

ZÍSKÁVÁNÍ A ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ MECHANICKÉHO ZKOUŠENÍ HORNIN V HORKÝCH KOMORÁCH

Kateřina Hrdličková, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.
katerina.hrdlickova@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Tento příspěvek se věnuje kritickému zhodnocení současné metody mechanického testování hornin v horkých komorách, což jsou laboratoře určené pro testování radioaktivních vzorků. V článku je popsán vliv radiace na jednotlivé složky betonu a následně i na výsledný beton. K analýze byly využity videozáznamy ze zkušebních testů projektu ACES, týkajícího se současného stavu jaderných elektráren v Evropě. Hlavními zjištěnými problémy je založení vzorku mimo osu lisu, nerovnost podstav vzorku, konstrukce lisu a špatné zaznamenávání deformací. Dalším zjištěným nedostatkem byla také špatná kvalita pořizovaného videozáznamu ze zkoušky. Navržena byla nová konstrukce lisu s doporučením lepší údržby a centrovací zářezky pro snadnější zakládání vzorku do lisu. Tato zlepšení by měla vést ke snadnější manipulaci se vzorkem a ke správným výsledkům, které budou sloužit jako kvalitní podklad pro následné numerické analýzy.

KLÍČOVÁ SLOVA

beton • radioaktivita • horké komory • hornina • mechanické zkoušky

ABSTRACT

This paper critically evaluates the current method of mechanical testing of rocks in hot cells, i.e., laboratories designed for testing radioactive samples. The impact of radiation on the individual components of concrete and subsequently on the final concrete is described. The analysis is based on video recordings from the ACES project trial tests on the current status of nuclear power plants in Europe. The identified issues include off-center sample loading, sample curvature, press design, and inadequate recording of deformations. Additionally, the video footage of the test was of poor quality. As part of the solution, a new press design was proposed that includes better maintenance and centering stops to facilitate sample handling during placement in the press. These improvements aim to facilitate sample handling and ensure accurate results, serving as a reliable basis for subsequent numerical analyses.

KEYWORDS

concrete • radioactivity • hot cells • rock • mechanical testing

1. ÚVOD

Příspěvek je tvořen na základě diplomové práce, která vychází z potřeby dokázat plnou funkčnost klíčových prvků jaderných elektráren v Česku i ve světě, zejména z hlediska prodloužení jejich životnosti. V 80. letech minulého století byly postaveny první výrobní bloky českých jaderných elektráren, kde byla uvažovaná jejich životnost 30 let. V Dukovanech již byla životnost o prvních 10 let prodloužena. Jelikož se energetická spotřeba neustále zvyšuje, je nutné tato zařízení udržovat v provozu a zajistit jejich rozšiřování, popřípadě výstavbu nových jaderných elektráren, ve kterých je ke stínění použit beton. Právě nyní probíhá hodnocení aktuálního stavu stínících betonů v jaderných elektrárnách, kterým se zabývá například projekt ACES, který zkoumá stav evropských jaderných elektráren.

Tento článek se zaměřuje na vliv ionizujícího záření na beton kolem reaktoru, který je použit jako biologická ochrana. Konkrétně jsou zkoumány složky betonu, tj. cementová pasta a kamenivo. Hlavním cílem je identifikovat systematické chyby při provádění tlakových zkoušek kameniva v horkých komorách. Jelikož se jedná o radioaktivní materiál, jsou na zkoušky a manipulaci se vzorkem kladena velká bezpečnostní opatření, která výrazně zvyšují časovou náročnost zkoušek a také náklady. Tato opatření, kromě jiného, vedou k omezenému množství zkoumaných vzorků. Každý vzorek je tak unikátní a jeho výsledky jsou považovány za konečné, bez vytváření statistik. Hlavním cílem tedy je eliminace chyb při zkoušení ozářených vzorků, aby výsledky byly spolehlivé a použitelné pro následné numerické analýzy.

2. VLIV RADIACE NA BETON

2.1. Cementová pasta

Kvůli amorfní struktuře cementové pasty má neutronové záření na vlastnosti betonu malý vliv. Hlavní vliv na cementovou pastu má gama záření, které vzniká během nepružných srážek neutronu s jádrem atomu (Maruyama et al. 2017; Khmurovskaya 2019). Gama záření způsobuje ubytek volně vázané vody v cementové pastě, který následně vede ke smršťování cementové pasty (Takizawa & Sato 2014). Dále také způsobuje radiolýzu vody (Bouniol & Aspart 1998; Vodák et al. 2005). Záření má

* Školitel: doc. Ing. Petr Bílý, Ph.D.

také vliv na karbonataci betonu. Přirozená karbonatace se projevuje pouze na povrchu betonu, ovšem karbonatace způsobená ozařováním způsobuje karbonataci i uvnitř vzorků (Vodák et al. 2011).

2.2. Kamenivo

Na kamenivo má hlavní vliv neutronové záření, které nejznatelněji působí na krystalické materiály. Během srážek neutronu s jádrem prvku dochází k poruchám krystalové mřížky (metamiktizaci minerálů) (Pomaro 2016; Hilsdorf et al. 1978). Tyto defekty se kumulují a dochází k tzv. RIVE (radiation induced volumetric expansion) – bobtnání kameniva. Každá hornina je unikátní, a to podílem jednotlivých minerálů a také chemickým složením minerálů. Tudíž i horniny se stejným názvem mají jiné chemické složení. Každý minerál nabývá na objemu jinak, což způsobuje značná napětí v hornině a dochází k vnitřnímu pnutí a následně trhlinám (Maruyama et al. 2017; Khmurovskaya 2019; Denisov et al. 2012).

Gama záření má vliv na kovalentní vazby, které se nacházejí v křemičitých materiálech a gama záření dokáže tyto vazby rozbít (Maruyama et al. 2017; Pomaro 2016). Z tohoto důvodu je vhodné používat bazické a ultrabazické horniny, které obsahují malé množství křemíku.

2.3. Beton

Vliv radiace na beton jako celek spočívá ve vzniku trhlin vlivem různých napětí od bobtnání kameniva a smršťování cementové pasty, čímž dochází ke snižování pevnostních charakteristik, a to pevnosti v tlaku až o 50 % a pevnosti v tahu o 75 %. Radiací je také ovlivňován modul pružnosti, který poklesne až o 25 %. Beton je ze 70 % tvořen kamenivem, tudíž největší vliv na vlastnosti výsledného betonu za vlivu radiace má právě použitá hornina (Field et al. 2015).

3. TESTOVÁNÍ AKTIVNÍCH VZORKŮ

3.1. Horké komory

Horké komory (dále HK) jsou laboratoře určené ke zkoušení vysoce radioaktivních materiálů. Laboratoře HK jsou ve společnosti Centrum výzkumu Řež v kontrolovaném pásmu. (Zoul et al. 2020). HK je tvořena hermetickým boxem a stínicí částí. Obojí je tvořeno z oceli. Hermetický box je vyjímatelný a je možné ho vyměnit. Stínicí část je tvořena z tří až pěti 100 mm tlustých ocelových plátů svařených k sobě. V každé HK je podtlak o velikosti 500 Pa. Každá HK má snímače, které sledují aktuální aktivitu, teplotu, tlak, ventily a polohu zařízení pro převoz materiálu. Operátor každé HK sleduje, zda jsou všechny hodnoty v bezpečných a odpovídajících mezích. V případě, že by meze splněny nebyly, může okamžitě spustit nouzové větrání, a spustit výjimečný stav. Veškeré tyto informace je možné sledovat na hlavní obrazovce, která je umístěna před kontrolovaným pásmem. Pohled do HK je zajištěn skrze olovnaté sklo tloušťky 500 mm (Petříčková et al. 2016).

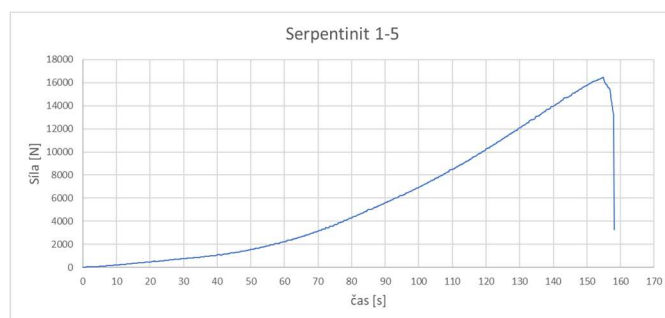
3.2. Manipulace se vzorkem

Jelikož se jedná o radioaktivní materiál, je nutné splňovat pro manipulaci se vzorkem přísná bezpečnostní opatření. A to jak při přepravě vzorku, tak následně při manipulaci se vzorkem uvnitř HK. K přepravě vzorku je nutné použití stíněných nádob. Mezi HK je použito zavazovací zařízení se stínícím zvonek. Pro manipulaci se vzorkem uvnitř HK je použit pár manipulátorů, které přesně kopírují pohyby operátora HK. V některých případech je nutný vstup do HK primárně kvůli nutným opravám. Vzorky v této chvíli musejí být uloženy ve stíněných trezorech, ovšem v HK se stále mohou vyskytovat radioaktivní aerosoly a prach. V těchto případech stanoví pracovník s přímým dohledem nad radiační ochranou (OPDRO), jaký typ úrovně ochrany je nutné použít (I-V, podle zamoření HK). Na základě tohoto rozhodnutí si pracovník musí obléknout stanovené osobní ochranné pracovní prostředky (OOPP) a následně je mu povolen vstup do HK (Zoul et al. 2020).

4. ROZBOR VIDEOZÁZNAMŮ ZKOUŠEK HORNIN

Mechanické testy posuzované v této práci byly realizovány jako zkušební testy pro projekt ACES (Khmurovskaya et al. 2024), který zjišťuje současný stav jaderných elektráren v Evropě. Cílem těchto testů bylo získání pracovních diagramů hornin, které budou použity jako vstup pro následnou numerickou analýzu. Rozborem provedených testů je možné odhalit případné nedostatky a následně tyto nedostatky odstranit pro další testování. Projekt ACES zkoumal celkem 10 typů hornin. Tato práce se zabývá pouze zkouškami na horninách použitých v českých jaderných elektrárnách Temelín a Dukovany. Jedná se o horninu Serpentin a Baryt. V tomto článku budou podrobněji rozebrány jen dva vzorky, na kterých budou ukázány hlavní nedostatky.

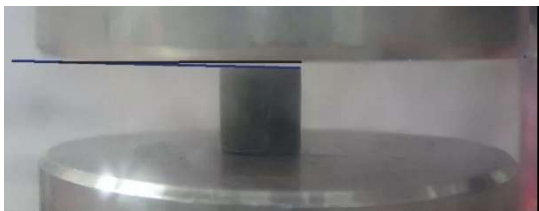
4.1. Serpentin



Obrázek 1 - Grafické znázornění závislosti zatížení na čase pro vzorek Serpentin 1-5

Vzorek serpentinu označený číslem 1-5 má rozměry 1 cm na výšku a 1 cm v průměru. Zatížení vzorku probíhalo postupně až do jeho porušení po dobu 155 s. Vzorek se rozpadl po 155 s při zatížení 1,65 t, což vyvolalo napětí 209,72 MPa na vzorek viz **Obrázek 1**. Vzorek byl uložen do lisu mimo jeho střed a také měl nerovné podstavy viz **Obrázek 2**. Lis se kvůli těmto nepřesnostem natáčel směrem k jedné straně. Zatěžovací křivka měla konvexní tvar až do přibližně 102 s, během této

doby docházelo k natáčení lisu viz **Obrázek 3**. Vzorek se na-
konec po 155 s náhle porušil na přetížené straně, která je blíže
ke středu lisu, způsobené vyoseným uložením vzorku viz **Ob-
rázek 4**.



Obrázek 2 - Nerovné podstavy vzorku Serpentinu 1-5

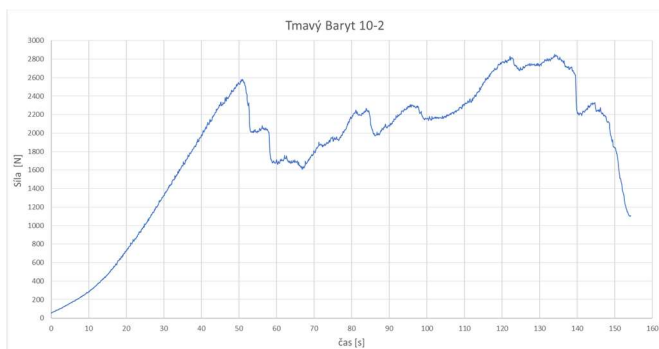


Obrázek 3 - Natáčení lisu pro vzorek Serpentinu 1-5,
čas 0 s (nahore), čas 102 s (dole)



Obrázek 4 - Porušení vzorku Serpentinu 1-5

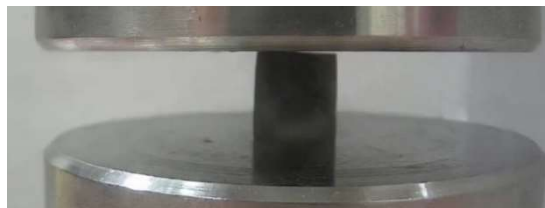
4.2. Baryt



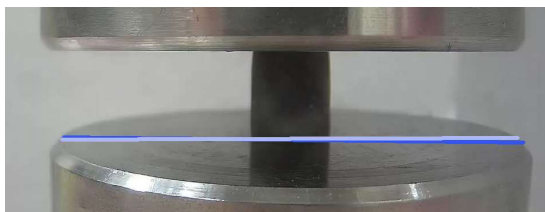
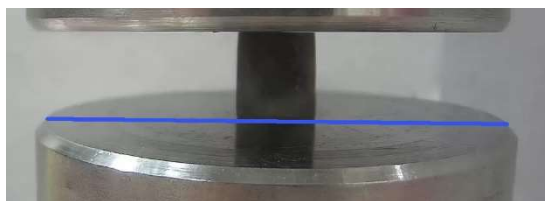
Obrázek 5 - Grafické znázornění závislosti zatížení na čase pro vzorek Baryt 10-2

Dalším rozebíraným vzorkem je baryt s označením 10-2. Vý-
sledná zatěžovací křivka vycházela velmi členitě, jak je patrné
z **Obrázku 5**. Z grafu lze určit, že zatěžování můžeme rozdělit
do několika fází, přičemž každá má odlišný vliv na celkovou
křivku. Z **Obrázku 6** je patrné, že vzorek má nerovné pod-
stavy a není umístěn ve středu lisu. Během prvních dvaceti
vteřin zkoušky je zatěžovací křivka konvexní. Během těchto

20 s dochází k natáčení lisu a vzorek je již zatěžován prakticky
na celou plochu podstavy viz **Obrázek 7**. Následně dochází
k lineárnímu nárůstu zatížení, avšak vyvýšená hrana vzorku je
přetěžována a v prvním vrcholu grafu dochází k podrcení vy-
výšené hrany a prvním prasklinám na této straně vzorku viz
Obrázek 8. Poté je vzorek již rovnoměrně zatěžován na obě
plochy podstav a zatížení opět roste. Vzorek je na jedné straně
již poškozen a vlivem dalšího zatěžování se rozšiřují stávající
trhliny a vznikají další. Vzorek se následně porušuje také vli-
vem excentrického založení v lisu a kolabuje na přetížené
straně viz **Obrázek 9**.



Obrázek 6 - Nerovné podstavy vzorku Baryt 10-2



Obrázek 7 - Natáčení lisu pro vzorek Baryt 10-2, čas 0 s
(nahore), čas 20 s (dole)



Obrázek 8 - Podrcení vyvýšené hrany vzorku Baryt 10-2

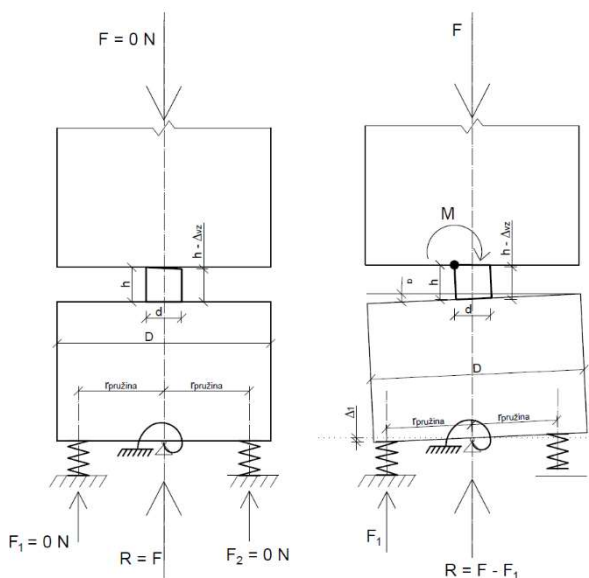


Obrázek 9 - Porušení vzorku Baryt 10-2

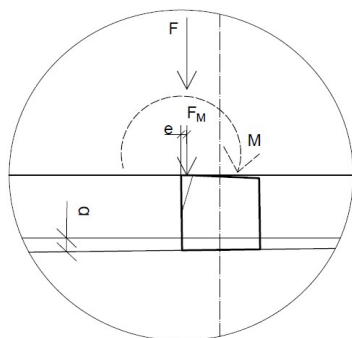
5. ZJIŠTĚNÉ NEDOSTATKY A JEJICH ŘEŠENÍ

5.1. Vzorek

Pokud je do lisu vložen vzorek s nerovnými podstavami, po každé dochází k přetěžování vyvýšené hrany vzorku. Spodní hlava lisu je navržena jako kyvná a měla by se natočit tak, aby byly obě podstavy zatěžovány rovnoměrně. K natočení lisu je ale zapotřebí vyvinout sílu, která zvládne natočit lis. Tato síla musí projít skrze vzorek a následně samotný vzorek natáčí spodní hlavu lisu. Hlava lisu se natáčí přes vyvýšenou hranu viz **Obrázek 10** a **Obrázek 11**. V některých případech docházelo k nadzvednutí vzorku a až do podrcení přetížené hrany lis nebyl natáčen. Na vzorek je tedy vyvíjeno velké napětí, jelikož je vzorek zatěžován na malou část plochy podstavy, tudíž je na této kontaktní ploše velké napětí. Poté, co se jedna strana vzorku podrtí, začne být vzorek zatěžován na celou plochu. Avšak, vzhledem k předchozímu nadrcení z jedné strany má každá hrana vzorku odlišnou tuhost, což vede k nevyváženému zatěžování a vzorek není zatěžován správně. Řešením je lepší příprava vzorku.



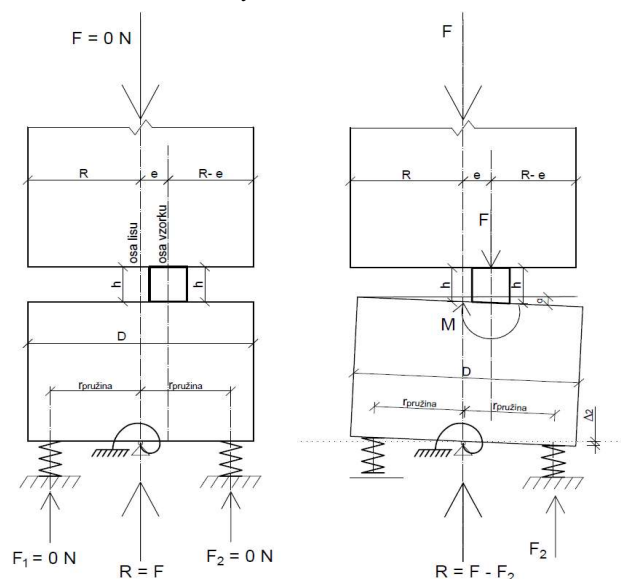
Obrázek 10 - Znáornění silového působení na vzorek s nerovnými podstavami



Obrázek 11 - Znáornění silového působení na vzorek s nerovnými podstavami, detail

Dalším zjištěným nedostatkem bylo umístění vzorku do lisu. U všech provedených testů byl vzorek založen mimo osu lisu a ve všech těchto případech došlo k podrcení vzorku na přetížené straně, způsobené vlivem vyosení. K natáčení lisu dochází opět skrze vzorek. Ze začátku zkoušky je vzorek zatěžován na obě plochy podstav rovnoměrně. Vlivem vyosení se ovšem začíná lis natáčet a vzorek už se začíná zatěžovat nerovnoměrně viz **Obrázek 12**. Poté co se vzorek natočí, dochází ke stejnému nárustu deformace na obou stranách vzorku, ovšem na jiné části vzorku, což způsobuje jiné poměrné přetvoření, čímž začne působit rozdílné napětí na hrany vzorku a vzorek se poruší nerovnoměrně.

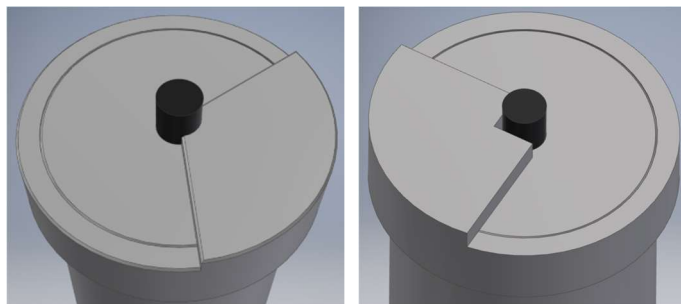
Pro vzorek bylo doložitaváno také jádro průřezu, které pro kruhový vzorek vychází jako kruh o poloměru 1/8 průměru vzorku. Pro průměr 10 mm je jádro průřezu kruh s poloměrem 1,25 mm. To dokazuje, že pro nerovnoměrné zatěžování vzorku stačí velmi malé vyosení.



Obrázek 12 - Znáornění silového působení na vzorek uložený mimo osu lisu

Řešením problému se založením vzorku do lisu je navržení centrovacích zarážek. V prvním návrhu zarážka obepíná vzorek ze všech stran. V tomto případě by ovšem, i kvůli malé výšce vzorku, byl velmi ovlivňován výsledek tlakové zkoušky. Proto byla navržena druhá zarážka, která by podpírala vzorek jen z části viz **Obrázek 13**.

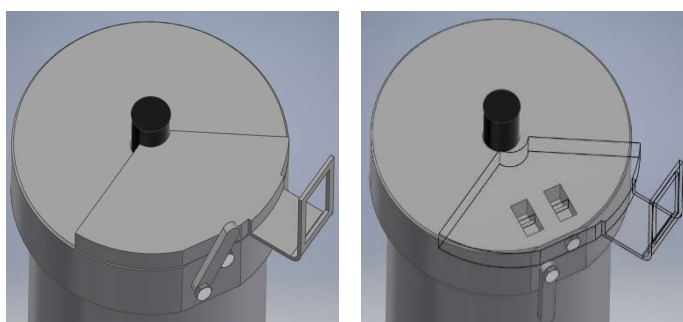
V prvním případě **Obrázek 13 (vlevo)** by docházelo k podepření vzorku částí kruhové zarážky. Ovlivňování výsledků by



Obrázek 13 - Statická centrovací zarážka s kruhovým otvorem (vlevo) s trojúhelníkovým otvorem (vpravo)

mohlo být i v případě trojúhelníkového podepření, kde by byl vzorek podepírán pouze bodově viz **Obrázek 13 (vpravo)**. Z těchto důvodů byla navržena pohyblivá zarážka viz **Obrázek 14**. Tato zarážka by fungovala následujícím způsobem. Nejprve by došlo k založení vzorku do centrovací zarážky. Poté by došlo k malému zatížení na vzorek, jen takovému, aby nemohlo dojít k posunutí vzorku, při odsouvání zarážky. Následně by došlo k odsunutí zarážky, a nakonec by byla provedena zatěžovací zkouška.

Veškeré nedostatky, které během testování vznikají, jsou výrazně ovlivněny také velikostí vzorku. Nerovnosti, které by na standartních betonových vzorcích krychle o hraně 150 mm neměly vliv, mají velký vliv na vzorky s průměrem 10 mm.



Obrázek 14 - Centrovací zarážka pohyblivá; zajištěná (vlevo), vysunutá (vpravo)

5.2. Konstrukce lisu

Problémy byly zjištěny i v konstrukci lisu. Natáčení hlavy lisu je umožněno pomocí kloubového ložiska. Při prohlídce lisu bylo zjištěno, že na ložisku je vrstva rzi. Rez způsobuje, že v ložisku dochází k většímu tření a je zapotřebí vyvinout větší sílu na otočení ložiska. Během zatěžování mohlo docházet také k drncení rzi v ložisku, a tedy k zaznamenávání větších deformací. Z těchto naměřených deformací také vycházel modul pružnosti vzorku cca 10x nižší než hodnoty zjištěné nedestruktivní metodou testování. V lisu jsou také navrženy pružiny, které mají za úkol dorovnávat hlavu lisu do vodorovné pozice, to se ale nedělo vždy. Tento problém může souviset také s vyšším třením v ložisku anebo také tím, že jsou pružiny za dobu používání deformované a nemají své počáteční schopnosti. Řešením tohoto problému je výměna ložiska a pružin a zlepšení údržby lisu. Např. mytí lisu v médiu na bázi alkoholu, aby v ložisku nevznikala rez.

Problém je také v umístění kyvné hlavy lisu (v dolní pozici), neboť k jejímu natočení dojde až při samotném zatěžování vzorku. Tím dochází k přetěžování vzorku ještě během dorovnávání hlavy lisu. Řešením je prohození kyvné hlavy a pevné hlavy lisu. Tím by byla kyvná hlava umístěna v horní části lisu a k natáčení lisu by docházelo vlivem gravitace již během dosedání lisu na vzorek.

5.3. Video

Kamerové záznamy jsou použity ve dvou případech. V prvním případě je kamera použita pro manipulaci se vzorkem a v druhém případě jako záznam ze zkoušky. Při manipulaci a zakládání vzorku pomocí manipulátorů si operátor kontroluje

umístění vzorku právě pomocí záznamu z kamery a také vizuální kontrolou skrze olovnaté sklo viz **Obrázek 15**. Ovšem záznam z kamery ukazuje zakládání vzorku přesně z druhé strany, než ze které operátor provádí pohyby pomocí manipulátorů, čímž dochází k zrcadlení obrazu na záznamu. To může vést k horší manipulaci se vzorkem a také k porušení vzorku během jeho zakládání. Řešením je odzrcadlení obrazu kamery. Kamerové záznamy ze zkoušky byly rozostřené. Rozostření bylo způsobeno automatickým ostřením kamery, která přestřovala při jakémkoliv zaznamenaném pohybu a poté přestřovala např. na škrábance na boxu z akrylového skla, které je umístěno kolem drnceného vzorku, z důvodu zamezení rozprášení vzorku po celé horké komoře. Řešením je pořízení kamery s mechanickým ostřením, kde by nedocházelo k přestřování a větší box z akrylového skla, aby byla umožněna lepší manipulace pomocí manipulátorů. Popřípadě zajištění častější výměny akrylového boxu.



Obrázek 15 - Operátor horké komory při zakládání vzorku

6. ZÁVĚR

Hlavním účelem této práce bylo kriticky zhodnotit současný průběh mechanického zkoušení hornin v horkých komorách. Po provedení rozboru videozáznamů byly identifikovány a popsány některé nedostatky, které mohou vést k nepřesnostem ve výsledcích zkoušek. Byla navržena konkrétní opatření k odstranění těchto nedostatků. Mezi nedostatky patří špatné porušení vzorků vlivem založení vzorku mimo osu lisu a nerovných podstav vzorku. Jednou z navržených úprav byl návrh centrovací zarážky, která by zajišťovala přesné založení vzorku do středu lisu a rovnoměrné zatěžování vzorku pro správné porušení. Dalším identifikovaným problémem byla spodní kyvná hlava lisu, která se narovná až při zatížení vzorku, což může vést k nadměrnému zatěžování vzorku během natáčení hlavy lisu. Pro tento problém byla navržena úprava v podobě pevného nástavce ve spodní části lisu a kyvného nástavce v horní části lisu. Během hodnocení výsledků zkoušek byly zaznamenány rozdíly mezi naměřenou hodnotou modulu pružnosti zjištěnou ze zatěžovacích křivek a s hodnotou naměřenou nedestruktivním testováním, tato nepřesnost mohla vzniknout zaznamenáváním větších deformací způsobených drncením rzi v ložisku. Proto byla navržena opatření pro lepší údržbu lisu. Navržené úpravy a doporučení mají za cíl zlepšit průběh zkoušek a zajistit kvalitní výsledky vhodné pro následné numerické analýzy. Díky umožnění přístupu do zařízení horkých komor jsem získala cenné poznatky, které mi umožnily navrhnout další vylepšení, která by měla usnadnit manipulaci se vzorkem

a zlepšit průběh zkoušek. Na základě pozitivních reakcí pracovníků horkých komor lze očekávat, že navržená opatření povedou k celkovému zlepšení průběhu zkoušek a poskytnou kvalitní výsledky pro následné analýzy.

Poděkování

Tento článek vznikl za finanční podpory ČVUT v Praze v rámci projektu SGS24/041/OHK1/1T/11.

Reference

- Bouniol, P. & Aspart, A., 1998. Disappearance of oxygen in concrete under irradiation: the role of peroxides in radiolysis. *Cement and Concrete Research*, vol. 28(issue 11), pp.1669-1681. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884698001380> [Accessed 2023-09-22].
- Denisov, A., Dubrovskii, V. & Solovyov, V., 2012. Radiation resistance of mineral and polymer construction materials. *ZAO MEI Publishing House*.
- Field, K., Remec, I. & Pape, Y., 2015. Radiation effects in concrete for nuclear power plants – Part I: Quantification of radiation exposure and radiation effects. *Nuclear Engineering and Design*, vol. 282, pp.126-143. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029549314005603> [Accessed 2023-09-22].
- Hilsdorf, H., Kropf, J. & Koch, H., 1978. The Effects of Nuclear Radiation on the Mechanical Properties of Concrete. *Special Publication*, (55), pp.223-254.
- Khmurovska, Y., 2019. *Influence of Neutron and Gamma Irradiation on Concrete Properties and Structural Performance*. dissertation. Prague.
- Khmurovska, Y. et al., 2024. zpráva ACES: Project Handbook – Management and Quality Plan.
- Maruyama, I. et al., 2017. Development of Soundness Assessment Procedure for Concrete Members Affected by Neutron and Gamma-Ray Irradiation. *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 15(issue 9), pp.440-523. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jact/15/9/15_440/_article [Accessed 2023-09-25].
- Petříčková, A. et al., 2016. O nových laboratořích na zkoumání radioaktivních materiálů v Řeži. *Technický týdeník*, 2016. https://www.technickytydenik.cz/rubriky/veda-vyzkum-inovace/o-novych-laboratorich-na-zkoumani-radioaktivnich-materialu-v-rezi_38007.html [Accessed 2023-10-12].
- Pomaro, B., 2016. A Review on Radiation Damage in Concrete for Nuclear Facilities: From Experiments to Modeling. *Modelling and Simulation in Engineering*, vol. 2016, pp.1-10. <http://www.hindawi.com/journals/mse/2016/4165746/> [Accessed 2023-09-25].
- Takizawa, M. & Sato, O. & Kontani, O. eds., Ichikawa, Y., Ishizawa, A., 2014. Irradiation Effects on Concrete Structures. In *Infrastructure Systems for Nuclear Energy*. John Wiley & Sons, Ltd., pp. 459-473.
- Vodák, F. et al., 2005. Effect of γ -irradiation on strength of concrete for nuclear-safety structures. *Cement and Concrete Research*, vol. 35(issue 7), pp.1447-1451. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884604004533> [Accessed 2023-09-22].
- Vodák, F. et al., 2011. Effect of gamma irradiation on properties of hardened cement paste. *Materials and Structures*, vol. 44(issue 1), pp.101-107. <http://link.springer.com/10.1617/s11527-010-9612-x> [Accessed 2023-09-22].
- Zoul, D., Koplová, M. & Zimina, M., 2020. Infrastruktura horkých komor Centra výzkumu Řež 1. díl. *Jaderná energie*, 1(2), pp.27-33. https://jadernaenergie.online/wp-content/uploads/2020/04/CVR_casopis_jaderna_energie_2_20_web.pdf [Accessed 2023-11-02].
- Zoul, D., Koplová, M. & Zimina, M., 2020. Infrastruktura horkých komor Centra výzkumu Řež 2. díl: Jadrová energia. *Jaderná energie*, 1(3), pp.14-20. https://jadernaenergie.online/wp-content/uploads/2020/07/CVR_casopis_jaderna_energie_3_20_web.pdf [Accessed 2023-11-02].