

**Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta
Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů**

**Charles University in Prague, Faculty of Science
Institute of Geochemistry, Mineralogy and Mineral Resources**

Doktorský studijní program: Aplikovaná geologie
Ph.D. study program: Applied Geology

Autoreferát disertační práce
Summary of the Ph.D. Thesis



Vliv složení a mikrostruktury vulkanických hornin na jejich technologické vlastnosti

Influence of composition and fabric of volcanic rocks on their technological properties

Kateřina Krutilová

Školitel/Supervisor: Prof. Mgr. Richard Přikryl, Dr.

Praha/Prague 2015

ABSTRAKT

Vzhledem k pestré geologické stavbě se v České republice pro výrobu drceného kamene využívá široká škála všech genetických typů hornin. Nejpoužívanější skupinou jsou výlevné magmatické horniny, které tvoří zhruba 34 % z celkové produkce (Starý et al. 2010). Tyto horniny jsou využívány pro všechny hlavní typy stavebních konstrukcí včetně pozemních komunikací.

Experimentální materiál drceného kamene, použitý pro tuto práci, byl odebrán ze čtyřiceti činných lomů v České republice. Zkoumané vulkanické horniny pocházejí z neoproterozoických a paleozoických komplexů Barrandienu, permokarbonu podkrkonošské pánve, permokarbonu vnitrosudetské pánve, ordoviku železnohorské oblasti, z hlavních vulkanických center Českého masivu v severozápadních Čechách (České středohoří a Doupovské hory), neovulkanických oblastí České křídové pánve a neovulkanické oblasti Východních a Západních Sudet.

Petrografický výzkum byl proveden formou standardních petrografických rozborů horninových výbrusů a chemické analýzy, s jejichž pomocí byly horniny zařazeny v příslušných klasifikačních systémech. Kromě toho byl celý soubor vulkanických hornin rozdělen do pěti petrograficko-technologických skupin vymezených jako: (1) ryolity / porfyry, (2) fonolity, (3) bazalty *s.l.*, (4) spility a (5) melafyry / diabasy.

U každé ze studovaných hornin byly podrobněji zkoumány její fyzikální a technologické vlastnosti. Z fyzikálních vlastností se stanovily základní indexové parametry (objemová hmotnost, otevřená pórovitost a nasákavost). Nejrozsáhlejší byla skupina technologických zkoušek, během nichž se stanovila mechanická odolnost (odolnost proti drcení metodou Los Angeles, odolnost proti drcení rázem, hodnota ohladitelnosti PSV a odolnost proti obrusu pneumatikami s hroty). Dále byly posuzovány geometrické vlastnosti pomocí tvarového indexu kameniva jednak podle normového, ale i modifikovaného, postupu a tvarové parametry s využitím počítačové analýzy obrazu. Experimentální studium se rovněž zaměřilo na zjištění stupně zdrobnění jako ukazatele drtitelnosti hornin v kombinaci se závislostí na predikci tvorby tvarově vhodných zrn kameniva.

Průměrné hodnoty objemové hmotnosti zrn kameniva se pohybují od 2,406 g/cm³ u horniny fonolitu do 3,216 g/cm³ u sodalitického nefelinitu. Průměrné hodnoty nasákavosti hornin se pohybují v rozmezí 1,9 % hmotnosti - 0,2 % hmotnosti. Průměrné zjištěné hodnoty otevřené pórovitosti se pohybují v rozmezí 4,70 % objemu - 0,52 % objemu. Hodnoty odolnosti proti drcení metodou Los Angeles se pohybují v rozsahu od minimální hodnoty u spilitu (LA = 8,4) do maximální hodnoty pro bazaltický andezit (LA = 29,2). Průměrné hodnoty odolnosti proti drcení rázem se pohybují v rozsahu od minimální hodnoty u olivinického nefelinitu (SZ = 8,9) do maximální hodnoty bazaltického andezitu (SZ = 25,1). Hodnoty odolnosti proti obrusu pneumatikami s hroty se pohybují v rozsahu od minimální hodnoty analcimického nefelinitu (A_N = 6,4) do hodnoty maximální hodnoty bazaltického andezitu (A_N = 43,3). Stupeň zdrobnění D_r vykazuje hodnoty od 3,33 u fonolitu do 6,16 u bazaltického andezitu. Zkoumané vulkanické horniny vykazují široký rozsah hodnot odolnosti proti ohlazování (PSV) se zastoupením v rozsahu 46 až 60.

Mechanická odolnost (stupeň zdrobnění, drtitelnost v rázu, odolnost proti drcení metodou Los Angeles, odolnost proti obrusu pneumatikami s hroty) vykazuje různý stupeň vzájemné závislosti. Nejvyšší míra závislosti byla zjištěna mezi drtitelností v rázu a odolností proti drcení metodou Los Angeles a mezi odolností proti obrusu pneumatikami s hroty a odolností proti drcení metodou Los Angeles. Velmi nízký stupeň závislosti byl zjištěn mezi drtitelností v rázu a odolností proti ohlazování (PSV), mezi stupněm zdrobnění a odolností proti obrusu pneumatikami s hroty, mezi odolností proti drcení metodou Los Angeles a odolností proti ohlazování (PSV), mezi stupněm zdrobnění a drtitelností v rázu nebo mezi odolností proti ohlazování (PSV) a stupněm zdrobnění. Značný rozptyl vykazuje i drtitelnost v rázu a odolnost proti obrusu pneumatikami s hroty nebo stupeň zdrobnění spolu s odolností proti drcení metodou Los Angeles. Při analýze mezi jednotlivými parametry

závislostí byl použit celý soubor dat jak pro všechny typy studovaných vulkanitů, tak odděleně pro jednotlivé petrograficko-technologické skupiny. Z výsledků vyplynulo, že tyto vztahy pro různé petrograficko-technologické typy hornin vykazují nejen různou těsnost, ale v některých případech i odlišné trendy.

V části studia věnované experimentálnímu drcení a následné velikostní a tvarové analýze zrn produktů se potvrdilo, že v oblasti velikosti výstupní štěrbině vznikají zrna s vhodným tvarovým indexem u všech typů vulkanických hornin a to i pro užití pouze jednoho stupně drcení. Nebyla zjištěna přímá závislost tvaru zrn na stupni zdrobnění hornin.

SUMMARY

Because of a very variable geological composition of the Czech Republic, there is a various scale of all genetic types of rocks that are used for the production of crushed stone. The most often used group of rocks are effusive magmatic rocks, which represent about 34 % of crushed stone marketed (Starý et al. 2010). These rocks are used for all kinds of construction purposes including roads.

The experimental material of crushed stone used in this thesis was sampled from 40 active quarries in the Czech Republic. The studied volcanic rocks originated from Neoproterozoic and Paleozoic complexes of Barrandien, Carboniferous and Permian of Krkonose Piedmont Basin, Carboniferous and Permian of Intrasudetic basin, area of ordovician Železné Hory, from the main volcanic center of Bohemian Massif in the north-west Bohemia (České středohoří Mts. and Doupov Mts.), Neovolcanic area of Czech Cretaceous basin and area of Neovolcanic East and West Sudeten.

Petrographic study was carried out in a form of standard petrographic analysis of thin sections and chemical analysis, which helped inclusion of rocks to a classified systems. The whole suite of volcanic rocks was separated to five petrographic-technologic subgroups defined as: (1) rhyolites / porphyres, (2) phonolites, (3) basalts *s.l.*, (4) spilites and (5) melaphyres / diabases.

Every single rock has been studied in detail for its physical and technological properties. Concerning the physical properties basic index parameters were tested (apparent density, open porosity and water absorption). The most extensive was a group of technological tests, during which mechanical resistance was determined (Los Angeles attrition test, Impact Test value, Polished Stone Value PSV and Nordic abrasion test by Studded tyres). Geometric properties with a shape index of aggregates in according to a standard and modified procedure and with use of image analysis shape parameters were evaluated too. Experimental study have been also aimed to investigate a reduction ratio as indicator of rocks crushability in combination with dependence correlation to the prediction of production cubic grains of aggregates.

Average values of apparent density of aggregates are from 2,406 g/cm³ in phonolite to 3,216 g/cm³ in sodalitic nephelinite. Average values of rocks water absorption are in the range of 1,9 - 0,2 % of Mass. Average values of open porosity are in the range of 4,70 - 0,52 % of Volume. Values of Los Angeles attrition test are from minimal value in spilite (LA = 8,4) to a maximum value in basaltic andesite (LA = 29,2). Average value of the Impact Test are from a minimum value (SZ = 8,9) in basaltic andesite and olivinic analcimite to a maximum value of olivinic nephelinite (SZ = 25,1). Values of the Nordic abrasion test are from the value (A_N = 6,4) in analcimic nephelinite to a maximum value of basaltic andesite (A_N = 43,3). Reduction ratio D_r values from 3,33 in phonolite to 6,16 in basaltic andesite. The studied volcanic rocks exhibit wide range of skid resistance expressed as Polished Stone Value (PSV) in the range from 46 to 60 with normal distribution.

Mechanical resistance (reduction ratio, Impact Test, Los Angeles attrition, Nordic abrasion Test) shows us a different degree of correlations. The best correlation was found between the Impact Test and Los Angeles attrition test and between the Nordic abrasion test and Los Angeles attrition test. A very low degree of correlation was found between the Impact Test and Polished Stone Value, between reduction ratio and the Nordic abrasion test, between Los Angeles attrition test and Polished Stone Value, between the Impact Test and the Impact Test and between Polished Stone Value and reduction ratio. The Impact Test, the Nordic abrasion test and reduction ratio with Los Angeles attrition test show considerable variability too. Complete data set was used for all types of studied volcanic rocks during analysis between every single parameters of correlations, and withal separated for each of petrographic-technologic group. These results indicate, that correlations give us not only a different tightness, but also different trends in some cases.

In the part of study, aimed to an experimental crushing and forthcoming size and shape analysis of grains was confirmed, that crushing of all petrographic-technologic rock types produced grains with a

cubic shape index in a zone of size setting (even with using only one degree of crushing). A direct correlation of grains shape with a reduction ratio of rocks was not identified.

1. Úvod

Vliv petrografických parametrů (modální složení, vlastnosti mikrostavby jako je velikost a tvar) na technologické vlastnosti hornin používaných pro výrobu drceného kamene je v současných výzkumech kameniva jedním z přehlížených aspektů. Petrografické vlastnosti hornin ovlivňují zejména zkoušené základní indexové fyzikální vlastnosti (objemová hmotnost, otevřená pórovitost a nasákavost). V této práci jsou zkoumány vulkanické horniny, které tvoří okolo 34 % celkové produkce drceného kameniva v České republice.

Základní vlastností produkce drceného kamene je stupeň zdobnění rubaniny během procesu drcení (Smith and Collis 2001, Alexander and Mindess 2005) spolu s produkcí tvarově vhodných zrn (Lees 1964, Ramsay et al. 1974). Každá hornina vykazuje různou odolnost proti zdobňování (tzv. drtitelnost), která závisí nejen na jejím složení a fyzikálně-mechanických vlastnostech (Koukis et al. 2007) ale také na typu drtiče a seřízení režimu drcení (Eloranta 1995). Stupeň zdobnění ovlivňuje tvarové parametry produktu drcení, u kterých se vyžaduje co nejvyšší podíl kubických zrn (Ramsay 1965, Hamzah et al. 2010). Velikost zavážky a výstupní šterbiny drtiče jsou klíčovými faktory, které ovlivňují tvarové vlastnosti (plochost) produktu (Ramos et al. 1994, Eloranta 1995).

Tvar zrn drceného kameniva je jednou z nejdůležitějších vlastností kameniva, která má vliv na chování kameniva v konstrukcích, zejména na jejich mechanické vlastnosti (Baalbaki et al. 1991). Přítomnost částic vykazujících anizotropii (zploštělá a protáhlá zrna) zvyšuje jejich měrný povrch a zhoršuje provázání a zhutnění kameniva a má také vliv na mezerovitost a propustnost (Smith and Collis 2001). Dále tvar částic ovlivňuje tření, pevnost betonu, asfaltových směsí a další vlastnosti. Tvarově protažené částice jsou méně mechanicky odolné v různých typech zkoušek, což je dáno nižší odolností vůči tahovému, resp. ohybovému namáhání (Lees 1964, Ramsay et al. 1974). Výsledné hodnoty tvarového indexu zrn slouží nejen spotřebiteli kameniva, pro posouzení jeho vhodnosti ke konkrétnímu účelu, ale i výrobci kameniva pro posouzení vhodnosti zvolených zdobňovacích strojů.

Mechanická odolnost kameniva se zjišťuje různými zkušebními metodami, jako například zkouškou odolnosti proti drcení Los Angeles. Alternativní zkušební metodou odolnosti proti drcení je zkouška drtitelnosti rázem podle evropské normy ČSN EN 1092-2. Zkouška odolnosti proti drcení rázem byla vyvinuta ke kvantifikaci odolnosti proti drcení kameniva pro kolejové lože. Zkouška se používá u přírodního kameniva určeného do staveb. Cílem této zkoušky je zjištění hodnoty drtitelnosti v rázu (SZ). Hodnota odolnosti proti ohlazování PSV, jako měřítko protismykové odolnosti kameniva, udává že vyšší hodnota PSV způsobuje vyšší koeficient tření. Kamenivo s vyšší hodnotou PSV by mělo vykazovat lepší vlastnosti obrusné vrstvy vozovky (Smith and Collis 2001, Lorenz and Gwosdz 2003). Podle stejných autorů hodnota PSV vyšší než 65 vyjadřuje, že drcené kamenivo je vysoce odolné proti ohlazování, avšak většina kameniva používaná do asfaltových směsí má hodnotu PSV v rozmezí 50-60. Další technologickou zkouškou, která je ukazatelem mechanické odolnosti kameniva je hodnota (A_N) odolnosti proti obrusu – Nordická zkouška, která se v České republice doposud pro hodnocení kameniva určeného do obrusných vrstev vozovek běžně nepoužívá. Je to zkouška, která je na pomezí mezi mechanickou stálostí a odolností proti ohlazování, stanovující odolnost proti obrusu a simuluje obrusné činnosti pneumatik s hroty na hrubé kamenivo, používané do obrusných vrstev vozovek (Erichsen 2009). Tato zkouška je běžná v severských státech Evropy (např. Erichsen 2009). V České republice není požadována a proto nejsou známy hodnoty místních hornin a chybí srovnání s ostatními fyzikálními a technologickými vlastnostmi.

Řešené téma bylo finančně podpořeno výzkumným projektem „Vytvoření databáze pro oceňování vlastností hornin používaných pro výrobu drceného kamene“ (50213/ENV/06 1855/660/06), poskytnutým Ministerstvem životního prostředí ČR (hlavní řešitel prof. R. Příkrýl).

2. Cíle práce

Předkládaná disertační práce spočívá ve zjištění vlivu petrografických parametrů na technické vlastnosti, což v současné době patří mezi opomíjené aspekty výzkumu stavebních surovin. Výsledky práce by měly sloužit k porozumění vzájemných vztahů mezi jednotlivými vlastnostmi hornin a napomoci k jejich optimálnímu využívání jako drceného kamene. Cíle disertační práce jsou následující:

- identifikace základních vlastností hornin (geologických, fyzikálních, mechanických a technologických);
- experimentální zjištění stupně zdrobnění při stejném režimu drcení pro různé typy vulkanických hornin;
- zjistit tvarové parametry drceného kameniva pomocí obrazové 3D analýzy;
- vyhodnocení získaných výsledků;
- zjištění korelačních vztahů mezi jednotlivými petrografickými a technologickými vlastnostmi;
- zjištění vzájemných vztahů s experimentálními a v České republice nepoužívanými metodami.

3. Materiál a metodika

Vzorky experimentálního materiálu byly odebrány ze 40 činných lomů v České republice, v nichž se vyrábí drcený kámen. Horninové typy zahrnuté do této práce tvoří skupina výlevných vulkanických hornin, obsahující širokou škálu typů z hlediska jejich složení (mineralogického a geochemického), horninové makro a mikrostavby a geologického stáří.

Ke zkoušce stupně zdrobnění byla odebrána frakce kameniva 32/63, která je ve většině případů produktem sekundárního drcení a pocházela ze skládek aktuální výroby. Dále byly odebrány i další frakce z výroby jako 8/11, 8/16 a 16/22, které byly třeba k přípravě zkušebních navážek na fyzikální, technologické zkoušky mechanické odolnosti a na silikátovou analýzu. Na petrografické studium byly odebrány menší kusové vzorky, charakteristické pro odebrané kamenivo ke zhotovení standardního petrografického výbrusu.

Výbrusy byly zkoumány v polarizačním mikroskopu Leica DM EP v procházejícím i polarizovaném světle. Mikroskopické pozorování se soustředilo na poměr, druh a velikost vyrostlic vůči základní hmotě. Pro pojmenování zkoumaných vulkanických hornin byl použit mezinárodní systém IUGS (Le Maitre, ed. 1989, Blatt et al. 2006). Pro silikátovou analýzu byly použity dílčí vzorky, namleté na analytickou jemnost. Chemické složení studovaných materiálů bylo provedeno standardní silikátovou analýzou (Kirschenbaum 1983) v Laboratořích geologických ústavů PřF UK. Výsledky byly použity pro zařazení studovaných hornin do diagramu TAS (Le Maitre, ed. 1989).

Experimentální drcení se provádělo na laboratorním dvojvzpěrném čelistovém drtiči DCD-D160. Drtič měl výstupní šterbinu seřízenou na 14 mm při maximálním sevření čelistí, zdvih 10 mm, vstupní šterbinu o rozměrech 105x150 mm, 120 otáček za minutu. Stupeň zdrobnění D_r , v literatuře označovaný též jako stupeň drcení, je numerickým vyjádřením, v jakém poměru použitý drtič zdrobnil materiál (Čep a Špírková 1997). Parametr se používá pro stanovení účinnosti drcení a vhodnosti použitého typu drtiče. V této práci byl parametr studován též v souvislosti s možným vztahem k petrologickým vlastnostem zkoumaných hornin. Stupeň zdrobnění je vlastně poměr mezi velikostí zrn zavážených do zdrobňovacího stroje a velikostí zrn, která ze zdrobňovacího stroje odcházejí. Vzhledem k tomu, že do zdrobňovacího stroje přichází zřídka stejně velká vstupující zrna zavážky a nevychází stejná zrna produkovaná, musí se tento poměr vztáhnout ke střední hodnotě velikosti vstupujících zrn a střední velikosti zrn odcházejících (Holec 1959). Rychlejší přehled o zdrobňovacím procesu poskytuje redukční poměr R80, což je zjednodušená metoda stupně zdrobnění D_r , která vychází z grafického znázornění křivek zrnitosti zavážky a produktu při 80 % propadu (Taggart 1945, Eloranta 1995, Čep a Špírková 1997).

Počítačová analýza obrazu kameniva prováděná v software SigmaScan (SigmaScan Pro, v. 5.0.0., SPSS Inc., USA) se zaměřila na zjištění hlavních parametrů použitých v této práci a to na délku dlouhé a krátké osy (Příkryl 2006) a tvarový faktor (angl. shape factor, form factor) SF (Kuo et al. 1998, Masad et al. 2007, Arasan et al. 2010, 2011).

Tvar a velikost zrn kameniva jsou základními parametry, které určují kvalitu kameniva. Pro vyjádření tvaru zrn kameniva existuje několik metod měření a způsobů vyjádření výsledků (např. Zingg 1935, Rosslein 1941, Lees 1964, Uthus 2007), proto je zásadní výběr správné metody. Podle současné platné evropské standardizace se tvar kameniva vyjadřuje pomocí indexu plochosti (EN 933-3) a tvarového indexu (EN 933-4), kde se vyjadřuje zastoupení nevhodných (nekubických) zrn v hmotnostních procentech. Pro výzkumné účely této práce tyto postupy poskytují málo relevantních dat, proto byl vyvinut vlastní experimentální postup pomocí obrazové analýzy. Tvar kameniva popisují prostorové parametry zrn, které jsou trojrozměrnými objekty.

Ke zjištění odolnosti proti drcení podle ČSN EN 1097-2 se navážka frakce kameniva 10/14 o hmotnosti 5 kg umístila spolu s 11 ocelovými koulemi do otlukového bubnu a vystavila se celkovému počtu 500 otáček (rychlost 31-33 otáček za minutu). Po skončení zkoušky se materiál vyjmul a

vytřídil, přičemž se stanovil zůstatek na síti 1,6 mm a tím se získala výsledná hodnota součinitele LA (Kahraman & Toraman 2008). K této zkoušce odolnosti proti drcení metodou Los Angeles je alternativní metodou odolnost proti drcení rázem, prováděná podle stejné normy. Celkový vzorek frakce kameniva 8/12,5, jehož množství závisí na objemové hmotnosti zrn, se rozdělil na 3 dílčí navážky. Každá z nich se podrobila deseti úderům beranu. Výsledná míra podrcení se poté vyhodnotila sítovým rozborem na sadě 5 zkušebních sít (0,2 mm, 0,63 mm, 2 mm, 5 mm a 8 mm). Hodnota odolnosti proti drcení rázem (též drtitelnost rázem) SZ se vypočetla ze součtu procentuálně vyjádřených hmotností propadů na příslušných zkušebních sítích.

Metodou ČSN EN 1097-9 se stanovuje odolnost kameniva proti působícímu silovému namáhání, otluku, otěru a obrusu jak mezi zrny kameniva navzájem, tak mezi zrny kameniva a mlecími koulemi nebo stěnami zkušebního zařízení (bubnu) ve vodním prostředí. Zkouška je určena pro simulaci obrusné činnosti pneumatik s hroty na hrubé kamenivo, používané do obrusných vrstev vozovek a rovněž ukazuje celkovou mechanickou odolnost kameniva ve stavu úplného nasycení vodou. V České republice a většině evropských zemí není tato zkouška vyžadována, proto se běžně neprovádí.

Zkouška odolnosti proti ohlazování povrchu vozovky působením kol aut stanovuje odolnost kameniva k ohlazení obrusné vrstvy vozovky pomocí přístroje na zrychlené ohlazování a simuluje působení pneumatik a příměsí abrazivních částic. Zkušební postup probíhal v souladu s postupem uvedeným v platné evropské normě ČSN EN 1097-8 Část 8: Stanovení hodnoty ohladitelnosti. Zkušební tělesa vyrobená slepením kameniva frakce 8/11 a pojiva se uchycená po obvodu nosného kola zkušebního zařízení podrobila ohlazování za současného přitlačování pogumovaného kola a rovnoměrného přidávání vody a zrnitého smirku v určitém množství a zrnitosti. Po ohlazování zkušebních těles se provedla zkouška třením pomocí zkušebního kyvadla.

4. Výsledky a diskuse

Petrografický výzkum byl proveden formou standardních petrografických rozborů horninových výbrusů a chemické analýzy, s jejichž pomocí byly horniny zařazeny v klasifikačních systémech IUGS a podle diagramu TAS. Kromě toho byl celý soubor vulkanických hornin rozdělen do pěti petrograficko-technologických skupin vymezených jako: (1) ryolity / porfyry, (2) fonolity, (3) bazalty *s.l.*, (4) spility a (5) melafyry / diabasy.

Průměrné hodnoty objemové hmotnosti zrn kameniva se pohybují od 2,406 g/cm³ u fonolitu do 3,216 g/cm³ u sodalitického nefelinitu. Průměrné hodnoty nasákavosti hornin se pohybují od 1,9 % hm. do 0,2 % hmotnosti. Průměrné hodnoty otevřené pórovitosti se pohybují v rozmezí 4,70 % obj. - 0,52 % objemu.

Z křivek zrnitostí jednotlivých frakcí je patrné, že pro všechny lokality je nejvyváženější produkt drcení frakce 11/16, který je nejbližší velikosti oblastí výstupní štěrbiny drtiče. Horniny ze skupiny melafyru s nejvyššími hodnotami stupně zdrobnění vykazují extrémně nízké zastoupení frakcí nad 16 mm a nejvyšší zastoupení frakcí pod 11 mm, avšak nedá se zároveň říci, že by se s růstem stupně zdrobnění drtiče zhoršovala tvarová hodnota (Eloranta 1995, Mitchell et al. 2008). Lze tedy konstatovat, že se vzrůstajícím D_r se nezhoršuje tvarová hodnota zrn a zároveň jsou tyto dva parametry v tomto případě na sobě nezávislé. Z výsledků bylo potvrzeno (Mitchella et al. 2008), že s růstem stupně zdrobnění se zvyšuje podíl drobného kameniva (frakce 0/4). U zkoumaných vulkanických hornin byl zjištěn rozptyl hodnot D_r od 3,33 do 6,16.

Podle současné platné evropské standardizace se tvar kameniva vyjadřuje pomocí indexu plochosti (EN 933-3) a tvarového indexu (EN 933-4), oba ukazatele vyjadřují zastoupení nevhodných (nekubických) zrn v hmotnostních procentech. Pro výzkumné účely této práce tyto postupy poskytují málo relevantních dat, proto byl vyvinut vlastní experimentální postup hodnocení pomocí obrazové analýzy. Tvar kameniva popisují prostorové parametry zrn, které jsou trojrozměrnými objekty (Přikryl 2006). Při vyhodnocení procentuálního zastoupení kubických zrn různými metodami bylo zjištěno, že nejpřísnější kritéria na tvar částic klade Zinggův přístup (Zingg 1935), naopak nejmírnější požadavky jsou podle evropské normové metodiky, která je směrodatná pro různá použití kameniva ve stavebnictví. Vliv mineralogického složení a texturního uspořádání horniny k predikci tvaru zrn se v tomto experimentu nepodařilo určit důsledkem toho, že se u všech lokalit podařilo vyrobít tvarově kvalitní frakci 11/16, u které nebyly výrazné rozdíly v rámci jednotlivých horninových skupin. Na druhou stranu se tímto potvrzuje pravidlo, že frakce, jejíž velikost tvoří střední hodnotu štěrbiny drtiče, má velmi dobrý tvar (Smith and Collis 2001). V tomto případě i navzdory typům hornin, které spíše inklinují k tvorbě plochých a protažených zrn či drcení pouze jednostupňově na čelistovém drtiči.

Nejpříznivější výsledky odolnosti proti drcení Los Angeles (tj. nejnižší hodnoty) byly zjištěny u skupiny bazaltů (rozsah hodnot 9,4-19,4) a spilitů (rozsah hodnot 8,4-14,9). Výsledky Nordické zkoušky obrusu vykazují široké rozmezí hodnot (6,4-36,9) s průměrnou hodnotou A_N 15,2 u skupiny bazaltů. Naopak u horninové skupiny spilitů je rozmezí hodnot A_N malé (7,2-15,9), velmi podobné rozsahu hodnot LA. Petrograficko-technologická skupina melafyr / diabas vykazuje mezi hodnotami LA (12,3-29,2) a A_N (16,8-43,3) velmi těsný vztah. Pro vulkanické horniny ze skupiny ryolit / porfyr je korelační vztah hodnot LA (15,1-19,3) a zkoušky obrusu A_N (7,3-21,9) ve význačné těsnosti vztahu. Nejnižší stupeň závislosti mezi hodnotami LA (14,9-23,8) a zkoušky obrusu A_N (14,2-17,6) byl zjištěn u skupiny fonolitu.

Studované vulkanické horniny vykazují rozsah hodnot odolnosti proti ohlazování (PSV) v rozmezí od 46 do 60. Nejnižší hodnoty byly zjištěny u hornin skupiny fonolitu (46-50, s průměrnou hodnotou 47) a bazaltů (48-55, s průměrnou hodnotou 51). Spility vykazují hodnoty od 47 do 54, s průměrnou hodnotou 52. Výsledkem zkoušek vulkanických hornin je zjištění, že ze 40 vzorků hornin

používaných pro výrobu drceného kameniva by bylo pro obrusné vrstvy vozovek vhodných 17 lokalit a pro nebezpečné úseky obrusných vrstev vozovek pouze 5 lokalit.

Podle předchozích provedených studií (Erichsen 2009), by měl existovat inverzní vztah mezi hodnotami PSV a A_N . Z výsledků této práce se však závislost zdá být velmi nízká vzhledem k velmi vysokým rozdílům mezi hodnotami PSV a A_N jednotlivých horninových skupin. Výsledky této práce ukazují, že závislost mezi PSV and A_N je pro celý soubor dat velmi nízká. Na vzdory tomu, že ohlazování vzrůstá se snižující se hodnotou PSV a obrušování vzrůstá se zvyšující se hodnotu A_N , vzájemný vztah mezi těmito dvěma parametry je mnohem složitější a může být různě závislý vzhledem k typu horniny a dalším vlivům (fyzikální vlastnosti, malé změně ve složení nebo stupeň zvětrání).

Korelace hodnoty PSV a petrografického složení se ukázala jako velmi problematická a byla posuzována jak z mineralogického složení, tak i velikosti a druhu vyrostlic. Při rozdělení hornin do úzkých skupin na základě jejich složení lze pozorovat určité trendy závislé vesměs na velikosti minerálů nebo odlišné tvrdosti jednotlivých komponent. Jednoznačná predikce hodnoty ohladitelnosti je však velmi obtížná, protože závisí na více faktorech jako je velikost a druh vyrostlic, minerální složení horniny, texturní uspořádání, stupeň navětrání nebo porušení horniny.

5. Závěr

Zkoumané vulkanické horniny byly na základě kvantitativního petrografického popisu klasifikovány podle mezinárodní klasifikace IUGS i na základě chemické analýzy podle diagramu TAS. Rozdělení jednotlivých hornin na základě jejich geologického stáří a horninového typu do petrograficko-technologických skupin: (1) skupina ryolitů / porfyrů, (2) skupina fonolitů, (3) skupina bazaltů *s.l.*, (4) skupina melafyrů a (5) skupina spilitů, k porovnávání míry závislosti mezi jednotlivými vlastnostmi se osvědčilo a přineslo informace, které nebyly z celého souboru vulkanických hornin patrné.

Potvrdilo se, že v oblasti velikosti výstupní štěrby vznikají zrna s vhodným tvarovým indexem a rozdíly hodnot tvarových indexů mezi lokalitami jsou malé. Nedá se proto spolehlivě určit, jak hodně petrografické vlastnosti ovlivňují tvar zrn.

Navzdory velmi podobnému principu zkoušek odolnosti proti drcení Los Angeles a obrusu pneumatikami s hroty - Nordické zkoušky (tj. mechanismu rozrušování zrn kameniva během zkoušky), byly zjištěny rozdílné výsledky i v rámci jednotlivých petrograficko-technologických skupin o podobném složení. Rozdíly mezi jednotlivými skupinami vulkanických hornin mohou být vysvětlovány variabilitou mezi makro a mikrostavbou, která významně ovlivňuje jejich fyzikální vlastnosti.

Na základě rozdělení celého souboru studovaných hornin do petrograficko-technologických skupin, je zřejmé, že nejlepší výsledky ohladitelnosti kameniva (nejvyšší hodnoty PSV) vykazují melafyry, které mají jemnozrnnou matrix a mandlovcovitou texturu. Naproti tomu tato horninová skupina vykazuje nejhorší výsledky u Nordické zkoušky, právě díky mandlovcovité textuře a jemnozrnné matrix. Korelace hodnoty PSV a petrografického složení se ukázala jako velmi problematická a byla posuzována jak z mineralogického složení, velikosti i druhu vyrostlic. Při rozdělení hornin do úzkých skupin na základě jejich složení lze pozorovat určité trendy závislé vesměs na velikosti minerálů nebo odlišné tvrdosti jednotlivých komponent. Jednoznačná predikce hodnoty ohladitelnosti je však velmi obtížná, protože závisí na více faktorech jako je velikost a druh vyrostlic, minerální složení horniny, texturní uspořádání, stupeň navětrání nebo porušení horniny. Protože různé mechanické vlastnosti vykazují jistou korelaci s horninovou stavbou, další výzkum by se měl zaměřit na podrobnější zkoumání a kvantifikaci parametrů horninové stavby, za účelem zjištění faktorů, které mají největší dopad na hodnotu PSV u drceného kamene.

Mechanická odolnost (stupeň zdrobnění, drtitelnost v rázu, odolnost proti drcení metodou Los Angeles, odolnost proti obrusu pneumatikami s hroty) vykazuje různý stupeň vzájemné závislosti. Při analýze mezi jednotlivými parametry závislosti byl použit jak celý soubor dat pro všechny typy studovaných vulkanitů, tak odděleně pro jednotlivé petrograficko-technologické skupiny. Z výsledků vyplynulo, že tyto vztahy pro různé petrograficko-technologické typy hornin vykazují nejen různou těsnost, ale v některých případech i odlišné trendy.

1. Introduction

The influence of petrographic parameters (modal composition, rock microfabric parameters as in grain size and shape) on the technological properties of rocks used for the production of crushed stone make some of the overlooked aspects in current research and practise of aggregates. Concerning the physical properties basic index parameters were tested (apparent density, open porosity and water absorption).

This study, is focused on detailed examination of volcanic rocks that contribute about 34 % of the total production of crushed stone in the Czech Republic. Size reduction of blasted rock fragments by crushing makes basis of crushed stone production (Smith and Collis 2001, Alexander and Mindess 2005). Along with defined size range, optimum shape of crushed stone particles is required (Lees 1964, Ramsay et al. 1974). Each rock type exhibits specific resistance to fragmentation (here called “crushing resistance”), depending not only on composition and physical/mechanical properties (Brattli 1992) and/or degree of weathering (Koukis et al. 2007) but also on the specific type of a crusher and its operational parameters (Eloranta 1995). Reduction ratio (i.e. degree of fragmentation) influences shape parameters of the product (Briggs and Evertsson 1998) for which the cubic shape of individual particles is the most desirable (Ramsay 1965, Hamzah et al. 2010). Feed size and close side setting has been found to be crucial factors governing shape properties (flakiness) of the product (Ramos et al. 1994, Eloranta 1995, Bengtsson and Evertsson 2006).

Shape of crushed stone particles thus makes one of the important functional properties of aggregates and governs behaviour of aggregate in structures, specifically their mechanical properties (Baalbaki et al. 1991). Presence of particles exhibiting anisotropic (flaky or elongated) shape increases their specific surface and deteriorates bonding capacity, compaction, void content or permeability (Smith and Collis 2001). Shape of particles also influences friction or resistance to further fragmentation which is fundamental property when used in cement-based or bitumen-based concretes for road surfacing (Chen et al. 2005, Masad et al. 2007, Arasan et al. 2011, Ganapati Naidu and Adishesu 2011, Long et al. 2011, Bulevičius et al. 2013, Wnek et al. 2013). Specifically in bitumen-based concrete, the shape of aggregate particles affects its durability, workability, shear resistance, tensile strength, stiffness, fatigue response, and/or optimum binder content of the mixture (Boutilier 1967, Huang 1970, Livneh and Greenstein 1972, Stephens and Sinha 1978, Huber and Heiman 1987, Kim et al. 1992, Krutz and Sebaaly 1993, Topal and Sengoz 2005, Arasan et al. 2011). Knowledge of the shape of produced crushed stone is thus fundamental for both, the producer to evaluate the efficiency of used crusher, and to the consumer to be sure that the product fulfils requirements for the specific end-use.

The strength of the aggregate can be measured by different test methods. Los Angeles attrition test is the European Standard test method for determination of resistance to fragmentation. Alternative testing procedure to the Los Angeles test is the impact test in according to European Standard EN 1097-2. The impact test has been developed to quantify the resistance against fragmentation of rock ballast. The standard is used for naturally and artificially produced aggregates that are used in constructions. Aim of the test is to obtain the impact fragmentation coefficient SZ.

If one accepts the PSV test results as a measure of the skid resistance of an aggregate, then the higher the PSV is, the greater is the coefficient of friction. Thus, an aggregate with a higher PSV should exhibit better performance within the wear surface of a road (Smith and Collis 2001, Lorenz and Gwosdz 2003). According to the same authors, a PSV over 65 indicates crushed stone highly resistant to polish-ing; however, most of the aggregates used in asphalt mixtures exhibit a PSV with-in the range of 50-60. From other technological tests exploring mechanical resistance of aggregates, Nordic abrasion value (A_N) is considered to partly simulate particle wear by polishing, although other major deterioration mechanisms such as attrition and/or crushing take place as well (Erichsen 2009). As this test is not required in the most of European countries except Scandinavia, very limited research has been published on the possible relationship between PSV and A_N till to date (see e.g. Erichsen 2009).

This study was supported financially from the research project „Creating a database for measuring properties of rocks used for the production of crushed stone“ (50213/ENV/06 1855/660/06), provided by the Ministry of Environment of the Czech Republic (major investigator prof. R. Příkryl).

2. Aims of the study

Presented thesis provides findings of influences of petrographic parameters on the technical characteristics, which currently ranks among the neglected aspects of the research building materials. Results should serve to help better understanding the relationships among the properties of rocks and help in optimizing their use as a crushed stone. Generally, the aims of the thesis is summarized as follows:

- identifying the main characteristics of rocks (geological, physical, mechanical and technological);
- experimental finding of reduction ratio in the same mode for crushing various types of volcanic rocks;
- determining shape parameters of crushed stone using 3D image analysis;
- evaluating of the obtained results;
- determining the correlation of relationships between petrography and technological characteristics;
- finding relationships with the experimental and in the Czech Republic disused methods.

3. Material and methods

Experimental material tested in this study is represented by a set of specimens collected from 40 active quarries producing crushed stone in the Czech Republic. The rock types covered by this study range to the volcanic (effusive rocks) in general, but encompass wide range of rock types in terms of their composition (both mineralogical and geochemical), rock macro- and microfabrics, and postgenetic history. For each quarry, collected bulk samples were carefully selected to represent standard production of the quarry. For the purpose of crushing resistance test, 32/63 fraction has been sampled. To be able to evaluate shape parameters of products of finer gradation from the quarry with those obtained by us in the laboratory, samples representing typically produced gradations of 8/11, 8/16 and/or 16/22 were collected as well.

Along with these technological samples, larger fragments of rocks have been collected as well. These petrographic samples were employed for the preparation of thin sections that were later examined in polarizing optical microscope. Very fine-grained nature of studied rocks made reliable quantitative modal analysis by means of optical microscopy impossible. As this knowledge is essential for placement in respective petrographic system – TAS classification (Le Bas et al. 1986; Le Maitre 1989), geochemical composition of bulk samples (major elements) was determined by standard wet silicate analysis (Kirschenbaum 1983). Samples were milled to analytical fineness and analysed in Laboratories of the Geological Institutes (Faculty of Science, Charles University). Based on the data obtained, the studied rocks have been plotted into the TAS diagram and classified following classification steps as recommended by IUGS (see Le Maitre 1989; Shelley 1992).

Experimental crushing was performed by using double toggle laboratory jaw crusher DCD-D160. For all of the materials tested, the following set up of the crusher was used: active feed opening was 105×150 mm, the width of the outlet gap was set to 14 mm, upward motion 10 mm, 120 oscillations per minute. Oversize and undersize fractions have been removed. Then, 32/63 experimental batch of known gradation has been continuously fed to the crusher. Reduction degree, sometimes denominated as crushing degree (citace), represents numerical value of the ratio in which the certain crusher reduced grain size of the material. This parameter is often used for the evaluation of the efficiency of industrial crushing (citace) and on the evaluation of suitability of crusher type for certain material. In general, this parameter expresses ratio between grain size of the feed and product. Due to the fact that the feed is composed of material showing relatively broad gradation and the product exhibits the same, the parameter is computed by using mean values of grain size of the feed and of the product. Much quicker information on the degree of size reduction can be obtained from the so-called reduction ratio parameter (R_{80}). This parameter is computed as (modified after Eloranta 1995) ratio of the size of fragments of the feed at 80 % of total weight with the size of fragments of the product at 80 % of total weight obtained by direct reading from the cumulative granulometric curve.

Digital image processing is powerful tool being recently adopted for the precise granulometric and shape analysis of aggregates (Yue et al. 1995, Broyles et al. 1996, Kuo et al. 1998, Masad et al. 2007, Arasan et al. 2010, 2011). In the recent study, digital image processing has been performed on macrophotographs obtained from imaging of representative set of particles (about 150 for each sample) prior and after experimental crushing. Particles were systematically placed in rows and columns on a holder and two images were obtained for each sample. Then, the digital images were analysed by image measurement and analysis software (SigmaScan Pro, v. 5.0.0., SPSS Inc., USA). Prior to the image processing, the real scale of the image was calibrated to operate with real dimensions. From numerous geometric parameters, that the image analysis software is capable to analyse, length of principal axes and perimeter were recorded. Length of principal axes served for the plotting of the grain shapes in conventionally used Zingg diagram (Zingg 1935 with later modifications from Rosslein 1941 and British Standard, Perimeter was employed for the computation of the so called shape (form) factor as (Přikryl 2006)

EN 1097-2 standard was used for the LA abrasion test, method for the determination of resistance to fragmentation. Test samples were oven-dried and then cooled to room temperature before they were tested. Eleven steel spheres were placed in a steel drum about 5000 g of aggregate sample and the drum was rotated for 500 revolutions at rate of 30-33 rev/min. After revolution was complete the sample was sieved through the 1,7 mm sieve. Amount of material passing the sieve, expressed as a percentage of the original weight, was the LA abrasion loss or percentage loss (Kahraman & Toraman 2008). For three tests of the impact test about 5000g of the aggregates are needed, it depend on density of sample. The sample is placed inside the mortar and after entering the die into the mortar, a blow hammer falls onto the die 20 times. After the execution of the test, the sample is sieved and weighed with the sieve sizes 8, 5, 2, 0.63 and 0.2.

Nordic abrasion test was performed following procedure recommended in the respective European standard (EN 1097-9: 1998). Laboratory specimen of aggregate fraction 11.2/16 has been washed, dried and weighed. Preparation of the appropriate amount of the test specimen requires knowledge of the bulk density, which has been determined by using pycnometric method.

Polished stone values (PSV) of the studied volcanic rocks were obtained by following the test procedure prescribed in the EN 1097-8 European standard (1999). Approximately 35-50 particles of aggregate fraction 8/11 were emplaced into an artificial resin and attached to the circuit road wheel of the test machine. After ful-filling the required number of revolutions, during which the sample was subjected to the abrading action of a rubber wheel and natural emery, the degree of polishing of the test sample was evaluated by a friction test using a pendulum device.

4. Results and discussion

The rock types covered by this study range to the volcanic (effusive rocks) in general; however, based on the variability in their composition (both mineralogical and geochemical), rock macro- and microfabrics, and postgenetic history they can be subdivided into the following petrographic/technological subgroups: basalts *s.l.*, melaphyres / diabase, spilites, phonolites, and rhyolites / porphyry. Basalts *s.l.* represent effusive rocks of Tertiary age, having generally basic to ultrabasic geochemistry. Similar age applies for phonolites. Melaphyres are mostly intermediate rocks from Upper Palaeozoic, often having pronounced amygdaloidal rock fabric. Spilite is a non-genetic term applied in older literature for altered (Na metasomatism during LT/LP metamorphism) submarine effusive rocks; in the Czech Republic these are bound to Neoproterozoic to Lower Palaeozoic terranes. Subgroup of studied rhyolite / porphyry encompasses acid rocks, belonging mostly to Palaeozoic complexes.

Average values of apparent density of aggregates are from 2,406 g/cm³ in phonolite to 3,216 g/cm³ in sodalitic nephelinite. Average values of rock water absorption are in the range of 1,9 - 0,2 % of Mass. Average values of open porosity are in the range of 4,70 - 0,52 % of Volume.

After plotting of proportions of different size fractions in the crushed product, one can see that except the 11/16 fraction, the remaining ones exhibit high variability in proportions of 0/4, 4/8, 8/11, 16/22, and 22/32 fractions. Concerning the 11/16 fraction, its balanced proportion between 25 to 30 wt. % for 75 % of studied materials (for about 10 % of them the value was in 20-25 wt. % range and for 15 % of specimens was between 30 to 40 wt. %) is due to the fact that the average value of the outlet gap was 14 mm. Two specimens of melaphyres with the highest reduction ratio exhibited the lowest proportion of size fraction above 16 mm and highest proportion of fraction below 11 mm, but their shape parameters did not deteriorate. However, the increasing reduction ratio increased content of fines (0/4 fraction). Reduction ratio is giving a range of values D_r (3,33-6,16)

Although flakiness (EN 933-3) and shape index (EN 933-4) remain the basic parameters for a description of the percentage of grains exhibiting unfavourable shape properties (non-cubic) in aggregate, image analysis of grain shapes allows more precise and probably also quicker method of evaluation of shapes. By using image analysis, more descriptive parameters of grain shapes can be obtained compared with length comparators (Přikryl 2006). In the recent study, image analysis of crushed product has been performed by using 11/16 fraction for which the most favourable shape properties were expected due to the preset size of outlet gap to 14 mm, i.e. size equal to mean value of produced fraction (Smith and Collis 2001). By using image analysis, more descriptive parameters of grain shapes can be obtained compared with length comparators (Přikryl 2006). As there is no standardised procedure, we have developed our own test procedure. Despite the fact that all studied rock types exhibit favourable shape parameters in general, small differences can be found for various rock types. The lowest percentage of grains with unfavourable shape was found for melaphyres followed by porphyry/rhyolites and for phonolites that are extremely homogeneous from rock fabric point of view. The highest percentage of these grains has been recorded for basalts and spilites which can be partly influenced by their high brittleness.

The most favourable results of Los Angeles attrition test (i.e. the lowest LA values) were obtained for basalts (range of values 9,4-19,4) and spilites (range of values 8,4-14,9) which are in fact Neoproterozoic to Late Paleozoic basalts affected by low grade metamorphism.

Nordic abrasion test exhibited much broader range of values (6,4 to 36,9) with average value at 15,2 for basalts, resulting in weak coefficient of determination (0,19). On the contrary, narrow range of values from Nordic abrasion test of spilites (7,2-15,9), very similar to the range of LA values, is reflected in higher coefficient of determination (0,56). On the contrary, the least favourable properties (LA values 12,3-29,2, Nordic abrasion 16,8-43,3) have been observed for a group of basic to

intermediate rocks classified in older literature as melaphyres and diabases (ranging from basalts to trachyandesites and/or trachybasalts) of Paleozoic age. However, in this specific group of volcanic rocks, the highest coefficient of determination (0,89) between both tests has been achieved. For volcanic rocks exhibiting acid composition (rhyolites and quartz porphyry), coefficient of determination between LA values (15,1-19,3) and Nordic abrasion test (7,3-21,9) is weak (0,42). The weakest relationship between LA values (14,9-23,8) and Nordic abrasion test results (14,2-17,6) have been observed for group of phonolites, with value of coefficient of determination 0,12.

The studied volcanic rocks exhibit wide range of skid resistance expressed as Polished Stone Value (PSV) in the range from 46 to 60 with normal distribution. The lowest values were obtained for phonolites (PSV = 46-50, with an average value of 47) and basalts (PSV = 48-55, with an average value of 51). For spilites (volcanic rocks of Neoproterozoic age that have undergone low-grade metamorphosis), the PSV ranged from 47 to 54, with an average value of 52. In terms of the suitability of the studied rocks for application in asphalt mixtures, 17 rock types (3 basalts, 5 spilites, 5 melaphyres, 2 rhyolites, quartz porphyry, and diabase) are suitable for ordinary roads; however, only 5 rock types (3 melaphyres, quartz porphyry, and diabase) are suitable for high traffic / dangerous road sections. According to previously published data (Erichsen 2009), there should exist inverse relationship between PSV and AN, which was fairly documented for specific rock types such as sandstones. However, considering all rock types included in the study of Erichsen (2009), this relationship seems to be very weak due to a very high variation of PSV and AN values of individual rock types. Focusing on the experimental data obtained by the recent study, one can see that the relationship between PSV and AN is very weak either when considering all data together. Despite the fact that polishing increases with decreasing PSV and wearing increases with increasing AN, the mutual relation between these two parameters is probably more complicated and can be also highly variable depending on the rock type and variability of other parameters (physical properties, minor variation in composition or degree of alteration within).

5. Conclusions

For various petrographic-technologic types of rocks in the study, aimed to an experimental crushing and forthcoming size and shape analysis of grains of was confirmed, that in a zone of size setting was produced grains with cubic shape index for all type of volcanic rocks and with used only one degree of crushing. A direct correlation of a grains shape with a reduction ratio of rocks was not identified.

Despite the similar principle of Los Angeles attrition test and Nordic abrasion test methods (i.e. the mechanism of deterioration of aggregate particles during the test), the results seem to be variable for rocks of similar mode of formation. The differences between individual groups of volcanic rocks can be partially explained by variable rock macro- and microfabrics that significantly affect their rock physical properties.

After splitting the whole studied set into five petrographic-technological categories (i.e. rhyolites / porphyry, phonolites, basalts *s.l.*, spilites, melaphyres), it is evident that the best performance in a skid resistance (i.e. the highest PSVs) was obtained for melaphyres due to their coarse microfabric and amygdaloidal macrofabric. However, presence of minerals with a highly contrasting hardness and specific rock macrofabric contributed to the worst performance in Nordic abrasion test of this rock group. Based on our results, it seems that correlation between the PSVs and the petrographic parameters is very complicated, and there is no single rock fabric parameter from which the PSV could be estimated. As shown on the example of the phenocrysts, the PSV does not demonstrate any strong correlation to their content and size. However, because many other rock mechanical properties do show a correlation to certain rock fabric parameters, future research should focus on more detailed examinations and quantifications of the rock fabric parameters, in order to determine which factors have the greatest impact on the PSV of crushed stone.

Mechanical resistance (reduction ratio, Impact Test, Los Angeles attrition, Nordic abrasion Test) showed a different degree of correlations. Complete data set was used for all types of studied volcanic rocks during analysis between every single parameters of correlations, and withal separated for each of petrographic-technologic group. These results indicates, that correlations gives-us not only different tightness, but also different trends in some cases.

6. Literatura (References)

- Alexander M., Mindess S., 2005. *Aggregates in concrete*. Taylor and Francis, Oxon, 448 pp.
- Arasan S., Yenera E., Hattatoglu F., Hinislioglu S., Akbuluta S., 2011. Correlation between shape of aggregate and mechanical properties of asphalt concrete: Digital Image Processing approach. *Road Materials and Pavement Design* 12(2), 239-262.
- Arasan S., Hasiloglu A.S., Akbulut S., 2010. Shape properties of natural and crushed aggregate using image analysis. *International Journal of Civil & Structural Engineering*, 1(2), 221–233.
- Baalbaki W., Benmokrane B., Chaallal O., Aitcin P.C., 1991. Influence of coarse aggregate on elastic properties of high-performance concrete. *ACI Materials Journal* 88(5): 499-503.
- Bengtsson M., Evertsson C.M., 2006. An empirical model for predicting flakiness in cone crushing. *International Journal of Mineral Processing* 79(1), 49-60.
- Blatt H., Tracy R. J., Owens B. E., 2006. *Petrology, Igneous, Sedimentary and Metamorphic*. W. H. Freeman and Company, New York, 530 str.
- Brattli B., 1992. The influence of geological factors on the mechanical properties of basic igneous rocks used as road surface aggregates. *Engineering Geology* 33(1), 31-44.
- Briggs C., Evertsson C.M., 1998. Shape potential of rock. *Minerals Engineering* 11(2), 125-132.
- Bulevičius M., Petkevičius K., Čirba S., 2013. The influence of geometric parameters on strength properties of the aggregates used to produce asphalt mixtures. *Journal of Civil Engineering and Management* 19(6), 894-902.
- Čep H., Špírková R., 1997. *Technologie úpravy kameniva*. Těžební unie Brno, KAMENIVO, Praha, 143 str.
- Eloranta J., 1995. Influence of crushing process variables on the product quality of crushed rock. Ph.D. Thesis, Tampere University of Technology, Publication 168, Finland, 118 pp.
- Erichsen E., 2009. Relationship between PSV and in situ friction: a Norwegian case study. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 68(3), 339–343.
- Ganapati Naidu P., Adishesu N.P., 2011. Influence of coarse aggregate shape factors on bituminous mixtures. *International Journal of Engineering Research and Applications* 1(4), 2013-2024.
- Hamzah M.O., Puzi M.A.A., Azizli K.A.M., 2010. Properties of geometrically cubical aggregates and its mixture design. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences* 3(3), 249-256.
- Holec M., 1959. *Drcení a třídění kamene*. Státní nakladatelství technické literatury, Praha, 337 str.
- Chen J.S., Chang M.K., Lin K.Y., 2005. Influence of coarse aggregate shape on the strength of asphalt concrete mixtures. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies* 6, 1062-1075.
- Kahraman S., Toraman O.Y., 2008. Predicting Los Angeles abrasion loss of rock aggregates from crushability index. *Bulletin of Materials Science*, 31(2), 173–177.
- Kirschenbaum H., 1983. *The classical chemical analysis of silicate rocks – the old and the new*. Geological Survey Bulletin 1547, United States Government Printing Office, Washington, 68 str.
- Koukis G., Sabatakakis N., Spyropoulos A., 2007. Resistance variation of low-quality aggregates. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 66(4), 457-466.
- Kuo C.Y., Freeman R., 1998. Image analysis evaluation of aggregates for asphalt concrete mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1615, 65–71.

- Lees G., 1964. The measurement of particle shape and its influence in engineering materials. *Journal of British Granite and Whinstone Federation* 4, 1-22.
- Le Bas M.J., Le Maitre R.W., Streckeisen R., Zanettin B., 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali–silica diagram. *Journal of Petrology*, 27(3), 745–750.
- Le Maitre R.W., ed., 1989. *A classification of igneous rocks and glossary of terms*. Blackwell, Oxford.
- Long W., Xiaoguang X., Hai L., 2011. Influence of laboratory compaction methods on shear performance of graded crushed stone. *Journal of Materials in Civil Engineering* 23(10), 1483-1487.
- Lorenz W., Gwosdz W., 2003. Manual on the geological-technical assessment of mineral construction materials. *Geologisches Jahrbuch* SH 15, 1–498.
- Masad E., Al-Rousan T., Bathina M., McGahan J., Spiegelman C., 2007. Analysis of aggregate shape characteristics and its relationship to hot mix asphalt performance. *Road Materials and Pavement Design* 8(2), 317-350.
- Mitchell C.J., Mitchell P., Pascoe R.D., 2008. Quarry fines minimisation: can we really have 10 mm aggregate with no fines? In: Walton, Geoffrey, (ed.) *Proceedings of the 14th Extractive industry geology conference*. Griffin House Publishing, str. 37–44.
- 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.
- Ramsay D.M., Dhir R.K., Spence J.M., 1974. The role of rock and clast fabric in the physical performance of crushed-rock aggregate. *Engineering Geology* 8(3), 267-285.
- Ramsay D.M., 1965. Factors influencing Aggregate Impact Value in rock aggregate. *Quarry Managers Journal* 49, 129-134.
- Ramos M., Smith M.R., Kojovic T., 1994. Aggregate shape-prediction and control during crushing. *Quarry Management* 21(11), 23-30.
- Rosslein D., 1941. *Steinbrecheruntersuchungen unter besonderer Berücksichtigung der Kornform*. Forsch a.d. Strassenwesen, Band 32, Berlin.
- Smith M.R., Collis L., eds., 2001. *Aggregates. Sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes*. 3rd ed., Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, 17.
- Taggart A.F., 1945. *Handbook of Mineral Dressing – Ores and industrial minerals*. John Willey & Sons, Inc., New York, 1905 str.
- Uthus L., 2007. *Deformation properties of unbound granular aggregates*. Ph.D. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 52 str.
- Wnek M.A., Tutumluer E., Moaveni M., Gehringer E., 2013. Investigation of aggregate properties influencing railroad ballast performance. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2374(1), 180-189.
- Zingg T., 1935. Beitrag zur schotteranalyse. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen* 15, 39–140.

CURRICULUM VITAE – ŽIVOTOPIS

Osobní údaje

Jméno: Kateřina Krutilová
Adresa trvalého bydliště: Lukavec 65, 508 01 Hořice
Telefon: +420 604 747 968
E-mail: kkutilova@yahoo.com
Národnost: česká
Datum narození: 7.12.1981

Vzdělání

Název školy: Střední průmyslová škola kamenická Hořice,
1998 - 2001 obor Těžba a zpracování kamene se specializací
na úpravnictví kameniva

dosažená kvalifikace: maturita (český jazyk, anglický jazyk,
technologie těžby, technologie úpravnictví a
praktická maturitní zkouška)

2002 - 2007

Název školy: Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy
Studijní program: magisterský
Studijní obor: geologie
Specializace: ložisková geologie
Státní závěrečné zkoušky: ložisková geologie, petrologie magmatických a
metamorfovaných hornin, petrologie
sedimentárních hornin

2007 - ...

Název školy: Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy
Studijní program: doktorské studium, aplikovaná geologie
Státní doktorské zkoušky: mechanika hornin, petrofyzika,
technická petrografie

Absolvované kurzy

Květen 2010 Mikroskopie materiálů

Září 2012 Auditor systému managementu kvality ISO 9001

Pracovní zkušenosti

2001 Zkušebna kamene a kameniva s.r.o.
laborantka

2011, září vedoucí certifikačního orgánu na výrobky č.
3045

2011, září vedoucí oznámeného subjektu č. 1392 a
autorizované osoby č. 218

2005 - 2011	Střední průmyslová škola kamenická a sochařská pedagog odborného předmětu Technologie úpravnictví kameniva
2011	Člen představenstva Svazu kameníků a kamenosochařů ČR
2011	Člen prezidia Svazu zkušeben pro výstavbu
2013	Člen Rady pro technickou normalizaci na UNMZ
2014	Vedoucí referátu přírodní kámen ve Vědeckotechnické společnosti pro sanaci a rekonstrukci památek (WTA)

Publikace/Publications

Krutilová K., Příkryl R. (2015, submitted). Relationship between Polished Stone Value (PSV) and Nordic abrasion value (AN) of volcanic rocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* (under review)

Krutilová K., Příkryl R. (2015). Relationship between Los Angeles Attrition test and Nordic abrasion test of volcanic rocks. *European Geosciences Union, General Assembly, 12-17 April 2015, Vienna, Austria* (poster)

Krutilová K., Příkryl R. (2015). Polished stone value of volcanic rocks used as aggregates: A case study from The Bohemian Masiff, Czech Republic. *Engineering Geology for Society & Territory – Volume 5*; p119-122, 4p.

Pertold Z., Šachlová Š, Šťastná A., Bílek V., **Krutilová K.**, Bílek V., Topolář L. (2014). Alkalicko-křemičitá reakce v České republice a možnosti její eliminace. *Beton TKS*, 2014, roč. 14, č. 2, s. 34-41. ISSN: 1213-3116.

Příkryl R., Čermák M., **Krutilová K.** (2014). Influences of petrographic parameters on technological properties of greywackes used for crushed stone production. *European Geosciences Union, General Assembly, 27 April – 2 May 2014, Vienna, Austria* (poster)

Krutilová K., Příkryl R. (2011). Relationship between mechanical and technologic properties of volcanic rocks used for aggregates. *European Geosciences Union, General Assembly 4-8 April 2011, Vienna, Austria* (poster)

Příkryl R., Weishauptová Z., **Krutilová K.** (2010). Exploration and testing of the authentic and alternative stone types for the monument repair: a case study of clastic sedimentary rocks at the Charles Bridge in Prague (Czech Republic). *European Geosciences Union, General Assembly, 3-7 April 2010, Vienna, Austria* (poster)

Grohová Krutilová K., Příkryl R., Dobrý M. (2008). Digital image procesing of the shape of crushed stone particles. *European Geosciences Union, General Assembly, 13-18 April 2008, Vienna, Austria* (poster)

V Praze, 30. června 2015

Kateřina Krutilová