

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN  
Centrum Baustoffe und Materialprüfung

**ZUR NACHBEHANDLUNG VON BETON**

-

**Auswirkungen des Wasserverlustes durch Evaporation  
in jungem Alter am Beispiel von Straßenbeton**

**Jürgen Huber**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der  
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)**

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. D. Heinz

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h. P. Schießl, i.R.

2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil., Dr. h.c. J. Stark  
Bauhaus-Universität Weimar

Die Dissertation wurde am 02.07.2008 bei der Technischen Universität München eingereicht  
und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen  
am 01.12.2008 angenommen.

## ZUSAMMENFASSUNG

Berechtigerweise ist der Stellenwert der Nachbehandlung, insbesondere der Verdunstungsschutz des jungen Betons, sehr hoch. Bisherige Nachbehandlungskonzepte berücksichtigen die Festigkeitsentwicklung als Parameter für die Dauer einer Nachbehandlungsmaßnahme. Entsprechende Überlegungen basieren auf Reifekonzepten und vernachlässigen den Einfluss der Verdunstung von Anmachwasser. Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen belegen, dass ein früher Wasserverlust durch Verdunstung direkte Auswirkungen auf die resultierenden Festbetoneigenschaften im oberflächennahen Bereich hinsichtlich Festigkeit und Dichtigkeit besitzt und damit die Dauerhaftigkeit eines Bauteils maßgeblich beeinflusst. Durch die Austrocknung der oberflächennahen Kapillaren, die Wasserbindung und damit auch die zeitabhängige Verengung des Porensystems im Inneren, verringert sich der Wasserverlust eines Betons nach einer bestimmten Zeit auch ohne externe Nachbehandlungsmaßnahmen deutlich. Die Verringerung des Wasserverlustes durch Nachbehandlungsmaßnahmen muss bis zu diesem Zeitpunkt, der in Abhängigkeit des Betons und den Umgebungsbedingungen bei max. 24 bis 48 Stunden nach Herstellung liegt, sehr effektiv sein. Später besitzt die Nachbehandlung auf die Festbetoneigenschaften nur noch einen geringen Einfluss.

## ABSTRACT

Curing of concrete, especially the reduction of a water-loss due to evaporation, is an important issue in concrete technology. At the moment the process of curing (esp. the duration) is based on the strength development due to temperature effects of the concrete and therefore undervalues the issue of evaporation (at least during the first hours after casting). The results of the accomplished examinations show clearly, that an early water-loss due to evaporation has got direct effect on the properties of hardened concrete in the surface-near area concerning strength and permeability and therefore the durability of a component. Due to the drying of bigger pores in the surface-near areas and the time-dependent narrowing of the pores in the inner part, the evaporation slows down by itself after a certain time after max. 24 to 48 hours depending on the environmental conditions and the composition of the concrete. That is why curing methods have to be very efficient in this period of time, afterwards they have minor impact on the concrete properties.

## VORWORT

Vorliegende Arbeit basiert auf Versuchen aus einem Forschungsvorhaben, welches ich während meiner Zeit als wissenschaftlicher Angestellter am Centrum Baustoffe und Materialprüfung der Technischen Universität München bearbeitet habe. Gefördert wurde dieses durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen.

Mein Dank gilt Herrn Prof. Heinz für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und Herrn Prof. Stark für die Übernahme des Korreferats, die aufmerksame Durchsicht dieser Arbeit und die wertvollen Anmerkungen.

Bei allen Vorgesetzten, Kollegen, Diplomanden und Hiwis, die im Laufe der Zeit zum Gelingen dieser Arbeit - sei dies durch die Mitarbeit an den Versuchen, Austausch von Erfahrungen und Meinungen oder auch Ablenkungen zum rechten Zeitpunkt - beigetragen haben, möchte ich mich sehr herzlich bedanken. Herauszuheben sind hierbei vor allem Herr Dipl.-Ing. Till Mayer für das Lektorat und Herr Dipl.-Ing. Christoph Czerner, ohne dessen Ausdauer, Gewissenhaftigkeit und Esprit bei der Versuchsdurchführung sowie den anregenden Diskussionen diese Arbeit in dieser Form wohl nicht zustande gekommen wäre. Es ist schön, sagen zu können, dass mir aus der Assistentenzeit gute Freundschaften erhalten geblieben sind.

Herrn Prof. Schießl gilt mein besonderer Dank für Alles.

Und abschließend ein unendlich großes Dankeschön an meine Eltern für die stete Unterstützung und an Fiona, dem Sonnenschein in meinem Leben.

München, im Juli 2008

Jürgen Huber

*„Ein so kleiner Schirm und trotzdem wird man nicht nass, wenn es nicht regnet.“*

*„Alle reden vom Wetter, aber keiner unternimmt was dagegen.“*

*„Es ist schon alles gesagt, nur noch nicht von allen.“*

*Karl Valentin*

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b> .....	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG</b> .....	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>LITERATUR</b> .....	<b>10</b>
<b>3.1</b>	<b>Hydratation</b> .....	<b>10</b>
3.1.1	Allgemeines .....	10
3.1.2	Ausgangsstoffe.....	10
3.1.3	Hydratationskinetik .....	11
3.1.4	Hydratationswärme.....	12
3.1.5	Wasserbindungen .....	13
3.1.6	Struktur des Zementsteins.....	17
<b>3.2</b>	<b>Transportmechanismen in porösen Stoffen</b> .....	<b>23</b>
3.2.1	Allgemeines .....	23
3.2.2	Wassertransport .....	23
3.2.3	Feuchtespeicherung .....	26
<b>3.3</b>	<b>Evaporation (und Absorption)</b> .....	<b>28</b>
3.3.1	Verdunstungsphasen.....	28
3.3.2	Berechnungsverfahren für die Evaporationsrate .....	29
<b>3.4</b>	<b>Relative Feuchte und Hydratation</b> .....	<b>33</b>
<b>3.5</b>	<b>Fahrbahndecken aus Beton</b> .....	<b>35</b>
<b>3.6</b>	<b>Nachbehandlung</b> .....	<b>36</b>
3.6.1	Allgemeines .....	36
3.6.2	NBM – flüssige Nachbehandlungsmittel .....	37
3.6.3	Vorschriften .....	39
<b>3.7</b>	<b>Nachweisverfahren zur Nachbehandlung</b> .....	<b>43</b>
<b>4</b>	<b>EIGENE UNTERSUCHUNGEN</b> .....	<b>44</b>
<b>4.1</b>	<b>Allgemeines</b> .....	<b>44</b>
<b>4.2</b>	<b>Untersuchungen zu Verdunstung und Nachweisverfahren</b> .....	<b>45</b>
4.2.1	Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzung .....	45
4.2.2	Probenherstellung und Lagerung .....	45
4.2.3	Nachbehandlung .....	46
4.2.4	Versuchs- und Messeinrichtungen .....	47
<b>4.3</b>	<b>Untersuchungen zur Texturbeständigkeit</b> .....	<b>52</b>
4.3.1	Allgemeines .....	52
4.3.2	Herstellung der Proben .....	52
4.3.3	Laborbeanspruchung .....	52

<b>4.4</b>	<b>Wasserverteilung im Querschnitt infolge Verdunstung - Mörtelversuche.....</b>	<b>57</b>
4.4.1	Allgemeines .....	57
4.4.2	Ausgangsstoffe und Zusammensetzung .....	57
4.4.3	Herstellung und Lagerung.....	57
4.4.4	Direkter Wassernachweis - Trocknung.....	57
4.4.5	Indirekter Nachweis - MRE.....	58
<b>5</b>	<b>VERSUCHSERGEBNISSE.....</b>	<b>60</b>
<b>5.1</b>	<b>Übersicht.....</b>	<b>60</b>
<b>5.2</b>	<b>Nachweise der Wasserbindungen .....</b>	<b>61</b>
5.2.1	Allgemeines .....	61
5.2.2	Direkter Nachweis – ohne Nachbehandlung .....	61
5.2.3	Direkter Nachweis – mit Nachbehandlung .....	62
5.2.4	Indirekter Nachweis - Multi-Ring-Elektrode (MRE) .....	64
5.2.5	Indirekter Nachweis - Carbonatisierung.....	65
5.2.6	Zusammenfassung .....	66
<b>5.3</b>	<b>Frischbetoneigenschaften und Druckfestigkeit .....</b>	<b>67</b>
<b>5.4</b>	<b>Evaporation ohne Nachbehandlungsmaßnahmen.....</b>	<b>68</b>
5.4.1	Allgemeines .....	68
5.4.2	Verdunstung von Wasser .....	68
5.4.3	Normalmörtel/-beton .....	68
5.4.4	Effekt des Blutens .....	71
5.4.5	Einfluss der Probenhöhe .....	71
5.4.6	Unterschiedliche Betonzusammensetzung.....	72
<b>5.5</b>	<b>Evaporation mit Nachbehandlungsmaßnahmen .....</b>	<b>74</b>
5.5.1	Nachbehandlung mittels NBM.....	74
5.5.2	Nachbehandlungsmittel .....	80
5.5.3	Temporäre Konservierung .....	80
5.5.4	Zusammenfassung der Verdunstungsuntersuchungen .....	82
<b>5.6</b>	<b>Resultierende Festbetoneigenschaften .....</b>	<b>84</b>
5.6.1	Probenkonditionierung .....	84
5.6.2	Einfluss der Nachbehandlungsmaßnahme.....	87
5.6.3	Biegezugfestigkeit .....	90
5.6.4	Korrelation Gas-/Wasserpermeabilität.....	91
5.6.5	Einfluss Zusatzstoffe .....	92
5.6.6	Zusammenfassung der Festbetonuntersuchungen .....	94
<b>5.7</b>	<b>Texturbeständigkeit.....</b>	<b>95</b>
<b>6</b>	<b>SYSTEMBESCHREIBUNG .....</b>	<b>99</b>
<b>7</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>102</b>

# 1 Einleitung

Zwei *grundsätzliche Anforderungen* werden an Beton gestellt: Zum einen muss er eine ausreichende *Festigkeit* besitzen, um einwirkende Belastungen schadfrei abzutragen und zum anderen muss er in den exponierten oberflächennahen Bereichen eine ausreichend hohe *Dichtigkeit* bzw. geringe *Permeabilität* gegenüber Luft, Wasser, darin transportierten Stoffen und daraus folgenden Beanspruchungen aufweisen. Sind diese Anforderungen über die gesamte erwartete Lebensdauer erfüllt, ist eine hohe Dauerhaftigkeit eines Betons und damit die erwartungsgemäße technische und wirtschaftliche Umsetzung gegeben.

Bereits die *Wahl und Zusammensetzung der Ausgangsstoffe* entsprechend der gegebenen *Umgebungsbedingungen* während der Erhärtungsphase bestimmen maßgeblich die Eigenschaften des Festbetons und sind deshalb in Normen und Vorschriften geregelt. Hierbei sind bei Normalbetonen für übliche Anwendungen je nach Exposition des Bauteils meist ein *Mindestgehalt an Zement* und ein *Verhältnis von Wasser und Zement* gefordert. Dies sind grundlegende Steuerungsparameter für die Güte bzw. die zu erwartenden Eigenschaften eines Betons.

Maßnahmen, die zusätzlich getroffen werden, um in den ersten Stunden und Tagen schädliche Einflüsse auf die Erhärtung des Betons zu minimieren bzw. eliminieren, werden gemeinhin als *Nachbehandlung* bezeichnet und umfassen im Wesentlichen den Schutz vor hohen und niedrigen Temperaturen, vor Verlust von Anmachwasser durch Verdunstung und vor mechanischen Beanspruchungen. Ein *Wasserverlust* durch Verdunstung während der Erhärtungsphase kann zu einer gestörten Hydratation bzw. zu einem Reaktionsstopp in den betroffenen Randbereichen eines Betons führen. Dies hat eine erhöhte Porosität und somit verminderte Festbetoneigenschaften (geringere Festigkeit und höhere Permeabilität) zur Folge und resultiert in einer Reduzierung der Dauerhaftigkeit eines Bauteils.

Besonders bei plattenförmigen Bauteilen mit großen freien Flächen, über die sehr viel Wasser verdunsten kann, sind zusätzliche, externe Nachbehandlungsmaßnahmen unabdingbar, um gute Betoneigenschaften zu erreichen. Einen Spezialfall stellen hierbei *Fahrbahndecken aus Beton* dar, die ohne feste Schalung (Gleitschalungsfertigung) hergestellt werden und direkt ab der Herstellung der freien Bewitterung (Sonne, Wind, etc.) ausgesetzt und deshalb besonders nachbehandlungssensitiv sind. Ein Verdunstungsschutz bzw. -minderung erfolgt hier in der Regel über das Aufsprühen von *Paraffinemulsionen (flüssigen Nachbehandlungsmitteln, kurz: NBM)*, da dieses Verfahren einfach, wirtschaftlich und sicher angewendet werden kann und den Baufortschritt kaum beeinflusst.

Der oberflächennahe Beton von Fahrbahndecken unterliegt durch seine Exposition zudem vergleichsweise hohen thermischen und hygrischen Beanspruchungen und zusätzlich mechanischer Beanspruchung, Frost-Tausalz-Angriff, saurem Regen, etc. und erfordert deshalb eine hohe Güte.

## 2 Problemstellung und Zielsetzung

Grundsätzlich unterscheiden sich *Fahrbahndecken* aus Beton von übrigen Betonbauteilen durch ihre in der Regel unbewehrte Ausführung. Eine Ausnahme bilden die im Moment in Deutschland im Versuchstadium befindlichen durchgehend bewehrte Fahrbahndecken (continuously reinforced concrete pavements, kurz: CRCP). Somit besitzen Schadmechanismen wie die Carbonatisierung oder ein Chlorideintrag im Fahrbahndeckenbau weitaus geringere Bedeutung als z.B. bei Ingenieurbauwerken. Hier sind jedoch temperatur- und feuchteinduzierte Spannungen und Verformungen kritischer zu betrachten, da diese einen wesentlichen Beitrag zur Lebensdauer einer Fahrbahn leisten.

Bezüglich der Nachbehandlung werden in den *aktuellen Normen und Vorschriften* einfache, in der Praxis umsetzbare Konzepte verfolgt. So ist die erforderliche Nachbehandlungsdauer eines Bauteils grundsätzlich abhängig von der *Festigkeitsentwicklung* des Betons, die unter anderem von den Umgebungsbedingungen beeinflusst wird. Grundlage für dieses Konzept ist die Annahme, dass der Beton nach Erreichen einer bestimmten Festigkeit einen ausreichenden Widerstand gegenüber externen Einflüssen besitzt. Es wird jedoch eine über den Querschnitt einheitliche Hydratation vorausgesetzt und keine weitere Aufgliederung bezüglich des speziellen Nachbehandlungsbedarfs eines Betons oder der Effizienz einer bestimmten Nachbehandlungsmaßnahme getroffen. Besitzt diese Vorgehensweise bei gleichmäßigen Temperatureinwirkungen und geringer Hydratationswärmeentwicklung ihre Berechtigung, kann ein uniaxialer Wasserverlust zu einer Störung der Hydratation im – für die Dauerhaftigkeit enorm wichtigen - Randbereich führen, der bei der Prüfung der (Druck-)Festigkeit eines Probekörpers mit im Vergleich zum betroffenen Bereich großen Abmessungen aber nicht ausreichend erfasst wird.

In der *Literatur* ist eine Vielzahl von Versuchen zur Bestimmung der Effekte und Güte einer Nachbehandlung mit standardisierten und neuen Nachweisverfahren beschrieben. Bei diesen meist praxisorientierten Herangehensweisen werden jedoch die physikalischen Grundlagen der Verdunstung, die Probenkonditionierung, die Auswirkungen einer Verdunstung auf die Hydratation und die Mikrostruktur des Betons außer Acht gelassen. So ist eine generalisierte Aussage über die Güte einer Nachbehandlung in den meisten Fällen nicht möglich. Zum Austrocknungsverhalten von Bauteilen mit ungeschalteten Flächen finden sich kaum Untersuchungen, die Schalungs(vor)lagerung beträgt für die meisten Nachbehandlungsversuche einen Tag.

Im *Rahmen dieser Arbeit* sollen Zusammenhänge zwischen der Verdunstung und den resultierenden Festbetoneigenschaften, geeignete Nachweisverfahren für die Güte einer Nachbehandlungsmaßnahme und notwendige Maßnahmen bei der Probenkonditionierung im Labor gefunden werden. Da diese Zusammenhänge prinzipiell auch für bewehrte Bauteile gelten, sind die

dargestellten Untersuchungen und deren Bewertung bewusst weiter gefasst als für den Straßenbau notwendig. Ziel ist die Ermittlung von praxisorientierten d.h. zuverlässigen und einfach umsetzbaren Kennwerten, Vorgehensweisen und Nachweisverfahren, da bisher keine standardisierten Methoden existieren. Zudem soll geklärt werden, wann eine Nachbehandlung als „ausreichend“ angesehen werden kann, also nach Beendigung der Maßnahme keine signifikanten Qualitätseinbußen zu erwarten sind. Dies beinhaltet die Bewertung der aktuell verwendeten Verfahren.

Hier nicht näher untersuchte Einflüsse und Effekte wie die zum Beispiel das Bluten des Betons, der Einfluss von Zementen, unterschiedliche Windgeschwindigkeiten sind in [Frentzel 2005] beschrieben und werden hier inhaltlich berücksichtigt.

In einer *Literaturstudie* werden zunächst die Bereiche Hydratation und Strukturbildung, Transport von Wasser und Evaporation, Nachbehandlung und Nachweisverfahren zur Wirksamkeit von Nachbehandlungsverfahren betrachtet und aufgrund der Komplexität der Zusammenhänge grundlegende Zusammenhänge dargestellt. Ein besonderer Blick gilt der Wechselwirkung zwischen Hydratation und Wasserverlust durch Verdunstung und deren Folgen. Anschließend wird der *Versuchsplan* der Untersuchungen erläutert und die verwendeten Betone, Proben, Randbedingungen und Verfahren beschrieben. Der *Ergebnisteil* gliedert sich in die Bereiche Verdunstung, Festbetoneigenschaften, Textureigenschaften und Nachweis der Wasserbindungen. Basierend auf den Beobachtungen der Evaporation soll ein Kennwert definiert werden, mit dem die resultierenden Festbetoneigenschaften wie Dichtigkeit und Festigkeit sowie die Textureigenschaften korreliert werden können, um die Wirksamkeit einer Nachbehandlungsmaßnahme quantifizieren zu können. Ein Aspekt ist dabei die Probenkonditionierung und die Versuchsdurchführung, die wichtige Aspekte für die Güte der Ergebnisse darstellen.

## 3 Literatur

### 3.1 Hydratation

#### 3.1.1 Allgemeines

Um die Auswirkungen einer Nachbehandlung bewerten zu können, ist es notwendig, grundlegende physikalische und chemische Vorgänge bei der Zementerhärtung zu verstehen.

Bis heute sind die genauen Zusammenhänge bei der Hydratation noch nicht vollständig geklärt. Vor allem die Wechselwirkungen zwischen Wasserangebot und Reaktionsfortschritt insbesondere in jungem Alter bedürfen weiterer Forschung. Im Rahmen der Literatursichtung wird der derzeitige Kenntnisstand dargelegt. Hier werden die in der Zementchemie üblichen Abkürzungen verwendet: C = CaO, S = SiO<sub>2</sub>, A = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, F = Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, H = H<sub>2</sub>O, CH = Ca(OH)<sub>2</sub>.

#### 3.1.2 Ausgangsstoffe

*Portlandzement* (CEM I), welcher im Straßenbau in der Regel zum Einsatz kommt, besteht hauptsächlich aus den Oxiden Calciumoxid (CaO), Siliciumoxid (SiO<sub>2</sub>), Aluminiumoxid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) und Eisenoxid (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Durch das Brennen bis zur Sinterung entstehen silicatische (Dicalciumsilicat, C<sub>2</sub>S und Tricalciumsilicat, C<sub>3</sub>S) und aluminatische (Tricalciumaluminat, C<sub>3</sub>A und Calciumaluminatferrit, C<sub>4</sub>AF oder C<sub>2</sub>(A,F)) Klinkermineralien, die für die Verarbeitung im Beton fein gemahlen werden. Portlandzement besitzt eine Korngrößenverteilung von etwa 0,1 bis etwa 150 µm und ist im Mittel wie folgt zusammengesetzt: 63 % C<sub>3</sub>S, 16 % C<sub>2</sub>S, 11 % C<sub>3</sub>A und 8 % C<sub>4</sub>AF [Schwenk 2002]. Zur Erstarrungsregelung wird dem Zement in der Regel Gips (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) oder Anhydrit (CaSO<sub>4</sub>) beigemischt. Bei *Kompositzementen* (CEM II) wird Kalkstein (inert) oder Hüttensand (latent hydraulisch) in unterschiedlichen Dosierungen zugemahlen. Zudem können diese Komponenten oder puzzolanische Stoffe, die erst im Laufe der Hydratation mit dem produzierten CH reagieren wie z.B. Flugasche, dem Zement separat zugegeben werden. Mittels chemischer Additive (Betonzusatzmittel) können Frisch- und Festbetoneigenschaften gesteuert werden. Hierzu zählen z.B. Luftporenbildner (MikroLuftporengehalt) oder Fließmittel (Verarbeitbarkeit).

Das Endprodukt Zement und damit auch dessen *physikalische und chemische Eigenschaften* hängen von den natürlichen Ausgangsstoffen, der Aufbereitung, dem Brenn- und Kühlprozess und der Aufmahlung ab und unterliegen damit naturbedingt Streuungen. Zudem führen unterschiedliche Bestimmungsverfahren und Berechnungsmethoden zu stark variierenden rechnerischen Klinkerzusammensetzungen. Dies ist vor allem ein Problem bei der rechnergestützten Simulation

der Hydratation [van Breugel 1991]. Physikalisch betrachtet bestimmen hauptsächlich die Korngrößenverteilung und Kornform der Zementpartikel die Reaktionskinetik.

### 3.1.3 Hydratationskinetik

Der Zementleim, eine flüssige bis plastische Suspension bzw. ein Kolloid, entsteht beim Mischen von Wasser und Zement. Unmittelbar nach der Wasserzugabe beginnt die exotherme chemische Reaktion zwischen dem Wasser und dem Zement (Hydratation). Dies geschieht durch die Wasseranlagerung an die feste Phase und das Inlösungsgehen des Ausgangsmaterials. Hierbei entstehen die festigkeitsbildenden Calciumsilikathydrate (C-S-H oder C-S-H-Phasen). Die Summe der erhärteten Reaktionsprodukte wird als Zementstein bezeichnet. Aufgrund der geringen Größe der C-S-H-Phasen werden diese auch als Zementgel bezeichnet. Tatsächlich stellen C-S-H-Phasen nanokristalline, d.h. röntgenamorphe Hydrateinbindungen dar.

Der Vorgang der Erhärtung eines Zements entspricht prinzipiell der seiner Klinkerphasen und kann bei Raumtemperatur zeitlich betrachtet in drei bzw. fünf *Hydratationsstadien* eingeteilt werden, s. Abbildung 1. Hauptsächlich wird die Anfangsphase von der Ettringitbildung, die Hauptperiode von der C-S-H-Bildung aus dem Alit ( $C_3S$ ) bestimmt.

- **Reaktionsbeginn** (Stadium Ia): Kurz nach der Wasserzugabe bilden sich geringe Mengen an CH (Calciumhydroxid oder Portlandit) und Trisulfat (Ettringit). Verantwortlich hierfür ist vor allem der Freikalk, welcher die an den Klinkerphasen durch das Anmachwasser gut zugänglichen Alkalisulfate dissoziiert, wobei sich lokal Syngenit bildet. Eine dünne Schicht aus Reaktionsprodukten legt sich um die Zementkörner (v.a. Alit / Belit). Dieser Vorgang dauert wenige Minuten. Es wird hierbei für kurze Zeit eine große Menge Wärme freigesetzt.
- **Ruhephase / Dormante Periode** (Stadium Ib): Die genannte erste Schicht unterbindet weitere wesentliche chemische Reaktionen, die Hydratation ruht für mehrere Stunden in Abhängigkeit der Mahlfeinheit des Zements, der Betontemperatur, der Zementart und der Zusatzstoffe und Zusatzmittel. Das Syngenit besteht aus leistenförmigen Kristallen, welche Zementklinker untereinander verbinden können. Die Folge ist ein Ansteifen nach ein bis drei Stunden, welches durch Energieeintrag wieder rückgängig gemacht werden kann. In diesem Zeitraum kann der Beton gut verarbeitet werden. Die Zugabe eines Abbindereglers verhindert die Bildung von großen Calciumaluminathydraten und verhindert ein vorzeitiges Erstarren.
- **Accelerationsphase** (Stadium IIa): Das Erstarren des Zementleims erfolgt durch die weitere Vernadelung der Zementkörner mittels leistenförmiger aber wenig festen Trisulfaten üblicherweise nach etwa vier bis sechs Stunden. Gleichzeitig setzt die Bildung von *kurzfaserigen* C-S-H (aus der Reaktion von  $H_2O$  mit  $C_2S$ , vor allem aber  $C_3S$ ) ein, die zu einer Verfestigung des noch wassergefüllten Gefüges durch die mechanische Verbindung von Zementkörnern und

Reaktionsprodukten führen und damit auch ein Porensystem erzeugt. Nach etwa 12 h beträgt die Hydratschichtdicke etwa  $1\ \mu\text{m}$ .

- **Decelerationsphase (Stadium IIb):** Durch die Diffusion von Wasser durch das Zementgel in das Innere der Zementkörner bilden sich weitere Reaktionsprodukte im Inneren und an den Rändern der Zementkörner. Dadurch, dass vom freien Wasser mit zunehmender Hydratationsdauer eine immer dickere Schicht an Hydratationsprodukten zu noch unreaktierten Klinkeranteilen durchdrungen werden muss, nimmt die *Reaktionsgeschwindigkeit* stetig ab. Zudem reduziert sich der freie Raum für ein ungestörtes Kristallwachstum ebenfalls kontinuierlich.
- **Finale Phase (Stadium III):** Ab einem Alter von etwa einem Tag bilden sich verstärkt C-S-H, die das vorhandene Gefüge weiter verdichten und verfestigen. Das bei der Hydratation entstehende CH trägt nicht zur Festigkeitsbildung bei, regelt aber die Basizität des Zementsteins. Die Hydratschichtdicke beträgt nach 14 d etwa  $10\ \mu\text{m}$ . Kleinere Zementkörner hydratisieren komplett, bevor der freie Porenraum gefüllt ist.

Die zeitliche Entwicklung der Reaktionsprodukte und die Struktur des Zementsteins sind in Abbildung 1 dargestellt.

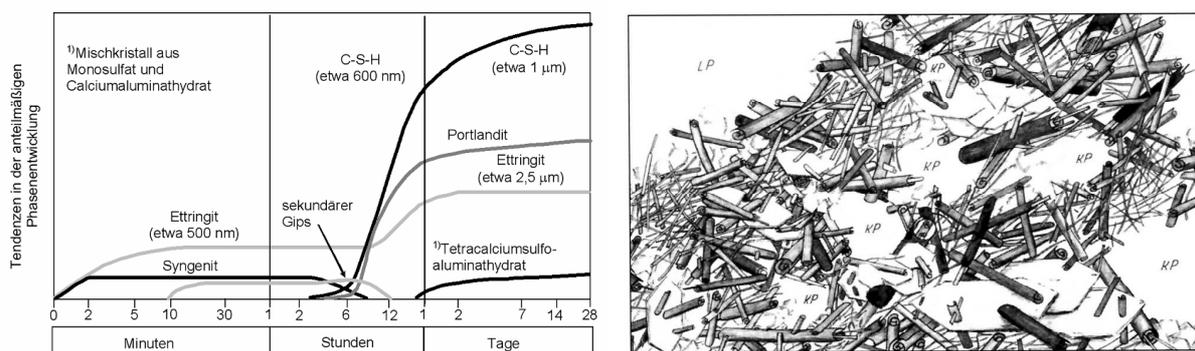


Abbildung 1: li.: Hydratationsphasen und Strukturbildung [Stark 2004]; re: Struktur des Zementsteins [Stark 2001] KP – Kapillarporen, LP – Luftporen

Die Geschwindigkeit der Reaktion nimmt mit steigender Mahlfeinheit und Menge des Zements zu und wird vom  $w/z$  –Wert maßgeblich beeinflusst, da dieser – geometrisch betrachtet – den Abstand zwischen den Zementkörnern vorgibt.

Bei der Erhärtung von Zement laufen komplexe chemische Reaktionen ab. Diese Zusammenhänge können verwendet werden, um stöchiometrische Berechnungen für die einzelnen Reaktionsprodukte und somit auch für die Wasserbindungen und Volumenanteile durchzuführen.

### 3.1.4 Hydratationswärme

Die *exothermen Teilreaktionen* führen aufgrund des Übergangs der Klinkerminerale in einen stabileren, energieärmeren Zustand zu einer *Wärmeentwicklung*, deren Intensität und zeitliche

Entwicklung von der Klinkerzusammensetzung und der Reaktionsgeschwindigkeit abhängt. Es besteht eine direkte Koppelung zwischen der Hydratationsgeschwindigkeit und der Temperatur, da höhere Temperaturen den Hydratationsfortschritt wiederum beschleunigen. Grundsätzlich führen höhere Temperaturen zu einer schnelleren Hydratation und damit Festigkeitsentwicklung, zugleich vermindert sich durch die schnellwachsende gröbere C-S-H-Struktur die Endfestigkeit.

Der Einfluss der Temperatur kann mit Hilfe von Reifefunktionen berücksichtigt werden, die das wirksame Alter des Betons beschreiben. Einen sehr vereinfachten Ansatz bietet die Gleichung nach Saul:

$$R = \sum (\vartheta + 10) \cdot \Delta t \quad \text{Gleichung 1}$$

*R* bezeichnet hierin die Reife und  $\vartheta$  die jeweilige Temperatur im Zeitintervall  $\Delta t$ .

Betone, welche bei höheren Temperaturen erhärten, besitzen demnach eine höhere Reife, also ein höheres theoretisches Alter, als kühler gelagerte Betone. Der beschriebene Ansatz gilt nur für Beton in jungem Alter, ist aber für die hier durchgeführten Betrachtungen ausreichend.

## 3.1.5 Wasserbindungen

### 3.1.5.1 Arten

Im Zementstein liegt das zugegebene Mischungswasser (hier:  $W_{zu}$ ) unter konservierten Bedingungen reaktions- und damit zeit- und ortsabhängig prinzipiell in

- *freier*
- *physikalisch gebundener* und
- *chemisch gebundener* Form

vor. In der Summe entsprechen die Anteile dem Zugabewasser, sofern keine externe Wasserabgabe (z.B. Verdunstung) stattfindet.

Je nach Bindungsart und Detektionsmethode kann eine weitere Unterteilung erfolgen.

Als *freies Wasser* (hier:  $W_{FR}$ ) oder Kapillarwasser wird das vorhandene oder bei hohen Luftfeuchten in den Kapillarporen kondensierte Wasser bezeichnet. Es unterliegt keinen oder nur geringen Bindungskräften und ist damit leicht verdunstbar bzw. verdampfbar. Infolge von Kapillarkräften werden Wassermoleküle an den Ausbuchtungen („Zwickel“) der Kapillaren gebunden. Externes, flüssig zugeführtes Wasser liegt zunächst auch in ungebundener Form vor. Dieser Wasseranteil steht für eine weitere Hydratation zur Verfügung oder ist evaporierbar. Nach [Powers 1947a] kann

die Menge an verdunstbarem Wasser durch Lagerung über Magnesiumperchlorat bei 23 °C bis zur Massekonstanz bestimmt werden.

In der porösen Struktur der C-S-H-Phasen, den Gelporen, wird Wasser durch energetische Wechselwirkungen (van-der-Waals Kräfte, elektrostatische Bindungen) an den Oberflächen *physikalisch gebunden* (hier:  $W_{PH}$ ), auch Gelwasser genannt. Mit dem Abstand der Moleküle zur jeweiligen Oberfläche verringert sich deren Bindungskraft. Unter normalen Bedingungen ist das Gelporenwasser nicht verdampfbar und steht auch nicht für eine weitere Hydratation zur Verfügung. Bei Temperaturen bis etwa 105 °C kann es komplett aus den Bindungen gelöst werden [Grübl 2001]. Hierbei wird auch der Anteil  $W_{FR}$  und in Ettringitphasen gebundenes Wasser mit erfasst. Es wird angenommen, dass bei einer vollständigen Hydratation etwa 15 M.-% v.Z. des Zugabewassers physikalisch gebunden sind [Powers 1947a]. Die Menge des Gelwassers hängt von Gelvolumen und der relativen Feuchte im Porensystem ab. Bei einer Luftfeuchte von 80 % sind Poren bis zu einem Durchmesser von 2 nm wassergefüllt, dies entspricht etwa der Größe der Gelporen [van Breugel 1991]. Durch die starken Massenanziehungskräfte wird eine um 10 % erhöhte Dichte des Gelwassers angenommen [Powers 1947a].

*Chemisch gebundenes Wasser* (hier:  $W_{CH}$ ), Hydratwasser oder Zwischenschichtwasser ist fest in das Kristallgitter der C-S-H-Phasen integriert und erst bei Temperaturen von etwa 1000 °C komplett aus den Bindungen lösbar [Grübl 2001]. Da es durch eine Trocknung bei 105 °C (oder äquivalente Verfahren) nicht ausgetrieben werden kann, wird dieser Anteil auch als nicht-verdampfbare Wasser bezeichnet [Powers 1947a]. Im Gegensatz zum freien und phys. geb. Wasser wird der Gehalt an chem. geb. Wasser im Zementstein nicht von der Umgebungsfeuchte beeinflusst. In Abhängigkeit der verwendeten Trocknungsverfahren ist in [van Breugel 1991] eine Übersicht über die in der Literatur bestimmten Mengen an chem. geb. Wasser bei vollständiger Hydratation angegeben. Die Ergebnisse lagen zwischen 20 und 26 M.-% v. Z.. Dem Autor zufolge ist die Streuung der Versuchsergebnisse unterschiedlicher Studien durch die unterschiedlichen Messmethoden, Nachbehandlungsverfahren und w/z-Werte bedingt. Da die einzelnen Klinkerphasen unterschiedliche Mengen an Wasser binden, ist auch deren Zusammensetzung mit verantwortlich. Mills, der für die Versuche die Ofentrocknung verwendete, ermittelte einen Wert von 24 - 26 M.-% v.Z. [Mills 1966]. Generell wird für Modellierungen meist von einem Wert von  $W_{CH} = 25$  M.-% v.Z. ausgegangen. Die Menge des in CH gebundenen Wassers kann bei einer kontinuierlichen Erhitzung durch den Masseverlust zwischen etwa 400 – 600 °C ermittelt werden.

*Evaporiertes Wasser* (hier:  $W_{EV}$ ) ist bzw. war Teil des freien Wassers, welches aufgrund von Dampfdruckunterschieden aus dem Beton entwichen ist.

Grundsätzlich ist aber eine strenge *Trennung* der genannten Anteile nicht möglich, da das Porensystem keine Diskontinuitäten bei bestimmten Grenzporendurchmessern (chemisch / physikalisch gebunden bzw. physikalisch gebunden / frei) aufweist und durch die genannten Verfahren prinzipiell keine reinen Anteile bestimmt werden.

Die beschriebenen Anteile, deren Wechselwirkung und Einflussparameter (s. spätere Kapitel) sind schematisch in Abbildung 2 zusammengefasst.

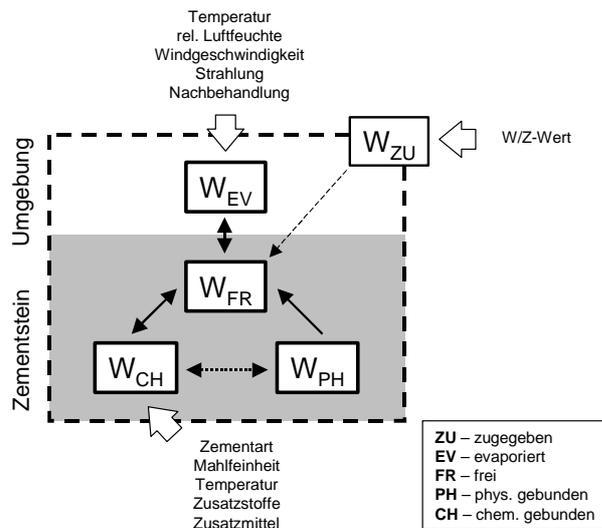


Abbildung 2: Wasseranteile und Einflussparameter

Steht der Zementstein in Kontakt mit der *Umgebung*, kann Wasser abgegeben (z.B. durch Verdunstung) oder aufgenommen werden (z.B. durch Adsorption). Dies verändert den Gesamtwassergehalt des Zementsteins.

### 3.1.5.2 Versuchstechnische Bestimmung der Wasseranteile

Zur *versuchstechnischen Bestimmung* der Wasseranteile können verschiedene Trocknungsverfahren angewendet werden z.B. Ofentrocknung (O-drying), Trocknung durch Vakuum (D-drying, dry-ice-method), Trocknung bei Raumtemperatur durch Lagerung über Salzen z.B. Magnesiumperchlorat (P-drying) [Catharin 1979, Powers 1947a].

Eine praktische Vorgehensweise zur Bestimmung der Wasseranteile zu einem festen Zeitpunkt mittels der *Ofentrocknung* sieht wie folgt aus:

- Wägung der Probe nach Herstellung  $(m_0)$
- Wägung der feuchten Probe zu Versuchsbeginn  $(m_t)$
- Trocknung bei 105°C bis zur Massekonstanz
- Abkühlen und Wägung  $(m_{105})$
- Trocknung bei 1000°C bis zur Massekonstanz
- Abkühlen und Wägung  $(m_{1000})$

Zusätzlich ist der relative Masseverlust (Glühverlust) des Zements  $GV_z$  und der Gesteinskörnung  $GV_G$  separat zu ermitteln und bei der Berechnung zu berücksichtigen. In der Regel sind die Masseverluste durch Trocknung bei 105°C der genannten Komponenten zu vernachlässigen.

$$GV_Z = \frac{m_Z - m_{Z,1000}}{m_Z} \quad \text{Gleichung 2}$$

$$GV_G = \frac{m_G - m_{G,1000}}{m_G} \quad \text{Gleichung 3}$$

Ist die Masse nach dem Glühen und die Massenverteilung der Ausgangsstoffe der Probe bekannt, so können die Anteile  $W_{EV}$ ,  $W_{FR+PH}$  und  $W_{CH}$  (bezogen jeweils auf die Ausgangszementmasse  $m_Z$ ) wie folgt berechnet werden:

Tabelle 1: Ermittlung der Wasseranteile

$$W_{EV} = \frac{m_t - m_0}{m_Z} \quad W_{FR+PH} = \frac{m_t - m_{105}}{m_Z} \quad W_{CH} = \frac{m_{105} - m_{1000}}{m_Z}$$

Tabelle 2: Zusammensetzung der ermittelten Massen

Massenanteile	Wasseranteile	Glühverluste
$m_0 = m_Z + m_G + m_W$	$m_W = m_{W,ZU}$	$m'_Z = m_Z \cdot (1 - GV_Z)$
$m_t = m_Z + m_G + m'_W$	$m'_W = m_W - m_{W,EV}$	$m'_G = m_G \cdot (1 - GV_G)$
$m_{105} = m_Z + m_G + m''_W$	$m''_W = m'_W - m_{W,FR+PH}$	
$m_{1000} = m'_Z + m'_G + m'''_W$	$m'''_W = m''_W - m_{W,CH} (= 0)$	

Eine Strukturänderung durch eine Carbonatisierung, eine Reaktion zwischen dem bei der Hydratation gebildeten  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  und eindiffundierendem  $\text{CO}_2$  aus der Luft zu  $\text{CaCO}_3$  und  $\text{H}_2\text{O}$ , ist separat zu betrachten.

### 3.1.5.3 Hydratationsgrad

Die Hydratation zeichnet sich durch das Freisetzen von Wärme und die chemische Bindung von Wasser aus, die beide einen maximalen Wert erreichen. Der *Hydratationsgrad*  $\alpha$  entspricht dem Quotienten aus der Menge an verbrauchtem Zement zur Gesamtzementmenge zum Zeitpunkt  $t$ . In der Praxis wird er über die *freigesetzte Wärme* oder die Menge *chemisch gebundenen Wassers* bestimmt. Nach [van Breugel 1991] besitzen beide genannten Verfahren ähnliche Variationskoeffizienten und sind damit als gleichwertig bezüglich der Ergebnisse zu betrachten. Daneben kann auch das chemische Schwinden, die Menge an CH, die spezifische Oberfläche des Zementgels, die Festigkeit oder die dielektrischen Eigenschaften des Zementsteins zur Ermittlung von  $\alpha$  herangezogen werden.

$$\alpha(t) = \frac{W_{CH}(t)}{W_{CH,max}} \cdot 100 = \frac{W_{CH}(t)}{0,25 \cdot Z} \cdot 100 \quad \text{Gleichung 4}$$

Hierbei bezeichnet  $\alpha$  den Hydratationsgrad [%],  $W_{CH}(t)$  die Menge an chem. geb. Wasser zum Zeitpunkt  $t$  [M.-% v.Z.] und  $W_{CH,max}$  die maximale Menge an chem. bindbarem Wasser (hier 25 M.-% v.Z.).

In der Literatur finden sich Angaben, wonach eine vollständige Hydratation bei üblichen w/z-Werten *praktisch* (also die Lebensdauer eines Bauwerks betreffend) nie erreicht wird. Nach 28 Tagen ist mit einem Wert von 0,6 bis maximal 0,8 zu rechnen [van Breugel 1991, Walz 1970]. Hier spielt allerdings die Lagerung des Betons eine wichtige Rolle. Mills [in: van Breugel 1992] berücksichtigt die Tatsache einer unvollständigen Hydratation und gibt hierfür folgende empirische Formel für eine Berechnung des Endwerts an:

$$\alpha = \frac{1,031 \cdot w/z}{0,194 + w/z} \quad \text{Gleichung 5}$$

So sind bei üblichen w/z-Werten von 0,30 bis 0,60 maximale Hydratationsgrade von 63 % bis 78 % zu erwarten. Beide Gleichungen berücksichtigen keinen Einsatz von Kompositzementen oder die explizite Zugabe von Zusatzstoffen wie Hüttensanden und/oder Flugasche und gelten somit nur für Portlandzementbetone. [Gutsch 1999] wies eine Abhängigkeit des max. Hydratationsgrades von der Frischbetontemperatur mit Begründung des temperaturabhängigen Kristallwachstums in der frühen Erhärtungsphase nach. Dies kann mit den angegebenen Gleichungen ebenfalls nicht erfasst werden.

Die Hydratation läuft bei Mörteln und Betonen im Vergleich zu reinen Zementpasten schneller ab und es kann ein höherer maximaler Hydratationsgrad erreicht werden. Der Grund liegt in der porösen Übergangszone zwischen Zementstein und Gesteinskörnung, in der ein besserer Wassertransport stattfinden kann [van Breugel 1991].

## 3.1.6 Struktur des Zementsteins

### 3.1.6.1 Allgemeines

Nach gängiger Lehrmeinung ist für eine vollständige Hydratation theoretisch ein w/z-Wert von  $W_{PH} + W_{CH} = 0,15 + 0,25 = 0,40$  erforderlich. Ein höherer Wert führt durch das überschüssige Wasser bei vollständiger Hydratation zu zunächst wassergefüllten (Kapillar-)Poren, eine geringere Wasserzugabe zu einem dichten Gefüge mit unvollständig hydratisierten Zementklinkern. Übliche Gesteinskörnung wie Quarz oder Basalt können in der Regel als nicht-porös betrachtet und in den weiteren Überlegungen vernachlässigt werden.

### 3.1.6.2 Poren

#### Einteilung der Poren

Eines der ersten konsistenten Modelle für die Mikrostruktur von Zementstein wurde von Powers und Brownyard entwickelt [Powers 1947a]. Es beschreibt die physikalischen Eigenschaften und bildet die Grundlage für volumetrische Berechnungen des Zementsteins. Auf der Basis von experimentell bestimmter Kapillar- und Gelporosität wird Zementstein in drei Phasen eingeteilt: Hydratationsprodukte, unreaktierter Zementklinker und Poren.

Die Poren werden nach ihrer Größe in Verdichtungs- und Luftporen, Kapillarporen, Schrumpfporen und Gelporen unterteilt, s. Abbildung 3 und Tabelle 3.

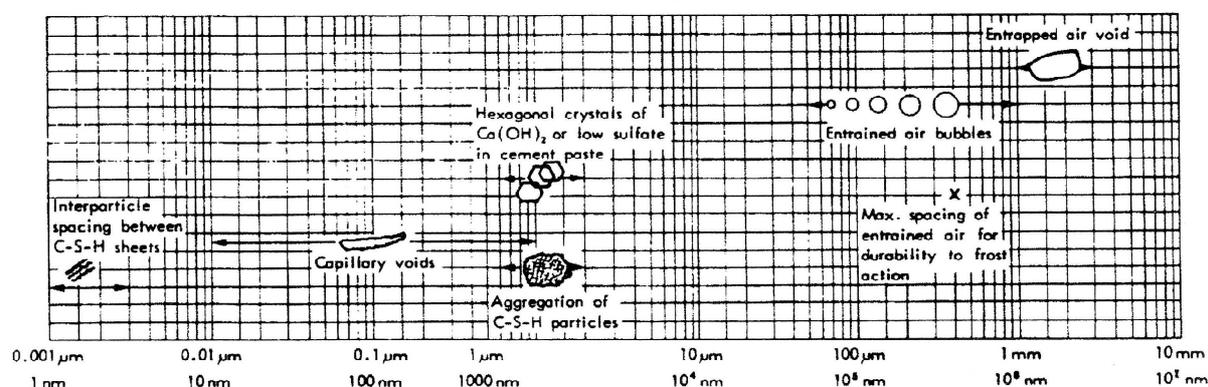


Abbildung 3: Poren- und Partikelgrößenverteilung im Zementstein [Hauggaard 1997]

Je nach Quelle differieren die Grenzdurchmesser für die jeweiligen Porenarten. Eine Aufstellung verschiedener Autoren ist z.B. in [van Breugel 1991] zu finden.

Nach [Setzer 1987] kann eine Einteilung der Porenarten nach den Eigenschaften für den Wassertransport vorgenommen werden. Grundlage hierfür war die Bestimmung der kapillaren Saugfähigkeit.

Tabelle 3: Porengrößen und Wassertransport nach [Setzer 1987]

Durchmesser	Bezeichnung	Wassertransport	Bemerkung
< 2 nm	Mikroporen	nein	Gelporen, Wasser phys. geb.
2 nm – 50 nm	Mesoporen	nein	Gelporen, Wasser phys. geb.
50 nm – 2 µm	Mikrokapillaren	ja	Langsam, große Saughöhe
2 µm – 50 µm	Kapillaren	ja	<u>wesentlicher Transport</u>
50 µm – 2 mm	Makrokapillaren	ja	schnell, geringe Saughöhe
> 2 mm	Grobporen	ja	v.a. Permeation

*Gelporen* befinden sich innerhalb der C-S-H-Phasen bzw. in deren Zwischenräumen, sind in sich geschlossen und unter normalen Bedingungen wassergefüllt. Das Gelvolumen hängt nur vom Zementgehalt und dem Hydratationsgrad ab. *Kapillaren* sind hingegen untereinander vernetzt und je

nach Trocknungszustand des Zementsteins und Hydratationsgrad leer, teilgesättigt oder wassergesättigt.

Bei Untersuchungen an Zementstein wurde festgestellt, dass die Kapillaren nicht mehr kontinuierlich untereinander verbunden (perkoliert) sind, wenn die Kapillarporosität durch das Fortschreiten des Hydratationsprozesses auf einen Wert unter 0,20 reduziert wird [Powers 1959, Bentz 1991]. Dies ist z.B. bei einem w/z-Wert von 0,40 ab einem Hydratationsgrad von etwa 50 % der Fall. Nach [Powers 1959] wird dies bei einer ungestörten Hydratation nach 3 Tagen erreicht. Ab diesem Zeitpunkt wird ein Feuchtigkeitstransport durch den Gelporenraum bestimmt, was die Transportkoeffizienten deutlich beeinflusst, da die Gelporen bis Feuchten von etwa 50 % wassergefüllt sind [Baroghel-Bouny 1994]. Für die Feuchteabgabe bzw. -aufnahme von Beton bedeutet dies, dass die verbleibenden Kapillarporen im Inneren bei Luftfeuchten über 50 % r.F. wassergefüllt sein können und dort eine Hydratation somit ungehindert fortlaufen kann, zugleich aber auch, dass eine externe Wasserzufuhr nur sehr langsam und damit evtl. unzureichend erfolgen kann [Powers 1947a, Bentz 1997]. Bei Beton kann eine Verbindung der Kapillaren durch die Übergangszone zwischen Zementstein und Gesteinskörnung auch bei niedrigerer Kapillarporosität hergestellt sein [Scrivener 1996].

#### Zeitliche Entwicklung der Porenverteilung

Mit dem (ungestörten) Kristallwachstum verändert sich der Porenraum zeitabhängig. Das Kapillarporenvolumen nimmt ab, das Gelporenvolumen nimmt zu und der mittlere Porenradius verringert sich. Zusätzlich beeinflussen der w/z-Wert und die Mahlfeinheit des Zementes die Porenverteilung, s. Abbildung 4.

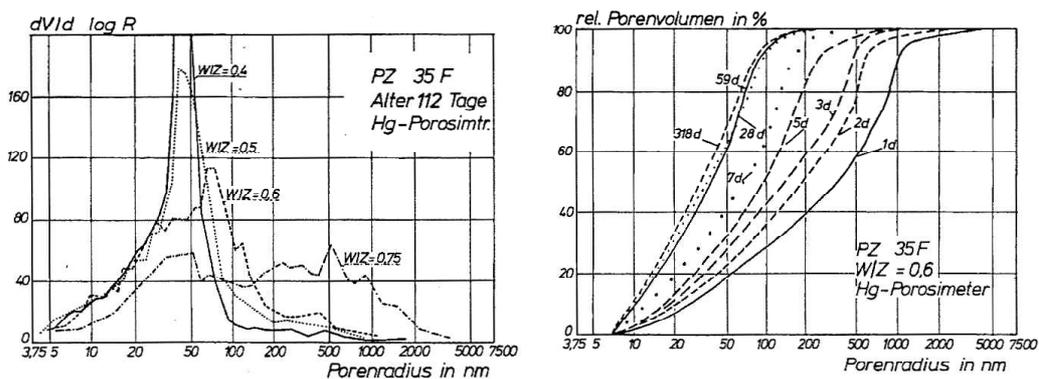


Abbildung 4: Porengrößenverteilung und w/z-Wert (links) sowie Summenhäufigkeit und Alter (rechts) nach Reinhardt [in: Tacke 2002]

Mit zunehmendem w/z-Wert nimmt vor allem der Anteil der Poren mit  $d > 100$  nm ab [Ungricht 2004]. Nach [Shi-Ping 1989] werden bei der Hydratation erst Poren mit einem Durchmesser  $> 132$  nm mit Hydratationsprodukten gefüllt, der Porengrößenbereich zwischen 3,7 und 50 nm bleibt zu Beginn volumenmäßig konstant. Das Kapillarporenvolumen nimmt also zeitabhängig ab, das Porensystem verfeinert sich in diesem Bereich. Die Gelporosität nimmt mit der Hydratationsdauer zu und erreicht

einen Endwert von etwa 26 V.-% [Powers 1959]. Bei der chemischen Wasserbindung verringert sich das Volumen der Produkte im Bezug zu den Edukten um etwa 18 bis 26 % [Powers 1947a], es bilden sich sog. Schrumpfporen. Hierbei fällt auch die Feuchte bei konservierter Lagerung in Abhängigkeit des w/z-Werts oder es wird bei entsprechendem Angebot externes Wasser aufgenommen. Der Vorgang des internen Wasserverbrauchs wird als Selbstaustrocknung bezeichnet.

### 3.1.6.3 Berechnung des Porenvolumens

Nach Powers kann der Porenraum unter idealisierten Randbedingungen und Annahmen berechnet werden. Das chemisch gebundene Wasser besitzt eine um 25 % erhöhte Dichte. Dies entspricht einer Volumenminderung von 6 cm<sup>3</sup> / 100 g Zement. Es kann maximal 25 % des Zementgewichts chemisch gebunden werden. Das physikalisch gebundene Wasser beträgt maximal 15 % des Zementgewichts und erfährt eine Verdichtung um 10 V.-%. Das Gelporenvolumen  $V_G$  und die Gesamtporosität  $V_p$  berechnen sich zu:

$$V_p = \frac{W - Z \cdot W_{CH} \cdot 0,75 \cdot \alpha}{\rho_w} \quad \text{Gleichung 6}$$

$$V_G = (W_{PH} \cdot 0,9 + W_{CH} \cdot 0,25) \cdot \frac{Z}{\rho_w} \cdot \alpha \quad \text{Gleichung 7}$$

Der Kapillarporenraum  $V_K$  errechnet sich somit aus der Differenz zwischen Gesamtporenvolumen und Gelporenvolumen.

$$V_K = V_p - V_G \quad \text{Gleichung 8}$$

Somit ist für Portlandzementbeton eine einfache Berechnungsmöglichkeit gegeben.

### 3.1.6.4 Porosität, Wasserbindung und Festigkeit

Die Porosität, speziell die Kapillarporosität, und die Festigkeit des Zementsteins stehen in engem Zusammenhang. In [Adam 2006] wurde die Druckfestigkeit in Abhängigkeit der chem. Wasserbindung experimentell für die untersuchten Betone (CEM I 32,5R und CEM I 42,5R, W/Z = 0,20 .. 0,60) ermittelt und folgender empirischer Zusammenhang erstellt:

$$f_c = \frac{232 + 305 \cdot w_{950^\circ C}^{1,345}}{232 + w_{950^\circ C}^{1,345}} \cdot Z \quad \text{Gleichung 9}$$

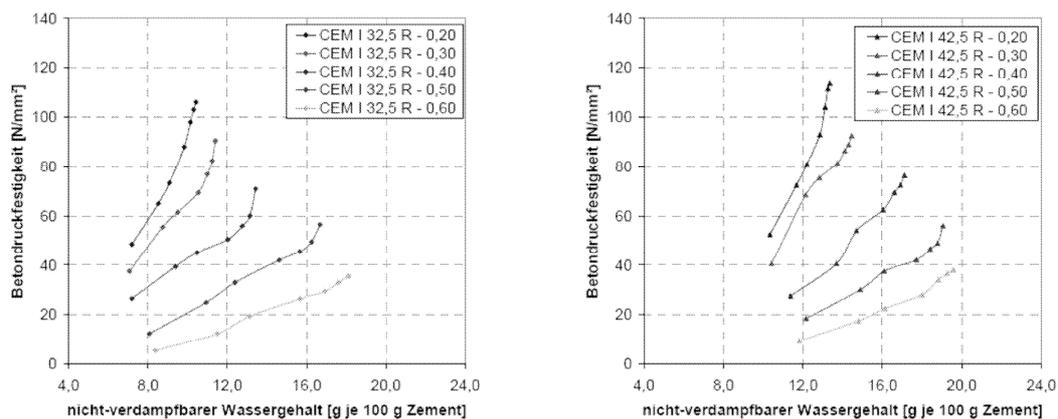
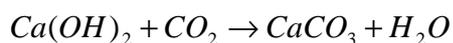


Abbildung 5: Zusammenhang zwischen chem. geb. Wasser und Betondruckfestigkeit bei versch. w/z-Werten und untersch. Zementen [Adam 2006]

Je höher der w/z-Wert und je geringer der Anteil an chem. geb. Wasser, desto niedriger ist die Festigkeit des Betons. Zwischen der Menge an nicht-verdampfbarem Wasser ( $w_{950}$ ) und Betondruckfestigkeit besteht jeweils ein nahezu linearer Zusammenhang.

### 3.1.6.5 Carbonatisierung

Bei der sog. Carbonatisierung handelt es sich um eine Reaktion der im Laufe der Hydratation gebildeten Alkalien bzw. Erdalkalien und entsprechende Hydroxide, vornehmlich des Calciumhydroxids aber auch Kalium- und Natriumhydroxiden, mit aus der Luft eingedrungenem Kohlendioxid (Konzentration in Luft etwa 0,038 M.-%) zu Calciumcarbonat, meist im Form von Calcit, und Wasser, welches meist entweicht. In carbonatisierten Betonbereichen fällt der pH-Wert auf bis zu unter 9, womit eine Depassivierung von Bewehrungsstahl und damit die Voraussetzung für eine Korrosion gegeben ist.



Gleichung 10

Nach [Kropp 1983] wird dabei ein Teil des in alkalische Hydratationsprodukte chemisch gebundenen Wassers freigesetzt und es werden weitere kristalline Phasen gebildet, welche bis zu 50 M.-% des Zementsteins einnehmen. Gleichzeitig findet ein Wasserverlust durch Verdunstung statt. Eine Volumenzunahme um bis zu 20 V.-% führt zu einer Verdichtung des Porensystems, vornehmlich im Porenbereich  $< 100$  nm. Zudem verringert sich die spez. Oberfläche der Poren, was zu verringerten Transportkoeffizienten führt. Pro Mol  $\text{CO}_2$  werden 0,4 bis max. 1 Mol chem. geb. Wasser freigesetzt. Die Masseaufnahme entsteht durch die unterschiedlichen Molmassen von  $\text{CO}_2$  (44 g/Mol) und  $\text{H}_2\text{O}$  (18 g/Mol) [Grube 1990]. Eine Carbonatisierung führt neben einer Verdichtung des Porensystem auch zu einer Festigkeitssteigerung im betroffenen Bereich. Die genannten Charakteristika gelten für Portlandzementbetone, bei Betonen mit hohen Hüttensandanteilen wurde eine Vergrößerung des Porensystems beobachtet.

Laut [Kropp 1983] gibt es in der Literatur keine expliziten Untersuchungen bezüglich Carbonatisierung und Diffusion bzw. Permeabilität. Es wird allgemein angenommen, dass carbonatisierte Bereiche den Transport von Wasser und Gasen einschränken. Die Carbonatisierungstiefe – eine vergleichbare Reaktivität der Zemente bzw. Betone vorausgesetzt – ist ein Indikator für die Dichtigkeit und damit die Betongüte.

### **3.1.6.6 Schwinden und Quellen**

Zu den lastunabhängigen hygrischen Verformungen von Zementstein zählen das Schwinden und Quellen. Je nach Ursache können verschiedene Schwindarten unterschieden werden.

Zu den Schwindarten in jungem und damit für die Nachbehandlung relevanten Alter zählt vor allem das plastische Schwinden. Hierbei führt das verdunstende Wasser zu Verformungen, die in der noch weichen (plastischen) Matrix bei Überschreitung der Zugbruchdehnung zu Rissen mit großen Rissbreiten bis zu 10 mm führen kann. Mit einsetzendem Erstarren reduziert sich aufgrund der wachsenden Materialwiderstands die Gefahr der plastischen Schwindrissbildung und ist ab einer Zementsteinfestigkeit ab  $1 \text{ N/mm}^2$  nicht mehr relevant [Grübl 2001]. Durch eine früh einsetzende Nachbehandlung kann das Frühschwinden reduziert werden.

## 3.2 Transportmechanismen in porösen Stoffen

### 3.2.1 Allgemeines

Vor allem aufgrund von Konzentrations- oder Druckunterschieden findet in porösen Stoffen eine Bewegung von flüssigen und gasförmigen Medien zur Erlangung eines Gleichgewichtszustandes statt. Je nach Beschaffenheit des Stoffes und des Mediums können verschiedene *Transportmechanismen* – auch gleichzeitig – wirksam sein, s. Abbildung 6 (li.). Wasser wird nach Aggregatzustand hauptsächlich flüssig oder gasförmig transportiert, s. Abbildung 6 (re.). Die Knudsen-Zahl  $K_n$  beschreibt das Verhältnis von mittlerer freier Weglänge eines Moleküls zum äquivalenten Porendurchmesser des Mediums und ermöglicht eine Einteilung der Vorgänge. Neben dem Transport werden hygrische Wechselwirkungen auch von der *Feuchtespeicherung* beeinflusst.

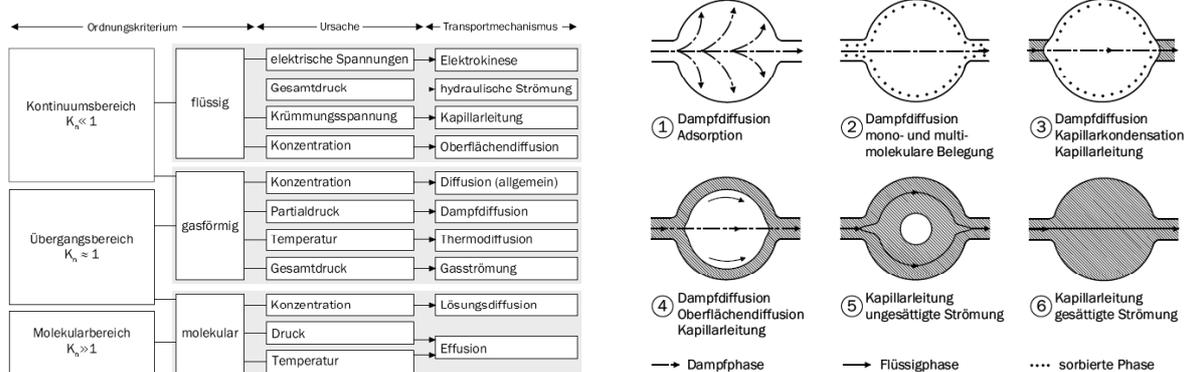


Abbildung 6: links: Transportphänomene in porösen Medien nach [Kießl 1983] und rechts: Stadien der Feuchtespeicherung nach [Klopfer 1974]

### 3.2.2 Wassertransport

#### Diffusion

Als Diffusion wird der Molekültransport mit zufälliger Bewegung von freien Ionen oder Molekülen aufgrund eines Konzentrationsunterschieds bezeichnet. Der Massestrom  $I$  [ $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] ist – stationäre Verhältnisse vorausgesetzt - proportional zum Konzentrationsgefälle  $dc/dx$  [ $(\text{g}/\text{m}^3)/\text{m}$ ] und dem Diffusionskoeffizienten  $D$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]. Dies wird mit dem 1. Fick'schen Gesetz beschrieben:

$$I = -D \cdot \frac{dc}{dx}$$

Gleichung 11

Die Diffusion ist bei Beton aber abhängig von Zeit, Ort, Konzentration und Temperatur. Mit dem 2. Fick'schen Gesetz wird dem instationären Zustand Rechnung getragen:

$$\frac{\partial c(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c(x,t)}{\partial x^2}$$

Gleichung 12

Diese Gleichung kann bei bekannten Randbedingungen und unter der Voraussetzung, dass keine chemische Reaktion des Mediums stattfindet, gelöst werden. Voraussetzung ist ein homogenes und isotropes Medium mit einem konstanten Diffusionskoeffizienten. Bei Beton ist dieser abhängig vom Wassergehalt im Porensystem und damit bei Feuchtegradienten wie bei einer Verdunstung zeitlich und örtlich veränderlich.

### Kondensation / Verdunstung

Generell wird der Wassergehalt der Luft als relative Luftfeuchte angegeben. Diese bezeichnet das stark temperaturabhängige Verhältnis von vorhandenem Wasserdampfdruck zum Sättigungsdampfdruck der Luft. Bei Luftfeuchten von unter 100 % beginnt flüssiges Wasser zu verdampfen. Geschieht dies über eine Oberfläche, wird der Vorgang als Verdunstung oder Evaporation bezeichnet und unterliegt zusätzlich den Übergangsbedingungen zwischen Luft und Stoffoberfläche. Ist die relative Luftfeuchte höher als die des Betons, kondensiert Wasser. Zusätzliche Einflussgrößen sind Strahlung, Wind, Luftdruck und Temperatur.

### Permeation

Als Permeation wird der Wasser- oder Gastransport durch ein Druckgefälle bezeichnet. Abhängig von der Porenstruktur und der Viskosität des Mediums kann die Strömung laminar oder turbulent sein. In letzterem Fall ist der Massenstrom nicht proportional zum Druckgefälle. Der Permeabilitätskoeffizient ist ein charakteristischer Wert für die Durchlässigkeit eines Stoffes.

### Gaspermeabilität

Da angenommen wird, dass bei Beton nicht laminare Strömungsverhältnisse vorliegen, muss das transportierte Medium bei der Berechnung der Gaspermeabilität Berücksichtigung finden. Trotzdem wird gemeinhin nachstehende, auf laminaren Verhältnissen basierende, Gleichung angenommen [RILEM 1995]:

$$K_g = \eta \cdot \frac{Q \cdot l}{t \cdot A} \cdot \frac{2 \cdot p}{(p_1 - p_2) \cdot (p_1 + p_2)}$$

Gleichung 13

Hierin bezeichnet  $K_g$  den Permeabilitätskoeffizienten [ $m^2$ ],  $\eta$  die Viskosität des Mediums [ $Ns/m^2$ ],  $Q$  das Gasvolumen [ $m^3$ ],  $l$  die Dicke des durchströmten Volumens [ $m$ ],  $A$  die durchströmte Fläche [ $m^2$ ],  $p$  den Druck, bei dem  $Q$  gemessen wurde [ $N/m^2$ ],  $p_1$  den Druck bei Messbeginn bzw.  $p_2$  bei Messende [ $N/m^2$ ] und  $t$  die Messzeit [ $s$ ].

## Kapillarleitung

Poröse hygroskopische Feststoffe nehmen in Kontakt mit flüssigem Wasser dieses über Kapillarkräfte auf und verteilen es im Stoffinneren, bis ein Gleichgewichtszustand (kapillare Saugkraft / Reibung, Gewicht) erreicht ist. Grund hierfür sind Grenzflächenspannungen zwischen Luft, Porenoberflächen und Wasser. Prinzipiell füllen und leeren sich große Poren schnell und erreichen geringe Steighöhen, bei kleinen Poren ist es umgekehrt. Durch die heterogene Porenstruktur von Beton ist daher auch keine scharfe Eindring- bzw. Austrocknungsfront zu erwarten. Kapillarleitung ist nur im Porenbereich von 50 nm bis 1 mm wirksam. Bei größeren Radien ist der Kapillardruck zu gering, kleine Poren werden bereits durch Kapillarkondensation gefüllt [Ungricht 2004].

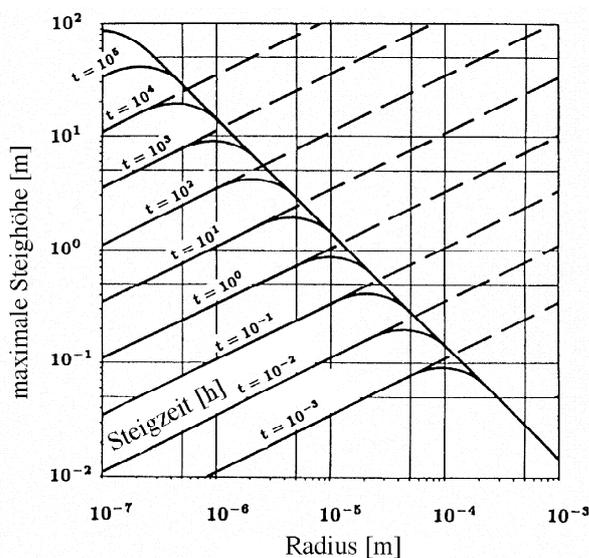


Abbildung 7: Steighöhe/Geschwindigkeit und Porendurchmesser [in: Ungricht 2002]

Für geringe Saugzeiten und geringe Eindringtiefen kann folgende einfache Beziehung zwischen Wasseraufnahme und Zeit aufgestellt werden ( $\sqrt{t}$ -Gesetz):

$$m(t) = A \cdot \sqrt{t}$$

Gleichung 14

$m(t)$  bezeichnet die Wasseraufn. [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ],  $A$  den Wasseraufnahmekoeffizient [ $\text{kg}/\text{m}^2/\sqrt{\text{h}}$ ] und  $t$  die Zeit [h].

Die Allgemeingültigkeit der Gleichung für Beton wird aufgrund von Quellvorgängen (Selbstabdichtung) während der Wasseraufnahme bezweifelt [Rucker 2006].

## Berechnungsverfahren

Um die komplexen Vorgänge von Wassertransport in porösen Medien zu berechnen – vor allem bei gekoppeltem Wärme- und Feuchtetransport – müssen Berechnungsprogramme eingesetzt werden. Möglich ist eine Simulation zum Beispiel mit dem Programm [WUFI] (Wärme und Feuchte instationär) des Fraunhofer Instituts für Bauphysik.

### 3.2.3 Feuchtespeicherung

Die Feuchtespeicherung (Aufnahme und Abgabe von Wasser an die bzw. von der Umgebung) wird in die Bereiche hygroskopisch (bis 95 % r.F.), überhygroskopisch und Übersättigung eingeteilt und ist von der Porosität, den Porenradien und der inneren Oberfläche abhängig. Im erstgenannten Bereich kann die Feuchtespeicherfunktion eines Stoffes gut mittels einer Sorptionsisotherme (Abbildung 8) beschrieben werden.

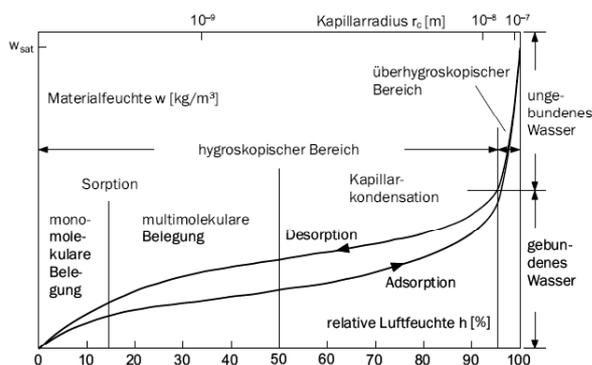


Abbildung 8: Feuchtespeicherfunktion von Beton (schematisch) [Kießl 1983]

Unter normalen Bedingungen ist der thermische Einfluss und die Hysterese zwischen Adsorption und Desorption (Flaschenhals- oder Ink-bottle-Effekt) vernachlässigbar [Kießl 1983, Künzel 1994]. Unterhalb einer relativen Feuchte von 50 % ist die Bindung der Wassermoleküle an die Oberflächen durch van-der-Waals-Kräfte maßgeblich, oberhalb regelt die Kapillarkondensation eine Wasseraufnahme bzw. -abgabe. Hierbei bilden sich in den Poren gekrümmte Wassermenisken, die zu einer Dampfdruckerniedrigung führen [Krus 1995].

Unter der vereinfachenden Annahme von zylindrischen Kapillaren kann mit Hilfe der Gleichungen von Kelvin und Laplace die relative Feuchte im Kapillarporensystem in Abhängigkeit des Porenradius berechnet werden (Kelvin-Thompson-Formel).

$$RH = \exp\left[\frac{-2 \cdot \sigma \cdot \cos \Theta}{r \cdot \rho \cdot R_d \cdot T}\right] \cdot 100$$

Gleichung 15

$RH$  bezeichnet die relative Luftfeuchte [%],  $\sigma$  die Oberflächenspannung des Wassers [N/m],  $\Theta$  den Randwinkel [grad],  $r$  den Grenzradius [m],  $\rho_w$  die Dichte des Wassers [kg/m<sup>3</sup>],  $R_d$  die Gaskonstante von Wasserdampf [N·m/kg·K] und  $T$  die vorh. Temperatur [°C bzw. K].

Für eine feste Temperatur (hier: 20°C) ist dieser Zusammenhang der Kelvin-Gleichung (Feuchte - Wasserfüllung) grafisch dargestellt, s. Abbildung 9. Es zeigt sich, dass sich bei abnehmender Feuchte zuerst die größeren Poren leeren.

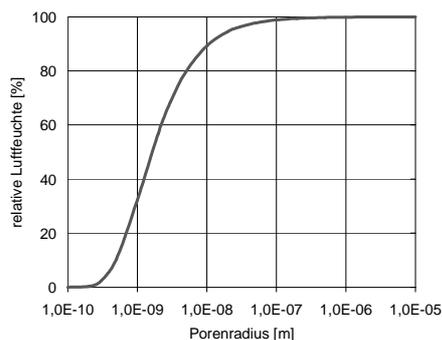


Abbildung 9: Wasserfüllung der Poren in Abhängigkeit der relativen Feuchte

Im Vergleich zur Adsorption ist die Kapillarkondensation deutlich effizienter und wird von der Wasseraufnahme (freien Kapillarwassers) im *überhygroskopischen Bereich* (bis zur freien Wassersättigung) noch übertroffen. Hierbei wird Wasser über Kapillarkräfte aufgenommen, bis in den Poren ein Gleichgewicht mit dem dort herrschenden Unterdruck erreicht ist. Der *Übersättigungsbereich* spielt z.B. bei Frostangriff eine entscheidende Rolle, ist bei normalen Feuchtebetrachtungen jedoch zu vernachlässigen.

Eine Beispielrechnung mit dem Programm WUFI an einem typischen, aushydratisierten und wassergesättigten Beton der Festigkeitsklasse C35/45 und uniaxialer Austrocknung im Klima 20/65 für 28d zeigt folgendes Ergebnis, s. Abbildung 10:

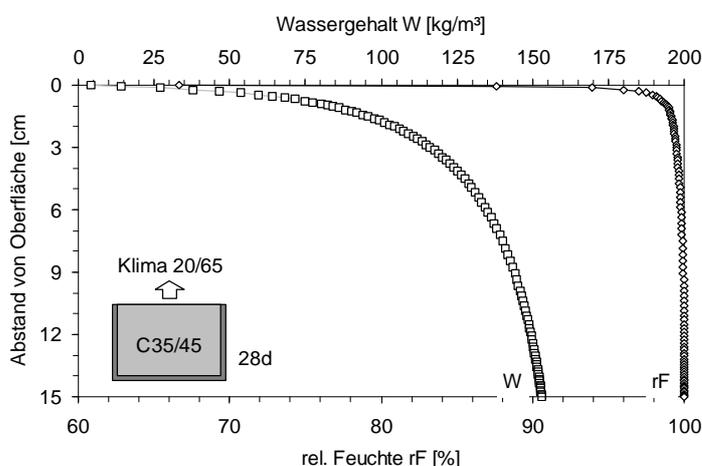


Abbildung 10: Beispielrechnung mit WUFI, Austrocknung eines wassergesättigten Betons

Mit der Trocknung stellt sich ein Feuchtigkeitsgradient zur Oberfläche hin ein, welcher aufgrund der Porengrößenverteilung nicht proportional zur relativen Porenfeuchte ist. Auf der Oberfläche ist nach 28d bereits lange die Umgebungsfeuchte erreicht, in 5 mm Tiefe ist aber noch eine Feuchte von > 98 % r.F. vorhanden.

Für eine genaue Beschreibung der Funktionen und Effekte des Wassertransports und der Wasserspeicherung siehe z.B. [Künzel 1994, Krus 1995, Kießl 1983, Wiegrink 2002, Ungricht 2004].

## 3.3 Evaporation (und Absorption)

### 3.3.1 Verdunstungsphasen

Einflüsse auf die Verdunstung von Wasser aus porösen Stoffen können in äußere und innere Verdunstungsbedingungen unterschieden werden.

Die *äußeren Verdunstungsbedingungen* beschreiben die potentielle Verdunstung und sind von den Umgebungsbedingungen (Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Strahlung) abhängig. Voraussetzung ist immer ein Dampfdruckgefälle zwischen der Oberfläche und der umgebenden Luft. Die *inneren Verdunstungsbedingungen* steuern die Verdunstung nach der Abtrocknung der Oberfläche und richten sich nach dem Wassergehalt des Betons und dessen kapillarer Leitfähigkeit. Bei konstanten Umgebungsbedingungen lässt sich nach [Nischer 1976] das Austrocknen in zwei Phasen unterteilen:

In der *ersten Phase* ist die Verdunstungsgeschwindigkeit konstant, da aufgrund der hohen Kapillarität des Gefüges und der hohen Feuchteleitfähigkeit eines feuchten Systems mehr Wasser zur Oberfläche transportiert als verdunstet werden kann. Es stellt sich bereits ein Feuchtegradient zur Oberfläche hin ein. Die Verdunstung wird von den Übergangsbedingungen Stoff / Umgebung begrenzt.

Die *zweite Verdunstungsphase* beginnt, wenn der Wassergehalt der Stoffoberfläche den maximalem hygrokopischen Feuchtegehalt erreicht hat. Die Verdunstungsgeschwindigkeit vermindert sich kontinuierlich, da das Flüssigkeitsgefälle abnimmt. Die Trocknungsfront liegt nunmehr im Stoffinneren. Wasser wird kapillar zur Trocknungsfront, anschließend über Diffusion, Effusion oder Oberflächendiffusion zur Oberfläche transportiert und von dort an die Umgebung abgegeben. Dieser Abschnitt ist also von den kapillaren Eigenschaften des Stoffes abhängig. Nach [Frentzel 2005] nimmt der Einfluss der äußeren Bedingungen wie Wind stark ab.

Prinzipiell schließt sich ein *dritter Abschnitt* an, da Beton hygrokopische Eigenschaften besitzt, also in Abhängigkeit der Stofffeuchte Wasser anlagert bzw. abgibt. Dieser Bereich beginnt, wenn im Bauteilinneren die max. hygrische Feuchte herrscht. Das Verdunstungsende ist erreicht, wenn sich zwischen dem Beton und der Umgebung ein thermodynamisches Gleichgewicht eingestellt hat.

Abbildung 11 zeigt schematisch die Verdunstungsabschnitte für einen anfangs wassergesättigten kapillarporösen Stoff mit unterschiedlichen Porenradien unter konstanten Randbedingungen.

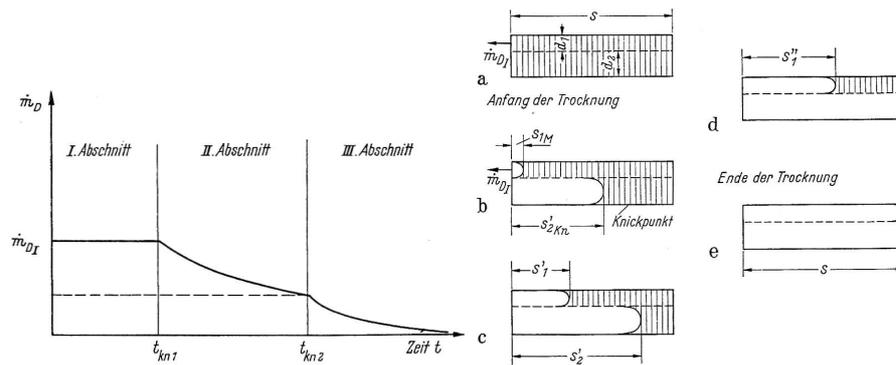


Abbildung 11: li.: Charakteristischer Verdunstungsverlauf eines kapillarporösen Stoffes, re: Flüssigkeitsverteilung beim Trocknen zweier verbundener Kapillaren unterschiedlicher Größe (Stadien a – e) [Krischer 1992]

Eine Voraussetzung für diese Annahmen sind konstante Umgebungsbedingungen. Dies impliziert, dass ein konvektiver Abtransport (Luftbewegung) der verdunsteten Feuchte stattfindet.

### 3.3.2 Berechnungsverfahren für die Evaporationsrate

Die Evaporationsrate von freien Wasseroberflächen kann neben empirischen Verfahren mit Hilfe von *aerodynamischen Ansätzen* oder *Energiebilanzen* berechnet werden. Eine geschlossene Lösung besteht – zumindest für poröse Stoffe – nicht.

Die meisten Berechnungsformeln für die Evaporation von freien Wasseroberflächen beruhen auf den von Dalton im Jahr 1802 ermittelten Zusammenhängen und ergeben sich aus der Differenz der Sättigungsdampfdrücke von Luft und Wasseroberfläche ( $e_o$ ,  $e_a$ ) multipliziert mit einer Funktion der Windgeschwindigkeit ( $V$ ). Auf dieser Grundlage und umfangreichen Versuchsergebnissen am Lake Hefner formulierte [Menzel 1954] folgende Gleichung:

$$W = 0,44 \cdot (e_o - e_a) \cdot (0,253 + 0,096 \cdot V) \quad \text{Gleichung 16}$$

Dies bildete die Grundlage für das bekannte ACI-Nomogramm [ACI 305], welches von [Bloem 1960] entwickelt wurde, s. Abbildung 12. Es bietet gegenüber der Formel von Menzel den Vorteil der leichteren Anwendung in der Praxis, da die Ermittlung der Dampfdrücke entfällt. Fälschlicherweise wird dieses Diagramm vielfach in Veröffentlichungen zur Nachbehandlung von Beton verwendet, um die Verdunstung von Wasser aus Beton pauschal zu quantifizieren. Dies besitzt jedoch nur Berechtigung, wenn der Beton als Suspension ohne Gefüge, also max. bis zum Erstarrungsbeginn, betrachtet wird, jedoch nicht danach.

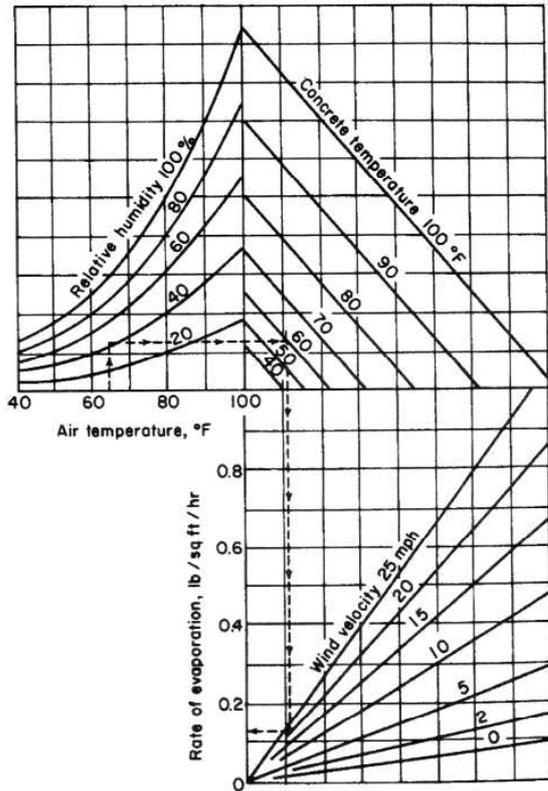


Abbildung 12: Verdunstungs-Nomogramm "ACI-Nomogramm" zur Berechnung der Verdunstung von freien Wasseroberflächen [ACI 305]

[Uno 1998] vereinfachte die Formel von Menzel, die Dampfdrücke müssen nun nicht mehr separat berechnet werden, wie folgt:

$$E = 0,313 \cdot (e_{so} - r \cdot e_{sa}) \cdot (0,253 + 0,06 \cdot V) \quad \text{mit } e_s = 0,61 \cdot \exp\left[\frac{17,3 \cdot T}{237,3 + T}\right] \quad \text{Gleichung 17}$$

$E$  bezeichnet hierbei die Evaporationsrate [kg/(m<sup>2</sup>·h)],  $e_s$  den Sättigungsdampfdruck [kPa],  $T$  die Temperatur [°C],  $e_{so}$  den Dampfdruck an der Wasseroberfläche [kPa],  $e_a$  den Dampfdruck der Luft über der Wasseroberfläche [kPa],  $r$  die rel. Luftfeuchte [%] und  $v$  die Windgeschwindigkeit in 50 cm Höhe [km/h].

Für Standardklimate ist dieser Zusammenhang in Abbildung 13 grafisch dargestellt:

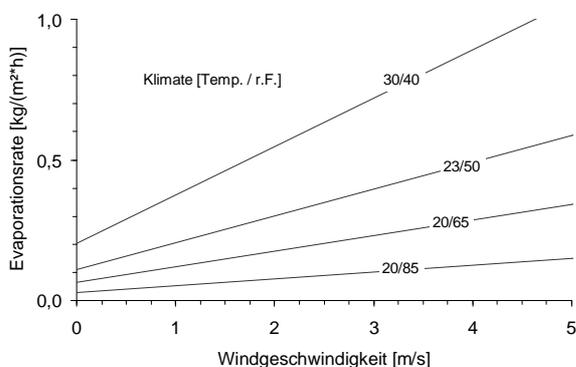


Abbildung 13: Verdunstung von freien Wasseroberflächen nach Menzel für Standardklimate

Prinzipiell ist die *Strahlungsenergie*, wenn auch nicht als Variable berücksichtigt, in Menzels Gleichung enthalten, da sie aus langjährigen empirischen Messungen unter freiem Himmel entstand.

Das Modell in [Penman 1948] kombiniert genannte Zusammenhänge mit der Energiebilanz-Methode in folgender Formel:

$$E = \left( \frac{Q_n \cdot \Delta + \gamma \cdot E_a}{\Delta + \gamma} \right) \text{ mit } \Delta = \frac{4098 \cdot e_s}{(237,3 + T)^2} \quad \text{Gleichung 18}$$

$\Delta$  ist hierin die Steigung der Kurve im Sättigungsdampfdruck/Lufttemperatur-Diagramm,  $Q_n$  die Strahlungsenergie,  $E_a$  die Evaporationsrate aufgrund von Windeffekten und  $\gamma$  die psychometrische Konstante (0,066 kPa/C).

Beide Modelle (Menzel bzw. Penman) dienen aber nur der Bestimmung der Evaporation von freien Wasseroberflächen, nicht aber der Determinierung der Wasserverdunstung aus einem porösen Medium mit unterschiedlichen Porendurchmessern, dessen Eigenschaften sich zudem zeitlich und in Abhängigkeit der Verdunstung ändern.

Der Ansatz von Penman wurde in [Jeong 2003] übernommen und für die Praxis wie folgt erweitert:

$$E = \delta \cdot \frac{Q_s}{H_v} + J \quad \text{Gleichung 19}$$

$$\text{mit } Q_s = \alpha \cdot \left[ I_d \cdot \sin(\Theta) + I_i \cdot \frac{1 + \cos(\gamma)}{2} \right] \text{ und } H_v = 427 \cdot (597,3 - 0,564 \cdot T_s)$$

Der Strahlungsanteil berechnet sie wie folgt:

$$Q_n = Q_s - Q_c - Q_r \quad \text{Gleichung 20}$$

$$\text{mit } Q_c = h_c \cdot (T_s - T_a) = 367 \cdot (6 + 3,7 \cdot v) \cdot (T_s - T_a)$$

$$Q_r = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_a^4) = \varepsilon (4,8 + 0,075 \cdot (T_a - 5)) \cdot (T_s - T_a)$$

Unter Laborbedingungen reduziert sich Gleichung 22 auf den Evaporationsterm, der wie folgt bestimmt werden kann:

$$J = B \cdot \ln \left( \frac{H_s}{H_a} \right) \quad \text{Gleichung 21}$$

Beeinflusst wird die Verdunstung durch die Temperaturunterschiede zwischen Umgebung und Oberfläche. Letztere wird durch den Verdunstungsvorgang beeinflusst, da bei einem Phasenübergang des Wassers von flüssig zu gasförmig der Umgebung Energie entzogen wird. Dies

wird allgemein als *Verdunstungskälte* bezeichnet, hier aber in der weiteren Betrachtung aufgrund des geringen Einflusses nicht berücksichtigt.

Im Programm WUFI werden die (konstanten) Parameter Trockenrohddichte, Porosität, kapillare Wasseraufnahme, bzw. Flüssigkeitstransportkoeffizient, freie kapillare Wassersättigung, Feuchtespeicherfunktion, Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit (trocken), feuchtebedingte Zunahme der Wärmeleitfähigkeit, sowie Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl verwendet, um Wärme- und Feuchtetransportvorgänge rechnerisch zu simulieren. Hieraus erkennt man, dass eine aussagekräftige Berechnung nur für feste, bei zementgebundenen Baustoffen also weitgehend aushydratisierte, Systeme mit ausreichend genau bestimmbaren Kennwerten funktionieren kann. Eine Wechselwirkung zwischen Wasserangebot und Hydratationsfortschritt und damit einer Veränderung der Kennwerte wird nicht berücksichtigt. [Adam 2006] versucht die Berechnung der Verdunstung und dessen Auswirkungen durch alternierende Verwendung von WUFI und eines Modellierungsprogramms für Hydratation (Hymostruc), jedoch erst ab einem Alter von einem Tag.

### 3.4 Relative Feuchte und Hydratation

Experimentell ist die Strukturbildung in der Betonrandzone nur sehr schwierig nachzuweisen, da die in Frage kommenden Verfahren in jungem Betonalter zu starken Streuungen führen. Zudem verändern sich die Betoneigenschaften über Zeit und Tiefe sehr schnell.

In [Bentz 1991] wurde die Auswirkung des Wasserverlustes infolge Evaporation und Selbstaustrocknung auf die Hydratation untersucht. Zwei Zementleimpasten mit  $w/z = 0,30$  bzw.  $0,40$  wurden nach jeweils unterschiedlichen Lagerungsdauern von 6h, 12h, 3d und 7d bei 100 % r.F. in ein Klima mit 90 % r.F. bei gleicher Temperatur und  $\text{CO}_2$ -freier Umgebung umgelagert, hier konnte also eine Evaporation stattfinden. Anschließend wurde der Hydratationsgrad (im Vergleich zu komplett hydratisierten Proben mit  $w/z = 3,0$ ) zu verschiedenen Zeitpunkten durch Ermittlung des Masseverlustes bei Trocknung zwischen  $105\text{ }^\circ\text{C}$  und  $950\text{ }^\circ\text{C}$  bestimmt.

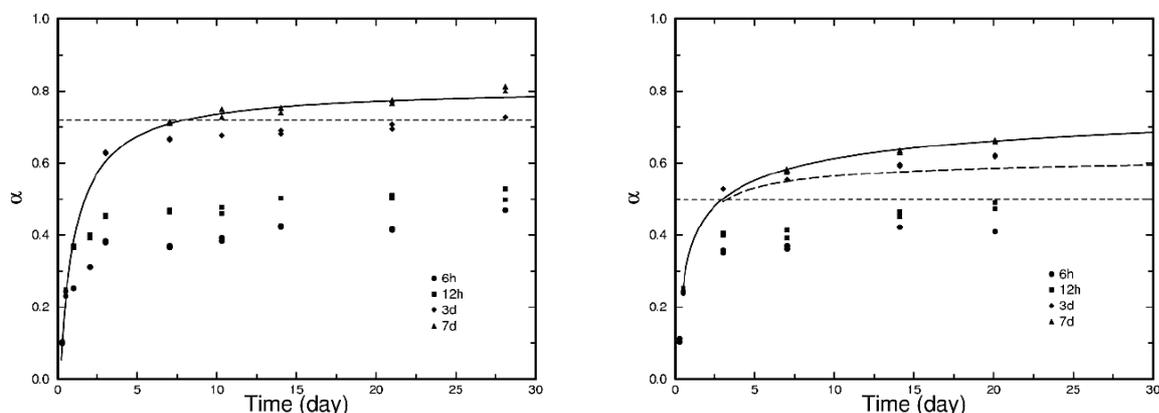


Abbildung 14: Hydratationsgrad von Zementleimpasten mit  $w/z=0,40$  (links) und  $0,30$  (rechts); Umlagerung von 100 % r.F. nach 90 % r.F. zu den angegebenen Zeitpunkten;

Hierbei stellt die durchgezogene Linie eine durchgehende Lagerung bei 100 % r.F., die gestrichelte eine durchgehende konservierte Lagerung (li. identisch mit durchgez. Linie) und die gepunktete Linie den Hydratationsgrad für eine Kapillarporosität von 20 % dar. Es zeigte sich, dass die Hydratation nur gering beeinflusst wurde, wenn die Probe erst umgelagert wurde, nachdem eine Kapillarporosität von weniger als 20 Prozent erreicht wurde und damit quasi eine Versiegelung des Porensystems stattgefunden hat. Bezüglich der Selbstaustrocknung zeigte sich bei den Proben mit  $w/z=0,30$  deutlich der Einfluss auf die Hydratationskinetik. Durch die Vergrößerung des ungefüllten Porenraums wurde die Hydratation negativ beeinflusst, da in diesen Bereichen das Wachstum der Reaktionsprodukte behindert bzw. unterbunden wurde. Der Effekt war bei Proben mit  $w/z$ -Wert  $0,40$  erwartungsgemäß von geringer Ausprägung.

In mehreren Untersuchungen zum Wasserangebot im Zementstein auf die Hydratation wurde festgestellt, dass die Festigkeitsentwicklung stark beeinflusst wird, wenn die Feuchte im Porensystem unter einen Wert von etwa 80 % fällt [Ho 1989, Molina 1992, Powers 1947a, Spears 1983, Jensen et al. 1999]. In [Grübl 2001] sind weitere Modelle und Versuchsergebnisse grafisch

zusammengefasst. Hier zeigt sich jedoch die Unterschiedlichkeit der verwendeten Modelle, s. Abbildung 15.

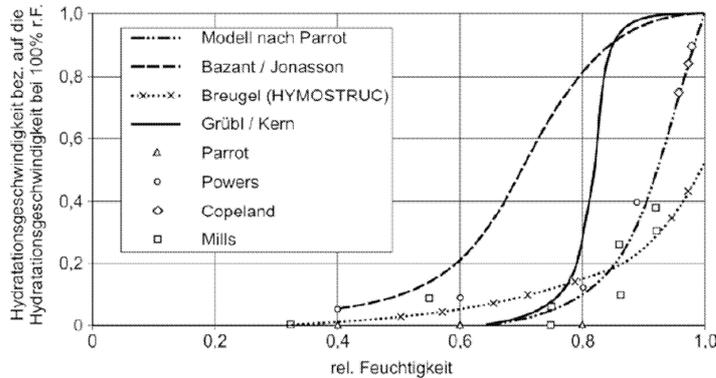


Abbildung 15: rel. Hydratationsgeschwindigkeit und relative Feuchte [Grübl 2001]

Untersuchungen zeigten, dass eine Hydratation bei geringen Luftfeuchten im Porensystem zu einer Verdichtung der Reaktionsprodukte um die unreaktierten Zementkörner herum führt, was den Reaktionsfortschritt verlangsamt bzw. unterbinden kann [Wittmann 1966]. Ob es nach diesem Vorgang zu einer weiten Reaktion kommen kann, wird auch von [Catharin 1979] bezweifelt.

Hydratationsbeschränkend kann neben dem absoluten Angebot an Wasser auch dessen Verteilung und der zur Verfügung stehende freie Raum für Hydratationsprodukte sein.

### 3.5 Fahrbahndecken aus Beton

Fahrbahndecken aus Beton werden meist mit Hilfe eines Gleitschalungsfertigers hergestellt. Der Beton, meist bestehend aus einem Portlandzement der Festigkeitsklasse 32,5 mit w/z—Werten um 0,45 in steifer Konsistenz, wird per LKW angeliefert. Im Fertiger wird er eingebracht, verdichtet und geglättet. Anschließend wird die Oberfläche mittels eines nachgeschleppten und beschwerten Jutetuches uniaxial in Fahrtrichtung texturiert. Die Nachbehandlung erfolgt üblicherweise direkt danach von einem Nachlaufwagen aus mittels flüssiger filmbildender Nachbehandlungsmittel, s. Abbildung 16. Der zeitliche Abstand zwischen dem Einbringen des Betons und dem NBM-Auftrag liegt in der Praxis bei max. 15-30 Minuten.



*Abbildung 16: Herstellen einer Betonfahrbahndecke mittels Gleitschalungsfertiger*

Zur Vermeidung einer wilden Rissbildung wird die so hergestellte Decke kurz nach der Befahrbarkeit mit Maschinen in Längs- und Querrichtung gekerbt. An diesen Stellen reißt die Fahrbahn aus Schwind- und Temperaturdehnungen über die Querschnittshöhe und bildet damit faktisch Einzelplatten aus. Zur Querkraftübertragung sind in diesen Bereichen kunststoffüberzogene Dübel und Anker bereits in den Frischbeton eingebracht. Die Fugen werden anschließend vergossen oder mit elastischen Fugenabdichtungen versehen.

## 3.6 Nachbehandlung

### 3.6.1 Allgemeines

#### Grundlagen

Als theoretische Grundlage für die Festlegungen in der europäischen Normung wurden folgende Grundsätze betrachtet:

Prinzipiell lässt sich die Wirkung bzw. die Güte einer Nachbehandlung über den Hydratationsgrad des zu beeinflussenden Bereiches eines Betons bestimmen. Zwar entwickeln sich dauerhaftigkeitsrelevante Eigenschaften wie die Dichtigkeit und der Carbonatisierungswiderstand nicht im gleichen Verhältnis zum Hydratationsgrad wie die Druckfestigkeit (s. Abbildung 17), dennoch wird diese als maßgebende Eigenschaft herangezogen, da sich diese einfach bestimmen lässt und eine große Erfahrung mit dieser Kenngröße vorliegt. Dies soll zu einer größeren Akzeptanz des Nachbehandlungskonzepts führen [Grübl 1998].

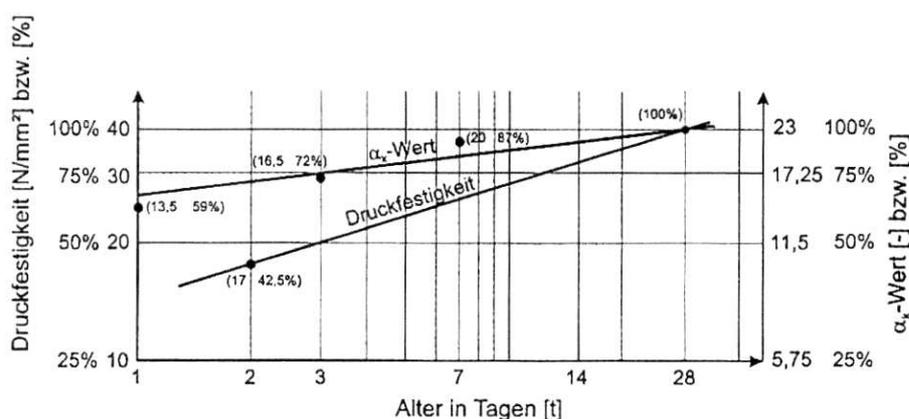


Abbildung 17: Entwicklung von Hydratationsgrad und Druckfestigkeit eines Portlandzementes [Grübl 1998]

Die Nachbehandlungsdauer hängt von einem Richtwert, dem Verhältnis der Festigkeiten nach 2 und 28 Tagen, ab. Dies soll einen ausreichenden Hydratationsgrad nach 28 Tagen sicherstellen und damit zur gewünschten Dauerhaftigkeit eines Bauteils führen. Zu berücksichtigen ist dabei die Reife des Betons, also seine temperaturabhängige Festigkeitsentwicklung.

#### Verfahren

Prinzipiell kann zwischen interner und externer Nachbehandlung unterschieden werden, je nachdem ob eine Verdunstung von außen auf der Betonoberfläche oder durch Einbringen von Wasser oder Chemikalien im Beton selbst reduziert wird.

Bei der externen Nachbehandlung kann zwischen drei Arten unterschieden werden:

- wasserzuführende Maßnahmen (z.B. Besprühen, Wasserlagerung, feuchte Abdeckungen)
- konservierende Maßnahmen (z.B. Abdecken mit Folien, Belassen in Schalung)
- verdunstungsmindernde Maßnahmen (z.B. Besprühen mit NBM)

Bei der internen Nachbehandlung, die insbesondere bei Betonen mit niedrigen w/z-Werten in Frage kommt, kann folgende Unterteilung vorgenommen werden:

- wasserzuführende Maßnahmen (vorgenässte poröse Gesteinskörnungen, Superabsorber)
- wasserrückhaltende Maßnahmen (wasserlösliche Zusatzmittel)

### Vorschriften

Aufgrund unterschiedlicher Anforderungen an Bauwerkstypen oder Bauteile aus Beton existieren unterschiedliche Regelwerke, in denen die Nachbehandlung des (Straßen-)Betons meist gesondert beschrieben wird. Im Folgenden sind die Anforderungen an die Nachbehandlung von Beton bzw. an die Nachbehandlungsmittel (NBM) nach den verschiedenen Regelwerken getrennt aufgeführt. Dies sind im Folgenden:

- DIN 1045-3 für Tragwerke aus Beton,
- ZTV Beton-StB für Fahrbahndecken aus Beton
- TL NBM-StB für flüssige Nachbehandlungsmittel im Straßenbau
- ZTV-ING für Ingenieurbauwerke im Straßenbau, sowie
- VOB Teil C für hydraulisch gebundene Deckschichten.

### 3.6.2 NBM – flüssige Nachbehandlungsmittel

In [Ye et al. 2005] ist die *Wirkungsweise von flüssigen Nachbehandlungsmitteln* (mit Paraffinen oder auch Kunstharzen) schematisch dargestellt. Mittels Emulgatoren werden Pigmente und Wachspartikel in Wasser in freier Verteilung gehalten. Nach dem Kontakt mit der Betonoberfläche, auf der ein pH-Wert von über 12 herrscht, und der Verdunstung des Mediums, „bricht“ der Emulgator und es legt sich im Idealfall ein geschlossener Film aus Pigmenten und Wachspartikeln auf die nachbehandelte Oberfläche, der die Wasserverdunstung stark reduziert.

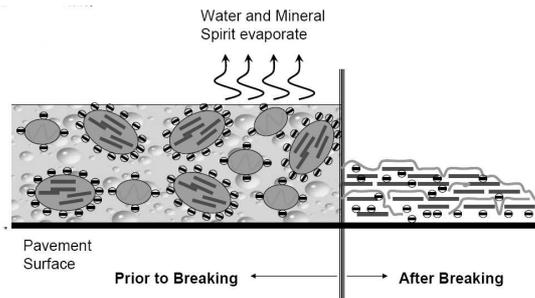


Abbildung 18: Funktionsweise eines NBM nach [Ye et al. 2005]

Nach [Hohnert 2003] ist die Nachbehandlung mittels NBM in vier Prozessphasen einzuteilen:

- Auftrag
- Erhöhung der Feststoffkonzentration durch Wasserverdunstung aus der Dispersion
- Inhomogener Paraffinfilm, Kapillarwirkung führt zu einem Herauspressen des Restwassers
- Homogener Paraffinfilm

Die Wirksamkeit eines NBM kann im Herstellungsprozess vor allem durch die Menge an Feststoffanteilen beeinflusst werden. Eine gute Verfilmung ist vor allem auf grob texturierten Oberflächen mit einem hohen Anteil an Spitzen und Vertiefungen notwendig. Eine zu hohe Auftragsmenge führt aber zugleich zu einer Verringerung der im Fahrbanddeckenbau wichtigen Griffigkeit. Aus diesem Grund existieren sowohl für die Sperrwirkung als auch für die Griffigkeit Grenzwerte, die stets eingehalten werden müssen.

Einen starken Einfluss auf die Verfilmung und damit die Wirkung eines NBM besitzt das Bluten des Betons. Oberflächlich vorhandenes Wasser führt zu einem „Verlaufen“ des NBM und einer Agglomeration von Feststoffpartikeln und damit verbunden zu einem inhomogenen Paraffinfilm mit geringerer Sperrwirkung. Diese Effekte wurden von [Frentzel 2005] nachgewiesen. Dort wird auch von einer schlechteren Wirkung der untersuchten NBM bei höheren Temperaturen berichtet.

Zur visuellen Kontrolle des Auftrags und zur Reduktion der Oberflächenerwärmung bei Sonneneinstrahlung sind in NBM meist weiße Pigmente enthalten. In den TL NBM-StB 96 ist ein Sperrkoeffizient von  $S > 75\%$  vorgeschrieben.

### 3.6.3 Vorschriften

#### DIN 1045-3

In DIN 1045-3 Abschnitt 8.7 ist die Nachbehandlung von Bauteilen aus Beton geregelt. Eine Nachbehandlung ist demnach während der ersten Tage der Hydratation notwendig, um

- das Frühschwinden gering zu halten,
- eine ausreichende Festigkeit und Dauerhaftigkeit der Betonrandzone sicherzustellen,
- das Gefrieren zu verhindern und
- schädliche Erschütterungen, Stoss oder Beschädigung zu vermeiden.

Nachbehandlungsmaßnahmen müssen nach Abschnitt 8.7.2 (1) ein übermäßiges Verdunsten von Wasser verhindern. Bei relativen Luftfeuchten über 85 %, also z.B. bei feuchtem, regnerischem oder nebligem Wetter sind zusätzliche Nachbehandlungsmaßnahmen nicht notwendig. Als geeignete Verfahren werden folgende angegeben:

- das Belassen in der Schalung
- das Abdecken mit dampfdichten Folien (mit Schutz gegen Durchzug)
- das Auflegen von wasserhaltenden Abdeckungen (unter ständigem Feuchthalten) bei gleichzeitigem Verdunstungsschutz
- das Aufrechterhalten eines sichtbaren Wasserfilms auf der Oberfläche (durch Besprühen, Fluten u.ä.)
- die Anwendung von Nachbehandlungsmitteln bei nachgewiesener Eignung und
- geeignete Verfahren, die ein übermäßiges Wasserverdunsten vermeiden

Nach dem Verdichten oder der Oberflächenbehandlung ist mit der Nachbehandlung unmittelbar zu beginnen. Die Dauer der Nachbehandlung richtet sich nach der Entwicklung der Betoneigenschaften in der Randzone. In Abhängigkeit der Expositionsklassen nach DIN 1045-2 ist die Nachbehandlung einen halben Tag (X0 und XC1) oder so lange durchzuführen, bis 70 % (XM) bzw. 50 % (restl. Klassen) der charakteristischen Festigkeit ( $f_{ck}$ ) des Betons erreicht ist. In Tabelle 4 ist eine entsprechende Zeitdauer (in Tagen) in Abhängigkeit der (Beton-)Oberflächentemperatur und dem Festigkeitsverhältnis  $r = f_{cm2} / f_{cm28}$  angegeben. Bei einer langsamen Festigkeitsentwicklung und niedrigen Temperaturen ist demnach eine besonders lange und sorgfältige Nachbehandlung notwendig.

Tabelle 4: Mindestnachbehandlungsdauer bei Expositionsclassen nach DIN 1045-2außer X0, XC1 und XM

Nr.	1	2	3	4	5
Oberflächentemperatur $\vartheta$ in °C <sup>e</sup>	Minstdauer der Nachbehandlung in Tagen <sup>a</sup>				
	Festigkeitsentwicklung des Betons <sup>c</sup>				
	$r = f_{cm2}/f_{cm28}$ <sup>d</sup>				
	$r \geq 0,50$	$r \geq 0,30$	$r \geq 0,15$	$r < 0,15$	
1	$\vartheta \geq 25$	1	2	2	3
2	$25 > \vartheta \geq 15$	1	2	4	5
3	$15 > \vartheta \geq 10$	2	4	7	10
4	$10 > \vartheta \geq 5^b$	3	6	10	15

<sup>a</sup> Bei mehr als 5 h Verarbeitbarkeitszeit ist die Nachbehandlungsdauer angemessen zu verlängern.  
<sup>b</sup> Bei Temperaturen unter 5 °C ist die Nachbehandlungsdauer um die Zeit zu verlängern, während deren die Temperatur unter 5 °C lag.  
<sup>c</sup> Die Festigkeitsentwicklung des Betons wird durch das Verhältnis der Mittelwerte der Druckfestigkeiten nach 2 Tagen und nach 28 Tagen (ermittelt nach DIN 1048-5) beschrieben, das bei der Eignungsprüfung oder auf der Grundlage eines bekannten Verhältnisses von Beton vergleichbarer Zusammensetzung (d. h. gleicher Zement, gleicher w/z-Wert) ermittelt wurde.  
<sup>d</sup> Zwischenwerte dürfen eingeschaltet werden.  
<sup>e</sup> Anstelle der Oberflächentemperatur des Betons darf die Lufttemperatur angesetzt werden.

### ZTV Beton-StB 01

In den Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton Ausgabe 2001 sind im Abschnitt 2.5.4 Schutzmaßnahmen und Hinweise zur Nachbehandlung von Betondecken angegeben.

Bei Temperaturen über 25°C ist nach dem Fugenschneiden die Oberfläche im Abstand von zwei bis drei Stunden mindestens dreimal flächendeckend zu nassen. Wird eine Nassnachbehandlung gewählt, ist diese mindestens drei Tage auf allen Flächen durchzuführen. Hierbei ist ein schnelles Abkühlen des Betons durch das Wasser zu vermeiden.

Wird ein Nachbehandlungsmittel nach TL NBM-StB 96 verwendet, ist die Auftragsmenge dabei so zu wählen, dass ein geschlossener Film mit einem Sperrkoeffizienten  $S > 75\%$  erreicht wird. Bei Temperaturen über 30 °C oder Luftfeuchten unter 50 % r.F. ist zusätzlich nass nachzubehandeln.

Im Kommentar zur ZTV Beton-StB wird bei Anwendung einer Jutetextur die im Zulassungsbescheid angegebene Auftragsmenge, bei einer Strukturierung mittels eines Stahlbesens die 1,5-fache Auftragsmenge empfohlen. Der Zeitpunkt des Mattfeuchtwerdens (Auftragszeitpunkt der NBM Typ M) ist nach den Autoren erreicht, wenn ein Teil des an der Oberfläche befindlichen Überschusswassers bereits verdunstet ist. Um nicht an diesen von den klimatischen Verhältnissen abhängigen Zeitpunkt gebunden zu sein, wird die Verwendung eines Mittels mit der Bezeichnung VH (Auftragszeitpunkt: sofort) empfohlen.

### TL NBM-StB 96

Nach den Technischen Lieferbedingungen für flüssige Beton-Nachbehandlungsmittel, Ausgabe 1996 (kurz: TL NBM-StB 96), müssen Beton-Nachbehandlungsmittel eigen- und fremdüberwacht werden. Hierbei wird vor allem die Sperrwirkung der Nachbehandlungsmittel bestimmt.

Als NBM werden Stoffe bezeichnet, die in flüssiger Form auf die Oberfläche von grünem oder jungem Beton aufgebracht werden und einen Film bilden, der die Wasserabgabe des Betons

weitgehend verhindert. Aufgrund der unterschiedlichen Anwendungsgebiete (horizontale/vertikale Flächen, etc) werden lösemittelhaltige und wässrig-disperse Systeme auf dem Markt angeboten. Hinsichtlich der Griffigkeitsanforderungen und des Auftragszeitpunktes werden NBM unterschieden und mit entsprechenden Kurzzeichen gekennzeichnet. Zusätzlich wird ein erhöhter Hellbezugswert (Kurzzeichen W) bzw. eine kurzfristige Verkehrsfreigabe (Kurzzeichen K) berücksichtigt.

Anwendungsbereich	Zeitpunkt des Aufbringens	sofort	mattefeucht	nach Entschalen
		H	M	E
Beton für Verkehrsflächen (Straßenbeton, mit Griffigkeitsanforderung)	V	VH	VM	–
Beton für nicht befahrene Bauteile (allgemeiner Betonbau, ohne Griffigkeitsanforderungen)	B *)	BH	BM	BE

\*) kann für Straßenbeton verwendet werden, wenn der Film vor der Verkehrsfreigabe entfernt wird.

Abbildung 19: Bezeichnung der Nachbehandlungsmittel [TL NBM 1996]

Um den Sperrkoeffizienten zu ermitteln, werden definierte, nachbehandelte und nicht nachbehandelte Betonprobekörper hergestellt und deren jeweiliger Wasserverlust bei Lagerung in konstantem Klima zu bestimmten Zeitpunkten ermittelt. Vorgegeben sind der w/b-Wert (0,42), die Festigkeitsklasse des Zementes (42,5 R), die Gesteinskörnung (0/8, Kiessand, vorgegebene Sieblinie), das Verhältnis Zement/Gesteinskörnung (1:3, Gewichtsteile), das Mischregime (3 Min.), die Verdichtung, die Temperatur der Ausgangsstoffe und die Probekörperabmessungen ( $l \cdot b \cdot h = 16 \cdot 21 \cdot 4 \text{ cm}^3$ ) sowie die Befüllung der Schalung. Die Lagerung der Proben erfolgt in einem Klimaraum mit  $30 \pm 2 \text{ °C}$  und  $40 \pm 3 \text{ \% r.F.}$  ohne starke Luftbewegungen. Es werden je 3 behandelte ( $W_{bn}$ , mit Nachbehandlungsmittel) und 3 unbehandelte ( $W_{un}$ , ohne Nachbehandlungsmittel) Proben, für NBM „H“ zusätzlich 3 für die Prüfung im Windkanal (Windgeschwindigkeit rd. 1 m/s), hergestellt und geprüft. Das Aufbringen der Textur (stets Besenstrich) und des NBM „H“ erfolgt sofort nach dem Befüllen der Schalung. Bei Verwendung von NBM „M“ wird die Textur bei mattheuchter Oberfläche, das NBM bei erneutem Mattheuchtwerden der Oberfläche aufgebracht. Nach jeweils 1, 3 und 7 Tagen werden die Proben gewogen und der Wasserverlust ermittelt. Hierfür muss der Trocknungsverlust des Nachbehandlungsmittels und der Randversiegelung durch Aufspritzen auf eine Glasplatte gesondert ermittelt werden. Der Sperrkoeffizient  $S_n$  bezeichnet die Differenz aus Wasserverlust der unbehandelten zur behandelten Probe bezogen auf den Wasserverlust der unbehandelten Probe zum Messzeitpunkt. Der Sperrkoeffizient  $S$  umfasst das arithmetische Mittel aus den drei einzelnen Sperrkoeffizienten  $S_1$ ,  $S_3$  und  $S_7$  zu den jeweiligen Prüftagen.

$$S_n = \frac{W_{un} - W_{bn}}{W_{un}} \cdot 100 = \frac{1 - W_{bn}}{W_{un}} \cdot 100 \quad \text{mit } n=1, 3 \text{ und } 7 \quad \text{Gleichung 22}$$

$$S = \frac{S_1 + S_3 + S_7}{3} \quad \text{Gleichung 23}$$

Die NBM „H“ und „M“ müssen einen Sperrkoeffizienten von mind. 75 % aufweisen, für NBM „E“ ist zur Zeit kein Grenzwert festgelegt. Bezüglich der Griffigkeit werden im Abschnitt 4.2.2 im Mittel 50

Skalenteile (NBM „V“) bzw. 60 Skalenteile (NBM „K“) bei Prüfung mit dem SRT-Pendel gefordert. Die Griffigkeit wird an gesondert hergestellten Proben ermittelt. Hierfür werden 3 unbehandelte Probekörper sieben Tage bei Klima 20 °C und 100 % r.F. anschließend 21 Tage bei Klima 20 °C/65 % r.F. gelagert. Bei der anschließenden Prüfung müssen SRT-Werte zwischen 70 und 80 Skalenteilen erreicht werden. Die geschützten Proben, die mit einer 1,25-fachen Auftragsmenge versehen werden müssen, lagern bis zur Prüfung 28 Tage bei 20 °C und 65 % r.F..

### **ZTV-ING**

Nach ZTV-ING, Teil 3 Massivbau, Abschnitt 2 Bauausführung sind Nachbehandlungsmittel an geschalteten Betonoberflächen nicht zulässig. Horizontale Flächen dürfen mit NBM des Typs BH oder BM nachbehandelt werden. Die Dauer der Nachbehandlung richtet sich nach den Expositionsklassen des Betons. Abweichend von der DIN 1045-3 muss Beton der Expositionsklassen XC3, XC4, XF, XD und XA solange nachbehandelt werden, bis die Festigkeit des oberflächennahen Betons 70 % der charakteristischen Festigkeit des Betons erreicht hat. Ohne genaueren Nachweis sind die Werte der DIN 1045-3 zu verdoppeln.

### **DIN 18316**

Nach DIN 18316:12-2000: VOB – Teil C - Verkehrswearbeiten – Oberbauschichten mit hydraulischen Bindemitteln Abschnitt 3.3.4.7. ist eine Betondecke mindestens drei Tage lang ständig feucht zu halten oder durch andere geeignete Maßnahmen gegen Austrocknen zu schützen.

### 3.7 Nachweisverfahren zur Nachbehandlung

Ein direkter Vergleich bzw. eine Zusammenstellung von Versuchen zur Nachbehandlung von Beton gestaltet sich schwierig, da die in der Literatur beschriebenen Ergebnisse von sehr vielen Parametern abhängen. Neben den Ausgangsstoffen und der Zusammensetzung der Proben, beeinflussen die Lagerung (vor allem Vorlagerung in Schalung, Klima) die Materialeite. Die Nachbehandlung kann durch Anwendungsfehler in ihrer Güte variieren. Zusätzlich können zum Nachweis der Beton- bzw. Nachbehandlungsgüte unterschiedlichste Verfahren zum Einsatz kommen. Auch die Probenkonditionierung spielt eine erhebliche Rolle, die leider vielfach unterschätzt wird. Vor allem fehlende Angaben über alle die Versuchsdurchführung betreffende Parameter erschweren eine objektive Beurteilung von Literaturstellen.

In [Kern 1998] und [RILEM 1995] sind vielfältige Nachweisverfahren exemplarisch beschrieben. Kern fasste die subjektive Bewertung der Ergebnisse systematisch zusammen.

Schema: Verfahren (Anzahl der Literaturstellen mit positiver / negativer Bewertung der Eignung des jeweiligen Verfahrens)

*Tabelle 5: Bewertung von Nachweisverfahren nach [Kern 1998]*

Druckfestigkeit (8+/2-)	Hydratationsgrad (4+/0-)	Carbo.tiefe (10+/0-)
Haftzugfestigkeit (2+/2-)	Wasseraufnahme (1+/0-)	Permeabilität (10+/0-)
Rückprallhammer (2+/2-)	Eindringvermögen (2+/0-)	Frost-Tausalz-W. (1+/0-)
Pendelhammer (1+/0-)	Kapillares Saugen (3+/0-)	Abwitterung (2+/0-)
Nadeleindr.vers. (0+/1-)	Sättigungsgrad (1+/0-)	Gewichtsverlust (1+/0-)
Kratzversuch (0+/1-)	Wasserabgabe (8+/0-)	Betontemperatur (1+/0-)
Verschleißf. (0+/1-)	Gewichtsverlust (1+/0-)	Chlorideindr. (1+/0-)
Elastizitätsmodul (2+/0-)	Porosität (MIP) (5+/0-)	

In allen bekannten Literaturstellen wird eine Verbesserung der untersuchten Betoneigenschaften durch eine verlängerte Nachbehandlungsdauer beschrieben. Exemplarisch seien hier [Grübl 2001] und [Rilem 1995] genannt.

[Kern 1998] stellte bei seinen umfangreichen Versuchen zur Wasserbindung in Abhängigkeit der Nachbehandlung bei Normalbetonen fest, dass bei einer Schalungsvorlagerung von einem Tag und anschließender Nachbehandlung der Hydratationsfortschritt nur bis in eine Tiefe von max. 20 mm beeinträchtigt wird. Wasserzuführende und konservierende Maßnahmen sind in ihrer Wirksamkeit äquivalent, NBM zeigten eine große Streuung bezüglich der Wirkung auf die Wasserbindungen.

## 4 Eigene Untersuchungen

### 4.1 Allgemeines

Die bisher durchgeführten Untersuchungen zur Nachbehandlung in der Literatur lassen so gut wie immer den Wasserverlust unbetrachtet und prüfen damit nur phänomenologisch die resultierenden Eigenschaften des Betons. Dies soll mit den dargestellten Untersuchungen ergänzt werden.

Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen fanden die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen an Beton- und/oder Mörtelproben statt.

Um praxisnahe Randbedingungen zu schaffen, wurden die Untersuchungen der Nachweisverfahren ausschließlich an *Betonproben*, meist mit den Abmessungen ( $A = 150 \cdot 150 \text{ mm}^2$ ,  $h = 150 \text{ mm}$ ), gelagert in handelsüblichen Kunststoffschalungen, durchgeführt. Für den genaueren Nachweis der Wasserbindungen wurden *Mörtelprismen* meist mit den Abmessungen ( $A = 30 \cdot 15 \text{ mm}^2$ ,  $h = 150 \text{ mm}$ ) verwendet, um Streuungen hervorgerufen durch grobe Gesteinskörnungen zu eliminieren und Voraussetzungen für die weiteren Untersuchungen am Gefüge bzw. den Wasserbindungen zu schaffen. Die Bestimmung der Verdunstung erfolgte an beiden Probekörpergeometrien. Eine Wasserabgabe an die Umgebung konnte dabei stets nur uniaxial über die obere freie horizontale Probekörperfläche stattfinden.

## 4.2 Untersuchungen zu Verdunstung und Nachweisverfahren

### 4.2.1 Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzung

Für die Hauptuntersuchungen wurde ein typischer *Straßenbeton* (Bez: B1) in folgender *Zusammensetzung* mit den angegebenen *Ausgangsstoffen* verwendet:

Tabelle 6: Zusammensetzung Beton B1

Art	Anteil [m <sup>-3</sup> ]	Beschreibung
Zement	350 kg	CEM I 32,5R
Wasser	156 kg	Leitungswasser
Gesteinskörnung	1917 kg	Sand 0/4, Basaltsplitt 2/8, 8/16; Sieblinie B
Zusatzmittel	1,6 kg	FM (Naphthalin-/Melaminsulphonat)
	0,26 kg	LP, auf FM abgestimmt

Der w/z-Wert betrug 0,45, das Verhältnis von Gesteinskörnung zur Gesamtmasse 78,8 M.-%.

### 4.2.2 Probenherstellung und Lagerung

Das *Mischen* erfolgte in einem 120 l-Zwangsmischer für insgesamt 180 Sekunden. Der Sand wies durch eine vorhergehende Trocknung keine Eigenfeuchte auf. Bei allen Einzelmischungen wurde eine steife Konsistenz (Konsistenzklasse C1) des *Frischbetons* mit einem LP-Gehalt von 4,5 V.-% und einer Frischbetontemperatur von 20 °C angestrebt.

Der Beton wurde nach dem Mischen in *Würfelschalungen* aus Kunststoff mit der Kantenlänge (Innenmaß) 150 mm in zwei Lagen eingefüllt und jeweils mit einem Aussenrüttler verdichtet. Bis zum Texturieren und dem anschließenden Transport in die Klimakammern waren die Proben mit nicht-anliegenden feuchten *Jutetüchern* und Folien abgedeckt und bei 20°C gelagert.

Die *Texturierung* erfolgte in Anlehnung an die [TL NBM 1996] etwa eine Stunde nach dem Abziehen der Oberfläche mittels eines Rosshaarbesens, dessen eingeprägte Oberflächenstrukturierung der eines in der Praxis verwendeten Jutetuches entspricht [Wenzl et al. 1999].

Die *Lagerung* der Probekörper erfolgte entsprechend dem Versuchsplan (s. folgendes Kapitel) in Klimakammern (s. Tabelle 7) bis zu einem Alter von 28 Tagen in Schalung. Die mittlere Windgeschwindigkeit lag hierbei bei etwa 0,1 m/s. Für erhöhte Windgeschwindigkeiten wurde ein Windkanal und ein Ventilator verwendet. Anschließend wurden die Proben ausgeschalt, getrocknet, geprüft oder an den Seiten- und der Bodenfläche in Aluminiumfolie dampfdicht verpackt und bis zur weiteren Verarbeitung in den jeweiligen Klimaten gelagert.

Tabelle 7: Verwendete Klimakammern bzw. Lagerungsbedingungen

Bezeichnung	Temp.	Rel. Feuchte	Windgeschw.	Bemerkung
20/65	20 °C	65 %	0,1 m/s	Betonversuche
30/40	30 °C	40 %	0,1 m/s	Betonversuche
30/40/W	30 °C	40 %	2,5 m/s	Betonversuche
20/85	20 °C	85 %	0,1 m/s	Beton+Mörtelversuche
23/50	23 °C	50 %	0,1 m/s	Mörtelversuche

### 4.2.3 Nachbehandlung

Für die Untersuchungen wurden folgende vier *Nachbehandlungsmittel* (NBM) verwendet, die nach den jeweiligen Herstellerangaben bezüglich Vorgehensweise, Zeitpunkt und Menge aufgetragen wurden. Verwendet wurde eine Handsprühflasche, in der ein konstanter Sprühdruk erzeugt werden konnte.

Tabelle 8: verwendete Nachbehandlungsmittel

Bez.	Art	Sperrkoeffizient nach TL NBM	Auftrag nach Texturierung	Bemerkung
N1	Acrylharzemulsion	60	bei Mattfeuchte	kein VM
N2	Paraffinemulsion	85-90	bei Mattfeuchte	-
N3	Paraffinemulsion	91	bei Mattfeuchte	-
N4	Kunstharzlösung	93	sofort	kein VM

Mit „Mattfeuchte“ wird das subjektiv festgestellte Abtrocknen der Betonoberfläche nach der Texturierung verstanden, welches nach [TL NBM-StB 96] nach etwa einer Stunde erstmals eintritt.

Zudem wurden eine Lagerung *ohne Nachbehandlung*, eine Lagerung *unter Wasser* und eine *konservierte Lagerung* (mittels feuchter Jutetücher) zur Referenzierung verwendet. Um die Güte einer Nachbehandlung mittels eines NBM mit der einer konservierenden Nachbehandlung vergleichen zu können, wurde eine Versuchsserie mit Proben hergestellt, deren Oberfläche ab Herstellung unterschiedlich lang mit *Folien* abgeklebt wurde. Zusätzlich wurde eine Serie von Proben mit einer um jeweils 50 % *verminderten und erhöhten Auftragsmenge* eines NBM sowie *untexturierte* Oberflächen untersucht, s. Abbildung 20.

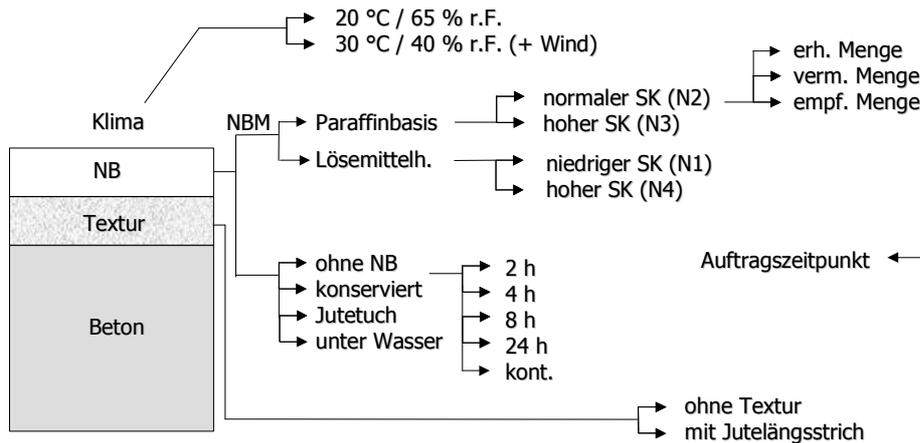


Abbildung 20: Versuchsmatrix der Hauptversuche

Zwei Bereiche wurden bei der Versuchsdurchführung intensiv betrachtet. Zum einen war dies die konservierte Lagerung für unterschiedlich lange Zeiträume als Referenz für die Nachbehandlungsgüte der mittels NBM nachbehandelten Proben. Zum anderen die Auswirkungen des Auftragszeitpunkts eines NBM, da dies auf die Wirkung eines Mittels Einfluss besitzt und damit einen wichtigen singulären Parameter für die Bewertung der Nachbehandlungsgüte darstellt.

Bewusst wurde der Beton nicht variiert und die Lagerungsarten begrenzt, um die Menge an Einflüssen auf die Evaporation und Nachbehandlung möglichst gering zu halten.

## 4.2.4 Versuchs- und Messeinrichtungen

### 4.2.4.1 Allgemeines

Zur Bestimmung der Wirkung einer Nachbehandlungsmaßnahme bzw. der Güte des oberflächennahen Betons wurden unterschiedliche Verfahren bzw. Kennwerte verwendet, die sich aufgrund von Vorversuchen als geeignet erwiesen haben:

<b>Wasserverlust / Evaporation</b>	Wägung
<b>Permeabilität gegenüber Luft</b>	Gasperm. nach Torrent, (Carbonatisierungstiefe)
<b>Permeabilität gegenüber Flüssigkeiten</b>	Wassereindringung nach Karstens
<b>Festigkeit</b>	Rückprallhammer, Druck- und Biegezugfestigkeit
<b>Oberflächendauerhaftigkeit</b>	spez. Verfahren der TU München

### 4.2.4.2 Wasserverlust / Evaporation

Die Bestimmung des Wasserverlustes einer Probe wurde mittels kontinuierlicher manueller *Wägung* ermittelt. Hierbei wurde, sofern nötig, jeweils der Masseverlust durch die Texturierung, der

Wasseranteil der NBM, die Masse der Randversiegelung und die Wasseraufnahme der Schalungen berücksichtigt.

### 4.2.4.3 Gaspermeabilität nach Torrent

Für die Bestimmung der *Luftpermeabilität* wurde das Verfahren *nach Torrent* [Torrent o.J.] verwendet, s. Abbildung 41. Hierbei wird über eine Messzelle ein starker Unterdruck (etwa 10 mbar) auf eine Betonoberfläche aufgebracht und der Druckanstieg innerhalb einer bestimmten Zeit durch die aus dem Betoninneren nachströmende Luft gemessen. Aus Gleichungen 25 und 26 berechnet sich der Gaspermeabilitätskoeffizient nach Torrent  $k_T$  und die theoretische Eindringtiefe  $L$  des Vakuums, die in der Steuereinheit automatisch angezeigt wird. Das Zwei-Kammer-Prinzip sichert einen homogenen Luftstrom zur inneren Messzelle und eliminiert Störeinflüsse, etwa durch nachströmende Luft über die angrenzende Probekörperoberfläche, über die äußere Kammer und damit die Unabhängigkeit der Messung von der Proben- bzw. Gerätegeometrie.

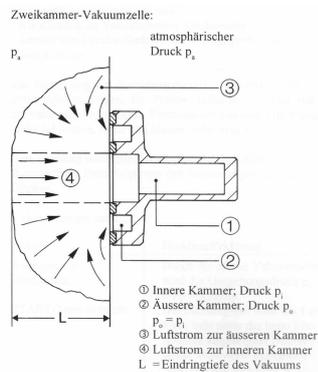


Abbildung 21: Permeabilitäts-Tester nach Torrent; schematische Darstellung (li.) und Ansicht (re.)

Die Luftpermeabilität bzw. der *Permeabilitätskoeffizient*  $k_T$  berechnet sich nach folgender Gleichung:

$$k_T = \left( \frac{V_c}{A} \right)^2 \cdot \frac{\mu}{2 \cdot \varepsilon \cdot p_a} \left[ \frac{\ln \left( \frac{p_a + p}{p_a - p} \cdot \frac{p_a - p_0}{p_a + p_0} \right)}{\sqrt{t} - \sqrt{t_0}} \right] \quad \text{Gleichung 24}$$

Entsprechend ergibt sich die *Eindringtiefe*  $L$  in [mm].

$$L = \sqrt{\frac{2 \cdot k_T \cdot p_a \cdot t}{\varepsilon \cdot \mu}} \quad \text{Gleichung 25}$$

Hierin bezeichnet  $k_T$  den Permeabilitätskoeffizienten nach Torrent [ $10^{-16} \text{ m}^2$ ],  $V_c$  das Volumen der Messkammer (plus Schlauch) [ $2,22 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ ],  $A$  die Querschnittsfläche der Messkammer [ $19,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ ],  $\mu$  die dyn. Viskosität der Luft [ $2,0 \cdot 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$ ],  $\varepsilon$  die Porosität der Betons ( $=0,15$ ; nach Torrent) [-],  $p_a$  den Luftdruck der Umgebung [ $\text{N/m}^2$ ],  $p_0$  den Druck in Messkammer zum Beginn der Messung [ $\text{N/m}^2$ ],  $p$  den Druck in der Messkammer zum Zeitpunkt  $t$  (Messende) [ $\text{N/m}^2$ ],  $t_0$  den Zeitpunkt des Messbeginns [60 s] und  $t$  den Zeitpunkt des Messendes [s].

Der absolute *Durchfluss*  $Q$  eines Gases durch einen porösen Feststoff berechnet sich nach folgender Formel:

$$Q = k \cdot \frac{A}{\eta_L} \cdot \frac{(p_e - p_a) \cdot (p_e + p_a)}{2 \cdot p} \quad \text{Gleichung 26}$$

Nach [Torrent o.J.] kann der Feuchtegehalt des Mediums durch folgendes Nomogramm berücksichtigt werden, wenn der el. Widerstand durch Messungen nach dem Wenner-Verfahren bestimmt wurde.

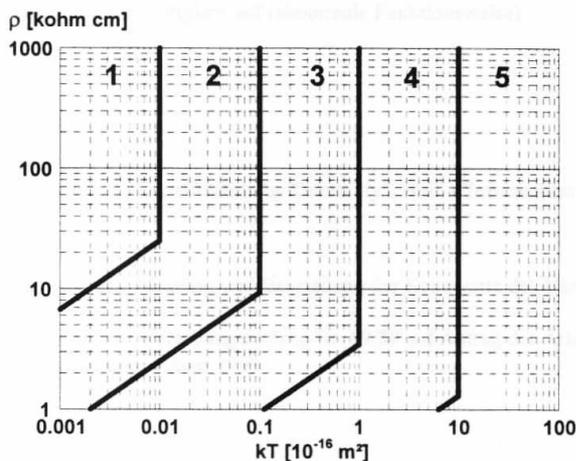


Abbildung 22: Nomogramm zur Berücksichtigung der Probenfeuchte nach Torrent

Ein Klassifizierung des untersuchten Betons erfolgt in den Stufen „sehr gut“ bis „schlecht“ bzw. „1“ bis „5“. Nach o.g. Nomogramm führen hohe Feuchtigkeitsgehalte, detektiert durch geringe Widerstände bei den Wenner-Messungen, vor allem bei feinen und dichten Porensystemen zu Korrekturen bezüglich der Einstufung des jeweiligen Betons.

In [Torrent et al. 1995] wird folgende – offensichtlich empirisch ermittelte - Korrelation zwischen dem Permeabilitätskoeffizienten nach Torrent  $k_T$  und  $k_O$ , dem Luftpermeabilitätskoeffizienten bestimmt nach der Cembureau-Methode, wie folgt angegeben:

$$k_{O(T)} = 2,5 \cdot k_T^{0,7} \quad \text{für trockene Proben} \quad \text{Gleichung 27}$$

$$k_{O(T)} = \frac{6 \cdot k_T^{0,4}}{\rho^{0,7}} \quad \text{für feuchte Proben} \quad \text{Gleichung 28}$$

#### 4.2.4.4 Carbonatisierung

Der Nachweis der Carbonatisierung erfolgte mittels einer wässrigen Phenolphthaleinlösung an frisch erzeugten Bruchflächen.

#### 4.2.4.5 Wassereindringung nach Karstens

Statt des Verfahrens der freien Wassersättigung nach DIN EN ISO 15148 mittels teilweisem Eintauchen wurde ein vergleichbares, für den mobilen Einsatz konzipiertes, aber praktikableres Verfahren nach Karstens verwendet.

Hierbei wird eine Glasglocke definierter Geometrie mit einem angeschlossenen Glaskolben auf die Betonoberfläche geklebt und mit Wasser gefüllt. Abgelesen wird die Wasserstandsabsenkung bzw. die eingedrungene Wassermenge an der Skalierung des Röhrchens in bestimmten Zeitabständen. Das Wasser wird stets nachgefüllt, um einen konstanten aber geringen Wasserdruck aufrechtzuerhalten. Als Ergebnis erhält man die in den Beton eingedrungene Wassermenge  $W$  pro Fläche und Zeit.

$$W = \frac{m_E - m_A}{A \cdot \sqrt{t_E - t_A}} \quad \text{Gleichung 29}$$

Hierin bezeichnet  $W$  die eingedrungene Wassermenge [ $\text{ml}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{-1/2})$ ],  $m_E$  die eingedrungene Wassermenge [ $\text{ml}$ ] und  $t_E$  [ $\text{s}$ ] die Zeit bei Versuchsende, entsprechend  $m_A$  [ $\text{ml}$ ] und  $t_A$  [ $\text{s}$ ] die Wassermenge und Zeit bei Versuchsbeginn, sowie  $A$  die Prüffläche [ $\text{cm}^2$ ].

Erst nach einer Stabilisierungsphase ist die Eindringung proportional zur Zeit, ab diesem Zeitpunkt beginnt die eigentliche Messung. Das Ergebnis ist ein Maß für die Kapillarporosität des Mediums.

Anstelle des mitgelieferten Plastellins wurde Fixogum für die Fixierung des Kolbens am Probekörper verwendet, da in Vorversuchen hiermit eine wesentlich geringere Streuung der Ergebnisse erhalten wurde, da hierdurch v.a. eine definiertere Prüffläche erstellt werden konnte.



Abbildung 23: Wassereindringprüfer nach Karstens

#### 4.2.4.6 Rückprallhammer, Druck- und Biegezugfestigkeit

Für die Ermittlung der Festigkeit bzw. der Elastizität des Betons im oberflächennahen Bereich wurde ein Rückprallhammer nach Schmidt verwendet. Für die Versuche wurde die oberste Zementsteinschicht abgeschliffen, die Probe in eine Prüfpresse gespannt und die Oberfläche an 13 gleichmäßig verteilten Stellen geprüft. Die geforderten Mindestabstände untereinander und zu den

Probekörperändern wurden stets eingehalten. Nach dem Streichen des höchsten und niedrigsten Messwerts wurde aus den Verbleibenden das arithmetische Mittel gebildet.

Zur Ermittlung der *Druckfestigkeit* wurden die Probekörper senkrecht zur Einfüll- und Trocknungsrichtung nach DIN EN 12390 geprüft.

Die *Biegezugfestigkeit* wurde an Proben mit den Abmessungen 70·15·15 cm<sup>3</sup> ermittelt. Bei der Prüfung wurden die Balken mit der Einfüll- und Trocknungsseite nach unten „topside down“ in die Prüfmaschine eingebracht. Die Prüfung erfolgte nach DIN EN 12390.

## 4.3 Untersuchungen zur Texturbeständigkeit

### 4.3.1 Allgemeines

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Probekörper auf den Einfluss des Nachbehandlungsmittels auf die Beständigkeit der Textur der Fahrbahnoberfläche und damit verknüpfte Eigenschaften unter praxisnahen zeittraffenden Beanspruchungen untersucht.

Als *Textur* ist die Abweichung von einer ideal-planen Oberfläche definiert, dies ist deren **primäre Eigenschaft**. Sämtliche **sekundären Eigenschaften** einer Fahrbahnoberfläche wie Griffigkeit, Reifen-/Fahrbahngeräusch, Wasserabfluss, Lichtreflexion, Rollwiderstand und Sprühfahnenbildung hängen maßgeblich von der geometrischen Ausbildung der Textur ab [MOB 2000].

### 4.3.2 Herstellung der Proben

Üblicherweise wird auf das Nachschleppen eines Jutetuches für eine anisotrope Längsstrukturierung der Oberfläche zurückgegriffen. Im Labor kann die Texturierung „Jutetuchlängsstrich“ einfach und gut reproduzierbar wie bei den hier durchgeführten Untersuchungen durch einen Rosshaarbesen nachgestellt werden. Verwendet wurden separat hergestellte Proben aus dem Beton B1, die mit den beschriebenen Verfahren nachbehandelt und gelagert wurden.

### 4.3.3 Laborbeanspruchung

Im Laufe der Zeit werden die Texturen von Betonfahrbahndecken durch Einwirkungen aus Verkehr und Umweltbeanspruchungen verändert. Um dem Rechnung zu tragen und die zeitliche Entwicklung der Griffigkeit zu erfassen, wurde ein Laborprüfverfahren entwickelt, welches ermöglicht, diese Einflüsse zeittraffend und realitätsnah nachzustellen [Wenzl 2008]. Hierzu wurde die Textur der Probekörper nach der Herstellung und ausreichender Erhärtung, i.d.R. ab einem Alter von 28 Tagen, beansprucht. Bei dem verwendeten Laborprüfverfahren werden die Probekörper folgendem Beanspruchungs-/Messzyklus ausgesetzt:

- **Nullmessung (NM)**
- **Chem. Beanspruchung:** Lagerung in saurer Lösung, 1 Stunde (pH=4,5)
- **Mech. Beanspruchung:** Prallabrieb, 3 Zyklen á 5 Minuten (PA5, PA10, PA15)
- **Phys. Beanspruchung:** Frost (nach CDF-Verfahren), 6 Frost-Tau-Wechsel (FTW)
- **Mech. Beanspruchung:** Prallabrieb, 5 Minuten (PA 20 = EM Endmessung)

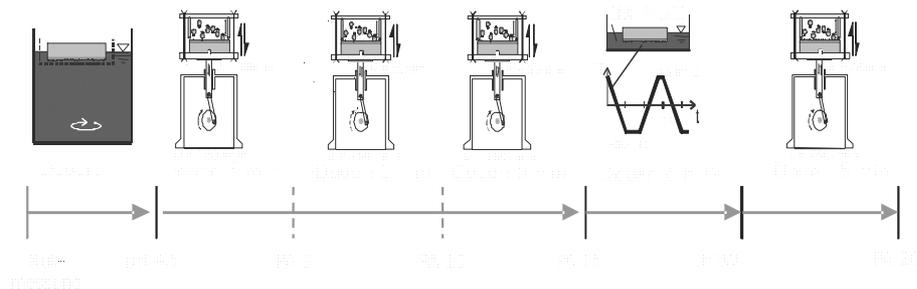


Abbildung 24: Beanspruchungszyklus bei den Texturuntersuchungen [Wenzl et al. 1999]

Die Lagerung bei 20 °C in saurer Acetat-Essigsäure-Pufferlösung mit einem pH-Wert von 4,5 simuliert die Beanspruchung aus saurem Regen. Die Nachstellung der mechanischen Beanspruchung der Oberfläche aus Verkehr geschieht durch ein Prallabtriebsgerät nach [Springenschmid et al. 1980]. Hierbei wird ein zylindrisches Gefäß (Prallkammer) auf den jeweiligen Probekörper gespannt. Durch vertikale Bewegungen von Prallkammer und Probekörper prallen Hartgummikugeln in der Prallkammer auf die texturierte Oberfläche. Nach dieser Beanspruchung wird durch Wägung jeweils der Messverlust bestimmt. Durch einen modifizierten CDF-Test (Capillary suction of De-icing solution and Freeze thaw rest, nach [Setzer 1997]) wird die Beanspruchung durch Frost und Taumittel simuliert. Durch Bestimmung der Abwitterung kann auf die Frost-Taumittel-Beständigkeit geschlossen werden. Um die Prüfkörper lediglich zu beanspruchen und nicht zu zerstören, wird auf die in diesem Verfahren beschriebene Vorsättigung verzichtet und nur sechs Frost Tau-Wechsel durchgeführt. Anschließend wird die Oberfläche erneut einer 5-minütigen Prallbeanspruchung ausgesetzt.

Vor und nach dieser Beanspruchung wurden die mittlere Rautiefe, die Griffigkeit und geometrische Texturkennwerte der Probekörper mit im Folgenden beschriebenen Verfahren ermittelt.

### Sandflächenverfahren

Beim Sandflächenverfahren wird die mittlere Rautiefe einer Betonoberfläche, also eine primäre Kenngröße, bestimmt. Dies entspricht der groben bzw. Makrotextur ( $\lambda < 10$  mm). Hierzu wird ein definiertes Volumen an Sand ( $d < 0,25$  mm) manuell mittels einer Holz- oder Hartgummischeibe auf einer trockenen und sauberen Stelle der Oberfläche solange kreisrund verteilt, bis das Volumen zwischen den Texturspitzen mit Sand gefüllt ist, der Sandkreis sich also nicht mehr vergrößern lässt. Anschließend wird der mittlere Durchmesser der Sandfläche bestimmt. Der Quotient des verwendeten Sandvolumens und des mittleren Durchmessers ergibt die mittlere Makrotexturtiefe  $R_m$ . Dieser Kennwert erfasst aber weder die Griffigkeit als sekundäre Eigenschaft noch die Verteilung der Spitzen und Vertiefungen, also der spezifischen Texturgeometrie.

Eine Verringerung der mittleren Rautiefe bedeutet eine Einebnung der Textur, eine Erhöhung die Vergrößerung der Textur, hervorgerufen vor allem durch den Verlust des Oberflächenmörtels durch die Beanspruchungen. Der Messbereich des Sandflächenverfahrens ist durch die kleinste Korngröße

des vorgeschriebenen Normensandes nach unten begrenzt. Somit ist eine Rautiefe kleiner als 0,25 mm physikalisch nicht bestimmbar.

### SRT-Pendel

Bei der Prüfung der Griffigkeit, also einer sekundären Eigenschaft, mit dem SRT-Pendel rutscht ein an einem Pendel befestigter Gleitschuh mit seiner Unterseite, an der ein Gummi befestigt ist, über die direkt vorher benässte Betonoberfläche. Die Lageenergie im ausgelenkten Zustand des Pendels wird nach dem Loslassen in kinetische Energie umgewandelt und diese dann durch die Reibung auf der Oberfläche vernichtet. Ein Schleppzeiger zeigt die Auslenkung nach Beendigung der Bewegung an. Die Skala des Pendels reicht von 0 bis 100 Skalenteile. Je höher dieser Wert ist, als desto griffiger kann die Oberfläche angesehen werden. Mittels des SRT-Pendels wird die Griffigkeit der Betonoberfläche an einzelnen Stellen gemessen.

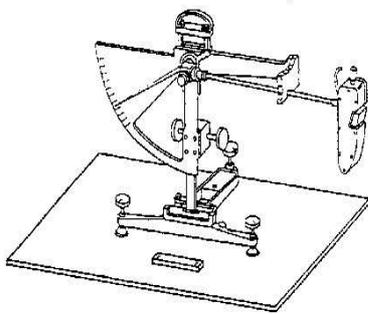


Abbildung 25: Skizze eines SRT-Pendels

### Laseroptisches Messverfahren und geometrische Kennwerte

Zur Ermittlung von primären geometrischen Kennwerten im Bereich der Mikro- und Makrotextur kann ein 3D-Oberflächenscanner verwendet werden. Hierbei wird die Oberflächengeometrie mittels eines Doppeltriangulationssensors in drei Dimensionen mit einer Genauigkeit von  $0,3 \mu\text{m}$  (z- bzw. Höhenachse) bzw. von  $30 \mu\text{m}$  (x- und y-Achse bzw. lateral) erfasst. Gemessen wird bei den Untersuchungen jeweils ein Feld mit  $61,4 \cdot 15,4 \text{ mm}^2$ , welches sich aus 512 Linien mit jeweils 2048 Messpunkten ergibt.

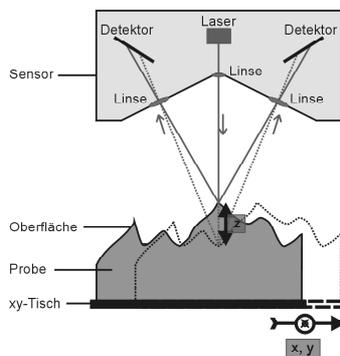


Abbildung 26: Schematischer Aufbau eines Oberflächenscanners [Wenzl et al. 1999]

Da mittels Oberflächenscanner im Gegensatz zum SRT Pendel keine sekundären Eigenschaften, sondern nur die Geometrie bestimmt wird, werden Kennwerte zur Beurteilung der Eigenschaften aus dem Wellenlängen-Amplituden-Spektrum abgeleitet. Im Rahmen von aktuellen Forschungsvorhaben wird geklärt, wie von diesen primären Kennwerte auf sekundäre Eigenschaften geschlossen werden kann.

Um die Texturgeometrie in Bezug auf die sekundären Eigenschaften bewerten zu können, wird das Höhenprofil zunächst frequenzanalytisch zerlegt und in verschiedene Bereiche eingeteilt. Die Zerlegung erfolgt mittels Fast-Fourier-Transformation (kurz: FFT), welche eine unbekannte Funktion (hier: das Höhenprofil) in einzelne (Sinus-)Wellen unterschiedlicher Wellenlänge und Amplitudenhöhen aufteilt. Die Vorgehensweise entspricht dem in [Wenzl et al. 1999] angewendeten Verfahren.

Diese Einzel-Wellen lassen sich aufgrund ihrer Effekte anschließend in folgende Wellenlängenbereiche zusammenfassen: Die Mikrotextrur (0 bis 0,5 mm) beeinflusst die Griffigkeit über die Haftreibung und ist somit unbedingt für den Kontakt Reifen/Strasse notwendig. Für die Drainage von Luft und Wasser hingegen ist der Wellenlängenbereich zwischen 0,5 und 10 mm (Makrotextrur) verantwortlich, größere Wellenlängen regen mechanische Schwingungen an und besitzen negative Auswirkungen auf die Fahrdynamik und die Lärmemission (Megatextrur). In nebenstehender Abbildung werden die Schritte für das Auswerteverfahren gezeigt, bei der die Wellenlängen-Amplituden-Spektren (die Summe aller Wellenlängen mit den dazugehörigen Amplituden) getrennt voneinander für die Mikro- ( $\lambda < 0,5$  mm) und für die Makrotextrur ( $\lambda < 10$  mm) ausgewertet werden.

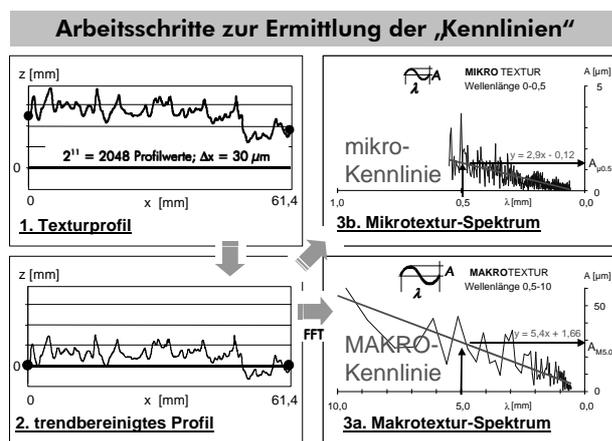


Abbildung 27: Arbeitsschritte zur Ermittlung der „Makro“- und „Mikro“-Kennlinien für die Textur [Wenzl et al. 1999]

Zunächst wird das Profil „trendbereinigt“, wobei tatsächlich die Profillinie nur verschoben und gekippt wird, so dass Anfangs- und Endpunkt die gleiche Höhe ( $l = 0$ ) besitzen. Anschließend wird mittels der Fast-Fourier-Transformation (FFT) das Wellenlängen-Amplituden-Spektrum ermittelt, welches i.d.R. bei größeren Wellenlängen eine höhere Amplitude aufweist. Die Spektren für die Mikro- und Makrotextrur (nach dem Abtrennen der übrigen Anteile) sind im linearen Maßstab rechts

in Abbildung 27 gezeigt. Die Ausgleichsgerade für das jeweilige Spektrum kann eindeutig zum einen über die Steigung „ $w_x$ “ der Geraden und zum anderen über eine Kennamplitude „ $A_x$ “ beschrieben werden. Für die Mikrotextur wird die zu der Bezugswellenlänge  $l = 0,5$  mm gehörige Kennamplitude  $A_{\mu 0.5}$  bestimmt, für die Makrotextur entsprechend die zu der Bezugswellenlänge  $l = 5$  mm gehörige Kennamplitude  $A_{M5.0}$ . Die Veränderung der Kennamplitudenwerte wird stellvertretend für die Veränderung der Textur und somit als Maß für die Texturbeständigkeit verwendet.

Mit Hilfe dieser Vorgehensweise ist es möglich, Texturen anhand von geometrischen Kenngrößen zu bewerten. Detaillierte Ausführungen zum beschriebenen Prüfverfahren und der Auswertemethodik finden sich in [Wenzl 2008].

## 4.4 Wasserverteilung im Querschnitt infolge Verdunstung - Mörtelversuche

### 4.4.1 Allgemeines

Ziel der Untersuchungen war die zeit- und tiefenabhängige Bestimmung der verdunsteten Wassermenge, des freien Wassers sowie der phys. und chem. geb. Anteile. ( $W_{EV}$ ,  $W_{FR+PH}$  und  $W_{CH}$ ). Hierfür wurden die einzelnen Wasseranteile

- *direkt* durch Verdampfen der Wasseranteile
- *indirekt* durch Messung der Impedanz mittels MRE (Multi-Ring-Elektrode)

bestimmt.

### 4.4.2 Ausgangsstoffe und Zusammensetzung

Für die Untersuchungen wurde folgende Mörtelmischung analog eines Normmörtel nach DIN EN 196 mit etwas erhöhtem Zementgehalt (aufgrund der besseren Verarbeitbarkeit) verwendet. Der w/z-Wert betrug in Korrelation zu den Betonversuchen 0,45, das Verhältnis von Gesteinskörnung zur Gesamtmasse 65 M.-%.

Tabelle 9: Rezeptur Mörtel M1

Art	Anteil [m <sup>-3</sup> ]	Beschreibung
Zement	550 kg	CEM I 32,5R
Wasser	248 kg	Leitungswasser
Gesteinskörnung	1486 kg	Normsand 0/2

### 4.4.3 Herstellung und Lagerung

Die Herstellung des Mörtels M1 erfolgte nach DIN 196 wie für Normmörtel. Der Frischmörtel wurde unter Verwendung eines Aussenrüttlers in mehreren Lagen unter Zuhilfenahme eines Aufsatzrahmens in die Kunststoffschalungen eingebracht. Die Lagerung der Proben erfolgte im Konstantklima 23/50.

### 4.4.4 Direkter Wassernachweis - Trocknung

Für die direkte Bestimmung der genannten Wasseranteile wurden Serien von Mörtelproben ab dem Zeitpunkt der Herstellung bzw. der Nachbehandlung unter unterschiedlichen, jeweils konstanten

Umgebungsbedingungen (Luftfeuchte, Temperatur, Windgeschwindigkeit) im Labor in Kunststoffschalungen stehend gelagert. Eine Austrocknung erfolgte jeweils unaxial über die Oberseite der Proben. Während der Lagerung wurde jeweils der integrale Wasserverlust durch manuelle Wägung bestimmt.

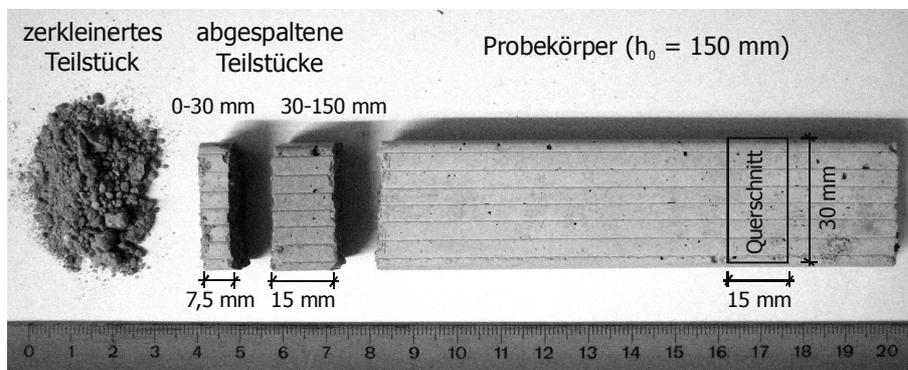


Abbildung 28: Mörtelprobekörper (nach Ende der Lagerung, ausgeschalt); links Seite = Oberseite

Zu bestimmten Zeitpunkten wurde jeweils ein Probekörper entschalt und gespalten. Die ersten vier Teilstücke von der Oberseite aus besaßen eine Höhe von 0,75 cm, die weiteren acht jeweils 1,5 cm. Diese Teilstücke wurden anschließend, um eine Nachhydratation zu vermeiden, sofort jeweils mechanisch zerkleinert und verwogen. Anschließend wurden sie bei 105 °C bis zur Massekonstanz getrocknet. Nach der Bestimmung des Gewichts wurden die Proben bei 1000°C geglüht und nach dem Abkühlen nochmals gewogen.

Aus den ermittelten Anteilen konnte zu einem bestimmten Zeitpunkt der Verlauf des phys. geb. und freien Wassers  $W_{PH+FR}$  und des chem. geb. Wassers  $W_{CH}$  über die Probenhöhe ermittelt werden. Für eine normierte Darstellung werden die Anteile auf den entsprechenden Zementgehalt (unter Berücksichtigung des Glühverlustes) bezogen.

### 4.4.5 Indirekter Nachweis - MRE

Bei einer Multi-Ring-Elektrode handelt es sich um eine etwa 20 mm dicke Sonde, bestehend aus je 2,5 mm starken isolierenden Kunststoff- und leitenden Metallringen in alternierender Anordnung, die meist in den Frischbeton eingebracht wird und von der Oberfläche bis in eine Tiefe von etwa 5 cm reicht, s. Abbildung 29. Die Metallringe sind im Inneren über Kabel, die nach außen geführt werden, verbunden und können somit über ein Messgerät mit Strom beschickt werden. Somit lässt sich der el. Widerstand bzw. die Impedanz des umgebenden Mediums zwischen jeweils zwei Metallringen bestimmen. Um Polarisierungseffekte zu vermeiden, verwendet man bei Beton Wechselstrom.

Als Ergebnis erhält man ein Impedanzprofil zu unterschiedlichen Zeitpunkten über die Tiefe im oberflächennahen Bereich. Da zwar maßgeblich die Feuchte des Mediums aber auch noch andere Faktoren wie zum Beispiel die Porenverteilung, die Ionenkonzentration, der pH-Wert, u.a. den el.

Widerstand beeinflussen, können Betone unterschiedlicher Ausgangsstoffe und Zusammensetzungen nur qualitativ miteinander verglichen werden. Eine direkte Berechnung der Feuchte im Porensystem ist nur bei Kenntnis der entsprechenden Kalibrierkurven für den jeweiligen Beton möglich.

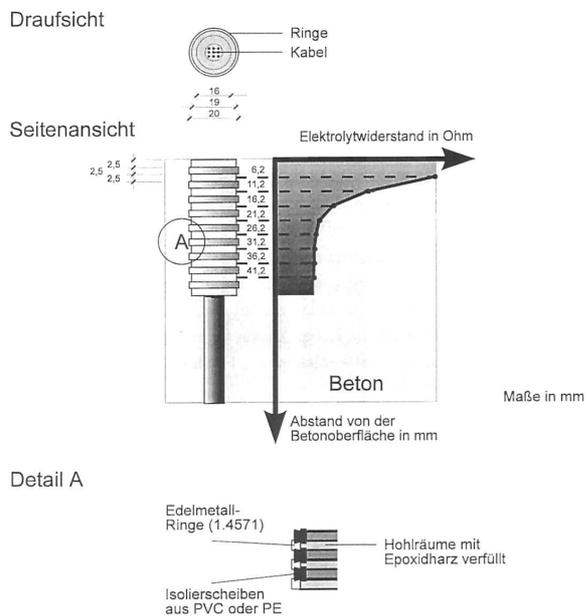


Abbildung 29: schematische Darstellung und Messprinzip einer MRE [Schießl et al. 1997]

## 5 Versuchsergebnisse

### 5.1 Übersicht

Im Folgenden werden die Ergebnisse der durchgeführten Versuche aufgeführt.

Kapitel 5.2 enthält die Ergebnisse der Mörteluntersuchungen zum direkten und indirekten *Nachweis der Wasserbindungen* und damit der Wasseranteile in Abhängigkeit der Zeit und der Tiefe bzw. des Abstand von der austrocknenden Oberfläche.

Im zweiten Abschnitt (Kapitel 5.3) werden kurz die *Frisch- und Festbetoneigenschaften* des Betons für die Betonuntersuchungen dargestellt.

Anschließend wird in den Kapiteln 5.4 und 5.5 die *Verdunstung* von Wasser aus Normalbetonen und –mörteln in jungem Alter mit und ohne Nachbehandlungsmaßnahmen mit dem Ziel der Ermittlung eines charakteristischen Kennwerts betrachtet. Einflüsse, welche die Güte der Nachbehandlung mittels NBM betreffen, werden gesondert untersucht. Zudem erfolgt eine kritische Betrachtung der geltenden Vorschriften. Im Zentrum steht die Untersuchung des im Versuchsplan festgelegten Programms.

Im folgenden Abschnitt (Kapitel 5.6) erfolgt ein Nachweis der *Festbetoneigenschaften* mittels ausgewählter Verfahren mit dem Ziel, eine Korrelation zwischen Kennwert der Verdunstung und Betoneigenschaften zu bestimmen. Hierbei ist die Frage zu klären, ob und wie die Wirkung eines Nachbehandlungsverfahrens über dessen Verdunstungsminderung beschrieben werden kann, oder das Verfahren selbst Einfluss auf die Güte des Betons besitzt. Sämtliche Einflüsse auf Probenkonditionierung und Versuchsdurchführung werden betrachtet und bewertet.

Im letzten Teil dieses Abschnitts (Kapitel 5.7) werden straßen- bzw. *verkehrsspezifische Festbetonkennwerte* untersucht. Hierzu zählt die Veränderung / Dauerhaftigkeit der Oberflächengeometrie (Textur) durch praxisrelevante Beanspruchung und die Auswirkungen auf die Griffigkeit und damit die Verkehrssicherheit.

## 5.2 Nachweise der Wasserbindungen

### 5.2.1 Allgemeines

Ziel dieser Untersuchungen war der direkte und indirekte Nachweis der Wasserbindungen in Abhängigkeit der Zeit und des Abstands von der Oberfläche im Probeninnern. Im Konstantklima 23 °C und 50 % r.F. (23/50) wurden Mörtelproben (M1) mit und ohne Nachbehandlung gelagert und untersucht. Die Windgeschwindigkeit betrug etwa 0,1 m/s. Für den zeit- und tiefenabhängigen Nachweis des Hydratationsgrades bei nicht-nachbehandelten Proben wurde jeweils eine Mörtelprobe zu einem bestimmten Zeitpunkt (6h, 12h, 18h, 24h, 3d, 7d, 28d) nach dem Entschalen in Stücke gespalten und bei 105°C getrocknet und anschließend bei 100°C gedarrt.

### 5.2.2 Direkter Nachweis – ohne Nachbehandlung

Abbildung 30 zeigt die Verteilung des chem. geb. Wassers über die Probentiefe und die Zeit. Bis zu einem Alter von etwa 18h nach Herstellung zeigte sich trotz der Verdunstung auf der Probenoberseite eine kontinuierliche und ungestörte Hydratation über die gesamte Probenhöhe. Zu diesem Zeitpunkt betrug der Hydratationsgrad  $\alpha = W_{CH} / W_{CH,max} = 0,36$ . Bereits nach 24 Stunden konnte eine verdunstungsbedingte Beeinflussung der Hydratation in einer (mittleren) Tiefe von 0,375 cm (Probenstück 0,00 bis 0,75 cm von Oberfläche) über dieses Verfahren festgestellt werden. Nach diesem Zeitpunkt war in diesem Bereich praktisch keine Hydratation mehr feststellbar. Zudem waren durch die fortlaufende Trocknung der Zementsteinmatrix immer tiefere Bereiche betroffen. Ab einer Tiefe von etwa 4 cm war trotz des fehlenden Verdunstungsschutzes keine signifikante Auswirkung auf den Hydratationsverlauf gegenüber einer Probe mit konservierter Lagerung vorhanden. Nach 28 Tagen wurde bei konservierender Lagerung und bei nicht-behandelten Proben ein Hydratationsgrad von 70 % erreicht.

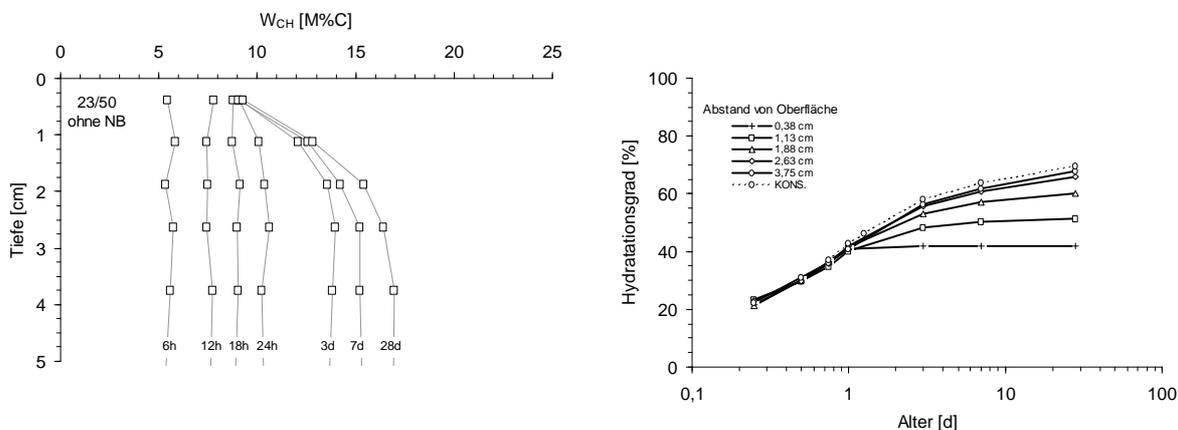


Abbildung 30: chem. Wasserbindung in Abh. von Zeit und Tiefe, Mörtel M1, Lagerung 23/50, ohne NB

Nach eintägiger Schalungslagerung (Konservierung) ermittelte [Kern 1998] an ähnlich gelagerten Proben eine Beeinflussung der Hydratation durch Austrocknung bis in eine Tiefe von etwa 20 mm.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei diesem typischen Mörtel die Austrocknung erst ab etwa 18 bis 24 h nach Herstellung Auswirkungen auf die Hydratation besitzt. Zuvor findet zwar auch eine Evaporation statt, beeinflusst die Wasserbindung aber nicht. Erst ab etwa 24 Stunden nach Wasserzugabe, fällt die relative Feuchte im bis dahin ausgebildeten Porensystem unter 80 % und damit kommt der Reaktionsfortschritt zum Erliegen. Dieser Effekt breitet sich mit zunehmender Trocknungs- und Hydratationsdauer in tiefere Bereiche aus.

### 5.2.3 Direkter Nachweis – mit Nachbehandlung

Anschließend wurde der Einfluss folgender Nachbehandlungsverfahren untersucht: Nachbehandlungsmittel (NBM), Konservierung für einen Tag (KO1) sowie kont. Konservierung (KO) mittels Folie. Tabelle 10 zeigt die ermittelten Wasserverluste nach 24 Stunden ab Herstellung.

*Tabelle 10: Wasserverlust der Mörtelproben M1 innerhalb von 24 h (E24), Klima 23/50*

Probe	E24 [kg/m <sup>2</sup> ]
oNB	4,40
NBM	1,87
KO1	1,30*
KO	0,00

*\* 24h nach Entf. der Folie*

Nach 28 Tagen zeigte sich, dass der chem. Wasserbindungsgrad im Probeninnern abhängig von der Nachbehandlung geringfügig variierte. Ohne Nachbehandlung der Oberfläche lag der Hydratationsgrad bei 68 %, mit NBM bei 69 % und bei Konservierung (kont. oder für 24h) bei 70 %. Eine Extrapolation der Messwerte bis zur Probenoberfläche ergab dort sehr geringe Hydratationsgrade von bis zu 20 %. Eine Verringerung des Wasserverlustes durch eine Nachbehandlungsmaßnahme verringerte den Gradienten der ungestörten Hydratation. Je höher der Wasserverlust in jungem Alter, desto geringere Hydratationsgrade werden erreicht und desto tiefer reicht die Hydratationsbeeinflussung, s. Abbildung 31.

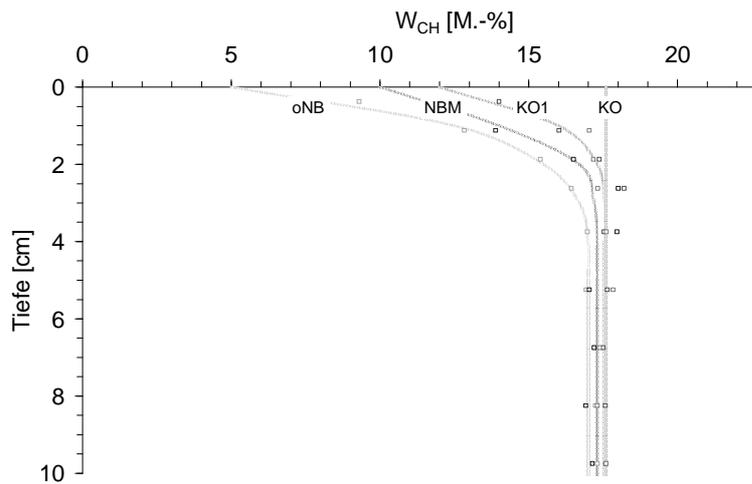


Abbildung 31: Hydratationsgrad nach 28d in Abhängigkeit der Tiefe und der Nachbehandlung, Mörtel M1, Lagerung 23/50

Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass ein Wasserverlust durch Evaporation die inneren Bereiche einer Probe kaum erreicht und die Wasserbindung in Hydratationsprodukte dort kaum beeinflusst. Die Probe KO1 (24 h konserviert) bestätigt die Ergebnisse von [Kern 2008]. Hier zeigt sich bereits aber auch, dass eine Nachbehandlung nach einer eintägigen Schalungslagerung nur noch geringe Auswirkungen besitzt.

Bei der Untersuchung des physikalisch gebundenen und freien Wasseranteils  $W_{PH}$  durch Trocknung bei 105 °C und des evaporierten Wasseranteils  $W_{EV}$  berechnet aus  $W_{ZU} - (W_{PH} + W_{CH})$  und verifiziert mit dem Ergebnis der Wägung ergab sich folgendes Bild:

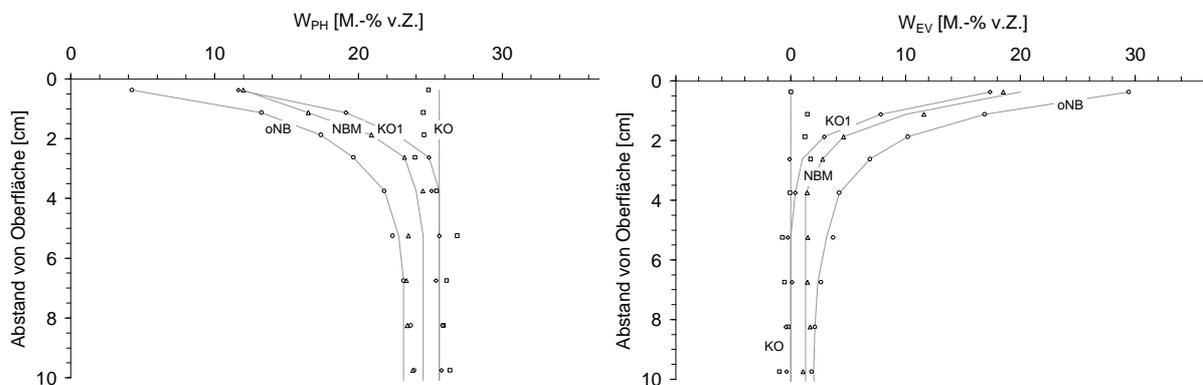


Abbildung 32:  $W_{EV}$  (li.) und  $W_{FR+PH}$  (re.) in Abhängigkeit der Tiefe und der Nachbehandlung nach 28d

Korrelierend mit den Anteilen des chem. geb. Wassers zeigte sich die Beeinflussung des phys. geb. Wassers. Der tiefenabhängigen Anteile des evaporierten Wassers wurde aus der Differenz der Anteile  $W_{PH}$  und  $W_{PH}$  zum Zugabewasser  $W_{ZU}$  ermittelt und entsprechen in der Summe dem absoluten Wasserverlust durch Verdunstung,

Hier zeigte sich, dass eine hohe frühe Verdunstung zu einem konstanten Wasserverlust über die Querschnittshöhe führt. Dieser Effekt ist auch noch bei der mittels NBM nachbehandelten Probe nachweisbar. Eine Konservierung führt hier allerdings nur zu einem Gradienten im

oberflächennahen Bereich, durch die ungestörte Hydratation bis zu einem Tag scheint ein Wassertransport aus dem Probeninneren sehr stark verlangsamt.

Schätzt man hieraus die Absenkung des w/z-Wertes im Probeinneren einer nicht-nachbehandelten Probe durch die Austrocknung im Vergleich zu einer konserviert gelagerten Probe ab, ergibt sich hier eine Verringerung um etwa 0,03 bis 0,04. Hierbei spielt die Probenhöhe aber eine maßgebliche Rolle.

### 5.2.4 Indirekter Nachweis - Multi-Ring-Elektrode (MRE)

Aus derselben Charge Mörtel wie bei den beschriebenen Versuchen wurden Proben in Zylindern mit einem Durchmesser von etwa 7 cm hergestellt und analog nachbehandelt. Auf der Oberseite wurde beim Verdichten jeweils eine Multi-Ring-Elektrode eingesetzt und lagestabil ausgerichtet. Nach 7 Tagen wurden die Widerstände bzw. Impedanzen der jeweiligen MRE über die Tiefe bestimmt, s. Abbildung 33.

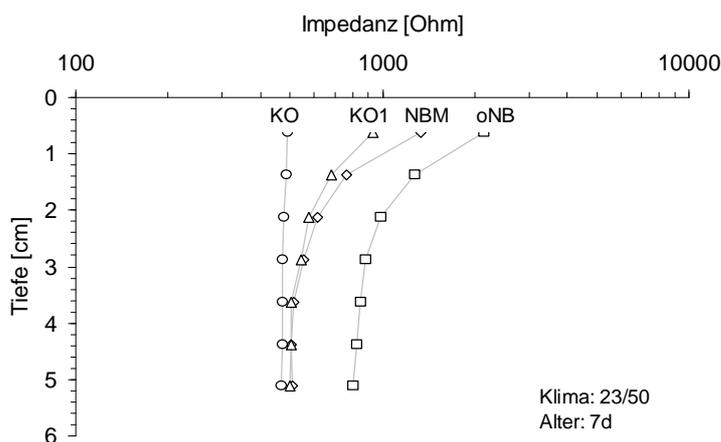


Abbildung 33: el. Widerstand in Abhängigkeit von der Nachbehandlungsmaßnahme, Mörtel M1, Klima 23/50

Es zeigte sich in etwa dasselbe Bild wie bei der Bestimmung des Wasseranteils  $W_{FR+PH}$  (freies und phys. geb. Wasser). Ein Vergleich der Impedanzen mit dem Wasseranteil nach 7 Tagen zeigte eine gute Übereinstimmung zwischen diesen beiden Werten, da der Widerstand ein Maß für die Mobilität der in der Porenlösung vorhandenen Ionen im Kapillarporensystem des Stoffes und damit dessen (freien) Wassergehalt darstellt, s. Abbildung 34.

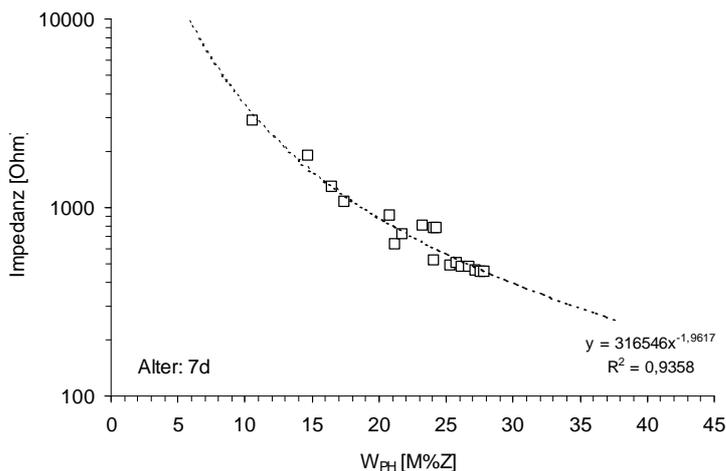


Abbildung 34: Korrelation zwischen Impedanz (gemessen mittels MRE) und  $W_{PH}$  (Bestimmt durch Trocknung)

Insgesamt betrachtet kann dieses Verfahren als Indikator zur Bestimmung der Nachbehandlungsgüte eingesetzt werden. Es bleibt im Weiteren allerdings, primäre Eigenschaften des untersuchten Betons nachzuweisen.

### 5.2.5 Indirekter Nachweis - Carbonatisierung

Bei den untersuchten Mörtelproben wurde die Carbonatisierungstiefe nach 56 Tagen, bei der nicht-nachbehandelten Serie zu unterschiedlichen Zeitpunkten bestimmt. Zusätzlich zu den bereits genannten Proben wurde ein Probekörper im Klima 20/85 (RH85) gelagert, und der Einfluss der Probenhöhe (1 cm, 5 cm, 10 cm und (Standard) 15 cm; Bez.: Hx) untersucht, s. Abbildung 35.

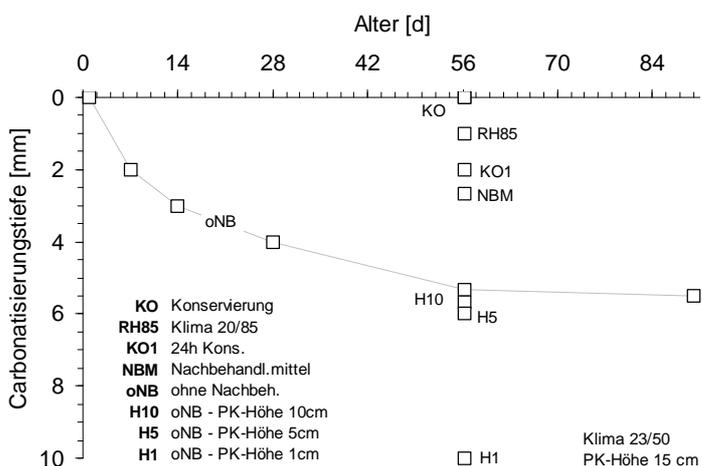


Abbildung 35: Carbonatisierungstiefen aller untersuchten Mörtelproben (M1)

Die Carbonatisierungstiefen hängen mit der verdunsteten Wassermenge (Annahme aus Lagerungsbedingungen und Nachbehandlung) zusammen. Nach 56 Tagen wurden teils sehr tiefe carbonatisierte Randbereiche bestimmt, was auf eine sehr grobporöse und vor allem trockene Struktur des Zementsteins zurückzuführen ist. Die Ergebnisse belegen die Wichtigkeit und Effekte

einer Nachbehandlung. Bereits in jungem Alter wird der Schutz vor einer Carbonatisierungskorrosion maßgeblich beeinflusst.

Bei Lagerung im Klima 23/50 ohne NB waren dies bereits 5 mm nach 56 Tagen. Proben ohne NB und geringen Probeshöhen zeigten etwas größere Carbonisierungstiefen, die Probe mit  $h = 1$  cm war komplett carbonatisiert.

## 5.2.6 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann bei den durchgeführten Mörteluntersuchungen festgestellt werden:

- Auch bei fehlender Nachbehandlung konnte an Normmörtelproben in Normklima nach 28d keine Hydratationsbeeinflussung ab einer Tiefe von 40 mm festgestellt werden. Ein Hydratationsstopp lag nur bis in eine Tiefe von etwa 10 mm vor.
- Bis zu einem Alter von etwa 24 h war unter den gewählten Bedingungen kein signifikanter Einfluss der Evaporation auf die chemische Wasserbindung feststellbar.
- Eine Austrocknung vor diesem Zeitpunkt führt zu einer Verringerung des nicht chemisch gebundenen Wassers und zwar gleichmäßig über den Querschnitt.
- Eine ausreichend lange konservierende Nachbehandlung ab Herstellung führt infolge der ungestörten Hydratation im Innern nicht zu vorangehend beschriebenem Effekt. Eine Austrocknung betrifft hier nur den Randbereich. Eine Nachbehandlung nach einer konservierenden Schalungsvorlagerung lässt auf nur geringe Effekte schließen.
- Die Carbonisierungstiefe ist ein geeigneter Indikator für die Güte einer Nachbehandlungsmaßnahme. Sie findet bereits mit der Trocknung der Randbereiche in jungem Alter statt.
- Die Bestimmung der Feuchte bzw. des freien Wasseranteils in einer Zementsteinmatrix ist mittels Impedanzbestimmungen möglich. Eine Kalibrierung kann über die manuelle Bestimmung des Wassergehalts einer Probe mittels Trocknung bei 105 °C erfolgen.

### 5.3 Frischbetoneigenschaften und Druckfestigkeit

Für die Untersuchungen wurden mehrere Chargen des Betons B1 verwendet, dessen *Frischbetoneigenschaften* untereinander nur geringen Schwankungen unterlagen.

*Tabelle 11: Frischbetoneigenschaften Beton B1*

Art	Wert	Var.koeff. [%]
Verdichtungsmaß	1,29	1,9
Luftporengehalt	4,9 Vol.-%	10,5
Frischbetontemperatur	20,5 °C	4,6
Frischbetonrohichte	2410 kg/m <sup>3</sup>	0,7

An normgelagerten Würfeln mit der Kantenlänge 150 mm (Wasserlagerung nach DIN EN 12390) wurde nach 28 Tagen eine *Druckfestigkeit* von 44,0 N/mm<sup>2</sup> ermittelt.

## 5.4 Evaporation ohne Nachbehandlungsmaßnahmen

### 5.4.1 Allgemeines

Für die Betrachtung der Evaporation wurde der Masseverlust der Mörtel- und Betonproben direkt nach der Herstellung ohne Behandlung der freien Oberfläche und Lagerung im Konstantklima zu unterschiedlichen Zeitpunkten durch Wägung bestimmt. Die verdunstete Wassermenge hängt vor allem von der Zusammensetzung des Betons/Mörtels und den Lagerungsbedingungen ab. Die Streuung der gemessenen Verdunstungen gleicher Proben bei gleicher Lagerung war insgesamt bei allen Versuchen sehr gering.

### 5.4.2 Verdunstung von Wasser

Bei der Überprüfung der Verdunstung von Wasser in Räumen mit Konstantklima 30/40 wurden erhebliche Unterschiede in Abhängigkeit des Lagerungsortes festgestellt.

Die verwendeten Klimaräume waren für eine effizientere Probenlagerung an den Seitenwänden mit offenen Regalen und einem Arbeitstisch in der Mitte des Raumes bestückt. Die Lüftungsöffnungen befanden sich an einer Seitenwand im Decken- bzw. Fußbereich. Für die Bestimmung der Verdunstung (von freien Wasseroberflächen) in Abhängigkeit des Lagerorts im Klimaraum wurden komplett mit Wasser gefüllte Kunststoffschalen verwendet, welche in regelmäßigen Abständen gewogen wurden. Diese lagerten an der den Lüftungsöffnungen gegenüberliegenden Seitenwand in unterschiedlichen Höhen. Aus dem Wasserverlust wurde die Verdunstungsrate in  $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$  bestimmt.

Die ermittelten Werte lagen zwischen 0,09 und 0,21  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ . Diese erheblichen Schwankungen sind auf die Luftumwälzung zurückzuführen, welche zu unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten an den Lagerungsplätzen und damit einem unterschiedlichen konvektiven Feuchteabtransport führt.

Für die durchgeführten Verdunstungsuntersuchungen ist dieser Effekt von entscheidender Bedeutung. Deshalb wurden alle Proben auf der (gleichmäßig luftüberströmten) Bodenfläche des Klimaraumes gelagert. Die Ergebnisse der Messungen finden sich in einem späteren Kapitel.

### 5.4.3 Normalmörtel/-beton

Die Evaporation, also die Abgabe von Wasser aus einem Medium an die Umgebung, weist bei Normalbetonen und -mörteln einen charakteristischen Verlauf auf, der durch die zeitabhängigen Materialeigenschaften bestimmt wird. Die Verdunstungsgeschwindigkeit ist in jungem Alter sehr hoch und reduziert sich ab einem Alter von 1 bis 2 Tagen deutlich. Im dargestellten Beispiel (Beton

B1) sind nach 24 Stunden bereits 45 % des nach 100 Tagen verdunsteten Wassers evaporiert, s. Abbildung 36. Zudem zeigt sich zu diesem Zeitpunkt eine deutliche Änderung der Verdunstungscharakteristik.

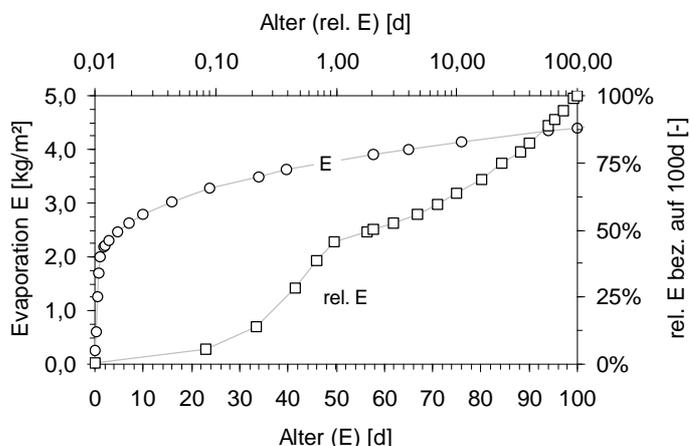


Abbildung 36: absolute und relative zeitl. Verdunstung in 100d, Beton B1, Lagerung 23/50

Für eine genauere Betrachtung des Wasserverlustes in jungem Alter wurden Mörtelproben kontinuierlich unter konstanten Bedingungen untersucht. Voraussetzung für die theoretischen Überlegungen ist ein Dampfdruckgefälle von Beton zur Umgebung hin, wie es unter normalen Bedingungen stets der Fall ist (rel. Luftfeuchte < 100 % r.F.). Konservierende oder wasserzuführende Lagerungen werden gesondert betrachtet. Einflüsse aus Temperatur werden zunächst vernachlässigt. Abbildung 37 zeigt die Verdunstung einer Probe bis zu einem Alter von drei Tagen.

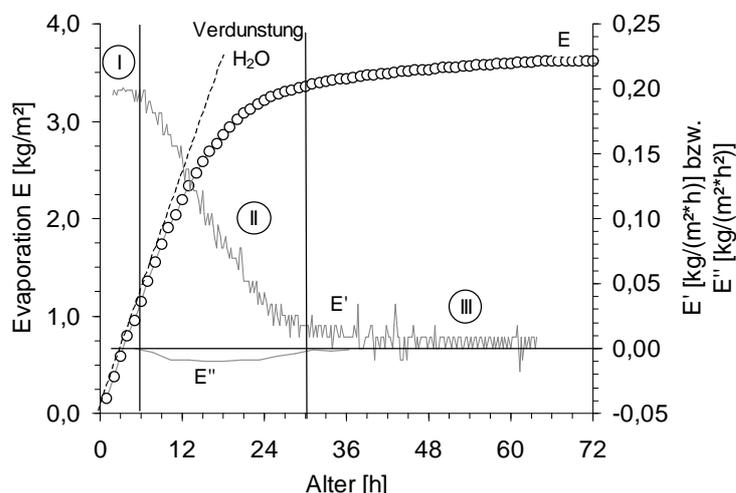


Abbildung 37: zeitl. Verlauf der Evaporation E und der zeitlichen Ableitungen E' und E'', Verdunstungsstadien, Mörtelprobe M1, Lagerung 23/50

Die Verdunstung lässt sich prinzipiell in drei Phasen einteilen. Abhängig von der Betonzusammensetzung und den Umgebungsbedingungen findet im grünen Beton eine hohe Verdunstung statt. In diesem **Stadium I**, in der der Beton/Mörtel bis zum Erstarrungsbeginn noch als strukturlose Suspension vorliegt, unterliegen die Wassermoleküle nur sehr geringen physikalischen

Bindungen. Die Verdunstungsgeschwindigkeit ist nahezu konstant und entspricht damit der Verdunstung von Wasser von freien Wasseroberflächen. Hieraus folgt, dass das ACI-Nomogramm Anwendung finden kann und auch eine Berechnung der Windgeschwindigkeit bei bekannter Luftfeuchte und –temperatur über die Formel von Menzel möglich ist. Je größer das Dampfdruckgefälle zwischen Beton und Umgebung ist, desto höher ist die Verdunstung.

Ab dem Zeitpunkt des Erstarrungsbeginns (hier ab etwa 6 Stunden) findet durch die Hydratation eine Strukturbildung des Zementsteins im jungen Beton statt, es bildet sich ein Kapillarporensystem und Wasser wird physikalisch und chemisch in bzw. an die Reaktionsprodukte gebunden. Die Durchmesser der Poren verringern sich mit der Bildung neuer Hydratationsprodukte. Sofern kontinuierlicher konvektiver Abtransport der feuchten Luft an der Probenoberfläche stattfindet, ist die äußere Voraussetzung für eine konstante Verdunstung weiter gegeben. Jedoch muss in diesem **Stadium II** bereits Wasser kapillar aus dem Probeninnern nachgesaugt werden. Wenn dies auf Grund des internen Wasserverbrauchs und der Verengung des Kapillarsystems nicht mehr vollständig geschehen kann, sinkt die relative Feuchte in den oberflächennahen Bereichen und der Wassertransport zur Oberfläche findet in den größeren Poren vermehrt über Diffusion statt und nimmt deshalb stark ab.

Ab einem Alter von 24 bis 36 Stunden sinkt die Verdunstungsrate auf ein sehr niedriges Niveau (**Stadium III**), die Evaporation ist hauptsächlich diffusionsgesteuert und damit im Vergleich zum Kapillartransport sehr langsam. Kapillarer Transport findet nur in sehr feinen Poren statt.

Da der Verlauf der Verdunstung bei allen untersuchten Betonen und Mörteln mit Beginn der Phase III sehr ähnlich war und der Beginn der Phase III bei etwa 24 Stunden lag, wird der absolute Wasserverlust nach 24 Stunden als Indikator für die Verdunstung betrachtet und im Folgenden als

---

**E24** abs. Evaporation/Wasserverlust [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ] in den ersten 24 Stunden nach Herstellung  
(bei konservierender Lagerung: in 24h nach Entfernen der Konservierung)

---

bezeichnet. Es sei hiermit ausdrücklich darauf hingewiesen, dass dieser Kennwert *in dieser Form* lediglich im Rahmen dieser Versuche bzw. für die hier verwendeten Betone Gültigkeit besitzt, da er den frühestmöglichen Zeitpunkt für einen charakteristischen Kennwert zur Bewertung der Nachbehandlungsgüte bezeichnet. Für andere Betone muss dieser Wert je nach der Art der Verdunstungsphasen ggf. bezüglich *des Zeitpunktes* neu betrachtet werden, der Kennwert als solcher bleibt aber signifikant.

Als Parameter hierfür kann die Verdunstungsrate  $E'$  dienen, festgelegt wie hier auf einen empirisch ermittelten Grenzwert von etwa  $0,025 \text{ [kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})]$  oder aber deren zeitliche Ableitung  $E''$ .

Bei nachbehandelten und wasserärmeren (z.B. geringerer w/z-Wert) Betonen kann dieser Kennwert deutlich früher erreicht werden, bei langsamer hydratisierenden Systemen verschiebt sich dieser charakteristische Punkt entsprechend nach hinten.

Findet keine Luftbewegung statt, sättigt sich die Luft über dem Beton und reduziert somit die Verdunstungsgeschwindigkeit aufgrund des immer geringer werden Dampfdruckgefälles erheblich. Dies ist zum Beispiel bei frisch hergestellten Estrichen in geschlossenen Räumen der Fall.

### 5.4.4 Effekt des Blutens

Bei einem *Bluten* des Betons/Mörtels entsteht vor allem aufgrund der Bindemittelzusammensetzung eine Wasserabsonderung auf der Probenoberfläche. In dieser Phase entspricht die Evaporation der einer freien Verdunstung. Für die Daten in Abbildung 38 wurde der Mörtel M2 verwendet, bei dem im Vergleich zum Mörtel M1 nur der Zement (ebenfalls CEM I 32,5 R) geändert wurde.

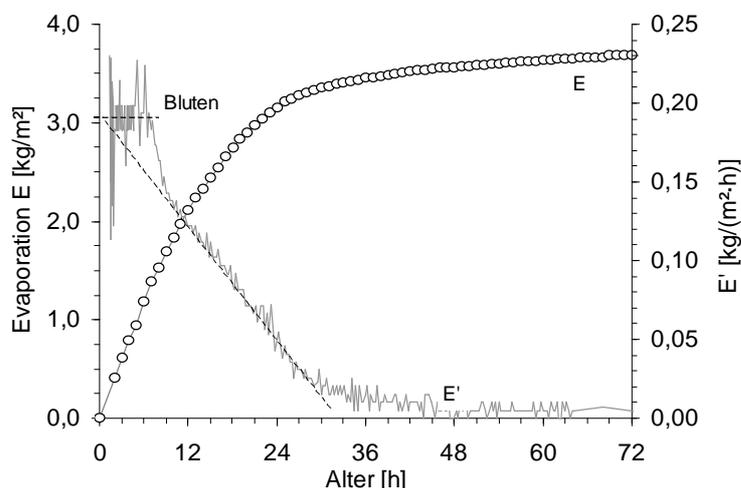


Abbildung 38: zeitl. Verlauf der Evaporation  $E$  und der zeitlichen Ableitungen  $E'$ , Mörtelprobe M2, blutende Mischung, Lagerung 23/50

Tatsächlich fand eine konstante Verdunstung statt, solange Wasser auf der Oberfläche vorhanden war. Anschließend sank die Verdunstungsgeschwindigkeit nach etwa sieben Stunden stärker als beim Versuch mit Mörtel 1 und fand sich nach etwa neun Stunden wieder auf demselben Niveau der Standardmischung. Insgesamt war die verdunstete Wassermenge nach 36 Stunden gleich. Somit kann davon ausgegangen werden, dass ein Bluten bis zum Erstarrungsbeginn keine Auswirkungen auf den gesamten Wasserverlust  $E_{24}$  besitzt.

### 5.4.5 Einfluss der Probenhöhe

In einer Mörtelversuchsreihe wurde der Einfluss der Probenhöhe auf die Evaporation untersucht. Neben der Standardhöhe von 15 cm wurden Proben mit  $h = 1, 5$  und 10 cm hergestellt und zeitabhängig gewogen, s. Abbildung 39. Der Lagerungsort und damit auch die Luftbewegung am

Lagerungsort war geringfügig höher als bei den anderen Versuchen und damit die potentielle Verdunstung höher.

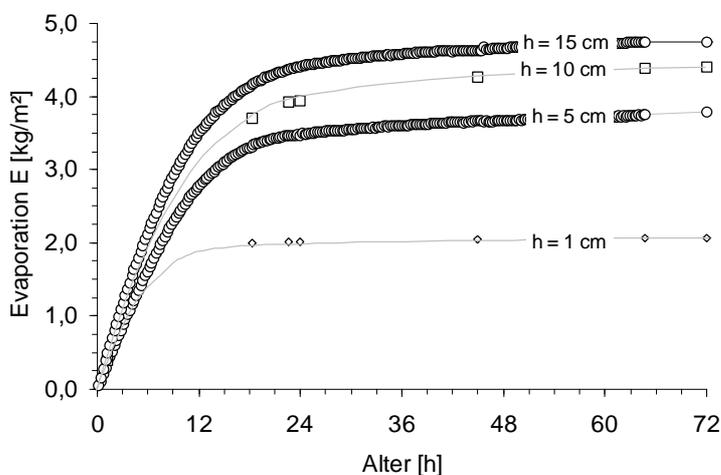


Abbildung 39: Evaporation unterschiedl. hoher (1, 5, 10, 15 cm) hoher Mörtelproben (M1), Lagerung 23/50

Abhängig von der Probenhöhe ergibt sich ein unterschiedlicher Verdunstungsverlauf. Bei der niedrigsten Probe ( $h = 1$  cm) war bereits nach 18 Stunden kaum noch eine Evaporation feststellbar. Bis zu diesem Zeitpunkt waren bereits etwa 56% des gesamten in der Probe vorhandenen Anmachwassers verdunstet. Nachdem kein nennenswerter Wasserverlust nach diesem Zeitpunkt feststellbar war, kann davon ausgegangen werden, dass das restliche Wasser in Hydratationsprodukten gebunden war bzw. kein weiterer Transport möglich war. Die übrigen Proben wiesen den charakteristischen Verdunstungsverlauf auf, nur die absolute Höhe der Verdunstung war aufgrund der unterschiedlichen Größe der Wasserreservoirs verbunden mit dem Nachtransport aus dem Probeninnern unterschiedlich. Die Betrachtung der zeitlichen Ableitungen der Verdunstungsverläufe (Proben mit  $h = 5$  cm, 15 cm) zeigt, dass ein Grenzwert von  $0,025 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  zwischen 18h ( $h = 5$  cm) und 24h ( $h = 15$  cm) unterschritten wurde. Wegen der nicht ausreichenden Messgenauigkeit der Wasser im Verhältnis zur Probe kann dies aber nur als Anhaltswert dienen.

## 5.4.6 Unterschiedliche Betonzusammensetzung

Exemplarisch für die Bandbreite möglicher Betonzusammensetzungen wurden drei Betone, ein üblicher Normalbeton (NB), ein Beton mit Flugasche als Betonzusatzstoff (FA) und ein ultrahochfester Beton mit Silicastaub und geringem w/b-Wert (UHPC) bezüglich ihres Verdunstungsverhaltens getestet, s. Abbildung 40. Da es sich um rein orientierende Untersuchungen handelt, sei hier auf eine Angabe der genauen Zusammensetzung verzichtet.

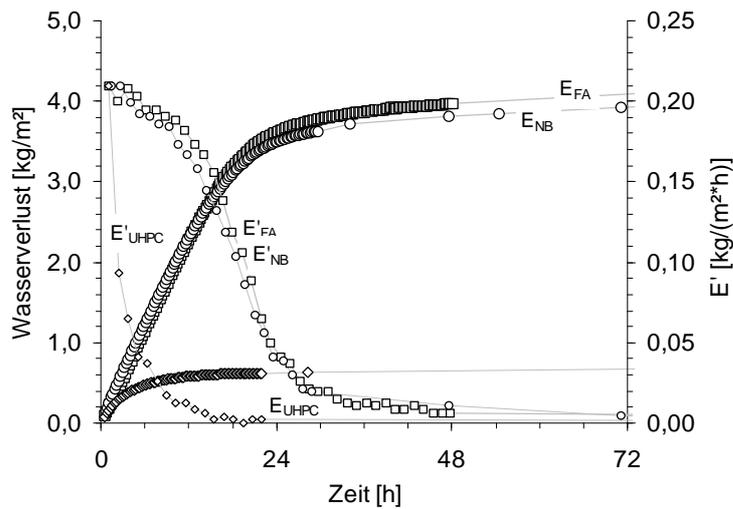


Abbildung 40: Evaporation unterschiedl. Betone (NB – Normalbeton, FA – Beton mit Flugasche, UHPC – ultrahochfester Beton) im Klima 23/50

Es zeigte sich hier kaum ein Unterschied zwischen NB und FA. Beide Betone wiesen eine deutliche Verdunstungsminderung nach 24 bis 36 Stunden nach Wasserzugabe auf. Der UHPC, prinzipbedingt mit einem sehr geringen Wassergehalt (hier:  $w/b=0.25$ ), erreichte diesen Grenzwert bereits nach etwa 8 bis 12 Stunden nach dem Mischen, der Anfangswasserverlust war jedoch zu den anderen beiden Mischungen identisch.

## 5.5 Evaporation mit Nachbehandlungsmaßnahmen

### 5.5.1 Nachbehandlung mittels NBM

#### 5.5.1.1 Verdunstung

Werden Proben auf der exponierten Fläche mit einem paraffinhaltigen NBM nachbehandelt, so verringert sich ab diesem Zeitpunkt die Verdunstungsrate erheblich. Zusätzlich wird Wasser auf die Oberfläche aufgebracht, da die Paraffinpartikel (Feststoffanteil im NBM etwa 5-15 M.-%) mittels eines Emulgators in diesem Medium verteilt sind. Bei einer üblichen Auftragsmenge sind dies somit etwa 0,135 bis 0,145 kg/m<sup>2</sup> Wasser.

Ein Vergleich der Evaporation aus einer nicht-nachbehandelten zu einer nachbehandelten (3 h nach Herstellung) Probe zeigt Abbildung 41.

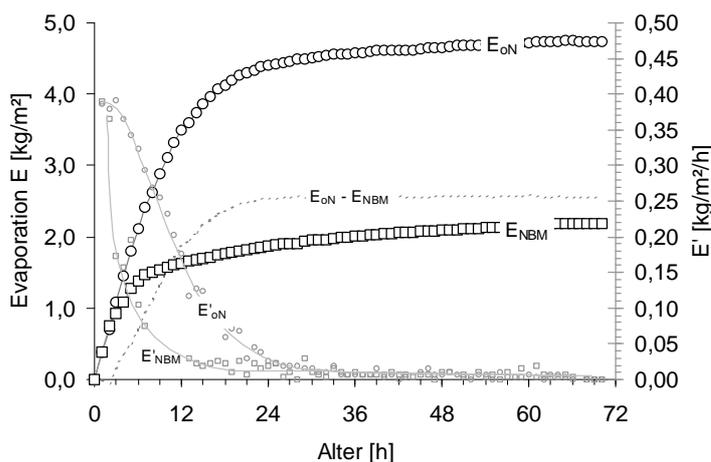


Abbildung 41: Evaporation einer Probe ohne Nachbehandlung (oN) und mit NBM (Auftrag nach 3 Stunden), Mörtel M1, Lagerung 23/50

Eine deutliche Verdunstungsminderung bzw. der Übergang in das Verdunstungsstadium III ist bei dem nachbehandelten Beton bereits nach etwa 12 h zu beobachten, bei der unbehandelten Probe nach etwa 24 h nach Wasserzugabe. Betrachtet man die Differenz in der Evaporation der beiden Proben ( $E_{oN} - E_{NBM}$ ), zeigt sich, dass sich bei der nachbehandelten Probe durch den Paraffinfilm sehr rasch eine Verdunstungsminderung einstellt und nach etwa 24 h der Wasserverlust aus beiden Proben fast identisch ist. Die Nachbehandlung mittels NBM ergibt also phänomenologisch denselben Effekt wie die Austrocknung der obersten Randschicht.

Folglich verringert sich durch das NBM der absolute Wasserverlust in jungem Alter und die Verdunstung sinkt früher als ohne Nachbehandlungsmaßnahme auf ein geringes Niveau. Für sie Hydratation steht somit mehr und früher bzw. länger Wasser zur Verfügung.

### 5.5.1.2 Auftragzeitpunkt NBM

Der Zeitpunkt des Auftrags eines paraffinhaltigen NBM ist entscheidend für dessen Sperrwirkung. In den Vorschriften (Herstellerangaben und Normen) findet sich oft der Ausdruck „Mattfeuchte“ als optimaler Auftragszeitpunkt. Hiermit ist der Zeitpunkt bezeichnet, zu dem sich an der Oberfläche gerade kein Wasser mehr befindet. Dieser ist jedoch nur subjektiv und sehr ungenau festzustellen.

Wird ein NBM sehr *früh* appliziert, befindet sich noch ein Wasserfilm auf der Probenoberfläche. Auf diesem kann sich bei normaler Auftragsmenge kein geschlossener Film von Paraffin-Partikeln ausbilden, da hier aufgrund der Beweglichkeit der Partikel und der physikalischen Bindungen Agglomerationen stattfinden. Die Sperrwirkung des NBM wird somit deutlich reduziert, der Schutz des Betons beginnt jedoch frühzeitig. Zudem kann durch Windeinwirkung ein geschlossener Film wieder auseinandergerissen werden. Findet ein Auftrag erst *spät* nach dem Abtrocknen bzw. der Mattfeuchte statt, ist die Wirkung eines NBM deutlich höher, da die Filmbildung nicht beeinträchtigt wird. Jedoch ist der Beton bis zu diesem Zeitpunkt ungeschützt und es kann somit ein hoher anfänglicher Wasserverlust stattfinden.

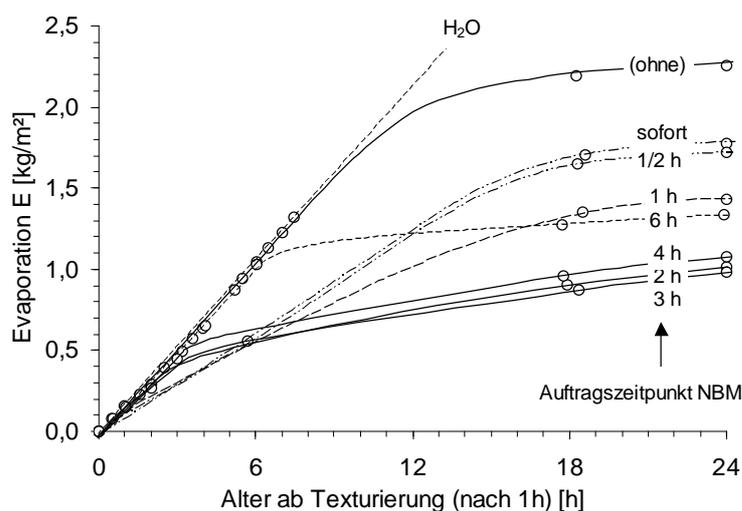


Abbildung 42: Evaporation in Abhängigkeit des NBM-Auftragszeitpunktes, Beton BE-1, Lagerung 30/40

Im dargestellten Beispiel wurden mehrere Proben einer Serie zu unterschiedlichen Zeitpunkten (h nach Texturierung) mit demselben NBM (N2) nachbehandelt. Die Texturierung (mittels Rosshaarbesen) erfolgte eine Stunde nach Herstellung des Betons. Bis zu diesem Zeitpunkt erfolgte bereits ein Wasserverlust, der bei allen Proben gleich war und hier nicht weiter dargestellt wird. Betrachtet man den absoluten Wasserverlust nach 24 Stunden, so zeigt sich, dass eine Nachbehandlung mittels NBM generell zu einer Senkung des Wasserverlustes um mind. 20 % führt. Eine in der Praxis übliche frühe Applikation (sofort, ½ Stunde) führt jedoch insgesamt zu einer geringen Sperrwirkung. Eine Nachbehandlung nach einer bzw. sechs Stunden nach Texturierung führt aufgrund der beschriebenen Zusammenhänge zu einem ähnlichen Wasserverlust nach 24 Stunden. Ein Optimum ist bei einem Auftrag drei Stunden nach der Oberflächenprofilierung

erreicht, die Spanne für gute Ergebnisse reicht von etwa zwei bis vier Stunden. Hierbei wird der Wasserverlust E24 gegenüber einem sofortigen NBM-Auftrag mehr als halbiert, s. Tabelle 12.

Tabelle 12: Auftragszeitpunkte NBM und Reduktion des Wasserverlustes nach 24h (E24)

Auftrag NBM	(ohne)	sofort	½ h	1h	2h	3h	4h	6h
Reduktion E24	-	21 %	24 %	37 %	55 %	57 %	52 %	41 %

### 5.5.1.3 Berechnung eines Sperrkoeffizienten nach TL NBM-StB 96

#### Allgemeines

Die in diesem Kapitel berechneten Sperrkoeffizienten nach TL NBM-StB 96 werden nur exemplarisch und nicht zur Bewertung der Ergebnisse verwendet. Zum einen entspricht die Bindemittelzusammensetzung und die Probekörpergeometrie nicht den Spezifikationen, zum anderen ist die dort beschriebene Vorgehensweise nicht exakt genug und Berechnungen teilweise nicht korrekt. Zudem ergibt die Ermittlung der Sperrkoeffizienten nach drei ( $S_3$ ) und sieben Tagen ( $S_7$ ) zusätzlich zum Sperrkoeffizienten  $S_1$  nach einem Tag aufgrund des ähnlichen Verdunstungsverläufen zwischen nachbehandelten und nicht-nachbehandelten Proben keine zusätzlichen Informationen, s. Abbildung 43.

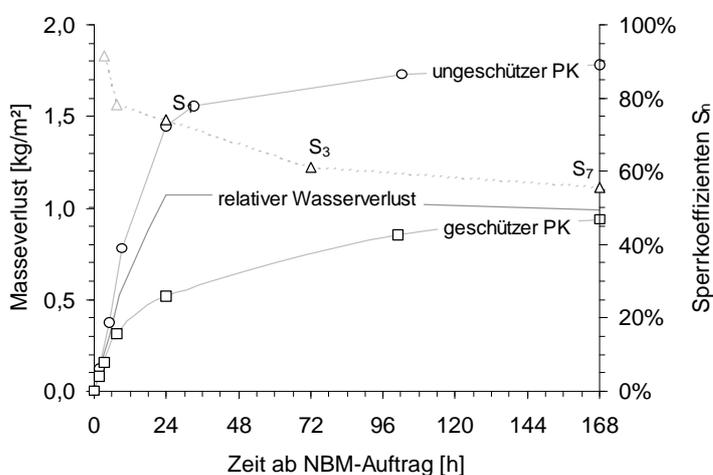


Abbildung 43: Evaporation aus nachbeh. und nicht-nachbeh. Proben, rel. Wasserverlust und Sperrkoeffizienten nach TL NBM-Stb 96

Aus den genannten Gründen werden auch trotz des optimierten Auftragszeitpunktes eines zugelassenen NBM nicht unbedingt die in der TL NBM geforderten Sperrkoeffizienten von  $S > 75 \%$  erhalten.

### **Kritikpunkte an den TL NBM-StB 96**

Wie auch in [Frentzel 2005] festgestellt, weist die aktuelle Fassung der Technischen Lieferbedingungen für flüssige filmbildende Nachbehandlungsmittel bezüglich der Ermittlung des Sperrkoeffizienten im Wesentlichen folgende Mängel auf:

- subjektive Bestimmung der Mattfeuchte bzw. des Abtrocknens der Probenoberfläche für den Auftrag des Nachbehandlungsmittels
- Bezug des Wasserverlustes der nachbehandelten und nicht-nachbehandelten Proben auf den Auftragszeitpunkt des NBM, der Anfangswasserverlust wird nicht berücksichtigt

In [Huber et al. 2006] ist eine Lösung für die beiden Probleme beschrieben, die im Folgenden nochmals dargestellt wird. Zudem ist die Texturierung der Proben nicht genau genug spezifiziert, was vor allem bei der zu verwendenden Auftragsmenge eines NBM für eine Filmbildung eine nicht unerhebliche Rolle spielt.

### **Lackmuspapieretest – Bestimmung des optimalen Auftragszeitpunktes**

Wie in Abbildung 42 gezeigt, hängt die Wirkung eines NBM vom Auftragszeitpunkt ab. Dieser ist optimal, wenn die Oberfläche der Probe gerade abgetrocknet ist. Um dies objektiv festzustellen, wurde mit dem Lackmuspapieretest ein kostengünstiges, einfach anwendbares und effektives Nachweisverfahren entwickelt. Hierbei nutzt man zwei Effekte des roten Lackmuspapiers: Zum einen saugt die Zellulose auf der Oberfläche vorhandenes Wasser auf, zum anderen erfolgt ein Farbumschlag von rot auf blau, falls die aufgesaugte Flüssigkeit einen pH-Wert über 8 aufweist, wie dies beim sehr alkalischen Milieu des Betons der Fall ist.

Für die Anwendung legt man zu unterschiedlichen Zeitpunkten für eine bestimmte Dauer ein Stück eines Lackmuspapiers auf die Probenoberfläche. Dies funktioniert zum Beispiel wie in [Huber et al. 2006] beschrieben. Hierbei wurde ein gefaltetes Stück Lackmuspapier alle zehn Minuten für zwei Minuten auf jeweils einen anderen Abschnitt der Oberfläche belassen. Sobald das Papier keine Feuchtigkeit mehr absorbiert, ist der optimale Zeitpunkt erreicht. Weitergehende Versuche zeigten, dass aufgrund der strukturierten Oberflächen der Proben ein ringförmiges Auflegen und eine zusätzliche geringe Auflast bessere Ergebnisse liefert, da man dadurch das Papier nicht unabsichtlich auf herausragende Sandkörner stellen kann und damit fälschlicherweise einen zu frühen Zeitpunkt ermittelt. Zudem ist ein größerer zeitlicher Messabstand von 15 Minuten in der Regel ausreichend.



Abbildung 44: Lackmuspapieretest, Ausführung (li.) und Ergebnis (re.)

### Berechnungszeitpunkt

Für die Basis der Berechnung des Sperrkoeffizienten S nach TL NBM wird der Zeitpunkt des Auftrags des NBM verwendet. Ein bis dahin stattgefundenener Wasserverlust wird nicht berücksichtigt, was sich bei einem späten Auftrag (s. vorangegangenes Kapitel) deutlich auswirkt. Bezieht man die Berechnung auf den Wasserverlust ab Herstellung bzw. ab der Texturierung, letzteres ist bei der Versuchsdurchführung deutlich praktikabler – erhält man Werte, die bei einem spätern Nachweis der Güte eine Nachbehandlungsmaßnahme, deutlich bessere Korrelationen zeigen. Die benannten Zusammenhänge sind in Abbildung 45 dargestellt.

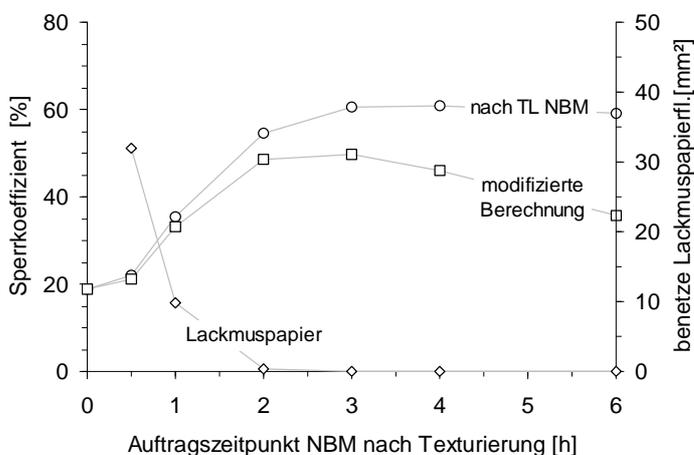


Abbildung 45: Sperrkoeffizient nach TL NBM und modifizierte Berechnung (Bezugspunkt Texturierung) an zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach-behandelten Proben, benetzte Lackmuspapierfläche in Abhängigkeit der Zeit

An dieser Versuchsserie wurde auch die benetzte Lackmuspapierfläche zu unterschiedlichen Zeitpunkten bestimmt. Es zeigte sich, dass hiermit der optimale Nachbehandlungszeitpunkt (mit der höchsten Sperrwirkung des NBM) gefunden werden konnte.

Eine gute Übereinstimmung zeigt sich auch zwischen dem absoluten Wasserverlust nach 24 Stunden und dem neu berechneten Sperrkoeffizienten mit geändertem Bezugspunkt, s. Abbildung 46. Dies ist damit begründbar, dass nach 24 Stunden kaum Unterschiede im

Verdunstungsverhalten der nachbehandelten und nicht behandelten Proben vorhanden sind. Nach der Korrektur des Bezugspunktes kann die Berechnung der TL NBM also weiter verwendet werden.

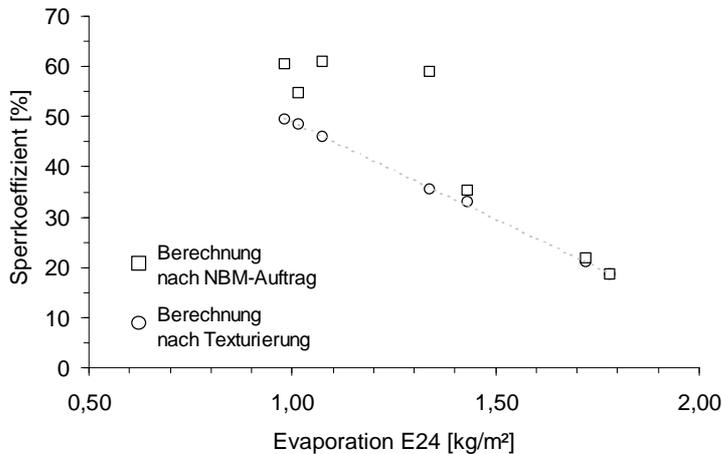


Abbildung 46: Korrelation abs. Wasserverlust nach 24h und Sperrkoeffizient (nach TL NBM und mit korr. Bezugspunkt)

Durch die Bestimmung des Auftragszeitpunktes mittels Lackmuspapiertest und die Korrektur des Bezugszeitpunktes kann für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche die Berechnung nach TL NBM-StB 96 verwendet werden. Für weiterführende Versuche und Vorschläge siehe [Frentzel 2005].

### 5.5.1.4 Auftragsmenge NBM

Im Hinblick auf einen geschlossenen NBM-Film auf einer nicht-ebenen Oberfläche spielt die aufgetragene Menge eine Rolle. Hersteller geben hierfür einen Bereich an, der bei etwa 150 g/m<sup>2</sup> liegt. In einem gesonderten Versuch wurde der Einfluss der Auftragsmenge auf den Sperrkoeffizienten betrachtet. Abweichend von der TL NBM wurden Würfel a = 15 cm aus einer Charge des Betons B1 mit der korrigierten Berechnung verwendet.

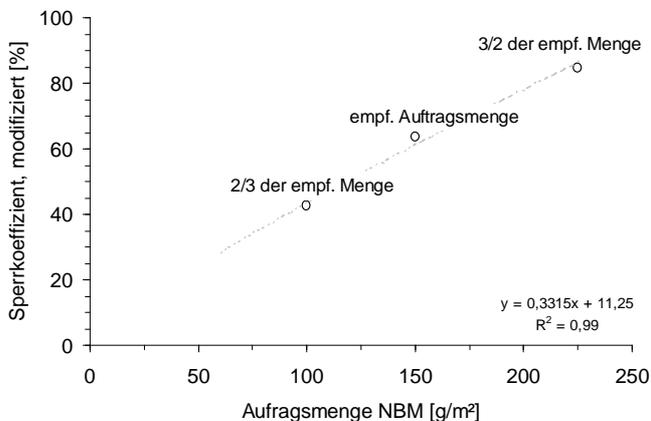


Abbildung 47: Einfluss der NBM-Auftragsmenge auf den Sperrkoeffizienten, modifizierte Berechnung, nicht konforme Proben und Beton

Der Zusammenhang zwischen Auftragsmenge und Sperrkoeffizienten war im untersuchten Bereich linear. Dies ist auf den erhöhten Feststoffgehalt des Paraffins auf der Oberfläche zurückzuführen, der eine dichtere Sperrschicht ausbildet. Besonders bei einer starken Texturierung (z.B. durch Stahlbesen) ist ein erhöhter Auftrag sinnvoll bzw. nach [TL NBM 96] gefordert.

## 5.5.2 Nachbehandlungsmittel

Nachdem die wesentlichen Einflüsse wie Auftragszeitpunkt, Auftragsmenge, Lagerungsbedingungen und Probenkonditionierung erfasst waren, wurden die Versuche zur Wirksamkeit der Nachbehandlung mittels NBM durchgeführt.

Im Klima 20 °C und 65 % r.F. wurden unterschiedliche Nachbehandlungsverfahren untersucht. Hierfür wurden Würfel ( $a = 15 \text{ cm}$ ) entsprechend der in Tabelle 13 dargestellten Arten nachbehandelt (Zeitpunkt: Lackmuspapiertest) und der Wasserverlust bis zu einem Alter von 168 Stunden bestimmt.

Tabelle 13: Nachbehandlungsverfahren und Wasserverlust E24 im Klima 20/65

Bezeichnung	Lagerung	Nachbehandlung	Bemerkung	E24 [kg/m <sup>2</sup> ]
20-JT	20 °C / 65 % r.F.	feuchtes Jutetuch	-	0,01
20-N4	20 °C / 65 % r.F.	NBM N4	-	0,14
20-N2	20 °C / 65 % r.F.	NBM N2	-	0,40
20-N3	20 °C / 65 % r.F.	NBM N3	-	0,48
20-N2-oT	20 °C / 65 % r.F.	NBM N2	ohne Textur	0,63
20-N2-2/3	20 °C / 65 % r.F.	NBM N2	67%ige NBM-Menge	0,71
20-N1	20 °C / 65 % r.F.	NBM N1	-	0,72
20-N2-sp	20 °C / 65 % r.F.	NBM N2	Auftrag nach 10h	1,44
20-oN	20 °C / 65 % r.F.	ohne NB	-	1,48
20-oN-oT	20 °C / 65 % r.F.	ohne NB	ohne Textur	1,58

Entsprechend der Nachbehandlung wiesen die Proben ein unterschiedliches Verdunstungsverhalten auf. Bei der Probe mit Jutetuch wurde fast keine Wasserabgabe festgestellt, den höchsten Wasserverlust zeigte die Probe ohne Nachbehandlung.

## 5.5.3 Temporäre Konservierung

Um den Einfluss der Wasserbindung und Strukturbildung durch Hydratation auf die Verdunstung zu untersuchen, wurden die Oberflächen von Betonprobekörpern (B1) nach der Herstellung unterschiedlich lange (ohne, 2h, 4h, 8h, 24h, bis zum Versuchsende (1512h bzw. 63d)) mittels einer PE-Folie praktisch dampfdicht abgeklebt und jeweils der Wasserverlust durch Wägung bestimmt.

Zudem wird der Versuch als Referenz für die Bewertung der Nachbehandlungsgüte mittels NBM verwendet, s. Abbildung 47.

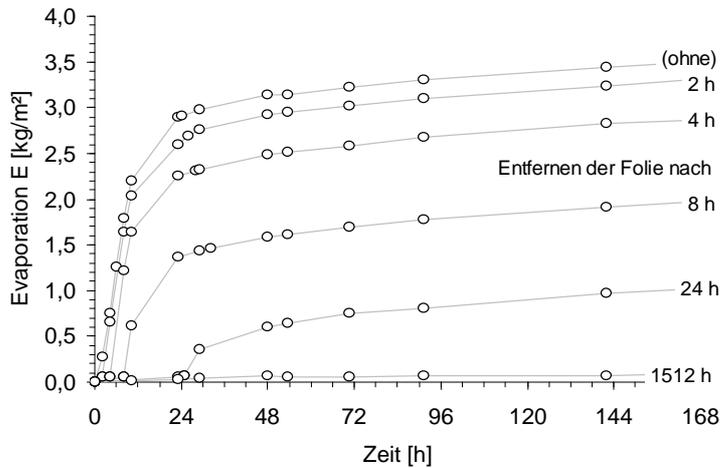


Abbildung 48: zeit. Verlauf der Evaporation, Probekörper 15·15·15 cm<sup>3</sup>, Klima 30/40, unterschiedliche Konservierungsdauer (ohne, 2h, 4h, 8h, 24h, 63d), Beton B1

Bedingt durch den Zeitraum der ungestörten Hydratation nahm die Höhe des Wasserverlustes mit der Dauer der Konservierung ab. Prinzipiell fällt auf, dass sich der Verlauf der Evaporation der Proben unterschiedlicher Konservierungsdauern ähnelt und sich hauptsächlich in der absoluten Höhe unterscheidet. Betrachtet man den Wasserverlust zu unterschiedlichen Zeiten nach Entfernen der Folienabdeckung, ergibt sich folgendes Bild:

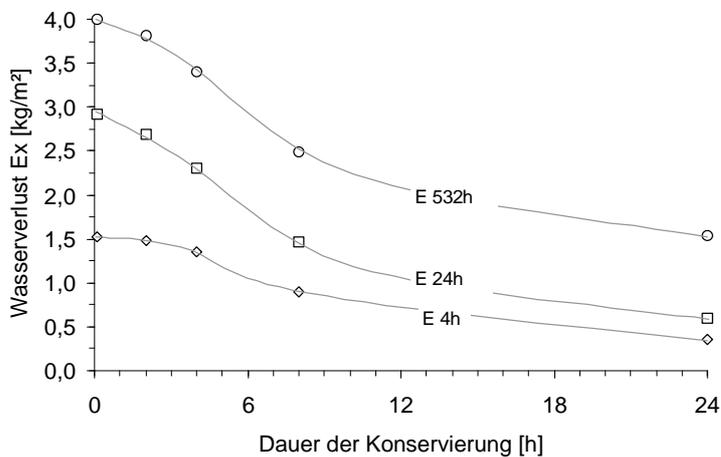


Abbildung 49: Wasserverlust 4, 24 und 532 Stunden nach Entfernen der Konservierung, Klima 30/40, Proben 15 dm<sup>3</sup>

Die dargestellten Wasserverluste kennzeichnen die Verdunstungscharakteristik in den drei Phasen.

Im Stadium III (hier: von Tag 1 bis zu Tag 21) zeigte sich bei allen Proben eine konstante Verdunstung von etwa 0,025 kg/(m<sup>2</sup>·d), der Wasserverlust E532 (nach 22 d) unterscheidet sich deshalb von Wasserverlust E24 nur in der absoluten Höhe. Letzterer wies eine Abhängigkeit von der Konservierungsdauer auf. Dies ist auf die Dauer der ungestörten Hydratation während der

Konservierung und damit Verfeinerung der Porenstruktur zurückzuführen. Der anschließende Wasserverlust hängt von der Kapillarfüllung ab, die mit abnehmendem mittlerem Porenradius geringer wird. Der Wasserverlust E<sub>4</sub> (4h nach Konservierung) ist ein Maß für die anfängliche Verdunstungsrate (Stadium I). Ab etwa 4h Konservierung ist der Beton bereits in der Erhärtungsphase. Dies ist auch im Diagramm erkennbar, da sich hier die Evaporation verringert.

## 5.5.4 Zusammenfassung der Verdunstungsuntersuchungen

Folgende Zusammenhänge wurden in diesem Kapitel ermittelt:

- Die Verdunstung von Wasser aus Beton nach der Herstellung lässt sich prinzipiell in drei Stadien einteilen.
- Der Wasserverlust am Ende der Phase II ist charakteristisch für die Verdunstung, da sich die Verdunstung in der Phase III für alle Betone nicht signifikant unterscheidet. In dieser Arbeit wird die absolute Evaporation nach 24h als Kennwert E<sub>24</sub> verwendet.
- Der Kennwert für den Beginn des Verdunstungsstadiums III (hier: E<sub>24</sub>) kann über die zeitliche Ableitung der Evaporation bestimmt werden (hier:  $E' < 0.025 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ).
- Im Stadium III sind Nachbehandlungsmaßnahmen nur noch bedingt wirksam.
- Ein Bluten besitzt keine signifikante Auswirkung auf die absolute Verdunstungsmenge und auf den gewählten Kennwert.
- Der Auftragszeitpunkt eines NBM besitzt signifikanten Einfluss auf die verdunstete Wassermenge und damit auf die (Sperr-)Wirkung des Mittels.
- Die in den TL NBM verwendete Vorgehensweise zur Ermittlung des optimalen Auftragszeitpunkts („Mattfeuchte“) ist ungenügend und kann durch den Lackmuspapiertest ersetzt werden.
- Die Berechnung des Sperrkoeffizienten nach TL NBM in den Fassungen bis 1996 ist nicht korrekt. Der Bezugspunkt für die Berechnung muss stets der Zeitpunkt der Herstellung der Probe (evtl. der Zeitpunkt der Texturierung) sein, nicht der Auftragszeitpunkt des NBM. Zudem liefern die Sperrkoeffizienten S<sub>3</sub> und S<sub>7</sub> keine zusätzlichen Informationen.
- Eine Veränderung der Auftragsmenge eines NBM beeinflusst dessen Sperrwirkung.
- Eine konservierende Lagerung der Proben in jungem Alter reduziert den Wasserverlust erheblich. Je länger die Konservierungsdauer ab Herstellung, desto geringer ist der Wasserverlust.
- In Laborversuchen besitzt die Luftumwälzung in Klimäräumen erheblichen Einfluss auf die gemessene Verdunstung. Somit muss der Lagerungsort der Proben sorgfältig gewählt

werden. Neben der Lufttemperatur und –feuchte muss stets die Windgeschwindigkeit bekannt sein.

Im folgenden Kapitel wird nun untersucht und nachgewiesen, ob der charakteristische Wasserverlust mit den resultierenden Festbetoneigenschaften in oberflächennahen Betonbereichen korreliert und somit ein Maß für die Güte einer Nachbehandlung darstellt.

## 5.6 Resultierende Festbetoneigenschaften

### 5.6.1 Probenkonditionierung

#### Trocknungsverfahren für Gaspermeabilitätsmessungen

Da bekannt ist, dass die Probenfeuchte signifikanten Einfluss auf Gaspermeabilitätsmessungen besitzt [z.B. Tauscher 2004], mussten vor der Bestimmung der Gaspermeabilität nach Torrent sämtliche Proben schonend getrocknet werden. Aufgrund der uneinheitlichen Meinung in der Literatur bezüglich der Vor- und Nachteile der möglichen Trocknungsverfahren, wurde nach einigen Vorversuchen entschieden, alle Proben für die Permeabilitätsmessungen in einem Vakuumofen zu entfeuchten.

Dieses Verfahren kombiniert die Dampfdruckherabsetzung durch die Reduzierung des Umgebungsdruckes (hier: 100 mbar) mit einer mäßigen Temperaturerhöhung (hier: 60 °C). Hierdurch wird eine schnelle und schonende Trocknung der relativ großvolumigen Proben (Würfel,  $a=15\text{cm}$ ) erreicht. Die (nicht vermeidbaren) Effekte der Nachhydratation (v.a. im Randbereich) durch die Lagerungsdauer bei erhöhten Temperaturen und die Mikrorissbildung durch ein scharfes Trocknen werden damit minimiert. Die Trocknungsdauer betrug etwa 90 d bis zur Massekonstanz der Proben. Dadurch, dass alle Proben mit demselben Verfahren getrocknet wurden und der untersuchte Randbereich zuerst trocknet, kann von konstanten Bedingungen bei der Probenkonditionierung ausgegangen werden.

Der Einfluss zwischen (Rest-)Feuchtegehalt im Beton und Gaspermeabilität wurde an einem Probekörper untersucht, der zu unterschiedlichen Trocknungsstadien jeweils gewogen und an der Ober- und Unterseite gemessen wurde. Die Probe konnte bis zum Trocknungsbeginn an der Oberseite ohne Nachbehandlung austrocknen, die Unterseite war stets geschalt.

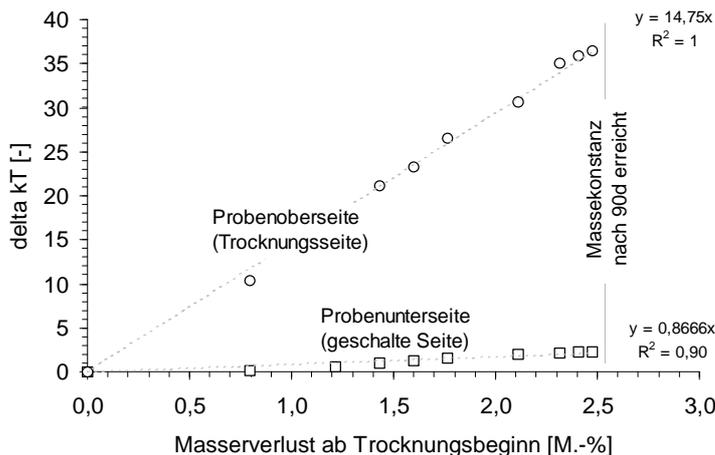


Abbildung 50: Masseverlust und Änderung des Perm.koeff.  $kT$  durch Trocknung bei  $60^{\circ}\text{C}$  und  $100\text{ mbar}$ , Probekörper  $15\text{ cm}^3$ , Beton BE-1

Proportional zum Masseverlust durch Trocknung erhöhte sich die Gaspermeabilität sowohl an der Probenober- als auch der Unterseite. Der Unterschied der Permeabilitäten auf den beiden Seitenflächen ist auf die Hydratationsbeeinflussung durch die Wasserabgabe infolge Verdunstung während der Erhärtungsphase zurückzuführen.

Auf eine Trocknung bei höheren Temperaturen wurde bei den durchgeführten Untersuchungen aufgrund der nicht bestimmbaren Einflüsse auf die Porenstruktur verzichtet.

### Lagerungsbedingungen

Ein oft unterschätzter oder gar nicht beachteter Faktor bei der Probenlagerung ist die Berücksichtigung der ungleichmäßigen Luftumwälzung in üblichen Klimakammern. Besonders „umgebungssensitiv“ sind Frischbetonproben, aber auch bei Proben für Schwindmessungen kann dies einen großen Einfluss besitzen.

Im verwendeten Klimaraum (20/65) wurden Proben in handelsüblichen Regalen ohne Rück- oder Seitenwände gelagert. Messungen der Verdunstungsrate von Wasser zeigten Werte zwischen  $0,086$  und  $0,191\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ . Dies entspricht einem Faktor 2,5. Bei einem Konstantklima kann man unter der Kenntnis dieser Werte die Windgeschwindigkeit nach der Formel von Menzel berechnen. Diese lag zwischen  $0,4$  und  $2,3\text{ m/s}$ .

Wie zu erwarten war, war die Verdunstungsrate des Wassers proportional zum Wasserverlust der an derselben Stelle gelagerten Betonproben. Gaspermeabilitätsmessungen der (vorher getrockneten) Proben ergaben zudem einen direkten Zusammenhang zwischen dem Permeabilitätskoeffizienten  $kT$  und dem Wasserverlust bzw. der Verdunstungsrate.

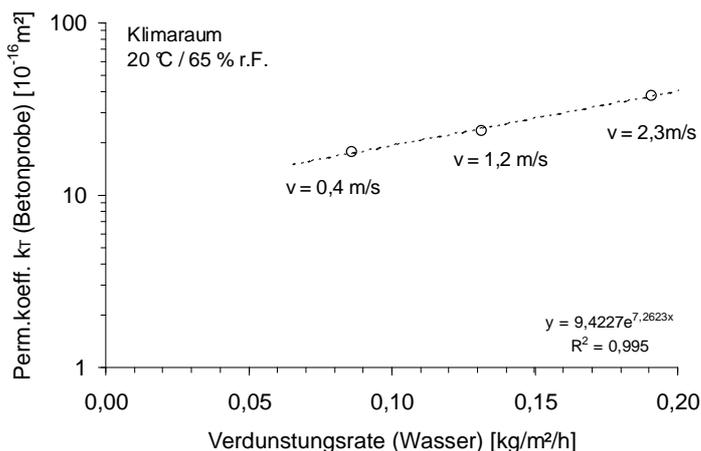


Abbildung 51: Verdunstungsrate von Wasser an unterschiedlichen Stellen einer Klimakammer und Perm.koeff.  $k_T$  der benachbarten Betonprobekörper  $a = 15 \text{ cm}$ , Klima 20/65

Die Bezeichnung „Konstantklima“ muss bei Laborversuchen also nicht nur eine konstante Temperatur und relative Luftfeuchte, sondern auch eine konstante Windgeschwindigkeit an allen Stellen eines Klimaraumes beinhalten.

Für die Verdunstung von Wasser aus Frischbeton bedeutet dies, dass die Umgebungsbedingungen maßgeblich und vor allem direkt die Festbetoneigenschaften im oberflächennahen Bereich beeinflussen und zwar sowohl im Stadium I als auch im Stadium II der Verdunstung.

### Auftragszeitpunkt des NBM

Wie bereits im Kapitel 5.5.1 gezeigt, besitzt der Auftragszeitpunkt eines NBM Auswirkungen auf den Wasserverlust nach 24 Stunden. An denselben Proben wurden nach vorheriger Konditionierung ebenfalls Gaspermeabilitätsmessungen durchgeführt. Auch hier zeigte sich, wie im vorherigen Unterkapitel gezeigt, ein direkter Zusammenhang zwischen Wasserverlust nach 24 Stunden und Permeabilitätskoeffizienten  $\log(k_T)$ .

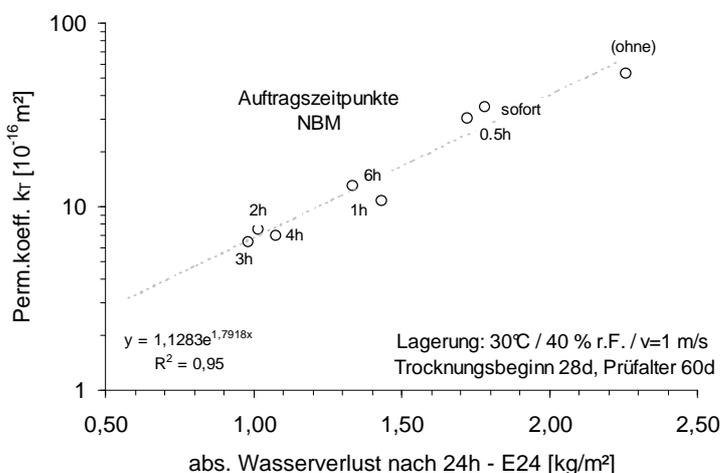


Abbildung 52: Wasserverlust in 24h und 168h und Perm.koeff.  $k_T$ , NBM N2

Die dichteste Zementsteinstruktur wird bei einem Auftrag des NBM nach zwei bis vier Stunden nach Texturierung, also drei bis fünf Stunden nach Herstellung erreicht. Dies widerspricht der gängigen Praxis, wonach ein NBM direkt im Anschluss an den Gleitschalungsfertiger appliziert wird. Der zeitliche Abstand Herstellung – Applikation beträgt hier maximal eine halbe bis eine Stunde.

### Prüfeinflüsse

Neben den bereits beschriebenen Parametern wurden folgende weitere Einflüsse überprüft. Es zeigte sich, dass für eine optimale Versuchsdurchführung die *Textur* und die *Feinmörtelschicht* der Probekörper vorsichtig mechanisch abgetragen werden muss, da ansonsten eine optimale Abdichtung der Messzellen des Torrent-Gerätes aufgrund der hohen Unterdrücke nicht sichergestellt werden kann.

Die Messungen der Proben sollten bei einer bestimmten *Temperatur* stattfinden und damit nach der Lagerung in anderen Klimaten oder Trocknungsverfahren temperiert werden, da sich die Viskosität der Luft mit der Temperatur ändert.

Die *Wiederholzeit* von etwa einer Stunde zwischen Einzelmessungen mit dem Torrent-Gerät an denselben Proben sollte stets eingehalten werden, damit ein Druckausgleich im Probeninnern stattfinden kann. Zudem muss eine regelmäßige *Kalibrierung* durchgeführt werden, um eine Null drift der Ergebnisse zu vermeiden.

Der Einfluss der Lagerung in handelsüblichen *Kunststoffschalungen* durch die Wasseraufnahme des Kunststoffs ist von untergeordneter Bedeutung. Ebenso wurde auf eine *Randabdichtung* der Proben zwischen Betonoberfläche und Schalungsrand mittels eines Dichtungsmittels wie Silikon oder Paraffinwachs (nach TL NBM) verzichtet, da sich aufgrund der steifen Schalung und der geringen Probenabmessungen kein Randspalt einstellte, der zu einer Vergrößerung der Verdunstungsfläche hätte führen können.

Werden Proben manuell und nicht auf einer automatischen Waage verwogen, muss zwingend darauf geachtet werden, dass beim Proben transport in jungem Alter keinerlei *Erschütterungen* auftreten, da sonst eine Wasserabsonderung auf der Probenoberfläche stattfinden kann, welche die Messergebnisse negativ beeinflussen kann (z.B. Bestimmung Auftragszeitpunkt NBM).

## 5.6.2 Einfluss der Nachbehandlungsmaßnahme

### 5.6.2.1 Unterschiedliche Konservierungsdauer

Auch die Versuchskörperserie mit unterschiedlicher Konservierungsdauer wurde auf die Gaspermeabilität getestet. Ebenso wie bei den vorherigen Versuchen wurde eine direkte Abhängigkeit zwischen E24 und dem Permeabilitätskoeffizienten  $\log(k_p)$  festgestellt. Auch die Druckfestigkeit  $f_c$  erwies sich als direkt abhängig vom Wasserverlust E24.

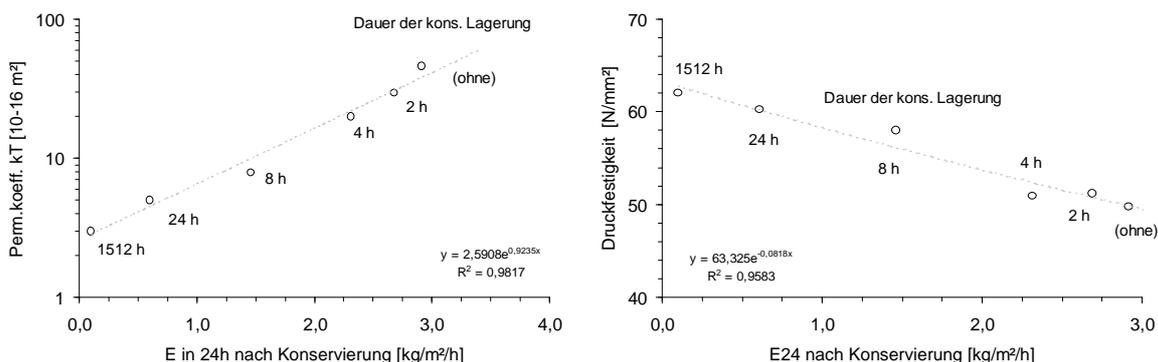


Abbildung 53: Zusammenhang zwischen der Dauer der kons. Lagerung und dem Wasserverlust nach 24h nach Ende der kons. Lagerung und dem Perm.koeff.  $k_T$  (li.) und der Würfeldruckfestigkeit ( $r_e$ ), Klima 30/40

Durch eine anschließende Trocknung bei 105 °C wurde der Anteil an freiem und physikalisch gebundenem Wasser ermittelt. Unter der Annahme, dass sich der Anteil des phys. geb. Wassers mit dem Hydratationsgrad erhöht und den ermittelten Werten für die Verdunstung bei Versuchsende, lässt sich die mittlere Zusammensetzung der Wasseranteile in den kubischen Proben zum Zeitpunkt 63d ermitteln. In Abbildung 54 ist dies in Abhängigkeit von  $E_{24}$  dargestellt.

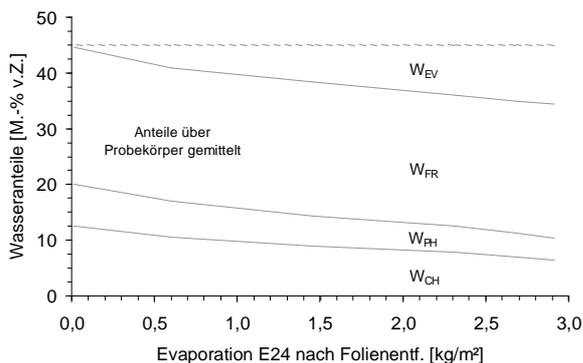


Abbildung 54: Über Probe gemittelte Wasseranteile nach 63d, Beton B1, Lagerung 30/40, unterschiedliche Konservierungsdauern, w/z-Wert 0,45, Würfel 15cm

Es lässt sich prinzipiell erkennen, dass sich im Mittel mit zunehmendem anfänglichen Wasserverlust der Anteil von  $W_{PH}$  und  $W_{CH}$  reduziert. Der Anteil des freien Wassers  $W_{FR}$  ist bei allen Proben in etwa gleich und liegt bei 50 M.-% des Zugabewassers. In den Proben bei Versuchsende dürfte dieser noch höher liegen. Da die Wasseranteile aber nicht homogen über den Probenquerschnitt verteilt sind, können die ermittelten Werte nicht direkt für eine Bewertung der Nachbehandlung verwendet werden. Aus den Ergebnissen lässt sich aber ableiten, dass im oberflächennahen Bereich aufgrund der Verdunstung überproportional weniger Wasser gebunden wird.

### 5.6.2.2 Nachbehandlung im Klima 20/65

Die im Klima 20/65 gelagerten Proben unterschiedlicher Nachbehandlung wurden nach 28 Tagen getrocknet. Anschließend wurde die Gaspermeabilität nach Torrent, die Elastizität der Oberfläche mittels Rückprallhammer nach Schmidt, die Druckfestigkeit der ganzen Proben und abschließend die Carbonisierungstiefe durch Besprühen mit Phenolphthalein bestimmt (in dieser Reihenfolge). Die Ergebnisse sind in Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 14: Festbetoneigenschaften der Versuche im Klima 20/65

Bezeichnung	E24 [kg/m <sup>2</sup> ]	kT [10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> ]	Carbo. [mm]	Rückpr. [-]	f <sub>c</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]
20-JT	0,00	2,0	1	44	54,0
20-N4	0,14	6,0	3	46	53,5
20-N2	0,40	5,7	5	38	49,0
20-N3	0,48	7,0	3	39	49,5
20-N2-oT	0,63	6,9	5	38	48,0
20-N2-2/3	0,71	8,4	4	38	51,0
20-N1	0,72	6,4	3,5	39	49,0
20-N2-sp	1,44	11,8	6	38	47,5
20-oN	1,48	12,0	7	37	45,5
20-oN-oT	1,58	13,3	8	37	48,0

Die aufgeführten Zusammenhänge sind in nachstehendem Diagramm grafisch dargestellt.

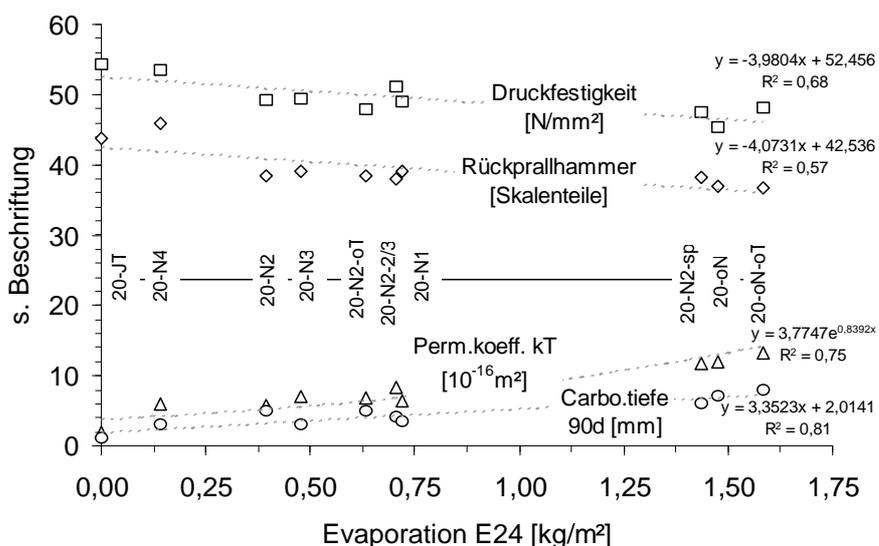


Abbildung 55: Festbetoneigenschaften der Proben im Klima 20/65

Sowohl die Festigkeitskennwerte (Druckfestigkeit, Rückprallhammer) als auch die Permeabilitätseigenschaften (Perm.koeff. kT, Carbonisierungstiefe) lieferten eine sehr gute

Korrelation zum Wasserverlust E24. Die Festigkeitskennwerte lieferten einen linearen, die Permeabilitätskennwerte einen exponentiellen Zusammenhang zum Wasserverlust. Die für den Betonstraßenbau zugelassenen NBM (VM) lagen in einem Bereich, der zwischen guten (Jutetuch - JT) und nicht bzw. sehr spät nachbehandelten Proben lag, aber entsprechend dem Wasserverlust ein durchaus gutes Nachbehandlungsverfahren darstellen.

### 5.6.2.3 Nachbehandlung im Klima 30/40 und 30/40/W

Aufgrund der beschriebenen Abhängigkeit der Verdunstung vom Auftragszeitpunkt eines NBM und von der Windgeschwindigkeit und damit dem Lagerungsort kann nur ein Teil der im Klima 30/40 durchgeführten Versuche für eine Auswertung verwendet werden, da bei der Versuchsdurchführung die Zusammenhänge zwar bekannt waren, aber noch nicht quantifiziert und damit berücksichtigt werden konnten. Somit kann auch kein genereller Vergleich zwischen den Versuchen in den Klimaten 20/65 und 30/40 erfolgen.

Prinzipiell zeigte sich jedoch auch hier ein Zusammenhang zwischen dem Wasserverlust E24 und den Permeabilitätseigenschaften.

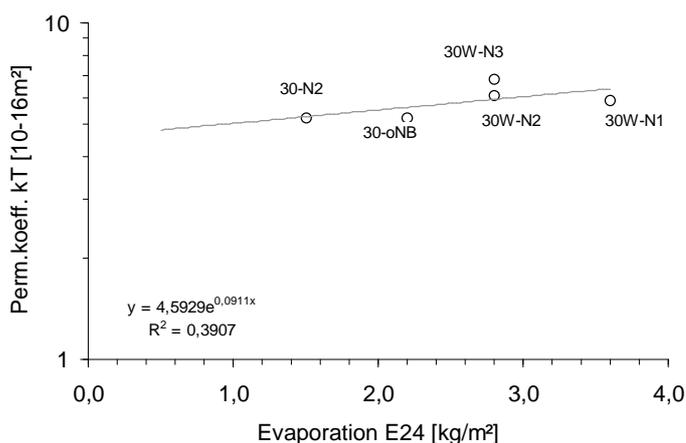


Abbildung 56: Evaporation E24 und Perm.koeff. kT der Proben im Klima 30/40

Trotz der höheren Wasserverluste war eine dichtere Betonrandzone vorhanden, die Permeabilitätskoeffizienten entsprachen denen der nicht-nachbehandelten Proben im Klima 20/65. Dies lässt sich mit der höheren Lagerungstemperatur und damit verbundenem schnelleren Hydratationsfortschritt begründen.

### 5.6.3 Biegezugfestigkeit

Für die Prüfung der Biegezugfestigkeit wurden Balken mit den Abmessungen 70·15·15 cm<sup>3</sup> mit der Einfüll- bzw. Austrocknungsseite nach unten in die Prüfvorrichtung gespannt. Die dargestellten Ergebnisse stammen aus Vorversuchen mit einem Beton B3, der bis auf die

Gesteinskörnungszusammensetzung (andere Zusammensetzung und Sieblinie) und den Zement (32,5R sd) mit dem Beton B1 identisch ist und etwas zum Bluten neigte.

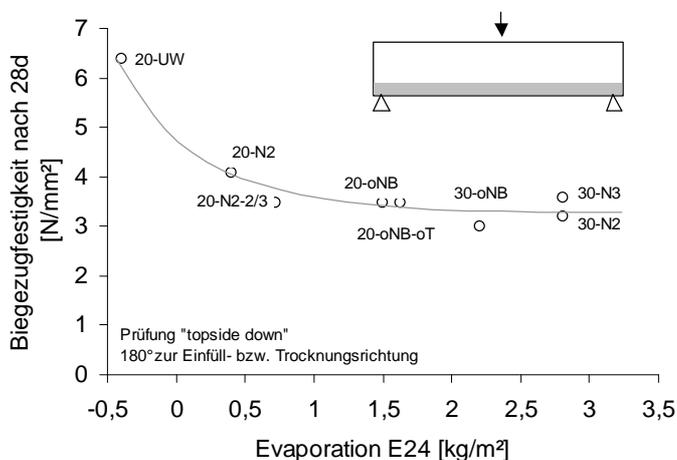


Abbildung 57: Evaporation nach 24h und Biegezugfestigkeit, Klima 20/65, 30/40 + Nachbehandlung und Unterwasserlagerung bei 20°C.

Der Zusammenhang zwischen Biegezugfestigkeit und Wasserverlust ist eher gering. Die unter Wasser gelagerten Proben wiesen eine überproportional höhere Festigkeit auf als die bei Normalklimaten gelagerten.

### 5.6.4 Korrelation Gas-/Wasserpermeabilität

Bei der Untersuchungen wurden neben der Gaspermeabilität punktuell die kapillare Wasseraufnahme nach Karstens geprüft. Obwohl beide Versuche in ihren Mechanismen unterschiedlich sind, zeigte sich eine sehr gute Korrelation zwischen beiden Kennwerten, s. Abbildung 58.

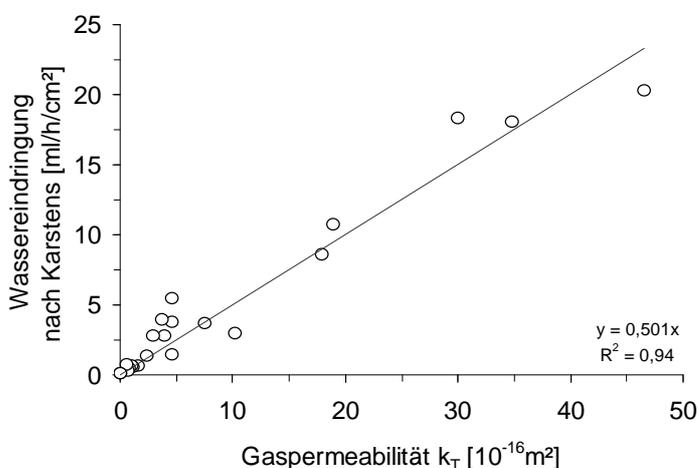


Abbildung 58: Korrelation zwischen Gaspermeabilität nach Torrent und kapillarer Wasseraufnahme nach Karstens

Als Grund hierfür kann die Nutzung desselben (Kapillar-)Porensystems angesehen werden [RILEM 1995]. Prinzipiell lassen sich somit beide Systeme zur Bestimmung der Nachbehandlungsgüte nutzen.

### 5.6.5 Einfluss Zusatzstoffe

Um den Einfluss von Zusatzstoffen, insbesondere Flugasche, auf die Verdunstung und deren Folgen abschätzen zu können, wurden zwei zusätzliche Betone, die nicht Bestandteil des zu Grunde liegenden Forschungsvorhabens waren, untersucht.

Beton B3n	Straßenbeton, CEM I 32,5, W/Z=0,45, Z=350 kg/m <sup>3</sup> , LP
Beton B3f	Str.beton mit Flugasche, CEM I 32,5, W/Z=0,45, Z=310 kg/m <sup>3</sup> , FA=102 kg/m <sup>3</sup> , LP

Die Lagerung und Nachbehandlung erfolgte im Klima 20/85 ohne NB sowie im Klima 20/65 jeweils mit und ohne NBM.

#### Verdunstung

Die Verdunstungsverläufe der Normal- und Flugaschebetone waren ähnlich. Bei den nicht-nachbehandelten Proben zeigte der Flugaschebeton eine etwas höhere Evaporation, bei den beiden anderen Lagerungs-/Nachbehandlungsarten eine etwas geringere, s. Abbildung 59.

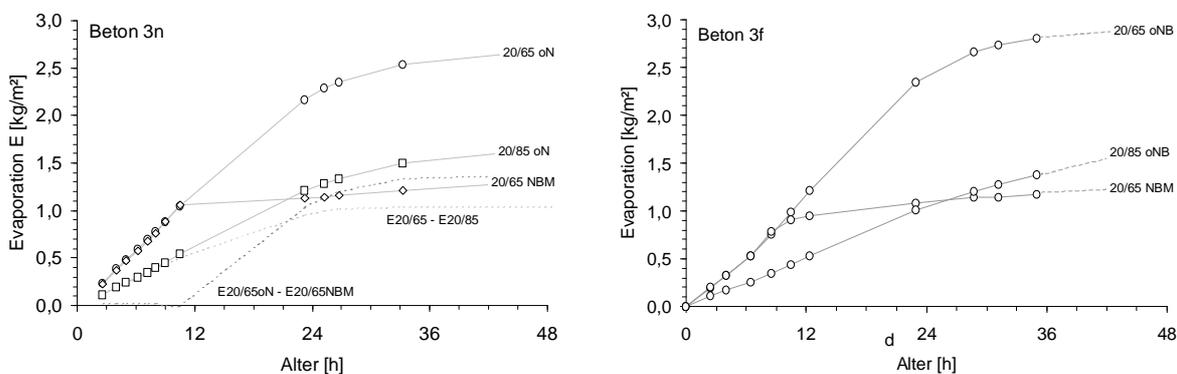


Abbildung 59: Evaporation der Betone B3n und B3f in Abhängigkeit der NB und Lagerung

Da sich die Betone im betrachteten Zeitraum aufgrund des noch nicht ausreichend gebildeten CH quasi nur in der Zementmenge unterschieden und die Flugasche nur einen geringen Hydratationsbeitrag liefert, ist die geringe Abweichung der Evaporation logisch.

## Permeabilität

Die Proben wurden nach 56d bei 70°C bis zur Massekonstanz getrocknet. Statt des Wasserverlustes nach 24 Stunden wurde hier aufgrund der besseren Korrelation der absolute Wasserverlust im Alter 36 Stunden (E36) herangezogen.

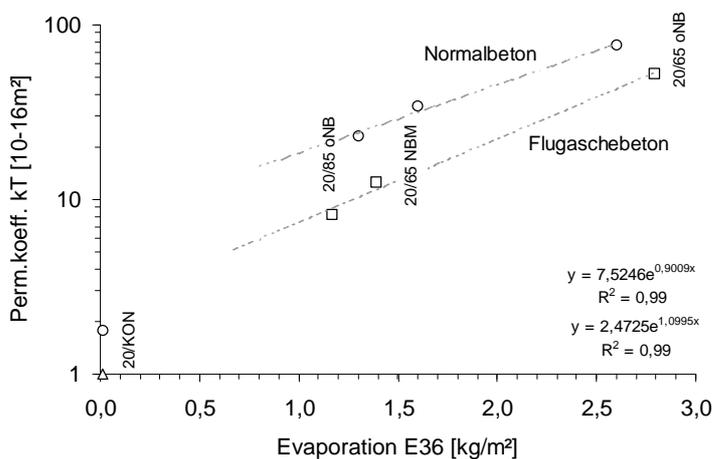


Abbildung 60: Evaporation E24 und Perm.koeff.  $k_T$  der Betone 3n und 3f in Abh. der Lagerung und NB

Bei ähnlichen Wasserverlusten nach 36 h wurden bei dem Flugaschebeton nach 56d (+Trocknungsdauer) geringere Permeabilitäten gemessen, was auf die puzzolanische Reaktion der Flugasche zurückzuführen ist, welche zu einem im Vergleich zum Normalbeton dichteren Gefüge führt. Bei beiden Betonen zeigte sich aber trotz der geringen Probenanzahl ein deutlicher Zusammenhang zwischen dem anfänglichen Wasserverlust und der Permeabilität des oberflächennahen Betons.

## Impedanzmessungen

Bei den im Klima 20/65 gelagerten Proben wurde der el. Widerstand mittels MRE bestimmt. In Abbildung 61 sind die Gradienten der Impedanzen für die Normalbetonmischung und die Flugaschemischung nach 28 Tagen für die Lagerungsarten Konservierung, NBM und ohne NB dargestellt.

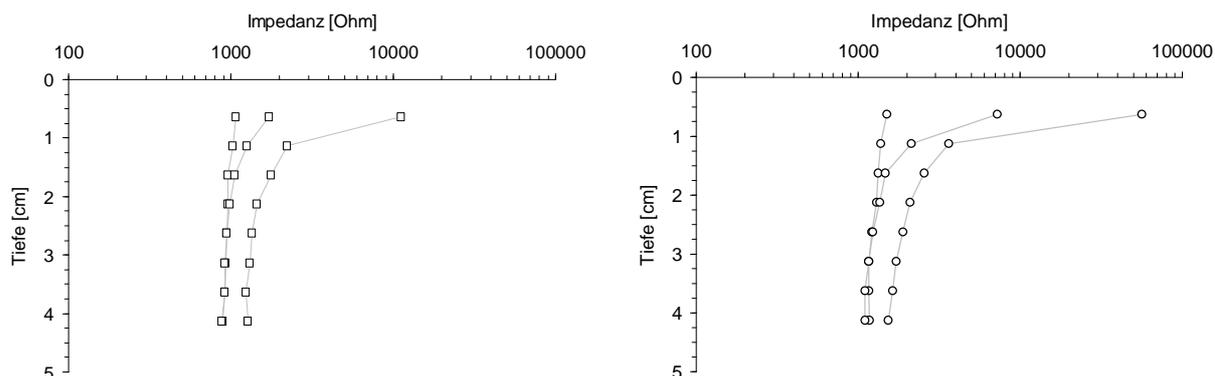


Abbildung 61: Normalbeton B3n (li.) und Flugaschebeton B3f (re.), MRE-Messungen nach 28d, Lagerung ohne NB, mit NBM und konserviert, Klima 20/65

Bei dem Beton mit Flugasche B3f zeigten sich stärkere Impedanz- bzw. Feuchtegradienten, was auf die dichtere Struktur der Zementsteinmatrix zurückzuführen ist. Auch führte ein starker frühzeitiger Wasserverlust zu einem „Austrocknen“ über den gesamten Querschnitt, zu erkennen am erhöhten el. Widerstand der nicht-nachbehandelten Proben.

### 5.6.6 Zusammenfassung der Festbetonuntersuchungen

Bezüglich der resultierenden Eigenschaften eines Betons/Mörtels kann folgendes festgehalten werden:

- Zwischen dem gewählten Kennwert E24 und den untersuchten Festbetoneigenschaften (Festigkeit und Permeabilität) besteht ein direkter Zusammenhang.
- Die Bestimmung der Gaspermeabilität nach Torrent, die Wassereindringung nach Karstens, die Carbonatisierungstiefe, die Rückprallhammerprüfung können als - vergleichender - Nachweis der Güte für eine Nachbehandlungsmaßnahme verwendet werden.
- Die genannten Verfahren lassen jedoch keine Aussage über die zeit- und tiefenabhängigen Stoffparameter zu, da sie nur integrale Kennwerte liefern.

Im folgenden Kapitel werden nach den Nachweisverfahren für übliche Festbetonkennwerte spezielle, für den Fahrbahndeckenbau wichtige Parameter bezüglich der Verkehrssicherheit (Textur - Griffigkeit) ermittelt.

## 5.7 Texturbeständigkeit

### Allgemeines

Bei der Versuchsdurchführung wurde festgestellt, dass bei einem – wie in der Praxis üblichen und damit nicht optimalen – frühen Nachbehandlungsmittelauftrag auf die noch feuchte und weiche Textur durch den Sprühdruk des NBM-Strahls und den hohen Wassergehalt der NBM eine Beeinflussung bzw. Änderung der eingebrachten Textur erfolgen kann. Eine eingebrachte Längsstrukturierung durch ein Jutetuch kann hierdurch „verlaufen“, die Textur ebnet sich ein und bildet damit eine neue Geometrie. Abhängig ist dies auch von den Frischbetoneigenschaften und den Umgebungs- bzw. Erhärtingsbedingungen. Nach dem Beanspruchungszyklus ist die oberflächennahe Feinmörtelschicht abgetragen und es kommt die grobe Gesteinskörnung des Oberbetons zum Vorschein. Die bezeichneten Oberflächen sind in Abbildung 62 dargestellt.

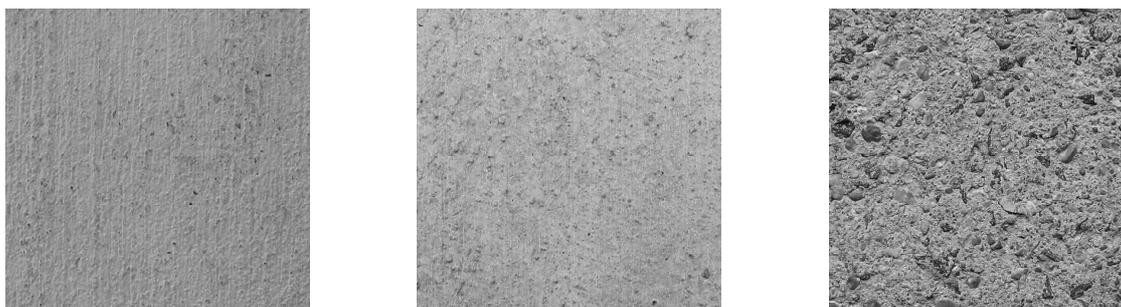


Abbildung 62: Oberfläche nach Texturierung (links), nach frühzeitigem NBM-Auftrag (Mitte) und nach Beanspruchungszyklus (rechts)

Bei der Herstellung der Versuchsserien für die Klimate 20/65 und 30/40 wurde festgestellt, dass sich die beiden Chargen trotz gleicher Frischbetoneigenschaften bezüglich des Feinmörtelgehalts unterschieden und deshalb bei der Charge im Klima 30/40 augenscheinlich eine etwas tiefere Texturierung erzielt wurde. Bei der Untersuchung und Bewertung der Oberflächen mittels Mikro- und Makrokennamplituden konnten in [Wenzl et al. 1999] die mittels Rosshaarbesens hergestellten Texturen als vergleichbar zu einer typischen Jutetextur eingestuft werden.

NM bezeichnet die Charakteristika bei Versuchsbeginn („Nullmessung“) vor der Beanspruchung der Oberfläche und EM die Kennwerte nach der Beanspruchung („Endmessung“).

### Sandflächenverfahren

Die Ergebnisse des Sandflächenverfahrens (Abbildung 63) zeigten eine Einebnung der Textur aller untersuchten Proben. Die mittlere Rautiefe nahm tendenziell ohne Korrelation zur Nachbehandlung bei allen Proben mit Ausnahme der untexturierten Oberfläche ab. Der Mittelwert aller untersuchten

Proben lag bei der Nullmessung bei 0,49 mm (Variationskoeffizient 21,4 %), nach der Beanspruchung bei 0,40 mm (Var.koeff. 18,0 %).

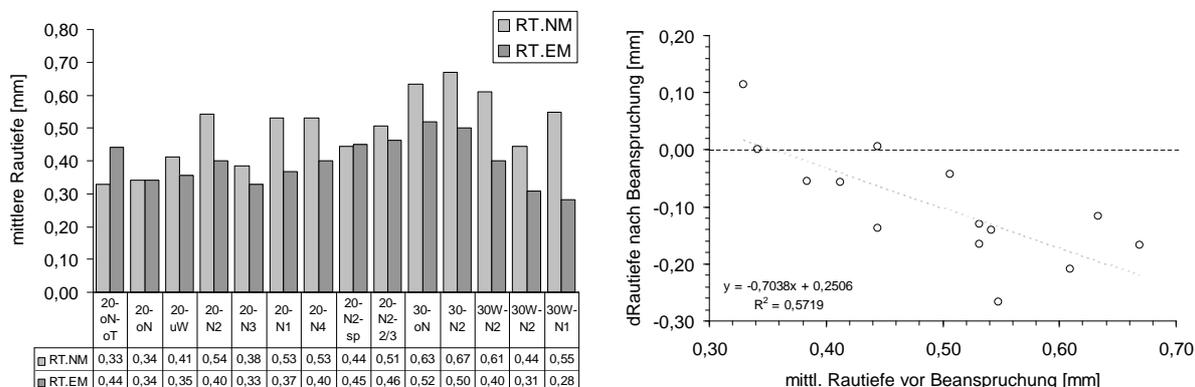


Abbildung 63: mittlere Rautiefe [mm] vor und nach der Beanspruchung (li.) und absolute Veränderung (re.) aller Proben

Die Angleichung der ermittelten Werte nach der Beanspruchung deutet auf eine Einebnung der Textur bzw. einen gleichmäßigen Abtrag des Oberflächenmörtels durch die Beanspruchungen hin.

### SRT-Pendel

Ein ähnliches Ergebnis zeigte sich bei der Bestimmung der Griffigkeit mittels SRT-Pendel, s. Abbildung 64. Hier blieb der Mittelwert aller Proben auf etwa gleichem Niveau (NM 58, EM 60) jedoch bei geringeren Streuungen (vor 11,6 %, nach 4,6 %). Die bei 30/40 gelagerten Proben wiesen vor der Beanspruchung stark unterschiedliche Griffigkeiten auf (45 bis 63 Skalenteile), nach dem Laborzyklus jedoch sehr einheitliche (59 bis 60 Skalenteile). Insgesamt zeigte sich dies auch bei den im Klima 20/65 gelagerten Proben.

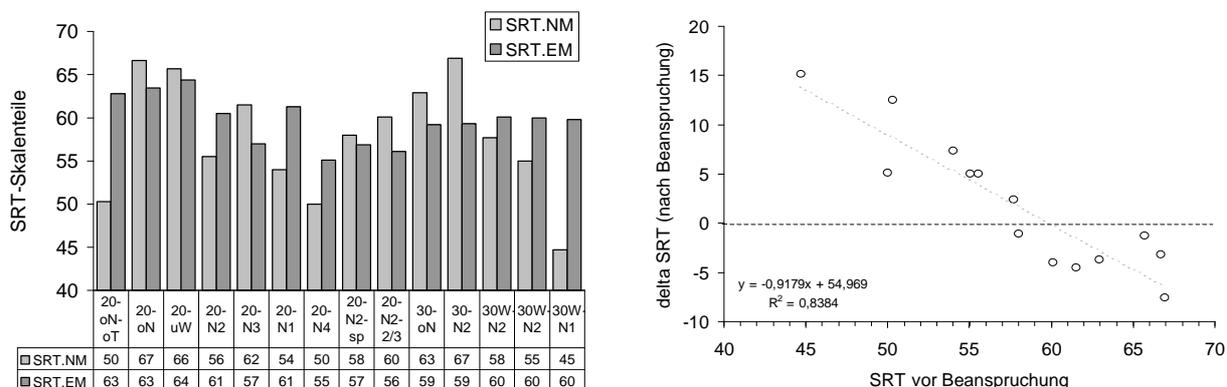


Abbildung 64: SRT-Werte [-] vor und nach der Beanspruchung (li.) und absolute Veränderung (re.) aller Proben

**Abrieb und Abwitterung**

Bezüglich des Masseverlustes durch „Abwitterung“, also nach den einzelnen Verfahrensstufen im Beanspruchungszyklus, lässt sich keine generalisierende Aussage treffen. Das lösemittelhaltige NBM (N1) löste sich nach der Frostbeanspruchung filmartig ab und führte somit zu einem hohen Masseverlust. Bei den anderen Proben ist die NBM-Abwitterung von etwa 0,5g pro Probe in den einzelnen Anteilen enthalten. Der Prallabrieb PA5 beinhaltet den Masseverlust aus lösendem Angriff, der sich erst durch die nachgeschaltete mechanische Beanspruchung einstellt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 65 dargestellt.

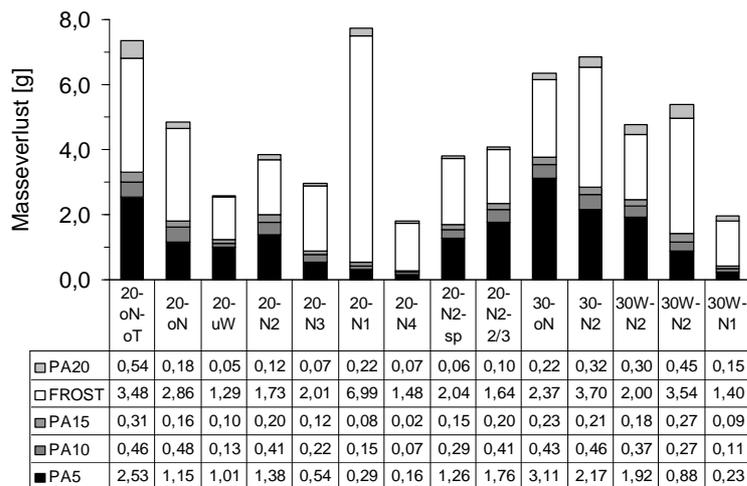


Abbildung 65: summierte absolute Masseabnahme[g] im Beanspruchungszyklus aller Proben

Prinzipiell ließ sich keine signifikante Korrelation zwischen der Abwitterung nach den einzelnen Beanspruchungsarten und einer weiteren Kenngröße wie zum Beispiel E24 feststellen.

**Kennamplituden**

Die Untersuchung der Oberflächen vor und nach der Beanspruchung mittels 3D-Laser-Scan und Auswertung zeigte mit der (erwarteten) Ausnahme der untexturierten Oberfläche kaum eine Änderung in den Kennamplituden der Makrotextur  $A_{M5,0}$ , s. Abbildung 66.

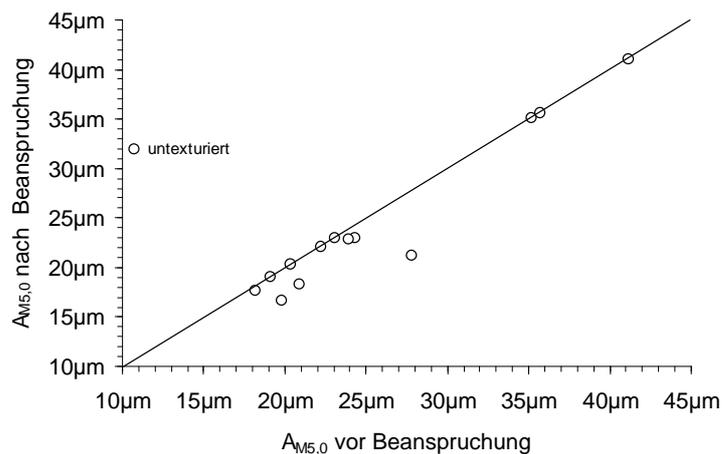


Abbildung 66: Kennamplituden für die Makrotextur  $A_{M5,0}$  aller Proben

### Zusammenfassung der Texturuntersuchungen

Ingesamt lässt sich aus den Untersuchungsergebnissen keine Tendenz ablesen. Korrelation zwischen dem Kennwert E24 und den einzelnen Beanspruchungsarten sind nur schwach ausgeprägt und besitzen Varianzen zwischen 20 und 30 %. Dies liegt vor allem am Prüfungsablauf mit kombinierter Beanspruchung und der Tatsache, dass nur die oberste Feinmörtelschicht beansprucht und abgetragen wurde. Die Güte dieser Schicht ist aufgrund der exponierten Lage an der Oberfläche nur sehr gering bis gar nicht durch Nachbehandlungsmaßnahmen beeinflussbar und damit für alle untersuchten Proben sehr ähnlich. Nach der Beanspruchung sind die Oberflächeneigenschaften im Rahmen der verfahrensbedingten Streuungen sehr ähnlich. Ob das Prüfverfahren für die durchgeführten Untersuchungen zu dominant war, kann aus den Ergebnissen nicht geschlossen werden.

## 6 Systembeschreibung

### Allgemeines

Wie gezeigt, lässt sich die Verdunstung von Wasser in jungem Alter aus ungeschützten Betonen und Mörteln in **drei Phasen** einteilen.

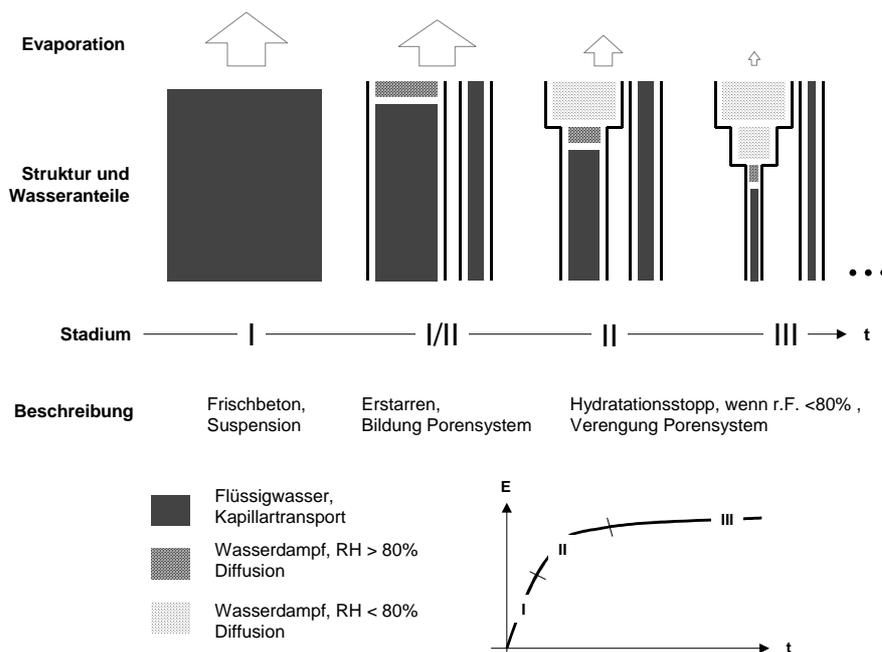


Abbildung 67: Modellhafte Darstellung von Evaporation, Struktur und freien Wasseranteilen im Beton in verschiedenen Stadien – ohne Einfluss von Carbonatisierung

Im Stadium I ab der Herstellung des Betons liegt der Beton als strukturloses Kolloid vor. Die Verdunstung entspricht der maximalen Verdunstungsrate (freie Wasseroberfläche). Der Transport findet über wasserergänzte kapillare Kanäle statt. Die verdunstete Wassermenge wird dem gesamten Querschnitt entnommen, was zu einer geringfügigen Senkung des effektiven w/z-Wertes führt. Der Hydratationsverlauf wird in dieser Phase nicht bzw. nicht signifikant beeinflusst. Dies bedeutet im Prinzip, dass der Erstarrungsbeginn indirekt Auswirkungen auf den effektiven, im Beton vorhandenen w/z-Wert besitzt. Ein verzögerter Erstarrungsbeginn und damit eine Verlängerung des Stadiums I – bedingt durch einen erhöhten Gipsgehalt im Zement, eine gröbere Mahlfineinheit des Zements oder die Verwendung von Betonzusatzmitteln wie FM – verringert resultierend den Wassergehalt gleichmäßig über den Querschnitt. Zudem beeinflusst der w/z-Wert selbst - geometrisch betrachtet als Abstandsmaß zwischen den Zementpartikeln - den Erstarrungsbeginn.

Ab dem Beginn des Erstarrens (junger Beton) beginnt das *Stadium II*, in welchem sich durch die Hydratation (Strukturbildung durch C-S-H-Phasen) ein Porensystem ausbildet, welches sich bei ungestörtem Verlauf stets weiter verfeinert. Der Verbindungsgrad der Kapillaren nimmt stetig ab. Kann von der Oberfläche durch entsprechende Umgebungsbedingungen mehr Wasser verdunsten, als durch die gebildeten Poren (kapillar und diffusiv) nachtransportiert werden kann, entsteht ein Feuchtigkeitsgefälle zur Oberfläche hin, in dem die relative Feuchte im Porensystem unter 100 % r.F. sinkt. Hierbei trocknen zuerst die Poren mit den größten Durchmessern. Dies muss zunächst noch zu keiner Verringerung der absoluten Verdunstung führen. Zusätzlich wird zunächst freies Wasser physikalisch und chemisch an und in die Reaktionsprodukte gebunden. Bei sehr geringen w/z-Werten führt die sog. Selbstaustrocknung (engl: self-dessication) zu einer zusätzlichen Absenkung der Porenfeuchte. Nach Literaturangaben wird die Hydratation bei einer Feuchte unter 100 % r.F. bereits beeinträchtigt und kommt zum Stillstand, wenn Werte von unter 80 % r.F. erreicht werden. Mit dem Eindringen der Trocknungsfront in das Probeninnere wird also auch die Hydratation zeit- bzw. tiefenabhängig gestoppt. Dies hat zur Folge, dass Bereiche wie zum Beispiel direkt an der Probenoberfläche, in denen die Hydratation nur relativ kurze Zeit ungestört ablaufen kann, ein grobes Porensystem besitzen. Je weiter ein Bereich von der Oberfläche einer trocknenden Probe entfernt ist, desto länger findet eine Hydratation statt und desto dichter ist das Gefüge des Zementsteins. Für eine Verdunstung von freiem, im Probeninnern vorhandenen Wasser über die freie Oberfläche muss aber ein Transport durch die immer enger werdenden Kapillaren im Inneren sowie die oberflächennahe Zone stattfinden. In letzterer kann eine Weiterleitung der Wassermoleküle aufgrund der geringen Feuchte nur diffusiv und damit im Vergleich zum Kapillartransport sehr langsam stattfinden. Prinzipiell verringert sich die Verdunstungsgeschwindigkeit einer Probe also durch die Verengung der Kapillaren und die Ausbildung einer aushydratisierten (trockenen) grobporösen oberflächennahen Zementsteinschicht. Betone reduzieren durch die Austrocknung im Randbereich und den damit verbundenen langsamen diffusiven Wassertransport sowie die kontinuierliche Verengung des Porensystems und den schnellen, aber damit reduzierten kapillaren Wassertransport die Verdunstungsmenge selbst. Die Reaktionsgeschwindigkeit der Hydratation beeinflusst Beginn und Ende der maßgeblichen Verdunstungsreduktion. Je länger ein Beton sich im Stadium II befindet, desto länger und damit auch tiefer (von der Oberfläche aus betrachtet) kann eine negative Beeinflussung des Hydratationsfortschrittes stattfinden.

Im *Stadium III* findet die Verdunstung auf geringem Niveau statt, es ergeben sich geringfügige Unterschiede zwischen Proben unterschiedlichen Feuchtegehalts. Die Verdunstungsgeschwindigkeit nimmt mit Zunahme der Diffusionswege stetig ab und dauert bei konstanten Umgebungsbedingungen solange, bis die Feuchte an allen Stellen der Probe der der Umgebung entspricht. Die Kapillaren sind durch die stetige Hydratation nicht mehr untereinander verbunden. Der Verdunstungsvorgang in dieser Phase bzw. die dadurch hervorgerufenen Verformungen des Zementsteins werden im Allgemeinen als Trocknungsschwinden bezeichnet. Eine Verdunstung im

Stadium III beeinflusst die resultierenden Festbetoneigenschaften und dessen Güte in nicht signifikantem Ausmaß.

Als *Grenzwert* für den Übergang vom Stadium II in das Stadium III wurde in vorliegender Arbeit für die untersuchten Mörtel/Betone und Klimate eine Verdunstungsgeschwindigkeit von  $0,025 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  definiert. Bei nicht-nachbehandelten Normalbetonen wurde dieser Wert spätestens etwa 24 h erreicht (E24). Die Spanne ungeschützter Betone lag von etwa 8 Stunden (UHPC) bis 30 Stunden (Beton mit Flugasche).

*Zusätzliche Einflüsse* wie den der Carbonatisierung der Randbereiche verbunden mit einer Verfeinerung bzw. Verdichtung des Porensystems und daraus resultierend erhöhter Festigkeit und Dichtigkeit konnten nicht explizit nachgewiesen werden.

### **Stoffparameter**

Im relevanten Alter (Stadium II) zwischen Herstellung bis etwa max. zwei Tage ändern sich die Stoffeigenschaften des Zementsteins sehr stark und schnell. Durch übliche Verfahren sind diese zudem aufgrund der geringen Ausprägung der Eigenschaften (z.B. Druckfestigkeit, Porensystem) nicht bzw. nicht exakt genug feststellbar. Eine Bestimmung von feuchtetechnischen Kennwerten würde zudem in die Hydratation und damit die Ergebnisse eingreifen. Hinzu kommt, dass mit der Porenstruktur auch die Zementsteineigenschaften nicht nur zeit-, sondern durch den Einfluss der Evaporation auch tiefenabhängig sind.

Es können somit keine experimentellen diskreten Werte für die Feuchtespeicherfunktion, den Flüssigtransportkoeffizient und die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl ermittelt werden und müssten somit abgeschätzt werden.

## 7 Zusammenfassung

Bei den durchgeführten Untersuchungen handelt es sich im Wesentlichen um

- Betrachtung der Verdunstung von Wasser aus Beton ab der Herstellung, Bestimmung eines charakteristischen Kennwerts der Verdunstung
- Überprüfung der Lagerungseinflüsse und Verfahren für die Probenkonditionierung
- Nachweis der dauerhaftigkeitsrelevanten Festbetoneigenschaften (Permeabilität, Festigkeit) durch geeignete Verfahren
- Bestimmung der Auswirkung einer Nachbehandlung auf die Textur (und Griffigkeit)
- Korrelation zwischen Verdunstungskennwert und Festbetoneigenschaften, Aussage über die Nachbehandlungsgüte eines Verfahrens
- Direkte Nachweisverfahren für die Wasserbindungen

Bei den Untersuchungen zur Evaporation von Normalbeton unter üblichen Bedingungen stellte sich ein charakteristischer Verlauf ein, der sich prinzipiell in drei Stadien einteilen lässt. Im ersten Stadium ist die Verdunstung sehr hoch, da der Beton als Suspension vorliegt. Mit der Ausbildung eines Porensystems im Stadium II, beginnend mit der Erstarrung, trocknen große Poren an der Oberfläche aus und die Kapillaren verengen sich durch den Hydratationsfortschritt. Dies führt zu einer starken Verdunstungsminderung über die Oberfläche, da ein Nachtransport von Wasser aus dem Inneren stark verlangsamt wird. Ist das Stadium III nach etwa 24 bis 48 Stunden erreicht, befindet sich die Verdunstung auf einem sehr niedrigen Niveau und nimmt zeitabhängig ab, bis sich ein Gleichgewichtszustand Beton/Umgebung einstellt. Der absolute Wasserverlust zu Beginn des Stadiums III ist ein charakteristischer Kennwert für einen Beton. Grundsätzlich ist der Wasserverlust ein maßgeblicher Kennwert bei Untersuchungen zur Nachbehandlung, der aber bei fast allen Literaturstellen missachtet wird.

Die Lagerungsbedingungen besitzen einen großen Einfluss auf die Versuchsergebnisse, da die ortsabhängigen Windgeschwindigkeiten in üblichen Klimakammern den konvektiven Wasserabtransport von verdunstetem Wasser auf der Oberfläche beeinflussen. Dies betrifft vor allem Verdunstungsversuche aber auch Versuche zum Trocknungsschwinden. Vor der Bestimmung von Transport- oder Permeabilitätskoeffizienten muss das Kapillarporensystem frei von Wasser sein, da die Messergebnisse sonst deutlich beeinflusst werden und nicht korrigierbar sind. Hierbei ist bei Ofentrocknung eine Mikrorissbildung und Nachhydratation nicht zu vermeiden, beeinflusst aber vergleichende Untersuchungen nur in geringem Ausmaß.

Als geeignete Nachweisverfahren zur Bestimmung der Güte einer Nachbehandlungsmaßnahme erwies sich die Gaspermeabilitätsmessung nach Torrent. Auch die Carbonatisierungstiefe, der Rückprallhammer nach Schmidt und die Druckfestigkeit lieferten sehr gute Ergebnisse. Die Untersuchungen zu den Textureigenschaften vor und nach praxisnahen Beanspruchungen zeigt, dass eine Nachbehandlung bzw. deren Güte nicht mit der Texturbeständigkeit korreliert werden kann, da sich die Qualität der obersten Zementleimschicht und der darunter liegenden, kaum mehrere mm dicken Zementsteinschicht kaum durch Nachbehandlungsmaßnahmen beeinflussen lässt und zudem von Carbonatisierung beeinflusst wird.

Es zeigte sich eine sehr gute Korrelation zwischen dem Wasserverlust bis zum Beginn des Verdunstungsstadiums III und den bestimmten Festbetoneigenschaften. Dies bestätigt die Richtigkeit der getroffenen Annahmen und bietet einen wichtigen Anhaltspunkt für weitere Untersuchungen und Entwicklungen.

Der Einsatz von flüssigen filmbildenden Nachbehandlungsmitteln im Betonstraßenbau ist damit berechtigt und nützlich. Der Nachweis der Sperrwirkung nach TL NBM muss in der nächsten Fassung korrigiert werden, liefert dann aber eine gute Aussage. Ein später Auftragszeitpunkt eines heute handelsüblichen NBM sollte in der Praxis umgesetzt werden, um eine bessere Wirkung zu erzielen. Eventuell liefert ein zweifacher Auftrag (sofort, nach einigen Stunden) noch bessere Ergebnisse.

Die Nachweise der Wasserbindungen zeigten, dass mit dem Beginn des Stadiums III ein Hydratationsstopp in den oberflächennahen Bereichen eintritt, da dort die relative Feuchte Werte unter 80 % erreicht.

Ein Nachweis des freien Wassers über die Tiefe mittels Impedanzmessungen einer Multi-Ring-Elektrode ist nach Kalibrierung durch Trocknung sehr gut möglich.

Im *Rahmen dieser Arbeit* wurden also bekannte Zusammenhänge und sehr einfache Kennwerte und Nachweisverfahren entwickelt und verwendet, um die Güte und damit die Folgen einer Nachbehandlung nachzuweisen. Dies liegt in der Literatur in dieser Form bisher nicht vor und bietet nun Möglichkeiten zur Anwendung in der Praxis sowie Potenzial zu weiterer Forschung.

### **Ausblick**

Um dieses komplexe Thema zu vertiefen, wäre auf der theoretischen Ebene eine Kombination aus Feuchte- und Wärmetransport auf der einen Seite (wie z.B. WUFI) und Hydratation auf der anderen (z.B. CEMHYD3D, DUCOM, HYMOSTRUC) wünschenswert bzw. notwendig. Diese Möglichkeit besteht zur Zeit nicht. Es gibt zwar Bestrebungen, durch wechselseitiges Einsetzen der jeweilig ermittelten und fehlenden Parameter das beschriebene Problem zu lösen, dies ist jedoch fehlerbehaftet und mit einem hohen manuellen Einsatz verbunden.

Auf experimenteller Ebene bieten sich noch Versuche zum Einfluss der Wärme und Strahlung oder verschiedenen Betonen (Zemente, Zusatzstoffe, w/z-Werte) auf Hydratation und Feuchtetransport an, da bisher nur grundsätzliche Aussagen getroffen werden konnten. Zudem wäre eine versuchstechnische Bestimmung von Kennwerten bezüglich der Feuchteleitung sehr interessant.

**ZITIERTE LITERATUR**

- ACI 1996** ACI 305R-96: Hot Weather Concreting. Manual of Concrete Practice, Part 2, American Concrete Institute, 1996
- Adam 2006** Adam, T.: Ein Modell zur Beschreibung der Hydratation in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt, Dissertation, TU Darmstadt, 2006
- Baroghel-Bouny 1994** Baroghel-Bouny, V.: Microstructure and Moisture Characterization of Ordinary and Very High Performance Cement Pastes and Concretes, Ph.D. Thesis, Ecole Nationale de Ponts et Chaussees, Paris, 1994
- Bentz 1991** Bentz, D.P., Graboczi, E.J.: Percolation of Phases in a Three-Dimensional Cement Paste Microstructural Model, Cement and Concrete Research, Vol. 21, S. 324-344, 1991
- Bloem 1960** Bloem, D.: Plastic Cracking of Concrete, Engineering Information, National Ready Mixed Concrete Association / National Sand and Gravel Association, July 1960, 2 Seiten
- Catharin 1979** Catharin, P.: Hydratationswärme und Festigkeitsentwicklung, Teil 1, 10/1978, S. 539-544; Teil 2, 12/1978, S. 729-733; Teil 3, 1/1979, S. 59-62, Zement-Kalk-Gips
- CEMHYD3D** Computer Program -CEMHYD3D: A Three-Dimensional Cement Hydration and Microstructure Development Modelling Package. Version 2.0 (4/2000), National Institute of Standards and Technology, 2000
- CEB 182** Durable Concrete Structures – CEB Design Guide, Bulletin d'Information No. 182, Second Edition 1989
- Day 1985** Day, R.L. et al: Measurement of the Permeability of Concrete containing Fly Ash, in Proceedings of the 7th International Ash Utilization Symposium and Exposition, Orlando, Vol. II, S. 811-821
- DIN EN 1045-3** DIN EN 1045-3:2002 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 3: Bauausführung
- Dorner 1980** Dorner, H.W., Setzer, M.J.: Tieftemperatur-DTA-Untersuchungen des Zementsteingefüges bei unterschiedlichem Hydratationsgrad, Cement and Concrete Research, Vol.10, No.3, S. 403-411
- Frentzel 2005** Frentzel-Schirmacher, A.: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben FE-Nr.: 08.174/2002/LRB: Bestimmung des Sperrkoeffizienten nach TL NBM-StB 96, Bauhaus-Universität Weimar, 2005
- Grube 1990** Grube, H.: Ursachen des Schwindens von Beton und Auswirkungen auf Betonbauteile, Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf, 1990

- Grübl 1998** Grübl, P.: Einfach aber wirksam: Nachbehandlung von Betonfertigteilen; Betonwerk + Fertigteil-Technik, Heft 2/1998, S. 103-109
- Grübl 2001** Grübl, P., Weigler, H., Karl, S.: Beton – Arten, Herstellung und Eigenschaften, Berlin, Ernst und Sohn, 2001
- Gutsch 1999** Gutsch, A.: Stoffeigenschaften des jungen Betons – Versuche und Modelle, Dissertation, TU Braunschweig, 1999
- Hauggaard 1997** Hauggaard-Nielsen, A.B.: Mathematical Modelling and Experimental Analysis of Early Age Concrete, Institut for Baerende Konstruktioner og Materialer, Technical University of Denmark, 1997
- Hilsdorf 1997** Hilsdorf, H.K., Reinhardt, H.-W.: Beton, Betonkalender 1997, Teil 1, S. 1-150
- Ho 1989** Ho, D.W.S et al.: The Influence of Humidity and Curing Time on the Quality of Concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 19, S. 457-464, 1989
- Hohnert 2003** Hohnert, D., et al.: Nachbehandlung von Beton zur Verringerung des Wasserverlustes und der Reduzierung von Ausblühungen, Tagungsbericht IBAUSIL, Weimar, 2003, S. 1281-1290
- Huber et al. 2005** Huber, J., Czerner, Chr.: Bestimmung des optimalen Auftragszeitpunktes von Nachbehandlungsmitteln (NBM), wissenschaftlicher Kurzbericht Nr.2 (2005), Centrum Baustoffe und Materialprüfung, TU München, 2005
- Jacobsen 1999** Jacobsen, S., Aarseth, L.-I.: Effect of wind on drying from wet porous building materials surfaces – A simple model in steady state, Materials and Structures, Vol. 32, January/February 1999, S. 38-44
- Jensen et al. 1999** Jensen, O.M., et al.: Clinker mineral hydration at reduced relative humidities, Cement and Concrete Research, 29 (1999), S. 1505–1512
- Jeong 2003** Jeong, J.-H.: Development of Test Methodolgy and Model for Evaluation of Curing Effectiveness in Concrete Pavement Construction, Meeting of the Transportation Research Board, Washington, 2003
- Kern 1998** Kern, R.: Der Einfluss der Austrocknung auf die Wasserbindung und Eigenschaften des Betons, Dissertation, Darmstadt, 1998
- Kießl 1983** Kießl, K.: Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen, Rechnerische Erfassung und bauphysikalische Anwendung, Dissertation, Universität Essen, 1983
- Klopfer 1974** Klopfer, H.: Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen, Bauverlag, Wiesbaden, 1974

- Krischer 1992** Krischer, O.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik, Springer, 1992
- Kropp 1983** Kropp, J.: Karbonatisierung und Transportvorgänge in Zementstein, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1983
- Locher 2000** Locher, F.W.: Zement – Grundlagen der Herstellung und Verwendung, Verlag Bau und Technik, 2000
- MC 1990** CEB-FIB Model-Code 1990, Final Draft, Bulletin d'Information No. 205, Lausanne, July 1991
- Menzel 1954** Menzel, C.A.: Causes and Prevention of Crack Development in Plastic Concrete, Portland Cement Association Annual Meeting, 1954, S. 130-136
- MOB 2000** Merkblatt für die Herstellung von Oberflächentexturen auf Fahrbahndecken aus Beton (MOB); Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Ausgabe 2000
- Mills 1966** Mills, R.H., Factors Influencing Cessation of Hydration in Water-Cured Cement Pastes, Special Report No. 90, Highway Research Board, Washington, D.C., 1966, S. 406-424.
- Molina 1992** Molina, L.: On Predicting the Influence of Curing Conditions on the Degree of Hydration, Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1992
- Neville 1996** Neville, A.M.: The Properties of Concrete, Wiley and Sons, New York, 1996
- Nischer 1976** Nischer, P.,: Austrocknen von jungem Beton, Betonwerk- und Fertigteil-Technik, 1976, Teil 1: Heft 3, S. 117-120, Teil 2: Heft 4, S. 180-184, Teil 3: Heft 5, S. 242 – 246
- Pantozopoulo 1995** Pantazopoulo, S.J., Mills, R.H.: Microstructural Aspects of the Mechanical Response of Plain Concrete, ACI Materials Journal, Vol. 92 (1995); No. 6, S. 605 - 616
- Powers 1947a** Powers, T.C., Brownyard, T.L.: Studies of the physical properties of hardened portland cement, Bulletin No. 22 der Portland Cement Association, Journal of the American Concrete Institute, 43 (1947)
- Powers 1947b** Powers, T.C.: A Discussion of Cement Hydration in Relation to the Curing of Concrete, Proceedings of the Highway Research Board, Volume 27, 1947
- Powers 1959** Powers, T.C.: Capillary Continuity or Discontinuity in Cement Pastes, PCA Bulletin, No. 10, S. 2-12, 1959
- Powers 1962** Powers, T.C.: Physical Properties of Cement Paste, Proceedings of the Fourth International Conference on the Chemistry of Cement, U.S. National Bureau of Standards Monograph 43, Vol.2, S. 577-613

- Richartz 1965** Richartz, W., Locher F.W.: Ein Beitrag zur Morphologie und Wasserbindung von Calciumsilikathydraten und zum Gefüge des Zementsteins. Zement-Kalk-Gips, 1965, Heft 9, S. 449-259
- RILEM 1995** Kropp, J., Hilsdorf, H.K. (Editors): RILEM Report 12: Performance Criteria for Concrete Durability, E&FN Spon, 1995
- RILEM 1984** RILEM, CP11.3, Absorption of water by immersion under vacuum, Materials and Structures / Research and Testing, No. 101, S. 393-394, 1984
- Rucker 2006** Rucker, P., Beddoe, R.: Wasser- und Salzhaushalt im Gefüge zementgebundener Baustoffe - Modellierung der auftretenden Mechanismen, Beton- und Stahlbetonbau, 06/2006, S. 402-412
- Schießl et al. 1997** Schießl P., Souchon T., Breit W.: Berechnungsmodell zur Bestimmung von Feuchtigkeitsgehalten aus Widerstandsmesswerten der Multi-Ring-Elektrode ermittelt in der Betonrandzone mittels Einbausensoren, Abschlussbericht F 538 ibac, Aachen, 1997
- Schießl 2004** Schießl, P.: Nachbehandlung und Oberflächenqualität von Beton, Skriptum, der TU München, Centrum Baustoffe und Materialprüfung, München, 2004
- Schwenk 2002** Schwenk Zement KG (Hg.), Betontechnische Daten, Ulm, 2002
- Scrivener 1996** Scrivener, K.L., Nematy, K.M.: The Percolation of Pore Space in the Cement Paste / Aggregate Interfacial Zone of Concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 1, S. 35-40, 1996
- Setzer 1987** Setzer, M.J.: Einwirkung von Kohlendioxid, Schwefeldioxid und Wasser auf Beton, Fachtagung: Langzeitverhalten und Instandsetzen von Ingenieurbauwerken aus Beton, BBIV, Baustoffinstitut, TU München, 1987
- Setzer 1997** Setzer, M.J.: CDF-Test: Frost-Tausalz-Widerstand von Betonen, Prüfung mit Taumittel-Lösung; Beton und Fertigteiltechnik; Heft 4, 1997
- Shi-Ping 1989** Shi-Ping, J., Grandet, J.: Evolution comparee des porosites des mortiers de ciment au laitier et des mortiers de ciment portland, Cement and Concrete Research, Vol. 19, No. 3, S. 487-496
- Skriptum T+F** Skriptum Transportvorgänge und Formänderungen des Lehrstuhls für Baustoffkunde der TU München, Oktober 2001
- Spears 1983** Spears, R.E.: The 80 Percent Solution to Inadequate Curing Problems, Concrete International, April 1983, S.15-18
- Springenschmid 1980** Springenschmid, R.; Brunner, M.: Untersuchungen über den Einfluss der Zuschläge im Mörtel- und Grobkornbereich auf die Griffigkeit von Betonoberflächen bei

unterschiedlicher mechanischer Beanspruchung; Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik; Heft 298; 1980

**Stark 2001** Stark, J. et al.: Neue Ansätze zur Zementhydratation; ZKG International Jg.: 54, Nr.1, 2001 , S.52-60

**Stark 2004** Stark, J. et al.: Hydratation von Portlandzement; Lehrbrief des F.A.Finger-Instituts für Baustoffkunde; Bauhaus-Universität Weimar; 2004

**Tacke 2002** Tacke, R.: Feuchte- und Festigkeitsentwicklung hydratisierenden Betons – Modellierung und numerische Analyse, Dissertation, TU Braunschweig, 2002

**Tauscher 2004** Tauscher, F.: Tauscher, Franka: Einfluss des Wassergehalts auf die Gaspermeabilität von Mörtel und Beton, Dissertation, Duisburg 2004

**TL NBM 1996** TL NBM-StB 1996: Technische Lieferbedingungen für flüssige Beton-Nachbehandlungsmittel, Ausgabe 1996; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen

**Torrent o.J.** Torrent, R.J., Frenzer, G.: Über die Permeabilität des Überdeckungsbetons; in: Torrent Permeability Tester – Bedienungsanleitung, ohne Jahresangabe

**Torrent et al. 1995** Torrent, R., Frenzer, G.: A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the „covercrete“, Int. Symposium Non-destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), 1995

**Ungricht 2004** Ungricht, H.: Wasserhaushalt und Chlorideintrag in Beton – Einfluss der Exposition und der Betonzusammensetzung, Dissertation, ETH Zürich, 2004

**Uno 1995** Uno, P.: Plastic Shrinkage Cracking and Evaporation Formulas, ACI Materials Journal, July-August 1998, S. 365-375

**van Breugel 1991** van Breugel, K.: Simulation of Hydration and Formation of Structure in Hardening Cement-Based-Materials - Second Edition, PhD-Thesis, Delft, 1991

**Walz 1970** Walz, K.: Beziehung zwischen Wasserzementwert, Normfestigkeit des Zements und Betondruckfestigkeit; Beton 20 (1970), Nr. 11, S. 499-503

**Wenzl et al. 1999** Wenzl, P., Beckhaus, K.: Dauerhaftigkeit von Betondeckenoberflächen – FE 8.157 LRB; Forschungsbericht, Bundesanstalt für Straßenwesen, 1999

**Wenzl 2008** Wenzl, P.: Dauerhaftigkeit der Oberflächeneigenschaften von texturierten Verkehrsflächen aus Beton, Dissertation, TU München 2008

**Wiegrink 2002** Wiegrink, K.: Modellierung des Austrocknungsverhaltens von Calciumsulfat-Fließstrichen und der resultierenden Verformung, Dissertation, TU München, 2002

**Wittmann, 1966** Wittmann, F.H.: Hydratation und Festigkeit einer frühzeitig ausgetrockneten Portlandzementprobe, Zement-Kalk-Gips, Vol. 19 (1966), No. 9, S. 448-451

**Wittmann 1977** Wittmann, F.H.: Grundlagen eines Modells zur Beschreibung charakteristischer Eigenschaften des Betons, Schriftenreihe des DAFStb, Heft 290, 1977

**WUFI** WUFI Pro 4.1, PC-Programme zur Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen, Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.

**Ye et al. 2005** Ye, D., Avelar, I., Zollinger, D.: Moisture Monitoring and Curing Quality in Concrete Pavement Construction, CEAT Workshop on Airport Pavement Instrumentation, Texas Transportation Institute, 2005

**Young 1973** Young, J.F., Berger, R.L., Lawrence, F.V.: Studies on the hydration of tricalcium silicate pastes III. Influence of admixtures on hydration and strength development, Cement and Concrete Research, Vol. 3 (1973), No. 6, S. 689-700

**ZTV 2001** ZTV Beton-StB 01: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton, Ausgabe 2001

**ZTV KO 2001** Grüning, R., Schuster F.O.: ZTV Beton-StB 01, Ausgabe 2001 – Kommentar unter Berücksichtigung neuer Normen; Kirschbaum Verlag GmbH, Bonn, 2002