

ZUSAMMENFASSUNG ZUR DISSERTATION

**ZUM EINFLUSS DER NACHBEHANDLUNG AUF DIE GE-  
FÜGEAUSBILDUNG UND DEN FROST-TAUMITTEL-  
WIDERSTAND DER BETONRANDZONE**

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

**DR.-ING.**

an der Fakultät Bauingenieurwesen der  
Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

**Dirk Ehrhardt**

Geboren am 29.06.1978 in Gotha  
(interner Doktorand)

Mentor: Univ. Prof. em. Dr.-Ing. habil. Jochen Stark

Hamburg, April 2016

## Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit

1. Die Grundlage für die Gefügeverfestigung eines jeden Betons ist die Zementhydratation - eine chemische Reaktion der Zementphasen mit dem Anmachwasser.
2. Die Zementhydratation kann nur ablaufen, wenn ein ausreichender Wassergehalt zur Verfügung steht. Die Verdunstung von Anmachwasser des Betons und die Zementhydratation unter Verbrauch von Anmachwasser stellen Konkurrenzreaktionen dar.
3. Betone müssen deshalb solange vor der Verdunstung des Anmachwassers geschützt werden, bis die Zementhydratation so weit vorangeschritten ist, dass negative Auswirkungen nicht mehr zu befürchten sind. Alle zu diesem Zweck dienenden Maßnahmen bezeichnet man als Nachbehandlung des Betons.
4. Mit der vorliegenden Arbeit soll anhand von Beton für Verkehrsflächen ein Beitrag zur Klärung der komplexen Vorgänge zwischen der Austrocknung, der Nachbehandlung und der Gefügeverfestigung (Zementhydratation) geleistet werden.
5. Ein weiteres Ziel ist es herauszuarbeiten, ob durch Aufsprühen der im Verkehrsflächenbau üblichen Nachbehandlungsmitteln (NBM) und der Verwendung von hüttensandhaltigen Kompositzementen eine ausreichende Qualität gewährleistet werden kann.

## Stand der Wissenschaft

6. Sinkt der Wassergehalt im frischen oder jungen Betongefüge unter einen rezepturspezifischen Grenzwert, verlangsamt sich die Reaktionsgeschwindigkeit der Zementhydratation. Sinkt der Wassergehalt weiter, fällt die Reaktionsgeschwindigkeit auf vernachlässigbar geringe Werte.
7. Eine unzureichende Nachbehandlung führt zu Qualitätseinbußen- vor allem in der Betonrandzone.
8. Um den Einsatz von Rohstoffen und Energie zu reduzieren, werden Kompositmaterialien, die in anderen Wirtschaftszweigen anfallen, bei der Zementherstellung verwendet. Mit dem Einsatz von Kompositstoffen z. B. Hüttensand, geht i.d.R. eine langsamere Gefüge- und Festigkeitsentwicklung einher. Bei Kompositzementen sind deshalb längere Nachbehandlungsdauern erforderlich.
9. Aufgrund negativer Erfahrungen durch Schadensfälle herrscht bezüglich der Anwendungssicherheit von Kompositzementen eine große Skepsis. Deshalb wurden zum Teil grundsätzliche Anwendungsbeschränkungen ausgesprochen. Dies steht im Widerspruch zu der gewünschten ökologischen und ökonomischen Optimierung im Bauwesen.
10. Zur Herstellung von Verkehrsflächen aus Beton werden flüssige Nachbehandlungsmittel (NBM) eingesetzt. Dabei handelt es sich um Wachsdispersionen, die auf den frischen oder jungen Beton aufgesprüht werden und dort einen dünnen Wachsfilm bilden, der die Verdunstung des Anmachwassers vermindert, aber nicht gänzlich verhindern kann.
11. Im speziellen Fall von Kompositzementen im Verkehrsflächenbau und der Anwendung von Nachbehandlungsmitteln ist es bislang ungeklärt, ob mit dieser Kombination eine ausreichende Bauteilqualität erreicht werden kann oder ob zusätzliche Maßnahmen erforderlich sind.
12. Die in Deutschland üblichen NBM verfilmen durch Verdunstung des Dispersionswasseranteils. Maßgebend für erfolgreiche Anwendung der NBM ist der Auftragszeitpunkt derselben. Ein zu früher Auftrag führt zu einem deutlich geringeren Wasserrückhaltevermögen. Andererseits ist ungeklärt welche Auswirkungen es hat, wenn ein Beton zunächst eine gewisse Zeit (bis zum Auftrag der NBM) ungeschützt bleibt.
13. Die Erforschung der Nachbehandlungsproblematik ist geprägt von umfangreichen empirischen Untersuchungen. In den letzten Jahren ist versucht worden, durch vertiefende theoretische Betrachtungen eine allgemeinere Erfassung der Problematik zu ermögli-

chen. Hier sind weitere Forschungen notwendig, um ein besseres Verständnis der Vorgänge zu erlangen.

## Verwendete Methoden

14. Die Arbeit ist in fünf Bearbeitungsschritte untergliedert. Im ersten Schritt wird das Austrocknungsverhalten von Betonen durch eine parallele und kontinuierliche Erfassung der Wasserabgabe und des elektrolytischen Betonwiderstandes erforscht. Für die Messung des elektrolytischen Widerstandes wurde eine selbst entwickelte Messelektrode verwendet, mit der die Austrocknung direkt in der Betonrandzone erfasst werden kann. Zur Erforschung der Wirkungsweise von Nachbehandlungsmitteln wurden mittels Auflichtmikroskopie und einem unter atmosphärischen Bedingungen arbeitenden Rasterelektronenmikroskops Untersuchungen zur Filmbildung der Nachbehandlungsmittel durchgeführt.
15. Im zweiten Schritt werden die unter Punkt 14 hergestellten Proben auf die Qualität der Betonrandzone untersucht. Dazu wurde der Frost-Tausalz-Widerstand im Laborprüfverfahren (CDF-Test) bestimmt.
16. Im dritten Bearbeitungsschritt werden im Rahmen von großtechnisch hergestellten Erprobungsflächen (Teilabschnitte von Bundesfernstraßen) und der Auslagerung von Proben praxisnahe Untersuchungen durchgeführt. Die Erprobungsflächen wurden über einen Zeitraum zwischen sieben und acht Jahren begutachtet.
17. Im vierten Untersuchungsteil wird das Zementsteingefüge der Proben aus Punkt 14 und Punkt 16 tiefengestaffelt im Rasterelektronenmikroskop (Hochvakuum) bis in eine Tiefe von 10 mm abgebildet. Unter Anwendung der digitalen Bildanalyse wurden die Bildaufnahmen hinsichtlich der Anteile an Porosität, unreaktiertem Zement und Hydratationsprodukten ausgewertet.
18. Den fünften Bearbeitungsschritt bilden theoretische Betrachtungen zum Zusammenspiel zwischen der Austrocknung und der Hydratation. Durch numerische Lösung der eindimensionalen Wärme- und Feuchtetransportgleichungen (Finite Volumen Methode) wurden erste Berechnungen zum Einfluss der Austrocknung auf die Gefügeentwicklung durchgeführt. Als Grundlage für diese Berechnungen wurden relevante Transport- und Stoffkenngrößen und ihre Veränderungen durch die Hydratation untersucht.

## Wesentliche Ergebnisse

19. Anhand der gleichzeitigen Bestimmung von Wasserabgabe und des elektrolytischen Widerstandes in der Betonrandzone, konnte erstmals in dieser Deutlichkeit eine allgemeine Beschreibung der Trocknung von jungem Beton erfolgen.
20. Die Trocknung von jungem Beton erfolgt in drei Phasen.
21. Innerhalb der ersten Austrocknungsphase wird der Verdunstungsverlust an der Oberfläche vollständig durch einen kapillaren Feuchtetransport aus dem Inneren ausgeglichen. Diese Trocknungsphase wird deshalb als Kapillarphase bezeichnet.
22. Nach Ende der Kapillarphase nimmt der kapillare Feuchtigkeitstransport immer weiter ab. Feuchtigkeit wird nun zunehmend durch Diffusion transportiert. Diese Phase wird deshalb Übergangsphase bezeichnet. Mit Beginn der Übergangsphase setzt eine starke Austrocknung der Randzone ein. Damit steigt die Gefahr einer unzureichenden Hydratation in der Randzone.
23. Als wesentliche Einflussfaktoren auf die Dauer der Kapillarphase konnten die 2d- Zementdruckfestigkeit, die Erhärtungstemperatur und die potentielle Verdunstungsrate herausgearbeitet werden. Durch Bereitstellung eines Nomogramms mit der in Abhängigkeit der drei genannten Faktoren die Dauer der Kapillarphase abgeschätzt werden kann, stehen die Erkenntnisse auch zur baupraktischen Anwendung bereit.
24. Dass eine Beeinträchtigung der Zementhydratation in der Betonrandzone erst ab dem Ende der Kapillarphase zu befürchten ist, konnte durch die Ergebnisse der digitalen Bild-

analyse bestätigt werden. Dass eine frühe Wasserabgabe mit Blick auf die Zementhydratation unkritisch ist, stellt eine neue Erkenntnis dar.

25. Durch die tiefengestaffelte Aufnahme des Betongefüges in der Randzone und die Auswertung dieser Aufnahmen mittels quantitativer Bildanalyse war es erstmals möglich die Wirkung verschiedener Nachbehandlungsvarianten auf die Gefügeausbildung in der unmittelbaren Randzone mit hoher Ortsauflösung darzustellen.
26. Durch Anwendung der digitalen Bildanalyse ist es zudem gelungen, die in der Literatur oft genannte Erhöhung des Wasser-Zement-Verhältnisses direkt nachzuweisen und zahlenmäßig zu belegen.
27. Langsam reagierende Zemente geben nach Ende der Kapillarphase im Vergleich zu Zementen mit hoher Frühfestigkeit größere Wassermengen ab. Dies führt zu einer größeren Eindringtiefe der Trocknungsfront verbunden mit einer starken Beeinträchtigung der Zementhydratation in der Randzone. Dieser Zusammenhang erklärt, weshalb langsam reagierenden Zemente unter sonst gleichen Bedingungen i. d. R. einen geringeren Frost-Tausalz-Widerstand aufweisen.
28. Der Einfluss der Nachbehandlung auf den Frost-Taumittelwiderstand war besonders groß bei Zementen, die eine 2d-Druckfestigkeit von unter 23 N/mm<sup>2</sup> aufwiesen. Dabei ist es unerheblich, ob es sich um hüttensandhaltige Kompositzemente handelte oder nicht - entscheidend war die Frühfestigkeit. Diese Erkenntnisse zeigen, dass eine generelle Anwendungsbeschränkung von Kompositzementen mit mittlerem Hüttensandgehalt im Verkehrsflächenbau nicht notwendig ist.
29. Die detaillierten Untersuchungen zur Wirksamkeit der flüssigen Nachbehandlungsmittel haben folgende Erkenntnisse erbracht:
  - eine positive Wirkung der NBM setzt nur ein, wenn sie auf eine Betonoberfläche aufgesprüht werden, die kein flüssiges Wasser mehr abstößt. Dies konnte erstmals auch durch die Ergebnisse der digitalen Bildanalyse gezeigt werden.
  - NBM stellen eine ausreichende Nachbehandlungsmethode dar – dies gilt auch bzw. gerade für langsam reagierende Kompositzemente.
  - der Mechanismus der Filmbildung in Abhängigkeit des Zustandes des Betonuntergrundes wurde erstmals genau beschrieben. Bei einem zu frühen Auftrag entsteht während der Filmbildung zwischen der Betonoberfläche und dem NBM-Film eine dünne Luftschicht. Der NBM-Film liegt dann partiell hohl, was zur Rissbildung und einer geringeren Wirksamkeit führt.
  - die Untersuchungen zeigen weiterhin, dass Anmachwasser aus dem Beton von der NBM-Schicht nachgesaugt wird. Eine Filmbildung tritt erst ein, wenn dieser Transport durch die Gefügeverdichtung im Beton abnimmt.
  - durch die Beschreibung der Filmbildung von wachshaltigen NBM konnten bislang nur empirisch bekannte Besonderheiten genau erklärt werden. z. B. ist es bekannt, dass die Prüfung der NBM gemäß der Prüfvorschrift TL NBM-StB 09 zu sehr hohen Sperrkoeffizienten führt. Die neuen Erkenntnisse zeigen, dass dies am für die Prüfung vorgeschriebenen schnell reagierenden Zement liegt. Dieser führt frühzeitig zu einem starken Hydratationssog, der dem NBM Dispersionswasser entzieht. Dies führt zu einer schlagartigen und frühen Verfilmmung der NBM und damit zu hohen Sperrwirkungen.
30. Die theoretischen Betrachtungen zum Zusammenspiel von Austrocknung und Gefügeentwicklung sind sehr vielversprechend. In dieser Arbeit gelang es die Entwicklung des Gefüges in Abhängigkeit verschiedener Klimaten oder Nachbehandlungsvarianten zu simulieren. Die im experimentellen Teil festgestellten Erkenntnisse ließen sich damit erstmals durch rechnerische Betrachtungen abbilden. Damit steht ein Werkzeug bereit, mit dem im Vorfeld von Forschungsvorhaben theoretische Betrachtungen zur Planung der experimentellen Arbeiten möglich sind.