

# **Einfluss einer Ettringit- und Thumasitbildung auf das Tragverhalten von Mauerwerk aus Porenbetonplansteinen**

**Az.: ZP 52-5- 15.76-1209/06**

## **1 Anlass und Zielsetzung**

In den letzten Jahren sind wieder vermehrt Risse in Wänden aus Porenbetonplansteinen und Dünnbettmörteln entstanden, hervorgerufen durch Volumenvergrößerung des Fugenmörtels. Diese Volumenvergrößerung kann zu Zugspannungen in Innen- und Außenwandputzen führen, die bei Überschreitung der Zugfestigkeit der Putze Putzrisse im Stoß- und Lagerfugenbereich verursachen. Bei der Bearbeitung von Schadensfällen zeigte sich, dass die Risse das Mauerwerk durchtrennten und vermutlich die Tragfähigkeit verminderten.

## **2 Untersuchungsprogramm**

Für die Untersuchungen wurden zwei Steinsorten von je drei Porenbetonplansteinherstellern verwendet. Aus diesen Steinen wurden mit je zwei Dünnbettmörteln zweier unterschiedlicher Hersteller Prüfkörper hergestellt. Bei diesen Dünnbettmörteln handelte es sich jeweils um einen speziellen Porenbetonplansteinklebemörtel und einen Dünnbettmörtel, der für Kalksandstein-, Betonstein-, oder Ziegelmauerwerk verwendet werden kann.

In einem ersten Schritt wurde das Dehnungsverhalten sowie die Haftzug- und Haftscherfestigkeit der verschiedenen Stein-Mörtelkombinationen bei Lagerung für 180 Tage im Klima bei 20 °C und 65 % rel. Feuchte im Vergleich zur Lagerung bei 5 °C und hoher Luftfeuchte (80-90% rel. Feuchte) untersucht.

Mit Hilfe der Versuche zum Dehnungsverhalten sollte eine besonders ungünstige Stein-Mörtelkombination identifiziert werden, aus der dann kleine Prüfwände zur vergleichenden Untersuchung der zentrischen Mauerwerksdruckfestigkeit nach Lagerung für 140 Tage bei 20 °C und 65 % rel. Feuchte und bei 5 °C und hoher Luftfeuchte hergestellt wurden.

Die Hersteller der Porenbetonplansteine wurden mit den Kürzeln „X“, „H“, und „P“ bezeichnet, die Festigkeitsklassen der Porenbetonsteine wird zusätzlich mit „2“ und „4“ für die entsprechende Festigkeitsklasse 2 (Rohdichteklasse 0,35) und 4 (Rohdichteklasse 0,50) angegeben. Die Hersteller der verwendeten Mörtel wurden mit „F“ und „M“ bezeichnet, wobei jeder Mörtel noch entweder mit einem „D“ für Dünnbettmörtel oder einem „P“ für Porenbetonkleber gekennzeichnet wird. Die Lagerungsarten wurden mit „N“ für Normlagerung bei 20 °C und 65 % rel. Feuchte und einem „F“ für die kühle Lagerung bei 5 °C mit hoher Luftfeuchte bezeichnet. Somit handelt es sich bei einer Probe mit der Bezeichnung X4-MP-F um eine Kombination eines Porenbetonplansteines des Herstellers

„X“ der Festigkeitsklasse „4“ mit dem Porenbetonkleber des Herstellers „M“ und Lagerung bei 5 °C und hoher Luftfeuchte.

### **3 Versuchsergebnisse**

#### **3.1 Ergebnisse der Dehnungsmessungen an den prismatischen Prüfkörpern**

Grundsätzlich kann aus den durchgeführten Dehnungsmessungen an den Prismen aus unterschiedlichen Stein-Mörtelkombinationen bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen abgeleitet werden, dass bei Verwendung der geprüften Porenbetonkleber in Verbindung mit den untersuchten Porenbetonplansteinen unabhängig von der Lagerungsart und den Steinherstellern keine schädlichen Dehnungen an den Prismen auftraten.

Bei Verwendung eines Dünnbettmörtels, der nicht explizit für die Verwendung in Verbindung mit Porenbetonplansteinen konzipiert ist, kann bei allen verwendeten Steinsorten und der durchgeführten feuchten und kühlen Lagerung davon ausgegangen werden, dass signifikante Dehnungen auftreten werden. Das Ausmaß der Dehnungen und die Geschwindigkeit der Dehnungszunahme ist dabei von der Stein-Mörtelkombinationen abhängig. Demgegenüber weisen alle expansiven Stein-Mörtelkombinationen bei einer Lagerung im normalen Klima (20 °C und 65 % rel. Feuchte) keine schädlichen Dehnungen auf. Die Lagerungsart ist somit entscheidend für das Auftreten von schädlichen Dehnungen.

Das unterschiedliche Verhalten der Probekörper aus den beiden Dünnbettmörteln FD und MD ist auf den unterschiedlich hohen Anteil an  $C_3A$  zurückzuführen.

Die ermittelten Dehnungen traten bei den Prismen i.d.R. nach rd. 60 Tagen Lagerungsdauer auf. Das Kriterium nach [ 1 ] von 0,05 mm/Fuge zur Beurteilung der Eignung der Stein-Mörtelkombinationen nach 10 Wochen Lagerungsdauer ist somit vermutlich nur eingeschränkt geeignet. Die untersuchten Prismen mit dem Mörtel MD bei feuchter Lagerung lagen auch nach 20 Wochen mit einer Ausnahme noch unterhalb des Grenzwertes von 0,10 mm/Fuge, wobei die Ergebnisse der Lagerungsdauer bis 180 Tage den Schluss nahe legen, dass auch bei diesen Stein-Mörtelkombinationen starke Dehnungen auftreten werden, die möglicherweise zu Schäden führen können.

#### **3.2 Ergebnisse der Röntgenbeugungsanalyse der Prismen nach 140d Lagerung**

Aufgrund der Ergebnisse der Dehnungsmessungen wurden die Kombinationen aus den Porenbetonplansteinen X4 und P4 und Dünnbettmörtel FD bei hoher rel. Luftfeuchte und kühler Lagerung als die ungünstigsten identifiziert und hinsichtlich der Phasenzusammensetzung im Bereich der Klebefugen untersucht. Zum Vergleich wurden auch die Prismen dieser Stein-Mörtelkombinationen, die bei 20 °C und 65 % rel. Feuchte gelagert wurden, mittels Röntgenbeugungsanalyse untersucht.

Bei den beiden Proben, die über einen Zeitraum von 140 Tagen bei 20 °C und einer rel. Feuchte von 65 % gelagert wurden, sind im wesentlichen dieselben kristallinen Phasen vorhanden. Dabei handelt es sich hauptsächlich um Calcit, Calciumsilikat, Larnit, Gips, Anhydrit und Quarz. Als potenziell treibende Phase, die durch eine Reaktion des Porenbetonplansteins mit dem Dünnbettmörtel entsteht, ist bei beiden nur Ettringit nachweisbar. Dieser stammt jedoch vermutlich aus dem Hydratationsprozess des Dünnbettmörtels und führte nicht zu einer messbaren Volumenvergrößerung des Prüfkörpers.

Nach der Lagerung dieser Proben bei 5 °C und hoher Luftfeuchtigkeit sind grundsätzlich dieselben kristallinen Phasen wie bei der Lagerung bei 20 °C und 65 % rel. Feuchte zu finden. Zusätzlich ist jedoch sowohl bei der Probe X4-FD-F und P4-FD-F noch Thaumasit in größerem Umfang vorhanden. Da bei beiden Lagerungsarten dieser Proben Ettringit nachweisbar war, das Thaumasit jedoch nur bei den Proben, die bei 5 °C gelagert wurden, ist die gemessene Volumenvergrößerung im Zusammenhang mit der Bildung des Thaumasits zu sehen.

Zusätzlich wurden noch die Proben der selben Steinarten X4 und P4, die mit dem speziellen Porenbetonkleber FP verklebt wurden und analog zu den oben beschriebenen Proben gelagert wurden, hinsichtlich der Phasenzusammensetzung untersucht.

Analog zu den Proben, die mit den Dünnbettmörteln verklebt und bei niedrigen Temperaturen und hoher Luftfeuchte gelagert wurden (X4-FD-F, P4-FD-F), konnte auch bei diesen Proben (X4-FP-F, P4-FP-F) bei dieser Lagerungsart Thaumasit nachgewiesen werden. Bei den Proben, die mit dem Porenbetonkleber hergestellt wurden und bei 20 °C und 65 % rel. Feuchte gelagert wurden, konnte kein Thaumasit gefunden werden. Bei einem Vergleich der Peakhöhe des Ettringits und Thaumasits bei den Proben, die mit dem Dünnbettmörtel hergestellt wurden, zeigte sich, dass die Peaks deutlich höher waren als bei den Proben, die mit dem Porenbetonkleber hergestellt wurden. Dies lässt den Schluss zu, dass bei den Proben mit dem Dünnbettmörtel auch ein höherer Anteil an treibenden Phasen vorhanden war.

### **3.3 Ergebnisse der Haftzugfestigkeitsuntersuchungen**

Insgesamt konnte bei den Haftzugfestigkeitsuntersuchungen bei verschiedenen Stein-Mörtelkombinationen ein Einfluss der Lagerungsart auf die Haftzugfestigkeit festgestellt werden. Bei beiden untersuchten Dünnbettmörteln, die nicht speziell für Porenbetonplansteinmauerwerk konzipiert wurden, konnte ein Festigkeitsverlust nach 140 Tagen in Verbindung mit verschiedenen Steinen festgestellt werden. Der Festigkeitsverlust konnte auf eine schädliche Phasenbildung infolge der kühlen Lagerung bei hoher rel. Luftfeuchte zurückgeführt werden. Auffällig waren jedoch die Ergebnisse der

Haftzugfestigkeitsuntersuchungen mit dem Porenbetonklebemörtel FP. Auch bei diesem speziellen Porenbetonkleber waren nach 140 Tagen Lagerung die Haftzugfestigkeiten bei verschiedenen Stein-Mörtelkombinationen nach kühler Lagerung deutlich niedriger als nach normaler Lagerung. Bei diesen Varianten konnte jedoch infolge des begrenzten Untersuchungsumfanges nicht abschließend geklärt werden, ob hier eine Ettringit- oder Thaumasitbildung ursächlich war für den Festigkeitsunterschied.

Die Ergebnisse der Haftzugfestigkeitsuntersuchungen korrelierten nicht eindeutig mit den Ergebnissen der Dehnungsmessungen. Tendenziell konnte zwar festgestellt werden, dass Stein-Mörtelkombinationen, die eine hohe Dehnung nach 140 Tagen bei kühler Lagerung im Vergleich zur normalen Lagerung aufwiesen, auch eine niedrige Haftzugfestigkeit hatten. Umgekehrt galt bei den untersuchten Proben jedoch nicht, dass bei einer niedrigen Haftzugfestigkeit nach 140 Tagen bei kühler Lagerung im Vergleich zur Normallagerung auch automatisch für diese Stein-Mörtelkombination hohe Dehnungen festgestellt wurden.

### **3.4 Ergebnisse der Haftscherfestigkeitsuntersuchungen**

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass auch bei Verwendung eines speziellen Porenbetonklebers bei einer dauerhaften Lagerung bei niedrigen Temperaturen und hoher rel. Luftfeuchte ein negativer Einfluss auf die Haftscherfestigkeit auftreten kann. Bei beiden verwendeten Porenbetonklebern MP und FP gab es Stein-Mörtelkombinationen, die im Vergleich zur normal gelagerten Variante eine deutlich geringere Haftscherfestigkeit nach 140 Tagen Lagerung aufwiesen. Die dabei festgestellten Unterschiede sind eindeutig im Verlauf der Lagerung entstanden. Im Gegensatz dazu stellte sich bei dem Dünnbettmörtel MD nach 140 Tagen kühler Lagerung kein Unterschied zu den trocken gelagerten Proben ein. Bei den Proben, die mit dem Dünnbettmörtel FD hergestellt wurden, konnte bis auf eine Stein-Mörtelkombination nach 140 Tagen stets eine Verschlechterung der Haftscherfestigkeit beobachtet werden.

Die bei den Haftscherfestigkeitsuntersuchungen festgestellten schlechteren Werte bei verschiedenen Stein-Mörtelkombinationen mit den Porenbetonklebern bei kühler Lagerung, konnten bei den Dehnungsmessungen nicht durch eine Dehnung der entsprechenden Prüfkörper bestätigt werden. Die Dehnungsmessungen an den Proben mit den Dünnbettmörteln decken sich qualitativ mit den Ergebnissen der Haftscherfestigkeitsuntersuchungen.

### **3.5 Ergebnisse der Druckfestigkeitsermittlung an kleinen Prüfwänden**

Auf Basis der Ergebnisse der Dehnungsmessungen wurde für die Ermittlung des Einflusses der Ettringit- bzw. Thaumasitbildung auf die Druckfestigkeit des Mauerwerks die Stein-Mörtelkombination X4-FD ausgewählt. Aus dieser Stein-Mörtelkombination wurden 6 kleine

Wände mit einer Länge 500 mm und einer Höhe von 5 Steinlagen im Läuferverband mit einem Überbindemaß von rd. 25 cm hergestellt. Jeweils 3 Wände wurden für die Dauer von 140 Tagen bei 20 °C und 65 % rel. Feuchte sowie bei 5 °C und hoher Luftfeuchte gelagert und anschließend die zentrische Druckfestigkeit ermittelt. Zusätzlich wurden noch weitere 3 Wände aus der Stein-Mörtelkombination X4-FP hergestellt und ebenfalls bei 5 °C und hoher Luftfeuchte gelagert und anschließend die zentrische Druckfestigkeit ermittelt. Diese Stein-Mörtelkombination erwies sich bei den Dehnungsmessungen bei dieser Lagerungsart als unauffällig und dienten ebenfalls als Referenzproben.

Die mittlere Druckfestigkeit der Wände X4-FD-N nach normaler Lagerung betrug im Alter von 140 Tagen 3,0 N/mm<sup>2</sup>.

Bei den Wänden X4-FD-F wurde nach 140 Tagen Lagerung bei 5°C und hoher rel. Luftfeuchte eine mittlere zentrische Druckfestigkeit von 2,8 N/mm<sup>2</sup> ermittelt.

Die Druckfestigkeit bei den kühl gelagerten Proben liegt somit etwas unter der Druckfestigkeit der normal gelagerten Proben, der Unterschied ist jedoch nicht signifikant. Ein negativer Einfluss einer Ettringit- oder Thaumasitbildung ist nicht erkennbar. Der Unterschied liegt im Bereich der üblichen Streuungen dieses Prüfverfahrens.

Dies wird gestützt durch das Ergebnis der Druckfestigkeitsprüfungen an den 3 Wänden, die mit dem Porenbetonkleber FP hergestellt wurden und ebenfalls kühl gelagert wurden. Bei diesen betrug die mittlere Druckfestigkeit 2,9 N/mm<sup>2</sup> und lag somit zwischen den Mittelwerten der beiden anderen Prüfserien.

#### **4 Zusammenfassung und Diskussion**

Bei den hier durchgeführten Untersuchungen zeigte sich, dass bei normaler Lagerung im Klima 20 °C und 65 % rel. Feuchte auch bei Verwendung der Dünnbettmörtel, die nicht speziell für Porenbetonplansteinmauerwerk konzipiert wurden, keine schädlichen Dehnungen an den Proben aus verklebten Porenbetonplansteinen über die Messdauer von 180 Tagen auftraten.

Im Klima bei 5 °C und hoher Luftfeuchtigkeit wurden bei den Proben, die mit den Porenbetonklebemörteln hergestellt wurden, innerhalb der Messdauer nach [ 1 ] von maximal 140 Tagen keine Dehnungen über dem Grenzwert von 0,10 mm/Fuge ermittelt.

Bei den untersuchten Dünnbettmörteln zeigte sich ein großer Unterschied im Dehnungsverhalten, der auf den unterschiedlichen C<sub>3</sub>A-Gehalt der beiden Mörtel zurückgeführt werden kann. Bei dem Dünnbettmörtel FD traten bereits nach rd. 90 Tagen Lagerungsdauer bei der Probe X4-FD-F Dehnungen größer 0,10 mm/Fuge auf. Alle Probekörper, die mit diesem Mörtel und Steinen der Festigkeitsklasse 4 hergestellt wurden, wiesen sehr hohe Dehnungen bis 0,46 mm/Fuge (X4-FD-F) auf. Die Proben aus den Steinen

der Festigkeitsklasse 2 und Mörtel FD lagen nach 140 Tagen am bzw. noch knapp unterhalb des Abnahmekriteriums nach [ 1 ] von 0,10 mm/Fuge. Hier ist also auch ein Einfluss des Steines erkennbar. Beim Dünnbettmörtel MD lagen nach 140 Tagen Lagerung alle Probekörper unter dem Kriterium von 0,10 mm/Fuge.

Der Unterschied zwischen den Ergebnissen dieser beiden Mörtel ist auf den unterschiedlichen Gehalt an  $C_3A$  zurückzuführen. Der niedrigere  $C_3A$ -Gehalt des Dünnbettmörtels MD führt bei sonst gleichen Randbedingungen erwartungsgemäß auch zu geringeren Dehnungen.

Mit Hilfe der Röntgenbeugungsanalyse konnte bei den Proben, die eine starke Dehnung nach 140 Tagen aufwiesen, ein hoher Gehalt an Ettringit und Thaumasit nachgewiesen werden. Der Ettringit war jedoch auch in den nicht expansiven Proben vorhanden, die bei 20 °C und 65 % rel. Feuchte gelagert wurden. Anhand der unterschiedlichen Peakhöhe war jedoch qualitativ in den als treibend eingestuften Stein-Mörtelkombinationen ein höherer Gehalt an Ettringit vorhanden.

Aus sämtlichen Porenbetonplanstein-Mörtelkombinationen, an denen die Dehnungen ermittelt wurden, wurden auch Probekörper zur Untersuchung des Einflusses der Ettringit- und Thaumasitbildung auf die Haftzugfestigkeit und Haftscherfestigkeit hergestellt. Die Lagerung der Proben erfolgte ebenfalls bei 20 °C und 65 % rel. Feuchte sowie bei 5 °C und hoher Luftfeuchte. Die Haftzugfestigkeit und Haftscherfestigkeit wurden jeweils nach 28 Tagen und 140 Tagen Lagerung ermittelt.

Bei den Haftzugfestigkeitsuntersuchungen konnte ein Einfluss der Ettringit- und Thaumasitbildung bei den Dünnbettmörteln, die nicht explizit für Porenbetonplansteinmauerwerk konzipiert wurden, festgestellt werden. Auffällig waren bei diesen Untersuchungen die Ergebnisse mit dem Porenbetonkleber FP. Hier waren nach 140 Tagen Lagerung bei niedrigen Temperaturen und hoher rel. Luftfeuchte ebenfalls geringere Haftzugfestigkeiten festgestellt worden, als bei normaler Lagerung. Für diesen speziellen Fall konnte infolge des begrenzten Umfangs der Untersuchungen nicht abschließend geklärt werden, was die Ursache für diesen Festigkeitsunterschied war. Eine eindeutige Korrelation der Ergebnisse der Haftzugfestigkeitsuntersuchungen mit den Ergebnissen der Dehnungsmessungen war nicht möglich.

Bei den Haftscherfestigkeitsuntersuchungen gab es bei beiden Porenbetonklebemörteln Stein-Mörtelkombinationen, bei denen nach 140 Tagen kühler Lagerung eine bis zu 49 % geringere Haftscherfestigkeit ermittelt wurde im Vergleich zur normalen Lagerung. Der Unterschied konnte auf die Lagerungsart zurückgeführt werden. Im Gegensatz zu den beiden Porenbetonklebern konnte bei dem Dünnbettmörtel MD auch nach 140 Tagen Lagerung bei 5 °C und hoher Luftfeuchtigkeit keine negative Veränderung der

Haftscherfestigkeit festgestellt werden. Auch bei den Haftscherfestigkeitsproben konnte keine eindeutige Korrelation zwischen den Dehnungsmessungen und den Ergebnissen der Haftscherfestigkeitsuntersuchungen ermittelt werden.

Anhand der Ergebnisse der Dehnungsmessungen an den Prismen wurde die Stein-Mörtelkombination X4-FD für die vergleichende Untersuchung der zentrischen Druckfestigkeit an kleinen Prüfwänden ausgewählt. Es wurden insgesamt 6 Pfeiler aus dieser Stein-Mörtelkombination hergestellt und jeweils 3 Stück bei 20 °C und 65 % rel. Feuchte bzw. in 5 °C und hoher Luftfeuchte für 140 Tage gelagert. Zusätzlich wurden noch 3 Pfeiler der Kombination X4-FP hergestellt und als weitere Referenzprobe ebenfalls im Klima 5 °C und hoher Luftfeuchte für 140 Tage gelagert.

Trotz der hohen Dehnungen, die bei den Prismen an der Kombination X4-FD-F bei kühler Lagerung ermittelt wurden, konnte kein negativer Einfluss bei der zentrischen Druckfestigkeit der Pfeiler festgestellt werden. Die mittlere Druckfestigkeit betrug für diese Stein-Mörtelkombination bei kühler Lagerung 2,8 N/mm<sup>2</sup>, die normal gelagerten Proben wiesen eine Druckfestigkeit von 3,0 N/mm<sup>2</sup> auf und die ebenfalls bei hoher Luftfeuchte und niedriger Temperatur gelagerte Serie X4-FP-F erreichte eine mittlere Druckfestigkeit von 2,9 N/mm<sup>2</sup>.

Trotz der starken Dehnungen und der Verschlechterung der Haftzugfestigkeit sowie der Haftscherfestigkeit wird die zentrische Druckfestigkeit des Mauerwerks der Prüfserie X4-FD nach 140 Tagen Lagerung bei niedriger Temperatur und hoher Luftfeuchte nicht negativ beeinflusst.

Im Rahmen dieser Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die zentrische Druckfestigkeit von Porenbetonplansteinmauerwerk auch bei Wahl eines nicht für Porenbetonplansteine optimierten Klebemörtels und ungünstigen klimatischen Randbedingungen nicht negativ beeinflusst wird. Die Haftscherfestigkeit und Haftzugfestigkeit des Porenbetonplansteinmauerwerks kann sich jedoch bei entsprechenden Randbedingungen im Lauf der Zeit deutlich verschlechtern. Überraschenderweise wurde dies teilweise auch bei Stein-Mörtelkombinationen festgestellt, die mit den speziellen Porenbetonklebern hergestellt wurden.

Trotz der Tatsache, dass bei den hier durchgeführten Untersuchungen zur zentrischen Druckfestigkeit des Mauerwerks aus Porenbetonplansteinen und üblichem Dünnbettmörtel nach DIN EN 998-2 [ 2 ] und DIN V 20000-412 [ 3 ] und ungünstiger Lagerung keine Verschlechterung der Druckfestigkeit festgestellt wurde, sollte zusätzlich eine verbindliche Verträglichkeitsprüfung z.B. wie in [ 1 ] beschrieben, eingeführt werden.

Allerdings eignen sich die Dehnungsmessungen wie in [ 1 ] beschrieben nur eingeschränkt zur Identifizierung von Stein-Mörtelkombinationen, die bei dauerhafter Lagerung in kühlem Klima mit hoher Luftfeuchte zu einer Verringerung der Haftscherfestigkeiten und/oder

Haftzugfestigkeiten im Vergleich zu den Werten nach Normlagerung im Alter von 28 Tagen neigen.

Eine zusätzliche Überprüfung der Verträglichkeit des Dünnbettmörtels mit dem Porenbetonplanstein nicht nur im Hinblick auf das Dehnungsverhalten, sondern auch im Hinblick auf die Haftscherfestigkeit und Haftzugfestigkeit wäre deshalb notwendig.

### **Literatur**

- [ 1 ] DINplus Zertifizierungsprogramm Porenbetonprodukte nach DIN 4165 und DIN 4166, Stand März 2001, DIN CERTCO, Berlin
- [ 2 ] DIN EN 998-2 – Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau – Teil 2: Mauermörtel, Ausgabe September 2003
- [ 3 ] DIN V 20000-412 – Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken – Teil 412:Regeln für die Verwendung von Mauermörtel nach DIN EN 998-2:2003-09