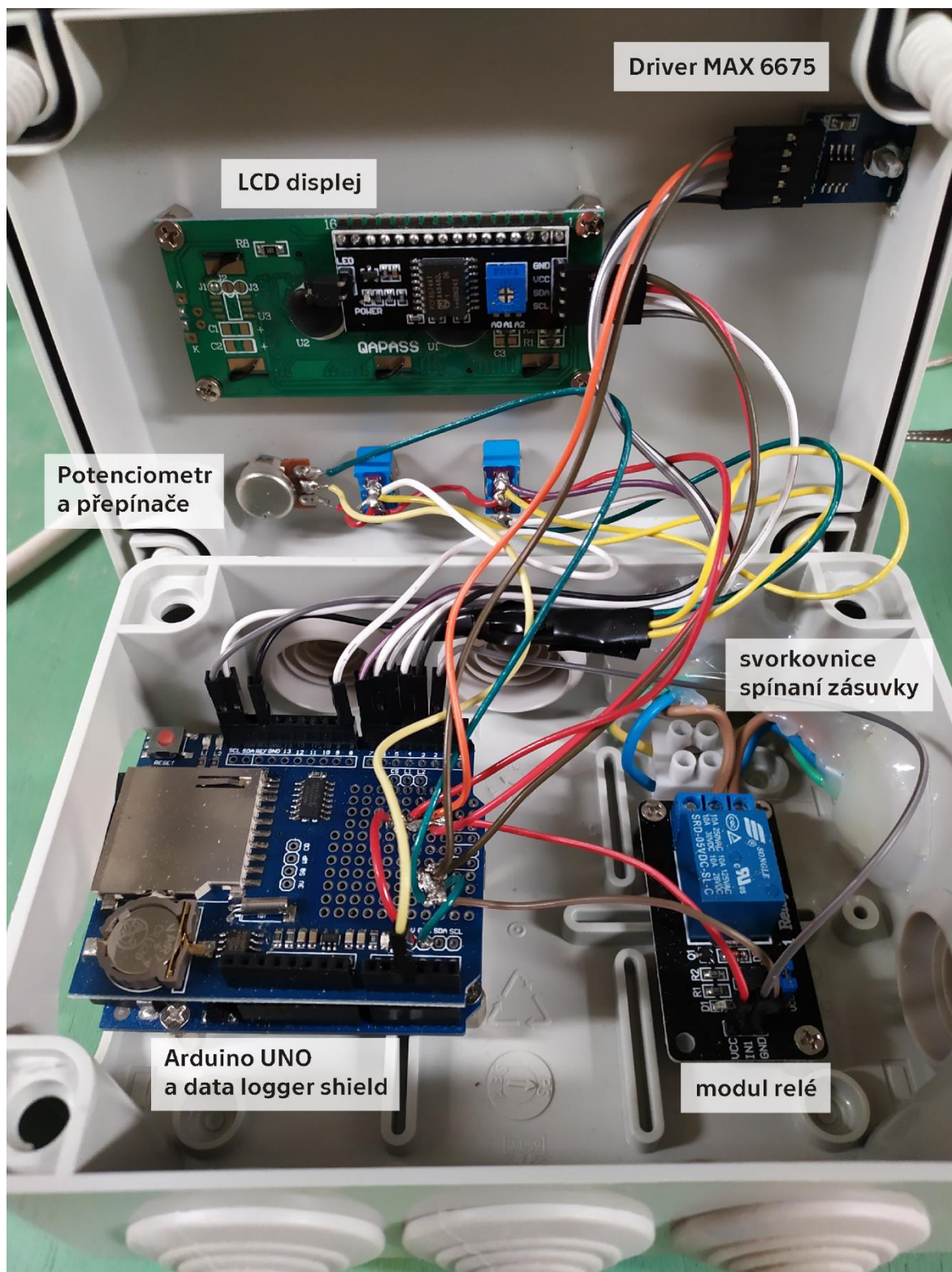
Kontrolní systém byl navržen na základě prototypovací platformy Arduino. Základními komponenty byla deska Arduino UNO, termočlánek typu K, driver MAX 6675 a modul relé. Ovládání je realizováno pomocí dvouřádkového displeje, přepínačů a potenciometru. Pro záznam reálných hodnot teploty uvnitř pece byl využit data logger shield pro Arduino UNO, který umožňuje připojení SD karty (Obrázek 107 a Obrázek 108).



Obrázek 107 Komponenty kontrolního systému (foto: dratek.cz)

a) Arduino UNO; b) termočlánek typu K a driver MAX 6675; c) relé modul; d) LCD displej; e) data logger shield; f) dvoupolohový přepínač; g) potenciometr





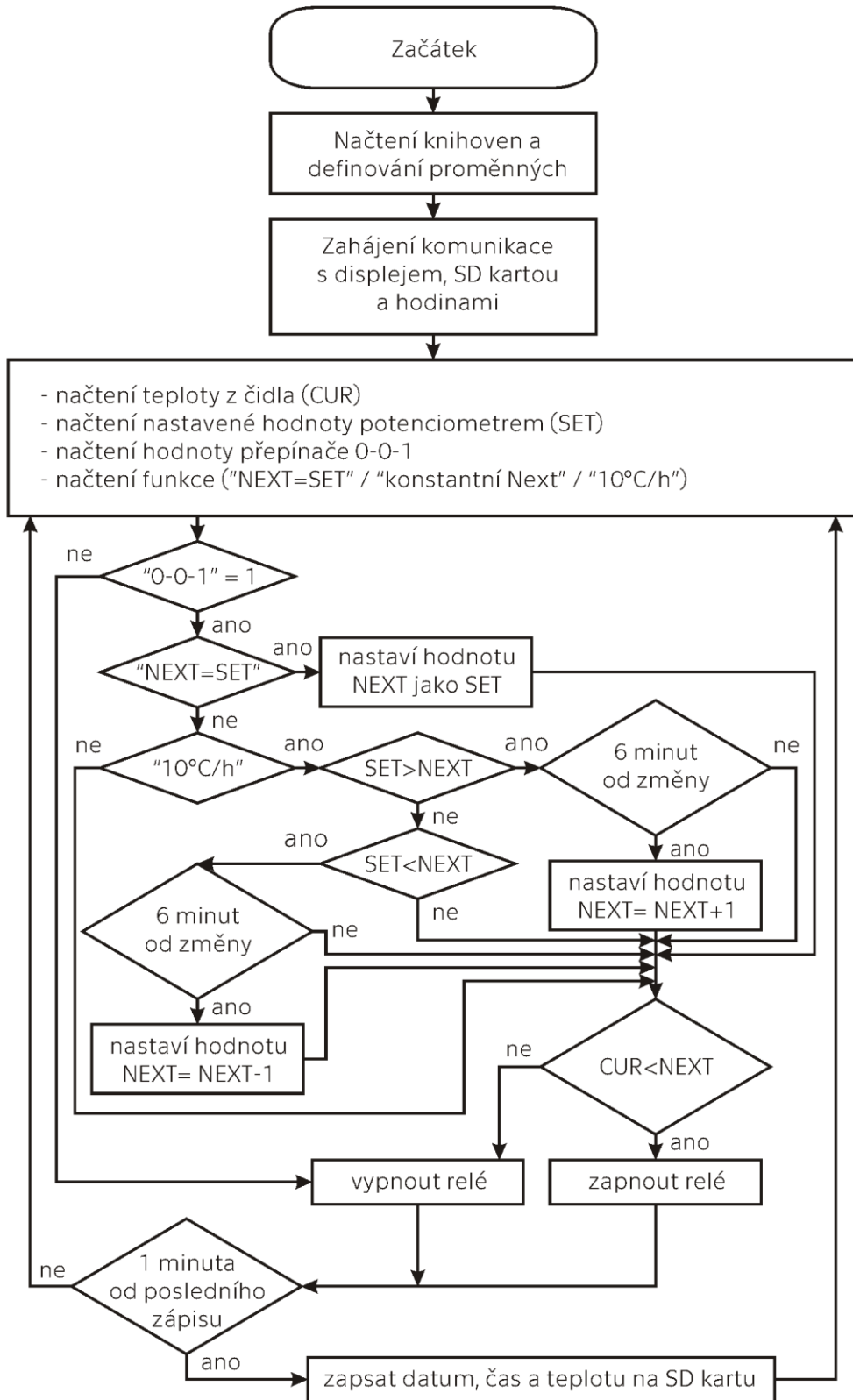
Obrázek 108 Zapojení kontrolního systému

Princip navrženého kontrolního systému spočívá v měření teploty uvnitř pece, jejího vyhodnocení a zapínání nebo vypínání topné spirály pomocí relé tak, aby reálná teplota oscilovala kolem požadované hodnoty. Oscilace je způsobena hysterezí, protože relé neupravuje výkon topné spirály, ale pouze ji zapíná na maximální výkon nebo vypíná. Po vypnutí tudíž spirála předává zbytkovou energii, zatímco po zapnutí dochází k postupnému nahřátí spirály. Základní funkce, která udržuje požadovanou teplotu, vypíná relé před dosažením požadované teploty a spíná ho po opětovném klesnutí pod nastavenou teplotu. Druhá funkce umožňuje postupné lineární zvyšování nebo snižování nastavené hodnoty. Pro první testy funkce byl přírůstek stanoven na 1 °C každých 6 minut.

Celý proces řídí skript nahraný do desky Arduino UNO. Skript obsahuje zaváděcí funkci (setup), která proběhne jednou, a smyčku (loop), která se provádí opakovaně. Před zaváděcí funkcí se definují využívané knihovny a proměnné. Za smyčkou mohou být funkce, které jsou v průběhu chodu skriptu volány. Kontrolní systém vyžadoval načtení knihoven ke komunikaci pomocí I2C, ke čtení dat z driveru MAX 6675, pro ovládání LCD displeje a k využívání RTC (Real Time Clock) a SD karty pro zápis dat pomocí data logger shieldu. V zaváděcí funkci je zahájena komunikace s displejem, SD kartou a s hodinami reálného času. Ve smyčce pak probíhá vyhodnocení naměřené teploty a spínání relé. V definovaných časových intervalech pak probíhá zápis času a naměřené teploty na SD kartu (Obrázek 109). Vzhledem k tomu, že častý zápis hodnot zpomaluje chod skriptu, byl základní interval zápisu stanoven na jednu minutu.

Ovládání bylo navrženo pomocí dvou přepínačů a jednoho potenciometru. Potenciometrem se mění napětí na vstupním analogovém pinu Arduina, čímž se nastavuje požadovaná teplota. Jeden přepínač slouží k softwarovému odpojení ovládání relé, aby nedošlo k permanentnímu zapnutí např. při vyjmutí teplotního čidla během výměny zkušebních těles. Druhý přepínač slouží k nastavení funkce pro definování teploty.

Použitý termočlánek umožňuje rozsah měření od -200 °C do +1300 °C. Ovšem driver MAX 6675, který teplotu vyhodnocuje, má rozsah měření omezen na 0 °C až 1024 °C, což je ale vzhledem k parametrům pece dostačující. Přesnost měření je  $\pm 1,5$  °C a teplotní rozlišení je 0,25 °C.



Obrázek 109 Zjednodušený vývojový diagram kontrolního systému pece



## 2.6.2 Výsledné zařízení

Kontrolní systém byl zhotoven a umístěn do elektroinstalační rozbočovací krabice (Obrázek 110). Pro zprovoznění je potřeba připojit zdroj Arduina a zdroj spínané zásuvky do zásuvky (230V) a propojit pec se spínanou zásuvkou. Teplotní čidlo je nutné vložit dovnitř pece pod víčko (Obrázek 111). Při vsunutí čidla pouze do otvoru ve víčku dochází k nadměrnému ochlazování termočláнку (při 50 °C čidlo zaznamenalo pouze 27 °C).



Obrázek 110 Zapojení kontrolního systému



Obrázek 111 Umístění termočláunku



Po spuštění se na LCD panelu zobrazí aktuální měřená hodnota teploty (Cur:), potenciometrem nastavená teplota (Set:) a další dosahovaná teplota (Next:). Vyhodnocovací skript běží okamžitě po spuštění kontrolního systému.

Spínač „0-0-1“ ovládá funkci spínající relé, tzn. pouze v poloze 1 je kontrolní systém plně funkční. Polohy 0 jsou určeny pro vypnutí topné spirály bez nutnosti vypínat kontrolní systém. Přepnutí do polohy 1 je doporučeno až při zahajování experimentu.

Levý spínač ovládá hodnotu Next a je aktivní pouze při nastavení spínače „0-0-1“ na 1. V horní poloze je funkce „10°C/h“, která zvyšuje/snižuje hodnotu Next o 1° každých 6 minut dokud nedosáhne hodnoty Set. V prostřední poloze zůstává hodnota Next konstantní nezávisle na hodnotě Set. Spodní poloha umožňuje okamžité nastavení hodnoty Next pomocí potenciometru, stejně jako hodnotu Set.

Nastavení teploty se ovládá potenciometrem „Set Temp“, rozsah je omezen na 0-920°C.

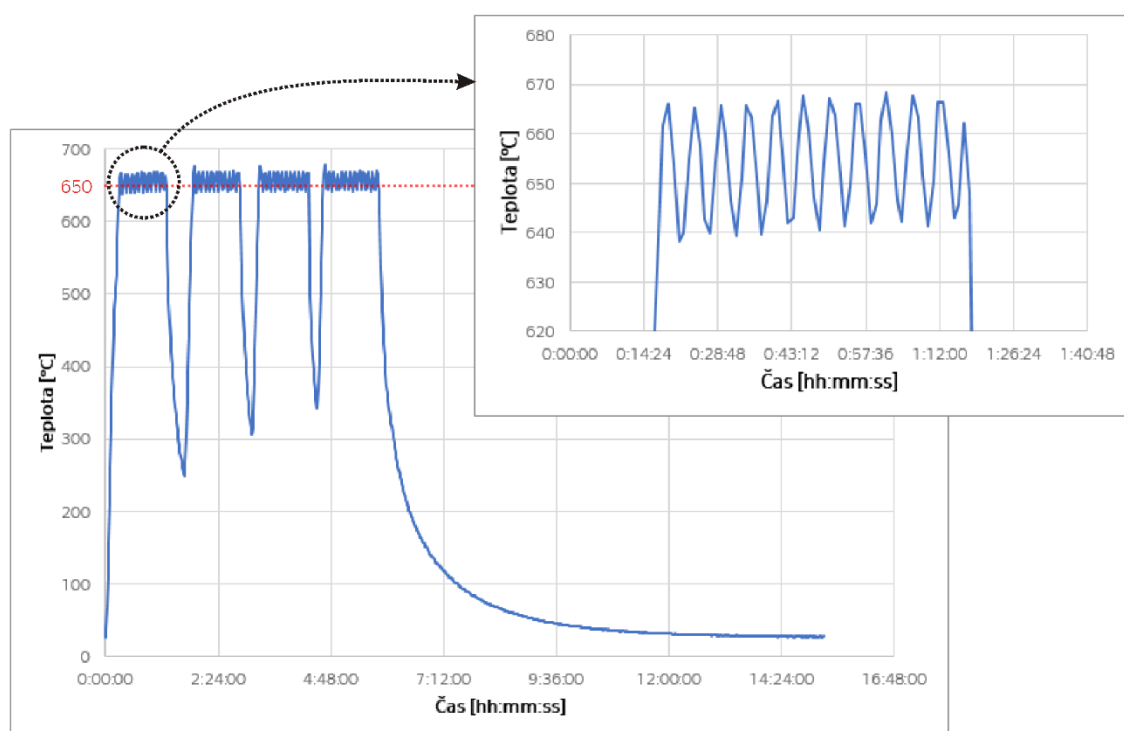
Zápis na SD kartu se provádí každou minutu a zaznamenává se datum, čas a naměřená teplota. Záznam je prováděn do souboru „mereni.txt“. Nová data se zapisují na konec souboru. Při stahování dat je vhodné soubor promazat nebo přejmenovat pro snadnější vyhodnocení dalších měřených dat.



Obrázek 112 Ovládání kontrolního systému

### 2.6.3 Diskuse výsledku

Navržený kontrolní systém splnil všechny požadavky. Bez zásahu do vlastní konstrukce pece zařízení umožňuje ovládat teplotu uvnitř pece. Lze držet konstantní teplotu nebo ji lineárně měnit. Při zásahu do skriptu je možné nadefinovat přesný průběh teplot v čase. Jedinou nevýhodou je oscilace teploty kolem nastavené hodnoty (Obrázek 113), která je způsobena hysterezí, jelikož topná spirála je pouze spínána a není měněn její výkon. Vzhledem k využívání vysokých teplot oscilace probíhá v řádu maximálně jednotek procent.



Obrázek 113 Průběh teploty během experimentu (oscilace kolem teploty 650°)

## 2.7 Klimatický větrný tunel

Kvalita betonu je dána nejen složením a zpracováním, ale i podmínkami ve kterých tuhne a tvrdne. Ošetřování betonu po betonáži má na výslednou kvalitu velký vliv. Zkušební tělesa jsou obvykle v laboratoři zhotovena v optimálních podmínkách, které se ovšem neshodují s podmínkami na stavbě.

Klimatický větrný tunel je zařízení, které vytváří v komoře se zkušebními vzorky kontrolované prostředí. Vzorky stejného betonu je možné vystavit různým okrajovým podmínkám a využít různé druhy ošetřování. Tyto experimenty se nejčastěji provádí ke zjištění optimální metody ošetřování betonu pro dané klimatické podmínky. Z pohledu výzkumu možnosti prodloužení životnosti jaderných elektráren je možné zařízení využít k nasimulování okrajových podmínek při stavbě konkrétních jaderných elektráren a tvorbě zkušebních těles v požadované kvalitě.

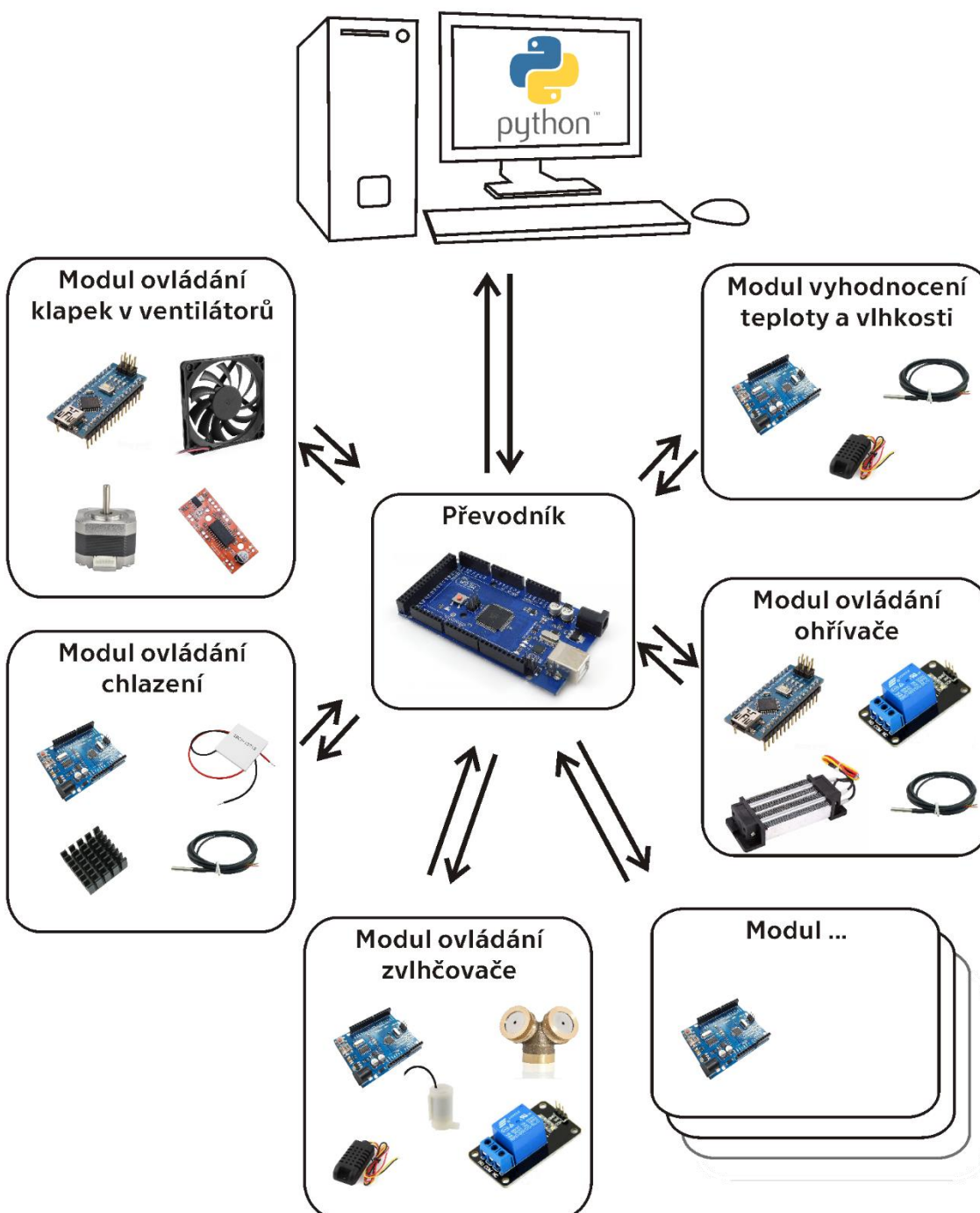
### 2.7.1 Požadované funkce

Základními parametry okrajových podmínek jsou teplota a vlhkost vzduchu a rychlost, směr a typ proudění vzduchu. Tyto parametry nejsou konstantní a v průběhu dne se mění. Někdy dochází k velmi rychlé změně. Požadavky na zařízení byly stanoveny následovně:

- Zařízení musí disponovat kontrolním systémem, který bude automaticky udržovat nadefinované parametry.
- Pro simulaci rychlých změn okrajových podmínek budou pro úpravu vzduchu využity dva oddělené okruhy.
- V případě otevření zkušební komory během experimentu musí kontrolní systém automaticky přerušit přívod upraveného vzduchu.
- Úprava vzduchu musí zahrnovat:
  - o Změnu rychlosti proudění vzduchu
  - o Oteplování vzduchu
  - o Ochlazování vzduchu
  - o Zvlhčování vzduchu
  - o Odvlhčování vzduchu

## 2.7.2 Kontrolní systém

Ovládání tunelu je navrženo tak, že software v počítači komunikuje s převodníkem ve formě Arduina Mega. Převodník předává příkazy modulům a získané informace vrací softwaru v počítači (Obrázek 114). Modulární systém má velkou výhodu, protože je možná rychlá výměna modulu v případě poruchy nebo upgradu a hardwarově náročné výpočetní operace se provádí v PC. Každý modul navíc obsahuje vlastní Arduino, které nejen řídí, ale i vyhodnocuje činnost modulu a v případě poruchy vyše signál o chybě.

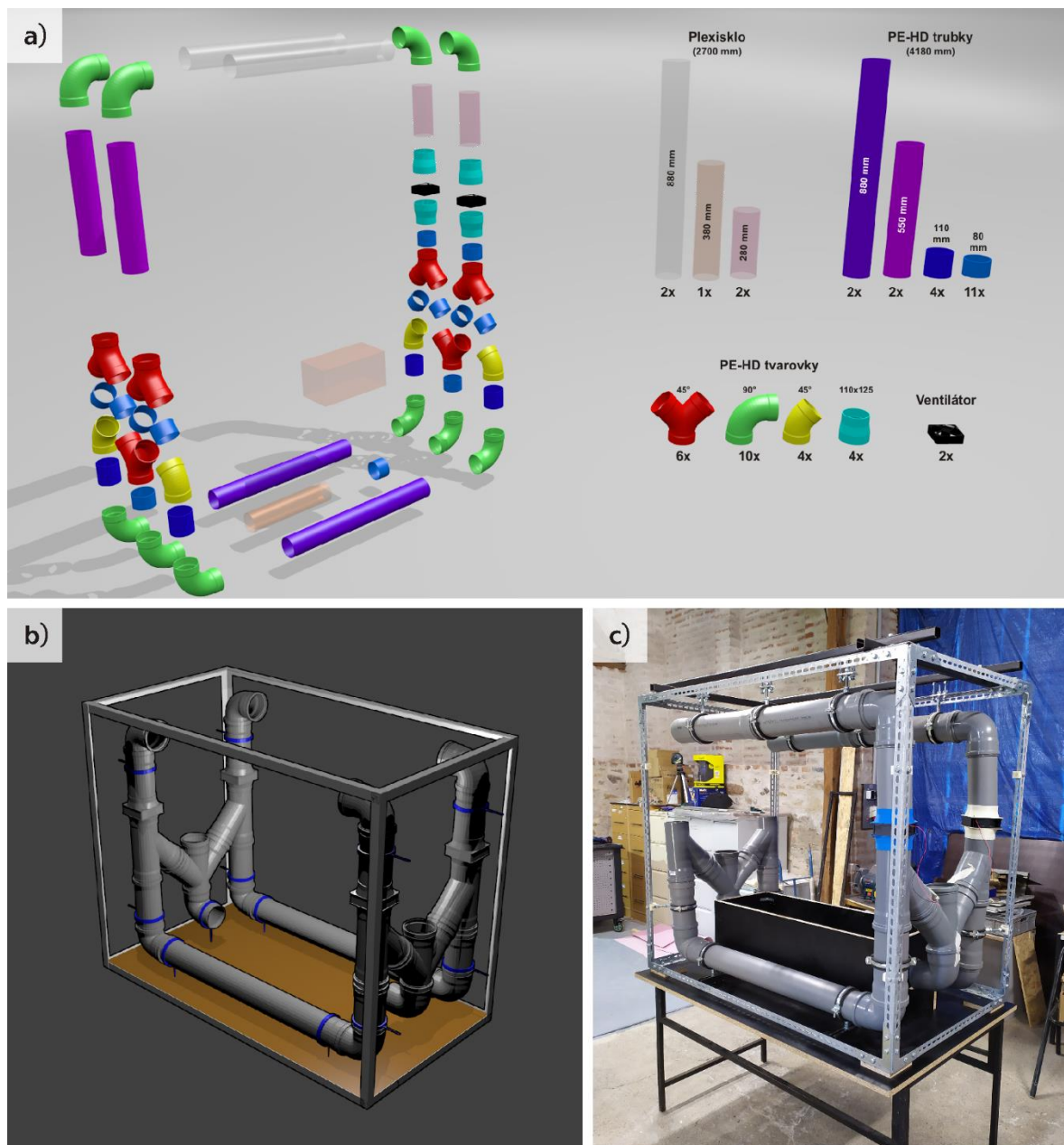


Obrázek 114 Ovládání kontrolního systému



### 2.7.3 Vývoj návrhu klimatického tunelu

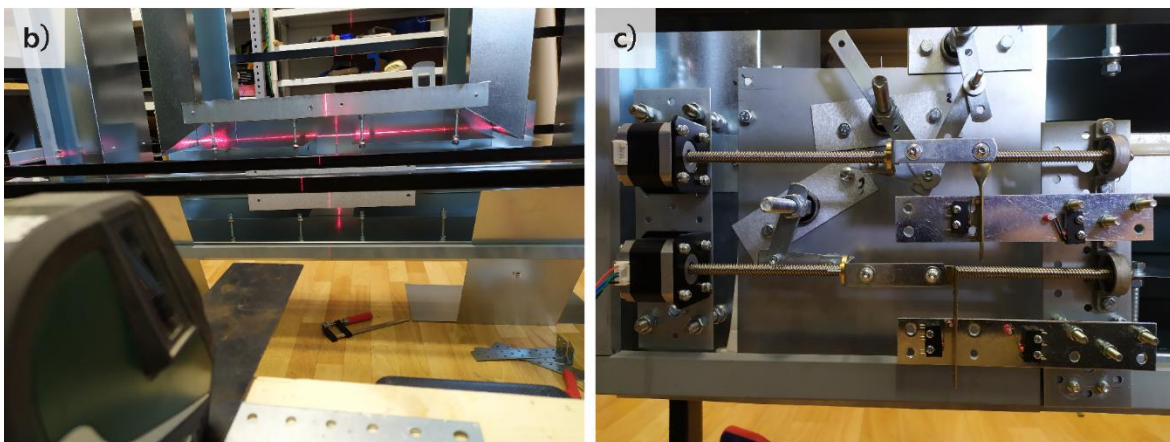
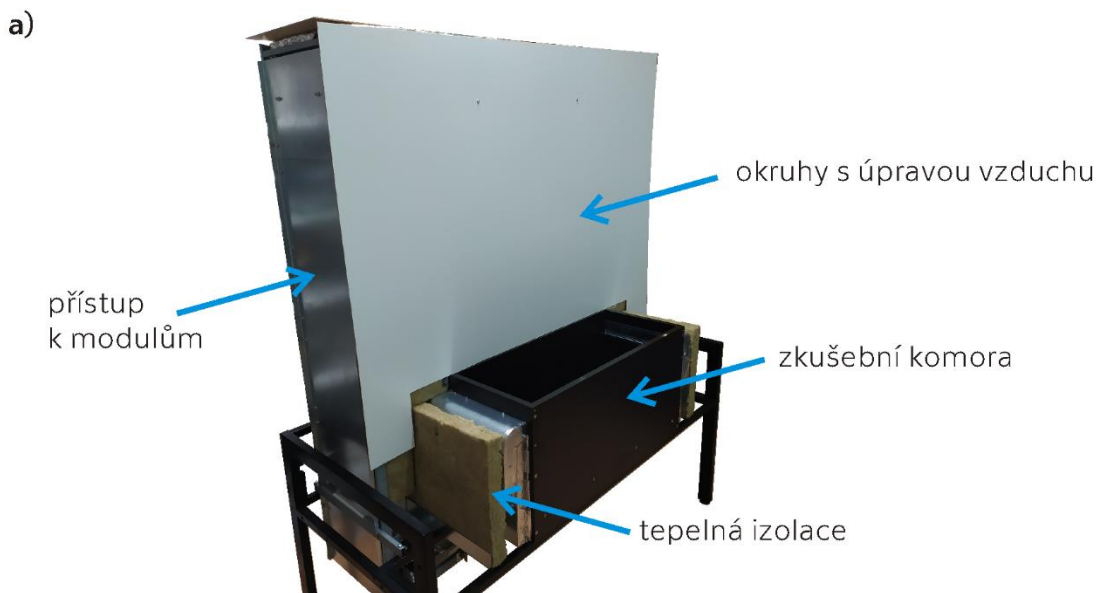
První návrh klimatického tunelu uvažoval použití plastového vzduchotechnického potrubí průměru 100 mm. Vzhledem k tepelné odolnosti byla vybrána varianta trubek z plastu PE-HD. Návrh byl následně upraven na použití TH trubek DN 110 (Obrázek 115). Hlavním důvodem byla výrazná finanční úspora a materiál s větší tepelnou odolností. Po zhotovení se ukázalo, že množství upravovaného vzduchu není vzhledem k velikosti zkušební komory dostatečné.



Obrázek 115 První návrh klimatického větrného tunelu

a) Vzduchotechnické PE-HD trubky; b-c) TH trubky

Nový tunel byl vyráběn v době pandemie virové choroby Covid-19 mimo budovu fakulty, proto byly jeho rozměry navrženy tak, aby bylo možné tunel kdykoliv převést bez nutnosti demontáže jakékoliv části. Na základě zkušeností s prvním návrhem byl nový tunel navržen z pozinkovaného plechu tloušťky 0,55 mm. Průřez trubky tunelu byl obdélníkový s rozměry 125 x 250 mm. Obdélníkový průřez byl zvolen kvůli snazšímu zhotovení přepínacích klapek i snazšímu zakomponování jednotlivých modulů. Tunel byl po vyrobení zateplen minerální vlnou (Obrázek 116). Ovládání přepínacích klapek bylo zhotoveno pomocí krokových motorů. Pohyb vzduchu obstarávají v každém okruhu čtyři ventilátory 120x120 mm. Ohřívání vzduchu je realizováno topným tělesem o výkonu 400 W, chlazení a odvlhčování peltierovými články o výkonu 350 W a zvyšování vlhkosti rozprašovací tryskou.



Obrázek 116 Realizace druhého klimatického větrného tunelu

a) Tunel; b) vyměřování polohy klapky; c) mechanismus ovládající přepínací klapky

## **2.7.4 Další vývoj zařízení**

Přestože je klimatický větrný tunel vyrobený, funkční a je možné pomocí něho provádět výzkum, jeho vývoj není zdaleka u konce. V dalším vývoji je potřeba se zaměřit na:

- vylepšení fungování odvlhčovače,
- vylepšení vyhodnocovacích a ovládacích funkcí pomocí fuzzy logiky,
- tvorbu grafického uživatelského rozhraní pro zadávání průběhu experimentu,
- vytvoření možnosti propojit oba okruhy dohromady,
- nainstalování mikroskopu, který bude automaticky snímkovat vzorky v průběhu experimentu.





# Závěr

V práci byl prezentován vývoj a realizace experimentů, zkušebních těles a zkušebních zařízení sloužících k získávání dat potřebných k validaci výpočetních modelů s ohledem na maximalizaci získaných dat při současné minimalizaci energie a úsilí.

V první části práce byla zkoumána možnost zkoušení vzorků z textilního betonu. Nejdůležitější poznatky a doporučení jsou shrnuty níže:

- *Vyvinutý materiál*

V rámci zkoušení vzorků z textilního betonu byl nejprve vyvinut původní kompozitní materiál s netkanou polypropylenovou textilií, který vzniká vrstvením textilních vrstev a mezivrstev z cementové malty a výztužné tkaniny. Pro materiál byl stanoven a ověřen obecně použitelný postup výroby včetně doporučené velikosti kameniva 0,25 mm, která je schopna infiltrace do netkané textilie.

- *Zkoušení mechanických vlastností*

Při zkoušení mechanických vlastností tento materiál prokázal velkou schopnost deformovat se při současném vzniku velkého množství mikrotrhlin. Použitím výztužných sítí z alkalivzdorného skla došlo ke zlepšení pevností. Výztužné sítě ovšem negativně ovlivnily soudržnost a docházelo častěji k delaminaci vrstev, přičemž tento jev byl také kvantifikován.

- *Uplatnitelnost materiálu*

Velké uplatnění materiálu se našlo při výzkumu zacelování trhlin v betonu, a to především kvůli velkému množství trhlin na malé ploše vzorku. Na definované ploše 16 cm<sup>2</sup> byla naměřena celková délka trhlin 1,2 m. Pro získání optimálních podmínek potřebných pro autogenní hojení betonu se doporučuje používat malé vzorky pro snazší skladovatelnost při různých okrajových podmínkách.

- *Využitelnost automatizace a digitalizace*

Pro vyhodnocování dat byl vytvořen automatizovaný postup sběru dat. Předpokladem k automatizaci byla výroba rovných vzorků s trhlinami, které vzniknou narovnáním zaobleně vyrobených vzorků. Digitálním mikroskopem je pak možné při pohybu ve dvou osách nasnímat celý povrch vzorku, posléze složit celkovou fotografii, a vyhodnotit množství trhlin a data uložit. Celý proces vyhodnocování se tím jednak zjednoduší pouze na výměnu zkušebního vzorku a spuštění vyhodnocování a jednak se eliminuje vliv lidského faktoru na vznik chyb.

Ve druhé části práce byly navrženy a realizovány experimenty, zkušební tělesa a zkušební zařízení, která podporují výzkum vlivu ionizujícího záření na betonové konstrukce:

- *Zkušební tělesa pro nedestruktivní testování betonu*

Byla navržena vyrobena zkušební tělesa pro ověření vyvíjených metod nedestruktivního testování kvality betonu v okolí ionizačních kanálů reaktorů typu VVER. Jednalo se o čtyři tělesa, která byla vyrobena z betonů pěti různých kvalit. Jednotlivé typy betonu měly vykazovat snížené mechanické vlastnosti pozorované u betonů ozářených ionizujícím zářením, a to jak skokově, tak gradientně po výšce vzorku. Lokalizované trhliny byly vytvořeny pomocí obrobených malých kusů plastové fólie přimíchaných do směsi. Oddělování kameniva od malty bylo realizováno olejovým separátorem aplikovaným na hrubou frakci kameniva před přimícháním kameniva do rozmíchané cementové malty. Při vývoji těchto betonových směsí byla požadovaná snižující se kvalita hodnocena podle snižování jednoosé pevnosti betonu v tlaku a modulu pružnosti.

- *Vliv gama záření na smršťování a dotvarování cementové malty*

Pro výzkum vlivu gama záření na smršťování a dotvarování cementové malty bylo navrženo a vyrobena zkušební zařízení a definovány rozměry zkušebního vzorku. Jednalo se o dlouhodobý experiment, který probíhal v prostorách ozařovny. Proto bylo potřeba minimalizovat rozměry zařízení. Tvar plochy průřezu vzorku byl z výrobních důvodů stanoven jako čtvercový 10x10 mm. Délka pak byla stanovena experimentálně s přihlédnutím na manipulaci se vzorkem během vkládání do upevňovadel a dlouhodobou stabilitu štíhlého vzorku ve zkušebním zařízení tak, aby nedošlo k porušení vzorku během celé doby ozařování. Tímto byla ochráněna investice do tohoto finančně velmi náročného měření. Délka tak byla stanovena na 40 mm. Velikost zkušebního zařízení pak byla definována velikostí vzorku a velikostí zatěžovací pružiny. Samotný experiment trvající jeden rok proběhl bez komplikací a bylo prokázáno, že gama záření nemá výrazný vliv na smršťování a dotvarování cementové malty z pohledu běžných aplikací, nicméně z pohledu zaručení stínících vlastností betonových konstrukcí po celou dobu životnosti jaderných zařízení bude toto zařízení použito pro další série zpřesňujících měření.

- Zkoušení soudržnosti výztuže a betonu při vystavení ionizujícímu záření*

Pro výzkum soudržnosti výztuže a betonu při ozáření gama zářením byl použit hladký obetonovaný ocelový váleček, který byl následně z betonu vytlačován. Jako forma sloužila hladká plastová miska. Pro umístění vzorků v gama ozařovně byl navržen a vyroben hliníkový rámový stojan. Požadavek na maximální velikost stojanu byl 500x1000 mm a musel pojmout 40 vzorků. Při ověřování zkušební metody vytlačování válečku docházelo k radiálnímu praskání vzorků. Bylo zjištěna nerovnost dosedací plochy betonového vzorku. Srovnání plochy bylo realizováno broušením se strojařskou přesností. Z tohoto důvodu byl pro broušení vyroben přípravek pro rektifikaci natočení vzorku, aby dosedací plocha byla dokonale kolmá na osu ocelového válce vytlačujícího zabetonovanou výztuž. Experimentální vyšetřování soudržnosti tak proběhlo bez problémů a byl prokázán nárůst soudržnosti vlivem ozáření, což je přisuzováno zdrsněním třecí plochy vlivem koroze výztuže.
- Jádrové vývrty nerostů a hornin průměru 10 mm určené pro ozařování*

Výzkumy prokázaly, že kamenivo v betonu při ozáření neutronovým zářením zvětšuje svůj objem. Aby mohl být sestaven matematický model porušení betonu tímto jevem, je potřeba získat informace o změnách objemů nerostů v závislosti na absorbované dávce záření. Vzorky ozářené neutronovým zářením se musí testovat v horkých komorách, proto testování probíhá ve spolupráci s ÚJV Řež a Centrem výzkumu Řež. Příprava vzorků probíhala na ČVUT. Vzorky byly vyrobeny jako jádrové vývrty průměru 10 mm a výšce 10 mm a 20 mm. Výroba obnášela odvrtání válečků diamantovou korunkou, následné zkrácení na požadovanou délku a finální dobroušení diamantovým pilníkem a korundovým brusným papírem na strojařskou přesnost. K dobroušení bylo vyrobeno zařízení podobné malému soustruhu pro vybroušení optimálního tvaru. Vzorky byly úspěšně vyrobeny a v době odevzdání této práce jsou vyhodnocovány v Centru výzkumu Řež.
- Ověření vlastností betonové zálivek kontejnerů pro radioaktivní odpad*

K ověření vlastností samozhutnitelných betonových směsí pro vyplnění kontejnerů pro ukládání radioaktivního odpadu byl navržen a realizován funkční vzorek v měřítku 1:1. Funkční vzorek obnášel betonáž výseku spáry mezi ocelovým sudem s radioaktivním odpadem a betonovým kontejnerem. Vzhledem k měřítku se jednalo o betonáž 4,65 m vysokého vzorku. Pro vizuální

kontrolu zatékání betonu byla navržena vnitřní strana bednění z plexiskla vyztuženého děrovaným plechem. Experimentem porovnávacím povrchové vlastnosti materiálů bylo ověřeno, že nahrazením plechu plexisklem nedojde ke zkreslení chování betonové směsi. Betonáž funkčního vzorku proběhla bez komplikací. Po odbednění proběhla vizuální kontrola povrchu, která neodhalila nežádoucí póry a kavity. Následně byl vzorek rozřezán a byla zjištěna objemová hmotnost po výšce, kdy horní části objemová hmotnost u obou směsí zmenšila v rámci požadované tolerance.

- *Systém pro řízení teploty vysokoteplotní pece*

V rámci analýzy možných experimentů byl navržen a zkonstruován kontrolní systém pro vysokoteplotní pec. Kontrolní systém byl vystaven na základě prototypovací platformy Arduino. Kontrolní systém funguje tak, že vyhodnotí teplotu termočládku, porovná jí s nastavenou hodnotou a podle výsledku porovnání sepne nebo rozepne relé, které spouští topnou spirálu. Kontrolní systém má zabudovanou funkci postupné změny teploty, např. 10°C/hod, která podle nastaveného časového kroku zvyšuje nebo snižuje teplotu dokud se hodnota neshoduje s požadovanou hodnotou. Ovládací skript je navržen tak, aby bylo možné jednoduše definovat jakýkoliv průběh teplot v čase. Hodnoty měření teplot jsou zaznamenávány na SD kartu a je tak možné kontrolovat průběh experimentu. Vzhledem k pouhému spínání spirály bez regulace výkonu nevyhnutelně dochází díky hysterezi k oscilaci teploty kolem nastavené hodnoty.

- *Klimatický větrný tunel*

V práci je krátce prezentován vývoj klimatického větrného tunelu, který slouží k udržování předepsané vlhkosti a teploty ve zkušební komoře. Pomocí tohoto klimatického tunelu je možné zkoumat vlastnosti betonů tuhoucích při různých okrajových podmínkách. Zároveň je možné simulovat určité okrajové podmínky, aby byly získány vzorky odpovídající kvalitě betonů tuhoucích ve stejných podmínkách. Kontrolní systém je navržen tak, že skript v počítači komunikuje s převodníkem ve formě Arduina Mega, které dále komunikuje s jednotlivými ovládacími moduly. Jednotlivé moduly jsou navrženy jako samostatné jednotky ovládané vlastní prototypovací deskou Arduino. Výhoda tohoto systému je v rychlé výměně modulů v případě jejich poruchy nebo upgradu. Navíc každý modul může vyhodnocovat větší množství dat, než



předává kontrolnímu skriptu v počítači. Naopak složité operace jsou zasílány výkonnému počítači. Klimatický tunel je dále možné upravovat jak po softwarové tak hardwarové stránce pro získávání přesných dat dle požadavků prováděného experimentu.

Závěrem lze konstatovat, že zdánlivá různorodost jednotlivých výzkumných oblastí, kterým se autor v rámci této disertační práce věnoval, byla největší výzvou pro snahu pochopit hlubší souvislosti mezi jednotlivými zkoumanými oblastmi, a tedy dojít k poznání, že většina technických úloh vychází z obdobných problémů, přičemž největší z nich je schopnost, či spíše neschopnost, rozpoznat samotnou podstatu daného technického úkolu a následně ji jednoduše definovat právě s ohledem na možnost jejího reálného ověření v podmínkách, které má ta která laboratoř k dispozici.



## Seznam použité literatury

- [1] R. CONTAMINE, A. SI LARBI a P. HAMELIN. *Contribution to direct tensile testing of textile reinforced concrete (TRC) composites*. Materials Science and Engineering: A [online]. 2011, 2011(528), 29–30. ISSN 0921-5093.
- [2] J. HEGGER a S. VOSS. *Investigations on the bearing behaviour and application potential of textile reinforced concrete*. Engineering Structures [online]. 2008, 2008(30), 2050-2056. ISSN 0141-0296.
- [3] VIKTOR MECHTCHERINE a MATTHIAS LIEBOLDT. *Permeation of water and gases through cracked textile reinforced concrete*. Cement and Concrete Composites [online]. 2011, 2011(33), 725-734. ISSN 0958-9465.
- [4] HEGGER, J., WILL, N, BRUCKERMANN, O. a S. VOSS. *Load-bearing behaviour and simulation of textile reinforced concrete*. Materials and Structures [online]. 2006, 2006(39), 765-776. ISSN 1871-6873.
- [5] COLOMBO, I.G., MAGRI, A. a ZANI, G. *Textile Reinforced Concrete: experimental investigation on design parameters*. Materials and Structures [online]. 2013, 2013(46), 1933-1951.
- [6] AMIR SI LARBI, AMEN AGBOSSOU a PATRICE HAMELIN. *Experimental and numerical investigations about textile-reinforced concrete and hybrid solutions for repairing and/or strengthening reinforced concrete beams*. Composite Structures [online]. 2013, 2013(99), 152-162. ISSN 0263-8223.
- [7] THANH HAI NGUYEN, XUAN HONG VU, AMIR SI LARBI a EMMANUEL FERRIER. *Experimental study of the effect of simultaneous mechanical and high-temperature loadings on the behaviour of textile-reinforced concrete (TRC)*. Construction and Building Materials [online]. 2016, 2016(125), 253-270. ISSN 0950-0618.
- [8] MARUYAMA, I, et al. *Development of soundness assessment procedure for concrete members affected by neutron and gamma-ray irradiation*. Journal of Advanced Concrete Technology, 2017, 15.9: 440-523.
- [9] R. CHUDOBA, E. SHAREI a A. SCHOLZEN. *A strain-hardening microplane damage model for thin-walled textile-reinforced concrete shells, calibration procedure, and experimental validation*. Composite Structures [online]. 2016, 2016(152), 913-928. ISSN 0263-8223.
- [10] ISABELLA GIORGIA COLOMBO, MATTEO COLOMBO a MARCO DI PRISCO. *Bending behaviour of Textile Reinforced Concrete sandwich beams*. Construction and Building Materials [online]. 2015, 2015(95), 675-685. ISSN 0950-0618.
- [11] SHAMS, ALI, MICHAEL HORSTMANN a JOSEF HEGGER. *Experimental investigations on Textile-Reinforced Concrete (TRC) sandwich sections*. Composite Structures [online]. 2014, 2014(118), 643-653. ISSN 0263-8223.
- [12] ALI SHAMS, JOSEF HEGGER a MICHAEL HORSTMANN. *An analytical model for sandwich panels made of textile-reinforced concrete*. Construction and Building Materials [online]. 2014, 2014(64), 451-459. ISSN 0950-0618.

- [13] SMITHA GOPINATH, V. RAMESH KUMAR, HARISHKUMAR SHETH, A. RAMACHANDRA MURTHY a AGESH R. IYER. *Prefabricated sandwich panels using cold-formed steel and textile reinforced concrete*. Construction and Building Materials [online]. 2014, 2014(64), 54-59. ISSN 0950-0618.
- [14] V. DEY, G. ZANI, M. COLOMBO, M. DI PRISCO a B. MOBASHER. *Flexural impact response of textile-reinforced aerated concrete sandwich panels*. Materials & Design [online]. 2015, 2015(86), 187-197. ISSN 0264-1275.
- [15] MICHAEL TSESARSKY, ALVA PELED, AMNON KATZ a IDO ANTEBY. *Strengthening concrete elements by confinement within textile reinforced concrete (TRC) shells – Static and impact properties*. Construction and Building Materials [online]. 2013, 2013(44), 514-523. ISSN 0950-0618.
- [16] M. LIEBOLDT a V. MECHTCHERINE. *Capillary transport of water through textile-reinforced concrete applied in repairing and/or strengthening cracked RC structures*. Cement and Concrete Research [online]. 2013, 2013(52), 53-62. ISSN 0008-8846.
- [17] A. BRÜCKNER, R. ORTLEPP a M. CURBACH. *Anchoring of shear strengthening for T-beams made of textile reinforced concrete (TRC)*. Materials and Structures. 2008, 2008(41), 407–418.
- [18] FLÁVIO DE ANDRADE SILVA, MARKO BUTLER, SIMONE HEMPEL, ROMILDO DIAS TOLEDO FILHO a VIKTOR MECHTCHERINE. *Effects of elevated temperatures on the interface properties of carbon textile-reinforced concrete*. Cement and Concrete Composites [online]. 2014, 2014(48), 26-34. ISSN 0958-9465.
- [19] YIN SHIPING, XU SHILANG a LI HEDONG. *Improved Mechanical Properties of Textile Reinforced Concrete Thin Plate*. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed. [online]. 2013, 2013(28), 92-98. ISSN 1993-0437.
- [20] J. BLOM, M. EL KADI, J. WASTIELS a D.G. AGGELIS. *Bending fracture of textile reinforced cement laminates monitored by acoustic emission: Influence of aspect ratio*. Construction and Building Materials [online]. 2014, 2014(70), 370-378. ISSN 0950-0618.
- [21] BARZIN MOBASHER, VIKRAM DEY, ZVI COHEN a ALVA PELED. *Correlation of constitutive response of hybrid textile reinforced concrete from tensile and flexural tests*. Cement and Concrete Composites [online]. 2014, 2014(53), 148-161. ISSN 0958-9465.
- [22] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, et al. *Nuclear Power in the World Today*. [online]. 2022. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx>
- [23] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, et al. *Plans For New Reactors Worldwide*. [online]. 2022. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/plans-for-new-reactors-worldwide.aspx>
- [24] HILSDORF, H., KROPP, J., KOCH, H. *The effects of nuclear radiation on the mechanical properties of concrete*. 1978. Special Publication, ACI, 55:223–254.
- [25] SILVA, FLÁVIO de ANDRADE, MARKO BUTLER, VIKTOR MECHTCHERINE, DEJU ZHU a BARZIN MOBASHER. *Strain rate effect on the tensile behaviour of textile-reinforced concrete under static and dynamic loading*. Materials Science and Engineering [online]. 2011, 2011(528) 1727-1734. ISSN 0921-5093



- [26] ŽÁK, J. *Kompozitní materiál s cementovou matricí a textilní výztuží pro výrobu speciálních konstrukcí*. In: DVORSKÝ, T. a V. VYTLAČILOVÁ, eds. PhD Workshop - Full Text. Workshop doktorandů 2016, Praha, 2016-05-27. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, Katedra betonových konstrukcí a mostů, 2016. ISBN 978-80-01-05924-1.
- [27] ŽÁK, J. *Textilní beton s netkanou polypropylenovou textilií*. In: DVORSKÝ, T. a M. PETŘÍK, eds. PhD Workshop - Full Texts. PhD Workshop 2017, Praha, 2017-05-26. Praha: ČVUT FSv. Katedra betonových a zděných konstrukcí, 2017. ISBN 978-80-01-06132-9.
- [28] ŽÁK, J. a P. ŠTEMBERK. *Experimental Investigation of Tensile Behavior of Textile Reinforced Concrete with Nonwoven Polypropylene Fabric*. In: Mechanika 2017 Proceedings of the 22st International Scientific Conference. Mechanika 2017, Kaunas, 2017-05-19. Kaunas: Kauno technologijos universitetas, 2017. s. 399-401. ISSN 1822-2951.
- [29] ŽÁKOVÁ, H. a J. ŽÁK. *Using of TRC for Research of Crack Evolution and the Effect of Autogenous Healing*. In: BÍLÝ, P. et al., eds. Fibre Concrete 2019. Praha, 2019-09-17/2019-09-20. Bristol: IOP Publishing Ltd, 2019. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. sv. 596. ISSN 1757-899X. DOI 10.1088/1757-899X/596/1/012045
- [30] ŽÁK, J. a P. ŠTEMBERK. *Fire Temperature Influence on the Textile Reinforced Concrete with Non-woven Polypropylene Fabric*. In: BÍLÝ, P. et al., eds. Fibre Concrete 2019. Praha, 2019-09-17/2019-09-20. Bristol: IOP Publishing Ltd, 2019. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. sv. 596. ISSN 1757-899X. DOI 10.1088/1757-899X/596/1/012044
- [31] SEVÓN T et al. *Molten core-concrete interactions in nuclear accidents. Theory and Design of an Experimental Facility* Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland. 2005, 88 p. ISBN 951-38-6744-7
- [32] BAGHERZADEH R, SADEGHI A-H and LATIFI M *Utilizing polypropylene fibers to improve physical and mechanical properties of concrete*. Textile Research Journal 2011. 2011(82) 88–96
- [33] ŽÁK, J. *Vliv teplot při požáru na textilní beton s netkanou polypropylenovou textilií*. In: PETŘÍK, M. a A. HORÁKOVÁ, eds. Proceedings of the 8th PhD Workshop of the Department of Concrete and Masonry Structures. Praha, 2019- 05-31. Praha: ČVUT FSv. Katedra betonových a zděných konstrukcí, 2019. ISBN 978-80-01-06574-7.
- [34] PAZDERKA J and HÁJKOVÁ E. *Crystalline Admixtures And Their Effect On Selected Properties Of Concrete*. Acta Polytechnica. 2016. 56 306–11
- [35] PAZDERKA J. *Concrete with Crystalline Admixture for Ventilated Tunnel against Moisture*. Key Engineering Materials. 2016. 677 108–13
- [36] RAHHAL V et al. *Scheme of the Portland cement hydration with crystalline mineral admixtures and other aspects*. Silicates Industriels. 2009. 74 347-52
- [37] ZHOU M R et al. *Study on Experiment of Concrete Compounding XYPEX and Steel Fiber*. Applied Mechanics and Materials. 2011. 105-107 1755–9
- [38] PAZDERKA J and HÁJKOVÁ E. *The speed of the crystalline admixture's waterproofing effect in concrete*. Key Engineering Materials. 2017. 722 108-12
- [39] EDVARDSEN C. *Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete*. ACI Materials Journal. 1999. 96 448–54

- [40] ŽÁKOVÁ, H. et al. *Effect of Bacteria Bacillus pseudofirmus and Fungus Trichoderma reesei on Self-healing Ability of Concrete*. In: RÁCOVÁ, Z. a P. RYPAROVÁ, eds. CONTEMPORARY MATERIALS AND TECHNOLOGIES IN CIVIL ENGINEERING 2018 Moderní materiály a technologie ve stavebnictví 2018, Praha, 2018-06-13. Praha: Czech Technical University in Prague, 2019. s. 42-45. Acta Polytechnica CTU Proceedings. sv. 21. ISSN 2336-5382. ISBN 978-80-01-06547-1. DOI 10.14311/APP.2019.21.0042
- [41] ŽÁKOVÁ, H. et al. *Vliv bakterie Bacillus pseudofirmus a plísně Trichoderma reesei na samohojitelnost betonu*. In: RÁCOVÁ, Z. a M. SOKOLOVÁ, eds. Sborník konference Moderní materiály a technologie ve stavebnictví 2018 . Moderní materiály a technologie ve stavebnictví 2018, Praha, 2018-06-13. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, Katedra konstrukcí pozemních staveb, 2018. s. 5-6. ISBN 978-80-01-06485-6.
- [42] ŽÁK, J. *Využití textilního betonu pro výzkum zacelování trhlin*. In: HORÁKOVÁ, A. a M. PETŘÍK, eds. Proceedings of PhD Workshop, Department of Concrete and Masonry Structures 2020. Praha, 2020-11-13. Praha: ČVUT FSv. Katedra betonových a zděných konstrukcí, 2020. s. 209-212. ISBN 978-80-01-06774-1.
- [43] ŽÁK, J., M. FRANTOVÁ a P. ŠTEMBERK. *Design and Production of Samples Suitable for Testing of Autogenous Healing of Concrete*. In: REITERMAN, P., ed. SPECIAL CONCRETE AND COMPOSITES 2020: 17th International Conference. Special Concrete and Composites 2020, Skalský Dvůr, 2020-10-14/2020-10-15. Melville, NY: AIP Publishing, 2021. AIP Conference Proceedings. sv. 2322. ISSN 0094-243X. ISBN 978-0-7354-4066-1. DOI 10.1063/5.0041968,
- [44] ŽÁK, J. *Vhodný tvar zkušebních těles pro automatické vyhodnocování zacelování trhlin*. In: HORÁKOVÁ, A. a M. PETŘÍK, eds. Proceedings of PhD Workshop, Department of Concrete and Masonry Structures 2021., Praha, 2021-05-21. Praha: ČVUT FSv. Katedra betonových a zděných konstrukcí, 2021. ISBN 978-80-01-06842-7.
- [45] ŽÁKOVÁ, HANA. *Metody sanace vlhkostních poruch betonových konstrukcí budov s využitím krystalizačních materiálů*. Praha, 2021. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze - Fakulta stavební. Vedoucí práce Jiří Pazderka
- [46] ŽDÁREK, JIŘÍ, HORÁČEK, L., & BRABEC, P. *Temperature and Radiation Effects on the RPV Concrete Cavity Project Description on Irradiation, Testing and NDE Development*. Nuclear Energy Agency of the OECD (NEA). 2015. NEA-CSNI-R--2014-1.
- [47] STULÍK, P a ŠÍPEK B. *EXPERIMENTAL IMPACT-ECHO INVESTIGATIONS OF CONCRETE STRUCTURES*. In: FUIS, Vladimír a Michal PÁSEK. ENGINEERING MECHANICS 2008: ATIONAL CONFERENCE WITH INTERNATIONAL PARTICIPATION. 2008, s. 908-921. ISBN 978-80-87012-11-6. ISSN 1805-8256.
- [48] GIORLA A., VAITOVÁ M., LE PAPE Y., ŠTEMBERK P. *Meso-scale modeling of irradiated concrete in test reactor*. Nuclear Engineering and Design. 2015. 295 59-73p. ISSN 0029-5493
- [49] KHMUROVSKA, Y.; ŠTEMBERK, P.; SIKORIN, S.; ŽÁK, J.; KALADJEVYCH, Y.; PAVALANSKI, E.; FATSEYEU, V. *The Effect of Gamma Radiation on Mechanical Properties of Cement Mortar*. In: Proceedings of NUCLEAR 2018 The 11th International Conference on Sustainable Development through Nuclear Research and Education. RATEN ICN, 2018. ISSN 2066-2955.

- [50] KHMUROVSKA, Y.; ŠTEMBERK, P.; SIKORIN, S.; ŽÁK, J.; KALADJEVYCH, Y.; PAVALANSKI, E.; FATSEYEU, V. *Cement Mortar Creep under Exposure of Gamma-ray Irradiation*. In: Proceedings of NUCLEAR 2019 The 12th International Conference on Sustainable Development through Nuclear Research and Education. RATEN ICN, 2019. ISSN 2066-2955.
- [51] KHMUROVSKA, Y.; ŠTEMBERK, P.; PETŘÍK, M.; ŽÁK, J.; ZACHARDA, V.; SZILADYI, V.; KIS, Z.; HARSANYI, I. *Equipment for Concrete Irradiation Experiments*. In: Mechanika 2019 Proceedings of the 24th International Scientific Conference. Kaunas: Kaunas University of Technology, 2019. p. 80-83. ISSN 1822-2951.
- [52] KHMUROVSKA, Y.; ŠTEMBERK, P.; SIKORIN, S.; ŽÁK, J.; KALADJEVYCH, Y.; PAVALANSKI, E.; FATSEYEU, V. *Cement Mortar Creep under Exposure to Gamma-ray Irradiation*. Journal of Nuclear Research and Development. 2019,(18), 24-28. ISSN 2247-191X.
- [53] BOUNIOL P., ASPART A. *Disappearance of oxygen in concrete under irradiation: the role of peroxides in radiolysis*. Cement and Concrete Research, 28, 1998, pp. 1669-1681
- [54] BOUNIOL P., BJERGBAKKE E. *A comprehensive model to describe radiolytic processes in cement medium*. Journal of Nuclear Materials. 372. 2008. pp. 1-15
- [55] VODÁK F., VYDRA V., TRTÍK K., KAPIČKOVÁ O. *Effect of gamma irradiation on properties of hardened cement paste*. Materials and structures, 44, 2011, pp. 101-107
- [56] MARUYAMA I., ISHIKAWA S., YASUKOUCHI J., SAWADA S., KURIHARA R., TAKIZAWA M., KONTANI O. *Impact of gamma-ray irradiation on hardened white Portland cement pastes exposed to atmosphere*. Cement and Concrete Research, 108, 2018, pp. 59-71
- [57] TAMTSIA B.T., BEAUDOIN J.J. *Basic creep of hardened cement paste a re-examination of the role of water*. Cement and Concrete Research, 30, 2000, pp. 1465-1475
- [58] ACKER P., ULM F.J. *Creep and shrinkage of concrete: physical origins and practical measurements*. Nuclear Engineering and Design, 203, 2001, pp. 143-158
- [59] PIGNATELLI I., KUMAR A., ALIZADEH R., LE PAPE Y., BAUCHY M., SANT G. *A dissolution-precipitation mechanism is at the origin of concrete creep in moist environments*. The Journal of chemical physics, 145, 2016, 054701
- [60] KHMUROVSKA, Y.; ŠTEMBERK, P.; SIKORIN, S.N.; NĚMEČEK, J.; JOZWIAK-NIEDZWIEDZKA, D.; DOLEŽALOVÁ, M.; KALADKEVICH, Y.; PAVALANSKI, E. et al. *Effects of Gamma-Ray Irradiation on Hardened Cement Mortar*. International Journal of Concrete Structures and Materials. 2021, 15(17), ISSN 2234-1315.
- [61] SOO P., MILIAN L.M. *The effect of gamma radiation on the strength of Portland cement mortars*. Journal of Materials Science Letters, 20, 2001, pp. 1345-1348
- [62] VODÁK F., TRTÍK K., SOPKO V., KAPIČKOVÁ O., DEMO P. *Effect of  $\gamma$ -irradiation on strength of concrete for nuclear-safety structures*. Cement and Concrete Research, 35, 2005, pp. 1447-1451
- [63] BAŽANT Z.P., JIRÁSEK M. *Creep and hygrothermal effects in concrete structures*. Springer (Vol. 225), New York, 2018
- [64] Comité Euro-International du Béton, CEB-FIP model code 1990: Design code, Thomas Telford, London, 1991

- [65] Fédération internationale du béton, fib model code for concrete structures 2010, Ernst & Sohn, Berlin, 2013
- [66] ACI Committee 209, Guide for modeling and calculating shrinkage and creep in hardened concrete, Technical report 209.2R-08, ACI, Farmington Hills, Michigan, 2008
- [67] GARDNER N.J., LOCKMAN M.J. *Design provisions for drying shrinkage and creep of normal strength*. ACI Materials Journal, 98, 2001, pp. 159-167
- [68] KHMUROVSKA, Y.; ŠTEMBERK, P.; SIKORIN, S.; KALADKEVICH, Y.; PAVALANSKI, E.; FATSEVEU, V. *The Effect of Gamma-ray Irradiation on Mechanical Properties of Early-age Cement Mortar*. The Civil Engineering Journal. 2018, 2018(3), 357-363. ISSN 1805-2576.
- [69] KHMUROVSKA, Y.; SZILAGYI, V.; ŠTEMBERK, P.; KIS, Z.; HARSANYI, I.; SIKORIN, S.; KALADKEVICH, Y.; PAVALANSKI, E. et al. *Water Absorption Test Accompanied by Dynamic Neutron Radiography of Gamma-irradiated Cement Samples*. In: BRITTLE MATRIX COMPOSITES 12. Warszawa: Polish Academy of Science, Institute of Fundamental Technological Research, 2019. p. 211-221.
- [70] KAVANOVÁ D. *Determination of Method for Investigation of Irradiation-induced Steel-concrete Interface Degradation*. Praha, 2019. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze – Fakulta stavební. Vedoucí práce Petr Štemberk
- [71] DABROWSKI M. GLINICKI M.A., KUZIĄK J., JÓŹWIĄK-NIEDŹWIEDZKA D., DZIEDZIC K. *Effects of 2 MGy gamma irradiation on the steel corrosion in cement-based composites*. Construction and Building Materials. 2022. 342 – 127967. ISSN 0950-0618
- [72] POYET S. Design of the ONDRAF/NIRAS Supercontainer concept for vitrified HLW disposal in Belgium: study of the thermo-hydrological behaviour of the concrete buffer. 2007 Rapport CEA, RT DPC/SCCME/07-741-7.
- [73] CRAEYE B., DE SCHUTTER G., VUYE C., GERARDY I. Cement-waste interactions: hardening self-compacting mortar exposed to gamma radiation. Progress in Nuclear Energy, 2015. 83, 212-219.
- [74] KHMUROVSKA Y, ŠTEMBERK P. *Numerical estimation of radiation induced volumetric expansion of igneous rocks*. AIP Conference Proceedings 2322, 020032 (2021)
- [75] KHMUROVSKA Y, ŠTEMBERK P. *Catalogue of Radiation-Induced Damage of Rock Aggregates Identified by RBSM Analysis*. Journal of Advanced Concrete Technology. 2021. 19(6) 668-686p
- [76] KHMUROVSKA Y, ŠTEMBERK P. *RBSM-based model for prediction of radiation-induced volumetric expansion of concrete aggregates*. Construction and Building Materials. 2021. 294 123553. ISSN 0950-0618
- [77] ŽÁK, J. *Zkoušení chování čerstvé betonové zálivky při styku s různými povrchy materiálů bednění*. In: HORÁKOVÁ, A. a M. PETŘÍK, eds. Proceedings of PhD Workshop, Department of Concrete and Masonry Structures 2022. Praha, 2022-05-27. Praha: ČVUT FSv. Katedra betonových a zděných konstrukcí, 2022. ISBN 978-80-01-06989-9.



## Seznam vlastních publikací

ŽÁK, J. *Zkoušení chování čerstvé betonové záливky při styku s různými povrchy materiálů bednění*. In: HORÁKOVÁ, A. a M. PETŘÍK, eds. Proceedings of PhD Workshop, Department of Concrete and Masonry Structures 2022. Praha, 2022-05-27. Praha: ČVUT FSv. Katedra betonových a zděných konstrukcí, 2022. ISBN 978-80-01-06989-9.

ŽÁK, J. *Vhodný tvar zkušebních těles pro automatické vyhodnocování zacelování trhlin*. In: HORÁKOVÁ, A. a M. PETŘÍK, eds. Proceedings of PhD Workshop, Department of Concrete and Masonry Structures 2021., Praha, 2021-05-21. Praha: ČVUT FSv. Katedra betonových a zděných konstrukcí, 2021. ISBN 978-80-01-06842-7.

ŽÁK, J., M. FRANTOVÁ a P. ŠTEMBERK. *Design and Production of Samples Suitable for Testing of Autogenous Healing of Concrete*. In: REITERMAN, P., ed. SPECIAL CONCRETE AND COMPOSITES 2020: 17th International Conference. Special Concrete and Composites 2020, Skalský Dvůr, 2020-10-14/2020-10-15. Melville, NY: AIP Publishing, 2021. AIP Conference Proceedings. sv. 2322. ISSN 0094-243X. ISBN 978-0-7354-4066-1. DOI 10.1063/5.0041968, Scopus: 2-s2.0-85101642589, WoS: 000653725400014

ŽÁK, J. *Využití textilního betonu pro výzkum zacelování trhlin*. In: HORÁKOVÁ, A. a M. PETŘÍK, eds. Proceedings of PhD Workshop, Department of Concrete and Masonry Structures 2020. Praha, 2020-11-13. Praha: ČVUT FSv. Katedra betonových a zděných konstrukcí, 2020. s. 209-212. ISBN 978-80-01-06774-1.

KHMUROVSKA, Y. et al. *Cement Mortar Creep under Exposure to Gamma-ray Irradiation*. Journal of Nuclear Research and Development. 2019,(18), 24-28. ISSN 2247-191X. Dostupné z: [http://www.jnrnuclear.ro/images/JNRD/No.18/jnrd\\_190\\_art4.pdf](http://www.jnrnuclear.ro/images/JNRD/No.18/jnrd_190_art4.pdf)

ŽÁK, J. *Vliv teplot při požáru na textilní beton s netkanou polypropylenovou textilií*. In: PETŘÍK, M. a A. HORÁKOVÁ, eds. Proceedings of the 8th PhD Workshop of the Department of Concrete and Masonry Structures. Praha, 2019- 05-31. Praha: ČVUT FSv. Katedra betonových a zděných konstrukcí, 2019. ISBN 978-80-01-06574-7.

ŽÁKOVÁ, H. a J. ŽÁK. *Using of TRC for Research of Crack Evolution and the Effect of Autogenous Healing*. In: BÍLÝ, P. et al., eds. Fibre Concrete 2019. Praha, 2019-09-17/2019-09-20. Bristol: IOP Publishing Ltd, 2019. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. sv. 596. ISSN 1757-899X. DOI 10.1088/1757-899X/596/1/012045, Scopus: 2-s2.0-85072091551, WoS: 000562021200043

ŽÁK, J. a P. ŠTEMBERK. *Fire Temperature Influence on the Textile Reinforced Concrete with Non-woven Polypropylene Fabric*. In: BÍLÝ, P. et al., eds. Fibre Concrete 2019. Praha, 2019-09-17/2019-09-20. Bristol: IOP Publishing Ltd, 2019. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. sv. 596. ISSN 1757- 899X. DOI 10.1088/1757-899X/596/1/012044, Scopus: 2-s2.0-85072089302, WoS: 000562021200042

KHMUROVSKA, Y. et al. *Equipment for Concrete Irradiation Experiments*. In: Mechanika 2019 Proceedings of the 24th International Scientific Conference. 24th International Scientific Conference MECHANIKA 2019, Kaunas, 2019-05-17. Kaunas: Kaunas University of Technology, 2019. s. 80-83. ISSN 1822-2951.

KHMUROVSKA, Y. et al. *Cement Mortar Creep under Exposure of Gamma-ray Irradiation*. In: Proceedings of NUCLEAR 2019 The 12th International Conference on Sustainable Development through Nuclear Research and Education. Nuclear 2019, Pitesti, 2019-06-03/2019-06-04. RATEN ICN, 2019. ISSN 2066-2955.

KHMUROVSKA, Y. et al. *The Effect of Gamma Radiation on Mechanical Properties of Cement Mortar*. In: Proceedings of NUCLEAR 2018 The 11th International Conference on Sustainable Development through Nuclear Research and Education. Nuclear 2018, Pitesti, 2018-05-23/2018-05-25. RATEN ICN, 2018. ISSN 2066-2955.

ŽÁK, J. *Elektronický řídicí systém pro zkoušku abrazivního opotřebení betonu*. In: DVORSKÝ, T. a M. PETŘÍK, eds. PhD Workshop 2018 - CD. PhD Workshop 2018, Praha, 2018-05-25. Praha: ČVUT FSv. Katedra betonových a zděných konstrukcí, 2018. ISBN 978-80-01-06417-7.

ŽÁK, J. a P. ŠTEMBERK. *Experimental Investigation of Tensile Behavior of Textile Reinforced Concrete with Nonwoven Polypropylene Fabric*. In: Mechanika 2017 Proceedings of the 22st International Scientific Conference. Mechanika 2017, Kaunas, 2017-05-19. Kaunas: Kauno technologijos universitetas, 2017. s. 399-401. ISSN 1822-2951.

ŽÁK, J., P. ŠTEMBERK a J. VODIČKA. *Production of a Textile Reinforced Concrete Protective Layers with Nonwoven Polypropylene Fabric*. In: BROUKALOVÁ, I. et al., eds. Fibre Concrete 2017. Praha, 2017-09-13/2017-09-16. Bristol: IOP Publishing Ltd, 2017. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. sv. 246. ISSN 1757-899X. DOI 10.1088/1757-899X/246/1/012054, WoS: 000423733300054, Scopus: 2-s2.0-85034416932

ŽÁK, J. *Textilní beton s netkanou polypropylenovou textilií*. In: DVORSKÝ, T. a M. PETŘÍK, eds. PhD Workshop - Full Texts. PhD Workshop 2017, Praha, 2017-05-26. Praha: ČVUT FSv. Katedra betonových a zděných konstrukcí, 2017. ISBN 978-80-01-06132-9.

BOROVKOV, D. et al. *Betonová kánoi Stingray*. BETON-technologie, konstrukce, sanace. 2016, šestnáctý(2), 8-13. ISSN 1213-3116.

ŽÁK, J. *Kompozitní materiál s cementovou maticí a textilní výztuží pro výrobu speciálních konstrukcí*. In: DVORSKÝ, T. a V. VYTLAČILOVÁ, eds. PhD Workshop - Full Text. Workshop doktorandů 2016, Praha, 2016-05-27. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, Katedra betonových konstrukcí a mostů, 2016. ISBN 978-80-01-05924-1.

ŽÁK, J. *Odolnost betonových konstrukcí proti jadernému záření*. In: DVORSKÝ, T. a V. VYTLAČILOVÁ, eds. PhD Workshop 2015 - Full Versions. PhD Workshop 2015, Praha, 2015-05-22. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, 2015. ISBN 978-80-01-05722-3.

## **Sborník**

BÍLÝ, P.; BROUKALOVÁ, I.; FRANTOVÁ, M.; ŠTEMBERK, P.; ŽÁK, J., eds. Fibre Concrete 2019. Praha, 2019-09-17/2019-09-20. Bristol: IOP Publishing Ltd, 2019. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. sv. 596. ISSN 1757-899X. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/issue/1757-899X/596/1>

# Seznam obrázků

Obrázek 1 Vzorek textilního betonu se šesti výztužnými vrstvami [9].....	15
Obrázek 2 Ukázka realizovaných konstrukcí z TRC [9].....	16
Obrázek 3 Model konstrukce zastřešení haly s kosočtvercovou příhradovinou s rozpětím 3 metry [2].....	16
Obrázek 4 Souvrství TRC-pórobeton-TRC [14].....	17
Obrázek 5 Soudržnost vlákna s betonem [6] a tvorba mikrotrhlin při soudržnosti TRC s podkladem [3].....	18
Obrázek 6 Zesilování stávající konstrukce vrstvou TRC [16].....	18
Obrázek 7 Delaminace výztužné vrstvy [17].....	18
Obrázek 8 Výpočet momentu s uvažováním spolupůsobení TRC.....	19
Obrázek 9 Přídavné namáhání vzorků.....	20
Obrázek 10 Různé druhy vzorků pro zkoušku pevnosti v jednoosém tahu [1].....	20
Obrázek 11 4-bodová zkouška tahu za ohybu vrstvené konstrukce s tvrzenou pěnou [10].....	21
Obrázek 12 Zkouška průsaku tlakovou vodou [16].....	22
Obrázek 13 Geotextilie geoNETEX S 200g/m <sup>2</sup> [26].....	23
Obrázek 14 Výroba prvních vzorků [26].....	23
Obrázek 15 Vzorek z malty s kamenivem 0-0,5 mm [26].....	24
Obrázek 16 Vzorek z malty s kamenivem 0-1 mm [26].....	24
Obrázek 17 Nepropojení vrstev [26].....	24
Obrázek 18 Vzorek z malty s kamenivem 0-0,25 mm [26].....	25
Obrázek 19 Soudržnost vrstev vzorku z malty s kamenivem 0-0,25 mm [26].....	25
Obrázek 20 Výsledky tříbodové zkoušky pevnosti v tahu za ohybu [26].....	26
Obrázek 21 Řez zkušebním tělesem [26].....	26
Obrázek 22 Trhliny v porušených vzorcích (vlevo: jednovrstvý, vpravo: dvouvrstvý) [26].....	26
Obrázek 23 Proces výroby zkušebních vzorků.....	27
Obrázek 24 Řezání vzorků.....	27
Obrázek 25 Složky směsi pro infiltraci netkané textilie [27].....	28
Obrázek 26 Složky směsi mezivrstvy [27].....	28
Obrázek 27 Spodní povrch vzorků (zleva: dobře zhutněný vzorek; nedostatečně zhutněný vzorek).....	28
Obrázek 28 Typy vyrobených vzorků [27].....	28

Obrázek 29 Konfigurace 4-bodové zkoušky pevnosti v tahu za ohybu [28].....	29
Obrázek 30 Maximální průhyb vzorku [27] .....	29
Obrázek 31 Výsledky 4-bodové zkoušky pevnosti v tahu za ohybu [28].....	30
Obrázek 32 Nevratná deformace vzorku [28].....	30
Obrázek 33 Mikrotrhliny [29].....	30
Obrázek 34 Zkouška pevnosti v jednoosém tahu [28].....	31
Obrázek 35 Výsledky zkoušky pevnosti v jednoosém tahu [28] .....	31
Obrázek 36 Delaminace dvouvrstvého vzorku se skelnou výztužnou tkaninou [28]....	32
Obrázek 37 Zahřívání zkušebního tělesa teplotu 1200 °C.....	32
Obrázek 38 Testovací vzorky [30].....	33
Obrázek 39 Normová křivka působení vnějšího požáru (vlevo) a pomalého zahřívání [33].....	34
Obrázek 40 Povrch betonů pod mikroskopem DigiMicro Profi II [30].....	35
Obrázek 41 Porovnání zkušebních těles [42].....	38
Obrázek 42 Zkušebních tělesa [43].....	38
Obrázek 43 Rozvoj trhlin po opakovaném zatěžování zkušební vzorku [44] .....	39
Obrázek 44 Vyhodnocování zakřiveného vzorku [44] .....	39
Obrázek 45 Vhodné tvary zkušebních těles [44].....	40
Obrázek 46 Postup automatizované vyhodnocování vzorků [44].....	40
Obrázek 47 Vývoj trhlin na vzorkách z TRC [29] .....	41
Obrázek 48 Kontejnment jaderné elektrárny .....	43
Obrázek 49 Vzorky biologického stínění vyrobené pro Ústav jaderného výzkumu v Řeži v roce 2013 [46] .....	44
Obrázek 50 Návrh sady zkušebních těles .....	45
Obrázek 51 Postupné poškozování betonu ionizujícím zářením [48] .....	45
Obrázek 52 Umístění ionizačních kanálů v konstrukci biologického stínění .....	46
Obrázek 53 Smršťování cementového tmelu .....	47
Obrázek 54 Separace kameniva .....	47
Obrázek 55 Zkoušení „poškozeného“ betonu .....	48
Obrázek 56 Specifikace zkušebních těles.....	49
Obrázek 57 Výroba zkušebních těles .....	50
Obrázek 58 Kvalita betonu ve spodní části zkušebních těles; a) směs 1; b) směs 5 ....	51
Obrázek 59 Výsledná zkušební tělesa.....	51
Obrázek 60 Předání zkušebních těles pracovníkům ÚJV v Řeži .....	52
Obrázek 61 První návrh zatěžovacího zařízení .....	54



Obrázek 62 Upravený návrh zatěžovacího zařízení .....	55
Obrázek 63 Hotová zatěžovací zařízení .....	56
Obrázek 64 Uspořádání experimentu [49].....	57
Obrázek 65 Porovnání naměřeného a vypočteného přetvoření vzorků [49].....	58
Obrázek 66 Tlaková pevnost a relativní pevnosti v závislosti na absorbované dávce záření [49] .....	58
Obrázek 67 Uspořádání experimentu soudržnosti mezi výztuží a betonem .....	59
Obrázek 68 Betonáž vzorků .....	60
Obrázek 69 Poškození vzorku vlivem zkosení hrany válce .....	60
Obrázek 70 Navržený rámový stojan .....	61
Obrázek 71 Sestavení navrženého rámového stojanu .....	62
Obrázek 72 Hotové rámové stojany .....	62
Obrázek 73 Přeprava rámových stojanů .....	63
Obrázek 74 Umístění vzorků v areálu ozařovny .....	63
Obrázek 75 Porušení zkušební vzorku .....	64
Obrázek 76 Řez experimentem soudržnosti .....	64
Obrázek 77 Aparát na broušení vzorků .....	65
Obrázek 78 Broušení vzorků.....	66
Obrázek 79 Výsledný pracovní diagram saturovaných (vlevo) a vysušených vzorků ..	67
Obrázek 80 Koroze výztuže neozářeného (vlevo) a ozářeného vzorku .....	67
Obrázek 81 Horká komora (Foto: CV Řež).....	69
Obrázek 82 Zkušební tělesa .....	70
Obrázek 83 Rozmístění zkušebních těles v kapslích .....	70
Obrázek 84 Vrtání zkušebních těles.....	71
Obrázek 85 Vrtané kusy nerostů .....	72
Obrázek 86 Zkracování vzorků .....	73
Obrázek 87 Broušení vzorků.....	74
Obrázek 88 Zkušební tělesa z těžkého betonu JE Temelín .....	75
Obrázek 89 Zkušební tělesa z konstrukčního betonu JE Temelín.....	76
Obrázek 90 Zkušební tělesa z minerálů.....	77
Obrázek 91 Rozměry kontejnerů pro ukládání radioaktivního odpad.....	79
Obrázek 92 Základní rozměry navrženého bednění.....	81
Obrázek 93 Součásti navrženého bednění.....	81
Obrázek 94 Zkouška povrchových vlastností různých materiálů .....	82
Obrázek 95 Testované materiály [77] .....	83

Obrázek 96 Výsledky zkoušek pro úhel 0° [77] .....	83
Obrázek 97 Výsledky zkoušek pro úhel 30° [77] .....	84
Obrázek 98 Výsledky zkoušek pro úhel 60° [77] .....	84
Obrázek 99 Výroba bednění.....	85
Obrázek 100 Výroba bednění .....	86
Obrázek 101 Výroba bednění .....	87
Obrázek 102 Průběh experimentu.....	88
Obrázek 103 Snesení a odbednění vzorků .....	89
Obrázek 104 Nařezané vzorky .....	90
Obrázek 105 Objemová hmotnost směsí po výšce .....	90
Obrázek 106 Topná pec .....	91
Obrázek 107 Komponenty kontrolního systému (foto: dratek.cz) .....	92
Obrázek 108 Zapojení kontrolního systému.....	93
Obrázek 109 Zjednodušený vývojový diagram kontrolního systému pece .....	95
Obrázek 110 Zapojení kontrolního systému.....	96
Obrázek 111 Umístění termočlánku .....	96
Obrázek 112 Ovládání kontrolního systému .....	97
Obrázek 113 Průběh teploty během experimentu (oscilace kolem teploty 650°) .....	98
Obrázek 114 Ovládání kontrolního systému .....	100
Obrázek 115 První návrh klimatického větrného tunelu .....	101
Obrázek 116 Realizace druhého klimatického větrného tunelu.....	102

# Seznam tabulek

Tabulka 1 Dopad vysokých teplot na beton [31] .....	33
Tabulka 2 Hmotnostní vývoj zkušebních těles před zahřátím a po zahřátí na konkrétní teplotu [33] .....	34
Tabulka 3 Porovnání zkušebních těles [42] .....	38
Tabulka 4 Směsi použitých betonů .....	49