

# Pulsationsgrad - Kennzahl zur Abschätzung von maschinenbedingter Lagenbildung im Spritzbeton

## Einleitung

Der Einsatz von Drucksensoren in den Förder- bzw. Druckleitungen einer Spritzmaschine und die Zugabe eines Tracers zum Erstarrungsbeschleuniger haben gezeigt, dass es beim Spritzbetonauftrag im Nassspritzverfahren häufig durch nicht kontinuierlichen Betonförderstrom zu Lagenbildung im erhärteten Spritzbeton kommt [1–4]. Diese diskontinuierliche Förderung des Betons ist auf kurze Unterbrechungen im Förderstrom beim Wechseln der Zylinder der Doppelkolbenpumpe zurückzuführen. Technische Spezifikationen der jeweiligen Spritzmaschinen, wie zum Beispiel Kolbenlängen, Wechselgeschwindigkeit der Weiche oder Einstellung der Kolbenbewegung können dabei unterschiedlich starke Einflüsse auf den Förderstrom und das Ausmaß der Pulsation/Diskontinuität haben. Um Spritzmaschinen in Zukunft auf die Anfälligkeit für Lagenbildung testen zu können, wurde daher ein Test für den Pulsationsgrad der Maschinen entwickelt. Dieser Test wird laut derzeitigem Stand auch Teil der überarbeiteten Spritzbetonrichtlinie und ermöglicht es, Spritzmaschinen anhand des Pulsationsgrads in Gruppen zu unterteilen. Hierfür wird während des Spritzvorgangs der Druck in der Betonförderleitung kurz vor der Düse kontinuierlich aufgezeichnet, um die Zeitdauer des Druckabfalls im Verhältnis zur Gesamtdauer des einzelnen Hubs auswerten zu können. In einer ersten Versuchsreihe wurde der Pulsationsgrad an 5 aktuell im Tunnelbau eingesetzten Spritzmaschinen bestimmt und die zugehörige Lagenbildung im festen Spritzbeton untersucht.

## Methodik

In 5 Spritzmaschinen verschiedener Hersteller wurden in der Betonförderleitung kurz vor der Düse frontbündige Drucktransmitter (0-10 bar, Fa. Trafaq) mit der Rohrwandung bündig eingebaut (siehe Abb.1). Ein weiterer Drucktransmitter (0-10 bar) wurde in der Beschleunigerleitung kurz vor der Düse eingebaut. Mit einem Datenlogger wurden die Druckdaten mit einer zeitlichen Auflösung von 0,1 Sekunden aufgezeichnet.



Abb 1: Positionen der Sensoren kurz vor der Düse.

Für alle Maschinen wurden mehrere  $m^3$  einer gleichbleibenden Betonrezeptur (450  $kg/m^3$  CEM II/B-M (T-LL) 42,5 N; W/B= 0.45-0.49, Ausbreitmaß = 580-640 mm) bei 12  $m^3/h$  und bei 20  $m^3/h$  Förderleistungen über eine Zeitdauer von mindestens 10 Hügen gespritzt. Weiters wurde im Anschluss noch je Gerät von niedriger Förderleistung < 10 $m^3/h$  bis zu einer hohen Förderleistung > 20 $m^3/h$  gespritzt. Hier wurden 2 bis 10 Hüge pro Leistungsstufe aufgezeichnet.

Zusätzlich wurde der Beschleuniger mit einem Tracer (0.09 M% Na-Fluorescein) versetzt. Aus

Spritzkörpern wurden je Maschine und Förderleistung (12 und 20 m<sup>3</sup>/h) Bohrkernproben entnommen, trocken gelagert und parallel zur Spritzrichtung geschnitten. Mittels Epifluoreszenzanalyse [1,4] wurde anschließend die Beschleunigerverteilung im Spritzbeton ermittelt.

## Pulsationsgrad

Für die Auswertung des Pulsationsgrads wurden die gesamte Zeitdauer eines Hubs ( $t_1$ ) und der Maximaldruck ( $p_{max}$ ) eines Hubs aus den Druckdaten ausgelesen (siehe Abb. 2). Die Bestimmung des Maximaldrucks erfolgte über den Mittelwert des stabilen Druckbereichs eines Hubs. Zusätzlich wurde die Zeit bis zum Erreichen von 90% des Maximaldrucks ermittelt ( $t_2$ ). Aus den zwei Zeitdauern errechnet sich der Pulsationsgrad gemäß folgender Gleichung:

$$\text{Pulsationsgrad eines Hubes [\%]} = \frac{t_2}{t_1} \cdot 100$$

$t_1$ ...gesamte Zeitdauer eines Hubs

$t_2$ ...Zeitdauer vom Ende des Hubs bis zum Wiederanstieg des Drucks auf 90% des Maximaldrucks  $p_{max}$

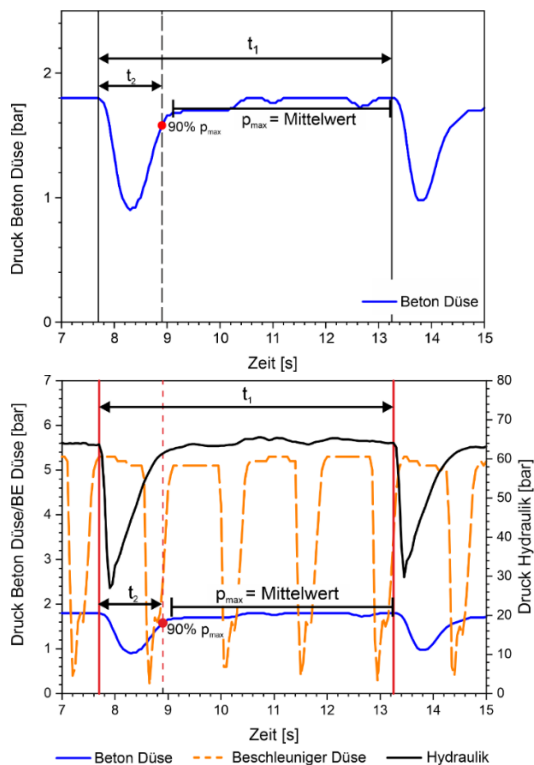


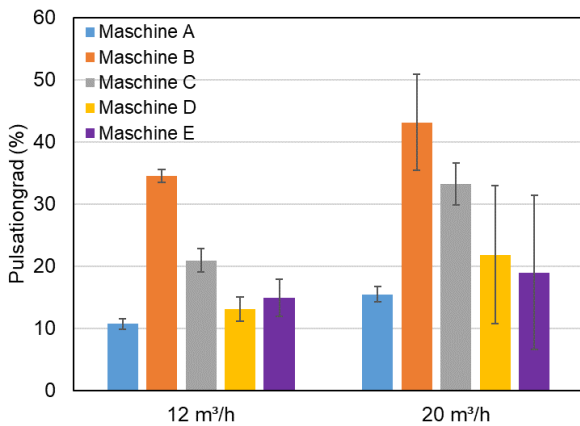
Abb 2: oben: Definition des Pulsationsgrads aus dem zeitlichen Druckverlauf in der Betonleitung kurz vor der Düse. unten: Beispiel mit Druckverlauf in der Betonleitung und in der Beschleunigerleitung (Beschleunigerförderung mittels Schlauchquetschpumpe).

## Ergebnisse und Diskussion

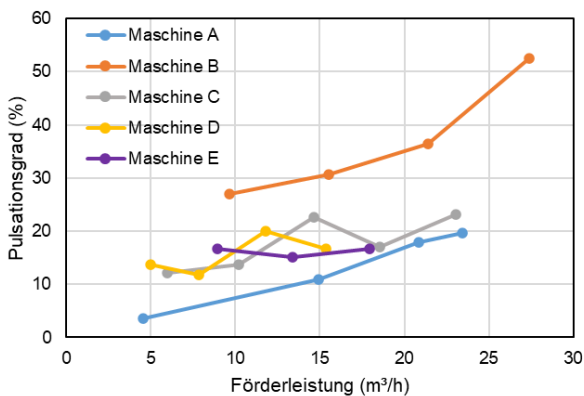
Die Druckmessungen zeigten bei allen Maschinen einen gewissen Druckabfall durch das Wechseln zwischen den Pumpenzylindern. Es konnte daher bei allen 5 Maschinen ein Pulsationsgrad bestimmt werden, wobei sich teils große Variationen feststellen ließen (siehe Abb. 3). Weiters wurde festgestellt, dass die Verwendung von Schlauchquetschpumpen zur Beschleunigerförderung zu einer (im Vergleich zum Beton hochfrequenten) Pulsation des Beschleunigerstroms führte, was bei Spritzmaschinen mit per Schneckenpumpe gefördertem Beschleuniger ausblieb.

Betrachtet man die berechneten Pulsationsgrade bei Spritzleistungen von 12 und 20 m<sup>3</sup>/h, so können die getesteten Maschinen in 2 Gruppen eingeteilt werden: Maschine B und C mit Pulsationsgraden > 20 % ab einer Förderleistung von 12 m<sup>3</sup>/h und die Maschinen A, D und E mit < 20 %. Generell ist für alle Geräte ein Anstieg des Pulsationsgrades bei Erhöhung der Förderleistung von 12 m<sup>3</sup>/h auf 20 m<sup>3</sup>/h zu beobachten. Auch die Standardabweichung zeigte mit Ausnahme der Maschine A eine deutliche Zunahme bei höheren Förderleistungen, was auf größere Variationen zwischen den einzelnen Hüben bzw. auf häufigere signifikante „Druckausschläge“ (singuläre Druckerhöhungen) während eines Hubes zurück zu führen ist.

Der Pulsationsgrad wurde auch bei kontinuierlich zunehmender Förderleistung bestimmt. Aus den Ergebnissen in Abb. 4 ist ersichtlich, dass der Pulsationsgrad der Maschine C ab einer Förderleistung von 15 m<sup>3</sup>/h knapp bei ca. 20% liegt. Lediglich Maschine B weist bereits ab einer Förderleistung von 10 m<sup>3</sup>/h einen Pulsationsgrad deutlich > 20% auf. Es muss jedoch erwähnt werden, dass aufgrund der geringen Anzahl (2-10) aufgezeichneter Hübe je Leistungsstufe die Daten eine größere Streubreite aufweisen. Generell ist aber auch bei kontinuierlicher Steigerung der Förderleistung eine Zunahme der Pulsation zu beobachten.

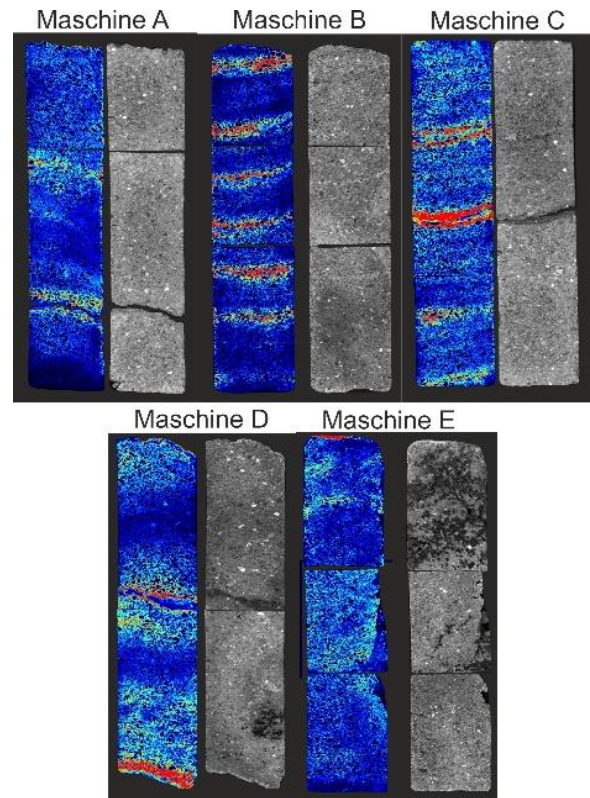


**Abb 3: Pulsationsgrade (Mittelwert von 10-15 Hügen) der 5 Maschinen bestimmt bei den 2 Förderleistungen von 12 und 20 m³/h**



**Abb 4: Pulsationsgrade mit steigender Förderleistung**

Die Epifluoreszenzanalyse an Spritzbetonbohrkernen zeigt auch ein ähnliches Bild wie die Ergebnisse des Pulsationsgrades. Am Beispiel von mit 12 m³/h gespritzten Bohrkernen ergeben sich für die Maschinen A und E geringe Lagenbildungen (siehe Abb. 5). Beim Bohrkern von Maschine D sind 2 deutliche Lagen ersichtlich (Bereiche mit Erhöhung der Fluoreszenz). Der höchste Anteil an Lagen wird im Bohrkern der Maschine B beobachtet, welche auch den deutlich höchsten Pulsationsgrad aufweist.



**Abb 5: Tracerverteilung in Bohrkernen gespritzt mit 12m³/h. Rot bedeutet dabei eine hohe Fluoreszenz bzw. BE-Konzentration.**

## Fazit

Der Pulsationsgrad ermöglicht es, eine Spritzmaschine hinsichtlich Kontinuität der Förderleistung zu beurteilen. Ziel ist es, Maschinen mit geringer Pulsation und dadurch gleichmäßigere Spritzbetonqualität von Maschinen mit höherer Pulsation und entsprechend inhomogenerer Spritzleistung unterscheiden zu können. In Abhängigkeit der für ein Bauteil erforderlichen Qualität und Homogenität des Spritzbetons kann eine entsprechende Spritzmaschine und maximale Förderleistung zur Herstellung des Spritzbetons gewählt werden.

Zur Bestimmung des Pulsationsgrads einer Spritzmaschine sollten mindestens 10 Hübe pro konstanter Förderleistung aufgezeichnet und ausgewertet werden. Aus der vorliegenden Untersuchung und den ermittelten Streubreiten speziell bei höheren Förderleistungen ist zu folgern, dass sinnvollerweise die Anforderungen an den Pulsationsgrad als Fraktile-Wert (z.B. 90%-Fraktile) vorgegeben werden.

## Referenzen

1. Sakoparnig, M., Koraimann, G., Briendl, L., Steindl, F., Angerer, T., Lindlar, B., Kusterle, W., Mittermayr, F.: Visualization and analysis of inhomogeneties in shotcrete (in German; Lagenbildung Teil 2: Visualisierung und Untersuchung von Inhomogenitäten im Spritzbeton), In: R. Galler, G. Goger, W. Kusterle (eds.) Spritzbeton-Tagung 2021, pp. 27–37. (2021).
2. Juhart, J., Briendl, L., Sakoparnig, M., Lindlar, B., Röck, R., Johannes, F., Florian, M., Kusterle, W.: Investigations on the pumping of wet-mix shotcrete and layer formation in applied shotcrete (in German; Lagenbildung - Teil 1: Untersuchung zur Förderung von Nass-Mischgut und zur Lagenbildung im aufgetragenen Spritzbeton), In: R. Galler, G. Goger, W. Kusterle (eds.) Spritzbeton-Tagung 2021, pp. 10–26. (2021).
3. Jolin, M., Beaupre, D.: Understanding wet-mix shotcrete; mix design, specifications and placement. Surf. Support Min. 263–267 (2003).
4. Sakoparnig, M., Galan, I., Kusterle, W., Lindlar, B., Koraimann, G., Angerer, T., Steindl, F.R., Briendl, L.G., Jehle, S., Flotzinger, J., Juhart, J., Mittermayr, F.: On the significance of accelerator enriched layers in wet-mix shotcrete. Tunn. Undergr. Sp. Technol. 131 (October 2022), 104764 (2023).