

Objemová stálost metalurgických strusek a dalších vedlejších produktů z hutní výroby. Zkoušky objemové stálosti metalurgických strusek – plusy a mínusy krátkodobých a dlouhodobých zkoušek

František Kresta, SG Geotechnika a.s. / VŠB Technická univerzita Ostrava, e-mail:
frantisek.kresta@geotechnika.cz

Abstract

Metallurgical by-products, primarily blast furnace slag and steel slag, have ranked among important alternative sources of fill as well as of material for the structural layers in roads and motorways. Main hazards of metallurgical by-products are closely connected to their chemical and mineralogical composition, especially the presence of free lime and magnesia, and they can be resulted in volume changes.

Underestimation the potential for volume changes in the case of steel slag and steelwork waste led to deformations of the pavement on the D47 motorway near Ostrava and deformation of the floors of many halls, shopping centers and administrative buildings in the Ostrava region in Czech Republic where these materials were used in their subgrade.

Volume stability of metallurgical materials is checked both by short-term and long-term tests. Short term tests are represented by autoclave tests or steam chamber tests (see EN 1744-1). The swell test in the CBR mould according to the EN 13286-47 is recommended as long-term tests. A disadvantage of this test is fact that volume changes are slow, and results are obtained during several months, even years, as confirmed by laboratory tests lasting more than 10 years. It has to be pointed out, that we still lack the values of correlation between swelling values obtained in environments that accelerate the changes of volume (at higher temperatures) and those that would be obtained in tests performed at standard temperature and pressure, with exception of correlation of linear swelling values measured at 75°C and under standard conditions.

However, research of slags properties is not so sexy in comparison with legal disputes. Main problem was in the uncritical acceptance of certificates of very heterogeneous materials (e.g., steelwork waste), which could replace the required tests. Neither the investors nor the contractors thought of questioning the certificates issued by the State Testing Laboratory. The result was deformation of the roads and floors and multi-million losses. At the instigation of the investor and his supervision, not a single lorry of these materials was removed from the construction site where these materials were placed, and it was always written in the building lots that the relevant layer was built without defects, and it was possible to continue working.

Keywords: *steel slag, steelwork waste, autoclave test, linear swelling, volume changes*

1. Úvod

Vedlejší metalurgické produkty, především vysokopecní a ocelářské struska, patří mezi významné alternativní zdroje sypaniny i materiálu pro konstrukční vrstvy silnic a dálnic. Vždy se jedná o umělé kamenivo vznikající při výrobě železa nebo oceli nebo při výrobě neželezných kovů

Takové metalurgické vedlejší produkty bývají označovány jako "strusky" nejen laiky, ale i odbornou veřejností. Přesný popis a použití správné terminologie při označování materiálu jsou nezbytné pro stanovení okrajových podmínek jeho použití i zpětně, pro analýzu případných vad nebo poruch vozovek nebo zemních konstrukcí způsobených objemovými změnami vedlejších metalurgických produktů.

Vzduchem chlazená vysokopecní struska je materiál vznikající při výrobě železa termochemickou redukcí ve vysoké peci. Tekutá struska pomalu chladne venku na vzduchu. Získaným produktem je krystalická vzduchem chlazená vysokopecní struska (ABS).

Ocelářská struska je produktem při výrobě oceli a v závislosti na použitém procesu výroby oceli může být následujících typů:

- **BOF** ocelářská struska (struska z procesu výroby oceli vytvářející alkalickou reakci), většina starších typů ocelářských strusek z otevřených pecí.
- **LD** ocelářská struska – struska produkovaná v ocelářských konvertorech. Strusky vznikající při konvertorovém procesu (LD strusky) nacházejí uplatnění při stavbě silnic především ve vozovkových a konstrukčních vrstvách.
- **EAF** ocelářská struska – druh ocelářské strusky produkované v elektrických obloukových pecích) vzniká při procesu přetavování oceli. Většinou plní pouze funkci ochrany roztaveného kovu před oxidací.

Granulovaná vysokopecní struska je struska složená hlavně ze zrn menších než 5 mm, s hlubokými otevřenými póry, vznikající rychlým ochlazením roztaveného materiálu ve vodě. Granulovaná vysokopecní struska se jako sypanina nepoužívá.

Studený odval (nebo hutní suť – viz německý technický předpis TL BuB E-StB 07 [12]) - je heterogenní směs vedlejších metalurgických produktů (směsné metalurgické strusky, slévárenské písky a žáruvzdorné materiály – vyzdívky). Studený odval (hutní suť) může obsahovat i drobné příměsi jiných materiálů - např. dřevo, PVC apod.) [1], [3].

Na přelomu tisíciletí byly ocelářské strusky a studený odval využívány jako sypanina při výstavbě dálnic a při výstavbě logistických či obchodních center na Ostravsku. Bohužel, znalosti o těchto materiálech v té době byly nedostatečné. Několik měsíců po dokončení stavebních prací došlo k prvním deformacím vozovek nebo podlah (obrázek 1).



Obrázek 1 Deformace vozovky dálnice D47 v roce 2013 (po prvních opravách)

2. Potenciál k objemovým změnám

Nebezpečí využití vedlejších metalurgických produktů z hlediska bobtnání vyplývá především z jejich chemického a mineralogického složení.

Z chemické složení vedlejších metalurgických produktů však nelze jednoznačně odvodit, zda jsou tyto materiály stabilní či nikoli. Tvzení týkající se objemové stability odvozená pouze z chemického složení jsou velmi zavádějící a mohou vést k nesprávným závěrům. V případě vysokopecní strusky je nutné eliminovat silikátový rozpad, který je v zásadě modifikační přeměnou β -C₂S na γ -C₂S, doprovázenou změnou objemu konečného produktu o cca 10 % a snížením objemové hmotnosti

Znakem, který poskytuje nepřímý důkaz o existenci této vlastnosti ve vysokopecních struskových kamenivech, je snížená odolnost materiálu k drcení hrubé frakce nad limit 50%

Následující chemické reakce přispívají ke změnám objemu ocelářských strusek a jiných vedlejších metalurgických produktů (jako je studený odval):

- hydratace volného vápna (CaO)

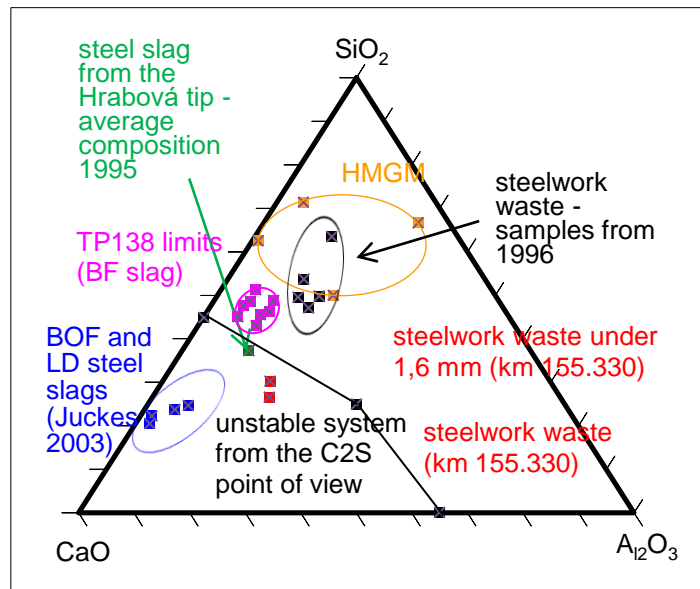
$$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$$
- hydratace periklasu (MgO)

$$\text{MgO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg(OH)}_2$$
- karbonace hydroxidu vápenatého a hydroxidu hořečnatého

$$\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$$

$$\text{Mg(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{MgCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$$
- polymorfní transformace křemičitanu vápenatého (C2S)

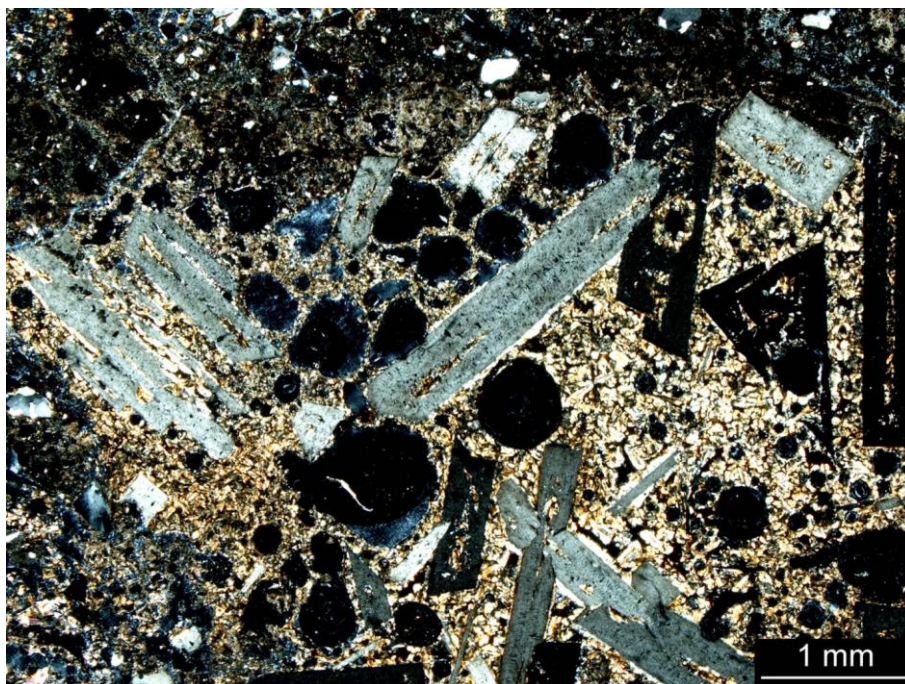
$$\beta\text{-C}_2\text{S} \rightarrow \gamma\text{-C}_2\text{S}$$
- hydratace fází C3S na CSH a reakce aluminátů.



Obrázek 2 Složení vedlejších metalurgických produktů, včetně studeného odvalu, HMGM [1] (Hüttenmineralstoffgemischen) ve fázovém diagramu CaO-SiO₂-Al₂O₃.

Hlavní příčinou objemových změn (bobtnání) ocelářské strusky a žáruvzdorných materiálů je přítomnost volného vápna a mineralogické složení příslušných materiálů. Volné vápno se v přítomnosti vody přeměňuje na portlandit Ca(OH)₂. Objemová hmotnost portlanditu je menší než objemová hmotnost oxidu vápenatého. Proto se reakce projevuje zvýšením objemu. Volné vápno pochází z nerozpuštěných (zbytkových) částic materiálů ve vsázce pece a z vápna vysráženého během procesu chlazení a při transformaci C3S na C2S [3].

Bylo provedeno porovnání mineralogického složení před a po zkouškách rozpadavosti v autoklávu s cílem definovat možný stav transformovaných materiálů v čase. Toto srovnání však bylo ovlivněno alterací minerálů v počátečních vzorcích (hydratace a karbonace) s typickými produkty (portlandit, kalcit, CSH, brucit) (obr. 3).



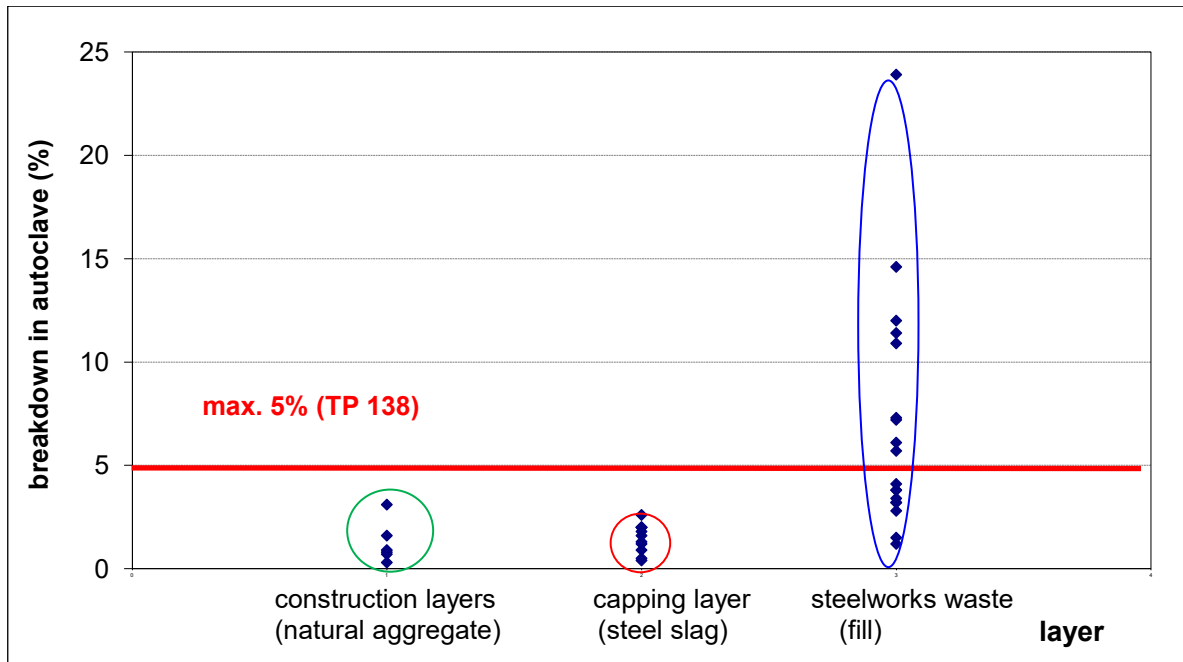
Obrázek 3 Cementační hmota ze zrn strusky. Typický produkt přeměny studeného odvalu. Vzorek po zkoušce v autoklávu. Fotografie: J. Ščučka

3. Zkoušky potenciálu k bobtnání

Objemová stabilita vedlejších metalurgických produktů se stanovuje krátkodobými i dlouhodobými zkouškami.

Krátkodobé zkoušky se provádějí za vyššího tlaku a 100% vlhkost pro ověření stability struskových zrn. Jedná se o zkoušky autoklávu nebo zkoušky v parní komoře (viz EN 1744-1) [10], [8]. Výsledky ukazují, kolik částic strusky bylo rozloženo (test v autoklávu) nebo jakých hodnot rozpínivosti bylo dosaženo (zkoušky v parní komoře). Krátkodobé zkoušky při vyšší teplotě a tlaku (např. test v autoklávu) poskytují výsledky velmi rychle. Je však složité je korelovat s chováním materiálu za normálních podmínek. Obecná krátkodobá zkouška pro jakýkoli materiál ještě nebyl navržena.

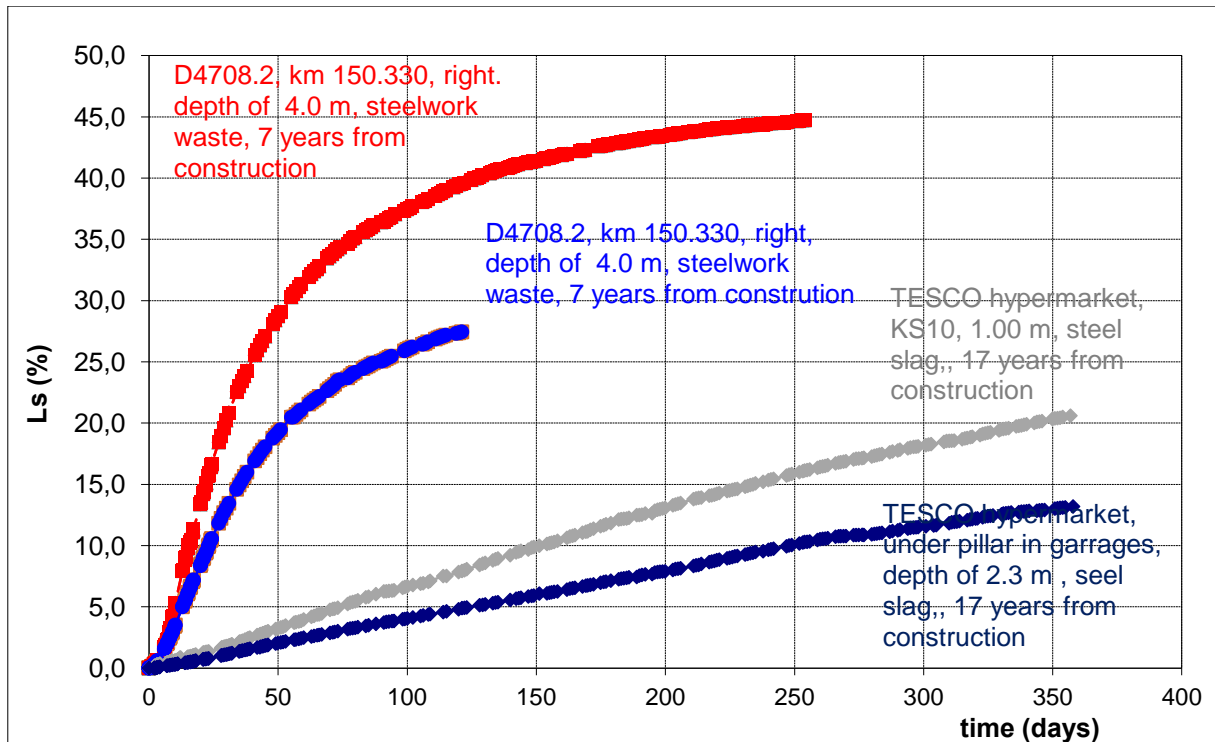
Souhrn výsledků všech zkoušek objemové stability z dálnice D47 provedených na materiálech pocházejících z konstrukčních vrstev (přírodní kamenivo), aktivní zóny (ocelářská struska) a studeného odvalu (násyp) v období 2009–2012 je uveden na obrázku 4.



Obrázek 4 Výsledky zkoušek kameniva na bázi strusky z hlediska rozpadavosti v autoklávu (dle TP 138) odebraných z konstrukčních vrstev, aktivní zóny na bázi ocelářské strusky a studeného odvalu (údaje z dálnice D47)

Dlouhodobé zkoušky jsou použitelné pro jakýkoli materiál (přírodního i umělého původu). Doporučuje se zkouška bobtnání v CBR moždíři podle EN 13286-47 [9]. Nevýhodou této zkoušky je skutečnost, že objemové změny jsou pomalé a výsledky jsou získávány během několika měsíců, dokonce i let.

Během našeho "hobby" výzkumu bylo urychlení objemových změn při zkouškách lineárního bobtnání simulováno při 75 °C a 100% vlhkosti. Některé výsledky zkoušek vedlejších metalurgických produktů při 75 °C v CBR moždíři jsou uvedeny na obrázku 5. Údaje za roky od výstavby představují dobu od použití materiálu jako sypaniny a zahájení zkoušek.



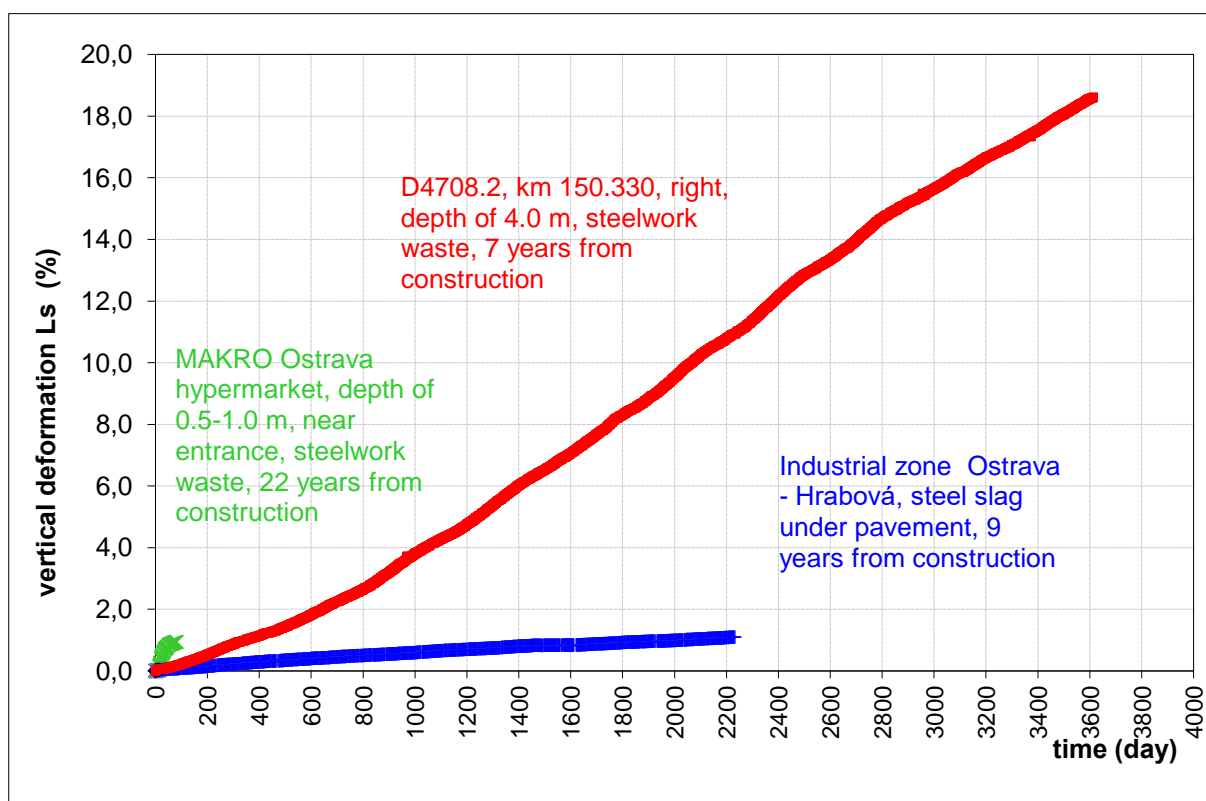
Obrázek 5 Časový průběh přírůstku vertikální deformace (bobtnání) vzorků ocelářské strusky a studeného odvalu po saturaci vodou při teplotě 75 °C



Obrázek 6 Pohled na vzorek zhuťněný 100% energií Proctor standard při teplotě 75°C po 352 dnech (hypermarket TESCO) a destrukci CBR moždíře

Objemové změny vedlejších metalurgických produktů za standardních podmínek jsou pro několik vzorků znázorněny na obrázku 6. Nejdelší měření je prováděno u jednoho vzorku z násypu dálnice D47

(12 let). Lineární bobtnání dosahovalo hodnot vyšších než 18 % a zatím nebyl pozorován žádný trend k ustalování deformací.



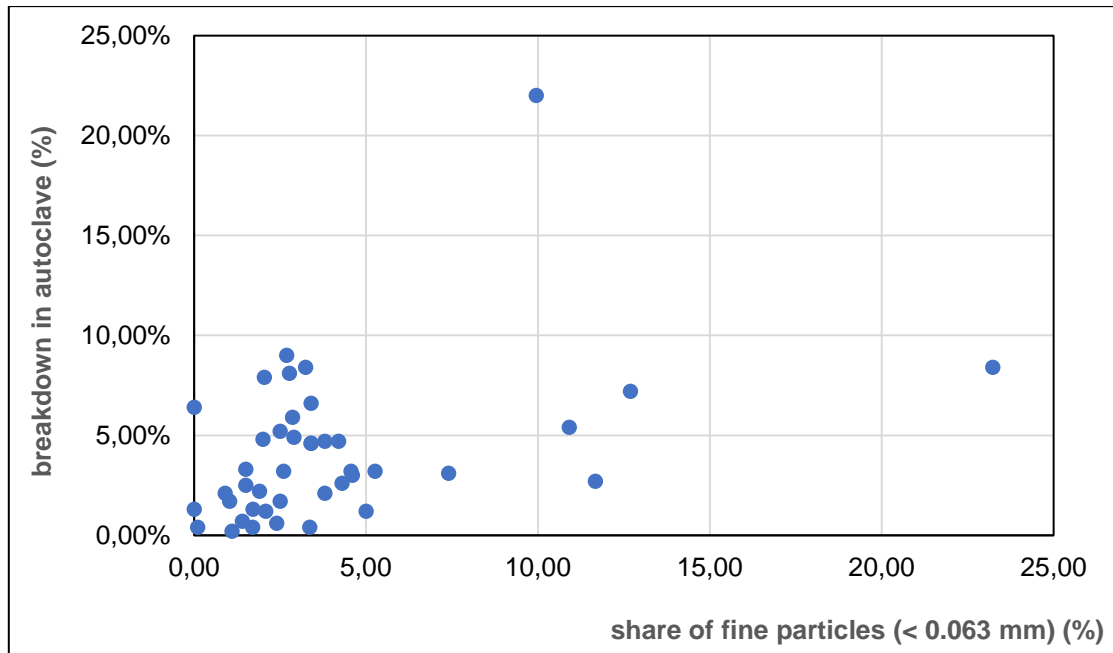
Obrázek 7 Průběh přírůstku vertikální deformace (lineárního bobtnání) vzorků studeného odvalu v čase za normálních podmínek

4. Hledání korelací

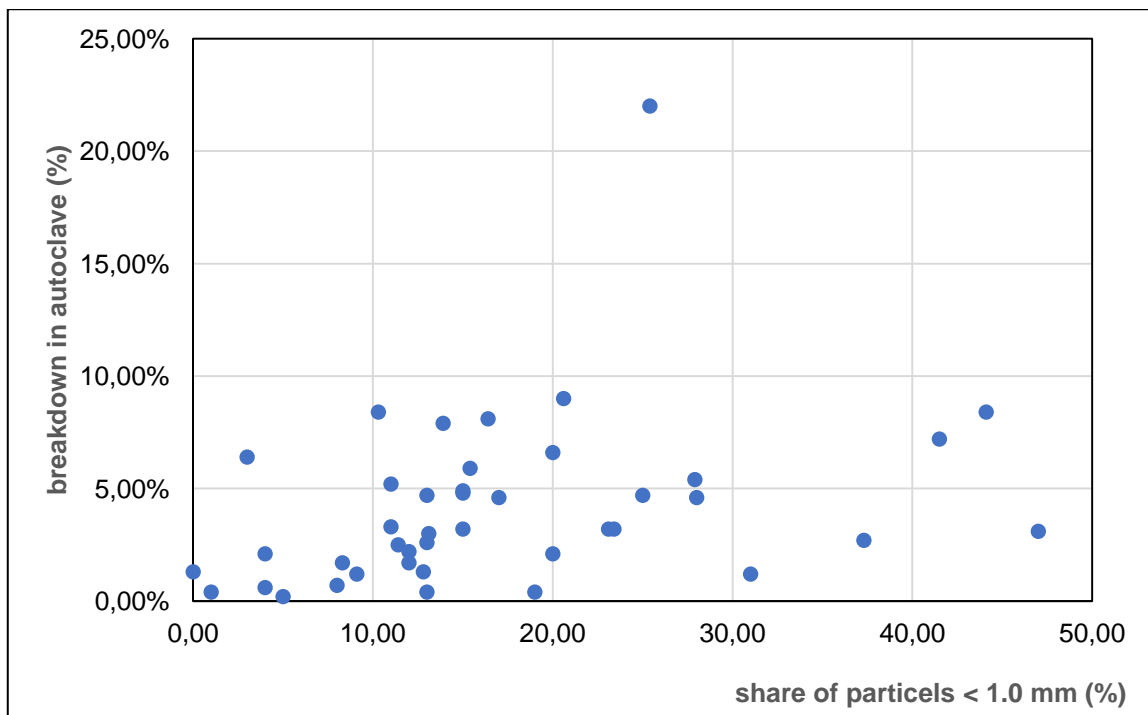
Jedna z hypotéz týkajících se objemových změn vedlejších metalurgických produktů byla zaměřena na zrnitost. Předpokládá se, že náchylnost k bobtnání se zvyšuje s vyšším podílem jemné frakce (pod 0,063 mm) nebo částic pod 1 mm. Hrubá zrna strusky během chemických procesů jsou ovlivněna pouze na jejich povrchu.

Byla pozorována určitá korelace mezi výsledky zkoušek rozpadavosti v autoklávu a obsahem jemných částic. Na druhé straně existuje velká skupina výsledků s nízkým obsahem jemných částic (< 5%) a s hodnotami rozpadavosti v autoklávu vyššími než 5% (obrázek 8).

Jakákoli korelace nebyla pozorována při porovnání rozpadavosti v autoklávu s obsahem zrn menších než 1 mm (obrázek 8).

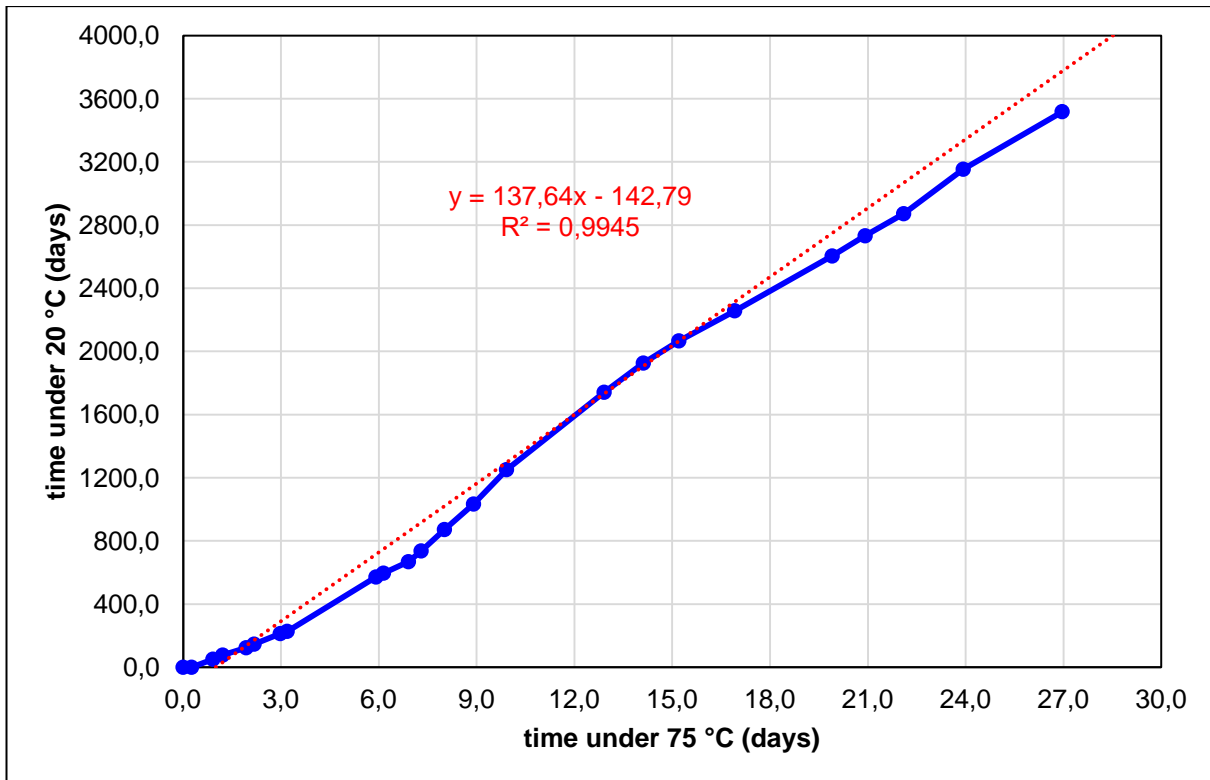


Obrázek 8 Korelace mezi hodnotami rozpadavosti v autoklávu a obsahem jemných částic



Obrázek 9 Korelace mezi hodnotami rozpadavosti v autoklávu a podílem zrn menšími než 1 mm

Je třeba zdůraznit, že nám stále chybí hodnoty korelace mezi hodnotami bobtnání získanými při zkouškách, ve kterých byly urychleny změny objemu (při vyšších teplotách) a hodnotami, které by byly získány při zkouškách prováděných při standardní teplotě a tlaku, s výjimkou korelace hodnot lineárního bobtnání měřených při 75 °C a za standardních podmínek. V tomto případě však máme data pouze pro jeden vzorek (z dálnice D47) a hodnoty lineárního bobtnání až 15 % při lineární závislosti (viz obrázek 10). Hodnoty lineárního bobtnání jsou uvedeny v grafu.



Obrázek 10 Korelace mezi vývojem lineárního bobtnání při 75 °C a za standardních podmínek (dálnice D47, km 150,330, hloubka 4,0 m)

Korelační koeficient je velmi vysoký ($r = 0,99$). Lineární vývoj bobtnání se očekává až k hodnotě lineárního bobtnání $L_s=25\%$ (viz zkoušky při 75 °C). Na základě tohoto předpokladu se předpokládá, že této hodnoty bude za normálních podmínek dosaženo k 10.3.2027 (zkoušky za normálních podmínek byly zahájeny 30.1.2012).

5. Závěry

Vedlejší produkty z metalurgických procesů vždy představují umělé kamenivo, jehož vlastnosti jsou určeny vstupními materiály a povahou použitého procesu výroby železa nebo oceli.

Mechanické vlastnosti těchto výrobků se liší v závislosti na místě a době jejich vzniku. Otázkou, která zůstává otevřená, je dlouhodobá objemová stabilita vysokopecní strusky, ocelářské strusky a dalších vedlejších metalurgických produktů. Není zde žádný problém s chemickými a mineralogickými procesy, které vedou k objemovým změnám. Problémem je však heterogenita materiálů v makroskopickém měřítku při objemech používaných v zemních pracích.

Bylo provedeno srovnání různých dostupných metod pro stanovení objemové stability vedlejších metalurgických produktů (rozpadavost v autoklávu, rozpínavost v parní komoře, bobtnání během zkoušky CBR).

Je zřejmé, že poškození budov nebo vozovek v důsledku objemové nestability ocelářské strusky nebo studeného odvalu bylo způsobeno nedostatečnou znalostí těchto materiálů. Jak ocelářská struska, tak studený odval byly certifikovány jako vysoce kvalitní výrobky (kamenivo) bez ohledu na jejich případné objemové změny. Je nutné zdůraznit, že všechny zde prezentované výsledky nebyly placeny účastníky sporu, kteří utrácejí peníze hlavně za právníky namísto výzkumu. Výzkum není sexy ve srovnání s právními spory trvajících déle než 12 let.

6. Literatura

- [1] Jaschke K et al. (1998): *Merkblatt über die Verwendung von Hüttenmineralstoffgemischen, sekundärmetallurgischen Schlacken sowie Edelstahlschlacken im Straßenbau*, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, FGSV Verlag GmbH Köln.
- [2] Juckes L M. (2003). *The volume stability of modern steelmaking slags*, Mineral processing and Extractive metallurgy, Vol. 112, No. 3, pp. 177-197.
- [3] Kresta F. (2012). *Secondary materials in highway construction*, VŠB TU Ostrava, 144 p.
- [4] Kresta F. (2014). *Metallurgical by-products in earthworks, hazards of their utilisation*, Advanced Materials Research, Vol. 1020(2014), pp.98-109.
- [5] Kresta F. (2015). *Steelwork waste – non-standard metallurgical by-product*. International Journal of Advance Research in Science and Engineering, Vol. 14, Special issue No. (02), pp. 5-16.
- [6] Kresta F.: *Steel slag and steelwork waste in earthworks and their swelling potential*. IV International seminar on Earthworks, 2018. Madrid.
- [7] Wang G. (2010). *Determination of the expansion force of coarse steel slag aggregate*, Construction and Building Materials, Vol. 24, Issue 10, pp. 1961-1966.
- [8] European Committee for Standardization (CEN) (2010). Tests for chemical properties of aggregates - Part 1: Chemical analysis (EN 1744-1)
- [9] European Committee for Standardization (CEN) (2010). Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 47: Test method for the determination of California bearing ratio, immediate bearing index and linear swelling (EN 13286-47)
- [10] Ministry of transport of Czech Republic (2011). Technical specification Utilisation of slag aggregate in road construction (TP138) (in Czech).
- [11] U.S. Department of Transport. Federal Highway Administration (1998). User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction (FHWA RD-97-148).
- [12] FGSV Verlag GmbH Köln (2013). Technische Lieferbedingungen für Böden und Baustoffe im Erdbau des Straßenbaus, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau (TL BuB E-StB 07).