MOŽNOSTI STANOVENÍ *k*-HODNOTY PRO ELEKTRÁRENSKÝ POPÍLEK

Petr Šperling, Rudolf Hela, Adam Hubáček

Článek se zabývá možnostmi stanovení tzv. *k*-hodnoty a indexu účinnosti pro elektrárenský popílek v kombinaci s cementem CEM II/(A-S) 42,5 R. *k*-hodnoty byly stanoveny na základě vztahu vodního součinitele a pevnosti v tlaku cementových malt s různými množstevními náhradami cementu elektrárenským popílkem. Z dosažených *k*-hodnot byly vytvořeny závislosti *k*-hodnoty na množství náhrady cementu elektrárenským popílkem. Dále byly stanoveny indexy účinnosti pro elektrárenský popílek v různých množstevních náhradách cementu.

POSSIBILITIES OF DETERMINING *K*-VALUE FOR FLY ASH FROM A POWER PLANT

This article deals with the ways of determining the so-called *k*-value and activity index for a power plant fly ash in combination with CEM II/(A-S) 42.5 R cement. Determination of the *k*-values was based on the relationship between the water/cement ratio and the compressive strength of cement mortars made with different degrees of replacement of the cement by a power plant fly ash. Values of *k* and the quantities of fly ash replacements were used to work out their relationship. In addition, efficiency indices for power plant fly ash in combinations with various cement substitutes were also determined.

Aktivní příměsi se používají do betonu jako náhrada cementu z několika důvodů. Mezi hlavní důvody patří např. zlepšení vlastností betonu jak v čerstvém, tak ve ztvrdlém stavu či snížení ceny betonu, protože se drahý cement částečně nahradí levnější druhotnou surovinou, jež po chemické reakci s vodou a portlanditem tvoří podobné sloučeniny jako cement při chemické reakci s vodou.

Při navrhování betonu s aktivními příměsmi se v ČR používá koncepce tzv. *k*-hodnoty, která je jen zběžně popsána v ČSN EN 206+A2 [1]. V této normě a v ČSN P 73 2404 [2] se uvádí také možnost použití tzv. koncepce ekvivalentních vlastností betonu nebo koncepce ekvivalentních kombinací, ovšem v ČR se v praxi tyto koncepce nepoužívají. *k*-hodnota se používá pro stanovení maximálního vodního součinitele a minimálního množství pojiva v betonu s aktivní příměsí s ohledem na jednotlivé stupně prostředí podle přílohy F.1. V [1] v článku 5.2.5.2. sice definice *k*-hodnoty je, avšak postup pro její stanovení pro jednotlivé typy příměsí a použitý typ cementu popsán není. Je zde pouze odkaz na CEN/TR 16639 [3], který se v ČR nepoužívá. Uvedené příklady *k*-hodnot pro aktivní příměsi jsou obecně stanovené s příliš vysokou bezpečností a lze je brát jako doporučení, které ovšem zdaleka není řešení ekonomické a nevyčerpává vazný potenciál dané aktivní příměsi. To byl hlavní důvod pro provedení experimentů, které se zabývaly jinými možnostmi a přístupy ke stanovení *k*-hodnoty pro konkrétní suroviny z konkrétního zdroje.

Index účinnosti

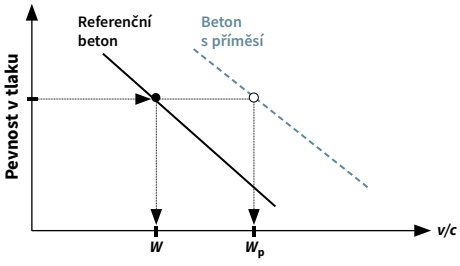
Index účinnosti I_u [%] je jednou z možností popisu vlivu aktivních příměsí (v tomto případě elektrárenského popílku) na pevnost v tlaku cementových malt. Vypočítá se podle vzorce:

$$I_u = (f_{c,a}/f_{c,ref}) \cdot 100 , \quad (1)$$

kde $f_{c,a}$ je pevnost v tlaku cementové malty s příměsí [MPa] a $f_{c,ref}$ pevnost v tlaku referenční cementové malty [MPa]. Díky tomu, že index účinnosti vystihuje poměr pevností v tlaku cementové malty s aktivní příměsí a pevností v tlaku cementové malty referenční, lze tento poměr teoreticky použít do koncepce výpočtu *k*-hodnoty.

Koncepce *k*-hodnoty

Koncepce *k*-hodnoty je preskriptivní metoda založená na porovnání trvanlivosti (nebo pevnosti) referenčního betonu s cementem A a betonu, v němž je část cementu A nahrazena příměsí. Tato příměs je započítána jako funkce vodního sou-



1 Princip koncepce *k*-hodnoty [4]
1 Principle of the *k*-value concept [4]

Tab. 1 Receptury cementových malt s náhradou portlandského směsného cementu popílkem MVM Mátrai Energia **Tab. 1** Mix designs of cement mortars with a replacement of a blended Portland cement by a MVM Mátrai Eneria fly ash

Receptura (náhrada cementu popílkem)	Cement [g]	Popílek [g]	Voda [g]	Normalizovaný písek CEN [g]	Vodní součinitel [-]
0 % - referenční	450	0	225	1 350	0,5
10 %	405	45			
20 %	360	90			
30 %	315	135			
40 %	270	180			

činitele a množství příměsi ve tvaru $v/(c + k \cdot p)$ [2]. Koncepce *k*-hodnoty povoluje použití aktivních příměsí pokud [1]:

- vztah pro výpočet vodního součinitele v/c je nahrazen vztahem $v/(c + k \cdot p)$, kde v je množství vody [kg/m^3], c množství cementu [kg/m^3], p je množství příměsi [kg/m^3] a k je *k*-hodnota,
- množství cementu s příměsí ($c + k \cdot p$) je větší než minimální množství cementu pro danou expoziční třídu [1].

Po nahrazení části cementu aktivní příměsí jsou za limitní hodnoty pevnosti v tlaku nebo trvanivosti považovány ty hodnoty, které odpovídají původnímu cementu bez použití aktivní příměsi [1].

Příměsi do betonu mohou přispět ke zlepšení různých vlastností čerstvého i zatvrdlého betonu. Abychom při návrhu betonu mohli vzít v úvahu vliv vlastností aktivní příměsi, resp. její vliv na vlastnosti betonu, *k*-hodnota používá vztah efektivního vodního součinitele a pevnosti betonu. Tento princip byl rozvinut v roce 1967 [4]. Efektivní vodní součinitel se číselně rovná vodnímu součiniteli betonu pouze s cementem stejné pevnosti ve stejném čase jako uvažovaný beton s příměsí. Pro betony s příměsí je příměs v rovnici voda/cement uvažována jako náhrada části cementu, která je opatřena hodnotou *k*. Tento faktor *k* naznačuje podíl příměsi na vývoji pevnosti ve vztahu k cementu [5]:

$$w_0 = v/(c + k \cdot p)\,, \qquad (2)$$

kde w_0 je vodní součinitel betonu bez příměsi [-], v obsah vody použité v betonu s příměsí [kg/m^3], c obsah cementu v betonu s příměsí [kg/m^3] a p obsah příměsi [kg/m^3]. (obr. 1)

Metodika experimentálních zkoušek

Předmětem experimentu bylo stanovení vlastností cementových malt s náhradou portlandského směsného cementu CEM II/A-S 42,5 R popílkem MVM Mátrai Energia v množství 10, 20, 30 a 40 % hmotnosti cementu. Byly vyrobeny cementové malty se stejným vodním součinitelem, přičemž vodní součinitel byl brán jako poměr hmotnosti vody ku součtu hmotnosti cementu a elektrárenského popílku. Jako referenční malty byly použity malty vyrobené pouze s cementem CEM II/A-S 42,5 R. Receptury jsou uvedeny v tab. 1. U cementu i elektrárenského popílku byl stanoven měrný povrch (Blaine) a u cementu také měrná hmotnost v souladu s ČSN EN 196-6 [6]. Na všech vzorcích byla sledována konzistence podle ČSN EN 1015-3 [7], na ztvrdlých cementových maltách pak pevnosti v tlaku a tahu za ohybu podle ČSN EN 196-1 [8]. Index účinnosti byl stanoven podle ČSN EN 450-1 [9]. Zrání vzorků probíhalo ve vodním uložení. Stanovení *k*-hodnoty bylo provedeno na základě vztahu vodního součinitele cementových malt a pevnosti v tlaku podle následujícího vzorce:

$$f_c = K \cdot (1/(v/c) - a)\,, \qquad (3)$$

kde f_c je pevnost v tlaku referenčního betonu [MPa], K koeficient závislý na referenčním cementu [MPa], c množství cementu v referenčním betonu [kg/m^3], v množství vody v referenčním betonu [kg/m^3] a a koeficient závislý na stáří a ošetřování betonu [-].

Tato rovnice je odvozena z Nevillova vztahu vodního součinitele a pevnosti v tlaku [10]. Díky tomu, že vychází z pevnosti betonu v tlaku, lze *k*-hodnoty stanovené pomocí této rovnice použít pouze pro návrh betonů, které nejsou zatěžovány agresivním prostředím, mrazem, chemickými rozmrazovacími látkami atd. Aby bylo možné *k*-hodnotu použít pro návrh betonů určených pro zmiňovaná prostředí, bylo by potřeba beton s aktivní příměsí na odolnost proti danému agresivnímu prostředí testovat.

Výsledky experimentálních zkoušek

V první části experimentálních prací byly stanoveny fyzikální vlastnosti použitého cementu a popílku: měrný povrch cementu byl 4 170 cm^2/g a popílku 5 490 cm^2/g, měrná hmotnost cementu byla 3,05 g/cm^3 a popílku 2,24 g/cm^3.

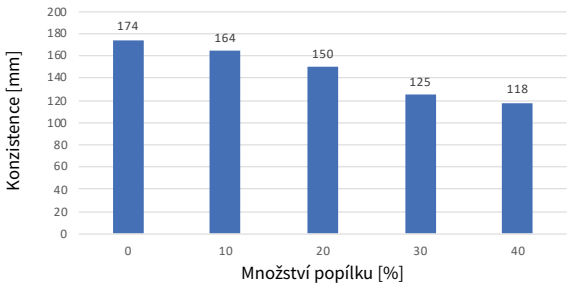
Graf na obr. 2 ukazuje vliv množství elektrárenského popílku na konzistenci čerstvých malt stanovenou podle ČSN EN 1015-3. Je vidět, že se zvyšující se náhradou cementu elektrárenským popílkem se rozlití cementové malty zhoršuje až na téměř 65 % rozlití cementové malty referenční.

Graf na obr. 3 zobrazuje pevnost v tlaku cementových malt. Ve všech zkoušených stářích můžeme vidět, že se zvyšující se náhradou elektrárenským popílkem se pevnost v tlaku snižuje. K nejvyššímu poklesu dochází ve stáří 7 dní. Cementová malta se 40% náhradou cementu elektrárenským popílkem dosahuje pouze 50 % pevnosti v tlaku referenční cementové malty. Pro následující stáří byl pokles pevností v tlaku menší, resp. na 65 % pevnosti v tlaku referenčních vzorků, a to pro malty se 40% náhradou cementu popílkem. To je způsobeno pomalejší pucolánovou reakcí popílku.

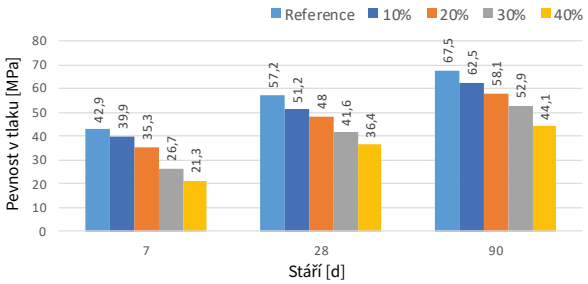
Index účinnosti je poměr pevnosti v tlaku malty s částečnou náhradou cementu elektrárenským popílkem a pevnosti v tlaku referenční malty. Z tohoto důvodu průběh indexů účinnosti odpovídá průběhům pevností v tlaku. (obr. 4)

Stanovené *k*-hodnoty mají obdobný průběh jako pevnosti v tlaku. Nejvyšší *k*-hodnoty jsou pro 10% náhradu cementu elektrárenským popílkem a s vyšší náhradou cementu popílkem se snižují. Ovšem v tomto případě se nejedná o tak velký pokles jako u pevností v tlaku. (obr. 5)

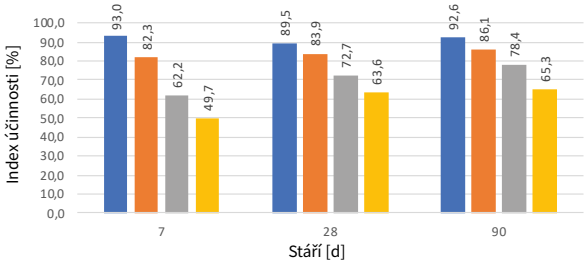
V grafu na obr. 6 jsou uvedeny lineární závislosti *k*-hodnoty na množství náhrady cementu elektrárenským popílkem ve stáří 7, 28 a 90 dní. Tyto závislosti umožňují dopočítání mezilehlých hodnot pro jiné než zde použité náhrady cementu daným popílkem. Všechny uvedené závislosti mají koeficient determinace vyšší než 0,95, z čehož lze usoudit, že se jedná o velmi přesné hodnoty.



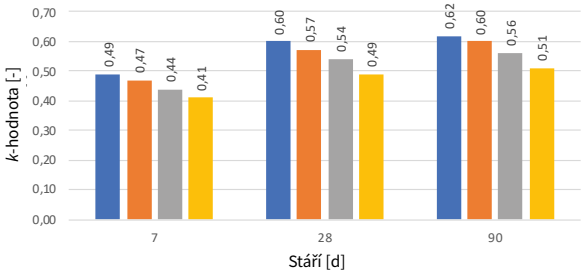
2 Konzistence cementových malt **2** Consistency of cement mortars



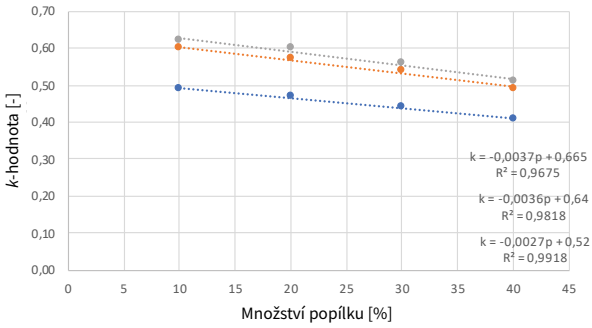
3 Pevnost v tlaku cementových malt
3 Compressive strength of cement mortars



4 Index účinnosti **4** Activity index



5 *k*-hodnota pro elektrárenský popílek **5** *k*-value for the fly ash tested



6 Závislost *k*-hodnoty na množství popílku ve stáří 7, 28 a 90 dní
6 Dependence of *k*-value on the amount of fly ash at the ages of 7, 28 and 90 days

Závěr

Cílem této práce bylo stanovení *k*-hodnoty a indexu účinnosti pro elektrárenský popílek při náhradě 10, 20, 30 a 40 % cementu CEM II/A-S 42,5 R.

Po stanovení fyzikálních vlastností cementu a elektrárenského popílku byly namíchány cementové malty s náhradou cementu elektrárenským popílkem. Konzistence čerstvých malt se s vyšším množstvím popílku snižovaly. Příčinou může být vysoký měrný povrch elektrárenského popílku a jeho vyšší vodonáročnost na ovlhčení povrchu zrn.

Nejvyšších pevností v tlaku dosahovaly referenční cementové malty bez elektrárenského popílku. S přidáním popílku se pevnosti v tlaku snižovaly až na hodnotu 50 % ve stáří 7 dní v případě 40% náhrady popílkem a na hodnotu 65 % ve stáří 28 a 90 dní s uvedenou náhradou. Tomu odpovídají i stanovené indexy účinnosti. Pokud budeme uvažovat normové požadavky na index účinnosti podle ČSN EN 450-1 [9], tak lze říci, že optimální náhrada cementu je v tomto případě 30 % a méně. Maximální povolené množství popílku v kombinaci s cementem CEM II je podle ČSN EN 206+A2 pouze 25 % [1].

Závěrem byly stanoveny *k*-hodnoty na základě vztahu vodního součinitele a pevnosti v tlaku. Uvedené *k*-hodnoty dosahují vyšších hodnot než doporučená *k*-hodnota uvedená v ČSN EN 206+A2, která je rovna 0,4 pro elektrárenský popílek v kombinaci s cementem CEM II v maximální náhradě 25 %. Podle dosažených *k*-hodnot uvedených v grafu na obr. 5 lze odvodit, že stanovené *k*-hodnoty jsou vyšší než tato doporučená hodnota již ve stáří 7 dní a se zvyšujícím se stářím vzorků nadále rostou. Při použití vyšší *k*-hodnoty při výpočtu ekvivalentního množství pojiva a vodního součinitele v návrhu betonu můžeme dosáhnout toho, že ekvivalentní množství pojiva v betonu bude vyšší, tím pádem se sníží i vodní součinitel betonové směsi, díky čemuž by se mohlo použít vyšší množství elektrárenského popílku pro jednotlivé expoziční třídy. Ovšem tento fakt a stanovené *k*-hodnoty je nadále potřeba ověřit dalšími zkouškami trvanlivosti pro jednotlivé stupně agresivity prostředí. Následně by se měla zpracovat metodika stanovení *k*-hodnoty pro různé typy příměsí.

Příspěvek byl vytvořen v rámci řešení projektu FAST-J-22-8057 Vliv cementu CEM II/A-LL na k-hodnotu pro aktivní příměsi do betonu.

Literatura:

[1] ČSN EN 206+A2. *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda.* Praha: ÚNMZ, 2021.
[2] ČSN P 73 2404. *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda – Doplňující informace.* Praha: ÚNMZ, 2016.
[3] TNI CEN/TR 16639. *Použitie koncepcie k-hodnoty, koncepcie ekvivalentných vlastností betónu a kombinovanej koncepcie ekvivalentných vlastností betónu.* Technická normalizačná informácia. 2014.
[4] SMITH, I. A. The Design of Fly-ash Concretes. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* [online]. 1967, Vol. 36, Issue 4, pp. 769–790. [cit. 2020-02-15]. ISSN 1753-7789. DOI: 10.1680/iicep.1967.8472. Dostupné z: icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/iicep.1967.8472
[5] HÁRDTL, R. The application of the *k*-value concept to ground granulated blast furnace slag. *Cement International*. 2010, Vol. 8, Issue 6, pp. 66–72. Dostupné z: researchgate.net/publication/282728386_The_application_of_the_k-value_concept_to_ground_granulated_blast_furnace_slag
[6] ČSN EN 196-6. *Metody zkoušení cementu – Část 6: Stanovení jemnosti mletí.* Praha: ÚNMZ, 2019.
[7] ČSN EN 1015-3. *Zkušební metody malt pro zdivo – Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střásacího stolku).* Praha: ÚNMZ, 2000.
[8] ČSN EN 196-1. *Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti.* Praha: ÚNMZ, 2016.
[9] ČSN EN 450-1. *Popílek do betonu – Část 1. Definice, specifikace a kritéria shody.* Praha: ÚNMZ, 2012.
[10] BADOGIANNIS, E., PAPADAKIS, V. G., CHANIOTAKIS, E., TSIVILIS, S. Exploitation of poor Greek kaolins: strength development of metakaolin concrete and evaluation by means of *k*-value. *Cement and Concrete Research* [online]. 2004, Vol. 34, Issue 6, pp. 1035–1041. [cit. 2021-12-29]. ISSN 00088846. DOI:10.1016/j.cemconres.2003.11.014. Dostupné z: sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884603004101

Ing. Petr Šperling
sperling.p@fce.vutbr.cz

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
hela.r@fce.vutbr.cz

Ing. Adam Hubáček, Ph.D.
hubacek.a@fce.vutbr.cz

všichni: Fakulta stavební VUT v Brně
Ústav technologie stavebních hmot a dílců