

Theoretische und praktische Funktionsweise des Monument Fillers

1. Beschreibung

In den Entwicklungsuntersuchungen zum Monument Filler wurden umfangreiche Untersuchungen der verdübelten Grabmalanlagen bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen durchgeführt, um potenzielle Bruchbilder (Rissbildung im Bereich von Armierungen) des Steins bei der Verankerung zu vermeiden. In diesen Untersuchungen hat der Monument Filler sehr gut abgeschnitten. Neben dem Einfluss der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Naturstein, Metall und Dübelmasse spielt auch der **Reaktionsschwund der Dübelmasse** bei der Entstehung eines Schadens eine entscheidende Rolle. In Abbildung 1 ist die Funktionsweise des Monument Fillers vereinfacht schematisch dargestellt. Aufgrund der kurzen Topfzeit von 13 bis 17 min bei 20 °C und der Haftung des Klebstoffes an Stein- und Metallwandung äußert sich der Reaktionsschwund neben einer leichten Einbuchtung der Reaktionsmasse an der Sichtseite auch in der Ausbildung nach innen gerichteter Spannungen. Diese nach innen gerichteten Spannungen können dadurch unterschiedliche Wärmeausdehnungen der eingesetzten Werkstoffe Stein, Dübelmasse und Metall ausgleichen.

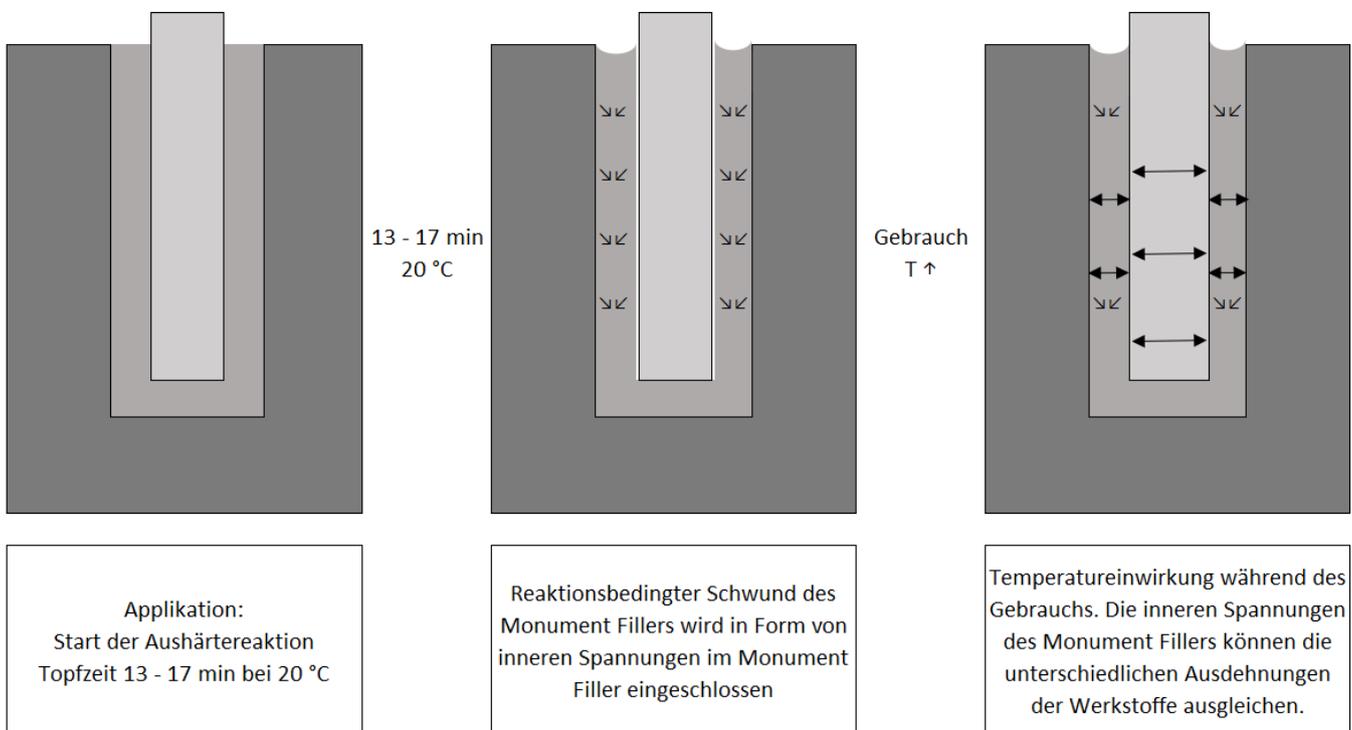


Abbildung 1: Vereinfachte schematische Darstellung der Funktionsweise des Monument Fillers

2. Untersuchung

- Externe Prüfung des thermischen Längenausdehnungskoeffizienten des Monument Fillers beim Süddeutschen Kunststoffzentrum (SKZ) in Würzburg, Messung von – 50 °C bis 200 °C
- Messung des Reaktionsschwundes des Monument Fillers an der Festkörper-Dichtewaage
- Zusammenhang zwischen Wärmeausdehnung und Schwund mit Bezug auf ein potenzielles Schadensbild ermitteln

3. Ergebnisse

- **Glasübergangstemperatur und thermischer Längenausdehnungskoeffizient des Monument Fillers**

Die Ergebnisse der Messung des SKZ werden in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Mittelwerte der thermischen Längenausdehnungskoeffizienten (α) und Glasübergangstemperatur (T_g) aus der Messung des SKZ

	Mittelwert
α -50 °C bis T_g / 10^{-6} K^{-1}	40 ± 2
α T_g bis 200 °C / 10^{-6} K^{-1}	120 ± 3
T_g / °C	62 ± 4

- **Schwundmessung Monument Filler**

Der Schwund des Monument Fillers liegt bei $3,8 \pm 0,1 \%$.

- **Zusammenhang Wärmeausdehnung und Schwund**

Um einen praktischen Zusammenhang zwischen den bestimmten thermischen Längenausdehnungskoeffizienten und dem Schwund zu erläutern, wird ein rechnerisches Beispiel erstellt, in dem die Dübelmasse keinerlei Metallanhaftung aufweist. Aufgrund des Schwunds von 3,8 % kommt es so zu einem Spalt zwischen Dübelmasse und Metall. In der Praxis hat der Monument Filler nach dem Setzen des Dübels eine gewisse Metallanhaftung, wodurch es zu keiner optischen Spaltausbildung kommt. Es wurde ein Bohrlochdurchmesser von 16 mm und ein Metalldübeldurchmesser von 12 mm für die Berechnungen verwendet. Dadurch ergibt sich eine Schichtdicke der Dübelmasse von 2 mm. Abbildung 2 (links) stellt dies schematisch dar. Sollte die Dübelmasse keine Metallanhaftung aufweisen, so würde sich aufgrund des Schwundes von 3,8 % ein Spalt von jeweils 0,076 mm zwischen Metall und Dübelmasse entwickeln (Abbildung 2 rechts).

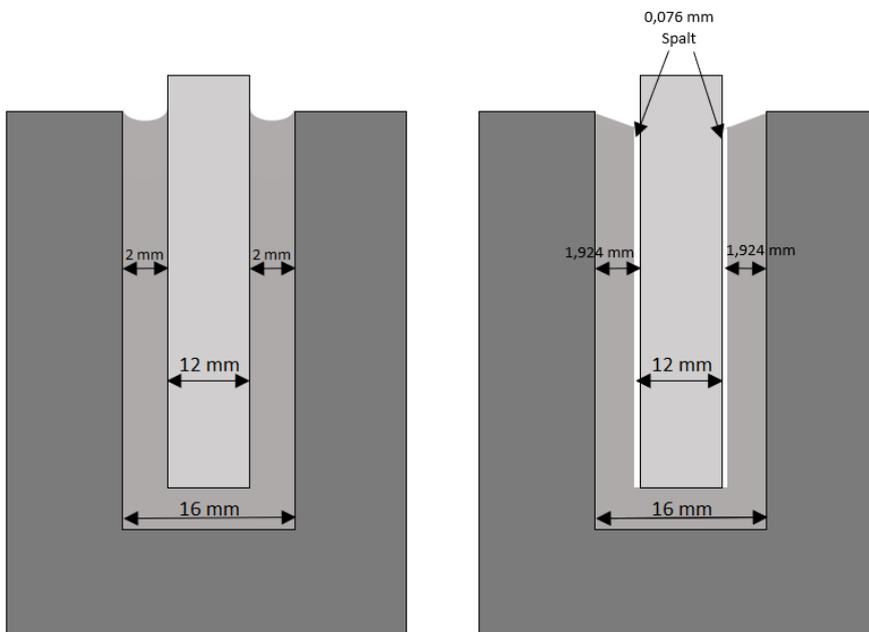


Abbildung 2: Schematischer Aufbau der Grabsteinverankerung, links Monument Filler Ist-Zustand aufgrund Metallanhaftung, rechts Theoriebeispiel sofern keine Metallanhaftung vorhanden und Schwund des Monument Fillers von 3,8 %

Wird nun die Grabsteinverankerung von 20 °C auf 70 °C erwärmt, kommt es zur Wärmeausdehnung des Steins, der Dübelmasse und des Metalls. Mittels Formel (I) kann so die jeweilige Wärmeausdehnung ΔL der Werkstoffe berechnet werden.

$$(I) \Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T$$

Da der Stein im Bereich des Bohrlochdurchmessers starr verankert ist, muss dieser Bereich mit einem Durchmesser von 16 mm für die Wärmeausdehnung des Steins berücksichtigt werden (Vergleich Abbildung 3). Diese weitet das Bohrloch und wirkt der Rissbildung durch die Wärmeausdehnung des Metalls und der Dübelmasse entgegen.

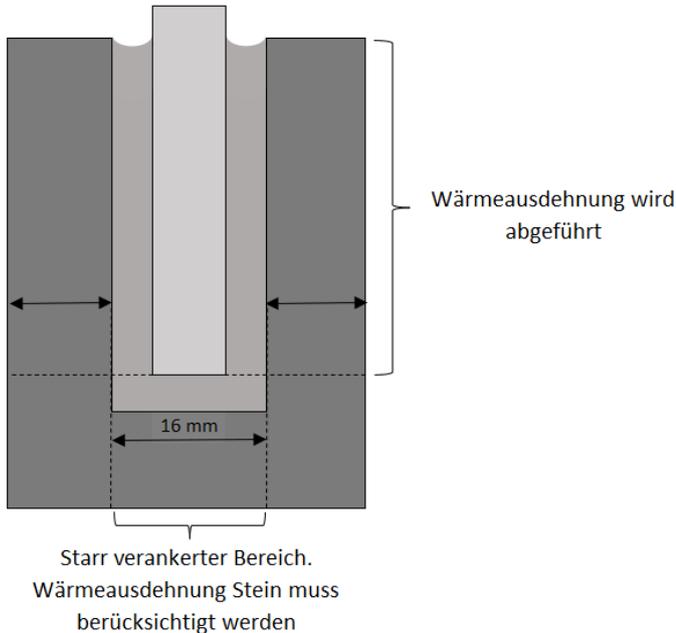


Abbildung 3: Berücksichtigung des Bohrlochdurchmessers bei der Wärmeausdehnung des Steins

Tabelle 3 stellt die Ergebnisse der Wärmeausdehnungen dar. Hier wird die Ausdehnung des Dübels, die beidseitige Ausdehnung der Dübelmasse Monument Filler bei einem 2 mm Spalt wie im praktischen Beispiel und die der Rissbildung entgegenwirkende Steinausdehnung berücksichtigt. Demnach wirkt in dem Bohrloch eine Wärmeausdehnung von 0,010 mm auf den Stein. Der in der Theorie beschriebene beidseitige Spalt von jeweils 0,076 mm, insgesamt also 0,152 mm, wäre demnach größer als die wirkende Ausdehnung von 0,010 mm und vermeidet dadurch eine Rissbildung.

Tabelle 2: Berechnung der Wärmeausdehnung bei einem ΔT von 50 K (20 °C bis 70 °C);
rot: Wärmeausdehnung mit Einfluss auf potenzielle Rissbildung, grün: wirkt Rissbildung entgegen
Thermische Längenausdehnungskoeffizienten α verschiedener Werkstoffe. Literatur: Werkstoffdatenblatt: Thyssen Krupp Materials Europe, A. Böge, J. Eichler: Physik für technische Berufe, Zugriff über <https://www.schweizer-fn.de/stoff/waermedehnung/waermedehnung.php>, 18.03.2025

	$\alpha / 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$\varnothing L / \text{mm}$	$\Delta L / \text{mm}$
Metалldübel Bsp. Edelstahl X6Cr17 (Werkstoffnr. 1.4016)	10 (für +20 °C bis +100 °C)	12	0,006
Dübelmasse Monument Filler Praxis (kein Spalt)	40 (für +20 °C bis +70 °C) aus SKZ Messung	2	0,004
Wärmeausdehnung Metалldübel + Dübelmasse $\Delta L(\text{Metall}) + 2 \times \Delta L(\text{Monument Filler Praxis, da beidseitig})$			0,014
Thermische Ausdehnung Stein (Bsp. Granit) führt zur Bohrlochweiterung und wirkt somit entgegen	3 – 8 (für 0 °C bis +100 °C) 5 zur Berechnung	16	0,004
Wirkende Wärmeausdehnung $\Delta L(\text{Metall}) + 2 \times \Delta L(\text{Dübelmasse, da beidseitig}) - \Delta L(\text{Stein})$			0,010
Durch Schwund des Monument Fillers theoretischer beidseitiger Spalt → Größer als wirkende Wärmeausdehnung → Keine Rissbildung			0,152

Zur Untersuchung des Einflusses der Einzelkomponenten, werden die in Abbildung 4 dargestellten Aufbauten betrachtet. Hier wird zum einen der passgenaue Einsatz des Metalldübels ohne Dübelmasse (links) betrachtet und der Einsatz der Dübelmasse Monument Filler ohne den Metalldübel (Mitte und rechts). Dabei entspricht der Durchmesser des Dübels bzw. der Dübelmasse dem Bohrlochdurchmesser. Auch hier wirken bei alleinigem Einsatz der Dübelmasse aufgrund des Reaktionsschwundes nach innen gerichtete Spannungen (Vergleich Abbildung 4 Mitte). Bei einem Theoriebeispiel ohne Steinhaftung würde sich demnach auf Grund des Schwundes, gemäß Abbildung 4 rechts, ein jeweiliger Spalt von 0,304 mm einstellen. Tabelle 3 stellt die sich hieraus ergebenden Wärmeausdehnungen dar.

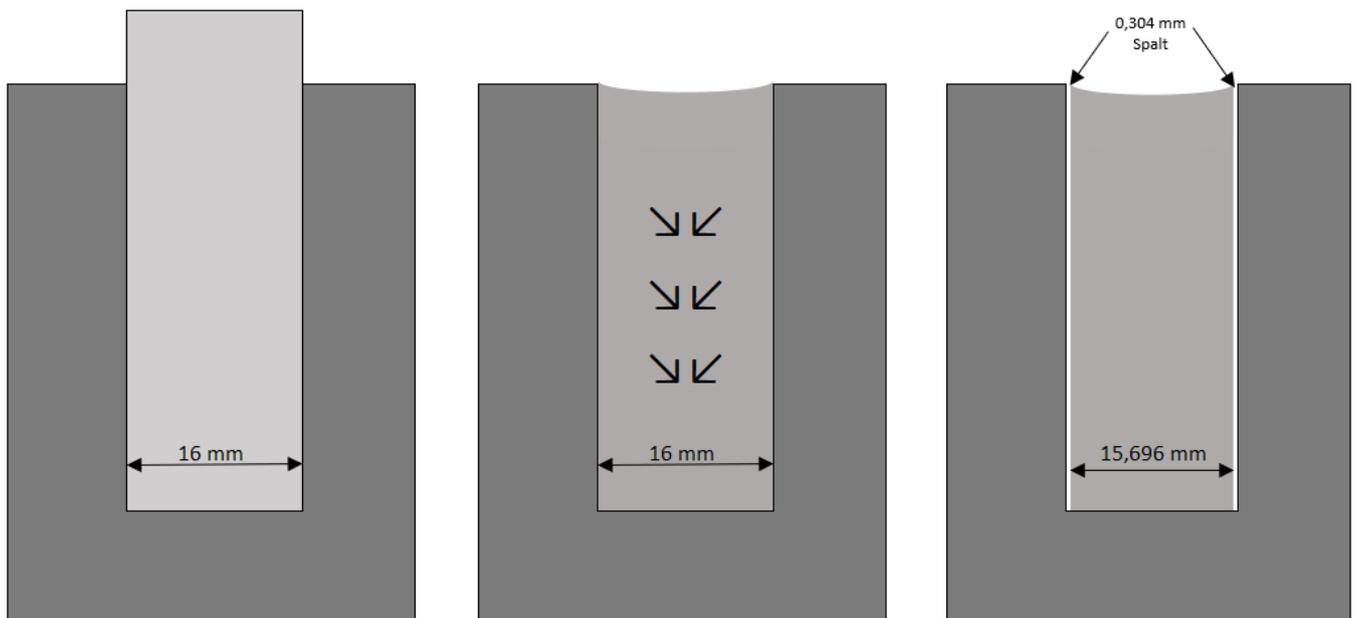


Abbildung 4: Links: passgenauer Einsatz des Metalldübels ohne Dübelmasse, Mitte: Füllung des Bohrlochs nur mit Dübelmasse Monument Filler ohne Metalldübel, Einfluss des Schwundes in Form innerer Spannungen, Rechts: Füllung des Bohrlochs nur mit Dübelmasse Monument Filler ohne Metalldübel, theoretische Bildung eines Spaltes auf Grund Reaktionsschwundes bei nicht vorhandener Steinhaftung

Tabelle 3: Wärmeausdehnung bei gleichen Durchmessern (\emptyset)

\emptyset Bohrloch = \emptyset Metalldübel und \emptyset Bohrloch = \emptyset Dübelmasse Monument Filler

rot: Wärmeausdehnung mit Einfluss auf potenzielle Rissbildung, grün: wirkt Rissbildung entgegen

	$\alpha / 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$\emptyset L / \text{mm}$	$\Delta L / \text{mm}$
Metalldübel Bsp. Edelstahl X6Cr17 (Werkstoffnr. 1.4016)	10 (für +20 °C bis +100 °C)	16	0,008
Dübelmasse Monument Filler Praxis (kein Spalt)	40 (für +20 °C bis +70 °C)	16	0,032
Durch Schwund des Monument Fillers theoretischer beidseitiger Spalt → Größer als Wärmeausdehnung Dübelmasse Monument Filler → Keine Rissbildung			0,608
Wärmeausdehnung Stein (Bsp. Granit) führt zur Bohrlochweitung und wirkt somit entgegen	3 – 8 (für 0 °C bis +100 °C) 5 zur Berechnung	16	0,004

Gemäß Tabelle 3 können demnach folgende Schlüsse gezogen werden:

- 1) Der Metalldübel dehnt sich bei passgenauem Einsatz um 0,008 mm aus. Da sich das Bohrloch aufgrund der Wärmeausdehnung des Steins nur um 0,004 mm weitet, ist eine Rissbildung zu erwarten.
- 2) Wenn man ein Bohrloch ohne Dübel nur mit Monument Filler füllt, wäre die berechnete Wärmeausdehnung der Masse 0,032 mm. Dies wäre größer als die Wärmeausdehnung des Steins, die nur 0,004 mm beträgt. Beim Aushärten der Dübelmasse Monument Filler entstehen jedoch aufgrund des Schwundes innere Spannungen, die die Wärmeausdehnung des Monument Fillers ausgleichen. Ohne theoretische Haftung am Stein gäbe es durch den Schwund der Masse einen Spalt von 0,608 mm (beidseitiger Spalt von jeweils 0,304 mm). Dieser theoretische Spalt (die inneren Spannungen in der Praxis) und die Ausdehnung des Bohrlochs können die Wärmeausdehnung des Monument Fillers ausgleichen. Im Juli 2020 wurden Versuche gestartet, bei denen ein Bohrloch nur gefüllt mit Monument Filler im Außenbereich gelagert wurde. Nach letzter Überprüfung im April 2025 ist, gemäß Abbildung 5, weiterhin keine Rissbildung zu erkennen.



Abbildung 5: Außenbereichslagerungsversuche Start Juli 2020, Bohrloch nur gefüllt mit Monument Filler, keine Rissbildung, Datum der letzten Überprüfung: 28.04.2025

4. Zusammenfassung

Nachfolgend sind in Tabelle 4 die Mittelwerte und die Standardabweichungen der thermischen Längenausdehnungskoeffizienten unterhalb und oberhalb der Glasübergangstemperatur des Monument Fillers sowie die Glasübergangstemperatur dargestellt.

Tabelle 4: Mittelwerte der thermischen Längenausdehnungskoeffizienten (α) und Glasübergangstemperatur (T_g) aus der Messung des SKZ des Monument Fillers

	Mittelwert
α -50 °C bis T_g / 10^{-6} K $^{-1}$	40 ± 2
α T_g bis $+200$ °C / 10^{-6} K $^{-1}$	120 ± 3
T_g / °C	62 ± 4

Tabelle 5 stellt im Vergleich dazu die thermischen Längenausdehnungskoeffizienten von Edelstahl und Granit dar.

Tabelle 5: Thermische Längenausdehnungskoeffizienten verschiedener Werkstoffe. Literatur: Werkstoffdatenblatt: Thyssen Krupp Materials Europe, A. Böge, J. Eichler: Physik für technische Berufe, Zugriff über <https://www.schweizer-fn.de/stoff/waermedehnung/waermedehnung.php>, 18.03.2025

	α / 10^{-6} K $^{-1}$
Edelstahl X6Cr17 (Werkstoffnr.1.4016)	10 (+20 °C bis +100 °C)
Granit	3,0 – 8,0 (0 °C bis +100 °C)

Der Reaktionsschwund beträgt $3,8 \% \pm 0,1 \%$ und trägt dazu bei, dass die in Tabelle 4 und Tabelle 5 beschriebenen unterschiedlichen thermischen Längenausdehnungskoeffizienten ausgeglichen werden können. Aus den zugehörigen Berechnungen aus Kapitel 3 konnten folgende Erkenntnisse zum Zusammenhang der thermischen Längenausdehnungskoeffizienten und des Reaktionsschwundes zur potenziellen Rissbildung gewonnen werden.

1) Steinbohrloch nur mit passgenauem Metalldübel

Die Wärmeausdehnung des Metalls bei passgenauem Bohrlocheinsatz und einer Temperaturerhöhung von 20 °C auf 70 °C liegt bei 0,008 mm. Die Bohrlochweiterung aufgrund der Wärmeausdehnung des Steins liegt im Gegensatz dazu lediglich bei 0,004 mm.

→ Rissbildung zu erwarten

2) Steinbohrloch nur mit Dübelmasse Monument Filler gefüllt

Die Wärmeausdehnung des Monument Fillers bei vollständiger Bohrlochfüllung und einer Temperaturerhöhung von 20 °C auf 70 °C würde bei 0,032 mm liegen. Diese wäre größer als die Bohrlochweiterung des Steins aufgrund seiner Wärmeausdehnung von 0,004 mm. Der Reaktionsschwund des Monument Fillers führt hier aber zu nach innen gerichteten Spannungen, die der Wärmeausdehnung des Monument Fillers entgegenwirken.

→ Keine Rissbildung. Außenbereichslagerungsversuche seit Juli 2020 eines Bohrloches nur gefüllt mit Monument Filler zeigen keine Risse (Abbildung 6, letzte Überprüfung 28.04.2025).



Abbildung 6: Außenbereichslagerungsversuche Start Juli 2020, Bohrloch nur gefüllt mit Monument Filler, keine Rissbildung, Datum der letzten Überprüfung: 28.04.2025

3) Verbund Steinbohrloch mit Dübelmasse Monument Filler und Metalldübel

Die auf den Stein wirkende Wärmeausdehnung (Metalldübel und Dübelmasse Monument Filler) liegt bei einer Temperaturerhöhung von 20 °C auf 70 °C bei 0,010 mm. Diese ist kleiner als der theoretische beidseitige Spalt von jeweils 0,076 mm, der sich aufgrund des Reaktionsschwundes bilden würde, sofern keinerlei Metallanhaftung vorhanden wäre. Demnach gleichen die tatsächlichen inneren Spannungen des Monument Filler die unterschiedlichen Wärmeausdehnungen aus.

→ Keine Rissbildung. Außenbereichslagerungsversuche seit Juli 2020 eines Verbundes Steinbohrloch mit Dübelmasse Monument Filler und einem Metalldübel zeigen keine Risse (Abbildung 7, letzte Überprüfung: 28.04.2025).



Abbildung 7: Außenbereichslagerungsversuche Start Juli 2020, Verbund Steinbohrloch mit Monument Filler und Metalldübel, keine Rissbildung, Datum der letzten Überprüfung: 28.04.2025

Nürnberg, den 30.04.2025,

Evelin Kalinowski
M. Sc. Angewandte Chemie
Chemieingenieurin Forschung und Entwicklung AKEMI