

# VIZUÁLNÍ ANALÝZA HUTNĚNÍ DVOU VRSTEV BETONU

Tomáš Trtik, \*

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

## ABSTRAKT

Vibrace je důležitým jevem k dosažení kvalitního stavebního materiálu, a je velmi obtížné popsat stochastický jev hutnění pomocí přesných fyzikálních rovnic. Experimentální ověření účinků vibrací na čerstvém betonu se jeví jako vhodnější přístup. Výzkum se zabývá hodnocením efektivity rozpohybování dvou navazujících vrstev čerstvého betonu uvnitř formy během hutnění. Pro vizuální hodnocení kvality hutnění byly krychelné vzorky rozděleny na dvě poloviny, které byly kontinuálně betonovány. Dolní polovina vzorku byla tvořena běžným prostým betonem s portlandským cementem, horní polovina vzorku byla tvořena identickým betonem s přidáním červeného pigmentu v dávce 5% hmotnosti cementu k možnosti vizuálního hodnocení. Sledovaným parametrem byl proces hutnění v závislosti na konzistenci betonu a frekvenci hutnění. Betonové směsi pro tělesa skládající se z více vrstev čerstvého betonu je vhodné koncipovat pro třídy konzistence betonu S3 až S1 s hutnicí frekvencí 90 Hz, která vykazovala jasný trend promíšení vrstev.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Hutnění • Beton • Frekvence • Konzistence • Amplituda

## ABSTRACT

Vibrations are important for achieving a quality construction material and it is very difficult to describe the stochastic phenomenon of compaction using physical equations. Experimental verification of the effects of vibration on fresh concrete seems to be a more appropriate approach. The research deals with the evaluation of the movement of two layers of fresh concrete inside the mold during compaction. Cube samples were continuously concreted in two layers for visual evaluation of compaction quality. The lower half of the sample was made of ordinary concrete with portland cement, the upper half of the sample was made of almost identical concrete with the addition of red pigment at a dose of 5% by weight of cement for visual evaluation. The monitored parameter was the compaction process depending on the consistency of the concrete and the frequency of compaction. Concrete mixtures for samples made of several layers of fresh concrete should be designed for consistency of concrete S3 to

S1 with a compaction frequency of 90 Hz, which showed a clear trend of mixing the layers.

## KEYWORDS

Compaction • Concrete • Frequency • Consistency • Amplitude

## 1. ÚVOD

Vibrace je důležitým jevem k dosažení kvalitního stavebního materiálu. Zhutnění betonu snižuje objem vzduchových pórů v čerstvém betonu, což vede k betonu s maximální hutností. Během hutnění ovšem existuje riziko segregace kameniva a úniku vody s částicemi cementu. Vysoké hutnosti betonu lze dosáhnout minimálním poměrem vody a cementu spolu s minimálním obsahem vzduchu, optimální dobou a frekvencí hutnění během ukládání betonu.

Norma ČSN EN 12390-2 umožňuje hutnit vzorky pomocí ponorného vibrátoru, vibračního stolu, propichovací tyče a zhutňovací tyče. Norma nedefinuje počet zhutňovacích vrstev. K dosažení správného zhutnění se doporučuje upravit počet vrstev v závislosti na konzistenci betonu a výšce formy. Podle ČSN EN 12390-2 je dosaženo optimální doby vibrací, když se již neobjevují na povrchu betonu vzduchové bubliny a povrch betonu je relativně hladký s lesklým vzhledem, bez nežádoucí segregace.

Vzhledem k obecnému doporučení normy ohledně počtu vrstev v závislosti na konzistenci betonu se předkládaný výzkum zaměřil na dvě zhutňované vrstvy čerstvého betonu pro pět základních konzistencí betonu. Vizuálně hodnotí pohyb a promíšení vrstev vlivem různých vibračních frekvencí.

## 2. EXPERIMENT

Experiment intenzity hutnění byl realizován na krychelných tělesech s hranou 100 mm. Sledovaným parametrem není maximální hutnost, která je navázána na objem vzduchových pórů, ale sledování procesu hutnění v závislosti na konzistenci betonu a frekvenci hutnění. Pro vizuální hodnocení kvality hutnění byl objem těles rozdělen na dvě přibližně stejně velké části, které byly kontinuálně betonovány díky použití dvou míchacích zařízení, která pracovala současně (Obrázek 1).

---

\* Školitel: doc. Ing. Jitka Vašková, CSc.



Obrázek 1: Druhé míchací zařízení.

Dolní polovina vzorku byla tvořena běžným prostým betonem se šedým cementem, která byla hutněna po dobu 10 sekund pro homogenizaci vrstvy (Obrázek 2).



Obrázek 2: Forma naplněná do poloviny výšky šedým prostým betonem.



Obrázek 3: Plně naplněná forma barevným betonem s pigmentem.

Horní polovina vzorku byla tvořena téměř identickým betonem, rozdíl byl v přidání červeného pigmentu v dávce 5% hmotnosti cementu k vizuálnímu hodnocení. Kompletně naplněná forma byla vystavena jedné sérii hutnění po dobu 30 s pro různé frekvence hutnění (Obrázek 3).

Hutnění betonových vzorků probíhalo pro tři různé frekvence. První zvolená frekvence 35 Hz (označena jako S) představuje minimální frekvenci, při které lze hutnit betonové vzorky na vibračním stole. Frekvence 60 Hz (označena jako M) je v současnosti běžně používanou frekvencí u vibračních stolů a zároveň se vyskytovala u dříve používaných vibračních stolů. Poslední použitá frekvence 90 Hz (označena jako H) rozšiřuje pole frekvencí hlavně pro jemnější frakce kameniva a tuto frekvenci lze označit za horní hranici používaných frekvencí pro hutnění deskových konstrukcí.

Experiment byl koncipován pro pět základních tříd konzistence (S1, S2, S3, S4 a S5), které byly stanoveny zkouškou sednutí kužele dle normy ČSN EN 12350-2.

Vibrační stůl použitý v experimentu se skládá ze dvou vibračních trubek, z nichž každá obsahuje 8 excentrů (4 vnitřní a 4 vnější), které se otáčejí kolem společné osy otáčení, maximální amplituda excentrů dosahuje 16 mm. Řada studií sledujících vliv vibrací na mechanické vlastnosti betonu publikují pouze čas vibrací, některé i použitou frekvenci. Pro lepší popis a srovnání jednotlivých studií (Howes et al. 2019, Arslan et al. 2011, Maslov et al. 2018) je důležité uvést amplitudu, případně rotační energii, přičemž tyto parametry jsou stejně důležité jako doba a frekvence vibrací.

### 3. VÝSLEDKY

Experiment byl vyhodnocován na základě fotografií, které dávají představu o chování a efektivitě rozpochybování čerstvého betonu během zhutňování. Účinek vibrací se liší v závislosti na konzistenci betonu neboli velikosti odporu proti přetváření dané směsi. Na prvních sérii fotografií (Obrázek 4, Obrázek 5 a Obrázek 6) jsou vyfoceny tři vzorky stejné konzistence, které jsou vždy seřazeny podle použité frekvence, kde levý vzorek označený jako S byl hutněn frekvencí 35 Hz, střední vzorek označený M byl hutněn frekvencí 60 Hz a pravý vzorek označený jako H byl hutněn frekvencí 90 Hz.



Obrázek 4: Vzorky konzistence S5 seřazené podle frekvence hutnění – fotografie vnějšího povrchu stěn.

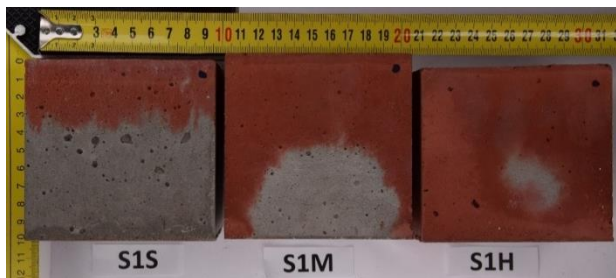
Konzistence třídy S5, kterou lze kvalifikovat jako velmi tekutou, vykazuje podobný pigmentový obrazec pro všechny použité frekvence (Obrázek 4). Tělesa jsou barevně rozdělena přibližně v polovině, což odpovídá ukládání čerstvé směsi

betonu. Dolní šedá vrstva nepatrně proniká do barevné pigmentové části, jinak nedochází k žádné změně.



Obrázek 5: Vzorky konzistence S3 seřazené podle frekvence hutnění – fotografie vnějšího povrchu stěn.

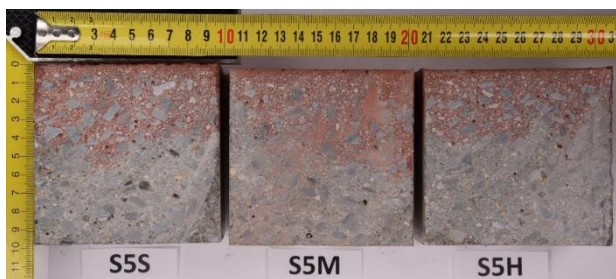
Konzistenci třídy S3 lze kvalifikovat jako velmi měkkou směs, u které se již ukázal směr pronikání vrstev na rozdíl od konzistence S5. Horní pigmentová vrstva proniká do dolní vrstvy v rozích formy a dostává se až ke spodnímu povrchu formy (Obrázek 5).



Obrázek 6: Vzorky konzistence S1 seřazené podle frekvence hutnění – fotografie vnějšího povrchu stěn.

Konzistenci třídy S1 lze označit za zavlhlou betonovou směs. Z fotografií je patrné, že se umocňuje směr pohybu horní vrstvy do dolní vrstvy směsí v rozích formy, kde pigmentová vrstva pokračuje po spodním povrchu formy do středu vzorku (Obrázek 6).

K vyhodnocení vnitřní struktury a promíchání vrstev byly všechny vzorky příčně rozříznuty diamantovou pilou ve vzdálenosti 3 cm od kraje vzorku. Vzorky na snímcích příčných řezů jsou seřazeny stejně jako u vnějších povrchů, tedy podle konzistence betonu a použité frekvence.



Obrázek 7: Vzorky konzistence S5 seřazené podle frekvence hutnění – příčný řez.

Příčný řez vzorků (Obrázek 7) splňujících konzistenci S5 se tvarově shoduje s bočním pohledem. Nedošlo k žádnému významnějšímu promíšení vrstev a během vibrace dochází pouze k redukci obsahu vzduchu.



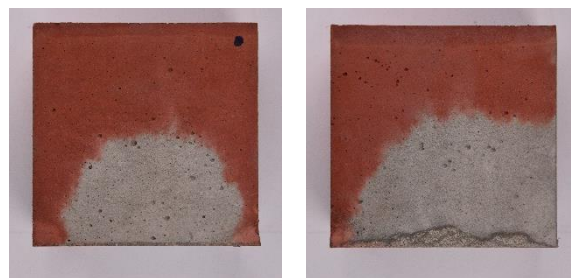
Obrázek 8: Vzorky konzistence S3 seřazené podle frekvence hutnění – příčný řez.



Obrázek 9: Vzorky konzistence S1 seřazené podle frekvence hutnění – příčný řez.

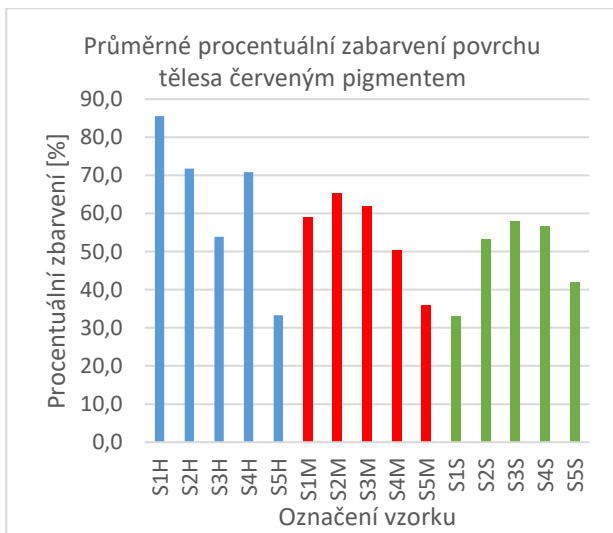
Hutnění vzorků frekvencí 35 Hz u žádné konzistence nevyvolalo vizuálně významnější promíšení vrstev, vzorky zůstaly rozdělné na původní vrstvy. Vzorky konzistence S5 a S4 nevykázaly významnější promíšení vrstev pro žádnou použitou frekvenci. Pro hutnicí frekvenci 60 Hz lze od konzistence S3 směrem ke konzistenci S1 pozorovat pronikání horní vrstvy v rozích formy směrem k dolní vrstvě (Obrázek 8). Hutnicí frekvence 90 Hz umocňuje efekt pronikání horní vrstvy, pro konzistenci S1 horní vrstva směřuje po spodním povrchu formy do středu vzorku (Obrázek 9). U všech řezů se ukázal jeden boční dominantní směr pronikání horní vrstvy, dolní vrstva je částečně vytlačována do horní vrstvy středem vzorku.

Každý vzorek byl nafocen ze všech čtyř bočních stran, byla odměřena plocha jednotlivých zbarvených ploch, a pro každou stěnu vyjádřeno procentuální zbarvení, ze kterých byl vypočítán průměr pro daný vzorek (Obrázek 10).

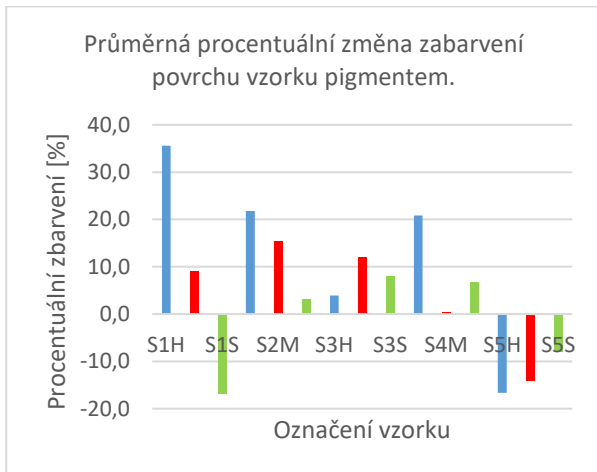




Obrázek 10: Příklad nafocení vzorku SIM ze všech čtyř bočních stěn.



Obrázek 11: Průměrné procentuální zbarvení stěn vzorku.



Obrázek 12: Procentuální změna zbarvení stěn vzorku pigmentem.

Grafy jsou rozděleny dle barev do tří částí podle frekvence hutnění. Na obrázku 11 jsou v jednotlivých škálách vzorky seřazeny vzestupně podle třídy konzistence. Pro frekvenci hutnění 90 Hz a 60 Hz je patrný klesající trend zbarvení prvku s rostoucí třídou konzistence, u které klesá odpor proti přetváření. Frekvence 35 Hz vykazuje podobné výsledky zbarvení pro více konzistencí betonu, což naznačuje nedostatečně velkou hutnicí energii. Během této této frekvence

dochází v betonu ke snižování objem vzduchových pórů v čerstvém betonu, ovšem v mnohem menší míře k promíšení dolní a horní vrstvy čerstvého betonu. Při vyšší frekvenci 90 Hz se horní vrstva čerstvého betonu dostává ke dnu formy a pokračuje do jejího středu, vysokou efektivitu hutnění potvrzuje i 86% zbarvení vzorku pro třídu konzistence S1. Na obrázku 12 jsou data seřazena podle konzistence betonu a prezentována tak, že 0% zbarvení odpovídá probarvení polovině vzorku pigmentem. Kladné hodnoty znamenají probarvení původně šedé části barevným pigmentem, záporné hodnoty naopak ústup barevného pigmentu v ploše. Výsledky ukazují jasný nárůst probarvení pro třídu konzistence S3 směrem k S1 s rostoucí frekvencí. Naopak klesající trend zbarvení pro třídu konzistence S4 a S5.

#### 4. ZÁVĚR

Betonové směsi pro tělesa skládající se z více vrstev čerstvého betonu je vhodné koncipovat pro třídy konzistence betonu S3 až S1, a jako velmi vhodná se ukázala hutnicí frekvence 90 Hz s jasným trendem promíšení vrstev. Pohyb vrstev čerstvého betonu nastává od třídy konzistence S3 a roste spolu s velikostí odporu proti přetváření směsi k třídě konzistence S1. Pro třídu konzistence S5 a S4 nedochází k pohybu ani výraznějšímu promíšení vrstev pro žádnou použitou frekvenci. Při hutnicí frekvenci 35 Hz nedošlo k významnějšímu promíšení vrstev pro žádnou konzistenci betonu. Během vibrací nastává pohyb u horní pigmentové vrstvy, která proniká do dolní vrstvy v rozích formy a dostává se až ke spodnímu povrchu formy, kde směřuje do středu vzorku. U všech řezů se ukázal jeden boční dominantní směr pronikání horní vrstvy, dolní vrstva je částečně vytlačována do horní vrstvy středem vzorku.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

Tento příspěvek vznikl za finanční podpory projektu SGS19/149/OHK1/3T/11, SGS20/109/OHK1/2T/11 a SGS21/040/OHK1/1T/11.

#### Reference

- ČSN EN 12390-2: Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti (2020). Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN EN 12350-2: Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím (2020). Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- Howes, R., Muhammad N.S. Hadi, South, W. (2019), Concrete strength reduction due to over compaction, Construction and Building Materials 197, pp. 725-733.
- Arslan, M.E., Yozgat, E., Pul, S. & Husem, M. (2011), Effects of vibration time on strength of ordinary and high performance concrete, Proceedings of the 4th WSEAS international conference on Energy and development - environment – biomedicine.
- Maslov, O., Batsaikhan, J. & Salenko, Y. (2018), The theory of concrete mixture vibratory compacting, International Journal of Engineering & Technology, pp. 239-244.