

Univerzita Karlova v Praze
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geologie
Studijní obor: Ložisková geologie



Bc. Petr Snížek

**Změny vnitřní stavby klastických sedimentárních hornin při
zkoušce Schmidtovým kladivem**

**Modification of rock fabric of clastic sedimentary rocks due to the
Schmidt hammer test**

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: prof. Mgr. Richard Příkryl, Dr.

Praha 2013

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 8.8.2013

Podpis

Poděkování:

Největší díky patří vedoucímu mé diplomové práce prof. Mgr. Richardovi Příkrylovi, Dr. za odborné konzultace a vedení v průběhu zpracovávání diplomové práce. Tato diplomová práce vznikla s finanční podporou Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR, projekt MSM 0021620855 „Mechanismy transportu látek ve svrchních sférách Země“ a projektu GAČR 13-13967S. Poděkování také patří mé rodině a nejbližším za podporu a shovívavost při psaní této práce.

Abstrakt

Schmidtovo kladivo patří mezi metody sloužící k určení mechanických vlastností hornin a řadí se mezi tzv. nepřímé metody. Je to zkouška vycházející ze stanovení hodnot odrazové tvrdosti (R), které se získávají odečtením míry odražení razníku nástroje od povrchu zkoušené horniny. Schmidtovo kladivo patří mezi zkoušky, které se používají *in situ* a je označováno za nedestruktivní metodu zkoušení hornin (někdy za metodu mikrodestruktivní). Hlavním cílem této práce je dokázat, že Schmidtovo kladivo je nástrojem destruktivním a stanovit také míru poškození, které Schmidtovo kladivo během zkoušení způsobí.

Pro zkoušení byly použity sedimentární horniny, konkrétně křemenné a arkóзовé pískovce s různým druhem pojiva. Bylo tedy možno zkoumat nejen samotný vývoj porušení hornin, ale také závislost porušení na typu pojiva v horninách. S ohledem na různé zrnitosti použitých hornin bylo též možno zkoumat závislost porušení a jeho vývoj vzhledem k zrnitostnímu charakteru hornin.

Již během samotného zkoušení se ukázalo, že zkouška odrazové tvrdosti (R) pomocí Schmidtova kladiva nemůže být označována jako nedestruktivní. Povrch po úderu kladiva vykazuje i makroskopicky pozorovatelné porušení. V místě dopadu razníku Schmidtova kladiva je pozorovatelná stopa po dopadu razníku Schmidtova kladiva přibližně kruhového tvaru a na povrchu této stopy jsou drobné úlomky zrn, které lze setřít prstem. Pro účel pozorování vývoje porušení bylo prováděno též zkoušení několika úderů v jednom místě a bylo zjištěno, že porušení se s rostoucím počtem úderů zvyšuje.

Zkoušené vzorky, respektive místa dopadů razníku Schmidtova kladiva, byly po změření hodnot odrazové tvrdosti zpevněny pryskyřicí s příměsí fluorescenčního barviva a byly zhotoveny výbrusy v řezech kolmých na osu dopadu razníku Schmidtova kladiva. Pomocí tohoto řezu bylo možné pozorovat, jak se porušení projevilo pod povrchem horniny. Výbrusy byly dále pozorovány v mikroskopu, byly pořízeny mikrofotografie a ty byly dále analyzovány pomocí specializovaného počítačového programu. Ze získaných dat byly stanoveny zrnitostní charakteristiky hornin a další parametry, které posloužily pro výzkum míry poškození horniny.

Mikroskopické studium ukázalo, že pod razníkem Schmidtova kladiva vznikla drcená zóna, která je ve všech zkoušených případech členěna na několik částí, a která zasahuje až do hloubky několika milimetrů pod povrchem horniny. Byl pozorován vznik kráteru, dále vznik zóny nadrcených klastů, která pozvolna přechází do zóny rozpraskaných klastů a přibližně ve třetině případů byly ještě pozorovány mikrotrhliny, vybíhající z drcené zóny dále do neporušené horniny.

Následné zhodnocení vývoje vlastností a parametrů klastů v místě dopadu razníku Schmidtova kladiva umožnilo vytvořit obecný model, který přibližně popisuje způsob, jakým se porušení horniny vyvíjí. Je patrné, že s rostoucím počtem úderů se zmenšuje velikost klastů v drcené zóně a navíc se ukázalo, že samotné drcení klastů má také svůj specifický vývoj. Klasty se nejprve nadrtí tak, že vznikají spíše protažené tvary a až při vyšším počtu úderů razníkem Schmidtova kladiva v jednom místě horniny dochází k jejich dalšímu drcení, které způsobí vznik izometričtějších klastů.

Získané výsledky byly dále porovnány s dřívějšími pracemi, které se zabývaly studiem vývoje podobných jevů po aplikaci vlačné zkoušky na granitoidní horniny a mezi oběma zkouškami bylo objeveno několik společných rysů, ale i několik rozdílů. Je pravděpodobné, že tyto rozdíly vznikají v důsledku rozdílu mezi vnitřní stavbou sedimentárních hornin, použitých v této práci a vnitřní stavbou granitoidních hornin, použitých v dřívějších pracích, a také v důsledku rozdílného charakteru samotné zkoušky.

Summary

Schmidt hammer is the instrument which is used for the assessment of rock mechanical properties and this instrument is classified as the indirect method. This method is based on the assessment of rebound value (R) of the Schmidt hammer, which is measured by the amount of rebound of the impact plunger from the surface of tested rock. Schmidt hammer is called as the non-destructive method of rock assessment and it is called as *in situ* testing method as well. The main objective of this work is to prove, that Schmidt hammer testing is destructive method and define degree of damage which is caused in the rock mass.

Sedimentary rocks were used for the testing, mostly sandstones and arkose sandstones with different types of cement. This made it possible to test the fraction of the rock mass and the relation between fraction and type of cement. The clasts of the rocks had different properties than it was possible to find the relation between grain size and fraction of the rock.

Already in procedure of the testing by Schmidt hammer it was obvious, that this method is definitely destructive. Rock surface after hitting by plunger of Schmidt hammer gains macroscopically observable destruction. On the surface is the circular track of the plunger and the surface is grinded. It is possible to wipe the small fragments of grains from the surface by fingers. For the determination of destruction was also used the testing by more impacts of the plunger to the same place and observation showed, that the destruction rises with the increasing number of impacts of the plunger.

Places of impacts were compacted by the resin with the fluorescent pigment and from these single parts have been made thin sections. The rock has been cutted perpendicular to the axis of the rebound. Because of this cut it is possible to observe features of the destruction under the surface of the rock. Thin sections have been studied in the optical microscope, microphotographies has been made and these pictures has been analysed by the specialised software. From the pictures have been determined grain and texture parameters of the rock which have been used for the description and evaluation of the destruction.

The study of thin sections showed, that the impact of plunger creates the crushed zone which can be divided into the few parts and which reaches few millimeters under the rock surface. The crushed zone consists of small crater on the rock surface, under above mentioned zone is the grinded zone which cut into the zone of cracked grains. Approximately in one third of specimens were also observed cracks which protrude from the crushed zone to the undestroyed rock mass.

Evaluation of development of properties and parameters of grains in the impact zone of plunger allowed to create the basic model which demonstrates the destruction of the rock mass development with the rising number of impacts of the plunger. It is obvious that with the rising number of impacts are grains smaller and there is also the change in their shape. After few first impacts, grains crack to the elongated shapes and with the increasing number of impacts grains became more isometric.

The results of measurements have been compared to the past works which studied similar phenomena in the granitoid rocks studied using by the indentation test. A few similarities have been observed but as well as some differences. It is probable that these differences are caused on one hand by the difference between rock types (sedimentary in this work and granitoid in past works) and on the other hand in the difference of the mechanism of testing methods.

Obsah

1. ÚVOD	1
2. PŘEHLED NEDESTRUKTIVNÍCH A MIKRODESTRUKTIVNÍCH ZKOUŠEK HORNIN IN SITU	2
2.1. Hlavní nedestruktivní a mikrodestruktivní metody pro zkoušení mechanických vlastností	2
2.1.1. Důvody využití	2
2.1.2. Přehled metod	2
2.2. Schmidtovo kladivo	3
2.2.1. Vývoj a hlavní oblasti využití	3
2.2.2. Konstrukce Schmidtova kladiva	4
2.2.3. Základní postupy pro použití Schmidtova kladiva v praxi	6
2.2.4. Požadované vlastnosti zkoušeného vzorku	7
2.2.5. Požadavky na zkoušení Schmidtovým kladivem	8
2.2.6. Sběr dat a jejich zpracování	9
2.2.7. Korelace odrazové tvrdosti s mechanickými vlastnostmi	9
3. METODIKA	12
3.1. Obecně	12
3.2. Výběr a příprava experimentálního materiálu	12
3.2.1. Experimentální materiál	12
3.2.2. Příprava zkoumaných hornin pro zkoušku Schmidtovým kladivem	12
3.3. Stanovení odrazové tvrdosti Schmidtovým kladivem	13
3.4. Příprava zkoušených povrchů pro mikroskopický výzkum	13
3.5. Mikroskopická pozorování	14
3.6. Kvantitativní analýza vybraných jevů ve výbrusech	14
3.6.1. Optimalizace přípravy digitálních snímků pro kvantitativní analýzu	14
3.6.2. Pracovní postup kvantitativní analýzy	15
4. VÝSLEDKY	17
4.1. Petrografie studovaných hornin	17
4.2. Odrazová tvrdost	17
4.3. Makro a mikroskopická pozorování povrchu hornin po dopadu razníku Schmidtova kladiva	17
4.3.1. Makroskopická pozorování povrchu hornin po dopadu razníku Schmidtova kladiva	17
4.3.2. Mikroskopická pozorování	17
4.4. Kvantifikace poruch v místě dopadu razníku Schmidtova kladiva	21
4.4.1. Rozsah poruch	21
4.4.2. Zrnitostní charakteristika klastů v drcených zónách	24
4.4.3. Tvarové parametry klastů v drcených zónách	25
5. DISKUSE	29
5.1. Problematika nedestruktivního charakteru zkoušení Schmidtovým kladivem na základě makroskopických pozorování	29
5.2. Hodnoty odrazové tvrdosti	29
5.3. Mikroskopicky pozorovatelné porušení	30
5.3.1. Obecný charakter porušení	30
5.3.2. Rozsah porušení	30
5.3.3. Změna velikosti zrn	32
5.3.4. Tvarové parametry klastů	32
5.4. Vztah mezi porušením způsobeným Schmidtovým kladivem a statickými vtláčnými zkouškami	35
6. ZÁVĚR	37
7. LITERATURA	38
PŘÍLOHY	48
I Petrografická charakteristika zkoušených hornin	48

II Tabulka naměřených hodnot odrazové tvrdosti.....	53
III Mikrofotografie drcených zón vytvořených dopadem razníku Schmidtova kladiva	54
IV Přehled kvantitativních dat naměřených ve vzorcích	83
V Histogramy zrnitosti (ekvivalentního průměru klastů) jednotlivých vzorků.....	88

Seznam obrázků v textu

Obr. 1. Konstrukce Schmidtova kladiva typu L (převzato z Deere a Millera 1966).	5
Obr. 2. Práce se Schmidtovým kladivem: a) v podmínkách <i>in situ</i> , b) v laboratorních podmínkách (převzato z Göktana a Gunese 2005).....	8
Obr. 3. Schematické znázornění vedení řezu pro přípravu výbrusu v pohledu shora (A) a v kolmém řezu (B).....	14
Obr. 4. Postup měření geometrických parametrů pomocí počítačové analýzy obrazu (Příkryl 2001)..	15
Obr. 5. Celkový pohled na rozsah drcené zóny v křemenném pískovci s železitým tmelem (vzorek KM-ZE2, po 4 úderech Schmidtovým kladivem). Na snímku je patrná deprese oproti původnímu povrchu (kráter) a také vývoj drcené zóny, v níž zůstávají ojedinělé neporušené původní klasty. Měřítka v levém horním rohu označují délku 0,5 mm.	19
Obr. 6. Detail okraje kráteru v křemenném pískovci s železitým tmelem (vzorek KM-ZE2, po 4 úderech Schmidtovým kladivem). Na snímku je patrný přechod z drcené zóny při povrchu kráteru k rozpraskaným zrnům (pravý okraj snímku). Měřítka v levém horním rohu označují délku 0,1 mm.	19
Obr. 7. Detail přechodu mezi zcela nadrcenými zrny a rozpraskanými zrny v křemenném pískovci s SiO ₂ pojivem (vzorek KO-M, po 4 úderech Schmidtovým kladivem, vzorek zkoušen v navlhčeném stavu). Měřítka v levém horním rohu označují délku 0,3 mm.....	20
Obr. 8. Detail dvou neporušených křemenných klastů v jinak zcela rozdrčené hornině dokumentuje, že míra destrukce zrn souvisí s jejich velikostí, tvarem a orientací. Křemenný pískovec s železitým tmelem (vzorek KM-ZE2, po 5 úderech Schmidtovým kladivem). Měřítka v levém horním rohu označují délku 0,3 mm.	20
Obr. 9. Mikrotrhliny vybíhající z kráteru v křemenném pískovci s SiO ₂ pojivem (vzorek KO-M, po 7 úderech Schmidtovým kladivem, vzorek zkoušen v navlhčeném stavu). Měřítka v levém horním rohu označují délku 0,3 mm.....	21
Obr. 10. Schematické znázornění porušené zóny pod povrchem horniny po dopadu (dopadech) razníku Schmidtova kladiva a popis měřených veličin v porušené zóně.	22
Obr. 11. Změny hodnot odrazové tvrdosti (R) stanovené Schmidtovým kladivem s rostoucím počtem úderů v jednom místě.	30
Obr. 12. Změna mocnosti horniny s mikroskopicky pozorovatelnými poruchami, způsobenými razníkem Schmidtova kladiva v závislosti na rostoucím počtem úderů Schmidtovým kladivem v jednom zkušebním bodu.....	31
Obr. 13. Změna velikosti plochy plochy drcené zóny s rostoucím počtem úderů Schmidtovým kladivem v jednom zkušebním místě.	31
Obr. 14. Velikost klastů, resp. jejich reliktní, vyjádřená střední hodnotou ekvivalentního průměru v neporušené hornině a její změna v drcené zóně při rostoucím počtu úderů v jednom zkušebním bodě.	32
Obr. 15. Postupný vývoj porušení při rostoucím počtu úderů Schmidtovým kladivem. Čísla označují pořadí vzniku mikrotrhlin.....	34
Obr. 16. Detail podrcených/rozpraskaných křemenných klastů po jednom úderu ve vzorku křemenného pískovce s SiO ₂ pojivem z lomu Kocbeře (vzorek KO-M). Měřítka v levém horním rohu označují délku 0,3 mm.	34
Obr. 17. Detail podrcených/rozpraskaných křemenných klastů po sedmi úderech ve vzorku křemenného pískovce s SiO ₂ pojivem z lomu Kocbeře (vzorek KO-M). Měřítka v levém horním rohu označují délku 0,3 mm.....	35
Obr. 18. Schematické znázornění porušení horniny po aplikaci statické vtláčivé zkoušky (upraveno podle Lindqvista et al. 1994).	36
Obr. 19. Mikrografie neporušené horniny (vzorek KM-ZE).....	48
Obr. 20. Mikrografie neporušené horniny (vzorek KM-ZE1).....	49
Obr. 21. Mikrografie neporušené horniny (vzorek KM-ZE2).....	50
Obr. 22. Mikrografie neporušené horniny (vzorek KO-S).....	51
Obr. 23. Mikrografie neporušené horniny (vzorek KO-M).....	52
Obr. 24. Mikrografie dokumentující rozsah porušení horniny KM-ZE v místě dopadu razníku Schmidtova kladiva typu N (jeden úder). Měřítka v levém dolním rohu odpovídá délce 0,5 mm.	54
Obr. 25. Mikrografie dokumentující rozsah porušení horniny KM-ZE v místě dopadu razníku	

Obr. 53. Histogram ekvivalentního průměru pro neporušenou část horniny ve vzorku KM-ZE.	88
Obr. 54. Histogram ekvivalentního průměru pro vzorek KM-ZE (jeden úder).....	88
Obr. 55. Histogram ekvivalentního průměru pro vzorek KM-ZE (dva údery).....	89
Obr. 56. Histogram ekvivalentního průměru pro vzorek KM-ZE (tři údery).....	89
Obr. 57. Histogram ekvivalentního průměru pro vzorek KM-ZE (čtyři údery).....	90
Obr. 58. Histogram ekvivalentního průměru pro vzorek KM-ZE (pět úderů).....	90
Obr. 59. Histogram ekvivalentního průměru pro neporušenou část horniny ve vzorku KM-ZE1.	91
Obr. 60. Histogram ekvivalentního průměru pro vzorek KM-ZE1 (jeden úder).....	91
Obr. 61. Histogram ekvivalentního průměru pro vzorek KM-ZE1 (dva údery).....	92
Obr. 62. Histogram ekvivalentního průměru pro vzorek KM-ZE1 (tři údery).....	92
Obr. 63. Histogram ekvivalentního průměru pro vzorek KM-ZE1 (čtyři údery).....	93
Obr. 64. Histogram ekvivalentního průměru pro vzorek KM-ZE1 (pět úderů).....	93
Obr. 65. Histogram ekvivalentního průměru pro neporušenou část horniny ve vzorku KM-ZE2.	94
Obr. 66. Histogram ekvivalentního průměru pro vzorek KM-ZE2 (jeden úder).....	94
Obr. 67. Histogram ekvivalentního průměru pro vzorek KM-ZE2 (dva údery).....	95
Obr. 68. Histogram ekvivalentního průměru pro vzorek KM-ZE2 (tři údery).....	95
Obr. 69. Histogram ekvivalentního průměru pro vzorek KM-ZE2 (čtyři údery).....	96
Obr. 70. Histogram ekvivalentního průměru pro vzorek KM-ZE2 (pět úderů).....	96
Obr. 71. Histogram ekvivalentního průměru pro neporušenou část horniny ve vzorku KO-S.....	97
Obr. 72. Histogram ekvivalentního průměru pro vzorek KO-S (jeden úder).....	97
Obr. 73. Histogram ekvivalentního průměru pro vzorek KO-S (dva údery).....	98
Obr. 74. Histogram ekvivalentního průměru pro vzorek KO-S (tři údery).....	98
Obr. 75. Histogram ekvivalentního průměru pro vzorek KO-S (čtyři údery).....	99
Obr. 76. Histogram ekvivalentního průměru pro vzorek KO-S (pět úderů).....	99
Obr. 77. Histogram ekvivalentního průměru pro vzorek KO-S (šest úderů).....	100
Obr. 78. Histogram ekvivalentního průměru pro vzorek KO-S (sedm úderů).....	100
Obr. 79. Histogram ekvivalentního průměru pro neporušenou část horniny ve vzorku KO-M.	101
Obr. 80. Histogram ekvivalentního průměru pro vzorek KO-M (jeden úder).....	101
Obr. 81. Histogram ekvivalentního průměru pro vzorek KO-M (dva údery).....	102
Obr. 82. Histogram ekvivalentního průměru pro vzorek KO-M (čtyři údery).....	102
Obr. 83. Histogram ekvivalentního průměru pro vzorek KO-M (pět úderů).....	103
Obr. 84. Histogram ekvivalentního průměru pro vzorek KO-M (šest úderů).....	103
Obr. 85. Histogram ekvivalentního průměru pro vzorek KO-M (sedm úderů).....	104

Seznam tabulek v textu

Tab. 1. Hlavní postupy při aplikaci Schmidtova kladiva pro stanovení odrazové tvrdosti hornin (převzato a upraveno podle Göktana a Gunese 2005).....	10
Tab. 2. Korelační vztahy mezi přetvárnými nebo pevnostními charakteristikami hornin a odrazovou tvrdostí stanovenou Schmidtovým kladivem (převzato a upraveno podle Aydina a Basu 2005).....	11
Tab. 3. Parametry vnitřní stavby hornin (resp. klastů) studované pomocí počítačové analýzy obrazu v horninových výbrusech (převzato z Příkryla 2006).	16
Tab. 4. Vyhodnocení hodnot odrazové tvrdosti (R) zjištěné Schmidtovým kladivem typu N.....	18
Tab. 5. Míra poškození studovaných hornin v souvislosti s aplikací Schmidtova kladiva typu N. Označení veličin je stejné jako na Obr. 10.	23
Tab. 6. Počet pozorovaných mikrotrhlin. Jejich maximální délky, minimální délky a střední hodnoty délky.	24
Tab. 7. Počet objektů (klastů) vyhodnocených pomocí počítačové analýzy obrazu.	24
Tab. 8. Přehled minimálních, maximálních a průměrných hodnot ekvivalentních průměrů v drcených zónách a ve výchozích horninách.....	25
Tab. 9. Přehled minimálních, průměrných a maximálních hodnot kompaktnosti v neporušené hornině a v drcených zónách.....	26
Tab. 10. Přehled minimálních, maximálních a průměrných hodnot tvarových faktorů v drcených zónách a ve výchozích horninách.....	27
Tab. 11. Přehled minimálních, maximálních a průměrných hodnot poměrů os klastů v drcených zónách a ve výchozích horninách.	28
Tab. 12. Počet klastů vyřazených z výzkumu poměrů dlouhé a krátké osy.....	28
Tab. 13. Naměřené hodnoty odrazové tvrdosti.....	53
Tab. 14. Přehled ploch porušených zón a kvantitativních dat kompaktnosti, ekvivalentního průměru, tvarového faktoru a poměru os ve vzorcích s označením KM-ZE.	83
Tab. 15. Přehled ploch porušených zón a kvantitativních dat kompaktnosti, ekvivalentního průměru, tvarového faktoru a poměru os ve vzorcích s označením KM-ZE1.	84
Tab. 16. Přehled ploch porušených zón a kvantitativních dat kompaktnosti, ekvivalentního průměru, tvarového faktoru a poměru os ve vzorcích s označením KM-ZE2.	85
Tab. 17. Přehled ploch porušených zón a kvantitativních dat kompaktnosti, ekvivalentního průměru, tvarového faktoru a poměru os ve vzorcích KO-S.	86
Tab. 18. Přehled ploch porušených zón a kvantitativních dat kompaktnosti, ekvivalentního průměru, tvarového faktoru a poměru os ve vzorcích KO-M.....	87

1. ÚVOD

Stanovení mechanických vlastností hornin (např. zjištění chování horninového masivu, odvození vlastností pro optimalizaci dobývacích metod, stanovení využitelnosti hornin ve stavebnictví atd.) patří k základním typům zkoušek v mechanice hornin (Bieniawski 1974, Goodman 1989). Pevnost hornin se zpravidla stanovuje v laboratorních podmínkách pomocí zkušební lisu (Hawkes a Mellor 1970, Hawkins 1998). Zkouška však vyžaduje přípravu sady zkušebních těles pravidelného tvaru a definovaných rozměrů. Zkoušku je tedy možné provést jedině tehdy, pokud lze odebrat větší množství neporušené horniny. Mechanické vlastnosti hornin však lze odvodit také z výsledků zkoušek, provedených tzv. nepřímými metodami (Fener et al. 2005), jejichž realizace je snazší. Zároveň tyto zkoušky nevyžadují velké množství zkoušeného materiálu. V některých případech však odběru vzorků brání různé skutečnosti a provedení výše uvedených zkoušek pak není možné.

Z těchto důvodů byly vyvinuty zkušební metody, které umožňují odvodit vybrané mechanické vlastnosti z měření *in situ*. Tyto metody jsou obecně označovány jako tzv. neinvazivní (Dionísio et al. 2013), nedestruktivní (Charitaras 1996, de Vekey 2003, Pápay a Török 2007, Ahmad et al. 2010) nebo mikrodestruktivní (Siedel et al. 2010). Kromě vybraných geofyzikálních metod, založených na skutečně nedestruktivním měření fyzikálních vlastností (např. rychlost šíření ultrazvukového signálu, měrný elektrický odpor), je do skupiny těchto metod kladeno nepřímé vyhodnocování mechanických vlastností pomocí odporového vrtání (Tiano et al. 2000a,b) nebo pomocí stanovení vlačné či odrazové tvrdosti (ISRM 1978). Mezi výhody těchto zkušebních metod patří nižší finanční náklady, rychlost provedení a zpravidla malý, v některých případech nulový stupeň porušení materiálu po aplikaci zkoušky.

Označení zkoušky jako nedestruktivní znamená, že v praxi může být taková metoda používána i v místech, kde je nevratné poškození zkoušeného materiálu vyloučeno. To se týká zejména zkoušení povrchů materiálů, které jsou součástí objektů kulturního dědictví nebo nemohou být poškozeny z jiných důvodů. Na objektech kulturního dědictví je jakákoliv změna soudržnosti materiálu, způsobená provedenou zkouškou, nepřijatelná nejen kvůli bezprostřednímu poškození estetického vnímání, ale může způsobit zvýšenou náchylnost zkoušeného materiálu k postupnému rozpadu působením zvětrávacích činitelů.

Tato experimentální diplomová práce je založena na hypotéze, že některé typy zkoušek, označované za nedestruktivní, ve skutečnosti vedou k místnímu nevratnému porušení materiálu. Jednou z takových zkoušek může být stanovení odrazové tvrdosti povrchu materiálu pomocí Schmidtova kladiva. Odrazová tvrdost, původně určená pro „nedestruktivní“ zkoušení betonu (Schmidt 1951), našla postupem času široké uplatnění v řadě úloh mechaniky hornin a v posledních desetiletích je řazena mezi tzv. nedestruktivní zkoušky anorganických materiálů historických staveb, architektonických, kamenicky opracovávaných prvků a sochařských výtvarných děl (Török 2010).

Východiskem experimentálního programu této práce je skutečnost, že na povrchu hornin, podrobených zkoušce odrazové tvrdosti Schmidtovým kladivem, zůstává makroskopicky pozorovatelná stopa, která naznačuje možnost vzniku nevratného poškození materiálu. I když byl tento fenomén okrajově zmiňován v některých dřívějších pracích (Aoki a Matsukura 2007, Viles et al. 2011), žádná z nich se tomuto problému nevěnovala podrobněji zejména z hlediska určení typu a rozsahu porušení materiálu a možné kvantifikace jevů, souvisejících s poškozením (např. míra drčení, rozvoj mikrotrhlin apod.). Vedle těchto jevů se předložená diplomová práce pokouší zjistit, zda existuje nějaká souvislost mezi poruchami po dopadu razníku Schmidtova kladiva a jevy, které vznikají při statických vlačných zkouškách.

2. PŘEHLED NEDESTRUKTIVNÍCH A MIKRODESTRUKTIVNÍCH ZKOUŠEK HORNIN IN SITU

2.1. Hlavní nedestruktivní a mikrodestruktivní metody pro zkoušení mechanických vlastností

2.1.1. Důvody využití

Pro zkoušení a zjišťování mechanických vlastností hornin se používá mnoho metod (Goodman 1989), které lze podle místa a způsobu provedení rozdělit na: a) zkoušky *in situ* a b) zkoušky laboratorní. Obě skupiny zkoušek spolu úzce souvisí a některé metody, využívané ke zkoušení mechanických vlastností hornin, jsou dokonce pro oba druhy zkoušek stejné. Liší se pouze metodikou provedení, které je v laboratoři výrazně zpřesněno speciálními přípravky (držáky, vodící mechanismy a další).

Mezi laboratorní zkoušky, které hojně využívá mechanika hornin, patří stanovení pevnosti v prostém tlaku (Hawkes a Mellor 1970) a další zátěžové zkoušky, využívající zkušební lisy. U těchto metod jsou kladeny vysoké nároky na přípravu zkušebních těles ze vzorku, odebraného v terénu. Zkušební tělesa musí mít předepsaný tvar a rozměry, zkouška musí být prováděna za předepsaných fyzikálních podmínek (teplota, vlhkost). Dosahuje se tak přesnějších a snáze opakovatelných výsledků.

Laboratorní zkoušky, používané v mechanice hornin, patří mezi tzv. destruktivní typy zkoušek, protože vyžadují odběr zkoušeného materiálu a přípravu zkušebních těles. Většina laboratorních zkoušek v mechanice hornin probíhá na mez porušení. Zkušební těleso se při zkoušce rozruší působením síly, vyvinuté zkušebním lisem.

V některých případech však není možné, aby byly provedeny zkoušky laboratorní a navíc destruktivní. Taková situace nastává tehdy, pokud nelze odebrat dostatečně velký vzorek, z něž by se dala připravit zkušební tělesa. To může nastat například ve špatně přístupných místech, ve složitém terénu či v místech, kde vzorek nelze vůbec odebrat. Posledně jmenovaným příkladem jsou např. historické památky. Pro tyto případy je používáno měření různých vlastností přímo na místě (*in situ*). Nepřímé vyhodnocení mechanických vlastností hornin *in situ* je možné pomocí různých metod, mezi něž patří ultrazvukové prozařování (Ahmad et al. 2010), odporové vrtání (Tiano et al. 2000a,b) nebo stanovení tvrdosti materiálu různými typy zkoušek (ISRM 1978).

Měření *in situ* přinášejí oproti laboratorním zkouškám mnoho výhod, ale též různé nevýhody. Mezi výhody těchto metod patří bezesporu jejich použitelnost v místě výzkumu bez nutnosti odebírat vzorek a možnost získání velkého souboru dat. Další výhodou je rychlost provedení zkoušky a nízká finanční náročnost. Samozřejmostí u těchto zkoušek je nízká hmotnost používaného nástroje, s tím související snadný transport nástroje a tedy jeho snadná použitelnost v podstatě kdekoliv. Naopak nevýhodou může být nepřesnost měření či špatná dostupnost a kvalita zkoušených hornin nebo kolísající kvalita zkoušených povrchů hornin. Oproti laboratorním zkouškám lze většinu terénních měření považovat za mikrodestruktivní nebo nedestruktivní (de Vekey 2003).

2.1.2. Přehled metod

Ultrazvukové prozařování *in situ* je jedním z nejrozšířenějších způsobů nedestruktivního měření (Christaras 1996). Provádí se pomocí elektroakustických snímačů s různou pracovní frekvencí v rozsahu přibližně 1-500 kHz (Schuller et al. 1995, Christaras 1998). Ze změřeného času, potřebného k průchodu signálu materiálem po určité dráze, lze vypočítat rychlost P- a S-vln, která závisí nejen na elastických parametrech neporušené pevné látky, ale též je ovlivněna přítomnými poruchami (např. mikrotrhlinami) či navětráním materiálu. Pokročilé způsoby zpracování celého vlnového obrazu zachyceného signálu umožňují odvodit trvanlivost přírodního kamene (Valdeon et al. 1996, Benavente et al. 2006, Martínez-Martínez et al. 2011). Ultrazvukové měření tak lze výhodně použít pro klasifikaci kvality hornin a stanovení míry navětrání (Topal a Doyuran 1995), pro detekci mikrotrhlin

a podpovrchových oslabených zón nebo pro zjištění míry průniku konzervačních látek do zvětralého přírodního kamene (Bruneau et al. 1995, Christaras 1998, Weiss et al. 2002, Ahmad et al. 2010, Fort et al. 2010, 2013, Siegesmund et al. 2010, Török 2010).

Zjišťování tvrdosti povrchových a podpovrchových částí přírodního kamene a dalších stavebních materiálů pomocí odporového vrtání je založené na měření rychlosti prostupu vrtáku malého průměru materiálem do hloubky několika cm (Hirschwald 1908, Tiano et al. 2000a). Rychlost prostupu vrtáku lze převést na energii, potřebnou k vyvrtání daného otvoru a tu lze korelovat s pevností v prostém tlaku (Delgado Rodrigues a Costa 2004, Pamplona et al. 2007). Třebaže je tato metoda v posledních letech poměrně hojně využívána při průzkumu přírodního kamene a dalších stavebních materiálů na památkách pro zjištění míry zvětrání nebo hloubky průniku konzervačních prostředků (Tiano a Viggiano 2000, Tiano et al. 2000b, Tiano 2001, Delgado Rodrigues et al. 2002, Török et al. 2005, 2007, Fratini et al. 2006, Fernandes a Lourenço 2007, Costa Portugal et al. 2012, Ferreira Pinto a Delgado Rodrigues 2008, 2012), jedná se zároveň o metodu, kterou s ohledem na rozsah zásahu nelze označit za nedestruktivní nebo neinvazivní; v některých pracích je popisována jako mikrodestruktivní (Delgado Rodrigues et al. 2002, Siedel et al. 2010).

Mezi nedestruktivní metody zkoušení je řazeno určování tvrdosti hornin (Török 2010). Tvrdost hornin je v mechanice hornin pokládána spíše za určitý projev chování materiálu než za základní materiálovou vlastnost (ISRM 1978). Obecně ji lze charakterizovat jako odolnost vůči lokální deformaci (Tabor 1956). Měření tvrdosti se provádí ve třech základních uspořádáních pomocí: (1) vlačných zkoušek, (2) odrazových zkoušek nebo (3) vrypových zkoušek.

Princip vlačných zkoušek je jednoduchý a v některých případech umožňuje měření *in situ* (Szwedzicki 1998). Vlačné zařízení (penetrometr) obsahuje pružinu, která se stlačuje tlakem vyvozeným na rukojeť a příslušné stlačení se odečítá na měřítku. Do povrchu horniny je vlačován hrot, který může mít různé tvary (kužel s proměnlivým vrcholovým úhlem, jehlan). Existuje řada variant vlačného hodnocení tvrdosti, pro horniny je nejvíce využívána Knoopova nebo Vickersova metoda, zatímco pro kovy Brinellova metoda nebo zkouška Rockwell (ISRM 1978). Pro zpřesnění zkoušky bývá penetrometr opatřen vodícím stojánkem, který zajišťuje správnou polohu hrotu vůči povrchu horniny, a také libelkou. Zaznamenává se hloubka průniku hrotu do horniny. Tato metoda je tzv. komparativní, tedy naměřené hodnoty se vztahují k hodnotám naměřeným v laboratorních podmínkách, což může být značnou nevýhodou (Polák 1965).

Měření odrazové tvrdosti je založené na míře odskočení dopadajícího indentoru od povrchu zkoušeného materiálu. Kromě Shoreho skleroskopu, využívaného v laboratorních podmínkách (ISRM 1978, Holmgeirsdottrir a Thomas 1998, Altindag a Güney 2006), se používá tzv. kuličková odraznost (Hack et al. 1993) a zejména Schmidtovo kladivo (viz dále), případně alternativní zařízení pracující na podobném principu – Equotip (Verwaal a Mulder 1993, Meulenkamp a Alvarez Grima 1999, Aoki a Matsukura 2008) nebo Duroscope (Török 2003).

Vrypové zkoušky se používají pro stanovení odolnosti vůči vrypu. Nejznámějším hodnocením je tzv. Mohsova stupnice tvrdosti, jejíž hodnoty jsou korelovatelné s výsledky některých vlačných zkoušek (Tabor 1954).

2.2. Schmidtovo kladivo

2.2.1. Vývoj a hlavní oblasti využití

Schmidtovo kladivo bylo původně vyvinuto E. Schmidtem jako nedestruktivní nástroj pro zkoušení povrchové pevnosti betonů (Schmidt 1951, Kolek 1958). Schmidtovo kladivo patří do stejné kategorie zkušebních postupů jako skleroskopické zkoušky, které jsou však vhodné pro použití v laboratorních podmínkách. Konstrukce Schmidtova kladiva naopak usnadňuje práci v terénu; laboratorní využití

přítom není nijak omezené.

Brzy po zavedení do praxe se Schmidtovo kladivo začalo používat v mechanice hornin jako levná, rychlá a účinná metoda pro odvození pevnostních nebo přetvárných charakteristik hornin (Hucka 1965). Mezi přednosti zkoušení odrazové tvrdosti Schmidtovým kladivem je řazena snadnost provedení zkoušky a opakovatelnost měření (Day a Goudie 1977, Poole a Farmer 1980, Gökten a Ayday 1993). Schmidtovo kladivo je výhodnější tam, kde stupeň porušení nebo petrografické charakteristiky způsobují značný útlum ultrazvukového signálu (Young a Fowell 1978).

K prvním příkladům praktického využití Schmidtova kladiva v oblasti mechaniky hornin patří odhad mechanických vlastností horninového masivu při stavbě přehrad (Knill a Jones 1965) nebo odvozování korelačních vztahů mezi odrazovou tvrdostí a laboratorně stanovenou pevností v prostém tlaku (Deere a Miller 1966). Za několik desítek let trvajících existenci našlo Schmidtovo kladivo řadu oblastí použití nejen ve stavebnictví, ale zejména v mechanice hornin, kde se využívá k následujícím úlohám:

- odhadu pevnosti v prostém tlaku a dalších mechanických vlastností hornin při zkouškách v laboratoři nebo *in situ* (Duncan 1969, Inoue a Omi 1970, Aufmuth 1973, Kazi a Al-Mansour 1980, Janach a Merminod 1982, Sachpazis 1990, Xu et al. 1990, Cargill a Shakoore 1990, Aggastalis et al. 1996, Amaral et al. 1999, Katz et al. 2000, Kahraman 2001, Kahraman et al. 2002, Yilmaz a Sendir 2002, Dinçer et al. 2004, Yaşar a Erdoğan 2004, Buyuksagis a Goktan 2007, Shalabi et al. 2007, Tandon a Gupta 2013);
- hodnocení kvality diskontinuit v horninách a v horninovém masivu (Barton a Choubey 1977, Young a Fowell 1978, Greco a Sorriso-Valvo 2005);
- stanovení stupně navětrání v inženýrsko-geologické praxi (De Puy 1965, Day a Goudie 1977, Irfan a Dearman 1978, Matthews a Shakesby 1984, McCarroll 1991, Sjöberg a Broadbent 1991, Karpuz a Paşamehmetoğlu 1997);
- odvození kvality horninového masivu při ražení tunelů (Fowell a McFeat Smith 1976, Howarth et al. 1986, Bilgin et al. 2002, Gökten a Gunes 2005);
- odvození mechanických vlastností při hlubinném nebo povrchovém dobývání nerostných surovin (Kidybiński 1968, 1981, Tarkoy a Hendron 1975, Garter a Sneddon 1977, Poole a Farmer 1978, Farmer et al. 1979, Sheorey et al. 1984, Haramy a De Marco 1985, Ghose a Chakraborti 1986, Karpuz 1990, Singh et al. 2002, Basarir a Karpuz 2004);
- odhadu rychlosti postupu vrtných prací (Kahraman 1999, Li et al. 2000, Kahraman et al. 2000, 2003).

V posledních desetiletích však přibýly nové oblasti využití, k nimž patří geomorfologie (Day a Goudie 1977, Williams a Robinson 1983, McCarroll 1987, 1989a,b, 1992, Ballantyne et al. 1990, Sjöberg a Broadbent 1991, Nesje et al. 1994, Evans et al. 1999, Aa a Sjøstad 2000, Ericson 2004, Aoki a Matsukura 2007), opracovatelnost přírodního kamene (Kahraman et al. 2004, Yurdakul a Akdaş 2012), predikce chování kameniva (Kazi a Al-Mansour 1980, Al-Harhi 2001, Kahraman a Gunayidin 2007) nebo výzkum památek (Török 2003, 2008, Koca et al. 2006, Pápay a Török 2007, Fort et al. 2010, Viles et al. 2011).

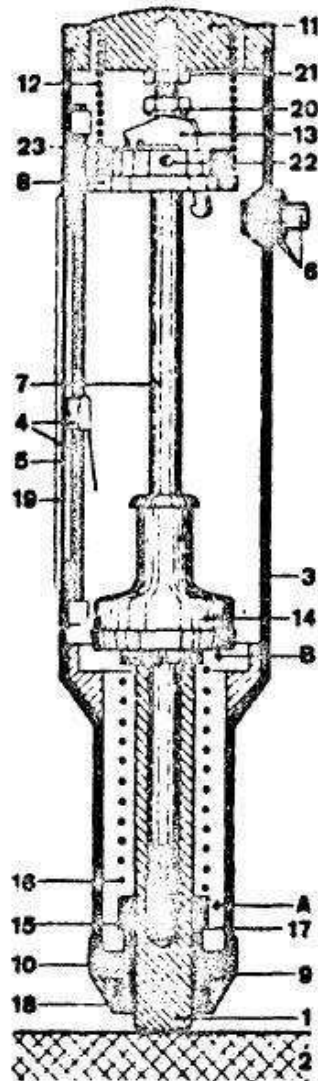
2.2.2. Konstrukce Schmidtova kladiva

Schmidtovo kladivo má jednoduchou konstrukci (Obr. 1) a princip měření. Pracovní mechanismus tvoří pružina a hrot (razník), který dopadá na povrch zkoušeného materiálu, dále stupnice, z níž se odečítá hodnota odrazové tvrdosti, a spouštěcí tlačítko, které uvolňuje pružinu. Celý tento

mechanismus je uložen v pevném pouzdře, které ho chrání při používání v terénu, kde je kladena vysoká náročnost na odolnost nástroje.

Razník Schmidtova kladiva se přikládá ve zkušebním místě kolmo k povrchu zkoušeného materiálu (osa razníku tedy směřuje kolmo k povrchu). Schmidtovo kladivo se stlačuje plynulým pohybem ruky a zmáčknutím spouštěcího tlačítka se vyvodí ráz. V tomto okamžiku je proti razníku vrženo silou pružiny nárazové závaží, které je po úderu odmrštno o určitý úsek zpět.

1. Razník
2. Testovaný vzorek
3. Pouzdro
4. Jezdec a vodící tyč
5. Stupnice odrazových hodnot
6. Spouštěcí tlačítko
7. Píst
8. Disk
9. Krytka razníku
10. Dvojitý prstenec
11. Zadní kryt
12. Pružina
13. Západka
14. Tělo kladiva
15. Přídržná pružina
16. Dopadová pružina
17. Vodící pouzdro
18. Podložka
19. Okénko z plexiskla
20. Jistící šroub
21. Pojistná matice
22. Svorka
23. Pružina západky
- A. Přední fixace dopadové pružiny
- B. Zadní část dopadové pružiny propojené s tělem kladiva



Poznámka:
(a) Razník (1) je v pozici nárazu

Obr. 1. Konstrukce Schmidtova kladiva typu L (převzato z Deere a Millera 1966).

Kinetická energie dopadajícího razníku má tři složky. Část energie je pohlcena horninou, druhá část se mění na teplo a zvuk, zatímco poslední složka představuje tvrdost (míru odporu) povrchu materiálu. Tato energie umožní zpětný ráz hrotu a dráha, kterou hrot od odrazu urazí, se projeví na stupnici Schmidtova kladiva. Naměřená veličina se označuje jako tzv. odrazová tvrdost (ang. rebound hardness); vyjadřuje se bezrozměrnou hodnotou (R). Podle typu Schmidtova kladiva lze odrazovou tvrdost měřit mechanicky nebo elektronicky. Platí, že čím vyšší je tvrdost povrchu, tím kratší je odrazový čas a tudíž i větší zpětný ráz a naopak.

V praxi se používají tři základní typy Schmidtových kladiv: Schmidtovo kladivo typu L, N nebo P.

Tato Schmidtova kladiva mají různou sílu dopadové energie. Základní Schmidtovo kladivo typu N vykazuje sílu dopadové energie 2,207 Nm, která je vhodná ke zkoušení materiálů s pevností v prostém tlaku 10 – 70 MPa. Schmidtovo kladivo typu L vykazuje sílu dopadové energie 0,735 Nm (rázová energie je snížena zhruba na 1/3 v porovnání s typem N). Typ L se zdá být nejhodnější pro použití na menších vzorcích hornin. Zkoušení vzorků z vrtných jader (Deere a Miller 1966) totiž ukázalo, že Schmidtovo kladivo typu N není vhodné pro orientační stanovení pevnosti na vrtných jádrech, protože působí příliš silný ráz a může dojít k rozlomení jádra. Kladivo typu P se používá jen zřídka pro zkoušení materiálů s pevností v tlaku nižší než 70 kPa (Viles et al. 2011), např. při měření pevnosti stavebních poživ. Pro měření hornin není příliš vhodné kvůli výrazně nižšímu silovému působení.

2.2.3. Základní postupy pro použití Schmidtova kladiva v praxi

I přes široké využití Schmidtova kladiva a poměrně dlouhou dobu jeho používání se vytvořily pouze rámcové zkušební postupy, přičemž každý z nich s sebou nese několik úskalí, která ovlivňují kvalitu výsledků. Jako příklad lze uvést vliv rozměrů vzorku, drsnosti povrchu, míru zvětrání povrchu vzorku, vlhkosti vzorku, míru nasycení vodou nebo také postup při zpracování naměřených dat. Při práci se Schmidtovým kladivem je vždy nutné přihlídnout k dané situaci a podle ní měření provádět. Podmínkou správné interpretace naměřených hodnot je proto vždy uvedení podmínek, za kterých zkoušení probíhalo.

Od počátku prací se Schmidtovým kladivem byla navržena řada postupů, jejichž cílem je zobecnit postup pro určitý typ úloh. Většina z těchto postupů je však použitelná pouze pro určitou situaci, se kterou daný autor pracoval. Za nejvíce používané a uznávané se v současnosti považují metodický postup Mezinárodní společnosti mechaniky hornin (ISRM 1978), případně metodický postup Americké společnosti pro zkoušení a materiály (ASTM 2005). Oba tyto metodické postupy jsou navrženy pro hodnocení odrazové tvrdosti na základě jednoho dopadu razníku Schmidtova kladiva na zkoušený povrch.

Od doby vydání metodického postupu ISRM (1978) se většina prací zaměřených na Schmidtovo kladivo soustředila na vytvoření korekčních tabulek pro nejrůznější typy hornin. Snahou je, aby se podařilo metodický postup ISRM (1978) co nejvíce zobecnit pro všeobecné použití a aby bylo možné navrhnout jednotný standardizovaný metodický postup, který by vedl k zajištění spolehlivých a vzájemně porovnatelných výsledků (Katz et al. 2000, Aydin a Basu 2005, Göktan a Gunes 2005).

Za velkou přednost práce se Schmidtovým kladivem je považována snadnost provedení zkoušky (Goudie 2006). Při měření stačí přiložit Schmidtovo kladivo k povrchu zkoušeného materiálu a změřit hodnotu odrazové tvrdosti. Stanovení lze rovněž provádět i v laboratorních podmínkách na pravidelných zkušebních tělesech nebo na vrtných jádrech (Schmidtovo kladivo typu L). K výhodám patří i možnost stanovení odrazové tvrdosti při různých pracovních orientacích, tedy vodorovně, svisle nebo kose, což usnadňuje práci v ražených podzemních dílech, případně v jeskyních nebo na převisích.

Schmidtovo kladivo se však musí při zkoušení přikládat kolmo k povrchu. Při použití Schmidtova kladiva v různých pracovních orientacích je nutno pamatovat na ovlivnění naměřených hodnot odrazové tvrdosti gravitační silou. Aby se tato možná odchylka ve zkoušení odstranila, byly navrženy různé korekční postupy. Metodický postup ISRM (1978) doporučuje, aby byly použity korekční křivky, které dodává výrobce s daným typem Schmidtova kladiva. Barton a Choubey (1977) představili alternativní korekční tabulku, která je využitelná pro Schmidtova kladiva typu L a je vytvořena z dat, která používají výrobci k vytváření korekčních křivek. Tuto korekční tabulku přejal metodický postup ISRM (1978). Kolaiti a Papadopoulos (1993) odhalili nedůslednost výrobců a upozornili na fakt, že výrobci tvoří korekční křivky a tabulky pouze podle jednoho materiálu (většinou betonu). Podle korekčních křivek dodávaných výrobcem lze navíc hodnotit pouze úder v omezeném

počtu orientací (většinou 0°, 45°, 90° a 180°). Basu a Aydin (2004) navrhli analytickou rovnici, která umožňuje výsledky normalizovat pro širokou škálu hornin. Jejich metoda normalizace výsledků může být použita pro všechny typy Schmidtova kladiva a jeho použití v jakémkoliv směru.

2.2.4. Požadované vlastnosti zkoušeného vzorku

Podle metodického postupu ISRM (1978) by měl mít zkoušený vzorek nejkratší hranu alespoň 6 cm dlouhou, zatímco novější metodický postup ASTM (2005) udává minimální délku hrany 15 cm. Pro vrtná jádra se oba metodické postupy shodují na průměru jádra minimálně 54,7 mm. Z jiných experimentálních prací vyplývá, že by minimální velikost vzorku měla přesáhnout 11 cm (Demirdag et al. 2009), případně až 25 cm pro horniny s nízkou pevností (Niedzielski et al. 2009).

I v dalších požadavcích na zkoušený vzorek se oba metodické postupy víceméně shodují. Důležité je, aby vzorek nebyl rozpraskaný. Požadavek na minimální hloubku homogenity je 6 cm, protože do této hloubky dosahuje rázová vlna dopadajícího razníku. Tomuto požadavku většinou nevyhovují vzorky z vrtného jádra, u nichž často dochází k poškození během samotného vrtání. Platí, že čím větší je vzorek, tím přesnějších výsledků lze dosáhnout.

Dalším požadavkem kvality vzorku je charakter jeho povrchu. Plochosť zkoušeného povrchu výrazně ovlivňuje výsledky zkoušky Schmidtovým kladivem. Čím je povrch zkoušeného vzorku drsnější, tím horší jsou výsledky. Razník po dopadu totiž neobsáhne povrch v celé své ploše, ale narazí pouze na výčnělky minerálů nad povrchem, které rozdrtí. Proto spíše měří jejich deformaci než odrazovou tvrdost samotného povrchu. Z těchto důvodů je ke Schmidtovu kladivu dodáván brousek, kterým se má zkoumaný povrch začistit a zploštit. Pokud toto není možné, může být částečným řešením tohoto problému opakování zkoušky v jednom místě do doby, než se výčnělky zploští; takový postup je však méně přesný (Hucka 1965, Katz et al. 2000).

Schmidtovo kladivo je extrémně citlivé na přítomnost jakýchkoliv poruch v horninách. Velký rozptyl naměřených hodnot se projeví v případě heterogenní horninové stavby, např. u tence laminovaných sedimentů (Özbek 2009) nebo u hornin s výraznou metamorfní foliací podmíněnou kompozičním páskováním (Viles et al. 2011).

Významnou roli v oblasti požadavků na kvalitu vzorku hraje také stupeň zvětrání vzorku a kvalita povrchu, přičemž i velice mírné navětrání povrchu způsobuje výrazné změny v naměřených hodnotách (Williams a Robinson 1983). Zvětrávání způsobuje poruchy v mikrostruktuře horniny, čímž se zhoršují její mechanické vlastnosti. Nejvíce se tato problematika dotýká polyminerálních hornin, kde každý minerál zvětrává jinak. Jako příklad lze uvést křemen a živce, které jsou základními horninotvornými minerály. U hornin, které tyto minerály obsahují, bývá dosaženo významného rozptylu naměřených hodnot, které se mohou lišit i v sousedních bodech. Obecně tedy platí, že naměřená hodnota odrazové tvrdosti klesá s rostoucím stupněm zvětrání (McCarroll 1991).

Výsledky měření rovněž ovlivňuje přítomnost vody ve zkoušeném materiálu, přičemž platí, že s rostoucím nasycením vodou nelineárně klesají hodnoty odrazové tvrdosti (Sumner a Nel 2002), podobně jako se snižují pevnostní charakteristiky (Dyke a Dobereiner 1991, Hawkins a McConnell 1992, Hawkins 1998, Chen a Hu 2003, Vásárhelyi 2003, 2005, Shakoor a Barefield 2009, Török a Vásárhelyi 2010). Změna hodnoty odrazové tvrdosti při zvyšujícím se obsahu vody však také závisí na druhu pórovitosti, mineralogickém složení horniny a řadě dalších faktorů. K vlhkosti je třeba přihlídnout zejména u vzorků, zkoušených přímo v terénu, protože u nich se může vlhkost rychle měnit v závislosti na okolním prostředí (Sumner a Nel 2002). Pokud však hornina obsahuje nestlačitelnou vodu v uzavřených pórech, mohou se hodnoty odrazové tvrdosti i mírně zvyšovat (Ballantyne et al. 1990). Obsahu vody je však třeba věnovat pozornost i při zkoušení vzorků laboratorních. Deere a Miller (1966) zjistili významné odchylky hodnot odrazové tvrdosti u vzorků,

temperovaných při běžné laboratorní teplotě a vlhkosti pod dobu 2 týdnů, vzorků vysušených při 100 °C po dobu 24 hodin a vzorků nasycených vodou během 60 až 90 minut. Nejmenší rozptyl naměřených hodnot vykazovaly vzorky temperované v běžných laboratorních podmínkách, naopak vzorky vysušené nebo úplně nasycené vykazovaly velký rozptyl naměřených hodnot.

2.2.5. Požadavky na zkoušení Schmidtovým kladivem

Základním předpokladem správného měření Schmidtovým kladivem je jeho přiložení kolmo ke zkoušenému povrchu. Minimalizuje se tak zkreslení výsledků, které by nastalo při šikmém dopadu razníku, kdy dochází k tomu, že se razník usmýkne po povrchu vzorku. V laboratorních podmínkách je i z tohoto důvodu nutno zajistit, aby vzorek spočíval na rovné podložce (tj. aby se neukláněl od osy kladiva). Podložka nemá být pružná, aby nedocházelo k tlumení dopadu, čímž by se snížila výsledná naměřená hodnota odrazové tvrdosti. Oba nejvíce používané metodické postupy (ISRM 1978, ASTM 2005) přesně popisují práci se vzorky v laboratoři: vzorek musí být připevněn k ocelové podložce o minimální hmotnosti 20 kg. V případě vzorků z vrtných jader se tyto musí vložit do přípravku, který se rozměrově shoduje s vrtným jádrem (Obr. 2), případně lze vrtná jádra vkládat do zářezu tvaru V. Zářez tvaru V je považován za vhodnější, protože vzorek nepodepírá přímo pod bodem dopadu razníku, což by u měkčích hornin mohlo způsobit prasknutí.



Obr. 2. Práce se Schmidtovým kladivem: a) v podmínkách *in situ*, b) v laboratorních podmínkách (převzato z Göktana a Gunese 2005).

Při zkoušení *in situ* je vždy složitější zajistit vhodné podmínky a tak lze očekávat větší rozptyl výsledků kvůli velmi rozdílným podmínkám, za kterých je zkouška prováděna. U materiálu zkoušeného *in situ* se obtížně stanovuje vlhkost nebo míra nasáknutí vodou. Často nelze opracovat povrch, tak aby byl rovný, ani nelze poznat, zda není zkoušený materiál jinak porušen pod povrchem. U měření *in situ* je pak důležité držet Schmidtovo kladivo pevně oběma rukama (Obr. 2), aby se zmenšilo zkreslení výsledné hodnoty zpětným rázem, který nastane při dopadu razníku na povrch horniny (Deere a Miller 1966, Aydin a Basu 2005).

2.2.6. Sběr dat a jejich zpracování

Při zkoušení Schmidtovým kladivem je zejména nutné rozhodnout se, kolik úderů na ploše vzorku je nutno provést, aby se povedlo zachytit kolísání tvrdosti povrchu a bylo tak možno vypočítat reprezentativní průměrnou hodnotu (Day a Goudie 1977). Zvolené body měření by neměly být příliš blízko k okrajům vzorků, protože dopadová energie se v těchto místech výrazně rozptýlí a metoda pak poskytuje neobvykle nízké hodnoty. Důležité je zvolit body v dostatečně vysokém počtu a v takové vzdálenosti mezi sebou, aby se jednotlivé úderky Schmidtovým kladivem vzájemně neovlivňovaly. Velmi často se používá rozdělení vzorku na jakousi síť, která má dle typu kladiva dostatečnou velikost jedné buňky, aby bylo zajištěno, že se jednotlivá měření neovlivní a v jednotlivých buňkách se pak provádí měření.

Metodické postupy ISRM (1978) a ASTM (2001) shodně uvádějí, že nejmenší vzdálenost dvou měřících bodů by měla být větší než je průměr Schmidtova kladiva v místě, kterým se přikládá ke vzorku. Protože každý výrobce dělá kladiva různě veliká, nelze velikost buňky postihnout přesným číslem. Většinou se na jednom vzorku provádí větší sada měření, přičemž jich vždy musí být více jak deset (Tab. 1).

Redukce naměřených hodnot se provádí tak, že se zanedbá určitá část nejnižších hodnot, aby se do výsledku nezahrnuly skryté praskliny a další případné poruchy povrchu horniny, které by mohly výsledek ovlivnit (Tab. 1). Podle metodického postupu ISRM (1978) je doporučeno vypočítat průměr z horních 50 % naměřených hodnot při použití nejméně dvaceti různých údajů. Metodický postup ASTM (2001) doporučuje pořádkem nejmeně deset měření a z nich vyloučit tři nejnižší hodnoty. Ze zbývajících hodnot se poté vypočte průměr. Nicméně Sheorey et al. (1984) zjistili, že při zahrnutí těchto hodnot do výpočtu výsledná hodnota odrazové tvrdosti lépe koreluje s pevností v prostém tlaku. Při zahrnutí všech naměřených hodnot do výpočtu je lépe zohledněna heterogenita materiálu (Amaral et al. 1999). Proto i podle revidované metodiky ISRM (Aydin 2009) by se neměly vynechávat žádné hodnoty.

Počet úderů v jednom zkušebním místě je dalším důležitým faktorem při zkoušení Schmidtovým kladivem. Třebaže většina studií využívá pouze 1 úder, některé výzkumné práce (Hucka 1965, Poole a Farmer 1980, Aoki a Matsukura 2007, 2008) ukazují, že při vyšším počtu úderů (zpravidla 5 až 10) razníku Schmidtova kladiva v jednom bodě se získají více konzistentní data než u jednotlivých úderů. Děje se tak z důvodu zpevnění materiálu během opakovaných úderů; své opodstatnění to má zejména u zvětralých hornin. Výsledky dosažené opakovanými úderky tedy reprezentují pozměněný stav horniny a také průběh změny stavu od prvního úderu k poslednímu a lze z nich například odvodit míru navětrání horniny nebo integritu její struktury (Aydin a Basu 2005).

2.2.7. Korelace odrazové tvrdosti s mechanickými vlastnostmi

Schmidtovo kladivo bylo vždy využíváno jako nástroj pro *in situ* měření, z jejichž výsledků bylo možné odvodit pevnost (Schmidt 1951). Tématu vztahu mezi hodnotami odrazové tvrdosti a běžnými mechanickými vlastnostmi, stanovenými v laboratorních podmínkách (pevnost v tlaku, přetvárné

charakteristiky) je proto věnována pozornost v četných studiích (Deere a Miller 1966, Aufmuth 1973, Dearman a Irfan 1978, Haramy a DeMarco 1985, Ghose a Chakraborti 1986, Cargill a Shakoore 1990, Sachpazis 1990, Turgul a Zarif 1999, Katz et al. 2000, Yilmaz a Sendir 2002). Velký rozptyl v získaných korelačních vztazích (Tab. 2) může mít řadu příčin: zkoušení hornin v různém stupni vysušení nebo nasáknutí vodou, zohlednění objemové hmotnosti nebo pórovitosti, proměnlivost složení atd. Poslední kritické studie (Aydin a Basu 2005, Yagiz 2009) potvrzují, že při odvozování korelačních vztahů je třeba věnovat velkou pozornost tomu, jaké horninové typy jsou do výpočtu zahrnuty. Při zanedbání této skutečnosti může docházet k extrémním rozptylům odvozovaných hodnot mechanických a dalších fyzikálních vlastností (Yagiz 2009).

Tab. 1. Hlavní postupy při aplikaci Schmidtova kladiva pro stanovení odrazové tvrdosti hornin (převzato a upraveno podle Göktana a Gunese 2005).

Autor	Postup zkoušení
Deere a Miller (1966)	Byla prováděna tři měření po délce vrtného jádra. Vždy tak, že byla v místě měření zjištěna hodnota odrazové tvrdosti, jádro bylo pootočeno o 45° a poté byla měřena další hodnota odrazové tvrdosti. Celkem bylo tedy získáno 24 výsledků. Podstatné je, že nebyla hlídána chybná a správná čtení, ale bylo vyhodnoceno vše.
ISRM (1978)	Bylo provedeno 20 měření v nejmenší možné vzdálenosti od sebe (na průměr Schmidtova kladiva). Deset hodnot bylo odstraněno jako chybné a deset bylo zprůměrováno.
Young a Fowell (1978)	Vzorek byl rozdělen na několik částí a výsledky byly získány zprůměrováním hodnot odrazové tvrdosti v jednotlivých částech.
Goktan a Ayday (1993)	Bylo provedeno 20 měření v nejmenší možné vzdálenosti od sebe (na průměr Schmidtova kladiva). Byly odstraněny chybné hodnoty pomocí Chuavenetova kritéria a zbytek byl zprůměrován na jediný výsledek.
Soiltest (1976)	Bylo naměřeno 15 hodnot odrazové tvrdosti a pět nejvyšších bylo odstraněno. Ze zbytku hodnot byl vytvořen průměr. Odchylka naměřených hodnot odrazové tvrdosti od průměru nesměla překročit 2,5.
Matthews a Shakesby (1984)	Na každém z použitých vzorků bylo provedeno 15 měření. Z naměřených hodnot odrazové tvrdosti byl vytvořen průměr a 5 hodnot, které byly nejvíce vzdáleny od tohoto průměru bylo ze zkoušky odstraněno.
Kazi a Al-Mansour (1980)	Bylo provedeno nejméně 35 měření odrazové tvrdosti na jednom vzorku. Nejnižších 10 hodnot bylo ze zkoušení odstraněno a ze zbytku byl vytvořen průměr.
Katz et al. (2000)	Bylo naměřeno 32 až 40 hodnot odrazové tvrdosti na jednom vzorku. Z nejvyšších 50ti % hodnot byl vytvořen průměr.
Poole a Farmer (1980)	V každém zkušebním místě bylo provedeno pět úderů. Z každých pěti hodnot byla vybrána pouze jedna nejvyšší a z těchto nejvyšších hodnot byl poté vypočítán průměr.
Hucka (1965)	V každém zkušebním bodě bylo provedeno deset úderů. Byla vybrána nejvyšší hodnota a z těchto nejvyšších hodnot pro všechny zkušební body byl spočítán průměr. U každého vzorku probíhalo zkoušení na třech různých místech.
GBG	Bylo provedeno 12 měření v každém zkušebním bodě a byly odstraněny nejvyšší a nejnižší hodnoty. Ze zbytku byla vypočtena průměrná hodnota odrazové tvrdosti.
USBR (1998)	Na každém ze zkoušených vzorků bylo provedeno 10 měření. V každém zkušebním bodě se měřilo pouze jednou. Poté bylo odstraněno 5 nejnižších hodnot a 5 nejvyšších bylo zprůměrováno.
Summer a Nell (2002)	Na každém vzorku bylo provedeno 15 měření a bylo odstraněno 5 nejdlejších hodnot. Ze zbylých deseti měření byl vytvořen průměr.

Tab. 2. Korelační vztahy mezi přetvárnými nebo pevnostními charakteristikami hornin a odrazovou tvrdostí stanovenou Schmidtovým kladivem (převzato a upraveno podle Aydina a Basu 2005).

Autor	Navrhovaná korelace	r	Rozsah platnosti / hornina	σ_{UCS}	R
Aufmuth (1973)	$\sigma_{\text{UCS}}=0,33*(R_L*q)^{1,35}$ $E_t=4911,84*(R_L*q)^{1,06}$	0,8 0,75	25 různých litologií	12 - 362	10 - 54
Dearman a Irfan (1978)	$\sigma_{\text{UCS}}=0,00016*R_L^{3,47}$ $E_t=1,89*R_L-60,55$	- 0,93	granit (stupeň I až IV)	11 - 266	23 - 62
Deere a Miller (1966)	$\sigma_{\text{UCS}}=9,97*e^{(0,02*RL*q)}$ $E_t=0,19*R_L*q^2-7,87$	0,94 0,88	28 různých litologií	22 - 358	23 - 59
Cargill a Shakoor (1990)	$\sigma_{\text{UCS}}=3,32*e^{(0,04*RL*q)}$ $\sigma_{\text{UCS}}=18,17*e^{(0,02*RL*q)}$	0,93 0,98	pískovce karbonáty	35 - 271	27 - 49
Yilmaz a Sendir (2002)	$\sigma_{\text{UCS}}=2,27*e^{(0,06*RL)}$ $E_t=3,15*e^{(0,05*RL)}$	0,91 0,95	sádrovec	15 - 30	30 - 44
Katz et al. (2000)	$\sigma_{\text{UCS}}=2,21*e^{(0,07*RN)}$ $E_t=0,00013*R_N^{3,09}$	0,96 0,99	vápenec, pískovec syenit, granit	11 - 259	24 - 73
Haramy a DeMarco (1985)	$\sigma_{\text{UCS}}=0,99*R_L-0,38$	0,7	uhlí	7 - 46	12 - 44
Ghose a Chakraborti (1986)	$\sigma_{\text{UCS}}=0,88*R_L-12,11$	0,87	uhlí	13 - 41	28 - 53
Sachpazis (1990)	$\sigma_{\text{UCS}}=4,29*R_L-67,52$ $E_t=1,94*R_L-33,93$	0,96 0,88	33 různých litologií	22 - 311	16 - 60
Tugrul a Zarif (1999)	$\sigma_{\text{UCS}}=8,36*R_L-416,00$	0,87	granit	109 - 193	64 - 72
Použité zkratky:					
σ_{UCS}	pevnost v prostém tlaku (MPa)				
E_t	tangenciální Youngův modul (GPa)				
q	hustota (g/cm ³)				
R_L a R_N	hodnoty odrazové tvrdosti pro Schmidtovo kladivo typu L nebo N				

3. METODIKA

3.1. Obecně

Metodika této práce vycházela ze základní pracovní hypotézy o destruktivním charakteru stanovení odrazové tvrdosti pomocí Schmidtova kladiva. Hypotéza vychází z dřívějších empirických pozorování školitele této diplomové práce, z nichž je zřejmé, že zkoušení odrazové tvrdosti Schmidtovým kladivem vede k makroskopicky znatelnému porušení povrchu zkoušeného materiálu, které má charakter nevratných změn. Tato pozorování jsou v rozporu s dosud publikovanými pracemi v tomto oboru, které zkoušku odrazové tvrdosti Schmidtovým kladivem považují za nedestruktivní (Török 2010) a v principu vhodné pro zkoušení materiálů na objektech kulturního dědictví, byť s určitou dávkou opatrnosti (Viles et al. 2011). Protože se však dosud žádná výzkumná práce nezabývala typem, ani rozsahem poruch, bylo hlavním cílem této diplomové práce tyto jevy prostudovat a kvantifikovat.

Pracovní postup se tedy skládal z výběru vhodných horninových typů, provedení zkoušky Schmidtovým kladivem a následného zkoumání míst dopadu razníku Schmidtova kladiva. Toto zkoumání spočívalo v provedení kvantitativních měření vybraných jevů, pozorovaných v horninových výbrusech.

3.2. Výběr a příprava experimentálního materiálu

3.2.1. Experimentální materiál

Pro experimentální ověření pracovní hypotézy byly vybrány 4 vzorky sedimentárních hornin z území České republiky. Všechny vzorky lze obecně klasifikovat jako úlomkovité sedimentární horniny (pískovce *s.l.*), které se mezi sebou liší zrnitostí, mineralogickým složením a povahou základní hmoty, resp. pojiva. Volbu tohoto souboru hornin lze zdůvodnit faktem, že se jedná o běžné stavební a sochařské přírodní kameny, využívané po staletí na území České republiky (Rybařík 1994). Dalším pozitivním faktem byl otevřený charakter pórového prostoru studovaných hornin, který umožnil proniknutí penetrační pryskyřice s barvivem do horniny (blíže viz kapitola 3.4. Příprava zkoušených povrchů pro mikroskopický výzkum), aniž by muselo být použito vakuum, což v případě jiných běžně používaných hornin, jakými jsou např. opuky, není tak snadné.

Tři ze studovaných vzorků jsou křemenné pískovce z oblasti české křídové pánve. Vyznačují se odlišným typem pojiva (jílová základní hmota, pojivo tvořené Fe-hydroxidy, případně tmel, tvořený SiO_2). Čtvrtý vzorek lze označit jako arkózu či arkózový pískovec z oblasti limnického permokarbonsu.

Pouze jeden z těchto vzorků byl odebrán v činném lomu Kocbeře (křemenný pískovec s tmelem, tvořeným SiO_2). Zbývající tři vzorky pocházejí z větších nepravidelných úlomků, vytažených při čištění dna Vltavy za Karlovým mostem v roce 2006. Tyto vzorky byly poskytnuty PŘF UK pro další výzkumy. Přesnou zdrojovou lokalitu těchto hornin nelze dnes určit, ale v případě křemenných pískovců se může jednat o území východně od Prahy nebo její východní či severovýchodní okraj; v případě karbonické arkózy lze zdrojovou lokalitu hledat buď severně od Prahy na Kralupsku, nebo západně od Prahy na Kladensku – oblast mezi Doksy a Kamennými Žehrovicemi.

3.2.2. Příprava zkoumaných hornin pro zkoušku Schmidtovým kladivem

Pro měření byly použity vzorky hornin tvaru větších nepravidelných bloků (rozměry několik desítek centimetrů). Vzorky KO měly tvar desek tloušťky 5 cm. Měření byla prováděna kolmo k sedimentární vrstevnatosti na rovné ploše, která byla zhotovena řezáním diamantovou pilou. Protože bylo plánováno provést měření Schmidtovým kladivem na jednom vzorku na více místech a s různými počty úderů razníku, musely být rovné plochy dostatečně velké, aby bylo možno dodržet

požadovanou vzdálenost mezi zkušebními body. Řezy skrz bloky byly vedeny tak, aby byla hornina pod zkoušenou plochou dostatečně mocná a nedocházelo k nežádoucímu rozpadu nebo rozlomení vzorku při úderu razníku Schmidtova kladiva.

3.3. Stanovení odrazové tvrdosti Schmidtovým kladivem

Zkušební plochy jednotlivých vzorků byly rozděleny na několik částí, v nichž byla prováděna jednotlivá měření. Měřicí body byly zvoleny tak, aby splňovaly kritérium pro minimální vzdálenost měřících bodů pro zkoušení Schmidtovým kladivem; byly tedy od sebe vzdáleny více, než je průměr razníku Schmidtova kladiva (v této práci více než dvojnásobně). Na každém vzorku bylo v prvním měřícím místě použito měření jednoho úderu na jeden bod, ve vedlejším měřícím místě dva údery na jeden bod a analogicky dále. Nejvyšší počet úderů do jednoho bodu byl 7 u vzorku KO – S/7 a u vzorku KO – M/7. U ostatních vzorků bylo použito nejvíce 5 úderů do jednoho bodu.

U jednoho ze zkoušených vzorků (KO – M/1 až KO – M/7) byla odrazová tvrdost hodnocena po navlhčení zkoušeného povrchu vodou. Vzorek byl navlhčen obyčejnou vodou z vodovodu po dobu několika minut a poté zkoušen stejným způsobem jako všechny ostatní vzorky.

Odrazová tvrdost všech studovaných vzorků byla zkoušena svisle vedenými údery Schmidtova kladiva. Pouze u některých vzorků byly provedeny také vodorovné údery. Konkrétně se jednalo o vzorky KM-ZE od třetího úderu výše a vodorovnými údery byl též zkoušen vzorek KM-ZE1. Od zkoušení vodorovně vedenými údery bylo ale brzy upuštěno, protože docházelo k opadávání nesoudržného materiálu v dřívě zkoušených místech zkoumané plochy.

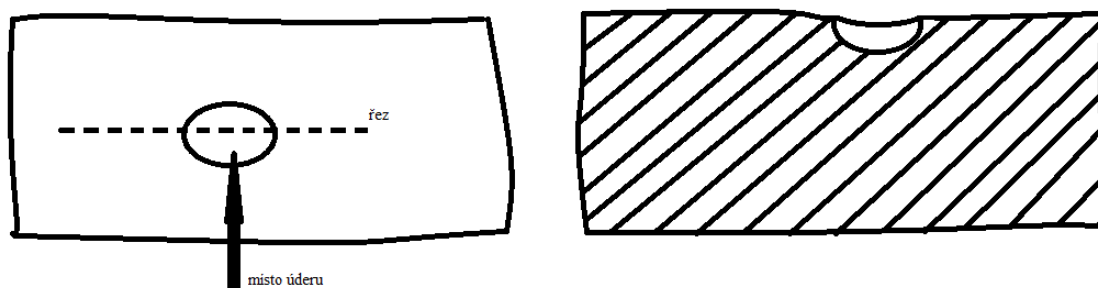
Při zkoušení byly částečně simulovány podmínky zkoušení v terénu, pro které je Schmidtovo kladivo zejména určeno. Vzorky ani Schmidtovo kladivo nebyly uchyceny v žádném držáku, jak je předepsáno pro laboratorní zkoušení (ISRM 1978, ASTM 2005). Vzorky byly volně položeny na podlaze případně zapřeny nohou nebo, v případě úderů vedených vodorovně, byly opřeny o zeď. Schmidtovo kladivo bylo vždy přiloženo kolmo k povrchu, avšak drženo pouze v ruce, takže přesnost přiložení odpovídá možnostem zkoušení přímo v terénu. V případě více úderů v jednom místě bylo Schmidtovo kladivo po každém úderu odejmuto od povrchu a byla odečtena a zapsána příslušná hodnota odrazové tvrdosti. Stav měření byl vynulován a Schmidtovo kladivo bylo opět přiloženo do místa předchozího úderu (předchozích úderů). Z tohoto je patrné, že přesnost některých přiložení, stejně jako kolmost Schmidtova kladiva k povrchu nemusela být vždy naprosto přesná, což odpovídá podmínkám zkoušení v terénu. Z těchto skutečností by mohly vyplývat některé nepřesnosti nebo nesrovnalosti ve výsledcích, které budou diskutovány dále.

3.4. Příprava zkoušených povrchů pro mikroskopický výzkum

Po provedení měření odrazové tvrdosti Schmidtovým kladivem byla místa dopadu razníku označena a napuštěna směsí epoxidové pryskyřice s fluorescenčním barvivem (EpoDye, výrobce Struers, Dánsko). Tento postup se využívá u pórovitých materiálů, u nichž je žádoucí zviditelnit pórový prostor vůči minerálním zrnům nebo klastům. Použitý postup je shodný s metodikou popsanou Příkrylem (2007), která, oproti dřívě navrhovaným penetračním látkám – akrylátovým pryskyřicím (Nishiayama a Kusuda 1994), využívá nízkoviskózní epoxidovou pryskyřici s delší dobou tvrdnutí (přibližně 24 hodin). To usnadňuje proniknutí látky i do pórů nebo trhlin velmi malých rozměrů.

Po vytvrdnutí pryskyřice byla oblast, postižená dopadem razníku Schmidtova kladiva (v pohledu shora přibližně kruhového průřezu s průměrem menším než 10 mm) spolu s bezprostředním okolím (přibližně dalších 10 mm okolo místa dopadu), vyříznuta diamantovou pilou. Vlastní výbrus byl potom zhotoven v řezu (Obr. 3) v ose dopadu razníku tak, aby byla zachycena středová část poruchové zóny,

kde bylo možné očekávat největší rozsah poruch a také oblast přechodu mezi neporušenou a porušenou horninou. Výbrus nebyl opatřen krycím sklíčkem, aby bylo možné provést pozorování v ultrafialovém světle.



Obr. 3. Schematické znázornění vedení řezu pro přípravu výbrusu v pohledu shora (A) a v kolmém řezu (B).

3.5. Mikroskopická pozorování

Výbrusy byly pozorovány v optickém mikroskopu Leica DMLP (Laboratoř optické mikroskopie ÚGMNZ). Nejprve byl proveden základní petrografický popis při pozorování ve viditelném procházejícím a polarizovaném světle. Poté byly výbrusy zkoumány v odraženém ultrafialovém světle a při těchto pozorováních byly zhotoveny mikrofotografie. Fotografická dokumentace poruch, spojených s dopadem razníku Schmidtova kladiva, byla provedena tak, aby byl zachycen jejich celkový rozsah v ploše výbrusu.

Fotografická dokumentace byla provedena fotoaparátem Canon EOS 500D, upevněným na výše zmíněném mikroskopu. Vzhledem k velikosti fotografovaného jevu musela být zhotovena série mikrofotografií, které byly později skládány v počítačovém programu Zoner Photo Studio 14 pomocí nástroje Panorama. Složeniny fotografií byly většinou tvořeny třemi, v některých případech i čtyřmi řadami po 6 až 8 fotografiích.

Fotografie byly pořizovány jak v porušených částech vzorku, tak v místech, kde nebyla hornina nijak porušena, aby bylo možné porovnat vybrané parametry neporušené a porušené horniny. Fotografie neporušených částí hornin byly pořizovány v okrajových částech vzorků, kam již porušení nezasáhlo. V okrajových částech byl většinou prostor pro pořízení série tří až čtyř snímků vedle sebe a maximálně dvou řad snímků pod sebou.

3.6. Kvantitativní analýza vybraných jevů ve výbrusech

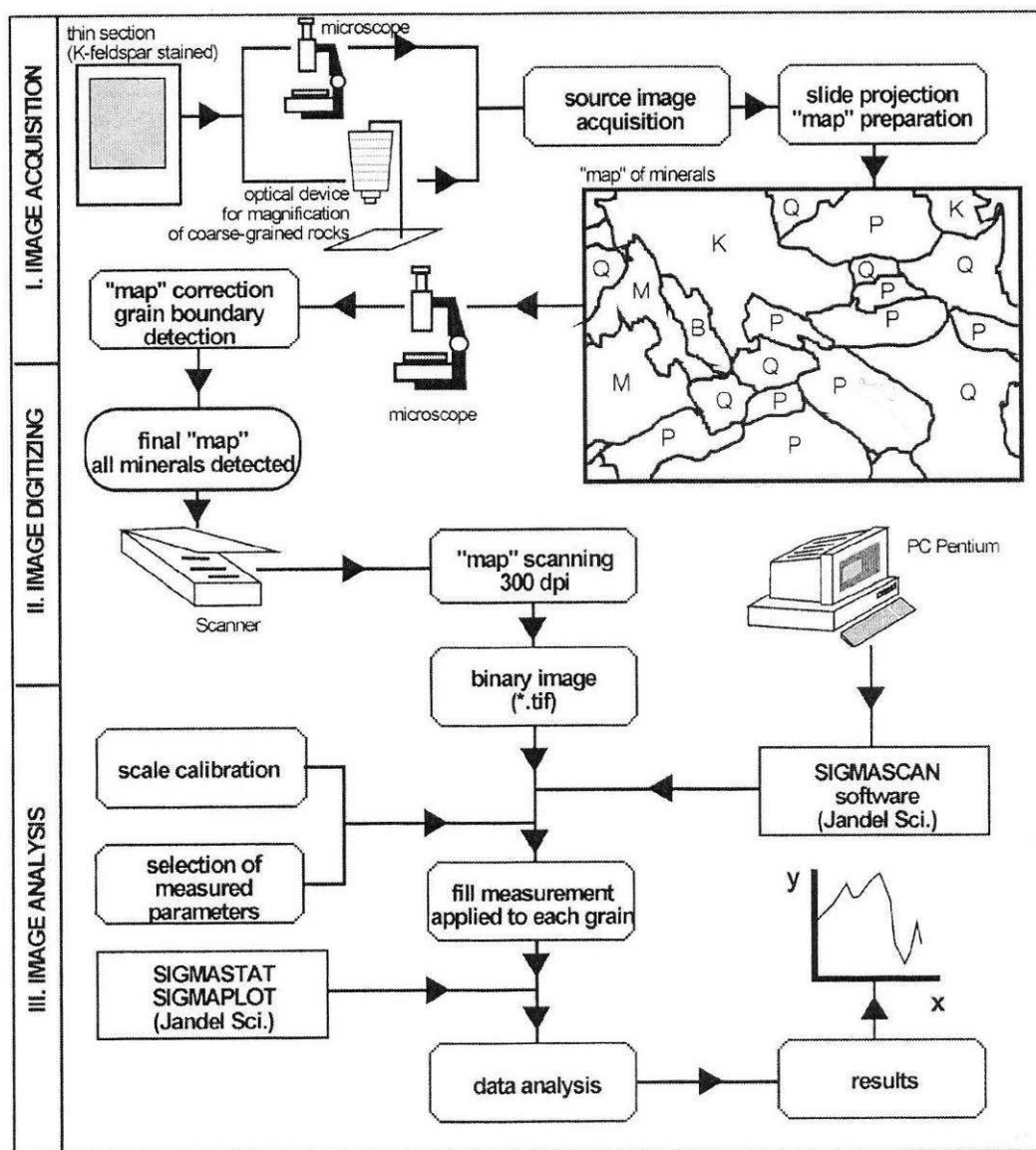
3.6.1. Optimalizace přípravy digitálních snímků pro kvantitativní analýzu

Pro účely kvantifikace jevů, spojených s porušením po úderu razníku Schmidtova kladiva, bylo nutno upravit snímky tak, aby studované objekty (klasty) byly jednoznačně odlišeny od pozadí a od jevů, které s nimi nesouvisí. Nejprve byl proveden pokus upravit kontrast pomocí počítačového programu Adobe Photoshop CS5. Vzhledem k těsnému kontaktu řady objektů (klastů) a z něj vyplývajícimu malému barevnému kontrastu však tento postup nebyl úspěšný.

Další variantou bylo „vyřezání“ zrn z fotografie opět pomocí počítačového programu Adobe Photoshop CS5 nástrojem „magická tužka“. I zde se však vyskytl problém s těsně sousedícími objekty, které nástroj neuměl oddělit ani po výrazném zvýšení kontrastu mezi pórovým prostorem a samotnými klasty. Dodatečné manuální úpravy ořezů by byly časově neúnosné kvůli vysokému počtu analyzovaných objektů (přibližně 500 v každém výbrusu).

3.6.2. Pracovní postup kvantitativní analýzy

Vzhledem k nemožnosti provést přípravu digitálních snímků postupy, popsány v předchozí kapitole, byl pro přípravu podkladů pro kvantitativní analýzu použit postup, popsany Příkrylem (2001, 2006). Postup přípravy podkladů byl součástí systému analýzy obrazu, který zahrnoval tři dílčí kroky (Obr. 4).



Obr. 4. Postup měření geometrických parametrů pomocí počítačové analýzy obrazu (Příkryl 2001).

Vlastní příprava podkladů spočívala v ručním vymezení hranic objektů (v tomto případě klastů) pomocí tenkého permanentního fixu na hladké průhledné kancelářské folii, pod níž byla umístěna vytištěná fotografie. Podklad byl opětovně digitalizován a uložen jako 8-bitový obrázek (ve stupních šedi). Objekty, uložené v získaném souboru, měly dostatečný barevný kontrast v podobě černého obvodu vůči bílé vnitřní ploše.

Vlastní měření objektů bylo provedeno pomocí počítačového programu SigmaScan®Pro (v. 5.0.0, SPSS Inc.). V případě klastů v neporušených částech hornin a rozdrčených klastů v porušené zóně byla měřena jejich plocha, délka dlouhé a krátké osy a délka obvodu. Z těchto parametrů byla poté

vypočtena velikost klastů, vyjádřená pomocí tzv. ekvivalentního průměru, poměr krátké a dlouhé osy, kompaktnost a tvarový faktor (Tab. 3). Srovnání ekvivalentního průměru klastů v porušené a neporušené zóně sloužilo vyjádření míry redukce jejich velikosti. Tvarové parametry umožnily stanovit změnu tvaru klastů. Získaná data byla dále zpracována a vyhodnocena v tabulkovém editoru Microsoft Office Excel 2007.

Tab. 3. Parametry vnitřní stavby hornin (resp. klastů) studované pomocí počítačové analýzy obrazu v horninových výbrusech (převzato z Příkryla 2006).

Parametr vnitřní stavby hornin	Vzorec	Jednotky	Definice
Ekvivalentní průměr (D_{equiv})	$D_{equiv} = \sqrt{\frac{4A_i}{\pi}}$	mm	Průměr objektu kruhového průřezu, který má v daném průřezu stejnou plochu (A_i) jako analyzované zmo nepravidelného tvaru
Poměr os (AR)	$AR = \frac{D_{min}}{D_{max}}$	-	Poměr mezi krátkou (D_{min}) a dlouhou (D_{max}) osou analyzovaného objektu
Kompaktnost (C)	$C = \frac{L_p^2}{A_i}$	-	Odchylka tvaru analyzovaného objektu od kružnice (objekt má obvod (L_p) a plochu (A_i))
Tvarový faktor (SF)	$SF = \frac{4 \cdot \pi \cdot A_i}{L_p^2}$	-	Kruhovitost průřezu studovaného objektu s obvodem (L_p) a plochou (A_i)

4. VÝSLEDKY

4.1. Petrografie studovaných hornin

KM-ZE – arkózový pískovec až arkóza s převážně jílovito-křemičitým pojivem. Makroskopicky klastická sedimentární hornina šedobéžové barvy.

KM-ZE1 – křemenný pískovec s jílovou základní hmotou. Makroskopicky klastická sedimentární hornina šedobílé barvy, bez znatelné sedimentární vrstevnatosti.

KM-ZE2 – křemenný pískovec s železitým tmelem. Makroskopicky klastická sedimentární hornina s hojným tmelem tvořeným Fe-oxyhydroxydy, které dodávají rudohnědé zbarvení. Na makrovzorku dobře patrná proměnlivá velikost zrn (gradační zvrstvení).

KO-S a KO-M – křemenný pískovec s převážně SiO₂ pojivem, lokalita Kocbeře. Makroskopicky klastická sedimentární hornina šedobílé barvy, na makrovzorku dobře patrná proměnlivá velikost zrn (gradační zvrstvení).

Detailní makroskopické i mikroskopické petrografické charakteristiky hornin jsou uvedeny v příloze I.

4.2. Odrazová tvrdost

Odrazová tvrdost zkoumaných vzorků pískovců se pohybuje ve značném rozpětí hodnot od R = 16,5 do R = 46,5. Z výsledků měření vyplývá, že velkého rozpětí hodnot bylo dosaženo nejen mezi jednotlivými studovanými typy pískovců, ale též pro jednotlivá měření na jednom typu pískovců a při stejném počtu úderů (Tab. 4). Významné rozdíly byly zaznamenány též pro stejný typ materiálu při různém počtu úderů v jednotlivých měřících bodech (Tab. 4).

4.3. Makro a mikroskopická pozorování povrchu hornin po dopadu razníku Schmidtova kladiva

4.3.1. Makroskopická pozorování povrchu hornin po dopadu razníku Schmidtova kladiva

Již po prvním dopadu razníku Schmidtova kladiva, resp. po odejmutí nástroje, byly na povrchu horniny pozorovatelné makroskopicky zřetelné známky poškození. V místě dopadu razníku vznikla stopa, resp. drobná prohlubeň přibližně kruhového tvaru (tvar prohlubně kopíroval tvar razníku Schmidtova kladiva).

V případě opakovaného zkoušení v jednom bodě, tedy s přibývajícím počtem úderů do jednoho místa, se jev dále vyvíjel. Po několika úderech se povrch horniny značně drtil. Prohlubeň, vniklá na povrchu, byla vyplněna jemným nadrceným materiálem, který bylo možné seřít prstem. Při zkušebních úderech, vedených k povrchu orientovanému ve svislém směru, pak u této nadrcené frakce docházelo k samovolnému odsypávání ze vzorku. V případě zkoušení odrazové tvrdosti ve vedlejším zkušebním bodě pak ráz Schmidtova kladiva způsobil zvýšení osypu materiálu. Na povrchu horniny poté zůstala prohlubeň (kráter) s hrubým povrchem. Velikost prohlubně závisela na počtu úderů a také na přesnosti přiložení razníku k povrchu horniny. Parametry poškození byly detailně zkoumány a kvantifikovány při mikroskopických pozorováních.

4.3.2. Mikroskopická pozorování

Mikroskopické studium výbrusů, zhotovených v řezech přes střed dopadu razníku (kolmo k povrchu horniny, viz Obr. 3) prokázalo přítomnost četných jevů, které dokládají nevratné změny vnitřní horninové stavby. Tyto jevy lze souhrnně popsat jako:

1) vznik drobné prohlubně (tzv. kráteru), jejíž hloubka (tj. rozdíl mezi původním povrchem horniny a

nejhlubším místem dna kráteru) nepřesahuje 0,6 mm;

2) vznik rozsáhlé zóny drcení a praskání klastických zrn pod dnem kráteru;

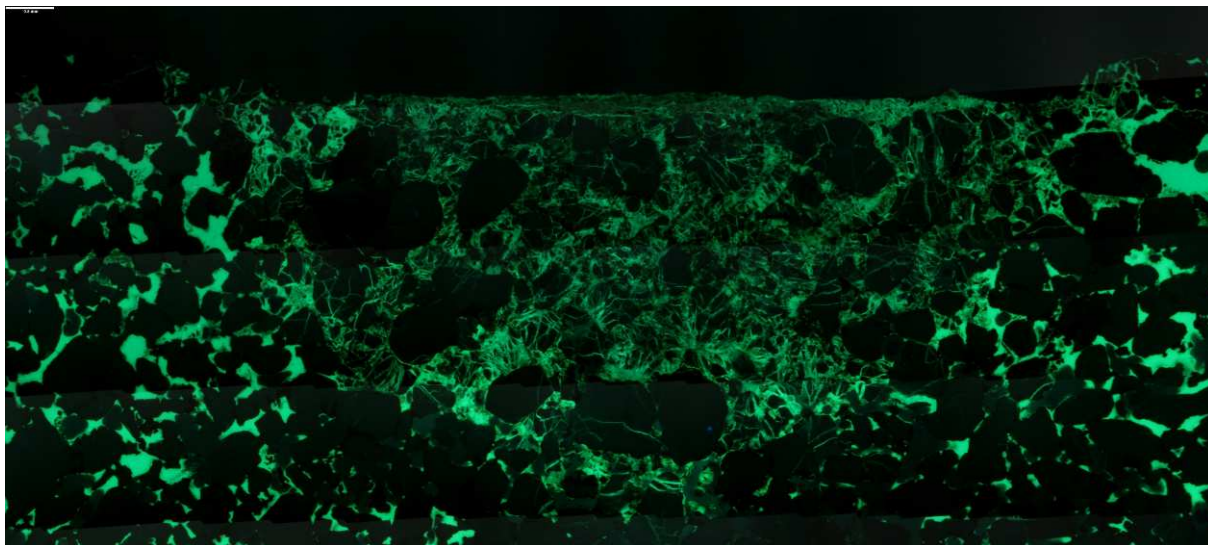
3) příležitostná tvorba mikrotrhlin, vybíhajících paprscitě ze zóny drcení.

Součástí mikroskopického popisu bylo zhotovení fotografické dokumentace.

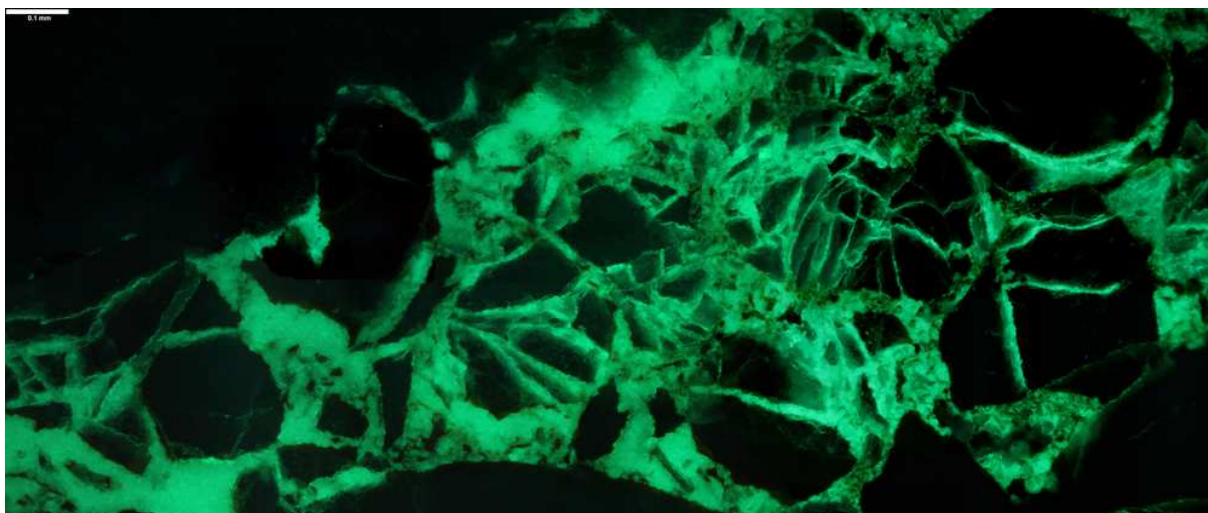
Tab. 4. Vyhodnocení hodnot odrazové tvrdosti (R) zjištěné Schmidovým kladivem typu N.

Označení vzorku	R				počet úderů	počet měřicích míst
	minimum	střední hodnota	maximum	rozdíl mezi minimální a maximální hodnotou		
KM-ZE	30,7	33,5	44	13,3	1	5
	36	37,6	40,7	4,7	2	4
	40,2	40,7	43	2,8	3	3
	41,2		45	3,8	4	2
		39,8			5	1
KM-ZE1	38,5	40,2	41,7	3,2	1	5
	40,5	43,75	47,5	7,0	2	4
	42,5	44,7	46,5	4,0	3	3
	46,5		48,2	1,7	4	2
		45			5	1
KM-ZE2	30,5	33,75	34,1	3,6	1	4
	31,9	39,5	40,5	8,6	2	3
	35,8		36,5	0,7	3	2
		39,2			4	1
KO-S	16,5	22,5	25,5	9,0	1	7
	17	24,6	27,8	10,8	2	6
	20	26,2	28,2	8,2	3	5
	24,2	26,5	27,8	3,6	4	4
	24,1	27	27,8	3,7	5	3
	26,5		26,8	0,3	6	2
		26,1			7	1
KO-M	19	22,5	25,8	6,8	1	7
	21,8	24,15	27	5,2	2	6
	21,9	25,2	27	5,1	3	5
	25	25,5	27,8	2,8	4	4
	24,2	25,9	27,7	3,5	5	3
	24		28	4,0	6	2
		23,8			7	1

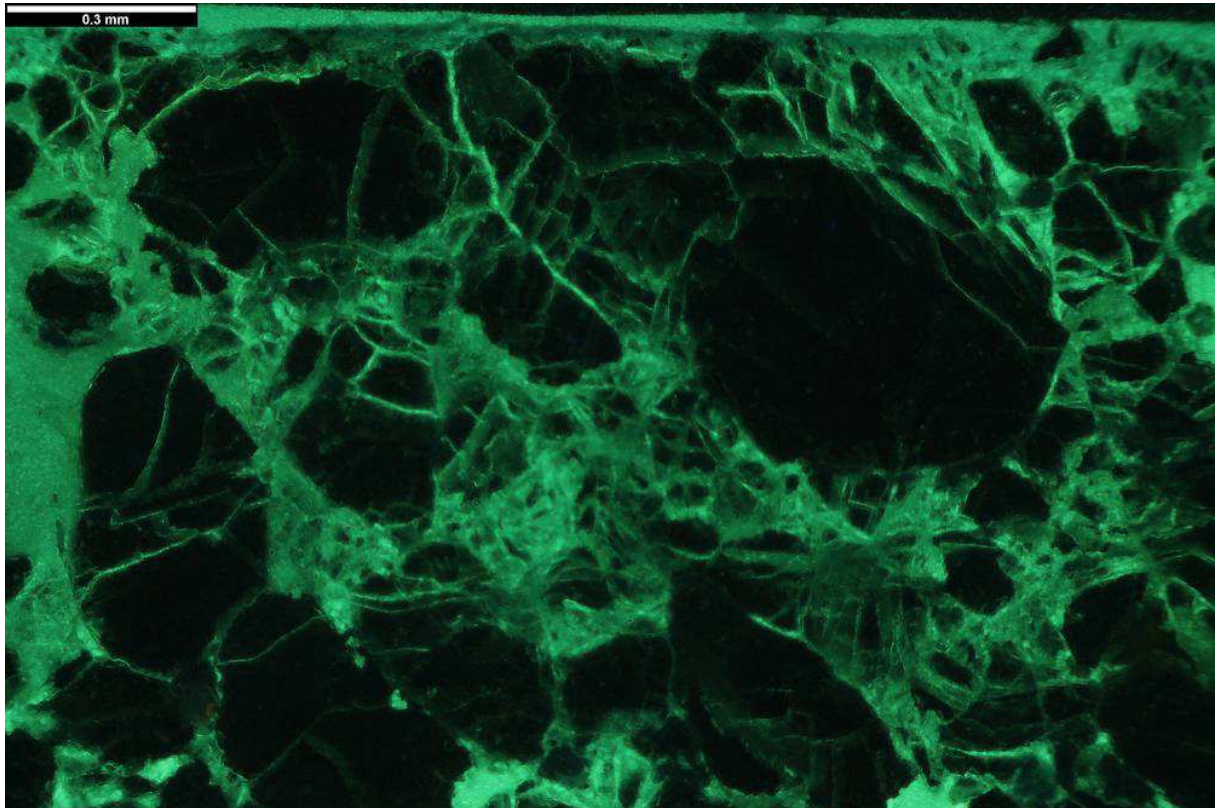
Z mikroskopických pozorování je patrný průběh poškození horniny po úderu razníku Schmidova kladiva (Obr. 5). Na povrchu horniny je vytvořena drobná deprese, pod jejím povrchem nadrcená zrna, dále zrna rozpraskaná (tyto zóny se poměrně široce prolínají (Obr. 6), ukázalo se, že míra nadrcení/rozpraskání záleží na velikosti a orientaci zrna – Obr. 7 a Obr. 8), jejich destrukce s hloubkou klesá. Z drcené zóny případně vybíhá systém mikrotrhlin (Obr. 9).



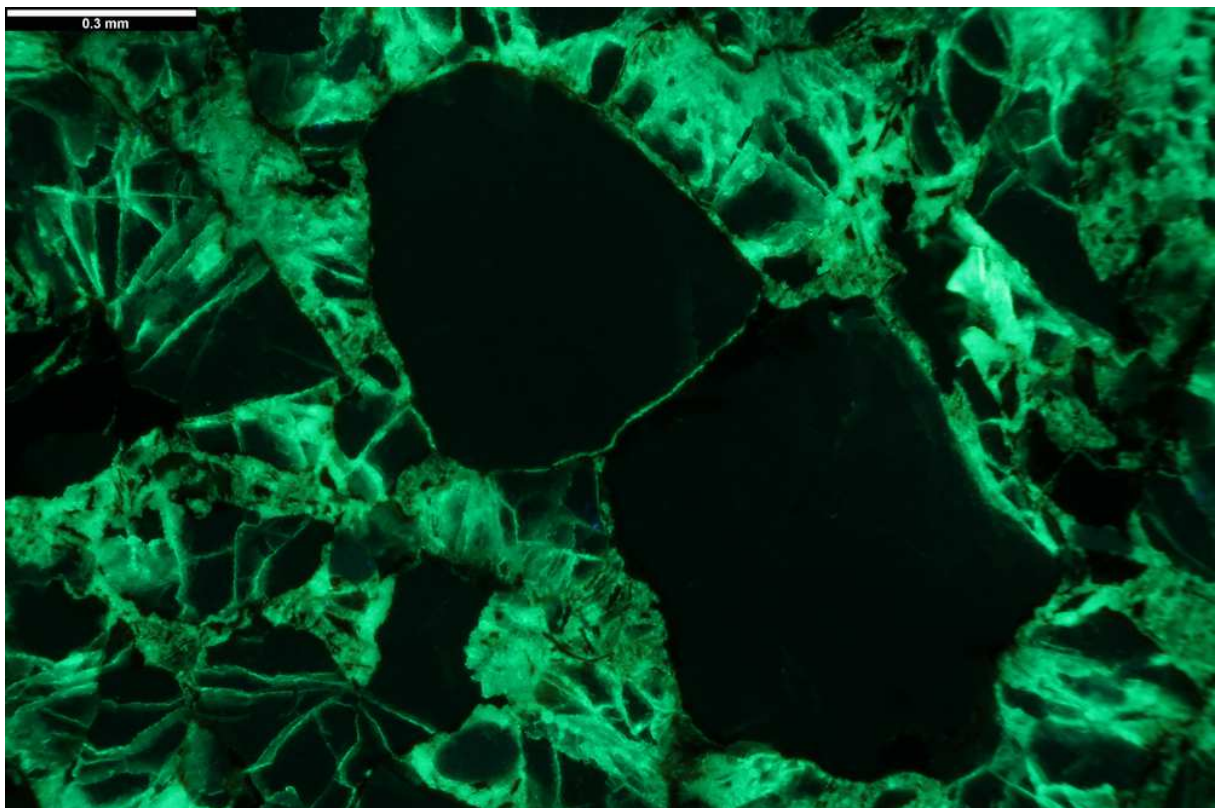
Obr. 5. Celkový pohled na rozsah drcené zóny v křemenném pískovci s železitým tmelem (vzorek KM-ZE2, po 4 úderech Schmidtovým kladivem). Na snímku je patrná deprese oproti původnímu povrchu (kráter) a také vývoj drcené zóny, v níž zůstávají ojedinělé neporušené původní klasty. Měřítka v levém horním rohu označuje délku 0,5 mm.



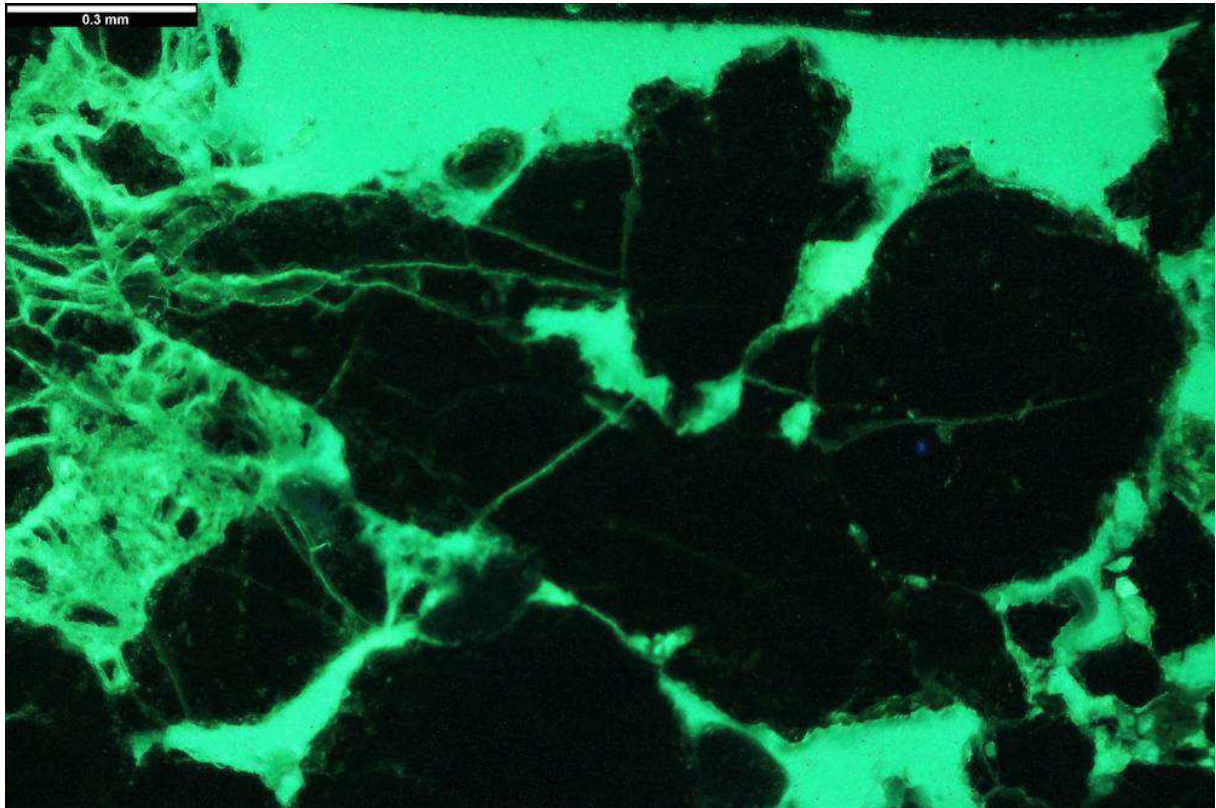
Obr. 6. Detail okraje kráteru v křemenném pískovci s železitým tmelem (vzorek KM-ZE2, po 4 úderech Schmidtovým kladivem). Na snímku je patrný přechod z drcené zóny při povrchu kráteru k rozpraskaným zrnům (pravý okraj snímku). Měřítka v levém horním rohu označuje délku 0,1 mm.



Obr. 7. Detail přechodu mezi zcela nadrcenými zrny a rozpraskanými zrny v křemenném pískovci s SiO_2 pojivem (vzorek KO-M, po 4 úderech Schmidtovým kladivem, vzorek zkoušen v navlhčeném stavu). Měřítko v levém horním rohu označuje délku 0,3 mm.



Obr. 8. Detail dvou neporušených křemenných klastů v jinak zcela rozdrčené hornině dokumentuje, že míra destrukce zrn souvisí s jejich velikostí, tvarem a orientací. Křemenný pískovec s železitým tmelem (vzorek KM-ZE2, po 5 úderech Schmidtovým kladivem). Měřítko v levém horním rohu označuje délku 0,3 mm.

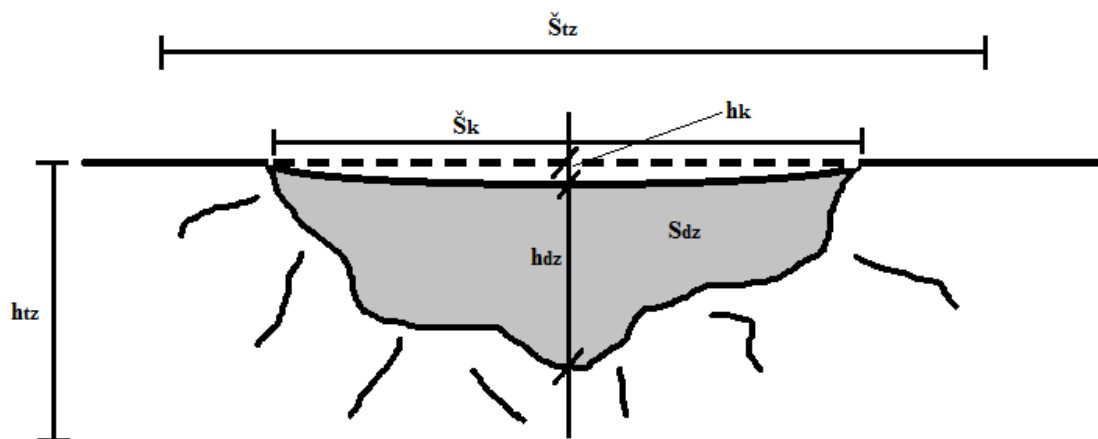


Obr. 9. Mikrotrhliny vybíhající z kráteru v křemenném pískovci s SiO_2 pojivem (vzorek KO-M, po 7 úderech Schmidtovým kladivem, vzorek zkoušen v navlhčeném stavu). Měřítko v levém horním rohu označuje délku 0,3 mm.

4.4. Kvantifikace poruch v místě dopadu razníku Schmidtova kladiva

4.4.1. Rozsah poruch

Po zhotovení základního mikroskopického popisu všech zkoumaných vzorků a fotografické dokumentace jevů v místě dopadu razníku Schmidtova kladiva, byl načrtnut obecný model porušení horniny a vymezeny základní parametry poškození (Obr. 10). Celkový rozsah poruch v důsledku použití Schmidtova kladiva byl hodnocen pomocí (1) šířky a hloubky kráteru, (2) rozsahu drcené zóny (maximální hloubka, plocha), (3) šířkou a hloubkou zóny porušené trhlinami, tak jak jsou znázorněny na obecném modelu porušení (Obr. 10).



- Štz - šířka zóny porušení mikrotrhlinami
- htz - hloubka zóny porušení mikrotrhlinami
- Šk - šířka kráteru
- hk - hloubka kráteru
- hdz - hloubka drcené zóny
- Sdz - plocha drcené zóny

Obr. 10. Schematické znázornění porušené zóny pod povrchem horniny po dopadu (dopadech) razníku Schmidtova kladiva a popis měřených veličin v porušené zóně.

Šířku a hloubku kráteru a rozsah drcené zóny bylo možné zaznamenat u všech studovaných vzorků (Tab. 5). Naopak přítomnost mikrotrhlin, vybíhajících z drcené zóny do jinak neporušené horniny, byla zaznamenána pouze v osmi výbrusech z celkem dvaceti osmi studovaných. U těchto mikrotrhlin byl zaznamenán jejich počet a byla měřena jejich délka (Tab. 6).

Tab. 5. Míra poškození studovaných hornin v souvislosti s aplikací Schmidtova kladiva typu N. Označení veličin je stejné jako na Obr. 10.

Vzorek	\check{S}_k (mm)	h_k (mm)	h_{dz} (mm)	S_{dz} (mm ²)	\check{S}_{tz} (mm)	h_{tz} (mm)	h_{cp} (mm)
KM-ZE 1	5,331	0,313	1,845	13,364	7,899		2,756
KM-ZE 2	9,765	0,362	3,646	30,337	10,850		4,007
KM-ZE 3	11,342	0,246	3,631	21,154	11,342		3,877
KM-ZE 4	9,664	0,405	3,487	21,315	9,664		3,892
KM-ZE 5	10,257	0,391	3,957	26,690	10,257		4,348
KM-ZE1-1	6,650	0,231	2,209	9,369	6,650		2,441
KM-ZE1-2	7,907	0,405	3,039	15,656	7,907		3,444
KM-ZE1-3	10,173	0,275	2,915	23,115	10,173		3,190
KM-ZE1-4	11,329	0,405	3,161	26,676	11,329		3,566
KM-ZE1-5	12,125	0,304	3,319	25,990	12,125		3,623
KM-ZE2-1	7,393	0,159	2,156	14,647	8,608		2,728
KM-ZE2-2	9,094	0,500	2,645	14,455	9,094		3,145
KM-ZE2-3	7,742	0,536	4,130	18,083	8,875		4,389
KM-ZE2-4	10,271	0,434	4,558	34,093	10,271		4,993
KM-ZE2-5	11,660	0,347	4,340	36,232	11,660		4,687
KO-S 1	5,935	0,217	2,147	6,710	5,935		2,363
KO-S 2	5,225	0,109	1,450	4,227	5,623		1,705
KO-S 3	7,559	0,477	2,423	7,313	7,559		2,901
KO-S 4	7,074	0,297	2,379	5,711	7,074		2,676
KO-S 5	6,401	0,275	2,293	8,786	6,401		3,074
KO-S 6	7,074	0,405	2,423	7,732	7,074		2,828
KO-S 7	10,317	0,362	3,863	18,063	10,317		4,224
KO-M 1	6,749	0,138	2,134	6,500	6,828		2,923
KO-M 2	6,669	0,189	2,525	9,358	6,669		2,713
KO-M 4	7,458	0,130	2,807	9,840	7,458		2,937
KO-M 5	5,823	0,108	1,982	4,903	6,011		2,886
KO-M 6	7,071	0,087	2,500	9,901	7,071		2,587
KO-M 7	7,429	0,203	2,836	12,295	8,528		3,436

Tab. 6. Počet pozorovaných mikrotrhlin. Jejich maximální délky, minimální délky a střední hodnoty délky.

vzorek	počet trhlin	minimum (mm)	střední hodnota (mm)	maximum (mm)
KM-ZE 1	7	0,201	0,312	0,641
KM-ZE2-1	9	0,172	0,376	0,975
KM-ZE2-3	7	0,173	0,349	0,453
KO-S 2	9	0,205	0,283	0,684
KO-S 5	6	0,210	0,343	0,557
KO-M 1	4	0,159	0,298	0,353
KO-M 5	4	0,325	0,458	0,699
KO-M 7	12	0,189	0,372	0,983

4.4.2. Zrnitostní charakteristika klastů v drcených zónách

V každé ze zkoušených hornin byla provedena zrnitostní analýza založená na stanovení ekvivalentních průměrů klastů. Ekvivalentní průměry vyjadřují velikost jednotlivých klastů. Pomocí této veličiny je možné sledovat redukci velikosti klastů podle měnícího se počtu úderů a také oproti výchozí neporušené hornině (Tab. 7). Hodnoty pro výchozí horninu jsou sečteny z hodnot získaných z výbrusů drcených zón. Data pro výchozí horninu byla vždy získána v okrajových částech výbrusu, do kterých nezasáhlo poškození. Protože ale tyto oblasti byly mnohem menších rozsahů než drcené zóny, byly sečteny. Jinak by totiž počet klastů hodnocených ve výchozí hornině byl výrazně nižší než v drcených zónách. Hodnoty pro výchozí horninu v této podobě reprezentují větší plochu neporušené horniny a navíc zachycují hodnoty ze všech částí horniny, které byly zkoumány z hlediska porušení a zachycují tak lépe její celkový charakter.

Tab. 7. Počet objektů (klastů) vyhodnocených pomocí počítačové analýzy obrazu.

vzorek	KM-ZE	KM-ZE1	KM-ZE2	KO-S	KO-M
	počet analyzovaných objektů				
neporušená hornina	420	1460	483	1418	1471
1 úder	234	399	483	450	320
2 údery	488	751	522	455	545
3 údery	413	732	323	575	
4 údery	585	838	631	243	498
5 úderů	722	1027	633	710	441
6 úderů				633	766
7 úderů				818	743

Naměřené hodnoty ekvivalentních průměrů byly dále zpracovány a byly z nich stanoveny kvantitativní údaje: minimální, střední a maximální hodnoty (Tab. 8), dále medián, 25% a 75% kvartil a směrodatná odchylka (Příloha IV).

Tab. 8. Přehled minimálních, maximálních a průměrných hodnot ekvivalentních průměrů v drcených zónách a ve výchozích horninách.

	neporušená hornina	počet úderů Schmidtova kladiva						
		1	2	3	4	5	6	7
KM-ZE								
Minimum	0,005	0,011	0,017	0,013	0,010	0,006		
Průměr	0,224	0,151	0,142	0,126	0,085	0,095		
Maximum	1,089	0,822	0,805	0,671	1,124	0,594		
KM-ZE1								
Minimum	0,010	0,008	0,004	0,008	0,012	0,009		
Průměr	0,143	0,084	0,069	0,084	0,078	0,061		
Maximum	0,416	0,445	0,437	0,381	0,304	0,337		
KM-ZE2								
Minimum	0,007	0,008	0,005	0,010	0,007	0,010		
Průměr	0,241	0,094	0,092	0,133	0,132	0,124		
Maximum	1,140	0,935	0,769	0,983	1,190	1,132		
KO-S								
Minimum	0,010	0,005	0,003	0,004	0,009	0,006	0,005	0,006
Průměr	0,167	0,070	0,048	0,058	0,080	0,058	0,052	0,071
Maximum	0,786	0,539	0,299	0,570	0,675	0,385	0,399	0,603
KO-M								
Minimum	0,006	0,007	0,009	X	0,006	0,003	0,004	0,006
Průměr	0,156	0,076	0,082	X	0,082	0,062	0,060	0,067
Maximum	0,702	0,353	0,471	X	0,518	0,707	0,573	0,907

4.4.3. Tvarové parametry klastů v drcených zónách

V drcených zónách hornin byly kromě zrnitostních charakteristik zkoumány také geometrické tvarové parametry klastů. Konkrétně se jednalo o kompaktnost klastů, jejich tvarových faktor a o poměr dlouhé osy klastů ku jejich krátké ose. Všechny tyto parametry vyjadřují míru protažení nebo zaoblení zrna, ale každý z poněkud jiného hlediska. Více bude tato problematika vysvětlena v diskusi. Stejně jako u zrnitostních charakteristik byly i u geometrických parametrů klastů zpracovány kvantitativní údaje (Tab. 9, Tab. 10 a Tab. 11, Příloha IV).

Tab. 9. Přehled minimálních, průměrných a maximálních hodnot kompaktnosti v neporušené hornině a v drcených zónách.

	neporušená hornina	počet úderů Schmidtova kladiva						
		1	2	3	4	5	6	7
KM-ZE								
Minimum	14,288	13,033	13,028	11,725	8,000	8,000		
Průměr	24,186	25,011	24,960	23,173	22,870	22,025		
Maximum	91,180	91,906	121,485	73,027	250,346	83,601		
KM-ZE1								
Minimum	14,488	13,020	8,000	8,000	8,000	8,000		
Průměr	27,808	23,564	24,608	22,677	21,874	19,683		
Maximum	113,519	229,154	265,308	80,930	70,450	65,433		
KM-ZE2								
Minimum	13,490	8,000	8,000	10,892	8,000	8,000		
Průměr	25,625	29,356	27,396	27,301	27,018	25,429		
Maximum	93,407	231,776	97,617	78,013	190,979	81,837		
KO-S								
Minimum	14,218	8,000	8,000	8,000	11,800	10,286	8,000	8,000
Průměr	24,598	22,957	23,935	21,855	22,711	21,113	21,158	21,764
Maximum	83,156	101,815	60,075	56,216	96,408	62,429	59,026	87,803
KO-M								
Minimum	14,751	9,771	12,166	X	8,000	8,000	8,000	8,000
Průměr	23,018	23,187	22,131	X	22,243	23,332	22,716	21,630
Maximum	239,515	99,957	79,312	X	92,167	80,128	86,744	60,319

Tab. 10. Přehled minimálních, maximálních a průměrných hodnot tvarových faktorů v drcených zónách a ve výchozích horninách.

	neporušená hornina	počet úderů Schmidtova kladiva						
		1	2	3	4	5	6	7
KM-ZE								
Minimum	0,138	0,137	0,103	0,172	0,050	0,150		
Maximum	0,880	0,964	0,965	1,072	1,571	1,571		
Průměr	0,574	0,551	0,560	0,589	0,619	0,623		
KM-ZE1								
Minimum	0,111	0,055	0,047	0,155	0,178	0,192		
Maximum	0,867	0,965	1,571	1,571	1,571	1,571		
Průměr	0,504	0,586	0,566	0,602	0,623	0,676		
KM-ZE2								
Minimum	0,135	0,024	0,129	0,161	0,066	0,154		
Maximum	0,932	4,725	1,571	1,154	1,571	1,571		
Průměr	0,536	0,457	0,534	0,528	0,554	0,553		
KO-S								
Minimum	0,151	0,123	0,209	0,224	0,130	0,201	0,213	0,143
Maximum	0,884	1,571	1,571	1,571	1,065	1,222	1,571	1,571
Průměr	0,552	0,597	0,576	0,617	0,600	0,640	0,638	0,627
KO-M								
Minimum	0,052	0,126	0,158	X	0,136	0,157	0,145	0,208
Maximum	0,852	1,286	1,033	X	1,571	1,571	1,571	1,571
Průměr	0,584	0,600	0,611	X	0,611	0,598	0,598	0,626

Tab. 11. Přehled minimálních maximálních a průměrných hodnot poměrů os klastů v drcených zónách a ve výchozích horninách.

	neporušená hornina	počet úderů Schmidtova kladiva						
		1	2	3	4	5	6	7
KM-ZE								
Minimum	1,033	1,030	1,000	1,000	1,000	1,000		
Průměr	1,737	2,157	2,164	2,163	2,410	2,276		
Maximum	4,950	7,831	10,932	10,104	14,577	10,156		
KM-ZE1								
Minimum	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		
Průměr	1,827	2,004	2,165	2,035	2,006	2,093		
Maximum	14,460	8,515	11,045	9,552	11,045	10,050		
KM-ZE2								
Minimum	1,031	1,000	1,000	1,000	1,028	1,000		
Průměr	1,795	2,462	2,481	2,315	2,197	2,336		
Maximum	6,034	9,055	16,125	15,133	9,055	11,045		
KO-S								
Minimum	1,002	1,000	1,000	1,000	1,062	1,000	1,000	1,000
Průměr	1,740	2,226	2,220	2,235	2,180	2,125	2,227	2,256
Maximum	6,383	10,012	9,633	8,809	6,620	12,042	11,045	12,358
KO-M								
Minimum	1,000	1,000	1,000	X	1,000	1,000	1,000	1,000
Průměr	1,730	2,277	2,044	X	2,039	2,234	2,299	2,209
Maximum	7,132	16,500	7,639	X	5,765	11,815	12,510	11,045

V parametru, který vyjadřuje poměr dlouhé osy klastu ku krátké ose klastu v některých případech nastala situace, ve které bylo nutné některé klasty z výsledků vyřadit (Tab. 12). Tyto klasty totiž měly kratší osy takové délky, která je pod rozlišovací schopností použitého počítačového programu, který tyto hodnoty označoval jako nulové. Ve výpočtech poměrů os tyto hodnoty nebyly pro stanovení poměru použitelné. Nejmenší délka osy, kterou používaný program ještě zaznamenal, činila 0,006 mm, vyřazeny tedy byly všechny klasty, které měly kratší osu menší délky.

Tab. 12. Počet klastů vyřazených z výzkumu poměrů dlouhé a krátké osy.

	KM-ZE	KM-ZE1	KM-ZE2	KO-S	KO-M
1	4	5	32	14	15
2	2	47	49	26	9
3	17	44	29	45	
4	68	31	26	9	17
5	46	84	39	36	26
6				59	43
7				54	42

Pro všechny uváděné parametry, ať již zrnitostní nebo geometrické byly získané hodnoty vyneseny také do histogramů. Histogramy byly zvoleny jako další prostředek, který umožňuje zobrazit vývoj jednotlivých sledovaných parametrů. Přehled vytvořených histogramů je v Příloze V.

5. DISKUSE

5.1. Problematika nedestruktivního charakteru zkoušení Schmidtovým kladivem na základě makroskopických pozorování

Již během vlastního měření odrazové tvrdosti pomocí Schmidtova kladiva bylo zjištěno, že tuto zkoušku nelze považovat za nedestruktivní, jak bývá uváděno v literatuře od zavedení této zkoušky do praxe (Schmidt 1951). Na možnost poškození zkoušené horniny Schmidtovým kladivem ostatně upozorňují některé z novějších studií (Viles et al. 2011), ale nepřinášejí žádné přímé důkazy.

Z pozorování, uskutečněných během zkoušení odrazové tvrdosti pískovců, vyplývá, že již po jednom úderu razníku Schmidtova kladiva vzniká na povrchu horniny okem pozorovatelné porušení. Po jednom úderu lze z povrchu horniny prstem setřít drobné úlomky, které vzniknou nadrcením povrchových nerovností horniny při dopadu razníku.

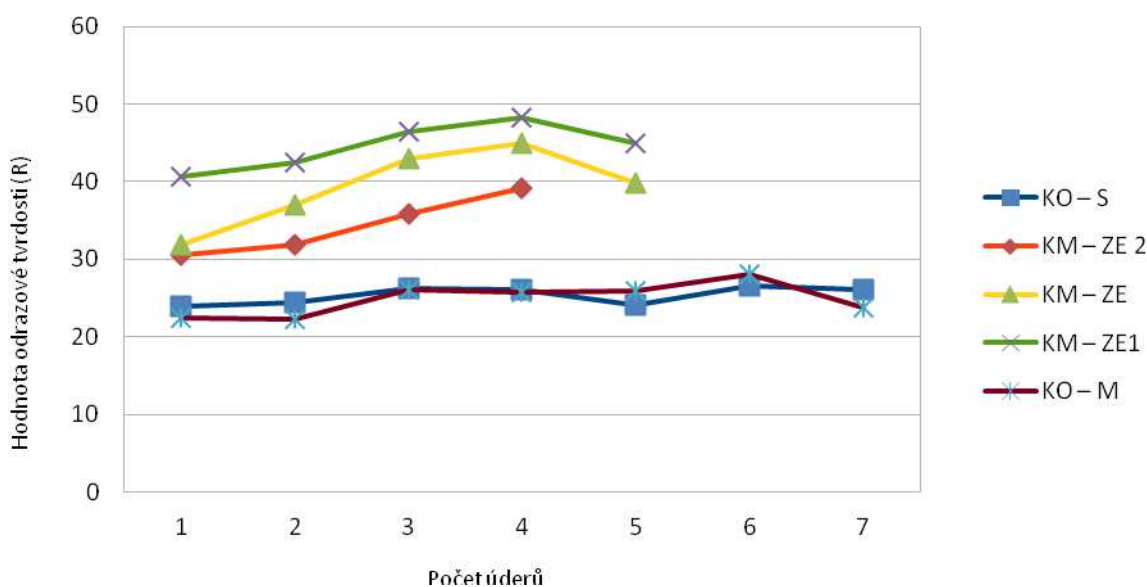
S rostoucím počtem úderů se potom tento jev prohlubuje. U zkoušky na svislém povrchu dosáhne dokonce porušení po více úderech takové úrovně, že při zkoušení ve vedlejším zkušebním místě (za dodržení požadované vzdálenosti zkušebních bodů) se odsypává materiál z předchozích zkušebních míst při každém rázu, který razník Schmidtova kladiva přenese na horninu. V těchto místech pak vznikají drobné vydrolené krátery s hrubým povrchem. Jejich hloubka byla později měřena při mikroskopických pozorováních. U vzorků, které prodělaly pět a více úderů v jednom místě je pak již v místě, kde byly úderý provedeny, patrný vytlačený kráter, který vzniká zhutněním nadrceného materiálu pod razníkem a tvar razníku věrně kopíruje. Vznikne tak jakýsi miskovitý útvar s jemně drcenými zrny. Opět není náročné dosáhnout odsypání tohoto nadrceného materiálu.

5.2. Hodnoty odrazové tvrdosti

Součástí zkoušení vzorků pomocí Schmidtova kladiva byl i zápis hodnot odrazové tvrdosti, které byly v jednotlivých zkušebních bodech naměřeny. Dle dostupné literatury (Amaral et al. 1999, Basu a Aydin 2004) by se tyto hodnoty měly s rostoucím počtem úderů chovat pravidelně a sice tak, že po prvních dvou úderech dochází k rozdrčení povrchu horniny a rozbití povrchových nerovností a hodnota odrazové tvrdosti klesá. S dalšími úderými se již nadrcená povrchová část zkoušené horniny naopak zpevní a působením tohoto jevu začnou hodnoty odrazové tvrdosti stoupat (Hucka 1965, Katz et al. 2000).

Zkoušky provedené v této práci tento jev potvrdily. U všech vzorků (až na vzorek v mokřém stavu viz dále) odrazová hodnota po dvou úderech poklesla a poté začala mírně stoupat. Další důležitý zlom ve vývoji hodnot nastal u čtvrtého úderu, kdy došlo k opětovnému poklesu hodnot odrazové tvrdosti (Obr. 11). Tento jev nastal u všech zkoušených hornin vyjma vzorku navlhčeného vodou.

Hodnota odrazové tvrdosti tohoto vzorku (navlhčeného vodou) vzrostla hned po dvou úderech a při třech úderech se dostala na hodnotu, která již zůstala s rostoucím počtem úderů neměnná. Tento jev lze vysvětlit vlivem vody v pórech horniny. Jejím působením dojde k mnohem rychlejšímu zhutnění povrchu horniny v místě úderu razníku Schmidtova kladiva a s rostoucím počtem úderů pak nedochází k většímu rozdrčení, které by umožnilo snížení hodnot odrazové tvrdosti. Zlom ve změně hodnot odrazové tvrdosti pak nastal při zkoušení sedmi úderými Schmidtovým kladivem do jednoho místa. V tomto případě náhle hodnota odrazové tvrdosti výrazně poklesla (Obr. 11).



Obr. 11. Změny hodnot odrazové tvrdosti (R) stanovené Schmidovým kladivem s rostoucím počtem úderů v jednom místě.

5.3. Mikroskopicky pozorovatelné porušení

5.3.1. Obecný charakter porušení

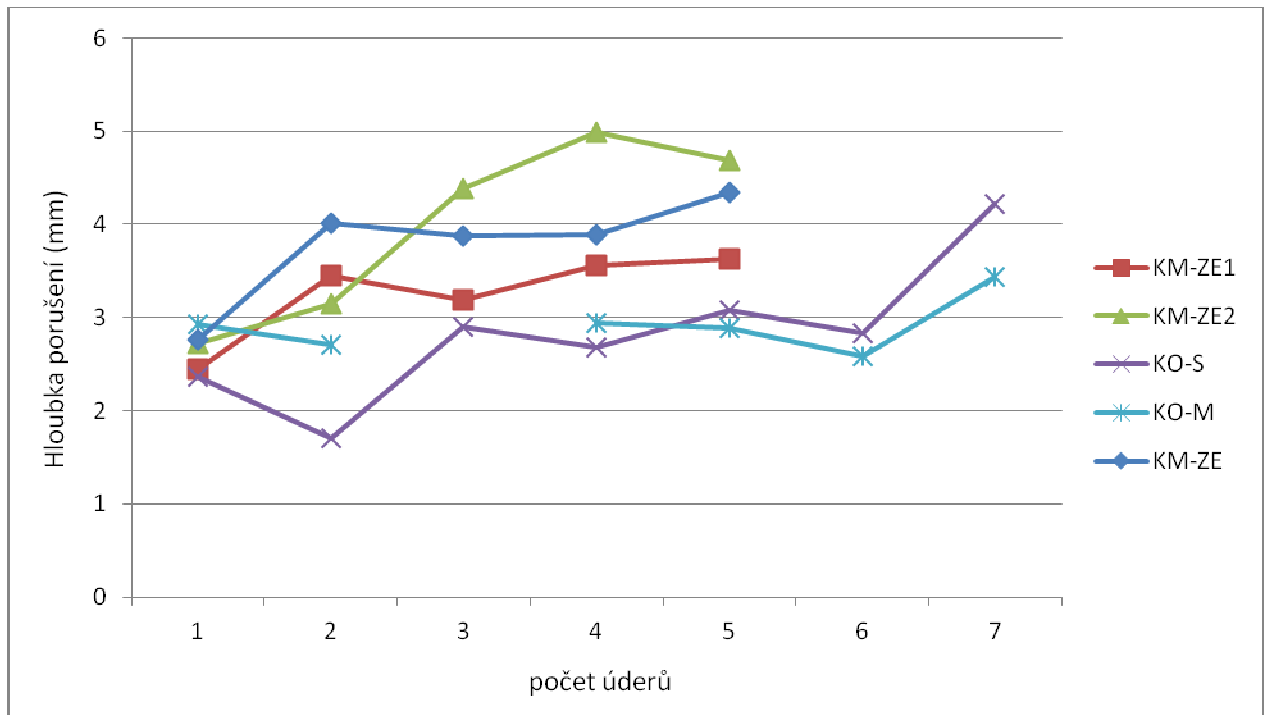
Mikroskopická pozorování ukázala, že dochází k tvorbě třech základních jevů, které potvrzují destruktivní charakter zkoušky Schmidovým kladivem pro studované typy hornin. Na povrchu pórovité horniny – pískovce *s.l.* – se po dopadu Schmidova kladiva vytvoří kráter, pod nímž se vytváří drcená zóna (tj. oblast s podrcenými klasty). Mikrotrhliny, které vybíhají z drcené zóny do jinak neporušené horniny jsou třetím jevem, který však byl zastížen jen v 8 z 28 pozorovaných výbrusů. V jednom vzorku se průměrně vyskytovaly 4 mikrotrhliny a jejich délka se pohybovala od 0,251 do 0,641 mm. Nejvíce patrným jevem, který byl pozorován během mikroskopického rozboru výbrusů zhotovených v řezech přes střed dopadu razníku (kolmo k povrchu horniny), byl rozvoj drcené zóny a případných mikrotrhlin.

5.3.2. Rozsah porušení

Prvním ze sledovaných parametrů v porušené zóně horniny byla hloubka vlastního porušení. Ta byla buď změřena pomocí příslušného počítačového programu, nebo byla z těchto měření vypočtena. V případě měřené hloubky porušení byla měřena vzdálenost mezi původním povrchem horniny a vzdálenost mezi nejhlubším místem, kam dosáhly mikrotrhliny, vybíhající z drcené zóny. Výpočet hloubky porušení byl prováděn u vzorků, u kterých z drcené zóny nevybíhaly žádné mikrotrhliny. Byla sečtena hloubka kráteru a hloubka drcené zóny a výsledkem je hodnota určující hloubku porušení oproti původnímu povrchu horniny. Druhá možnost, tedy výpočet hloubky porušení, byla častější. Stejný postup byl zvolen i u stanovení šířky porušené zóny.

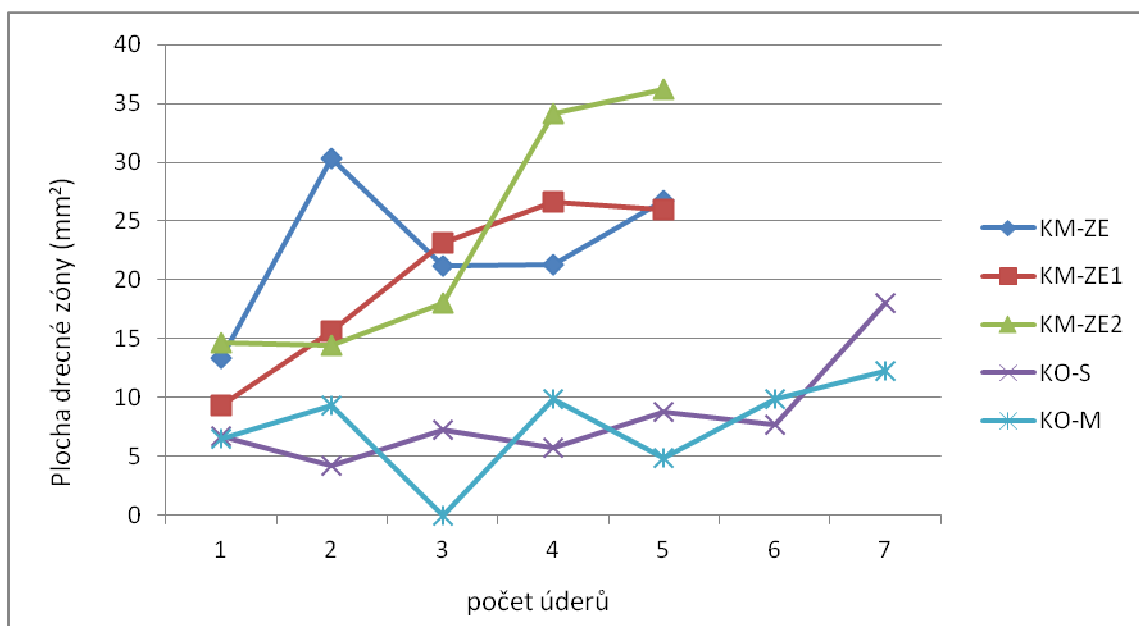
Ve třech z pěti případů (vzorky KM-ZE, KM-ZE2 a KO-S) se zvyšuje hloubka porušení s rostoucím počtem zkušebních úderů v jednom místě horniny (Obr. 12). U vzorků KM-ZE1 a KO-M (vzorek v mokřím stavu), se hloubky chovaly méně pravidelně (Obr. 12). U vzorku KO-M hodnota kolísala, u vzorku KM-ZE1 hodnota vzrostla, pak prudce poklesla a s dalšími údery (tedy třetí úder a více) pozvolna rostla. Lze tedy říci, že i u tohoto vzorku hloubka porušení horniny rostla se zvyšujícím se

počtem úderů až na výkyv po dvou úderech. U vzorku KO-M, porušeného třemi údery, se nepodařilo zhotovit potřebný výbrus.



Obr. 12. Změna mocnosti horniny s mikroskopicky pozorovatelnými poruchami, způsobenými razníkem Schmidta kladiva v závislosti na rostoucím počtem úderů Schmidtovým kladivem v jednom zkušebním bodu.

Dalším sledovaným jevem byla plocha drcené zóny v horninách. Plocha drcené zóny rovněž souvisí s počtem úderů a, až na výkyvy u některých vzorků, roste (Obr. 13).

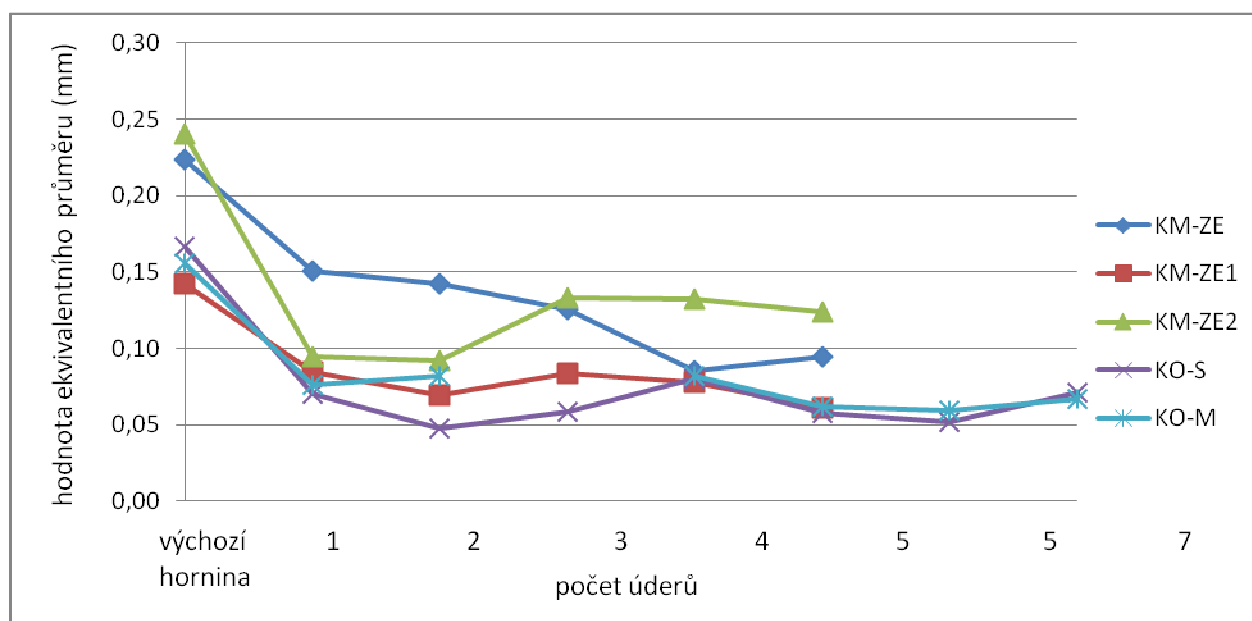


Obr. 13. Změna velikosti plochy plochy drcené zóny s rostoucím počtem úderů Schmidtovým kladivem v jednom zkušebním místě.

5.3.3. Změna velikosti zrn

Zrnitost (tj. velikost klastů) byla u zkoumaných vzorků popsána pomocí tzv. ekvivalentního průměru, který vyjadřuje velikost kruhu, jenž zaujímá stejnou plochu jako studované zrno nepravidelného průřezu (Příkryl 2006). Tento parametr by se měl logicky chovat tak, že v neporušené hornině budou jeho hodnoty nejvyšší (tj. klasty budou větší), a po úderu razníku Schmidtova kladiva a vzniku drcené zóny bude velikost klastů, resp. jejich reliktnů klesat. Dalším předpokladem bylo, že zdrobňování zrn bude souviset s počtem úderů razníku.

Z provedených měření vyplývá, že hodnoty ekvivalentního průměry skutečně oproti neporušené hornině poklesly ve všech případech (Obr. 14). První předpoklad byl tedy splněn a velikost klastů ve výchozí hornině je skutečně větší než velikost zrn v drcené zóně po úderu razníku Schmidtova kladiva. Druhý předpoklad, že s rostoucím počtem úderů se budou hodnoty ekvivalentního průměru dále snižovat, byl naplněn pouze částečně. Téměř u všech vzorků lze vysledovat nejméně jeden nárůst průměrné hodnoty ekvivalentního průměru oproti vzorku s nižším počtem úderů. Tento jev může souviset s přítomností několika mechanicky více odolných klastů a rychle postupující redukcí již dříve zdrobňelých klastů, z nichž se při více úderech Schmidtovým kladivem stávají úlomky natolik drobné, že nejsou oddělitelné jako samostatné objekty ani při běžném zvětšení optického mikroskopu, aby mohla být analyzována jejich velikost postupem, použitým v této práci.



Obr. 14. Velikost klastů, resp. jejich reliktnů, vyjádřená střední hodnotou ekvivalentního průměru v neporušené hornině a její změna v drcené zóně při rostoucím počtu úderů v jednom zkušebním bodě.

5.3.4. Tvarové parametry klastů

Ve výbrusech byly sledovány tři tvarové parametry klastů: kompaktnost, tvarový faktor a poměr dlouhé osy klastu ku jeho krátké ose. Všechny tyto parametry vyjadřují tvar klastů v hornině, ale každý vychází z odlišných charakteristik, jak bude vysvětleno dále.

Kompaktnost vyjadřuje tvar průřezu klastu. U kompaktnosti platí, že čím je její hodnota nižší, tím se tvar průřezu klastu blíží kruhu a čím je vyšší (tj. blíže nekonečnu), tím se průřez tvaru klastu blíží přímce. Pro tento parametr nebyla vyslovena žádná hypotéza, jak by se měly hodnoty chovat a vyvíjet, jako tomu bylo třeba u ekvivalentního průměru. Mělo se ovšem ukázat, jak se tvar klastů vyvíjí s rostoucí mírou porušení horniny, tedy s rostoucím počtem úderů do jednoho místa horniny.

U vzorku KM-ZE ležela průměrná hodnota kompaktnosti neporušené horniny mezi průměrnými U U vzorku KM-ZE ležela průměrná hodnota kompaktnosti neporušené horniny mezi průměrnými hodnotami kompaktnosti drcených zón po druhém a třetím úderu. Hodnoty kompaktnosti v této hornině pravidelně klesaly s rostoucím počtem úderů. Tento vývoj značí, že zpočátku byly klasty v drcené zóně spíše protaženější a postupným dalším drcením se stávaly více izometrickými. Původní klasty přitom byly, jak již bylo zmíněno, tvarově mezi těmito hodnotami.

Ve vzorku KM-ZE1 byla průměrná hodnota kompaktnosti neporušené horniny vyšší než průměrné hodnoty pro drcené zóny, v nichž hodnota kompaktnosti postupně klesala; s výjimkou vzorku po dvou úderech, kdy hodnota vzrostla. Opět je tedy patrný vývoj od protaženějších zrn k zrnům více izometrickým. Klasty ve výchozí hornině přitom byly výrazně protaženější než u drcených zón.

Ve vzorku KM-ZE2 byla průměrná hodnota kompaktnosti klastů v neporušené hornině nižší než u klastů z drcených zón. Průměrné hodnoty kompaktnosti v drcených zónách klesaly s rostoucím počtem úderů. Po pátém úderu pak průměrná hodnota kompaktnosti klesla pod hodnotu u neporušené horniny. Tyto výsledky naznačují, že se tvar klastů měnil od protaženějšího k více izometrickému, přičemž klasty v neporušené hornině byly spíše oválnějšího charakteru.

Ve vzorku KO-S byla průměrná hodnota kompaktnosti v neporušené hornině vyšší než v příslušných drcených zónách, avšak změna tvaru zrn s rostoucím počtem úderů nebyla nijak výrazná. Z hlediska tvarových parametrů si klasty téměř zachovaly svůj původní charakter. Pro vzorek KO-M, který byl zkoušen po navlhčení, byla průměrná hodnota kompaktnosti klastů v neporušené hornině přibližně stejná jako v příslušných drcených zónách. Hodnota kompaktnosti klastů v drcených zónách se ani při zvyšujícím se počtu úderů razníku výrazně neměnila. Vývoj kompaktnosti klastů pro tuto horninu v mokřem i v suchém stavu je tedy velmi podobný, od protaženějších klastů ve výchozí hornině k nepatrně více izometrickým v drcených zónách.

Dalším sledovaným parametrem zrnitosti charakteristiky byl tvarový faktor. Tvarový faktor vyjadřuje kruhovitosť průřezu klastu, tedy určuje, do jaké míry se průřez blíží kruhu (Příkryl 2006). Tvarový faktor nabývá hodnot od 0 do 1, přičemž 1 znamená dokonalý kruhový tvar.

Ve vzorcích KM-ZE a KM-ZE1 se průměrné hodnoty tvarového faktoru vyvíjely velmi podobně. Hodnota pro výchozí horninu byla vyšší než pro drcené zóny a v drcených zónách se tvarový faktor s rostoucím počtem úderů zvyšoval. Znamená to tedy, že klasty se po prvních úderech spíše protáhly a s rostoucím počtem úderů se vracely zpět k více tvarově izometrickým.

U vzorku KM-ZE2 se hodnoty tvarového faktoru pro výchozí horninu i pro drcené zóny pohybovaly na stejných hodnotách a nebyl pozorován zřejmý vývoj s rostoucím počtem úderů. Drcení klastů by u tohoto vzorku tedy nemělo žádný tvarový vývoj. Tvar klastů byl ve všech případech téměř stejný.

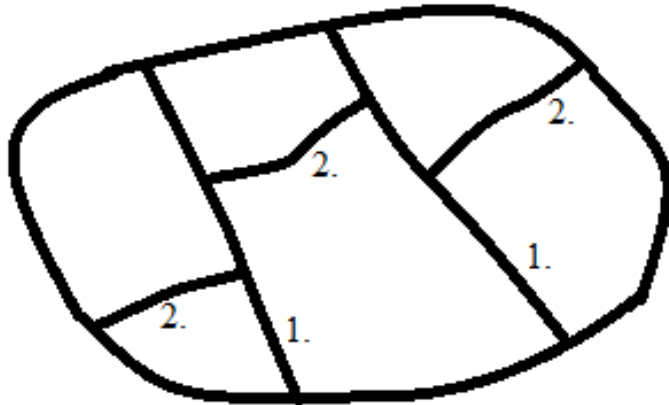
Stejný vývoj se ukázal i pro vzorky KO-S a KO-M. Výchozí hodnota tvarového faktoru byla u výchozí horniny nižší než u drcených zón, avšak vývoj s rostoucím počtem úderů nebyl zřejmý, hodnoty stále oscillovaly okolo podobné hodnoty. Opět tedy není pozorovatelný vývoj tvaru klastů s rostoucí mírou poškození horniny.

Třetím sledovaným jevem byl poměr dlouhé a krátké osy klastů. Poměr os vyjadřuje eliptičnost klastů (Příkryl 2006). Pro takto počítaný poměr os, že čím je jeho hodnota vyšší, tím je klast více protáhlý.

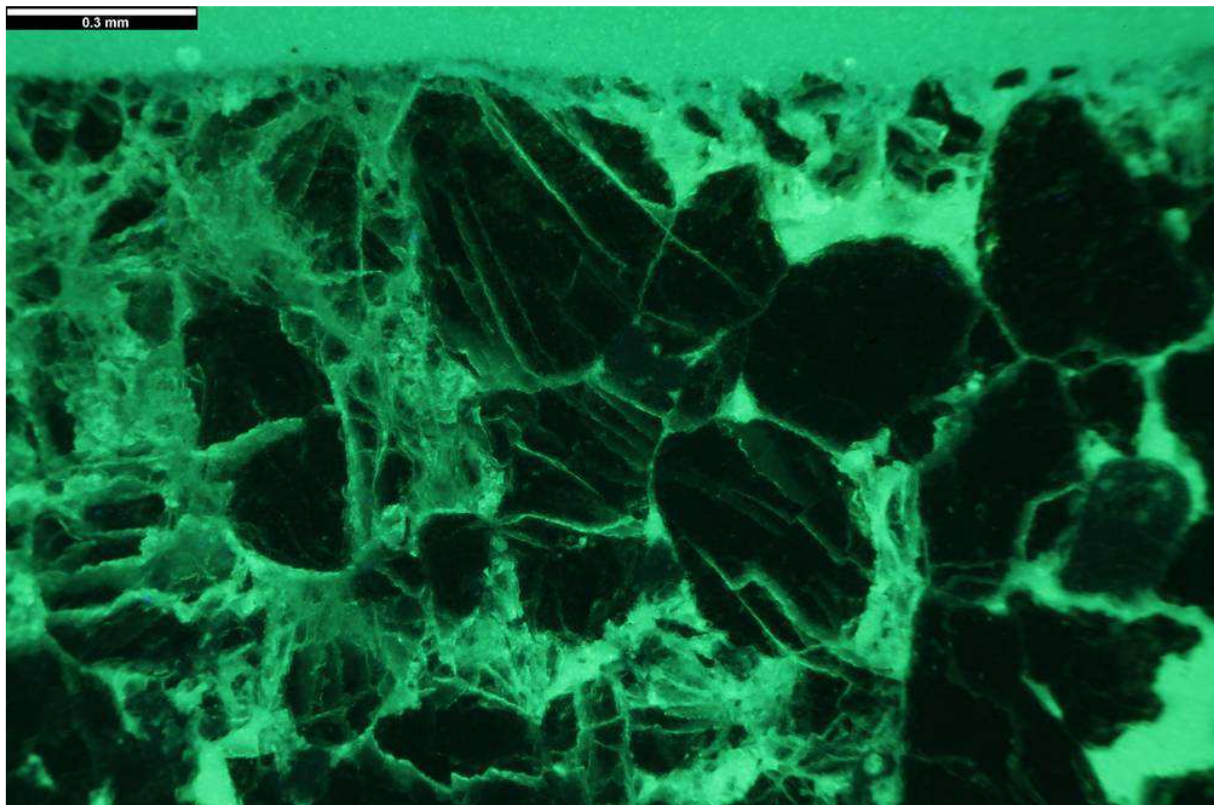
U všech studovaných hornin byl vývoj poměru os podobný. Klasty v neporušené hornině měly mírně oválný charakter, v drcených zónách se hodnoty spíše zvyšovaly, tedy klasty se vyvíjely k protaženějším tvarům. S rostoucím počtem úderů se trend obrátil zpět k více izometrickým tvarům.

Z výše uvedených údajů vyplývá, že vývoj tvaru klastů je ve velké většině případů velmi podobný a lze z něho tedy usuzovat na jakousi pravidelnost vývoje tvaru případně odhadnout mechanismus, jakým se klasty s rostoucím počtem úderů Schmidovým kladivem drtí. Oválné klasty nejprve

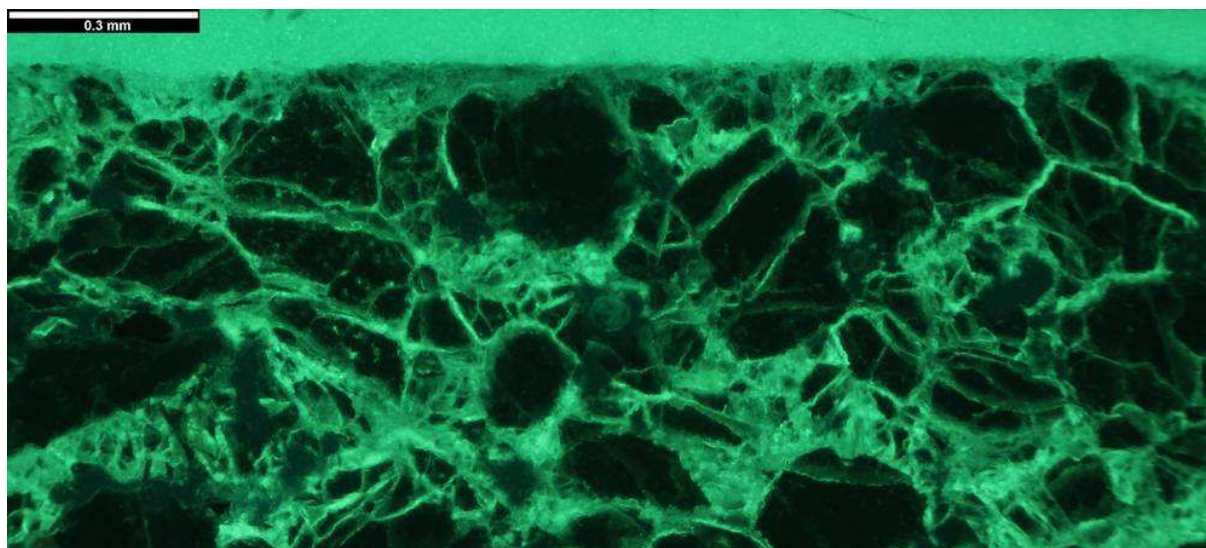
rozpraskají tak, že se z nich vytvoří klasty podlouhlého tvaru a ty se později dále drtí/praskají na menší části, které jsou tvarově více izometrické (Obr. 15). Tento předpoklad lze doložit i přímým pozorováním (Obr. 15).



Obr. 15. Postupný vývoj porušení při rostoucím počtu úderů Schmidtovým kladivem. Číslo označují pořadí vzniku mikrotrhlin.



Obr. 16. Detail podcřených/rozpraskaných křemenných klastů po jednom úderu ve vzorku křemenného pískovce s SiO₂ pojivem z lomu Kocbeře (vzorek KO-M). Měřítka v levém horním rohu označuje délku 0,3 mm.



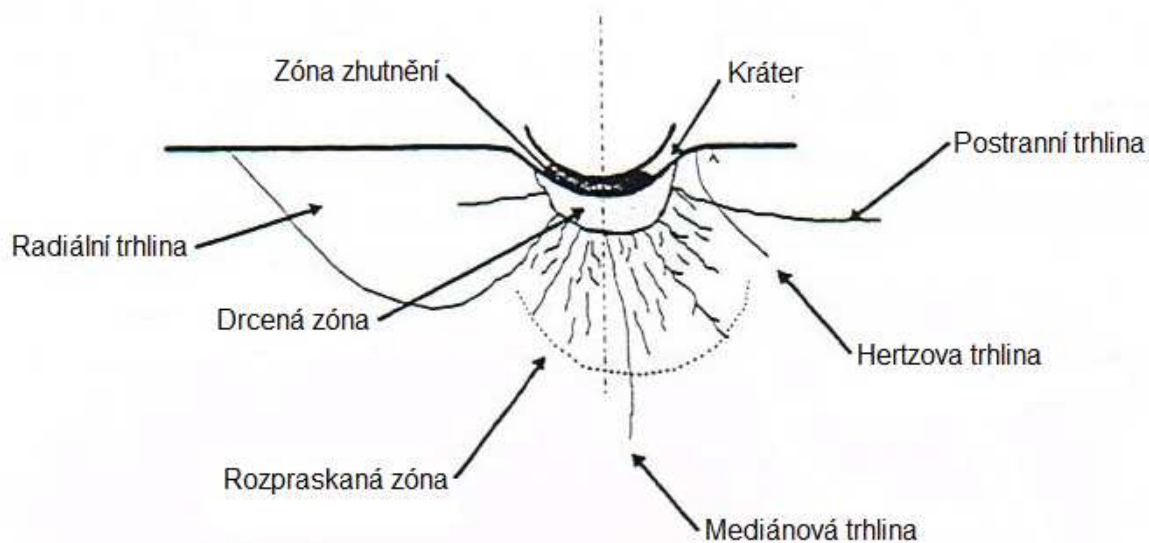
Obr. 17. Detail podrcených/rozpraskaných křemenných klastů po sedmi úderech ve vzorku křemenného pískovce s SiO₂ pojivem z lomu Kocbeře (vzorek KO-M). Měřítka v levém horním rohu označuje délku 0,3 mm.

5.4. Vztah mezi porušením způsobeným Schmidtovým kladivem a statickými vlačnými zkouškami

Jednou z otázek, které si kladlo zadání této práce, bylo nalezení podobného chování při porušení horniny jinými typy příbuzných zkoušek. Z hlediska provedení zkoušky jsou nejbližšími statické vlačné zkoušky s kuželovitými hroty, které se nejvíce využívají při experimentálním zkoušení dobytelnosti hornin (Mishnaevsky 1995). Studie provedené na četných skalních horninách (Lindqvist et al. 1994) prokázaly závislost mezi působící silou a hloubkou porušení nebo délkou trhlin (Kou et al. 1995), případně též vliv mikrostruktury hornin – zejména přítomností mikrotrhlin (Přikryl a Kou 1996).

Obecný model porušení málo pórovitých hornin pomocí vlačné zkoušky (Obr. 18), založený na empirických zkušenostech (Lindqvist et al. 1994, Přikryl a Kou 1996), předpokládá vznik výrazného kráteru, pod nímž je tenká vrstva ztuhlého práškovitého materiálu a drcená zóna, z níž vybíhá rozsáhlá rozpraskaná zóna s různými typy mikrotrhlin (Lindqvist et al. 1994). Při srovnání tohoto modelu porušení s jevy, pozorovanými v této práci, lze najít jak řadu shodných prvků, tak některé odlišnosti.

V první řadě je třeba zdůraznit, že obecný model porušení oběma typy zkoušek je v principu shodný, tj. u obou vzniká kráter, drcená zóna a rozpraskaná zóna. Odlišnost tkví zejména v intenzitě rozvoje jednotlivých jevů. Po dopadu razníku Schmidtova kladiva zůstává výrazně mělký kráter, než je tomu u vlačné zkoušky. To může být spojeno s nižším silovým působením rázu, vyvolaného razníkem Schmidtova kladiva. Naopak drcená zóna byla u studovaných pískovců výrazně rozsáhlejší a lépe pozorovatelná než u dříve studovaných granitoidních hornin (Přikryl a Kou 1996). Vznik rozsáhlé drcené zóny u studovaných pískovců však může souviset s mikrostavbou těchto hornin, zejména se značným pórovým prostorem mezi klastickými zrny. Naopak rozpraskaná zóna, která byla velmi dobře patrná u granitoidních hornin porušených statickou vlačnou zkouškou (viz Přikryl a Kou 1996), je u zde studovaných pískovců málo patrná a nevyskytuje se ve všech studovaných výbrusech. I zde by bylo možné hledat vysvětlení v odlišné mikrostavbě hornin.



Obr. 18. Schematické znázornění porušení horniny po aplikaci statické vlačné zkoušky (upraveno podle Lindqvista et al. 1994).

Pozorované odchylky mezi oběma modely porušení jsou však natolik významné, že by si zasloužily hlubší samostatnou studii. Ta by se měla zaměřit na výběr širšího spektra zkoumaných hornin (při zohlednění různého způsobu vzniku, proměnlivého mineralogického složení i horninové mikrostavby, typu pórového prostoru apod.), tak použití různého typu zkoušek (varianty Schmidtova kladiva s různou energií, jiné typy odrazových zkoušek, provedení pravých přetvárně-pevnostních zkoušek atd.).

6. ZÁVĚR

Makroskopická i mikroskopická pozorování pískovců, podrobených zkoušce odrazové tvrdosti pomocí Schmidtova kladiva ukázala, že tuto zkoušku nelze považovat za nedestruktivní. Při zkoušení jedním nebo více úderů v jednom zkušebním místě dochází k významnému nevratnému poškození studovaných hornin, které lze spolehlivě prokázat charakteristickým typem porušení a změnou mikrostrukturních parametrů.

Makroskopicky pozorovatelné porušení se projevuje vznikem prohlubně (zde označována jako kráter) v místě dopadu razníku Schmidtova kladiva. Plošný rozměr této prohlubně zhruba odpovídá ploše razníku. Povrch horniny, na nějž dopadá razník Schmidtova kladiva je rozdrčen na jemný prášek.

Mikroskopické studium sady výbrusů, vytvořených v kolmém řezu na plochu dopadu razníku Schmidtova kladiva, pomohlo vytvořit obecný model porušení horniny v místě dopadu razníku. Toto porušení se projevuje vznikem poměrně rozsáhlé drcené zóny pod kráterem. Hloubkový dosah této drcené zóny jsou 3-4 mm. Původní klasty jsou v drcené zóně rozpraskané a rozdrčené. V některých případech (přibližně 29 % sledovaných případů) byly pozorovány mikrotrhliny, které vybíhají z drcené zóny dále do horniny. Tuto oblast porušení lze označit jako rozpraskaná zóna.

Kvantitativní výzkum změn horninové mikrostruktury v drcené zóně umožnil vysledovat pravděpodobný vývoj drcení klastů v oblasti pod razníkem Schmidtova kladiva. Původně více izometrické klasty nejprve praskají podél přednostně orientovaných, subparalelních mikrotrhlin (dochází tedy k tvarovému protažení) a při rostoucím počtu úderů tato nově vytvořená protáhlá ostrohranná zrna praskají ve směru kolmém k hlavnímu protažení, stávají se tedy tvarově opět více izometrickými. Hlavním pozorovaným jevem v drcené zóně je však výrazná redukce velikosti klastů.

Pozorované jevy byly porovnány s dříve publikovanými modely porušení hornin, odvozených z experimentálních prací, studujících porušení při statických vlačných zkouškách. Zde navržený model porušení a dříve publikované modely se shodují v přítomnosti hlavních zón porušení, liší se však v jejich relativním rozsahu. Pro ověření pozorovaných jevů bude zapotřebí navrhnout zkušební protokol zahrnující vlačné i odrazové zkoušení tvrdosti na více horninových typech s různým mineralogickým složením, proměnlivou mikrostavbou a odlišnými fyzikálními vlastnostmi.

7. LITERATURA

- Aa A.R., Sjøstad J.A., 2000. Schmidt hammer age evaluation of the moraine sequence in front of Boyabreen, western Norway. *Norsk Geologisk Tidsskrift* 80(1): 27–32.
- Aggitalis G., Alivizatos S., Stamoulis D., Stournaras G., 1996. Correlating uniaxial compressive strength with Schmidt hardness, point load index, Young's Modulus, and mineralogy of gabbros and basalts (northern Greece). *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 54(1): 3–11.
- Al Harthi A.A., 2001. A field index to determine the strength characteristics of crushed aggregate. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 60(3): 193–200.
- Altindag R., Güney A., 2006. ISRM Suggested Method for determining the Shore Hardness value for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 43(6): 19–22.
- Ahmad A., Pamplona M., Simon S., 2010. Ultrasonic testing for the investigation and characterization of stone – a non-destructive and transportable tool. *Studies in Conservation Suppl.* 1: 43–53.
- Amaral P.M., Rosa L.G., Fernandes J.C., 1999. Determination of Schmidt rebound hardness consistency in granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 36(6): 833–837.
- Aoki H., Matsukura Y., 2007. A new technique for non-destructive field measurement of rock-surface strength: an application of the Equotip hardness tester to weathering studies. *Earth Surface Processes and Landforms* 32(12): 1759–1769.
- Aoki H., Matsukura Y., 2008. Estimating the unconfined compressive strength of intact rocks from Equotip hardness. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 67(1): 23–29.
- ASTM 2005. ASTM D5873-05 Standard Test Method for Determination of Rock Hardness by Rebound Hammer Method. Book of Standards Volume 04.08, ASTM International, West Conshohocken, PA, 3 str.
- Aufmuth R.E., 1973. A systematic determination of engineering criteria for rock. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 11(3): 235–245.
- Aydin A., 2009. ISRM suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: revised version. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 46(3): 627–634.
- Aydin A., Basu A., 2005. The Schmidt Hammer in rock material characterization. *Engineering Geology* 81(1): 1–14.
- Ballantyne C.K., Black N.M., Finlay D.P., 1990. Use of the Schmidt test hammer to detect enhanced boulder weathering under late-lying snowpatches. *Earth Surface Processes and Landforms* 15(5): 471–474.
- Barton, N., Choubey, V., 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics* 10(1-2): 1–54.
- Basarir H., Karpuz C., 2004. A rippability classification system for marls in lignite mines. *Engineering Geology* 74(3-4): 303–318.
- Basu A., Aydin A., 2004. A method for normalization of Schmidt hammer rebound values. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41(7): 1211–1214.
- Benavente D., Martínez-martínez J., Jáuregui P., Rodríguez M.A., García del Cura M.A., 2006. Assessment of the strength of building rocks using signal procedures. *Construction and Building Materials* 20(8): 562–568.
- Bieniawski Z.T., 1974. Estimating the strength of rock materials. *Journal of South African Institute of*

Mining and Metallurgy 74(8): 312–320.

Bilgin N., Dincer T., Copur H., 2002. The performance prediction of impact hammers from Schmidt hammer rebound values in Istanbul metro tunnel drivages. *Tunnelling and Underground Space Technology* 17(3): 237–247.

Bruneau C., Forrer A., Cuche A., 1995. Une méthode d'investigation non-destructive des matériaux pierreux. Les mesures à ultrason. In: Pancella, R. (ed.) *Conservation et restauration des biens culturels*. Actes du Congrès LCP 1995, 24-29 septembre 1995, Montreux (Switzerland). Laboratoire de Conservation de la Pierre, Département des matériaux, Ecole Polytechnique Fédérale du Lausanne, str. 187–194.

Buyuksagis I.S., Goktan R.M., 2007. The effect of Schmidt hammer type on uniaxial compressive strength prediction of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 44(2): 299–307.

Cargill J.S., Shakoor A., 1990. Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 27(6): 495–503.

Costa Portugal D., Magalhães A., do Rosário Veiga M., 2012. Characterisation of mortars using drilling resistance measurement system (DRMS): Tests on field panels samples. In: Válek J., Hughes J.J., Groot C.J.W.P. (eds.) *Historic Mortars. Characterisation, Assessment and Repair*. RILEM Bookseries, Vol. 7, Springer, Dordrecht, str. 413–424.

Day M.J., Goudie A.S., 1977. Field assessment of rock hardness using the Schmidt hammer. *British Geomorphological Research Group, Technical Bulletin* 18: 19–29.

De Puy G.W., 1965. Petrographic investigations of rock durability and comparisons of various test procedures. *Engineering Geology* 2(2): 31–46.

Delgado Rodrigues J., Ferreira Pinto A., Costa D., 2002. Tracing of decay profiles and evaluation of stone treatments by means of microdrilling techniques. *Journal of Cultural Heritage* 3(2): 117–125.

Delgado Rodrigues J., Costa D., 2004. A new method for data correction in drilling resistance. Tests for the effect of drill bit wear. *International Journal for Restoration of Buildings and Monuments* 10(3): 1–18.

Demirdag S., Yavuz H., Altindag R., 2009. The effect of sample size on Schmidt rebound hardness value of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 46(4): 725–730.

Deere D.U., Miller R.P., 1966. *Engineering classifications and index properties of intact rock*. Technical report no. AFWL-TR 65-116, University of Illinois, 300 str.

de Vekey B., 2003. In-situ evaluation of the physical and chemical state of masonry structures. In: Binda L., de Vekey R.C. (eds.) *PRO 26: International RILEM Workshop on On-Site Control and Non-Destructive Evaluation of Masonry Structures*. RILEM TC 177-MDT Workshop on On-Site Control and Non-Destructive Evaluation of Masonry Structures, 12-14 November 2001, Mantova, Italy. Publications s.a.r.l., Bagneux, str. 159-166.

Dinçer I., Acar A., Çobanoğlu I., Uras Y., 2004. Correlation between Schmidt hardness, uniaxial compressive strength and Young's modulus for andesites, basalts and tuffs. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 63(2): 141–148.

Dionísio A., Martinho E., Grangeia C., Almeida F., 2013. Examples of the use of non-invasive techniques for the evaluation of stone decay in Portugal. In: Guerra Rosa L., Silva Z.C.G., Lopes L. (eds.) *Global Stone Congress*. Key Engineering Materials 548: 239–246.

- Duncan N., 1969. *Engineering geology and rock mechanics*. Vol. 1, Leonard Hill, London, 252 str.
- Dyke C.G., Dobereiner L., 1991. Evaluating the strength and deformability of sandstones. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 24(1): 123–134.
- Ericson K., 2004. Geomorphological surfaces of different age and origin in granite landscapes: an evaluation of the Schmidt test hammer. *Earth Surface Processes and Landforms* 29(4): 495–509.
- Evans D.J.A., Archer S., Wilson D.J.H., 1999. A comparison of the lichenometric and Schmidt hammer dating techniques based on data from the proglacial areas of some Icelandic glaciers. *Quaternary Science Reviews* 18(1): 13–41.
- Farmer IW, Hignett HJ, Hudson JA., 1979. The role of geotechnical factors in the cutting performance of tunnelling machines in rocks. vol. 1. *Proceedings of the 4th international congress ISRM, Montreux*. 371–377.
- Fener M., Kahraman S., Bilgil A., Gunaydin O., 2005. A comparative evaluation of indirect methods to estimate the compressive strength of rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 38(4): 329–343.
- Fernandes F., Lourenço P., 2007. Evaluation of the compressive strength of ancient clay bricks using microdrilling. *Journal of Materials in Civil Engineering* 19(9): 791–800.
- Ferreira Pinto A.P., Delgado Rodrigues J., 2008. Stone consolidation: The role of treatment procedures. *Journal of Cultural Heritage* 9(1): 38–53.
- Ferreira Pinto A.P., Delgado Rodrigues J., 2012. Consolidation of carbonate stones: Influence of treatment procedures on the strengthening action of consolidants. *Journal of Cultural Heritage* 13(2): 154–166.
- Fort R., Alvarez de Buergo M., Perez-Monserrat E.M., Varas M.J., 2010. Characterisation of monzogranitic batholiths as a supply source for heritage construction in the northwest of Madrid. *Engineering Geology* 115(3-4): 149–157.
- Fort R., Alvarez de Buergo M., Perez-Monserrat E.M., 2013. Non-destructive testing for the assessment of granite decay in heritage structures compared to quarry stone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 61: 296–305.
- Fowell R.J., McFeat Smith I., 1976. Factors influencing the cutting performance of a selective tunnelling machine. In: Jones M.J. (ed.) *Tunnelling' 76, Proceedings of the international symposium*. Institution of Mining and Metallurgy, with the cooperation of the British Tunnelling Society, the Institution of Mining Engineers and the Transport and Road Research Laboratory, London, England, 1-5 March 1976. Institution of Mining and Metallurgy, London, str. 301–309.
- Fratini F., Rescic S., Tiano P., 2006. A new portable system for determining the state of conservation of monumental stones. *Materials and Structures* 39(2): 139–147.
- Garter P.G., Sneddon M., 1977. Comparison of Schmidt hammer, point load and unconfined compression tests in Carboniferous strata. In: Potts E.L.J. (ed.) *Proceedings of a conference on Rock Engineering*. Newcastle upon Tyne University, England, 4-7 April 1977. Newcastle upon Tyne University, England str. 197–210.
- Ghose AK, Chakraborti S., 1986. Empirical strength indices of Indian coals. *Proceedings of the 27th US symposium on rock mechanics*. Balkema. str. 59–61.
- Göktan R.M., Ayday C., 1993. A suggested improvement to the Schmidt rebound hardness ISRM suggested method with particular reference to rock machineability. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 30(3): 321–322.
- Göktan R.M., Gunes N., 2005. A comparative study of Schmidt hammer testing procedures with

reference to rock cutting machine performance prediction. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 42(3): 466–472.

Goodman R.E., 1989. *Introduction to rock mechanics*. 2nd ed., John Wiley and Sons, New York, 562 str.

Goudie A.S., 2006. The Schmidt hammer in geomorphological research. *Progress in Physical Geography* 30(6): 703–718.

Greco R., Sorriso-Valvo M., 2005. Relationships between joint apparent separation, Schmidt hammer rebound value, and distance to faults, in rocky outcrops, Calabria, Southern Italy. *Engineering Geology* 78(3-4): 309–320.

Gupta V., 2009. Non-destructive testing of some higher Himalayan rocks in the Satluj Valley. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 68(3): 409–416.

Hack H.R.G.K., Hingira J., Verwaal W., 1993. Determination of discontinuity wall strength by Equotip and ball rebound tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 30(2): 151–155.

Haramy K.Y., De Marco M.J., 1985. Use of Schmidt hammer for rock and coal testing. In: Ashworth E. (ed.) *Research & engineering applications in rock masses*. Proceedings of the 26th U.S. Symposium on Rock Mechanics, 26-28 June, 1985, South Dakota School of Mines & Technology, Rapid City. Balkema, Rotterdam, str. 549–555.

Hawkes I., Mellor M., 1970. Uniaxial testing in rock mechanics laboratories. *Engineering Geology* 4(3): 179–285.

Hawkins A.B., 1998. Aspects of rock strength. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 57(1): 17–30.

Hawkins A.B., McConnell B.J., 1992. Sensitivity of sandstone strength and deformability to changes in moisture content. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 25(2): 115–130.

Hirschwald J., 1908. *Die Prüfung der natürlichen Bausteine auf ihre Wetterbeständigkeit*. Ernst & Sohn, Berlin.

Holmgeirsdottir T., Thomas P.R., 1998. Use of the D-762 Shore Hardness Scleroscope for testing small rock volumes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science* 35(1): 85–92.

Howarth D.F., Adamson W.R., Berndt J.R., 1986. Correlation of model tunnel boring and drilling machine performances with rock properties. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 23(2): 171–175.

Hucka V.A., 1965. A rapid method for determining the strength of rocks in situ. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 2(2): 127–134.

Chen H., Hu Z.Y., 2003. Some factors affecting the uniaxial strength of weak sandstones. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 62(4): 323–332.

Charitaras B., 1996. Non destructive methods for investigation of some mechanical properties of natural stones in the protection of monuments. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 54(1): 59–63.

Charitaras B., 1998. Non-destructive methods used for the estimation of the damage (weathering and cracks) of the building and ornamental stones. In: Biscontin G., Moropoulou A., Erdik M., Delgado Rodrigues J. (eds.) *Compatible materials for the protection of European cultural heritage*. Technical Chamber of Greece, Athens, str. 213–220.

- Inoue M., Ohomi M., 1970. Study on the strength of rocks by the Schmidt test hammer. *Rock Mechanics Japan* 1: 177–179.
- Irfan T.Y., Dearman W.R., 1978. Engineering classification and index properties of a weathered granite. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 17(1): 79–90.
- ISRM, 1978. Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 15(1): 89–97.
- Janach W., Merminod A., 1982. Rock abrasivity test with a modified Schmidt hammer. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 19(1): 43–45.
- Kahraman R., 1999. Rotary and percussive drilling prediction using regression analysis. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 36(7): 981–989.
- Kahraman S., 2001. Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 38(7): 981–994.
- Kahraman S., Gunayidin O., 2007. Empirical methods to predict the abrasion resistance of rock aggregates. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 66(4): 449–455.
- Kahraman R., Balcı C., Yazıcı S., Bilgin N., 2000. Prediction of the penetration rate of rotary blast hole drills using a new drillability index. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 37(5): 729–743.
- Kahraman S., Fener M., Gunayidin O., 2002. Predicting the Schmidt Hammer values of in-situ rock from core sample values. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 39(3): 395–99.
- Kahraman S., Bilgin N., Feridunoglu C., 2003. Dominant rock properties affecting the penetration rate of percussive drills. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 40(5): 711–723.
- Kahraman S., Fener M., Gunayidin O., 2004. Predicting the sawability of carbonate rocks using multiple curvilinear regression analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41(7): 1123–1131.
- Karpuz C., 1990. A classification system for excavation of surface coal measures. *Mining Science and Technology* 11(2): 157–163.
- Karpuz C., Paşamehmetoğlu A.G., 1997. Field characterisation of weathered Ankara andesites. *Engineering Geology* 46(1): 1–17.
- Katz O., Reches Z., Roegiers J.-C., 2000. Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 37(4): 723–728.
- Kazi A., Al-Mansour Z.R., 1980. Empirical relationship between Los Angeles Abrasion and Schmidt hammer strength tests with application to aggregates around Jeddah. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 13(1): 45–52.
- Kidybiński A., 1968. Rebound number and the quality of mine roof strata. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 5(4): 283–292.
- Kidybiński A., 1981. Bursting liability indices of coal. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 18(4): 295–304.
- Knill J.L., Jones K.S., 1965. The recording and interpretation of geological conditions in the foundations of the Roseires, Kariba, and Latiyan Dams. *Geotechnique* 15(1): 94–124.
- Koca M.Y., Ozden G., Yavuz A.B., Kincal C., Onargan T., Kucuk K., 2006. Changes in the engineering properties of marble in fire-exposed columns. *International Journal of Rock Mechanics and Mining*

Sciences 43(4): 520–530.

Kolaiti E., Papadopoulos Z., 1993. Evaluation of Schmidt rebound hammer testing: a critical approach. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 48(1): 69–76.

Kolek J., 1958. An appreciation of the Schmidt rebound hammer. *Magazine of Concrete Research* 10(28): 27–36.

Kou S.Q., Lindqvist P.A., Tan X.C., 1995. An analytical and experimental investigation of rock indentation fracture. In: Fuji T. (ed.) *Rock Mechanics: Proceedings of the Eight International Congress on Rock Mechanics, Tokyo, Japan, 25-30 September, 1995*, Vol. 1, Theme 2, Taylor and Francis, London, str. 181–184.

Li X., Rupert G., Summers D.A., Santi P., Liu D., 2000. Analysis of impact hammer rebound to estimate rock drillability. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 33(1): 1–13.

Lindqvist P.-A., Suarez del Rio L.M., Montoto M., Tan X.C., Kou S.Q., 1994. *Rock indentation database: Testing procedures, results and main conclusions*. SKB Project Report PR 44-94-023, 48 str.

Martínez-Martínez J., Benavente D., García del Cura M.A., 2011. Spatial attenuation: The most sensitive ultrasonic parameter for detecting petrographic features and decay processes in carbonate rocks. *Engineering Geology* 119(3-4): 84–95.

Matthews J.A., Shakesby R.A., 1984. The status of the Little Ice Age in southern Norway: relative-age dating of Neoglacial moraines with Schmidt hammer and lichenometry. *Boreas* 13(3): 333–346.

McCarroll D., 1987. The Schmidt hammer in geomorphology: five sources of instrument error. *British Geomorphological Research Group, Technical Bulletin* 36: 16–27.

McCarroll D., 1989a. Schmidt Hammer relative-age evaluation of a possible pre-‘Little Ice Age’ Neoglacial moraine, Leirbreen, southern Norway. *Norsk Geologisk Tidsskrift* 69(2): 125–130.

McCarroll D., 1989b. Potential and limitations of the Schmidt hammer for relative age-dating: Field tests on Neoglacial moraines, Jotunheimen, southern Norway. *Arctic and Alpine Research* 21(3): 268–275.

McCarroll D., 1991. The Schmidt Hammer, weathering and rock surface roughness. *Earth Surface Processes and Landforms* 16(5): 477–480.

McCarroll D., 1992. A new instrument and techniques for the field measurement of rock surface roughness. *Zeitschrift fur Geomorphologie N. F.* 36: 69–79.

Meulenkamp F., Alvarez Grima M., 1999. Application of neural networks for the prediction of the unconfined compressive strength (UCS) from Equotip hardness. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 36(1): 29–39.

Mishnaevsky L.L., 1995. Physical mechanisms of hard rock fragmentation under mechanical loading: a review. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 32(8): 763–766.

Nesje A., Blikra L.H., Anda E., 1994. Dating rockfall-avalanche deposits from degree of rock-surface weathering by Schmidt Hammer tests – a study from Norangsdalen, Sunnmore, Norway. *Norsk Geologisk Tidsskrift* 74(2): 108–113.

Niedzielski T., Migoń P., Placek A., 2009. A minimum sample size required from Schmidt hammer measurements. *Earth Surface Processes and Landforms* 34(13): 1713–1725.

Nishiyama T., Kusuda H., 1994. Identification of pore spaces and microcracks using fluorescent resins. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*

31(4): 369–375.

O'Rourke J.E., 1989. Rock index properties for geoenvironmental engineering in underground development. *Mining Engineering* 41(2): 106–109.

Özbek A., 2009. Variation of Schmidt hammer values with imbrication direction in clastic sedimentary rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 46(3): 548–554.

Pamplona M., Kocher M., Snethlage R., Barros L.A., 2007. Drilling resistance: overview and outlook. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften* 158(3): 665–679.

Pápay Z., Török Á., 2007. Evaluation of the efficiency of consolidants on Hungarian porous limestone by non-destructive test methods. *Central European Geology* 50(4): 299–312.

Polák, V., 1965. *Poznatky z použití kuželového penetrometru pro nepřímé určení smluvní hodnoty pevnosti v tlaku u kladenského uhlí*. Nепublikovaná výzkumná zpráva, Hornický ústav Československé Akademie věd, Praha.

Poole R.W., Farmer I.W., 1978. Geotechnical factors affecting tunnelling machine performance in coal measures rock. *Tunnels Tunnelling* 10: 27–30.

Poole R.W., Farmer I.W., 1980. Consistency and repeatability of Schmidt hammer rebound data during field testing. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 17(3): 167–171.

Přikryl R., 2001. Some microstructural aspects of strength variation in rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 38(5): 671–682.

Přikryl R., 2006. Assessment of rock geomechanical quality by quantitative rock fabric coefficients: Limitations and possible source of misinterpretations. *Engineering Geology* 87(3-4): 149–162.

Přikryl R., 2007. Understanding the earth scientist's role in the pre-restoration research of monuments: an overview. In: Přikryl R., Smith B.J. (eds.) *Building Stone Decay: From Diagnosis to Conservation*. Geological Society London, Special Publications, 271, str. 9–21.

Přikryl R., Kou S.Q., 1996. *Fractures Caused by Indentation in Cracked Granitoids*. Research Report TULEA 1996:24, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, 43 str.

Rybařík V., 1994. *Ušlechtilé stavební a sochařské kameny České republiky*. Nadace Střední průmyslové školy kamenické a sochařské v Hořicích v Podkrkonoší, Hořice v Podkrkonoší, 218 str.

Sachpazis C.I., 1990. Correlating Schmidt hardness with compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 42(1): 75–83.

Shakoor A., Barefield E.H., 2009. Relationship between unconfined compressive strength and degree of saturation for selected sandstones. *Environmental & Engineering Geoscience* 15(1): 29–40.

Shalabi F.I., Cording E.J., Al-Hattamleh O.H., 2007. Estimation of rock engineering properties using hardness tests. *Engineering Geology* 90(3-4): 138–147.

Sheorey P.R., Barat D., Das M.N., Mukherjee K.P., Singh B., 1984. Schmidt hammer rebound data for estimation of large scale in-situ coal strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 21(1): 39–42.

Schmidt E., 1951. A non-destructive concrete tester. *Concrete* 59(8): 34–35.

Schuller M.P., Atkinson R.H., Noland J.L., 1995. Structural evaluation of historic masonry buildings. *APT Bulletin* 26(2-3): 51–61.

Siedel H., Pfefferkorn S., von Plehwe-Leisen E., Leisen H., 2010. Sandstone weathering in tropical climate: Results of low-destructive investigations at the temple of Angkor Wat, Cambodia.

Engineering Geology 115(3-4): 182–192.

Siegesmund S., Kracke T., Ruedrich J., Schwarzburg R., 2010. Jewish cemetery in Hamburg Altona (Germany): State of marble deterioration and provenance. *Engineering Geology* 115(3-4): 200–208.

Singh R., Singh A.K., Mandal P.K., 2002. Cuttability of coal seams with igneous intrusions. *Engineering Geology* 67(1-2): 127–137.

Sjöberg R., Broadbent N., 1991. Measurement and calibration of weathering using the Schmidt Hammer on wave washed moraines in the upper Norrland Coast, Sweden. *Earth Surface Processes and Landforms* 16(1): 57–64.

Soiltest Inc., 1976. *Operating instructions- concrete test hammer*. Evanston, IL.

Sumner P., Nel W., 2002. The effect of rock moisture on Schmidt hammer rebound: tests on rock samples from Marion Island and South Africa. *Earth Surface Processes and Landforms* 27(10): 1137–1142.

Szwedzicki T., 1998. Indentation hardness testing of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 35(6): 825–829.

Tabor D., 1954. Mohs's hardness scale – A physical interpretation. *Proceedings of the Physical Society, Section B* 67(3): 249–

Tabor D., 1956. The physical meaning of indentation and scratch hardness. *British Journal of Applied Physics* 7(5): 159–166.

Tandon R.S., Gupta V., 2013. The control of mineral constituents and textural characteristics on the petrophysical & mechanical (PM) properties of different rocks of the Himalaya. *Engineering Geology* 153: 125–143.

Tarkoy P.J., Hendron A.J., 1975. *Rock hardness index properties and geotechnical parameters for predicting tunnel boring machine performance*. National Science Foundation Report no. NSF-RAT-75-030.

Tiano P., 2001. The use of microdrilling technique for the characterization of stone materials. In: Binda L., de Vekey R.C. (eds.) *PRO 26: International RILEM Workshop on On-Site Control and Non-Destructive Evaluation of Masonry Structures*. RILEM TC 177-MDT Workshop on On-Site Control and Non-Destructive Evaluation of Masonry Structures, 12-14 November 2001, Mantova, Italy. Publications s.a.r.l., Bagnaux, str. 203-212.

Tiano P., Viggiano A., 2000. A new diagnostic tool for the evaluation of the hardness of natural and artificial stone. *International Journal for Restoration of Buildings and Monuments* 6(5): 555–566.

Tiano P., Filareto C., Ponticelli S., Ferrari M., Valentini E., 2000a. Drilling force measurement system, a new standardisable method to determine the stone cohesion: prototype design and validation. *International Journal for Restoration of Buildings and Monuments* 6(2): 133–150.

Tiano P., Delgado Rodrigues J., De Witte E., Verges-Belmin V., Massey S., Sneathlge R., Costa D., Cadot-Leroux L., Garrod E., Singer B., 2000b. The conservation of monuments: a new method to evaluate consolidating treatments. *International Journal for Restoration of Buildings and Monuments* 6(2): 115–132.

Topal T., Doyuran V., 1995. Ultrasonic testing of artificially weathered Cappadocian tuff. In: Pancella, R. (ed.) *Conservation et restauration des biens culturels*. Actes du Congrès LCP 1995, 24-29 septembre 1995, Montreux (Switzerland). Laboratoire de Conservation de la Pierre, Département des matériaux, Ecole Polytechnique Fédérale du Lausanne, str. 205–211.

Török A., 2003. Surface strength and mineralogy of weathering crusts on limestone buildings in

Budapest. *Building and Environment* 38(9-10): 1185–1192.

Török A., 2008. Black crusts on travertine: factors controlling development and stability. *Environmental Geology* 56(3-4): 583–594.

Török A., 2010. In situ methods of testing stone monuments and application of nondestructive physical properties testing in masonry diagnosis. In: Boştenaru M., Příkryl R., Török Á. (eds.) *Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures*. Springer, Dordrecht, str. 177–193.

Török Á., Vásárhelyi B., 2010. The influence of fabric and water content on selected rock mechanical parameters of travertine, examples from Hungary. *Engineering Geology* 115(3-4): 237–245.

Török Á., Vogt T., Löbens S., Forgó L.Z., Siegesmund S., Weiss T., 2005. Weathering forms of rhyolite tuffs. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften* 156(1): 177–187.

Török Á., Stück H., Quetscher A., Glätzner P., Siegesmund S., 2007. Comparative study of weathering features of stones in Hungarian castles: morphological characteristics and changes in physical properties. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften* 158(4): 931–955.

USBR, 1998. *Engineering geology field manual*. Field index tests. Vol. 1, str. 111–112.

Valdeon L., de Freitas M.H., King M.S., 1996. Assessment of the quality of building stones using signal processing procedures. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 29(4): 299–308.

Vásárhelyi B., 2003. Some observation regarding the strength and deformability of sandstones in case of dry and saturated conditions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 62(3): 245–249.

Vásárhelyi B., 2005. Statistical analysis of the influence of water content on the strength of the Miocene limestone. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 38(1): 69–76.

Verwaal W., Mulder A., 1993. Estimating rock strength with the Equotip hardness tester. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 30(6): 659–662.

Viles H., Goudie A., Grab S., Lalley J., 2011. The use of the Schmidt Hammer and Equotip for rock hardness assessment in geomorphology and heritage science: a comparative analysis. *Earth Surface Processes and Landforms* 36(3): 320–333.

Weiss T., Rasoloffosaon P.N.J., Siegesmund S., 2002. Ultrasonic wave velocities as diagnostic tool for the quality assessment of marble. In: Siegesmund S., Weiss T., Vollbrecht A. (eds.) *Natural stones, weathering phenomena, conservation strategies and case studies*. Geological Society of London, Special Publications, Vol. 205, London, str. 115–120.

Williams R.B.G., Robinson D.A., 1983. The effect of surface texture on the determination of the surface hardness of rock using the Schmidt hammer. *Earth Surface Processes and Landforms* 8(3): 289–292.

Xu G., Grasso P., Mahtab A., 1990. Use of Schmidt hammer for estimating mechanical properties of weak rock. In: Price D.G. (ed.) *Proceedings Sixth International Congress, International Association of Engineering Geology*, 6-10 August 1990, Amsterdam, Netherlands. Balkema, Rotterdam, Vol. 1, str. 511–519.

Yagiz S., 2009. Predicting uniaxial compressive strength, modulus of elasticity and index properties of rocks using the Schmidt hammer. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 68(1): 55–63.

Yaşar E., Y. Erdoğan Y., 2004. Estimation of rock physicomechanical properties using hardness methods. *Engineering Geology* 71(3-4): 281–288.

Yılmaz I., Sendir H., 2002. Correlation of Schmidt hardness with unconfined compressive strength and Young's modulus in gypsum from Sivas (Turkey). *Engineering Geology* 66(3-4): 211–219.

Young R.P., Fowell R.J., 1978. Assessing rock discontinuities. *Tunnels & Tunnelling International* 10(5): 45–48.

Yurdakul M., Akdaş H., 2012. Prediction of specific cutting energy for large diameter circular saws during natural stone cutting. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 53: 38–44.