

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

T 3172

T 3172

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2008

ISBN 978-3-8167-7767-0

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

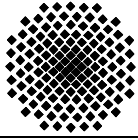
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de



Materialprüfungsanstalt · Universität Stuttgart · Otto-Graf-Institut
Postfach 801140 · D-70511 Stuttgart

Notifizierte Stelle 0672

Telefon +49 (0)711-6856-2261

Telefax +49 (0)711-6856-6828

E-mail fmpa.abt1@po.uni-
stuttgart.de

Abteilung Mineralische Baustoffe

Dienstgebäude Pfaffenwaldring 4 c
D-70569 Stuttgart

Datum 28.05.2008

Forschungsbericht

8352000/Di-06/UB/Sgm

Auftraggeber:

Deutsches Institut für Bautechnik DIBt

Postfach 620229

10792 Berlin

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

Einfluss einer Ettringit- und Thaumazitbildung auf das Tragverhalten von Mauerwerk aus Porenbetonplansteinen

Bearbeiter

Antragsteller

Dr.-Ing. M. Stegmaier

Dipl.-Ing. K. Zeus

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die Prüfgegenstände.

Dieser Bericht umfasst 33 Textseiten und 21 Beilagen. Die letzte Textseite und die Beilagen sind mit unserem Dienstsiegel versehen. Die Vervielfältigung und Veröffentlichung des Berichtes sowohl in vollem als auch in gekürztem Wortlaut sowie die Verwendung zur Werbung ist nur mit unserer schriftlichen Genehmigung zulässig. Gerichtsstand und Erfüllungsort ist Stuttgart.

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.

Bei der Herstellung von Porenbetonsteinen wird den Ausgangsstoffen neben dem Hauptbindemittel Zement oder Kalk immer Sulfat, in den meisten Fällen Anhydrit, zugegeben, zur Regelung des Beginns und des Verlaufs der Erhärtung.

Werden Porenbetonsteine unmittelbar nach der Dampfhärtung in Schrumpffolie verpackt und ausgeliefert, weisen diese Steine bei der Anlieferung auf der Baustelle meist einen hohen Feuchtigkeitsgehalt auf, wobei in dem Porenwasser der Steine in der Regel noch Sulfationen gelöst sind. Werden solche mit hohem Feuchtigkeitsgehalt an der Baustelle angelieferten Porenbetonplansteine unmittelbar danach mit einem Dünnbettkleber verklebt, der mit einem üblichen Zement nach DIN EN 197 hergestellt wurde, so bildet sich in den Berührungszonen des Lagerfugenmörtels und des Stoßfugenmörtels mit den Porenbetonsteinen immer Ettringit und bei tiefen Temperaturen und bei Einwirkung hoher Feuchtigkeit auch Thaumasit. Die hierbei durch die Ettringitbildung auftretende Volumenvergrößerung (Sulfattreiben) kann zu einer Reduzierung der Haftfestigkeit im Bereich Porenbetonplanstein-Dünnbettmörtel und zu einer Reduzierung des Tragverhaltens des Mauerwerks führen.

Die Gefahr einer Tragfähigkeitsminderung durch Sulfattreiben kann verringert werden, indem zur Herstellung der Dünnbettkleber für Porenbetonplanstein-Mauerwerk nur noch Zemente mit einem geringen C_3A -Gehalt verwendet werden und die Eignung dieser Dünnbettmörtel vorab durch Laborversuche nachgewiesen wird.

Dem Einfluss des Sulfattreibens auf das Tragverhalten von Mauerwerk aus Porenbetonplansteinen soll durch Versuche nachgegangen werden. Nach dem Ergebnis der Versuche sind hinsichtlich der Art der Dünnbettmörtel für Porenbetonplanstein-Mauerwerk möglicherweise ergänzende Regelungen erforderlich.

2 Untersuchungsprogramm

Das Versuchsprogramm gliedert sich in 2 Stufen. In einem ersten Schritt sollen an kleinformatigen Prüfkörpern die ungünstigste Stein-Mörtelkombination bei Lagerung der Prüfkörper

im Klima 20 °C und 65 % rel. Feuchte, sowie bei Lagerung bei 5 °C und hoher Luftfeuchtigkeit (ca. 80 % bis 90 % rel. Feuchte) für ca. ½ Jahr ermittelt werden. In dieser ersten Stufe werden Dehnungsmessungen an Prismen mit den Abmessungen 40 x 40 x 160 mm³ durchgeführt, sowie Haftscherfestigkeiten und Haftzugfestigkeiten an kleinformatigen Prüfkörpern ermittelt.

Im Anschluss daran wurden aus der ungünstigsten Stein-Mörtelkombination kleine Prüfwände errichtet und diese für 140 Tage bei 20 °C und 65 % rel. Feuchte, sowie bei 5 °C und hoher Luftfeuchtigkeit (ca. 80 % bis 90 % rel. Feuchte) gelagert. Nach dieser Lagerung werden diese Wände einer zentrischen Druckbeanspruchung ausgesetzt, um den möglichen Einfluss einer Ettringit- und/oder Thaumazitbildung auf das Tragverhalten aufgrund der Feuchtlagerung bei tiefen Temperaturen im Vergleich zur Normlagerung zu ermitteln.

2.1 Verwendete Materialien

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden von insgesamt 3 verschiedenen Porenbetonsteinherstellern jeweils 2 Sorten Porenbetonplansteine in Kombination mit 4 verschiedenen Dünnbettmörteln zweier Hersteller untersucht. Es wurden Steine der Festigkeitsklasse 2, Rohdichteklasse 0,35 sowie der Festigkeitsklasse 4, Rohdichteklasse 0,50 untersucht. Von jedem Hersteller der Dünnbettmörtel wurde ein spezieller Porenbetonplansteinkleber und ein Dünnbettmörtel, der üblicherweise für Ziegelmauerwerk benutzt wird, verwendet.

Zur Identifizierung der verschiedenen Stein-Mörtelkombinationen wurde folgende Nomenklatur verwendet:

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 und 4 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.

2.2 Charakterisierung der Ausgangsstoffe

2.2.1 Ermittlung des Feuchtegehaltes der angelieferten Porenbetonplansteine

Die einzelnen Teile der Prüfkörper, mit denen die Auswirkungen einer Ettringit-/Thaumasitbildung untersucht wurden, sollten beim Verkleben mit den Dünnbettmörtel einen Feuchtegehalt aufweisen, wie er bei Anlieferung der Porenbetonplansteine auf der Baustelle üblich ist. Dazu wurden aus den angelieferten Paletten der verschiedenen Hersteller je 3 Porenbetonplansteine aus der Palettenmitte ausgewählt und bis zur Massenkonstanz getrocknet. Aus den ermittelten Feuchtegehalten wurde der Mittelwert gebildet. Für das Verkleben der Prüfkörper wurden die Einzelteile dann auf diesen mittleren Feuchtegehalt eingestellt, so dass baupraktisch relevante Feuchtebedingungen vorherrschten.

2.2.2 Ermittlung der Zusammensetzung der verwendeten Dünnbettmörtel

Die kristalline Zusammensetzung der verwendeten Dünnbettmörtel wurde mit Hilfe einer quantitativen Röntgenbeugungsanalyse (Rietveld-Analyse) ermittelt. Ziel war dabei vor allem, quantitativ den C_3A -Gehalt der verschiedenen Dünnbettmörtel zu bestimmen. Die Röntgenbeugungsanalyse erfolgte dabei an dem gesamten Dünnbettmörtel, d.h. Bindemittel und Gesteinskörnung des Mörtels.

2.2.3 Ermittlung der Frisch- und Festmörteleigenschaften der verwendeten Dünnbettmörtel

Es wurde die Konsistenz der Mörtel nach DIN EN 1015-3 [1] und die Frischmörtelrohichte nach DIN EN 1015-6 [2] bestimmt. Die Druck- und Biegezugfestigkeit der Festmörtel wurde im Alter von 28 Tagen nach DIN EN 1015-11 [3] ermittelt.

2.2.4 Untersuchung der Lagerfugen der Porenbetonplansteine

Die Lagerfugen der verschiedenen verwendeten Porenbetonplansteine wurden ebenfalls mit Hilfe einer Röntgenbeugungsanalyse untersucht. Hier sollte der Ist-Zustand der Zusammensetzung der Porenbetonplansteine im Bereich der Lagerfuge vor dem Verkleben mit den Dünnbettmörteln festgehalten werden, um eine Vergleichsmöglichkeit für die Untersuchungen nach der Lagerung der verklebten Proben zu haben.

2.3 Versuche an kleinformatischen Prüfkörpern

2.3.1 Dehnungsmessungen

Die Prismen mit den Abmessungen von 40 x 40 x 160 mm³ zur Ermittlung der Längenänderung wurden analog nach dem in [4] beschriebenen Verfahren zur Untersuchung des Quellens in Folge von Ettringit-/Thaumasitbildung hergestellt. Dabei wurde darauf geachtet, dass immer nur ursprünglich vorhandene Lagerfugen der Porenbetonplansteine miteinander verklebt wurden.

Vor dem Verkleben wurden die Einzelteile auf den in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen mittleren Feuchtegehalt eingestellt. Dazu wurden die Reststücke der Porenbetonplansteine, aus denen die Einzelteile herausgesägt wurden, bis zur Massenkonstanz getrocknet und die Trockenrohichte bestimmt. Mit Hilfe der Trockenrohichte und dem gewünschten Feuchtegehalt konnte das Gewicht, das die Einzelteile beim Zusammenkleben aufweisen sollten, errechnet werden.

Nach dem Verkleben wurden alle Prismen bei 20 °C in geschlossenen Behältern über Wasser für 24 Stunden gelagert. Nach diesen 24 Stunden Lagerung erfolgte die Nullmessung der Länge für die Ermittlung der Dehnungsänderungen und der Masse der Prismen.

Anschließend wurden je drei Prismen aus jeder Probenreihe bei 20 °C und 60 % rel. Feuchte sowie bei 5 °C in einem geschlossenen Behälter über Wasser eingelagert.

Im weiteren Verlauf wurde die Längenänderung und die Masse der Prismen nach 7, 28, 56, 90, 150 und 180 Tagen Lagerungsdauer gemessen. Parallel zu den Dehnungsmessungen an den verklebten Prismen wurden auch Dehnungsmessungen an Prüfkörpern der verwendeten Porenbetonsteine mit den Abmessungen 40 x 40 x 160 mm³ durchgeführt, um den Anteil des Schwindens oder Quellens, der durch den Porenbetonstein selbst verursacht wird, berücksichtigen zu können.

2.3.2 Ermittlung der Haftscherfestigkeit

Der Einfluss einer Ettringit-/Thaumasitbildung auf die Haftscherfestigkeit von Porenbetonplansteinmauerwerk wurde an Prüfkörpern ermittelt, die aus einem einzelnen angelieferten Porenbetonplanstein hergestellt wurden. Dazu wurde der Porenbetonplanstein zuerst in der Länge halbiert. Anschließend wurde eine Hälfte des Porenbetonplansteins in der Höhe halbiert. Die so erhaltenen Viertelsteine wurden, nachdem sie auf die geforderte mittlere Feuchte eingestellt waren, so mit Dünnbettmörtel mit dem Halbstein verklebt, dass wieder nur ursprüngliche Lagerfugen mit dem Dünnbettmörtel verbunden wurden.

Im Anschluss an das Verkleben wurden die Proben einen Tag im Klima von 20 °C und 65 % rel. Feuchte gelagert und anschließend je Steinsorte und Mörtelart je 3 Probekörper bei 20 °C und 65 % rel. Feuchte sowie bei 5 °C über Wasser gelagert. Die Ermittlung der Haftscherfestigkeit erfolgte im Alter von 28 Tagen bzw. 140 Tagen in Anlehnung an die DIN EN 1052-3 [5] ohne Aufbringen einer senkrecht zu den Lagerfugen wirkenden Auflast.

2.3.3 Ermittlung der Haftzugfestigkeit

Zur Ermittlung der Auswirkung einer Ettringit-/Thaumasitbildung auf die Haftzugfestigkeit von Porenbetonplansteinmauerwerk wurden Prüfkörper verwendet, die ebenfalls aus einem einzelnen Porenbetonplanstein hergestellt wurden. Dazu wurde je ein ganzer Stein in der Höhe halbiert. Eine Hälfte wurde so belassen, die zweite Hälfte auf eine Höhe von 5 cm gekürzt. Diese beiden Teile wurden auf die geforderte mittlere Feuchte eingestellt. Anschließend wurden diese mit den beiden Lagerfugen mit Dünnbettmörtel verklebt.

Die Lagerung erfolgte analog zu den Proben der Haftscherfestigkeit (siehe Abschnitt 2.3.2).

Die Prüfung erfolgte nach 28 bzw. 140 Tagen Lagerung.

2.3.4 Ermittlung der treibenden Bestandteile

Zur Ermittlung der Art der treibenden Bestandteile wurden die Prismen für die Dehnungsmessungen nach Abschnitt 2.3.1 verwendet. Dazu wurden die Prismen, die ein ausgeprägtes Quellen aufwiesen im Bereich der Lagerfugen wieder zerlegt und die Phasenzusammensetzung im Übergangsbereich Lagerfuge-Dünnbettmörtel mit Hilfe der Röntgenbeugungsanalyse ermittelt.

Dazu wurde der Mörtel vorsichtig von den Lagerfugen abgekratzt und fein aufgemahlen.

Zum Vergleich wurden die Proben, die unter Normalbedingungen bei 20 °C und 65 % rel. Feuchte gelagert wurden, ebenfalls im Bereich der Lagerfugen untersucht, um die Veränderungen beurteilen zu können.

2.4 Versuche an kleinen Prüfwänden

Um einen möglichen Einfluss einer Ettringit- oder Thaumasitbildung auf das Tragverhalten des Porenbetonplansteinmauerwerks zu untersuchen, wurden aus einer aus den Dehnungsmessungen an den kleinformatischen Prüfkörpern ermittelten ungünstigen Stein-Mörtelkombination kleine Prüfwände in Anlehnung an DIN EN 1052-1 [6] errichtet. Die Wände waren rd. 50 cm lang und 5 Steinlagen hoch und wurden im Läuferverband mit einem

Überbindemaß von rd. 25 cm hergestellt. 3 Prüfwände wurden bis zur Ermittlung der zentrischen Druckfestigkeit im Alter von 140 Tagen im Klima bei 20 °C und 65 % rel. Feuchte gelagert und dienten als Referenzproben. Im Vergleich dazu wurden 3 Prüfwände aus derselben Stein-Mörtelkombination für 140 Tage bei 5 °C und hoher Luftfeuchtigkeit gelagert und anschließend die zentrische Druckfestigkeit ermittelt.

Die Vermauerung der Pfeiler erfolgte im Verband mit einem Überbindemaß von einer halben Steinlänge. Die notwendigen halben Steine wurden gesägt. Die verwendeten Dünnbettmörtel wurden nach Herstellerangaben mit den in Tabelle 2 und Tabelle 3, Beilage 2 genannten Wasser-Trockenmörtelverhältnissen w/m angemischt und mit Hilfe einer Zahntraufel auf die Lagerfugen aufgebracht. Die Stoßfugen blieben unvermörtelt. Das Mischen der Dünnbettmörtel erfolgte mit einem handelsüblichen Bauhandquirl.

Im Anschluss an das Verkleben wurden die Prüfwände einen Tag im Klima von 20 °C und 65 % rel. Feuchte gelagert und anschließend je Prüfserie 3 Probekörper bei 20 °C und 65 % rel. Feuchte sowie bei 5 °C und hoher rel. Luftfeuchte gelagert.

3 Versuchsergebnisse und Diskussion

3.1 Feuchtegehalt der verwendeten Porenbetonplansteine

Die Feuchtegehalte der angelieferten Porenbetonplansteine variierten zwischen rd. 39 M.-% und rd. 46 M.-%. Der mittlere Feuchtegehalt ermittelt aus den Einzelwerten der 3 verschiedenen Hersteller der Porenbetonplansteine betrug rd. 42 M.-%.

Sämtliche Prüfkörper der hier beschriebenen Versuche wurden vor dem Verkleben mit den unterschiedlichen Dünnbettmörteln auf diesen mittleren Feuchtegehalt eingestellt.

3.2 Ergebnisse der Quantitativen Röntgenbeugungsanalyse (Rietveld-Analyse) der verwendeten Mörtel

Die Ergebnisse der Quantitativen Röntgenbeugungsanalysen der verwendeten Dünnbettmörtel sind in Tabelle 1, Beilage 1 zusammengestellt.

3.3 Frisch- und Festmörteleigenschaften der verwendeten Mörtel

Das Wasser-Trockenmörtelverhältnis w/m, das Ausbreitmaß, die Frisch- und Festmörtelroh-dichte sowie die Druck- und Biegezugfestigkeiten der verwendeten Dünnbettmörtel sind in Tabelle 2 und Tabelle 3, Beilage 2 und 2 zusammengestellt.

3.4 Ergebnisse der Röntgenbeugungsanalyse der Porenbetonplansteine im Bereich der Lagerfuge vor dem Verkleben

Die Untersuchungen an den Lagerfugen der verwendeten Steinsorten mittels Röntgenbeugungsanalyse ergaben für die Steine H2, H4, P2 und P4 dasselbe Ergebnis. Es konnte Quarz, Calcit, Tobermorit und Anhydrit nachgewiesen werden. Bei den beiden Steinsorten X2 und X4 wurde zusätzlich noch Gips gefunden.

Die Röntgenbeugungsdiagramme der einzelnen Steinsorten sind in Bild 25 bis Bild 30, Beilage 3 bis Beilage 8 abgebildet.

3.5 Ergebnisse der Dehnungsmessungen an den prismatischen Prüfkörpern

Die folgenden Abbildungen zeigen die Messergebnisse der Dehnungsmessungen an den prismatischen Prüfkörpern, hergestellt aus den verschiedenen Porenbetonplansteinen und Mörteln unter Berücksichtigung des Quellens und/oder Schwindens der Porenbetonplansteine, das an separat untersuchten Prüfkörpern ermittelt wurde, über den Zeitraum von 180 Tagen. Die ermittelten Verformungen wurden gemäß [4] in mm/Fuge angegeben, d.h. die gemessene Gesamtverformung der Prismen wurden gleichmäßig auf die 3 vorhandenen Mörtelfugen der Prismen aufgeteilt.

Die durchgeführten Messungen haben gezeigt, dass unabhängig von der verwendeten Steinsorte und Lagerungsart bei dem Porenbetonkleber MP keine schädlichen Dehnungen an den Prismen auftreten (siehe Bild 1).

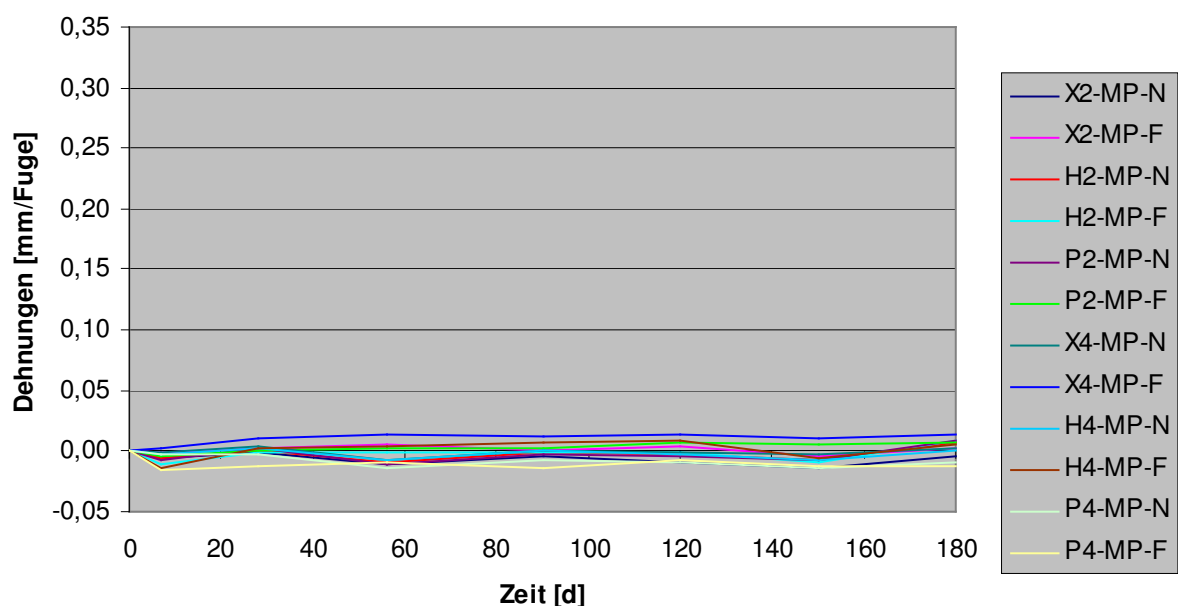


Bild 1: Messergebnisse aller Prismen, die unter Verwendung des Porenbetonklebers MP hergestellt wurden

Dasselbe Ergebnis wurde für den Porenbetonkleber FP ermittelt (siehe Bild 2). Auch hier traten unabhängig von der Steinsorte und Lagerungsart keine schädigenden Dehnungen an den Prismen auf.

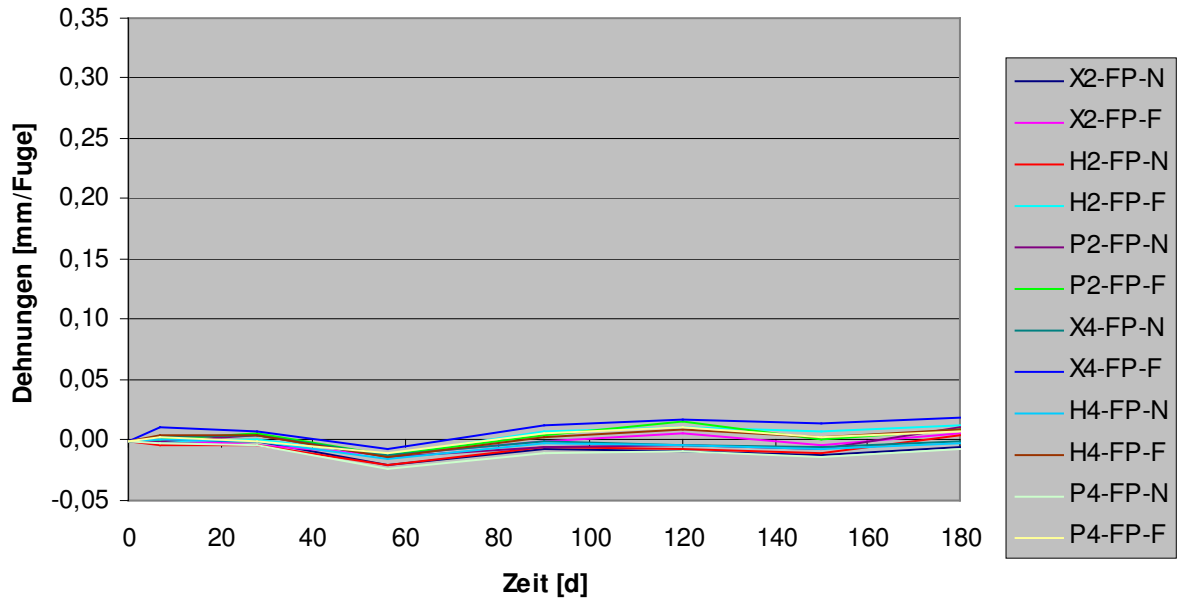


Bild 2: Messergebnisse aller Prismen, die unter Verwendung des Porenbetonklebers FP hergestellt wurden

Im folgenden Bild 3 sind die Ergebnisse der Messungen an den Prismen, die unter Verwendung des Dünnbettmörtels MD hergestellt wurden, zusammengestellt.

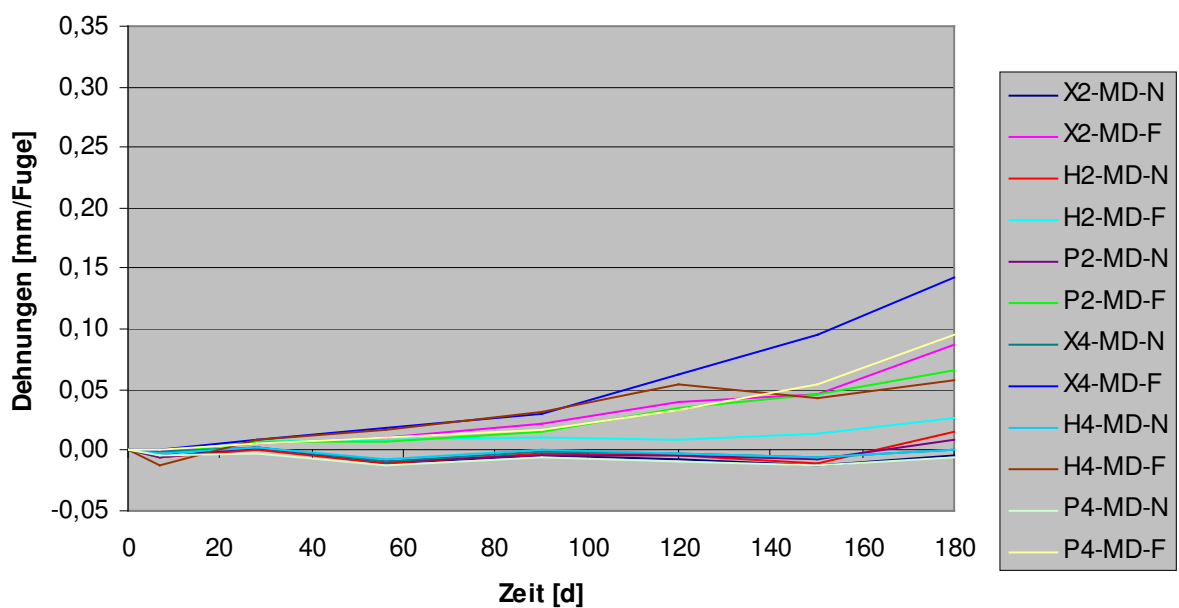


Bild 3: Messergebnisse aller Prismen, die unter Verwendung des Dünnbettmörtels MD hergestellt wurden

Es sind Messreihen erkennbar, die über den Messzeitraum von 180 Tagen keine Dehnungen aufweisen und Stein-Mörtelkombinationen, die als treibend einzustufen sind.

Eine Aufteilung der Messreihen nach den Lagerbedingungen führt zu einem eindeutigen Bild. Bei Lagerung im normalen Klima „N“ treten keinerlei potentiell schädliche Dehnungen an den Prismen auf. (siehe Bild 4).

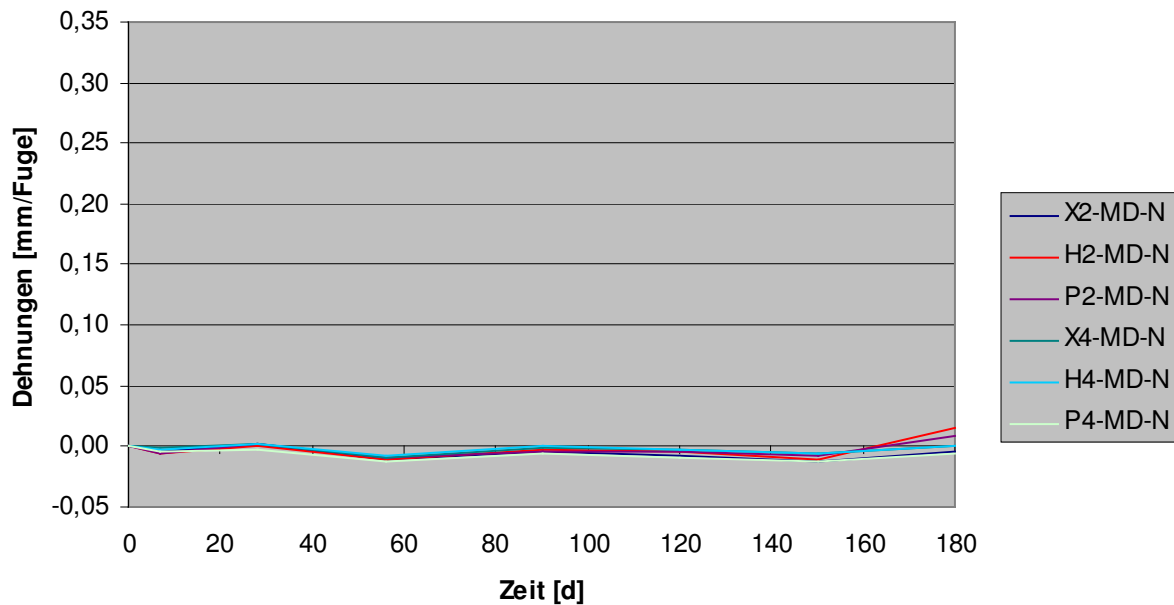


Bild 4: Messergebnisse der Prismen, die unter Verwendung des Dünnbettmörtels MD hergestellt und im Klima „N“ (20 °C, 65 % rel. Feuchte) gelagert wurden

Bei den Prismen dieser Mörtelart, die im kühlen Klima gelagert wurden, zeigt sich ein anderes Bild. Alle Prüfkörper zeigen eine kontinuierliche Zunahme der Dehnungen im Lauf der Zeit, wobei das Ausmaß unterschiedlich stark ausgeprägt ist (siehe Bild 5).

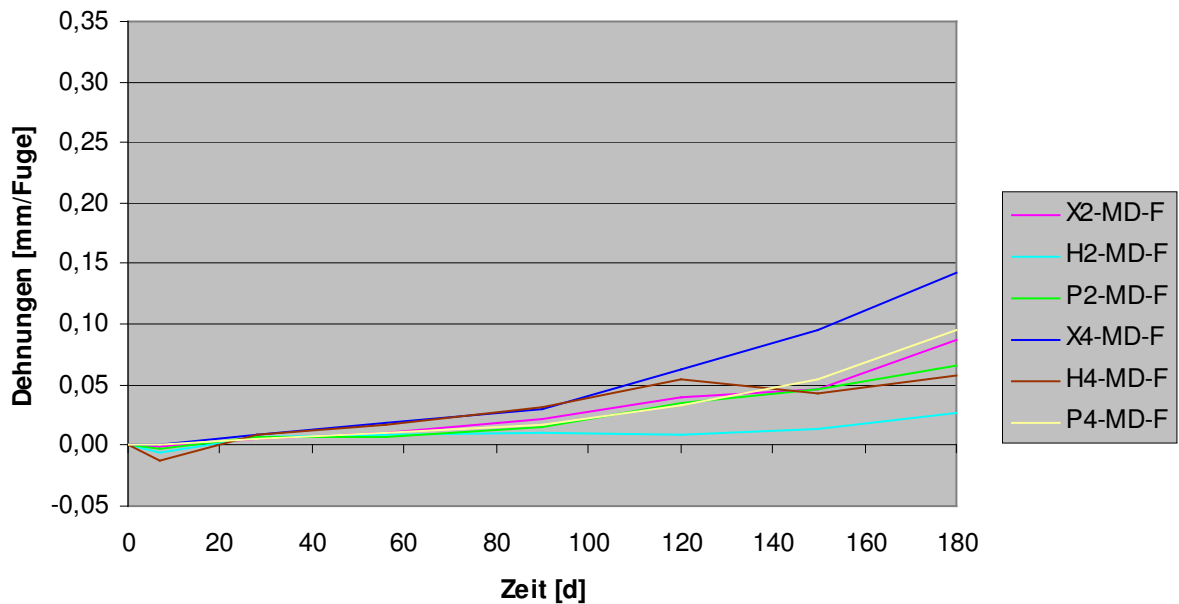


Bild 5: Messergebnisse der Prismen, die unter Verwendung des Dünnbettmörtels MD hergestellt und im Klima „F“ (5 °C, hohe rel. Feuchte) gelagert wurden

Alle Messreihen dieser Serie liegen unterhalb der in [4] genannten Grenzwerte zur Beurteilung einer möglicherweise ungeeigneten Stein-Mörtelkombination nach 10 bzw. 20 Wochen. Die Messwerte nach 180 Tagen Lagerung deuten jedoch darauf hin, dass zumindest die Kombination X4-MD-F in höherem Probenalter zu schädlichen Dehnungen führen kann.

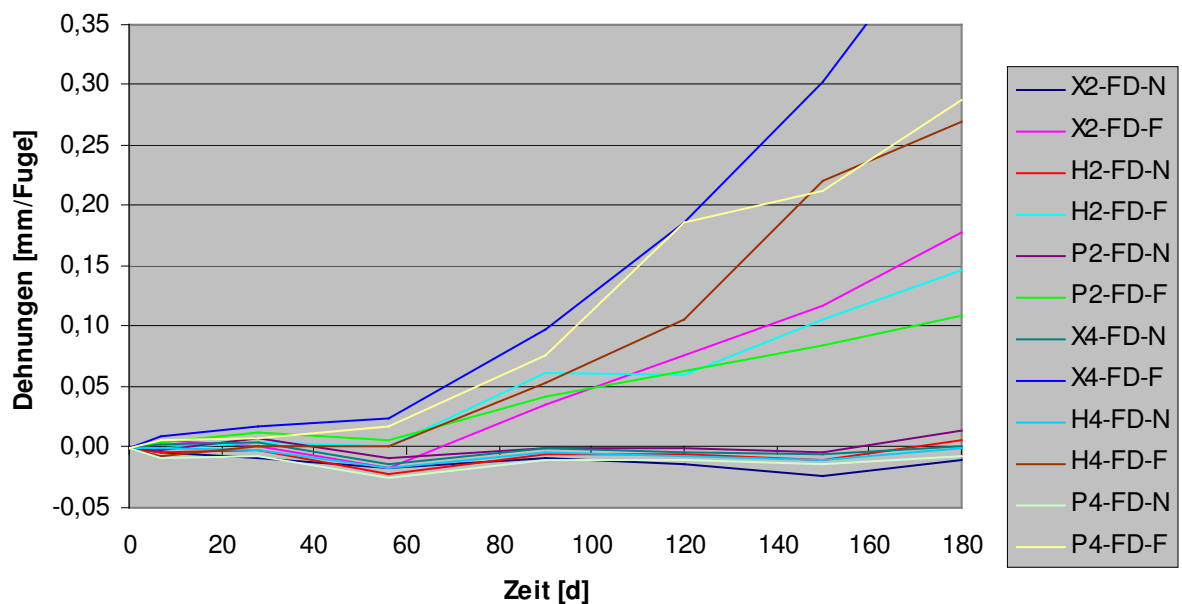


Bild 6: Messergebnisse aller Prismen, die unter Verwendung des Dünnbettmörtels FD hergestellt wurden

Ein ähnliches Bild wie bei dem Dünnbettmörtel MD kann auch bei dem Dünnbettmörtel FD beobachtet werden (siehe Bild 6). Auch hier gibt es deutlich expansive Messreihen und welche, die keine nennenswerten Dehnungen aufweisen. Analog zu dem Dünnbettmörtel MD handelt es sich bei den Messreihen ohne nennenswerte Dehnungen um die Proben, die bei 20 °C und 65 % rel. Feuchte gelagert wurden (siehe Bild 7).

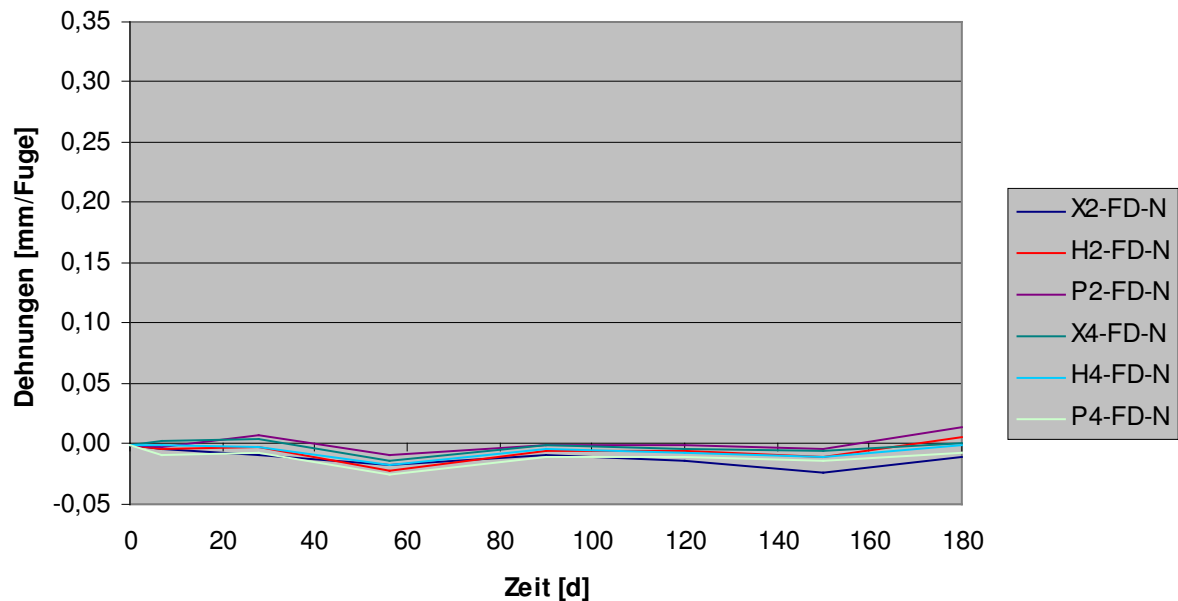


Bild 7: Messergebnisse der Prismen, die unter Verwendung des Dünnbettmörtels FD hergestellt und im Klima „N“ (20 °C, 65 % rel. Feuchte) gelagert wurden

Demgegenüber weisen alle kühl gelagerten Prüfkörper aus der Serie mit dem Dünnbettmörtel FD starke Dehnungen auf.

Bei allen Stein-Mörtelkombinationen dieser Serie begannen diese deutlichen Dehnungen nach rd. 60 Tagen Lagerungsdauer (siehe Bild 8). Alle Stein-Mörtelkombinationen dieser Messreihe sind auf Basis dieser Untersuchungen als ungeeignet einzustufen, da bei einem ausreichendem Feuchtigkeitsangebot und niedrigen Temperaturen bei allen Proben starke Dehnungen auftreten.

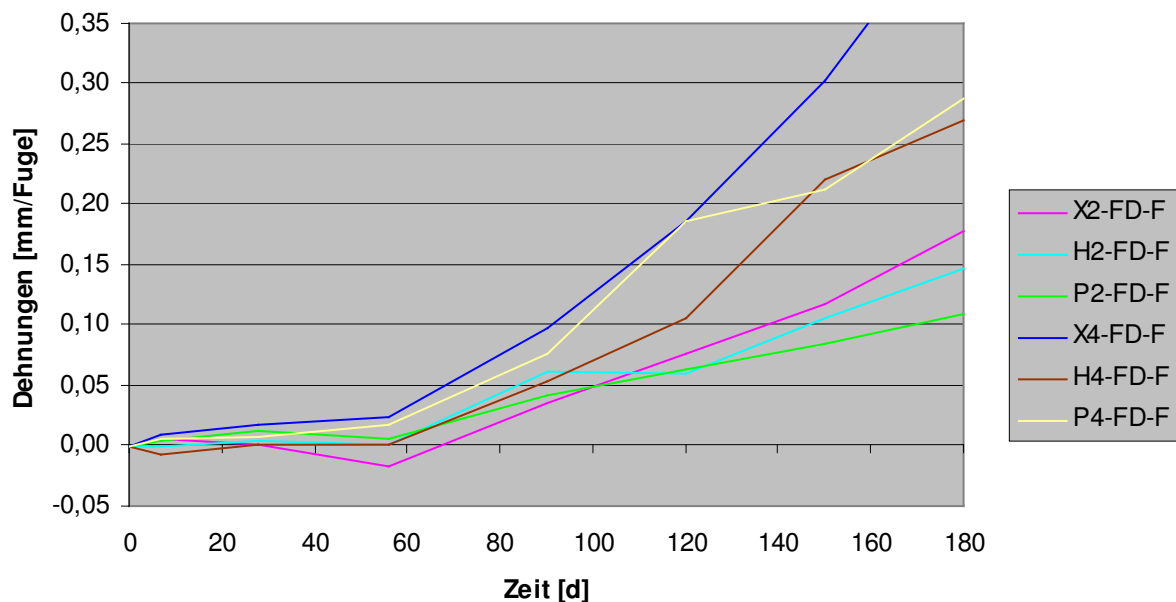


Bild 8: Messergebnisse der Prismen, die unter Verwendung des Dünnbettmörtels FD hergestellt und im Klima „F“ (5 °C, hohe rel. Feuchte) gelagert wurden

Mit Hilfe der in [4] genannten Grenzwerte sowohl nach 10 Wochen als auch nach 20 Wochen Lagerungsdauer wären jedoch 2 Stein-Mörtelkombinationen als potentiell geeignet eingestuft worden (H2-FD-F und P2-FD-F), da die Dehnungen zu beiden für die Beurteilung zugrundegelegten Zeitpunkten unterhalb der Grenzwerte von 0,05 mm/Fuge bzw. 0,10 mm/Fuge lagen.

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

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 C₃A zurückzuführen.

Die ermittelten Dehnungen traten bei den Prismen i.d.R. nach rd. 60 Tagen Lagerungsdauer auf. Das Kriterium [4] 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.

3.6 Ergebnisse der Röntgenbeugungsanalyse der Prismen nach 140d Lagerung

Wie bereits in Abschnitt 2.3.4 beschrieben wurde, beschränkte sich die Untersuchung der Art der treibenden Bestandteile auf die Stein-Mörtelkombinationen, die ein besonders ausgeprägtes Quellen aufweisen.

Aufgrund der Ergebnisse der Dehnungsmessungen nach Abschnitt 3.5 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.

Die Ergebnisse der Röntgenbeugungsanalysen dieser Proben sind in Bild 31 bis Bild 34, Beilage 9 bis Beilage 12 abgebildet.

Bei den beiden Proben, die über einen Zeitraum von 140d 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 (siehe Abschnitt 3.5).

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 (siehe Abschnitt 3.5) 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.

Die Ergebnisse der Röntgenbeugungsanalysen dieser Proben sind in Bild 35 bis Bild 38, Beilage 13 bis 16 zusammengestellt.

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.

3.7 Ergebnisse der Haftzugfestigkeitsuntersuchungen

Nach 140 Tagen Lagerung war bei der Steinsorte H4 in Verbindung mit dem Dünnbettmörtel MD ein deutlicher Unterschied zwischen normaler und kühler Lagerung erkennbar (siehe Bild 9).

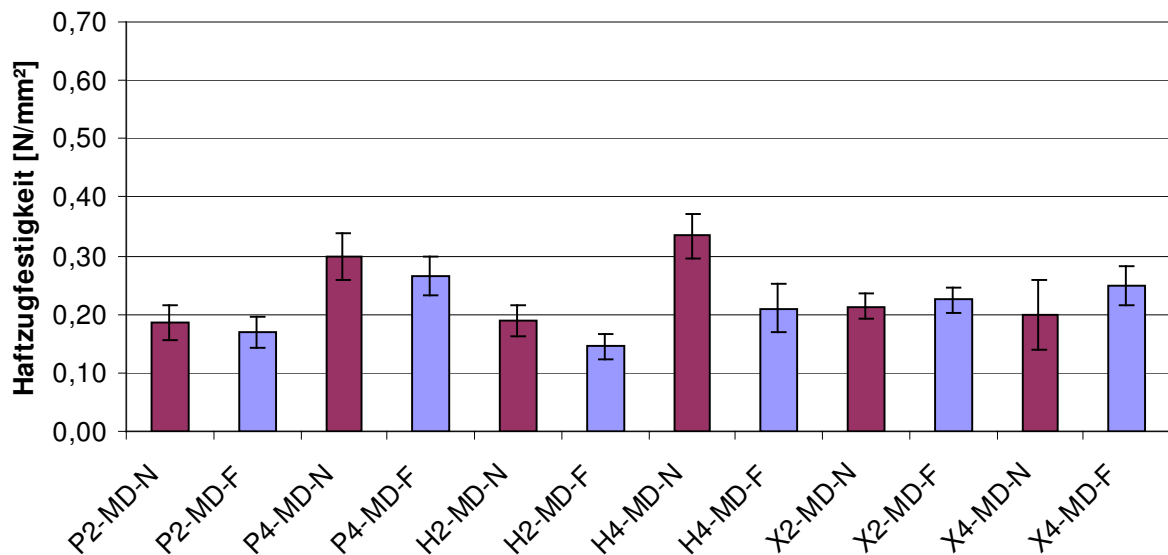


Bild 9: Vergleich der Haftzugfestigkeiten der Proben mit Dünnbettmörtel MD, nach 140 Tagen Lagerung (Mittel aus 5 Versuchen)

Bereits nach 28 Tagen waren die mittlere Haftzugfestigkeit der kühlen Lagerung bei hoher rel. Luftfeuchte etwas schlechter, aber der Unterschied zwischen den Lagerungsarten wurde mit der Lagerungsdauer größer (siehe Bild 10). Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der kühlen Lagerung kein nennenswerter Festigkeitszuwachs zu beobachten war, während bei der normalen Lagerung ein deutlicher Zuwachs der Haftzugfestigkeit vorhanden war. Die Lagerung hat hier einen Einfluss zumindest auf die Festigkeitsentwicklung. Es war allerdings kein Festigkeitsabfall unterhalb des mittleren 28-Tage-Wertes vorhanden.

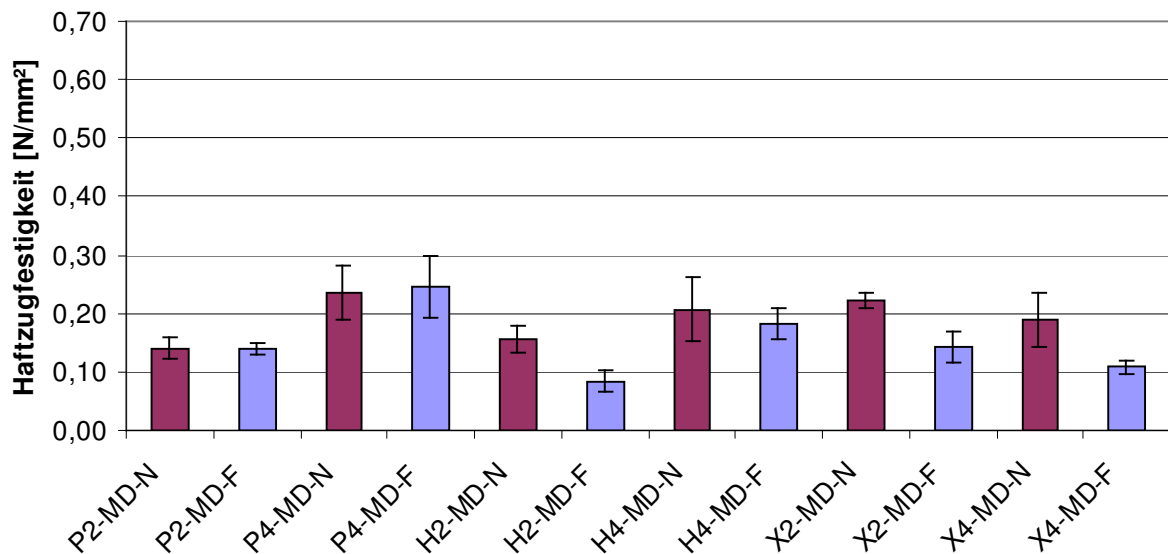


Bild 10: Vergleich der Haftzugfestigkeiten der Proben mit Dünnbettmörtel MD, nach 28 Tagen Lagerung (Mittel aus 5 Versuchen)

Auch bei P4-MD ist nach 140 Tagen Lagerung bei der kühl gelagerten Variante eine niedrigere mittlere Haftzugfestigkeit als bei normaler Lagerung gemessen worden (siehe Bild 9). Bei P4-MD war das Festigkeitsniveau der kühlen Variante nach 28 Tagen bereits auf dem Niveau nach 140 Tagen. Dies bedeutet, dass keine weitere Festigkeitsentwicklung stattgefunden hat. Im Gegensatz dazu nahm die Festigkeit bei der normal gelagerten Variante während der Lagerungsdauer um 25 % zu. Auch bei P4 ist somit ein Einfluss der Lagerung auf die Festigkeitsentwicklung vorhanden.

Bei der Stein-Mörtelkombination H2-MD ist zwar nach 140 Tagen Lagerung ebenfalls ein deutlicher Unterschied der Festigkeit zwischen der normalen und kühlen Lagerung vorhanden, dieser war jedoch nach 28 Tagen noch deutlich stärker ausgeprägt. Im Vergleich zu P4-MD und H4-MD nimmt bei dieser Stein-Mörtelkombination auch die Festigkeit bei der Lagerungsvariante mit hoher rel. Luftfeuchte während der Lagerungsdauer noch zu. Hier ist vermutlich kein negativer Einfluss infolge schädlicher Phasenbildung durch die Lagerungsart vorhanden.

Auffällig sind die Ergebnisse der Proben mit den Steinen X2 und X4 und dem Dünnbettmörtel MD. Nach 28 Tagen waren die Haftzugfestigkeiten der kühl gelagerten Varianten deutlich niedriger als bei den normal gelagerten Proben (siehe Bild 10). Die Ergebnisse der Haftzugfestigkeitsprüfungen nach 140 Tagen lagen bei den kühl gelagerten Proben jedoch über den Werten der normal gelagerten Prüfkörper. Bei diesen Stein-Mörtelkombinationen weisen die normal gelagerten Varianten nach 28 Tagen keinen weiteren nennenswerten Festigkeitszu-

wachs mehr auf, während die kühl gelagerten Proben eine deutliche Nacherhärtung trotz der durch die niedrige Temperatur verlangsamten Reaktionsgeschwindigkeit aufweisen. Dies liegt vermutlich an dem ausreichenden Feuchteangebot für die weitere Hydratation des Dünnbettmörtels. Ein negativer Einfluss der feuchten Lagerung ist nicht erkennbar.

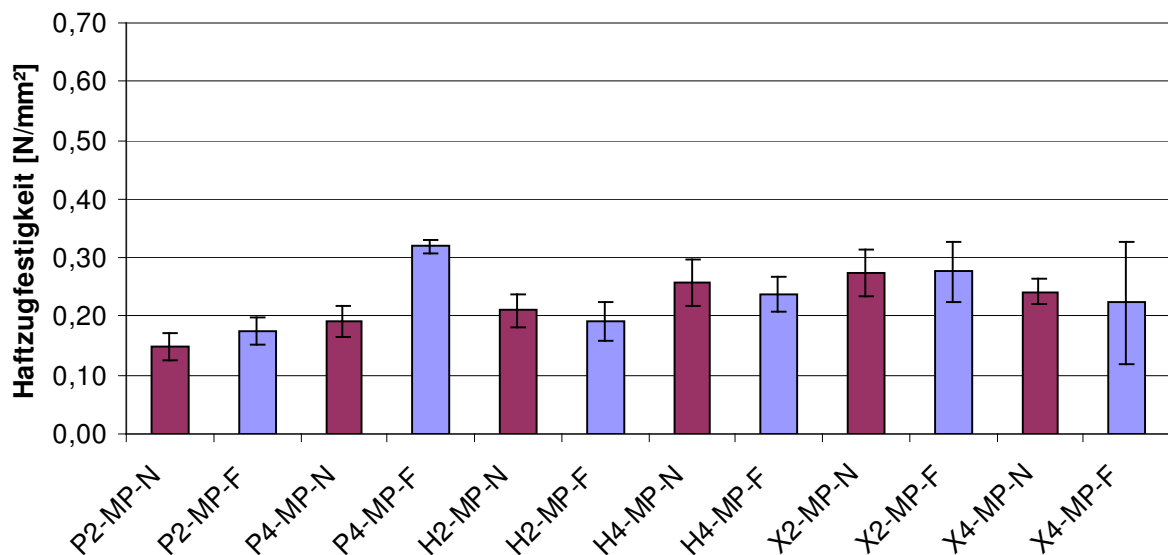


Bild 11: Vergleich der Haftzugfestigkeiten der Proben mit Porenbetonkleber MP, nach 28 Tagen Lagerung (Mittel aus 5 Versuchen)

Die Ergebnisse der Haftzugfestigkeitsuntersuchungen an den Probekörpern, die mit dem Porenbetonkleber MP hergestellt wurden, sind in Bild 11 (nach 28 Tagen Lagerung) und Bild 12 (nach 140 Tagen Lagerung) dargestellt.

Bei H2-MP und X4-MP sind bereits nach 28 Tagen bei der kühl gelagerten Prüfserie im Mittel etwas geringere Haftzugfestigkeiten ermittelt worden, wie bei der normalen Lagerung. Der Unterschied, der nach 28 Tagen Lagerung bereits vorhanden war, vergrößerte sich jedoch im Lauf der Lagerungsdauer.

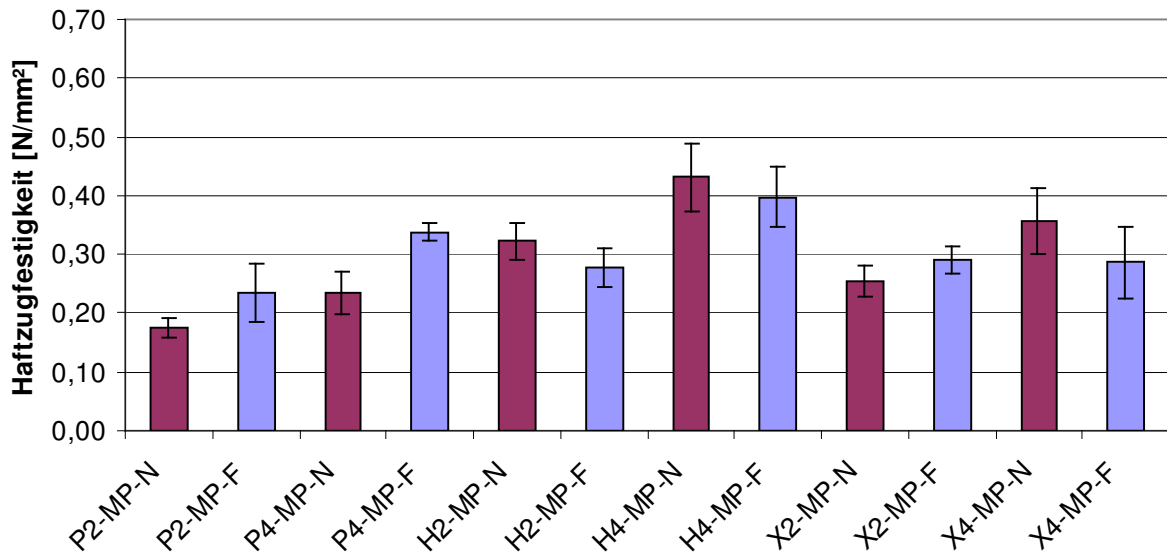


Bild 12: Vergleich der Haftzugfestigkeiten der Proben mit Porenbetonkleber MP, nach 140 Tagen Lagerung (Mittel aus 5 Versuchen)

Bei diesen beiden Stein-Mörtelkombinationen konnte jedoch sowohl bei der normalen wie bei der kühlen Lagerung mit hoher rel. Luftfeuchte zwischen der Prüfung nach 28 Tagen und 140 Tagen eine deutlich Zunahme der Haftzugfestigkeit beobachtet werden. Da bei diesen Proben kein Festigkeitsabfall nach 140 Tagen unter den Wert nach 28 Tagen festgestellt wurde, und auch ein deutlicher Festigkeitszuwachs zwischen der Prüfung nach 28 Tagen und 140 Tagen vorhanden war, liegt hier kein negativer Einfluss der kühlen Lagerung vor.

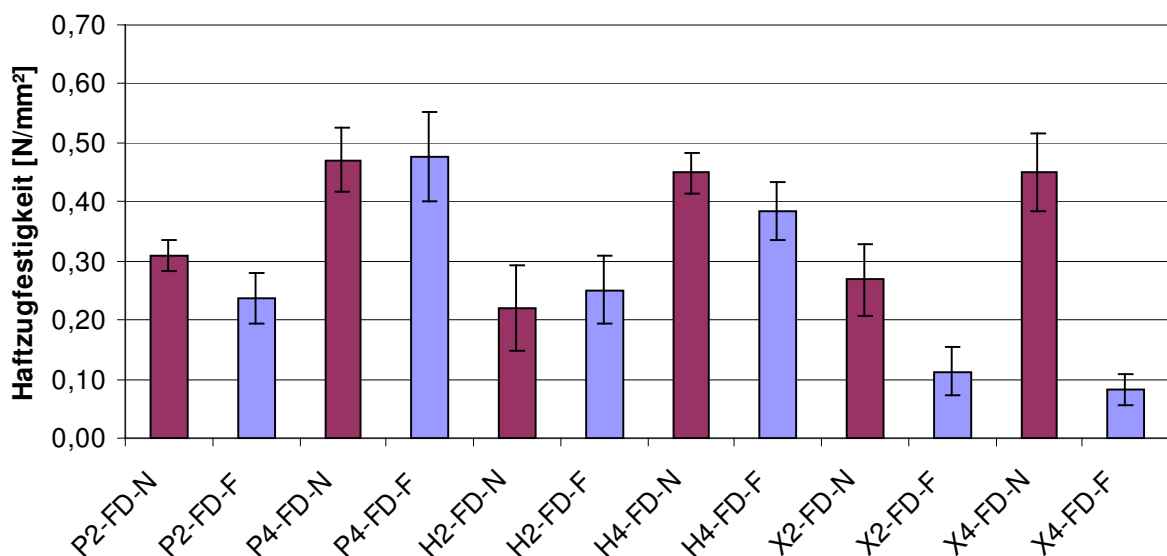


Bild 13: Vergleich der Haftzugfestigkeiten der Proben mit Dünnbettmörtel FD, nach 140 Tagen Lagerung (Mittel aus 5 Versuchen)

Im Vergleich zu den Ergebnissen mit dem Dünnbettmörtel MD sind die Ergebnisse der Haftzugprüfungen nach 140 Tagen bei kühler Lagerung für die Stein-Mörtelkombinationen X2-FD und X4-FD sehr schlecht (siehe Bild 13). Während bei den Varianten mit dem Dünnbettmörtel MD nach 140 Tagen Lagerung die Werte der kühl gelagerten Proben über den Werten der normalen Lagerung liegen (siehe Bild 9), ist bei dem Dünnbettmörtel FD ein Festigkeitsrückgang von 60 % (X2) bzw. 82 % (X4) vorhanden. Die Werte dieser Proben nach 140 Tagen Lagerung liegen auch deutlich unterhalb der Messwerte nach 28 Tagen. Hier ist somit eindeutig ein Einfluss der kühlen Lagerung bei hoher Luftfeuchte auf die Haftzugfestigkeit vorhanden.

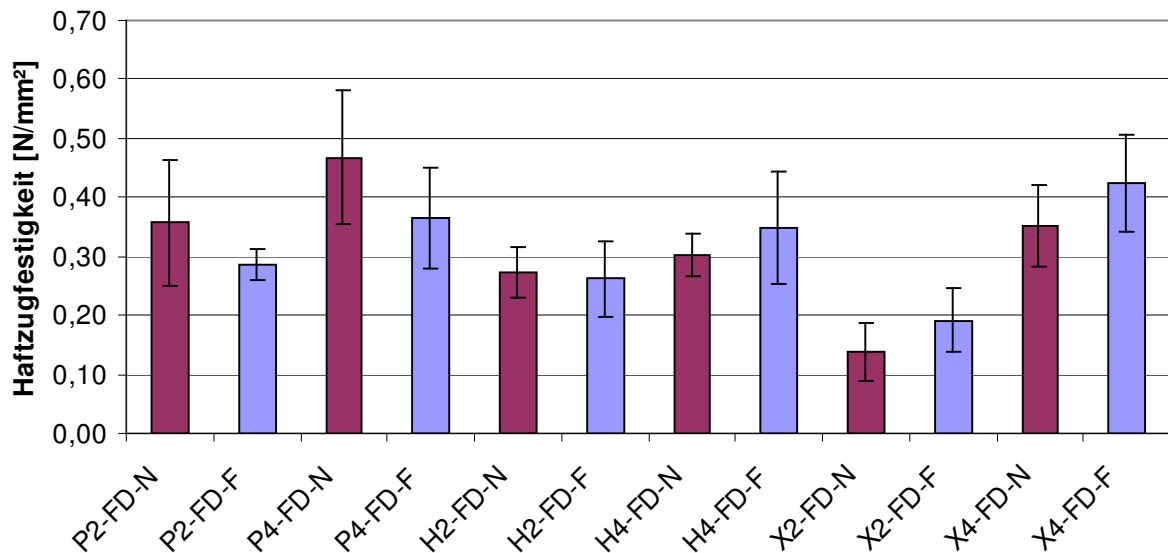


Bild 14: Vergleich der Haftzugfestigkeiten der Proben mit Dünnbettmörtel FD, nach 28 Tagen Lagerung (Mittel aus 5 Versuchen)

Bei H4-FD liegt die mittlere Haftzugfestigkeit nach 140 Tagen bei kühler Lagerung unter dem Wert bei normaler Lagerung. Nach 28 Tagen lag der Mittelwert der kühlen Lagerung noch über dem Wert der normalen Lagerung. Allerdings weisen die Proben bei beiden Lagervarianten einen Festigkeitszuwachs mit der Zeit auf.

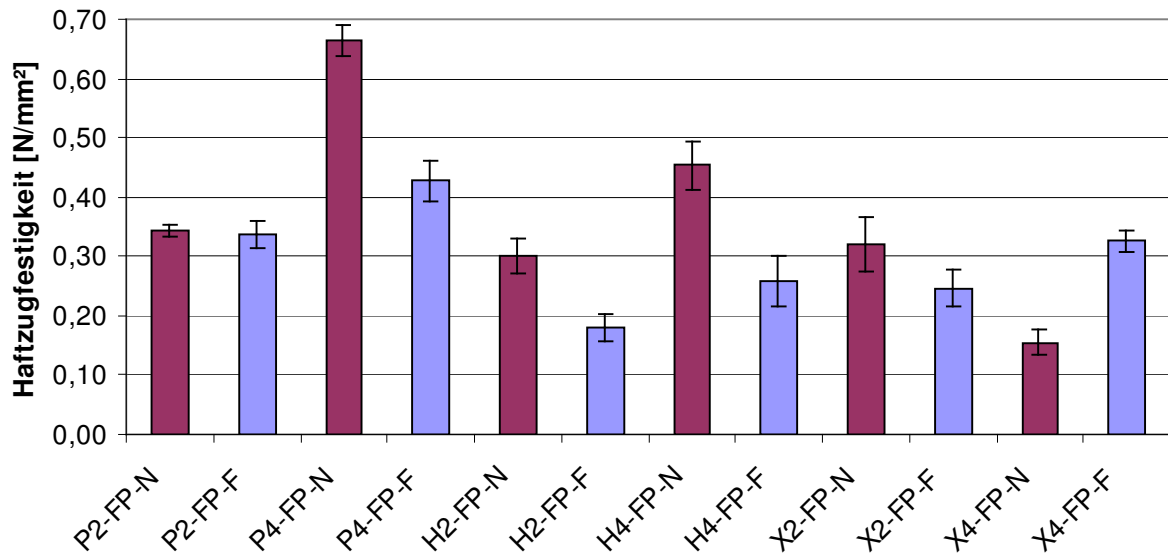


Bild 15: Vergleich der Haftzugfestigkeiten der Proben mit Porenbetonkleber FP, nach 140 Tagen Lagerung (Mittel aus 5 Versuchen)

Nach 140 Tagen Lagerung sind im direkten Vergleich der Proben, die mit dem Porenbetonkleber FP hergestellt und kühl gelagert wurden, mit den Proben, die normal gelagert wurden, bei den Steinen P4, H2, H4 und X2 deutlich schlechtere Werte bei der kühlen Variante mit hoher rel. Luftfeuchte vorhanden. Besonders ausgeprägt ist der Unterschied bei H4-FP.

Der Unterschied bei H4-FP und P4-FP resultiert dabei im Wesentlichen daraus, dass nach 28 Tagen Lagerung bei der kühl gelagerten Variante kein weiterer Festigkeitszuwachs mehr vorhanden war. Bei den normal gelagerten Proben nahm in diesem Zeitraum die Haftzugfestigkeit noch um rd. 40 % bzw. 45 % zu. Dieser Unterschied kann auf den Einfluss der Lagerung zurückgeführt werden.

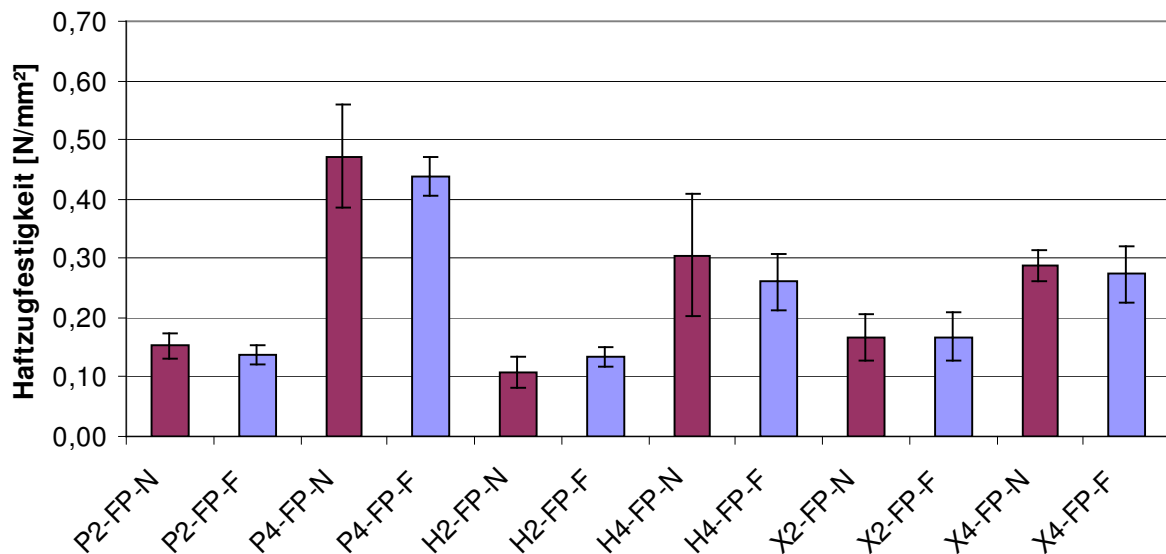


Bild 16: Vergleich der Haftzugfestigkeiten der Proben mit Porenbetonkleber FP, nach 28 Tagen Lagerung (Mittel aus 5 Versuchen)

Bei H2-FP und X2-FP sind im direkten Vergleich der Lagerungsarten nach 140 Tagen ebenfalls die kühl gelagerten Proben deutlich schlechter als die normal gelagerten Proben. Im Gegensatz zu P4-FP und H4-FP ist jedoch hier auch bei den kühl gelagerten Proben ein Festigkeitszuwachs im Vergleich zu den 28 Tage-Werten vorhanden. Dieser ist allerdings bei den normal gelagerten Proben wesentlich stärker ausgeprägt. Ob hier ein negativer Einfluss der kühlen Lagerung durch eine Ettringit- oder Thaumasitbildung Ursache des geringen Festigkeitszuwachses ist, oder ob die Reaktionskinetik nur durch die niedrige Temperatur verlangsamt wurde, konnte im Rahmen dieser Untersuchungen nicht eindeutig festgestellt werden.

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 schlechter 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 Er-

gebissen der Dehnungsmessungen aus Abschnitt 3.5. 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.

3.8 Ergebnisse der Haftscherfestigkeitsuntersuchungen

Nach einer Lagerungsdauer von 28 Tagen konnte bei den Proben, die mit dem Dünnbettmörtel MD hergestellt wurden, kein einheitliches Bild festgestellt werden (siehe Bild 17).

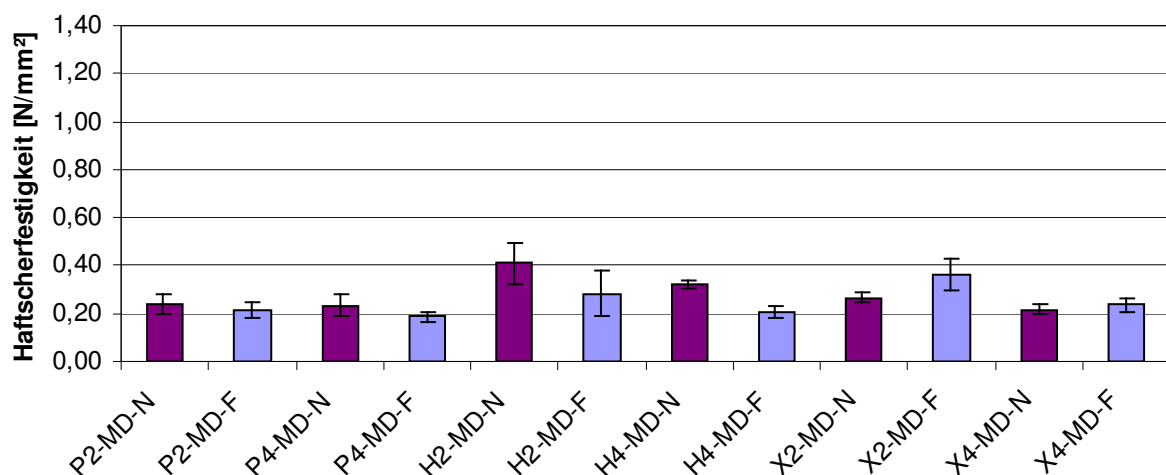


Bild 17: Vergleich der Haftscherfestigkeiten der Proben mit Dünnbettmörtel MD, nach 28 Tagen Lagerung (Mittel aus 3 Versuchen)

Die Mittelwerte der Haftscherfestigkeiten der Prüfkörper lagen bis auf die Proben X2 und X4 bei kühler Lagerung unter dem Niveau der normal gelagerten Proben.

Nach 140 Tagen Lagerung konnte lediglich bei H4-MD bei kühler Lagerung eine deutlich geringere mittlere Haftscherfestigkeit als bei den normal gelagerten Proben ermittelt werden (siehe Bild 18). Bei den übrigen Proben dieser Serie lagen die Haftscherfestigkeit auf gleichem oder über dem Niveau der normalen Lagerung. Insgesamt konnte kein negativer Einfluss der kühlen Lagerung auf die Haftscherfestigkeiten dieser Prüferserie festgestellt werden. Dies wird gestützt durch die Tatsache, dass der nach 140 Tagen Lagerung festgestellte Unterschied bei H4-MD bei kühler Lagerung bereits nach 28 Tagen Lagerung in dieser Größenordnung ermittelt wurde. Es stellte sich also im Verlauf der Lagerung keine weitere Verschlechterung ein.

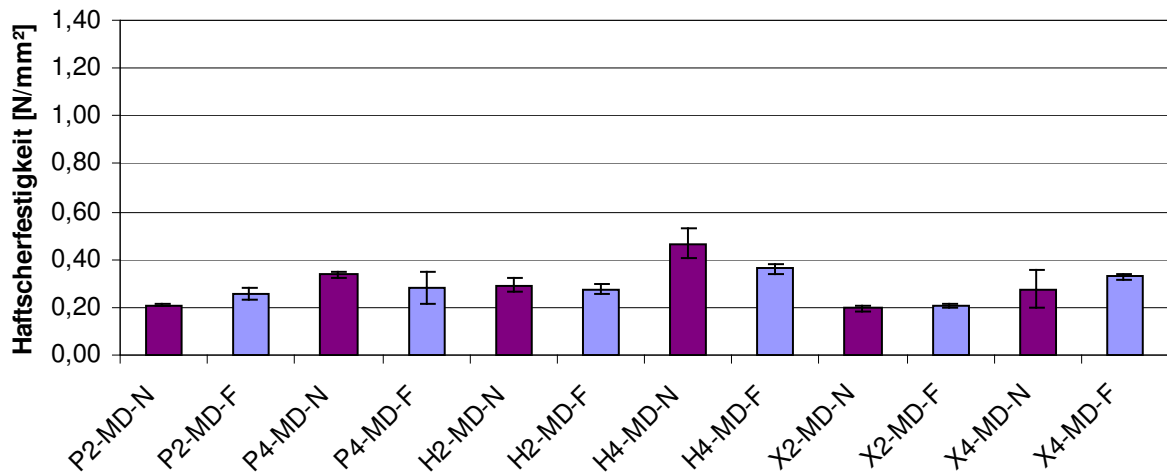


Bild 18: Vergleich der Haftscherfestigkeiten der Proben mit Dünnbettmörtel MD, nach 140 Tagen Lagerung (Mittel aus 3 Versuchen)

Bei den Proben der Serie X4-MP und X2-MP konnte nach 140 Tagen Lagerungsdauer ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Lagerungsarten festgestellt werden. Die Werte der kühlen Lagerung lagen rd. 54 % unter den Werten der Normallagerung (siehe Bild 19).

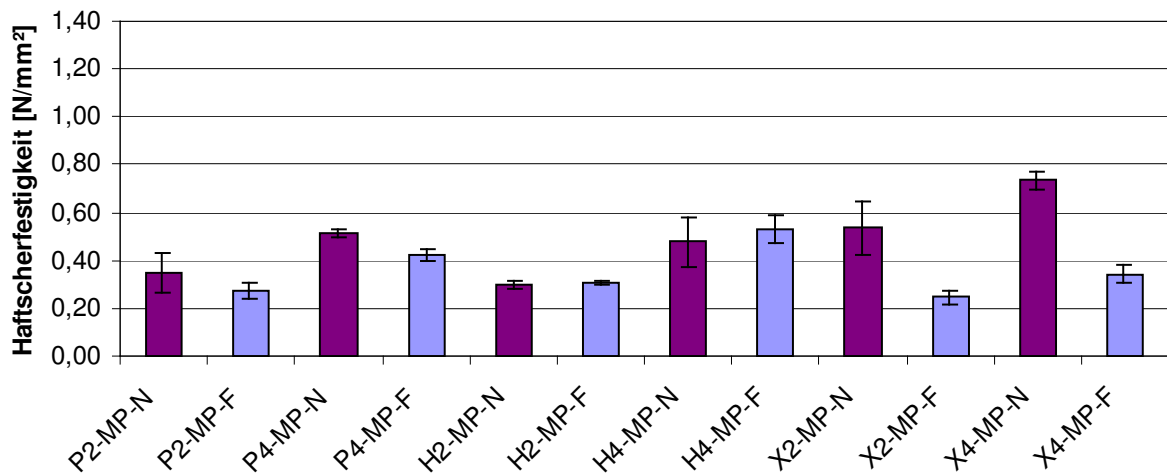


Bild 19: Vergleich der Haftscherfestigkeiten der Proben Porenbetonkleber MP, nach 140 Tagen Lagerung (Mittel aus 3 Versuchen)

Dieser Unterschied war nach einer Lagerungsdauer von 28 Tagen nicht vorhanden (siehe Bild 20).

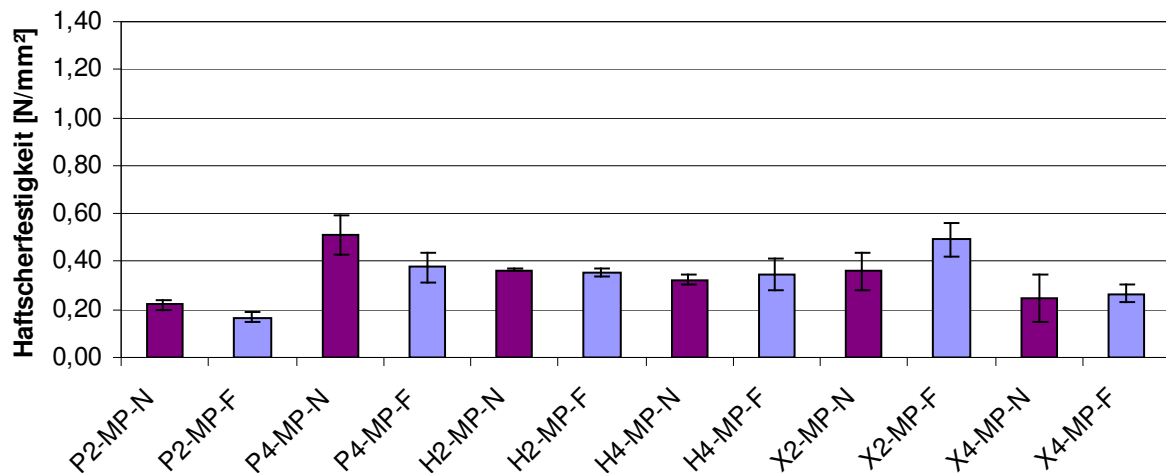


Bild 20: Vergleich der Haftscherfestigkeiten der Proben mit Porenbetonkleber MP, nach 28 Tagen Lagerung (Mittel aus 3 Versuchen)

Nach 28 Tagen Lagerung lagen die Mittelwerte der Lagerung bei niedriger Temperatur und hoher rel. Luftfeuchte etwas über denen der Normallagerung. Dies bedeutete, dass im Verlauf der Lagerung ein Festigkeitsverlust bei diesen Proben stattgefunden hat. Darauf deutet insbesondere bei der Probe X2-MP-F die Tatsache hin, dass nach 140 Tagen Lagerung die mittlere Haftscherfestigkeit rd. 50% unter dem Wert nach 28 Tagen lag. Bei der Probe X4-MP-F lag die mittlere Festigkeit nach 140 Tagen zwar über dem Wert nach 28 Tagen, aber es hat kein nennenswerter Festigkeitszuwachs stattgefunden.

Bei den Steinsorten H2 und H4 in Verbindung mit dem Porenbetonkleber MP bestand nach 140 Tagen Lagerung kein nennenswerter Unterschied zwischen den Haftscherfestigkeiten bei feuchter und normaler Lagerung. Allerdings lagen die Festigkeiten nach 140 Tagen auf dem Niveau nach 28 Tagen Lagerung, so dass im Verlauf der Lagerungsdauer keine Festigkeitsentwicklung stattfand.

Die restlichen Steinsorten P2 und P4 der Versuchsreihe mit Porenbetonkleber MP lieferten nach 140 Tagen Lagerung bei den kühl gelagerten Proben etwas niedrigere mittlere Haftscherfestigkeiten als bei normaler Lagerung. Allerdings waren auch schon nach 28 Tagen Lagerungsdauer die Werte der kühl gelagerten Proben unter dem Niveau der normal gelagerten Proben. Es fand durch die Lagerung also keine weitere Verschlechterung der Haftscherfestigkeiten bei diesen Steinsorten statt. Die Werte nach 140 Tagen Lagerung lagen bei beiden Lagerungsarten über den Werten nach 28 Tagen, d.h. es fand eine Festigkeitsentwicklung im Lauf der Zeit statt, die allerdings nur schwach ausgeprägt war.

Die Auswertung der Haftscherfestigkeitsversuche nach 28 Tagen mit dem Dünnbettmörtel FD zeigte, dass lediglich bei den Steinen H4 und X4 bei kühler Lagerung etwas niedrigere mittlere

re Festigkeiten vorhanden waren, als bei normaler Lagerung. Die Unterschiede liegen jedoch im Bereich der Streuungen der Messergebnisse. Bei den übrigen Proben dieser Versuchsreihe war die kühle Lagerung gleich oder besser wie die normale Lagerung (siehe Bild 21).

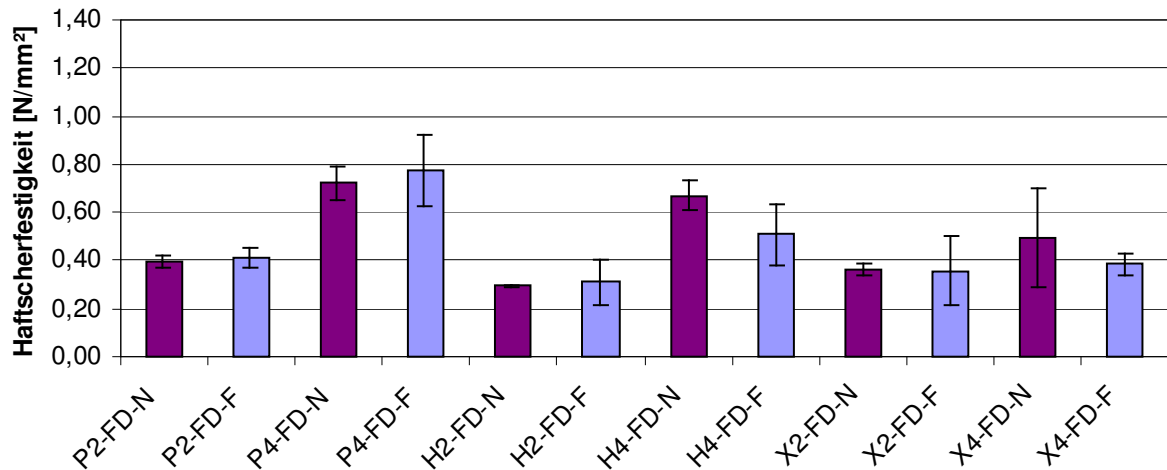


Bild 21: Vergleich der Haftscherfestigkeiten der Proben mit Dünnbettmörtel FD, nach 28 Tagen Lagerung (Mittel aus 3 Versuchen)

Nach einer Lagerungsdauer von 140 Tagen konnte im Vergleich der beiden Lagerungsarten bei den Steinen außer P2 eine deutlich geringere mittlere Haftscherfestigkeit festgestellt werden. Bei einem Vergleich der 28 Tage Festigkeiten und der Werte nach 14 Tagen zeigt sich, dass sich bei H2 und H4 die kühle Lagerung negativ auf die Haftscherfestigkeit auswirkt. Der bei X4 bereits nach 28 Tagen vorhandene Unterschied zwischen der kühlen und normalen Lagerung vergrößerte sich während der Messzeit. Dies bedeutet, dass auch bei dieser Probe ein negativer Einfluss der kühlen Lagerung vorhanden ist (siehe Bild 22).

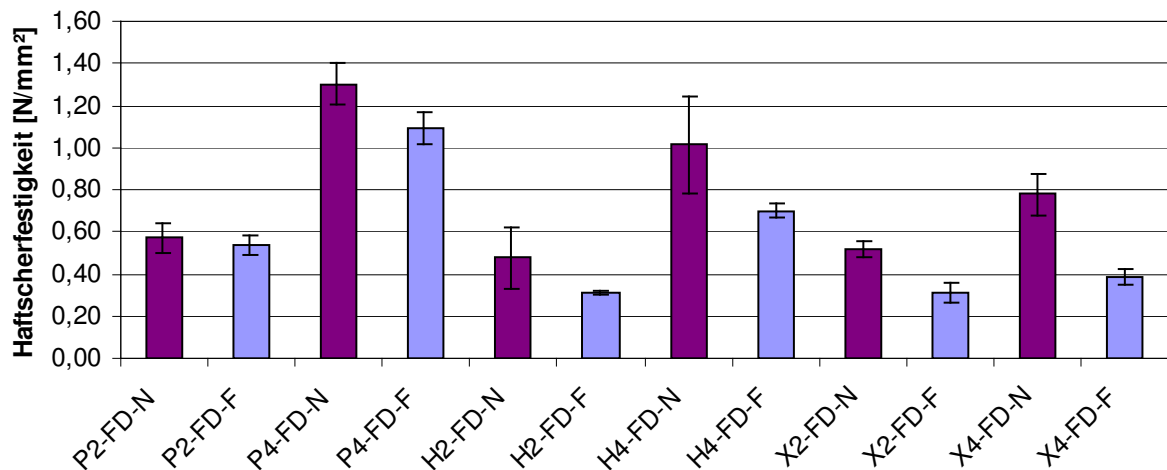


Bild 22: Vergleich der Haftscherfestigkeiten der Proben mit Dünnbettmörtel FD, nach 140 Tagen Lagerung (Mittel aus 3 Versuchen)

Nach 28 Tagen lieferten in der Versuchsserie, die mit dem Porenbetonkleber FP hergestellt wurden, bis auf H4 jeweils die kühl gelagerten Proben die höhere mittlere Haftscherfestigkeit (siehe Bild 23).

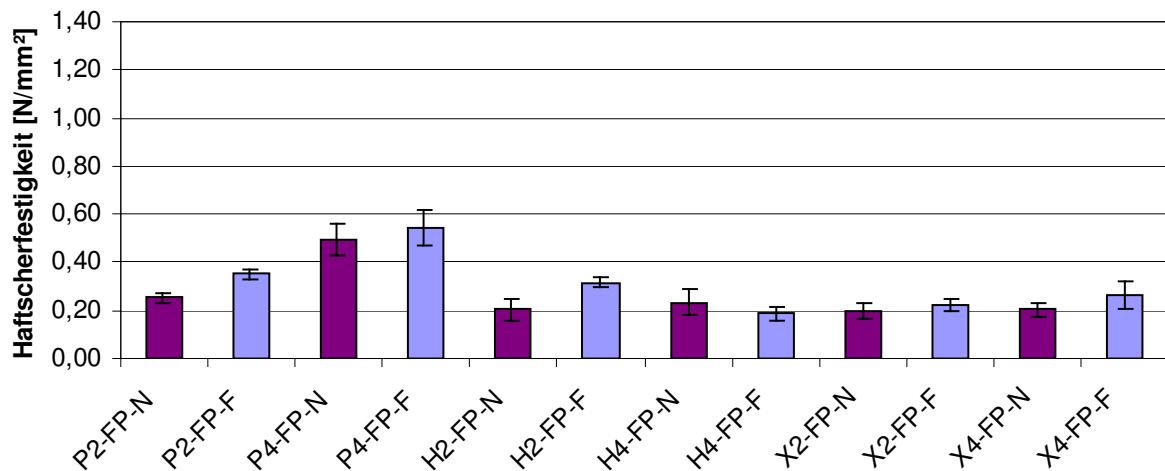


Bild 23: Vergleich der Haftscherfestigkeiten der Proben mit Porenbetonkleber FP, nach 28 Tagen Lagerung (Mittel aus 3 Versuchen)

Nach 140 Tagen Lagerung sind bei P4 und X4 signifikant geringere Festigkeiten nach kühler Lagerung ermittelt worden (siehe Bild 24).

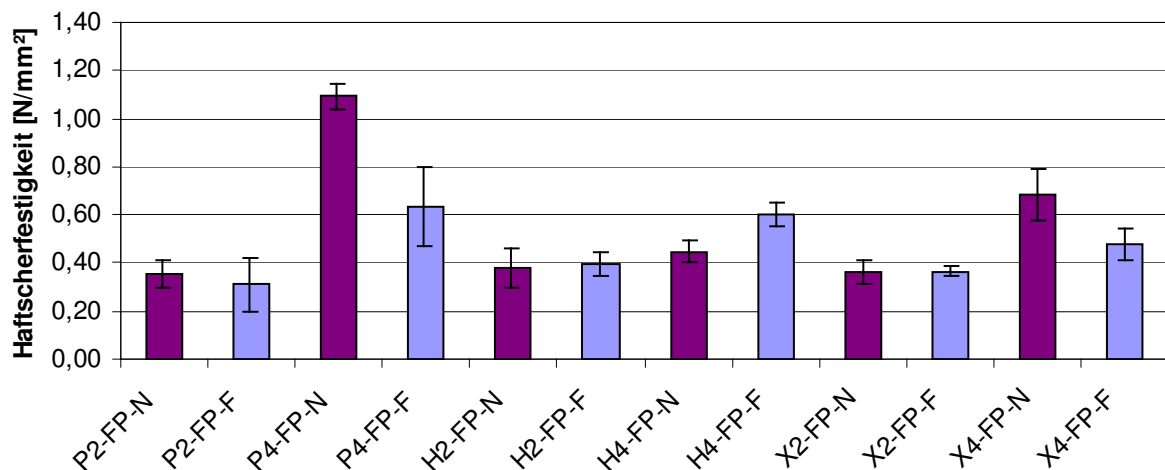


Bild 24: Vergleich der Haftscherfestigkeiten der Proben mit Porenbetonkleber FP, nach 140 Tagen Lagerung (Mittel aus 3 Versuchen)

Auch bei P2 wurde im Mittel eine etwas niedrigere Festigkeit gegenüber der normalen Lagerung gemessen. Der Unterschied liegt allerdings im Streubereich der beiden Versuchsserien.

Lediglich bei H2, X2 und H4 konnte nach der kühlen Lagerung keine niedrigere mittlere Festigkeit als bei normaler Lagerung festgestellt werden. Da bei allen Proben mit geringerer Festigkeit nach 140 Tagen bei kühler Lagerung die Werte nach 28 Tagen bei kühler Lagerung höher als bei normaler Lagerung waren, ist die niedrigere Festigkeit auf die kühle Lagerung zurückzuführen.

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 aus Abschnitt 3.5 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.

3.9 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 diesen beiden Materialien 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/mm².

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/mm² 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/mm² und lag somit zwischen den Mittelwerten der beiden anderen Prüfserien.

Die einzelnen Messergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen an den kleinen Prüfwänden sind in Tabelle 12 bis Tabelle 14, Beilage 21 zusammengestellt.

4 Zusammenfassung und Diskussion

Im Rahmen dieses Untersuchungsprogrammes sollte der Einfluss einer Ettringit- und/oder Thaumasilbildung auf das Tragverhalten von Porenbetonplansteinmauerwerk untersucht werden. Dazu wurden verschiedene Stein-Mörtelkombinationen gemäß dem in [4] beschriebenen Prüfverfahren auf ihre Eignung bei einer Lagerung in 20 °C und 65 % rel. Feuchte und bei Lagerung bei 5 °C und hoher Luftfeuchte (80 %- 90 %) untersucht. Für das Untersuchungsprogramm wurden sowohl 2 spezielle Porenbetonklebemörtel als auch 2 Dünnbettmörtel, die für Betonstein-, Kalksandstein- oder Ziegelmauerwerk verwendet werden können, ausgewählt.

Bei diesen 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 [4] 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 C₃A-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 [4] 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 C₃A zurückzuführen (siehe Tabelle 1, Beilage 1). Der niedrigere C₃A-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 Thaumasil 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 eingestuft 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 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 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 $2,8 \text{ N/mm}^2$, die normal gelagerten Proben wiesen eine Druckfestigkeit von $3,0 \text{ N/mm}^2$ auf und die ebenfalls bei hoher Luftfeuchte und niedriger Temperatur gelagerte Serie X4-FP-F erreichte eine mittlere Druckfestigkeit von $2,9 \text{ N/mm}^2$.

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.

Wie eingangs berichtet, hat sich bei der Bearbeitung von Schadensfällen gezeigt, dass in Porenbetonplansteinwänden, die bei feuchter und kühler Witterung errichtet wurden, Risse entstehen können, die sich im Stoß- und Lagerfugenbereich abzeichnen. Hierbei waren Dünnbettmörtel nach DIN 1053 [7] bzw. DIN V 18580 [8] verwendet worden, die nicht speziell für Porenbetonplansteinmauerwerk ausgezeichnet waren. Für Porenbetonplansteinmauerwerk hat die Industrie weitgehend weiße Dünnbettmörtel entwickelt, die in der Regel unter Verwendung eines Weißzementes mit geringem C_3A -Gehalt hergestellt werden.

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 [9] und DIN V 20000-412 [10] und ungünstiger Lagerung keine Verschlechterung der Druckfestigkeit festgestellt wurde, sollte zusätzlich eine verbindliche Verträglichkeitsprüfung z.B. wie in [4] beschrieben, eingeführt werden.

Allerdings eignen sich die Dehnungsmessungen wie in [4] 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] DIN EN 1015-3 - Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch), Ausgabe Juni 2004
- [2] DIN EN 1015-6 - Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 6: Bestimmung der Rohdichte von Frischmörtel; Ausgabe: Dezember 1998
- [3] DIN EN 1015-11 - Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 11: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel, Ausgabe: Oktober 1999
- [4] DINplus Zertifizierungsprogramm Porenbetonprodukte nach DIN 4165 und DIN 4166, Stand März 2001, DIN CERTCO, Berlin
- [5] DIN EN 1052-3 Prüfverfahren für Mauerwerk - Teil 3: Bestimmung der Anfangsscherfestigkeit, Ausgabe März 2002
- [6] DIN EN 1052-1 Prüfverfahren für Mauerwerk - Teil 3: Bestimmung der Druckfestigkeit, Ausgabe Dezember 1998
- [7] DIN 1053-1 - Mauerwerk - Teil 1: Berechnung und Ausführung, Ausgabe November 1996
- [8] DIN V 18580 - Mauermörtel mit besonderen Eigenschaften, Ausgabe September 2006
- [9] DIN EN 998-2 – Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau – Teil 2: Mauermörtel, Ausgabe September 2003
- [10] DIN V 20000-412 – Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken – Teil 412:Regeln für die Verwendung von Mauermörtel nach DIN EN 998-2:2003-09

Tabelle 1: Ergebnisse der quantitativen Röntgenbeugungsanalyse (Rietveld-Analyse) der verwendeten Dünnbettmörtel

Phase	Anteil im Dünnbettmörtel		Anteil im Porenbetonkleber	
	FD [%]	MD [%]	FP [%]	MP [%]
m_C ₃ S	16,42	21,48	15,44	11,00
beta_C ₂ S	3,00	7,61	4,00	5,34
c_C ₃ A	1,53	0,83	0,27	0,38
o_C ₃ A	0,78	0,19	0,80	0,52
MgO frei	0,29	-	-	0,18
CaO frei	0,06	0,10	0,18	0,20
Portlandit	2,46	1,12	0,36	0,58
Calcit	15,18	14,37	1,75	3,32
Dolomit	0,18	1,36	0,52	2,09
Anhydrit	0,96	1,03	1,36	1,29
Dihydrat	0,83	0,80	1,03	1,13
Quarz	51,73	41,39	64,64	55,36
Garronit	0,88	0,74	0,64	1,61
Ettringit	0,43	0,48	0,18	0,16
Anorthit	5,28	7,99	8,83	16,81
Muskovit	-	0,53	-	-

Tabelle 2: Wasser-Trockenmörtelverhältnis w/m sowie Frisch- und Festmörteleigenschaften der verwendeten Dünnbettmörtel nach Lagerung für 7 Tage bei 20 °C und 95 % rel. Feuchte und anschließend 21 Tage bei 20 °C und 65 % rel. Feuchte

Mörtel	w/m [-]	Ausbreit- maß [mm]	Frischmör- telrohddichte [kg/dm ³]	Festmörtel- rohddichte [kg/dm ³]	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	Druckfestigkeit [N/mm ²]
MD	0,32	169	1,71	1,52	6,70	18,9
MP	0,25	166	1,74	1,59	4,05	12,9
FD	0,29	197	1,82	1,68	7,08	25,4
FP	0,28	204	1,83	1,61	5,27	18,9

Tabelle 3: Wasser-Trockenmörtelverhältnis w/m sowie Frisch- und Festmörteleigenschaften der verwendeten Dünnbettmörtel nach Lagerung für 7 Tage bei 20 °C und 95 % rel. Feuchte, 7d bei 20 °C und 65 % rel. Feuchte und anschließend 14 Tage bei 20 °C in Wasser

Mörtel	w/m [-]	Ausbreit- maß [mm]	Frischmör- telrohddichte [kg/dm ³]	Festmörtel- rohddichte [kg/dm ³]	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	Druckfestigkeit [N/mm ²]
MD	0,32	169	1,71	1,71	3,70	13,1
MP	0,25	166	1,74	1,78	2,81	12,4
FD	0,29	197	1,82	1,84	4,61	18,5
FP	0,28	204	1,83	1,86	3,64	15,1

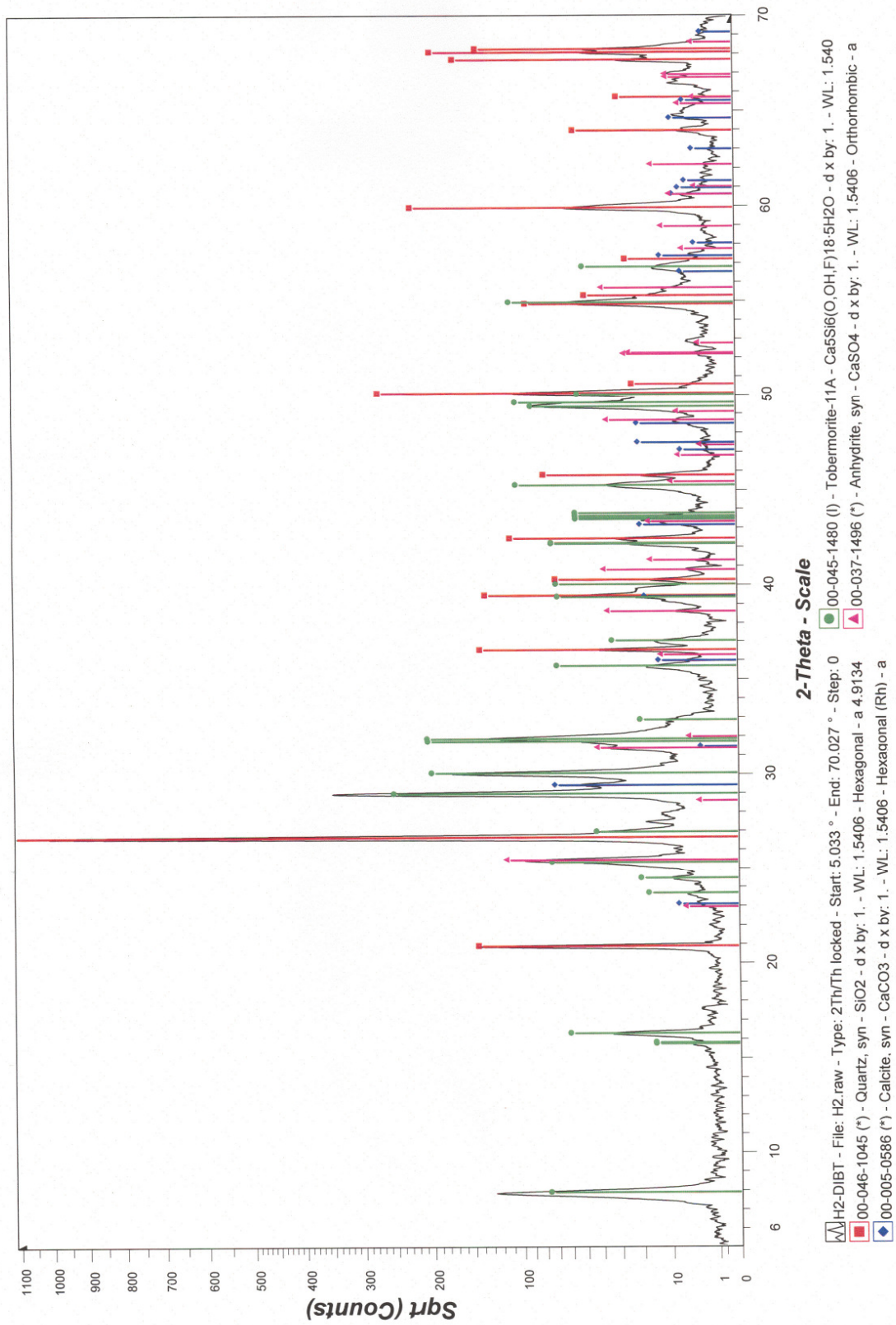


Bild 25: Ergebnis der Röntgenbeugungsanalyse der Steinsorte H2 im Anlieferungszustand

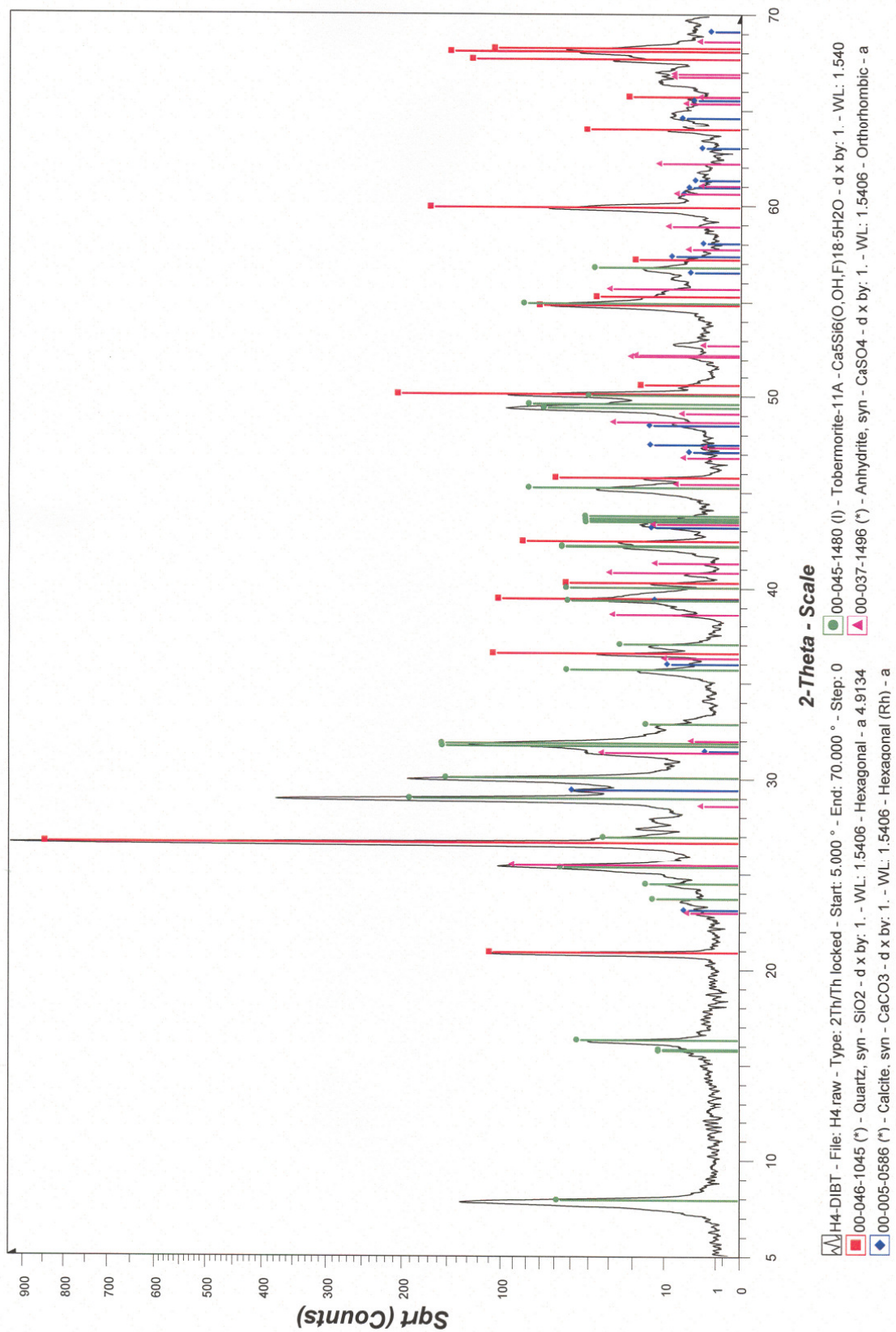


Bild 26: Ergebnis der Röntgenbeugungsanalyse der Steinsorte H4 im Anlieferungszustand

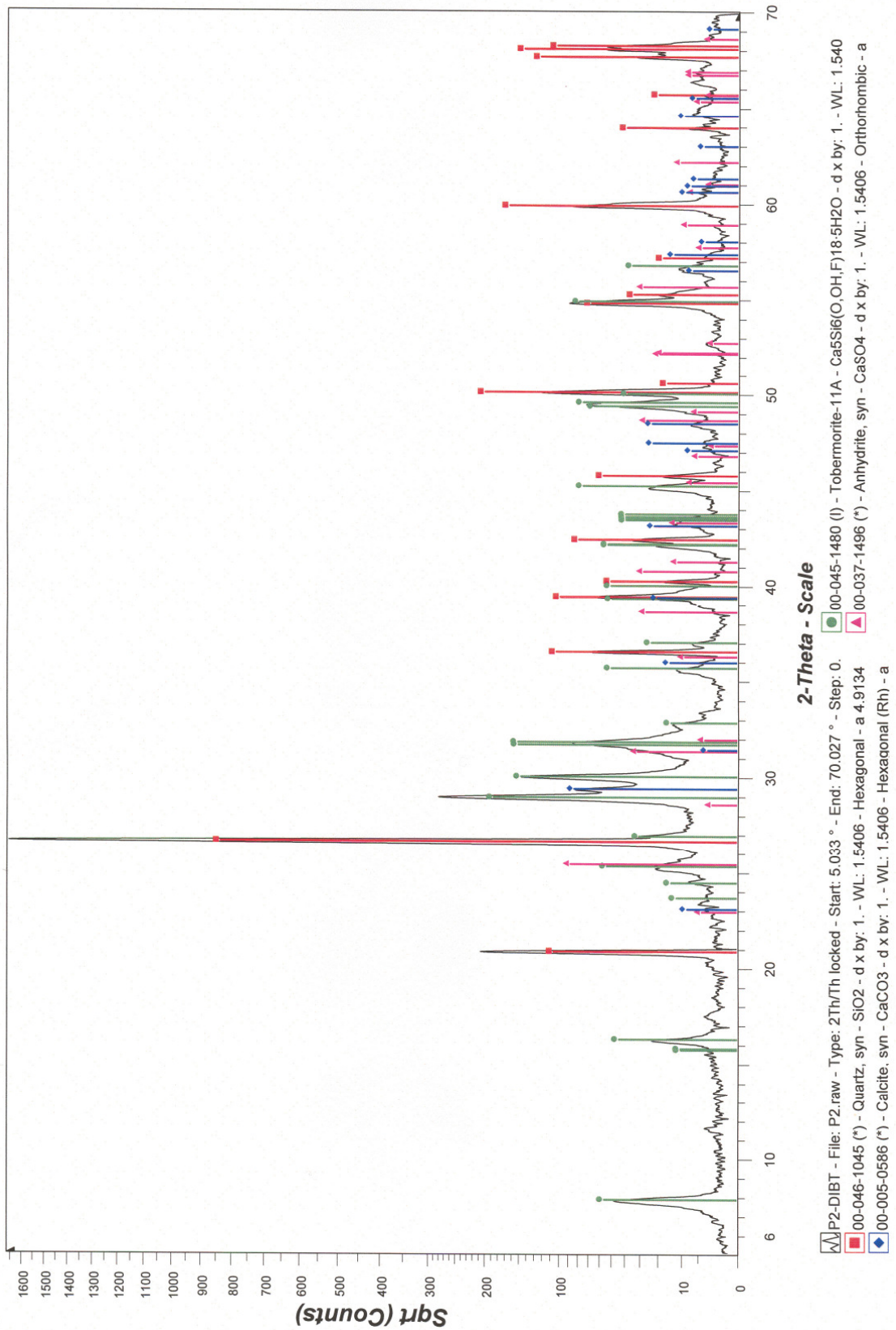


Bild 27: Ergebnis der Röntgenbeugungsanalyse der Steinsorte P2 im Anlieferungszustand

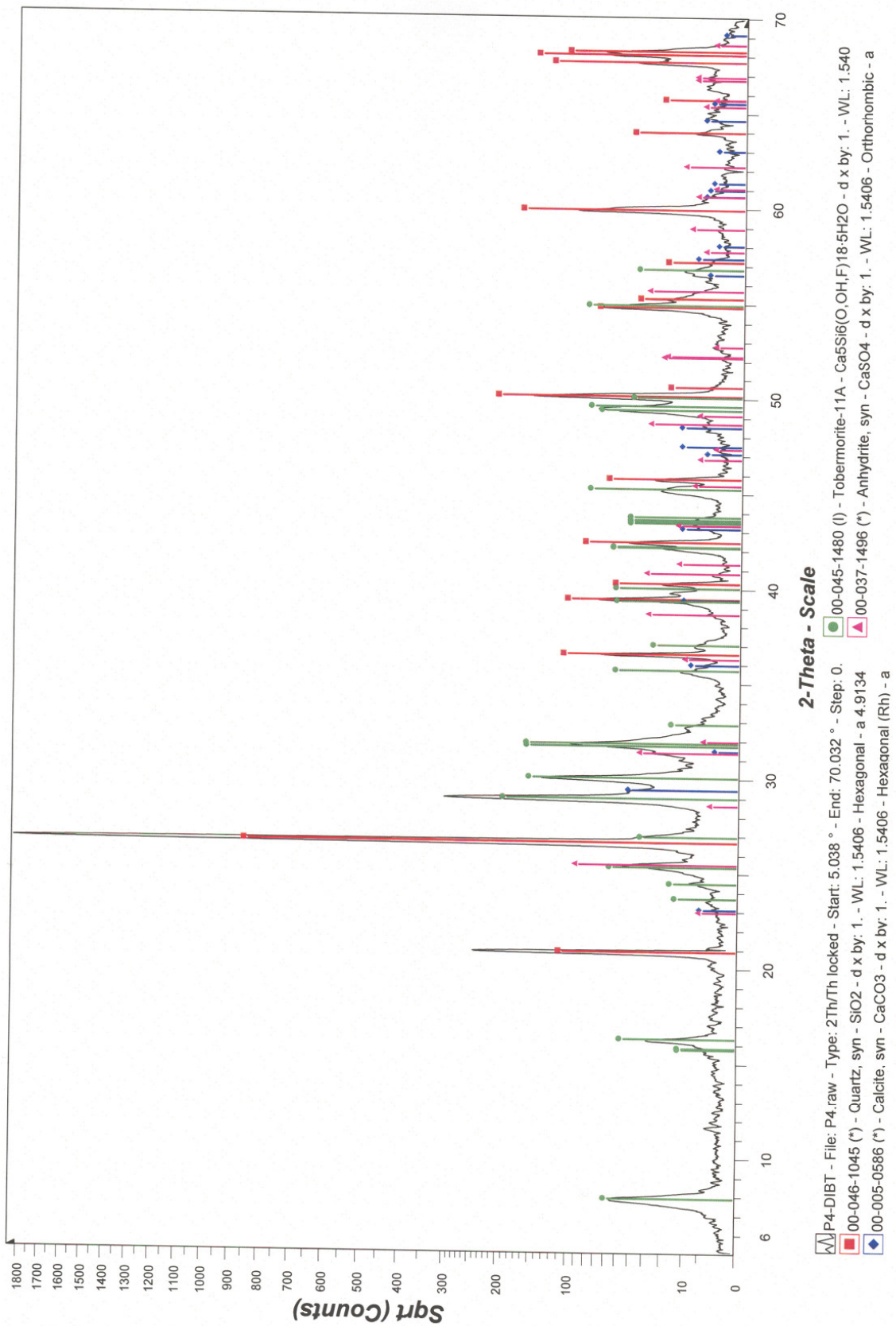


Bild 28: Ergebnis der Röntgenbeugungsanalyse der Steinsorte P4 im Anlieferungszustand

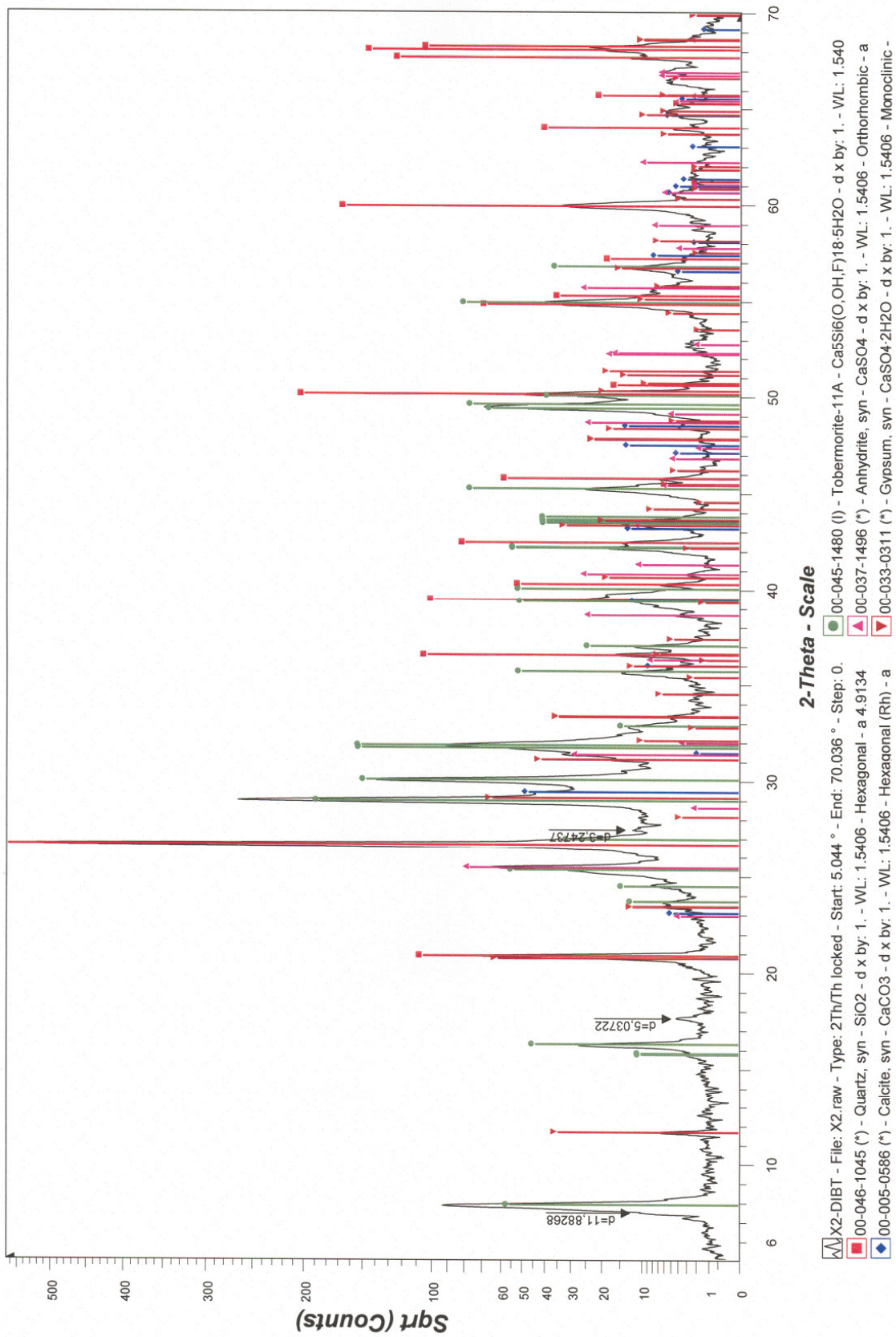


Bild 29: Ergebnis der Röntgenbeugungsanalyse der Steinsorte X2 im Anlieferungszustand

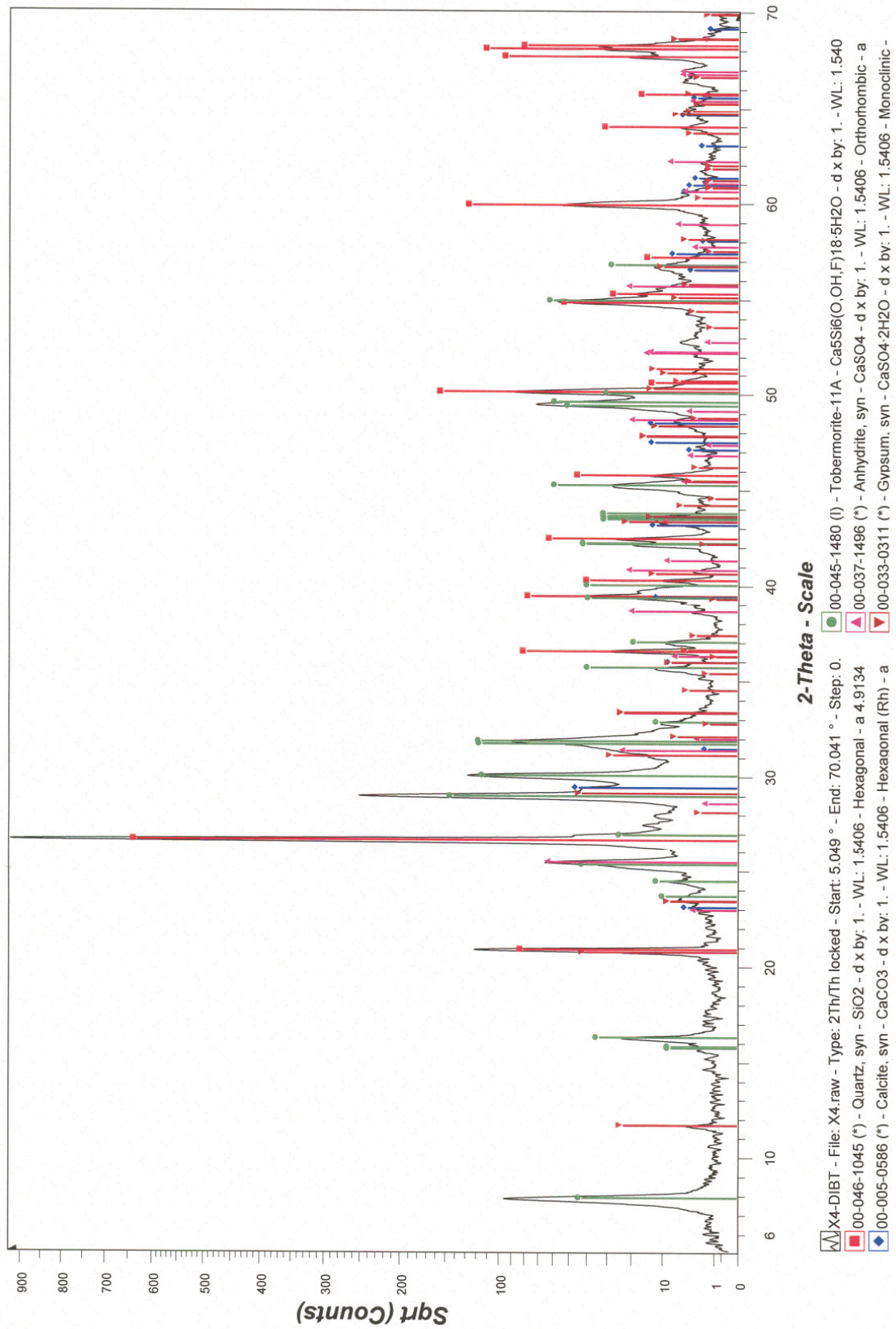


Bild 30: Ergebnis der Röntgenbeugungsanalyse der Steinsorte X4 im Anlieferungszustand

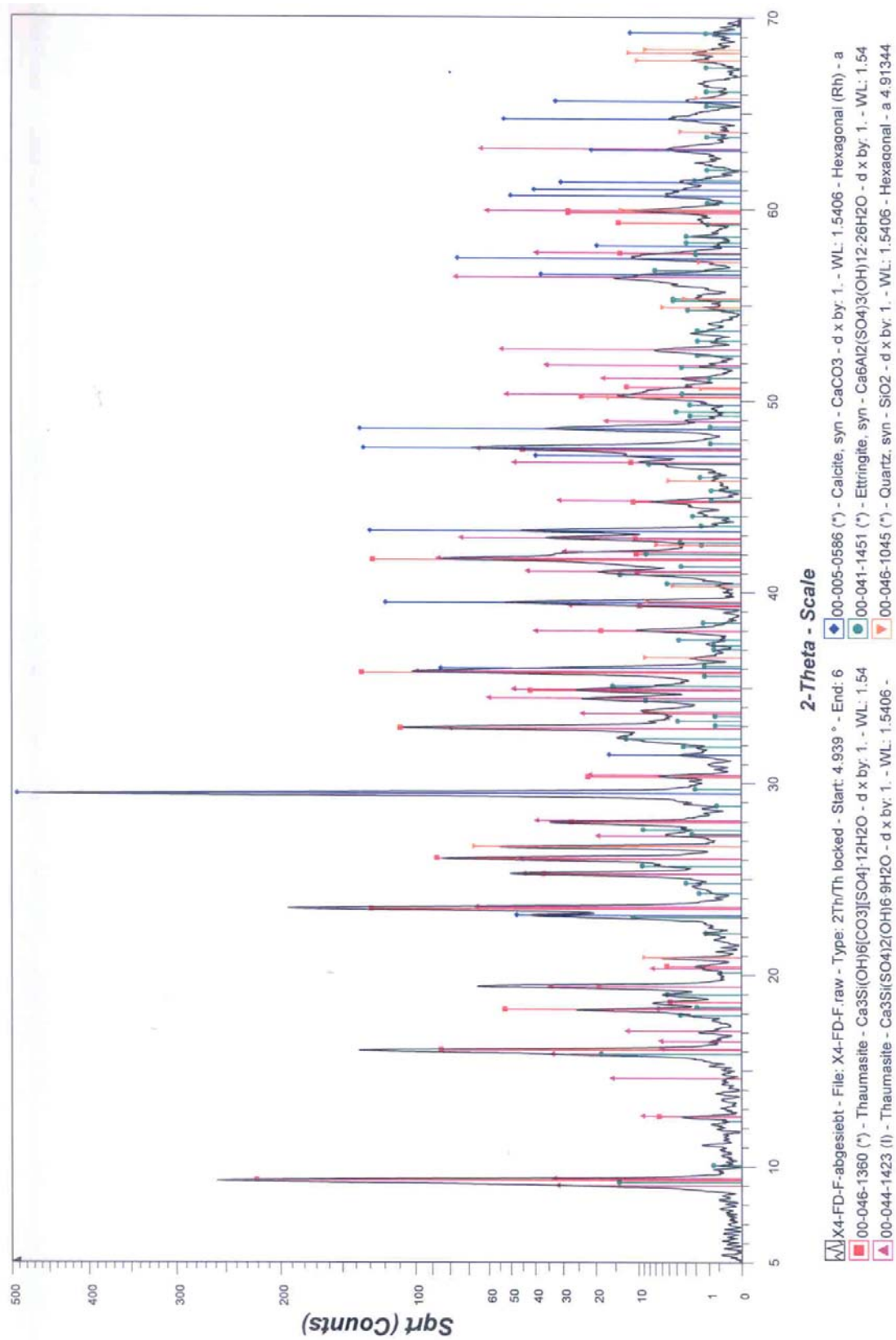


Bild 31: Ergebnis der Röntgenbeugungsanalyse der Probe X4-FD-F nach 140 Tagen Lagerung

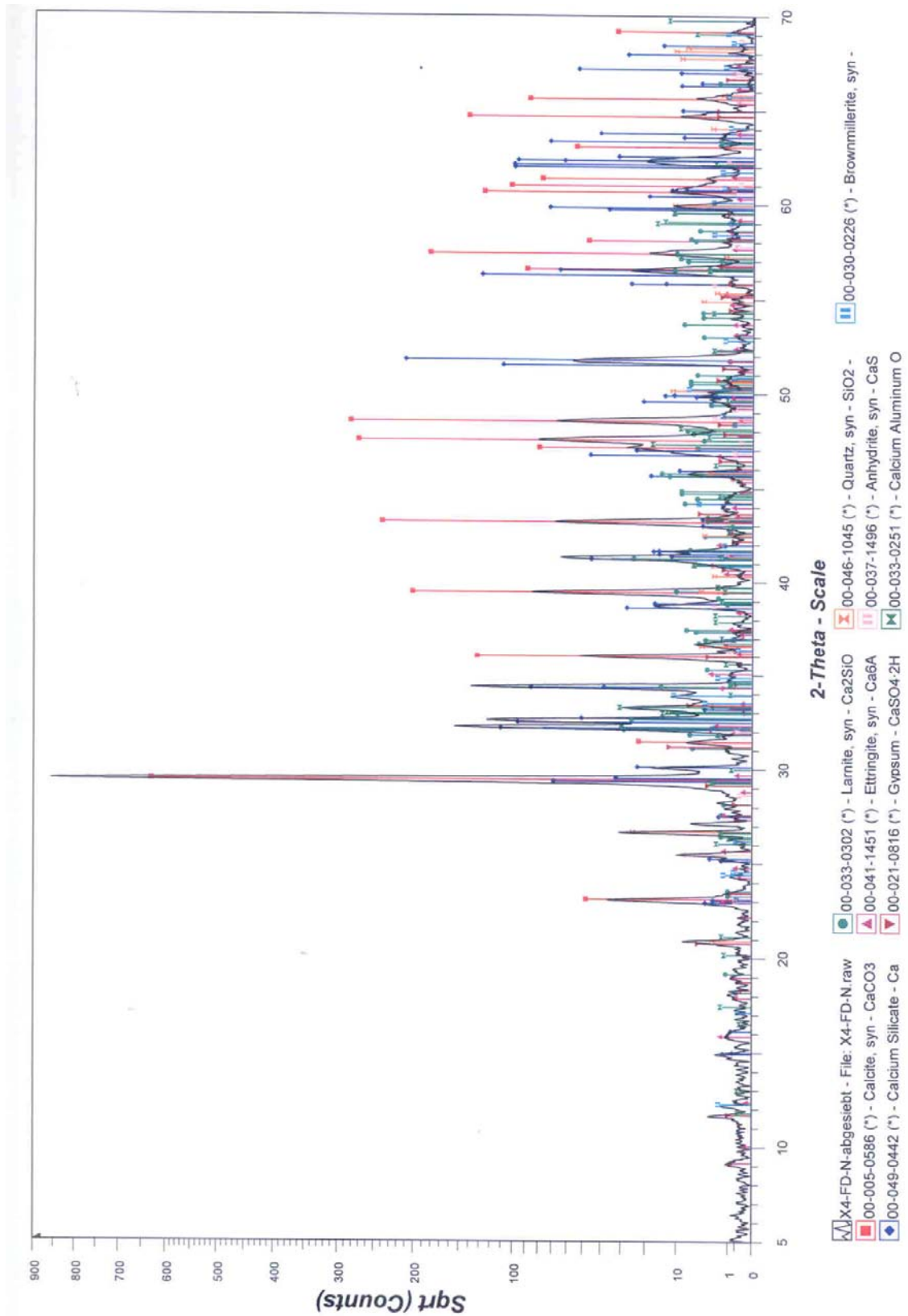


Bild 32: Ergebnis der Röntgenbeugungsanalyse der Probe X4-FD-N nach 140 Tagen Lagerung

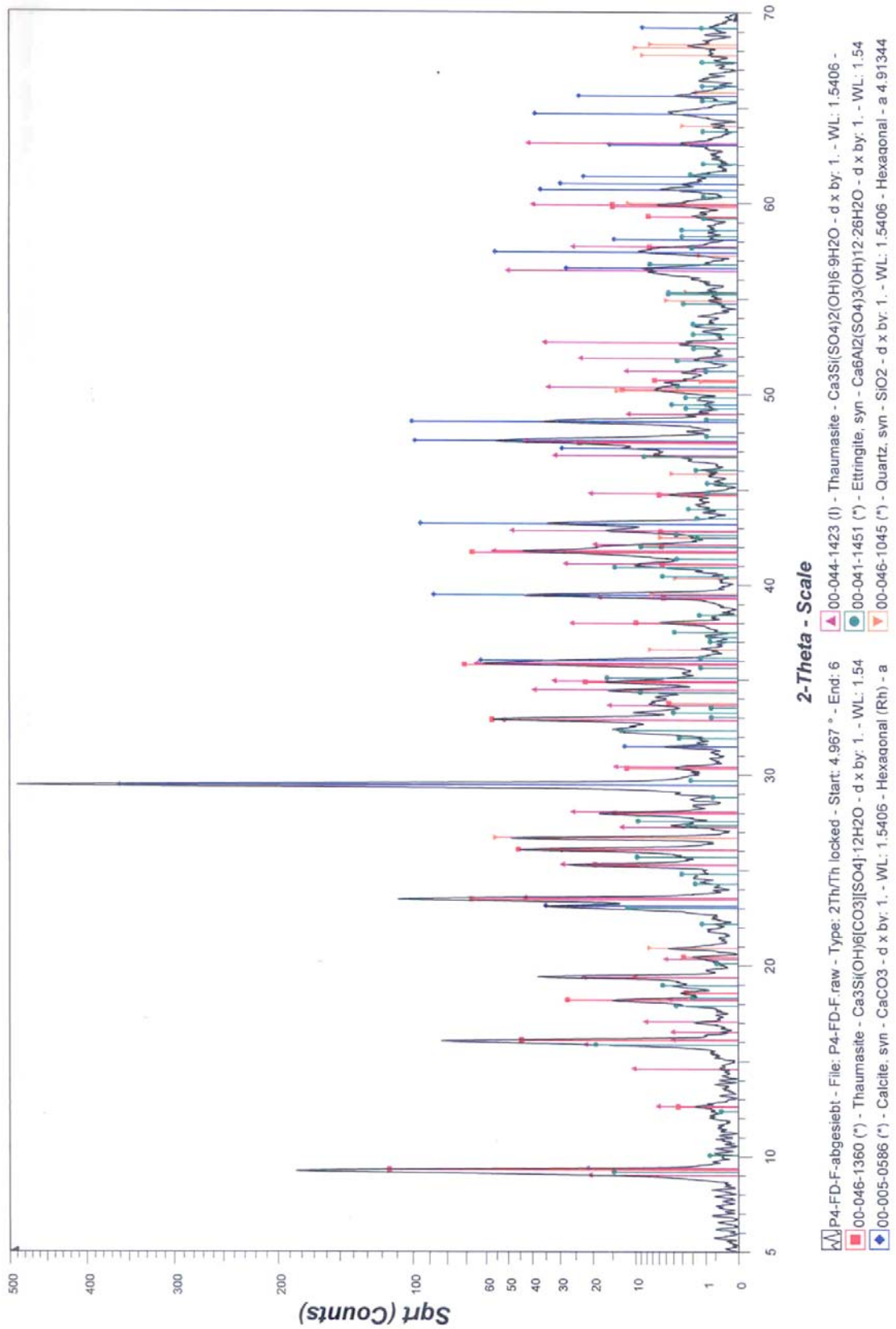


Bild 33: Ergebnis der Röntgenbeugungsanalyse der Probe P4-FD-F nach 140 Tagen Lagerung

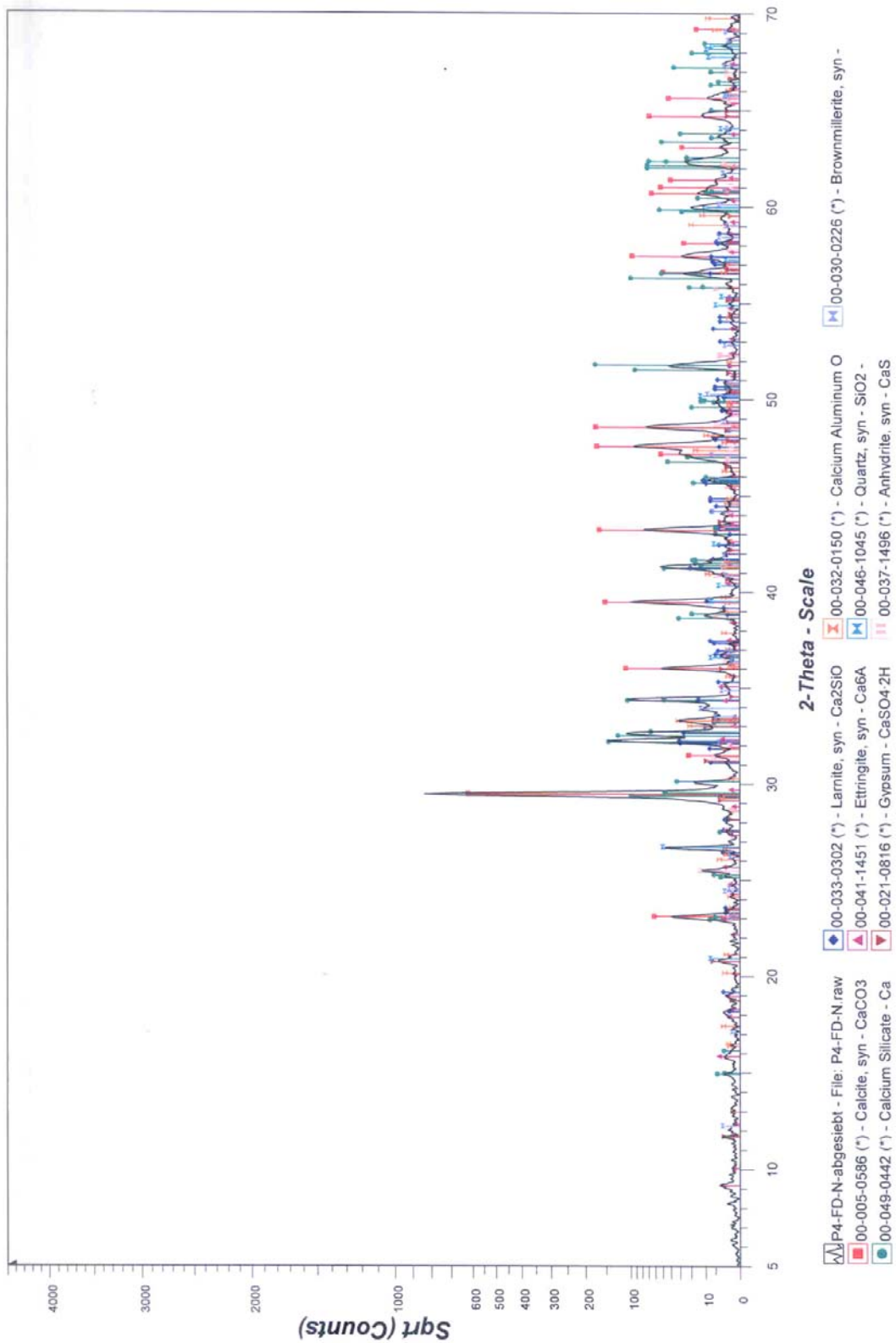


Bild 34: Ergebnis der Röntgenbeugungsanalyse der Probe P4-FD-N nach 140 Tagen Lagerung

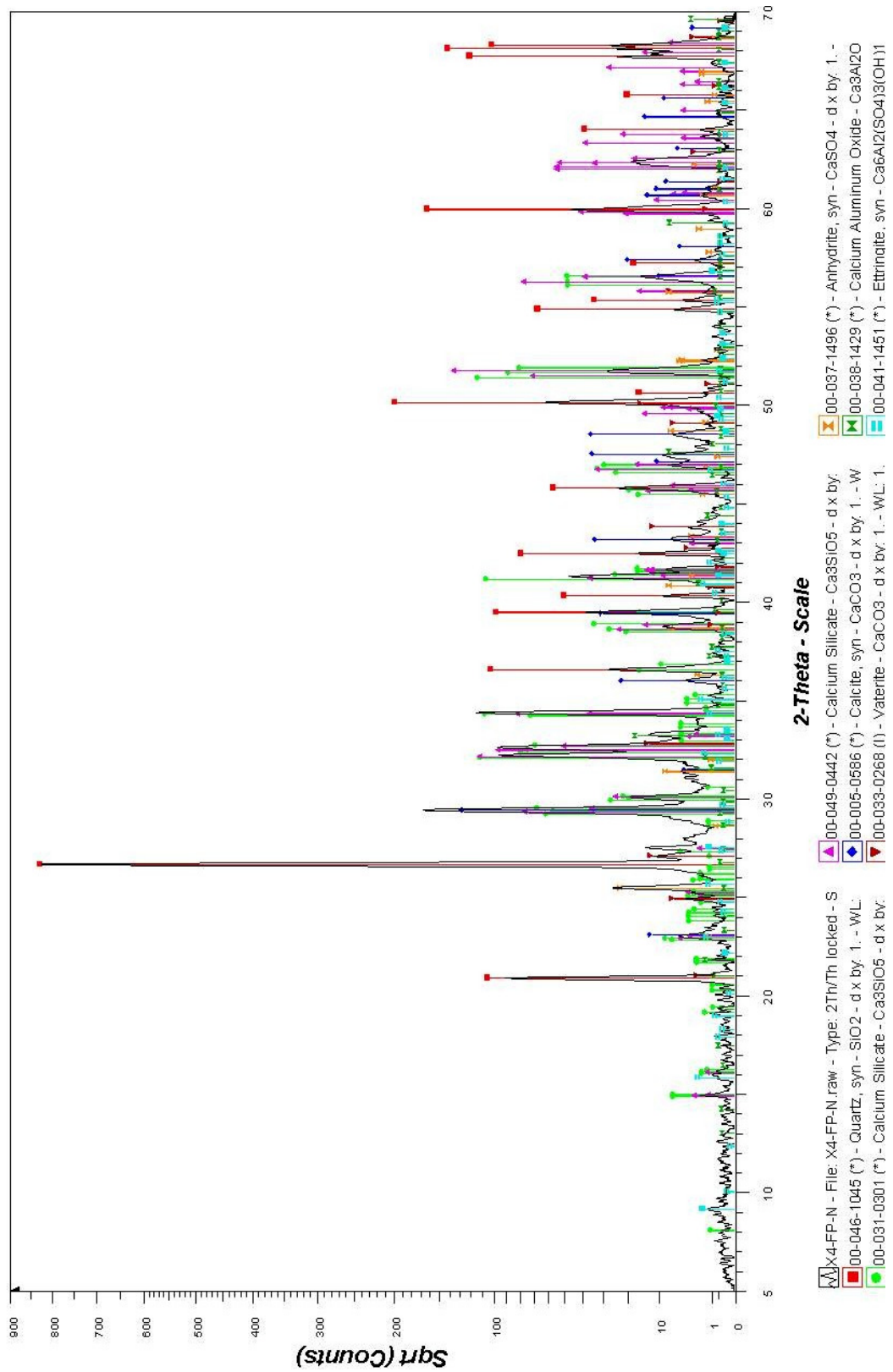


Bild 35: Ergebnis der Röntgenbeugungsanalyse der Probe X4-FP-N nach 140 Tagen Lagerung

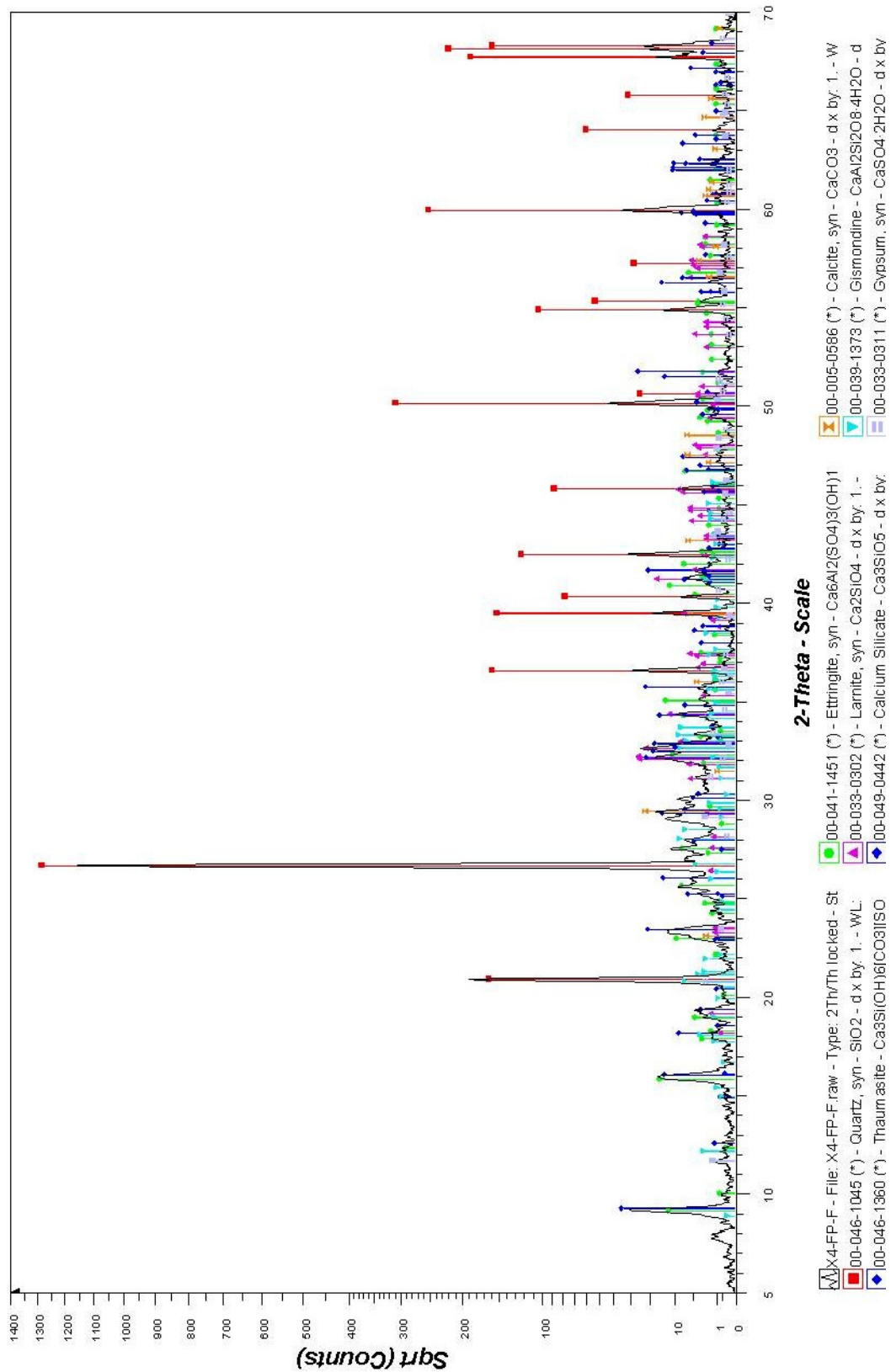


Bild 36: Ergebnis der Röntgenbeugungsanalyse der Probe X4-FP-F nach 140 Tagen Lagerung

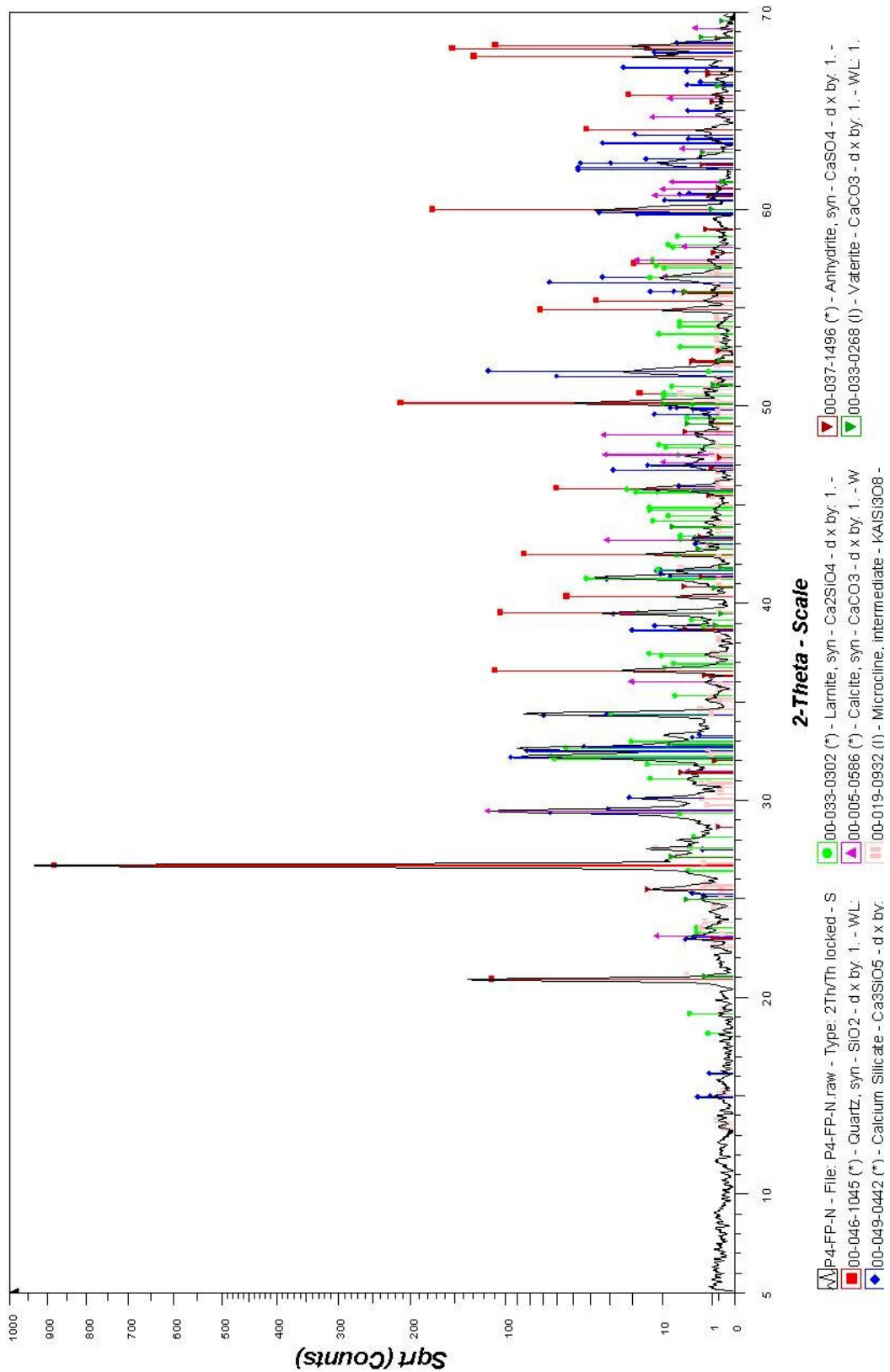


Bild 37: Ergebnis der Röntgenbeugungsanalyse der Probe P4-FP-N nach 140 Tagen Lagerung

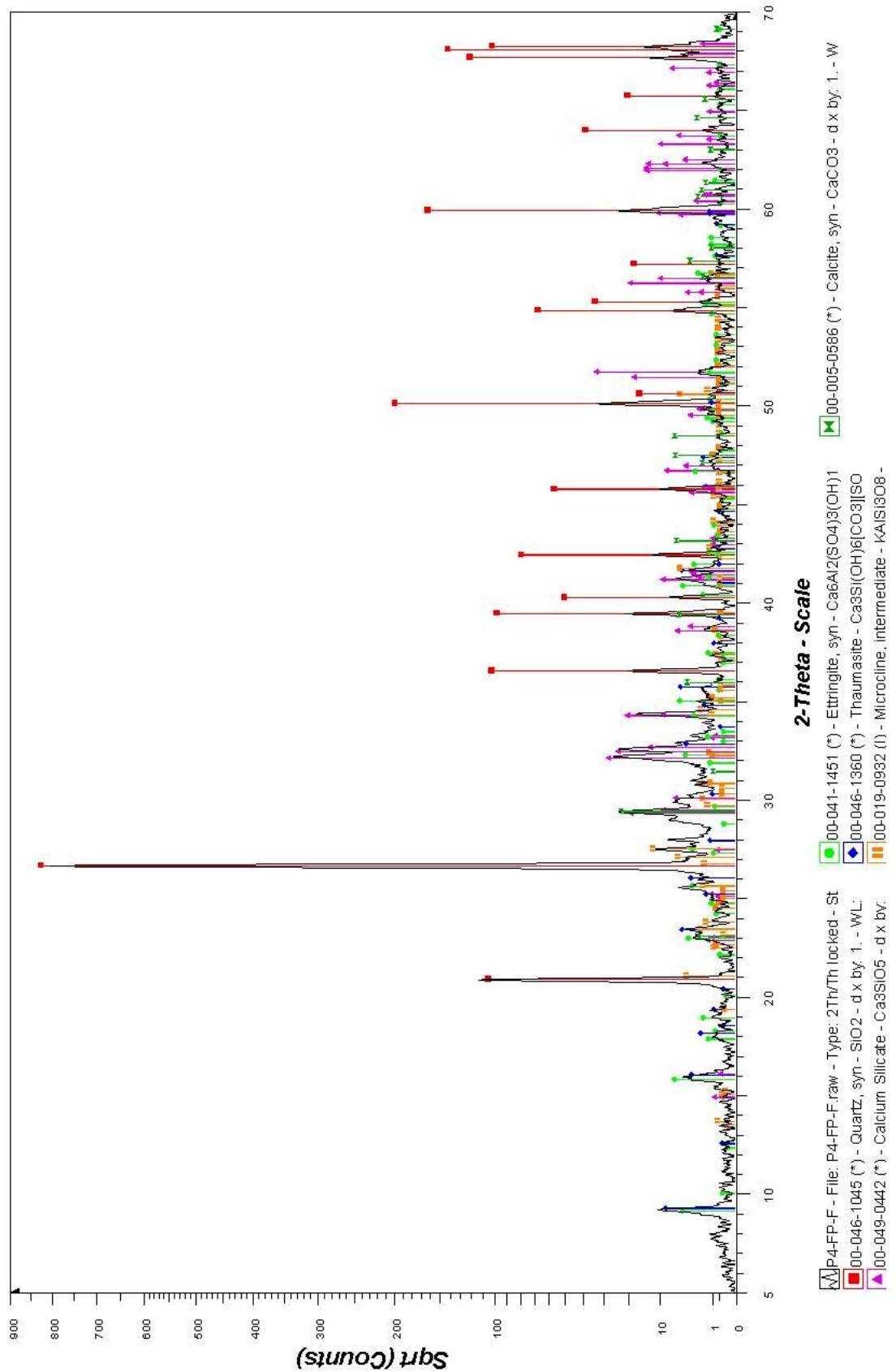


Bild 38: Ergebnis der Röntgenbeugungsanalyse der Probe P4-FP-F nach 140 Tagen Lagerung

Tabelle 4: Ergebnisse der Haftzugfestigkeitsuntersuchungen nach 28 Tagen und 140 Tagen Lagerungsdauer der Proben mit Dünnbettmörtel MD (Mittelwert aus 5 Einzelprüfungen)

Probe	Haftzugfestigkeit in [N/mm ²] nach	
	28 d	140 d
P2-MD-N	0,14	0,19
P2-MD-F	0,14	0,17
P4-MD-N	0,24	0,30
P4-MD-F	0,25	0,26
H2-MD-N	0,15	0,19
H2-MD-F	0,08	0,14
H4-MD-N	0,21	0,33
H4-MD-F	0,18	0,21
X2-MD-N	0,22	0,21
X2-MD-F	0,14	0,22
X4-MD-N	0,19	0,20
X4-MD-F	0,11	0,25

Tabelle 5: Ergebnisse der Haftzugfestigkeitsuntersuchungen nach 28 Tagen und 140 Tagen Lagerungsdauer der Proben mit Plansteinklebemörtel MP (Mittelwert aus 5 Einzelprüfungen)

Probe	Haftzugfestigkeit in [N/mm ²] nach	
	28 d	140 d
P2-MP-N	0,15	0,18
P2-MP-F	0,18	0,24
P4-MP-N	0,19	0,23
P4-MP-F	0,32	0,34
H2-MP-N	0,21	0,32
H2-MP-F	0,19	0,28
H4-MP-N	0,26	0,43
H4-MP-F	0,24	0,40
X2-MP-N	0,27	0,25
X2-MP-F	0,28	0,29
X4-MP-N	0,24	0,36
X4-MP-F	0,22	0,29

Tabelle 6: Ergebnisse der Haftzugfestigkeitsuntersuchungen nach 28 Tagen und 140 Tagen Lagerungsdauer der Proben mit Dünnbettmörtel FD (Mittelwert aus 5 Einzelprüfungen)

Probe	Haftzugfestigkeit in [N/mm ²] nach	
	28 d	140 d
P2-FD-N	0,36	0,31
P2-FD-F	0,29	0,24
P4-FD-N	0,47	0,47
P4-FD-F	0,36	0,48
H2-FD-N	0,27	0,22
H2-FD-F	0,26	0,25
H4-FD-N	0,30	0,45
H4-FD-F	0,35	0,39
X2-FD-N	0,14	0,27
X2-FD-F	0,19	0,11
X4-FD-N	0,35	0,45
X4-FD-F	0,42	0,08

Tabelle 7: Ergebnisse der Haftzugfestigkeitsuntersuchungen nach 28 Tagen und 140 Tagen Lagerungsdauer der Proben mit Plansteinklebemörtel FP (Mittelwert aus 5 Einzelprüfungen)

Probe	Haftzugfestigkeit in [N/mm ²] nach	
	28 d	140 d
P2-FP-N	0,15	0,34
P2-FP-F	0,14	0,34
P4-FP-N	0,47	0,66
P4-FP-F	0,44	0,43
H2-FP-N	0,11	0,30
H2-FP-F	0,13	0,18
H4-FP-N	0,31	0,45
H4-FP-F	0,26	0,26
X2-FP-N	0,17	0,32
X2-FP-F	0,17	0,25
X4-FP-N	0,29	0,15
X4-FP-F	0,27	0,33

Tabelle 8: Ergebnisse der Haftscherfestigkeitsuntersuchungen nach 28 Tagen und 140 Tagen Lagerungsdauer der Proben mit Dünnbettmörtel MD (Mittelwert aus 3 Einzelprüfungen)

Probe	Haftscherfestigkeit in [N/mm ²] nach	
	28 d	140 d
P2-MD-N	0,24	0,21
P2-MD-F	0,21	0,26
P4-MD-N	0,23	0,34
P4-MD-F	0,19	0,28
H2-MD-N	0,41	0,29
H2-MD-F	0,28	0,28
H4-MD-N	0,32	0,47
H4-MD-F	0,20	0,36
X2-MD-N	0,27	0,20
X2-MD-F	0,36	0,21
X4-MD-N	0,22	0,28
X4-MD-F	0,24	0,33

Tabelle 9: Ergebnisse der Haftscherfestigkeitsuntersuchungen nach 28 Tagen und 140 Tagen Lagerungsdauer der Proben mit Porenbetonplansteinkleber MP (Mittelwert aus 3 Einzelprüfungen)

Probe	Haftscherfestigkeit in [N/mm ²] nach	
	28 d	140 d
P2-MP-N	0,22	0,35
P2-MP-F	0,17	0,27
P4-MP-N	0,51	0,51
P4-MP-F	0,37	0,42
H2-MP-N	0,36	0,30
H2-MP-F	0,35	0,31
H4-MP-N	0,32	0,48
H4-MP-F	0,35	0,53
X2-MP-N	0,36	0,54
X2-MP-F	0,49	0,25
X4-MP-N	0,25	0,73
X4-MP-F	0,27	0,34

Tabelle 10: Ergebnisse der Haftscherfestigkeitsuntersuchungen nach 28 Tagen und 140 Tagen Lagerungsdauer der Proben mit Dünnbettmörtel FD (Mittelwert aus 3 Einzelprüfungen)

Probe	Haftscherfestigkeit in [N/mm ²] nach	
	28 d	140 d
P2-FD-N	0,40	0,57
P2-FD-F	0,41	0,54
P4-FD-N	0,72	1,30
P4-FD-F	0,77	1,10
H2-FD-N	0,29	0,48
H2-FD-F	0,31	0,31
H4-FD-N	0,67	1,01
H4-FD-F	0,51	0,70
X2-FD-N	0,36	0,52
X2-FD-F	0,36	0,31
X4-FD-N	0,50	0,78
X4-FD-F	0,39	0,38

Tabelle 11: Ergebnisse der Haftscherfestigkeitsuntersuchungen nach 28 Tagen und 140 Tagen Lagerungsdauer der Proben mit Porenbetonplansteinkleber FP (Mittelwert aus 3 Einzelprüfungen)

Probe	Haftscherfestigkeit in [N/mm ²] nach	
	28 d	140 d
P2-FP-N	0,25	0,36
P2-FP-F	0,35	0,31
P4-FP-N	0,50	1,09
P4-FP-F	0,54	0,64
H2-FP-N	0,20	0,38
H2-FP-F	0,32	0,40
H4-FP-N	0,23	0,45
H4-FP-F	0,19	0,60
X2-FP-N	0,20	0,36
X2-FP-F	0,22	0,37
X4-FP-N	0,20	0,68
X4-FP-F	0,26	0,48

Tabelle 12: Ergebnisse der zentrischen Druckfestigkeitsprüfung an kleinen Prüfwänden der Serie X4-FD-N nach 140 Tagen Lagerung im Normalklima bei 20 °C und 65 % rel. Feuchte

Pfeiler Nr.	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Druckfestigkeit [N/mm ²]
1	500,0	238,8	1258,0	3,0
2	500,0	238,9	1257,0	3,1
3	499,8	239,3	1257,0	2,9
Mittel:				3,0

Tabelle 13: Ergebnisse der zentrischen Druckfestigkeitsprüfung an kleinen Prüfwänden der Serie X4-FD-F nach 140 Tagen Lagerung in 5 °C und hoher rel. Feuchte

Pfeiler Nr.	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Druckfestigkeit [N/mm ²]
1	500,2	239,8	1250,0	2,9
2	500,3	240,0	1252,0	2,9
3	500,0	239,8	1251,0	2,7
Mittel:				2,8

Tabelle 14: Ergebnisse der zentrischen Druckfestigkeitsprüfung an kleinen Prüfwänden der Serie X4-FP-F nach 140 Tagen Lagerung in 5 °C und hoher rel. Feuchte

Pfeiler Nr.	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Druckfestigkeit [N/mm ²]
1	500,3	239,8	1250,0	2,8
2	500,0	239,6	1251,0	3,0
3	501,0	239,6	1251,0	3,0
Mittel:				2,9