Betoninstandsetzung unter Wasser

Mörtelentwicklung und Applikationstechniken

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg-Harburg
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieurin (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von
Lina Phan Anh Nguyen-Sauerbaum, geb. Nguyen

aus
Lüneburg

2017

1. Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Frank SCHMIDT-DÖHL Technische Universität Hamburg-Harburg Institut für Baustoffe, Bauphysik und Bauchemie
2. Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Michael RAUPACH RWTH Aachen Institut für Bauforschung
1. zusätzlicher Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Ralf OTTERPOHL Technische Universität Hamburg-Harburg
Vorsitzender des Promotionsausschusses:	Prof. Dr.-Ing. Ralf OTTERPOHL Technische Universität Hamburg-Harburg

Tag der mündlichen Prüfung: 18.10.2017
urn:nbn:de:gbv:830-88217114

Ich danke allen, die mich beim Entstehen dieser Arbeit unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Stand der Technik **1**

1.1. Einleitung 1
1.2. Derzeitiger Umgang bei Instandsetzungsmaßnahmen an Wasserbauwerken . . . 3
1.2.1. Deutschland 3
1.2.2. USA 5
1.3. Vorliegende praktische Erfahrungen 6
1.3.1. Sanierung von ebenen Flächen (Wände) 6
1.3.2. Sanierung von Pfählen 8
1.3.2.1. Verfahrensbeschreibung 9
1.3.2.2. Versuchsdurchführung 9
1.4. Bedarf und Zielsetzung 11

2. Anforderungen an ein zukünftiges Instandsetzungsverfahren **13**

2.1. Anforderungen an den Betonuntergrund 13
2.2. Anforderungen an den Instandsetzungsmörtel 15
2.2.1. Zementmörtel 17
2.2.2. Kunststoffmodifizierte Mörtel 18
2.3. Anforderungen an den Verbund 19
2.4. Anforderungen an die Applikationstechnik 19

3. Grundlagen **21**

3.1. Theoretische Grundlagen verwendeter Ausgangsstoffe 21
3.1.1. Portlandzement 21
3.1.2. Aluminatzement 21
3.1.3. Spritzbetonzement 22
3.1.4. Flugasche 22
3.1.5. Fließmittel 23
3.1.6. Luftporenbildner 23
3.1.7. Stabilisierer 24
3.1.8. Polymerdispersionen 25
3.1.9. Abbinderegler 27
3.1.9.1. Beschleuniger 28
3.1.9.2. Verzögerer 28
3.1.9.3. Dosierung von Abbindeverzögerern 31
3.1.9.4. Erstarrungszeit steuern über die Zementmischung 32
3.2. Feinstoffoptimierung und Packungsdichte von Partikeln 35
3.2.1. Hohlraum von Korngemischen 36
3.2.2. Packungsdichte von Partikeln und Feinstoffoptimierung 36

3.2.3. Experimentelle Optimierung nach PUNTKE . . . 37
3.2.4. Theoretische Optimierung . . . 39
3.2.4.1. Optimierung nach FULLER und THOMPSON . . . 40
3.2.4.2. Optimierung nach FUNK und DINGER . . . 40
3.2.4.3. Wahl des Verteilungsmoduls q . . . 42
3.2.5. Grundlagen zur Berechnung der Packungsdichteoptimierung . . . 42
3.3. Der Verbund . . . 45
3.3.1. Adhäsion . . . 45
3.3.1.1. Mechanische Adhäsion . . . 46
3.3.1.2. Spezifische Adhäsion . . . 47
3.3.2. Oberflächenbeschaffenheit und Verbund . . . 51

4. Prüfverfahren an Mörtel und Beton 55
4.1. Prüfungen am Frisch- und Festmörtel . . . 55
4.1.1. Verarbeitbarkeit und Konsistenz . . . 55
4.1.2. Erstarrungszeiten . . . 56
4.1.3. Biegezug- und Druckfestigkeit des Mörtels . . . 60
4.2. Prüfverfahren am Beton . . . 61
4.2.1. Druckfestigkeit . . . 61
4.2.2. Rautiefe der Betonoberfläche . . . 62
4.2.3. Technische Regeln zu Prüfverfahren von Oberflächenzug-, Abreiß- und Haftzugfestigkeiten . . . 64
4.2.3.1. Unterschiede der technischen Regeln . . . 67
4.2.3.2. Gemeinsamkeiten der technischen Regeln . . . 69
4.2.3.3. Einschränkungen der technischen Regeln . . . 70
4.2.4. Abreißfestigkeit des Betonungergrundes (Ermittlung der Abreißfestigkeit) 70
4.3. Prüfungen des Verbundes zwischen Mörtel und Beton . . . 73
4.3.1. Haftzugfestigkeit zwischen Mörtel und Beton (Ermittlung der Haftzugfestigkeit) . . . 74
4.3.2. Untersuchungen in der Verbundzone . . . 75

5. Werkstoffe und Applikationstechnik inklusive Diskussion 77
5.1. Herangehensweise . . . 77
5.2. Verwendeter Betonuntergrund . . . 77
5.2.1. Betonuntergrundeigenschaften . . . 81
5.2.1.1. Druckfestigkeit . . . 81
5.2.1.2. Abreißfestigkeit . . . 81
5.2.1.3. Rautiefen . . . 81
5.2.2. Oberflächenenergie und Kontaktwinkel . . . 82
5.3. Mörtelentwicklungen . . . 86
5.3.1. Vorüberlegungen . . . 86
5.3.1.1. Erstarrungszeiten . . . 86

5.3.1.2. Verarbeitbarkeit und Zusammenhaltevermögen 87
5.3.1.3. Randbedingungen aus Regelwerken 89
5.3.2. Vorgehensweise 89
5.3.2.1. Mischungsverhältnis Aluminat- und Portlandzement 91
5.3.2.2. Mischungen Spritzbetonzement mit verschiedenen verzögernden Mitteln 92
5.3.2.3. Mischungen mit Zusatzmitteln / Zusatzstoffen 93
5.3.2.4. Mischungen mit Polymeren 94
5.3.2.5. Erkenntnisse aus den Vorversuchen 95
5.3.3. Verwendete Baustoffe 95
5.3.3.1. Spritzbetonzement 96
5.3.3.2. Gesteinskörnung 96
5.3.3.3. Flugasche 96
5.3.3.4. Luftporenbildner 96
5.3.3.5. Fließmittel 97
5.3.3.6. Polymerdispersionen 97
5.3.3.7. Weinsäure 99
5.3.4. Kornform gewählter Stoffe 99
5.3.5. Korngrößenverteilung gewählter Stoffe 102
5.4. Packungsdichteoptimierung 103
5.4.1. Theoretische Optimierung mit Matlab 104
5.4.1.1. Herleitung der mathematisch ausgedrückten Randbedingungen 105
5.4.1.2. Ergebnisse der theoretischen Optimierung 109
5.4.2. Experimentelle Optimierung 117
5.4.3. Erkenntnisse aus der Optimierung 117
5.5. Mörtelrezepturen 119
5.5.1. Ausbreitmaß und Konsistenz 122
5.5.2. Erstarrungszeiten 122
5.5.3. Biegezug- und Druckfestigkeiten 123
5.5.4. Fazit Mörtel 124
5.6. Entwickeln einer Applikationstechnik 125
5.6.1. Andrücken mit Handkraft 126
5.6.1.1. Andrücken mit einer Kelle 127
5.6.1.2. Andrücken mit einem Stempel 127
5.6.2. Maschineller Auftrag (Ansätze) 130
5.6.2.1. Applikation durch Spritzen unter Wasser, im Dichtstromverfahren mit Luft 130
5.6.2.2. Applikation durch Spritzen unter Wasser mit Druckluftmotor und Scheibe 131
5.6.3. Kontinuierlicher Auftrag 138
5.6.3.1. Auftragsverfahren mit Düse 138
5.6.3.2. Auftragsverfahren mit Mörtelschlitten 139

5.6.3.3. MSK - Mörtelschlittenkelle . . . 140
5.6.4. Modifikation für flächigen Auftrag: Applikationsplatte . . . 141
5.6.4.1. Gleitender Auftrag des Mörtels . . . 143
5.6.4.2. Flächen aneinander setzen . . . 145
5.6.4.3. Entwicklungsschritte für das Aneinandersetzen von Mörtelflächen . . . 147
5.6.5. Fazit Applikationstechnik . . . 155

6. Verbundeigenschaften und Qualitätsmanagement inklusive Diskussion 157
6.1. Verbundeigenschaften . . . 157
6.1.1. Erreichte Haftzugfestigkeiten . . . 157
6.1.1.1. Untersuchungen an Verbundproben während der Rezepturentwicklung . . . 158
6.1.1.2. Untersuchungen an Verbundproben während der Entwicklung der Applikationstechnik . . . 161
6.1.1.3. Fazit Haftzugprüfungen . . . 165
6.1.2. Mikroskopische Beobachtungen . . . 166
6.1.2.1. Dünnschliff-Proben 1-3 . . . 168
6.1.2.2. Dünnschliff-Proben 4-6 . . . 174
6.1.2.3. Dünnschliff-Proben 8-9 . . . 178
6.2. Benötigter Anpressdruck für die Applikation . . . 190
6.3. Erforderliches Qualitätsmanagement . . . 191

7. Zusammenfassung und Ausblick 195

Literaturverzeichnis 198

Abbildungsverzeichnis 217

Tabellenverzeichnis 222

A. Betonuntergrund 225
A.1. Entscheidungshilfen für die Auswahl des Betonuntergrundes . . . 225
A.1.1. Anforderungen nach Normen . . . 225
A.1.2. Anforderungen nach Expositionsklassen . . . 227
A.1.2.1. Altbetonklassen nach ZTV-W LB 219 . . . 228
A.1.3. Zusammensetzung des Betons bestehender Wasserbauwerke . . . 228
A.2. Druckfestigkeiten des Betonuntergrundes . . . 230

B. Packungsdichteoptimierung 233
B.1. Messwerte aus Untersuchungen an den Mörtelkomponenten . . . 233
B.1.1. Sieblinien des Sandes . . . 233
B.1.2. Lasergranulometrische Untersuchungen . . . 234

B.2. Matlab Code 237
B.2.1. Datenblatt als Excel-Sheet 237
B.2.2. Datei zum Auslesen der Daten aus dem Excel-Sheet 240
B.2.3. Haupt-Matlab-File 244
B.2.4. Optimierungsfunktion fmincon 247

C. Untersuchungen am Mörtel **249**
C.1. Biegezug- und Druckfestigkeit von Mörtelprismen 249

D. Untersuchungen an Verbundproben während der Rezepturentwicklung **251**
D.1. Überblick: Rezeptur H - Verbund 251
D.2. Vergleich - Applikation auf Abgleichseite / untere Seite 251

E. Untersuchungen an Verbundproben während der Entwicklung der Applikationstechnik **255**
E.1. Auftrag mit Stempel (ST), POM Stempel (POM-ST) 255

F. Applikationstechniken - weitere Untersuchungen **257**
F.1. Spritzapplikationen 257
F.2. Drehzahlmessung unter Wasser 258
F.3. Notwendige Drehzahl und Scheibenart für eine Applikation an Luft 265

Lebenslauf **268**

1. Einleitung und Stand der Technik

1.1. Einleitung

Im Wasser- und Hafenbau wird als Baustoff bevorzugt Beton eingesetzt und gewinnt dabei immer mehr an Bedeutung, insbesondere weil Beton auf äußere Umwelteinflüsse unempfindlicher ist als Stahl. Dennoch ist der Baustoff dabei äußeren Einwirkungen ausgesetzt, so dass im Laufe der Zeit zunehmend Schäden entstehen und der Instandsetzungsbedarf ansteigt.

Aufgrund dessen sind mehrere für die Instandsetzung relevante Regelwerke in Deutschland eingeführt worden. Diese Regelwerke betreffen allerdings nur Betoninstandsetzungen, die im Trockenen durchgeführt werden, für die es bereits bewährte Methoden gibt. Es fehlen jedoch Bestimmungen für eine Instandsetzung von Betonflächen unter Wasser. Derzeit werden in vorgenannten Regelwerken Grundsätze, Methoden und Prinzipien für den Schutz und die Instandsetzung des Betons sowie für den Korrosionsschutz unabhängig vom Umgebungsmilieu der Bewehrung beschrieben.
Die EAU (Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstraßen, 2012) [4] geht zwar in Ansätzen auf die Instandsetzung von Beton unter Wasser ein, gibt jedoch nur grundsätzliche Bedingungen bzw. ein generelles Vorgehen an und geht nicht auf konkrete Ausführungen von Reparaturen unter Wasser ein.

Betonbauwerke im Wasser, wie z. B. Hafenanlagen, sind allerdings besonderen Umweltbeanspruchungen, wie physikalischen und chemischen Angriffen ausgesetzt. Unter physikalischen Einwirkungen versteht man Stoß- und Reibekräfte der Schiffe sowie Beanspruchungen aus wiederholten Austrocknen und Feuchtwerden von Beton in der Wasserwechselzone. Hinzu kommen Temperaturwechsel und Frosteinwirkungen. Nicht zu vernachlässigen ist die erosive Wirkung von Eis auf den Beton. Durch die Salze des Meerwassers werden chemische Beanspruchungen verursacht. In den Bereichen oberhalb der Wasserwechselzone, in der ausreichend Sauerstoff und Feuchtigkeit zur Verfügung stehen, kann es zur Korrosion der Bewehrung kommen. Neben diesen Korrosionsschäden kommt es zu Rissen und Oberflächenschäden am Beton.

Für eine Instandsetzung solcher Schäden am Beton unter Wasser sind zum einen die Baustoffauswahl und zum anderen die Verfahrenstechnik, mit der der Betonersatz auf den Altbeton aufgebracht wird, entscheidend. Bei der Baustoffauswahl ist wichtig, dass der Neubeton für den Einsatz unter Wasser geeignet ist und sich im Wasser nicht entmischt. Eine geeignete Verfahrenstechnik zeichnet sich dadurch aus, dass der Neubeton mit dem Altbeton eine Verbindung eingeht, die den Festigkeits- und Dauerhaftigkeitsanforderungen einer Betoninstandsetzung gerecht wird.

Die derzeitigen Instandsetzungsverfahren sind mit erheblichen Nutzungseinschränkungen bzw. hohen Kosten verbunden. Besonders schwierig ist dabei die Sanierung senkrechter Flächen. Es ist daher wünschenswert ein Verfahren zu entwickeln, mit dem senkrechte Betonoberflächen unter Wasser ohne Trockenlegung des Bauteils bzw. ohne Schalung instandgesetzt werden können.

Die derzeit für den Unterwassereinsatz verfügbaren Baustoffe, wie Colcrete-Beton und Unterwasserbeton, eignen sich jedoch nur für die Deckwerksverklammerung und den Bau von waagerechten Betonflächen unter Wasser. Bei Colcrete-Beton wird der Beton besonders aufbereitet: In einem intensiven Mischvorgang werden dem sog. Colcrete-Beton spezielle rheologische Eigenschaften verliehen [107].

Es wird auch von sog. „kolloidalem“ Mörtel (auch *Colgrout* genannt) gesprochen: Die Wasser- und Zementteilchen werden mit hoher Geschwindigkeit durch einen engen Spalt gepresst, wobei große Scher- und Reibungskräfte auftreten. Durch diese Kräfte werden die Bindemittelteilchen gut verteilt und benetzt. [18]

Der Colcrete-Mörtel kann auch ohne chemische Zusätze eine gute Fließfähigkeit besitzen. Außerhalb des Aufbereitungsvorganges bindet der Colcrete-Mörtel kein weiteres Wasser und kann folglich auch unter Wasser zusammenhalten und sich nicht entmischen. Der Mörtel besitzt ein hohes Haftvermögen und ist im erhärteten Zustand wasserundurchlässig. [107]

Bei der Verwendung von Schalungen sind die vorgenannten Baustoffe auch bei senkrechten Flächen anwendbar. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit werden die wissenschaftlichen Grundlagen für eine Betoninstandsetzung durch Mörtelauftrag unter Wasser auf nicht waagerechten Flächen ohne die Notwendigkeit einer Schalung, im Sinne der Einschalung eines Bauwerkes, und einer Trockenlegung des Bauteils erarbeitet. Die wichtigsten Arbeitsschritte dazu sind die Entwicklung eines Mörtels und eines Applikationsverfahrens und die daraufhin wiederum abgestimmte Mörteloptimierung im weiteren Schritt. Es wurden hierfür neue Applikationstechniken sowie Mörtelrezepturen und –herstellungsverfahren erprobt und optimale Verfahrensparameter ermittelt.

Ein Instandsetzungsmörtel, der unter Wasser einbaufähig ist und sich nicht von der instand zu setzenden Oberfläche löst, ist mit einem schnell erstarrenden Bindemittel anzumischen. Materialien mit normalen Erstarrungszeiten zementgebundener Baustoffe sind ungeeignet, da sie sich spätestens nach wenigen Minuten von der Betonoberfläche lösen. Weiterhin darf der Mörtel sich unter Wasser nicht entmischen. Daher ist Ziel der Eigenschaftsoptimierung die Entwicklung eines Mörtels, der die vorgenannten Charakteristika erfüllt.

Diese Forschungsarbeit baut auf vorangegangenen studentischen Arbeiten von NGUYEN [116, 117] auf. Daher können in dieser Arbeit einige Verweise auf diese Arbeiten auftreten oder auch werden Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus diesen verwendet.

1.2. Derzeitiger Umgang bei Instandsetzungsmaßnahmen an Wasserbauwerken

1.2.1. Deutschland

Im Rahmen studentischer Arbeiten von NGUYEN [116,117] wurde herausgearbeitet, wie derzeit mit Instandsetzungen von Wasserbauwerken umgegangen wird. Obwohl diese Arbeiten bereits einige Jahre zurück liegen, hat sich der Umgang mit Instandsetzungen von Wasserbauwerken nicht weiterentwickelt. Ein Gespräch mit der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) bestätigte, dass für die Instandsetzungen senkrechter Flächen entweder trocken gelegt oder Schalungen verwendet werden, jedoch tendenziell *eher improvisiert* wird.

Maßgebende Regelwerke in Deutschland bei einer Betoninstandsetzung sind die DAfStb-Richtlinie „Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen“ [28], die ZTV-ING, Teil 3, Abschnitt 4 [22] und die DIN EN 1504 [44].

Des Weiteren wurden vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen zusätzliche Technische Vertragsbedingungen - Wasserbau (ZTV-W) für den Schutz und Instandsetzung der Betonbauteile von Wasserbauwerken (Leistungsbereich 219) [24] eingeführt. Für den Schutz und die Instandsetzung von Betonbauwerken in kommunalen Kläranlagen wird das DWA-Merkblatt DWA-M 211 [27] herangezogen und kann dementsprechend Vertragsbestandteil sein. [117]

Diese Regelwerke betreffen nur Instandsetzungen, die im Trockenen durchgeführt werden und für die es bereits bewährte Methoden gibt. Sie enthalten keine Bestimmungen zur Instandsetzung unter Wasser. [116]

Die Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ für Häfen und Wasserstraßen (EAU [4]), die sich auch mit der Instandsetzung von Betonbauwerken unter Wasser beschäftigen, machen nur generelle Angaben. Ihre Angaben beziehen sich z. B. auf die Untergrundvorbehandlung und die Notwendigkeit einer fachgerechten Durchführung für das Einbringen und Verdichten des Betons unter Wasser ohne Entmischung (Zugabe eines geeigneten Stabilisierers). Auf konkrete Ausführungen von Reparaturen unter Wasser wird nicht eingegangen. Vielmehr wird beschrieben, dass es für die Instandsetzung mit Zementmörteln mit Kunststoffzusatz (PCC) und mit Reaktionsharzmörtel (PC) und für das Beschichten von Bauteilen Spezialprodukte für das Arbeiten unter Wasser gibt. Auch die Nachfrage beim Verfasser des Kapitels „Uferwände, Ufermauern und Überbauten aus Beton“ in den EAU [4] ergab keine weiteren Ansätze bzw. praktische Erfahrungen zu Instandsetzungen von Beton unter Wasser. Für Instandsetzungen von Betonflächen über Wasser verweist die EAU wiederum auf die ZTV-ING [22].

Zur Instandsetzung von Betonflächen im Unterwasserbereich werden die Flächen üblicherweise trocken gelegt. Bei Reparaturen von Schleusen werden diese vollständig gelenzt. In Bereichen, in denen der Wasserspiegel nicht abgesenkt werden kann (ob aus wirtschaftlichen oder praktischen Gründen), werden beispielsweise Süllkästen eingesetzt (siehe Abbildung 1.1). Die Süllkästen werden an den instand zu setzenden Bereich angebracht, leergepumpt und abgedichtet, so dass die Instandsetzung der Betonoberfläche im Trockenen geschehen kann. Süllkästen sind praktikabel, aber in der Anwendung begrenzt.

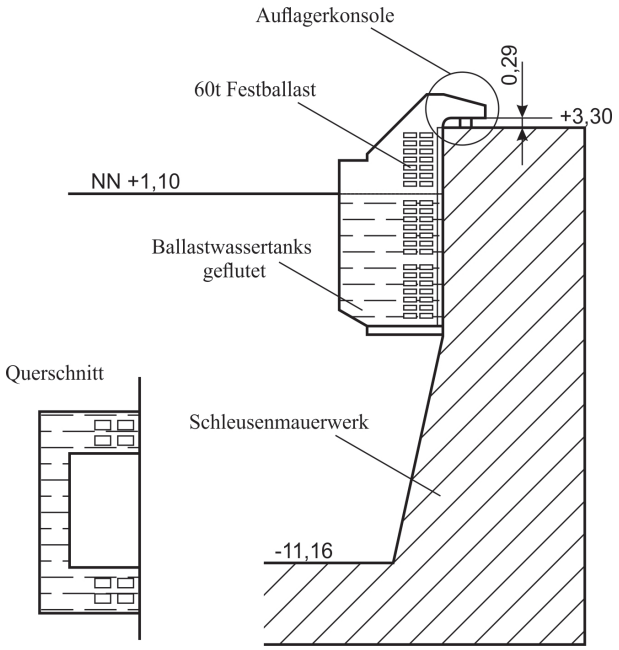


Abbildung 1.1.: Beispiel für einen Süllkasten an gerader Wand (vgl. [6])

So lassen sich Süllkästen nur an ebene Wände, wie beispielsweise Kaimauern einsetzen. Für Pfähle zum Beispiel eignet sich das System nicht. Diese Methode ist ebenfalls aufgrund der Montage und der benötigten statischen Nachweise für die Konstruktion aufwendig und kostenintensiv. Der Transport und die Mietkosten der Süllkästen treiben die Kosten zusätzlich in die Höhe. [117]

In Abbildung 1.2 (bei einer Großinstandsetzung der großen Seeschleuse in Emden) ist die Größe der Süllkästen zu erkennen. Ihr Einsatz zieht daher viel Aufwand und hohe Kosten nach sich. [117]

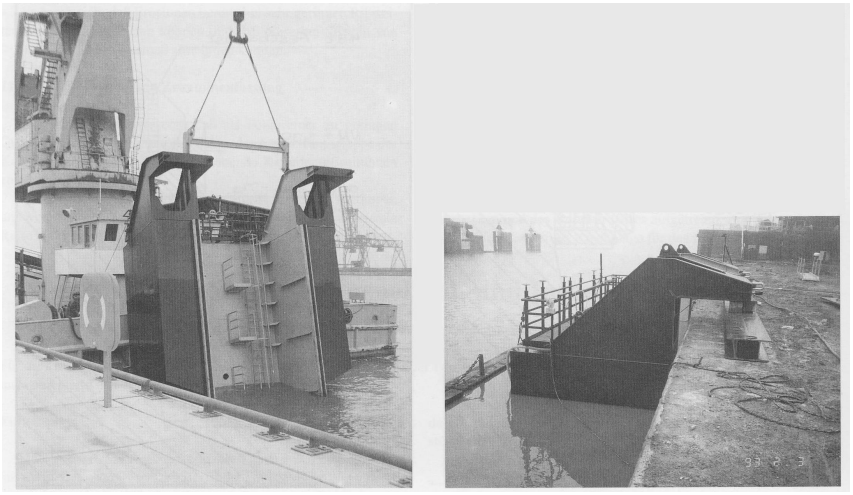


Abbildung 1.2.: Einhängen eines Süllkastens (links) und eingehängter Süllkasten (rechts) aus [6]

1.2.2. USA

In den USA gibt es die Richtlinie *Guide to Underwater Repair of Concrete* [2] des American Concrete Institutes (ACI). Zur Instandsetzung von Betonflächen unter Wasser werden hauptsächlich verschiedene Verfahren zur Unterwasserinstandsetzung unter Verwendung von Schalungen beschrieben. Darüber hinaus gibt es Angaben über die einzusetzenden Baustoffe. [116]

Die Angaben zu den zu verwendenden Baustoffen sind jedoch allgemein gehalten, wie z. B. die Anwendung von sogenannten *anti-washout admixtures*. Hierbei handelt es sich um chemische Zusatzmittel, die das freie Wasser in der Betonrezeptur binden und damit den Verlust von Feinstmaterial in das Wasser während der Unterwasseranwendung verringern [2]. Es ist nicht nachvollziehbar, ob sich die *anti-washout admixtures* für diesen Anwendungsfall von Stabilisierern unterscheiden, wie sie in Unterwasserbetonen eingesetzt werden werden.

Auch in COLLINS [25] werden Applikationen, die ohne Verschalung händisch unter Wasser aufgebracht (*hand patching*) werden, beschrieben. Des weiteren beschreibt er Methoden mit Verschalungen (*formed repairs*), die entweder starr (*rigid forms*) oder anpassungsfähig (*flexible forms*) sind. Die *hand patching* - Methode ist die technisch einfachste und mit den geringsten Kosten verbundene Methode. Instandsetzungen mit Verschalungen, sog. *formed repairs*, werden für große Flächen verwendet. Sie können sowohl über als auch unter Wasser angewendet werden. Drittens gibt es Verschalungen, die nach der Instandsetzung am Bauwerk verbleiben (*stay-in-place forms*) und daher für den Unterwassereinsatz ökonomisch sind, da die kostenintensive Demontage durch Taucher entfällt. Die *stay-in-place-forms* können natürlich auch starr sein (*rigid forms*). Im Falle der *rigid forms* sind die Schalungssysteme wiederverwendbar. Bei der Verwendung einer steifen Verschalung ist die Handhabung unter Wasser jedoch von Nachteil. Taucher können beispielsweise bei starken Strömungen die Schalung nicht oder nur schwer unter Kontrolle halten. Darüber hinaus sind diese steifen Schalungssysteme für unregelmäßig

geformte Bauteile bzw. Oberflächen ungeeignet. Die Methode unter Verwendung von *flexible forms* (= anpassungsfähige Verschalungen) ist einfacher für die Handhabung unter Wasser. Diese flexiblen Schalungssysteme sind anpassungsfähig, i. d. R. mit leichten, vorgefertigten, genähten Reißverschlusssystemen ausgestattet. [25]

Weitere Methoden für die Betoninstandsetzung unter Wasser sind in der Literatur von McLeish (1994) [101], McDonald & Neeley (1999) [100] und in dem zuvor genannten Regelwerk des ACI (American Concrete Institute, 2006) zu finden [2]. Hierbei handelt es sich um spezielle Unterwasserbetone unter Verwendung von Schalungen. Da es keine Angaben zur genauen Zusammensetzung zu den Instandsetzungsstoffen, der Dauerhaftigkeit der Instandsetzungsmaßnahmen unter Wasser sowie veröffentlichte Prüfergebnisse gibt, werden diese Methoden im Weiteren nicht berücksichtigt. [116]

1.3. Vorliegende praktische Erfahrungen

Aufgrund fehlender Literatur für die praktische Anwendung wurde im Vorfeld des Forschungsprojektes das Gespräch mit Ingenieuren von ausführenden Bauunternehmen, Planungsbüros und Behörden geführt. Darunter waren Fachleute von IMS Ingenieure GmbH, WTM Engineers, TORKRET Substanz/-bau KG, August Prien Bauunternehmung GmbH & CO. KG, Hamburg Port Authority (HPA) und die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW). Im Vordergrund der Gespräche standen die praktische Relevanz, die wirtschaftliche Erfordernis und die Machbarkeit der Instandsetzung von Betonflächen unter Wasser ohne Verwendung einer Schalung.

Das Ergebnis der Gespräche war, dass generell eine Instandsetzung unter Wasser per Auftragsverfahren ohne Verwendung einer Schalung wünschenswert ist. Es besteht jedoch große Skepsis, ob eine Ausführung ohne Schalung machbar ist.

1.3.1. Sanierung von ebenen Flächen (Wände)

Am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IfMB) der Universität Karlsruhe wurden für ein deutsch-russisches Verbundprojekt neue Instandsetzungsverfahren und -werkstoffe entwickelt, die eine Sanierung von Bauwerken auch unter Wasser ermöglichen.

Grund der Forschung waren die Staumauern eines Wasserkraftwerkes in Russland, die durch Frost und andere Umwelteinflüsse geschädigt und langfristig in ihrer Funktionsfähigkeit beeinträchtigt waren. Die Sanierungsarbeiten waren mit zwei Anforderungen verknüpft. Zum einen wurden neue Baustoffe benötigt, die in Zukunft den Witterungsverhältnissen standhielten, zum anderen musste ein Verfahren entwickelt werden, das den Betrieb des Kraftwerkes während der Sanierung nicht behindert. [128, 132]

Die mehr als 60 Jahre alten Wände wiesen erhebliche Schäden auf, wobei Frostabsprengung und Bewehrungskorrosion dominierten. Die Dauerhaftigkeit des Bauwerkes war durch Feuchte und

hohe Carbonatisierungseinwirkung gefährdet. Die Schäden am Bauwerk hatten zur Folge, dass die Tragfähigkeit und Funktionstüchtigkeit des Kraftwerkes nicht mehr gewährleistet waren.

Konventionelle Reparaturversuche waren zuvor gescheitert. Nach Untersuchungen von Bohrkernproben aus der brüchigen Konstruktion am Wasserkraftwerk wurde deutlich, dass die Herstellung eines festen Verbundes zwischen Reparatur- und Neubeton unter Wasser nicht gelungen und somit keine ausreichende Haftung zwischen Neu- und Altbeton gegeben war. Die Ursache hierfür war, dass Alt- und Neubeton deutlich unterschiedliche Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften hatten. Hinzu kamen verschiedene Dehnungsverhalten der Alt- und Neubetone, die sich insbesondere bei Temperatur- und Feuchtegehaltsänderungen zeigten. Gerade in der Wasserwechselzone waren die Unterschiede bei Temperatur und Feuchtegehaltsänderungen sehr groß. Durch das unterschiedliche Dehnungsverhalten der Betone entstanden Risse und Abplatzungen im Verbundbereich bzw. in der Verbundfuge zwischen Neu- und Altbeton. [132]

Taucher brachten an dem beschädigten Betonbauwerk eine Verschalung an. In diese Verschalung wurde durch eine Öffnung nach und nach der Beton eingefüllt. Durch weitere Öffnungen in der Verschalung floss das dabei entweichende Wasser nach außen (siehe Abbildung 1.3). Damit dies möglich war, hatte der Beton folgende drei Eigenschaften aufzuweisen. Der Beton muss sich selbst verdichten, sehr fließfähig sein und eine hohe Kohäsion besitzen. [132]



Abbildung 1.3.: Baustofftechnologen beim Pumpvorgang aus [132]

Die erfolgreiche Instandsetzung bei dem vorgenannten Projekt basiert auf der speziellen Rezeptur des Betons. Die besondere Eigenschaft der neuen Betonrezeptur ist, dass sich der Beton unter Wasser mit dem Untergrund des Altbetons verbindet. In Abbildung 1.4 ist das vorgenannte Instandsetzungsverfahren an einem Großversuch der Universität Karlsruhe dargestellt.



Abbildung 1.4.: Neues Verfahren für die Betoninstandsetzung unter Wasser im Großversuch aus [129]

Nach einer Vielzahl von Versuchen kam das Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IfMB) der Universität Karlsruhe zu einer Fertigungstechnik, Betonmischung und Qualitätssicherung, die eine Betoninstandsetzung unter Wasser möglich machte. Das Einbringen des Betons war dabei schwierig, da die Herstellungsverfahren und die Baustoffe optimal aufeinander abgestimmt sein müssen. Hierzu gehören beispielsweise der Pumpendruck und die Betoniergeschwindigkeit. Bei einer nicht fachgerechten Herstellung kann es zu einem Abplatzen der Schalung kommen. [132]

1.3.2. Sanierung von Pfählen

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) hatte im Jahr 2000 an Pfählen einer Kaje in einem Marinehafen an der Ostsee ein Verfahren zur Instandsetzung unter Wasser untersucht (siehe [116, 117]).

Stahlbeton- oder Spannbetongründungspfähle sind ein typischer Fall für eine Betoninstandsetzung unter Wasser. Solche Pfähle, die z. B. an zahlreichen Kajen in den Marinehäfen an Nord- und Ostseeküste eingesetzt werden, sind meist in der Wasserwechselzone durch Betonabplatzungen infolge Bewehrungskorrosion, Frostbeanspruchung oder Eisgang beschädigt.

Die Firma Beton- und Monierbau GmbH (BuM) entwickelte für diese Aufgabe das System *Bullflex*. Es handelt sich hierbei um ein textiles Schalungssystem, das für den Unterwassereinbau geeignet ist. In Abbildung 1.5 ist zu sehen, dass dieses Schalungssystem für die Ummantelung von korrodierten Pfeilern eingesetzt werden kann, so dass ein Sanierungssystem speziell für die Instandsetzung von Pfählen erhältlich ist.

Nach Angaben des Herstellers ist *Bullflex* für den Unterwassereinbau schnell, unproblematisch, kostengünstig und ohne Mörtelverlust anwendbar. So kann dieses System z. B. für die Ummantelung von korrodierten Anlegepfählen angewendet werden.

1.3.2.1. Verfahrensbeschreibung

Bei der Verwendung des vorgenannten Verfahren werden wie bei der Sanierung am Land zunächst lose Betonteile des beschädigten Betonpfahls entfernt und die instand zu setzende Fläche mittels Wasserstrahlen mit oder ohne Zugabe von Strahlmitteln gereinigt. Korrodierte Bewehrung wird ersetzt und/oder zusätzliche Bewehrung montiert. Ein bedingt wasserdurchlässiges Textil wird wie eine Schalung um den Bereich des Pfahles gelegt, der instand gesetzt werden soll. Zur Fixierung des Textils werden je ein schlauchförmiger Ring am oberen und am unteren Rand des beschädigten Bereichs angeordnet. Dieser besteht ebenfalls aus dem genannten Textil. Zum Abschluss wird eine starre, wasserdurchlässige Schalung über dem Textil montiert. [184]

In Abbildung 1.5 ist eine Prinzipskizze für das Sanierungsverfahren Bullflex dargestellt [184]. Der instand zu setzenden Pfahl in textiler und in kompletter Schalung ist in Abbildung 1.6 (Seite 10) zu erkennen.

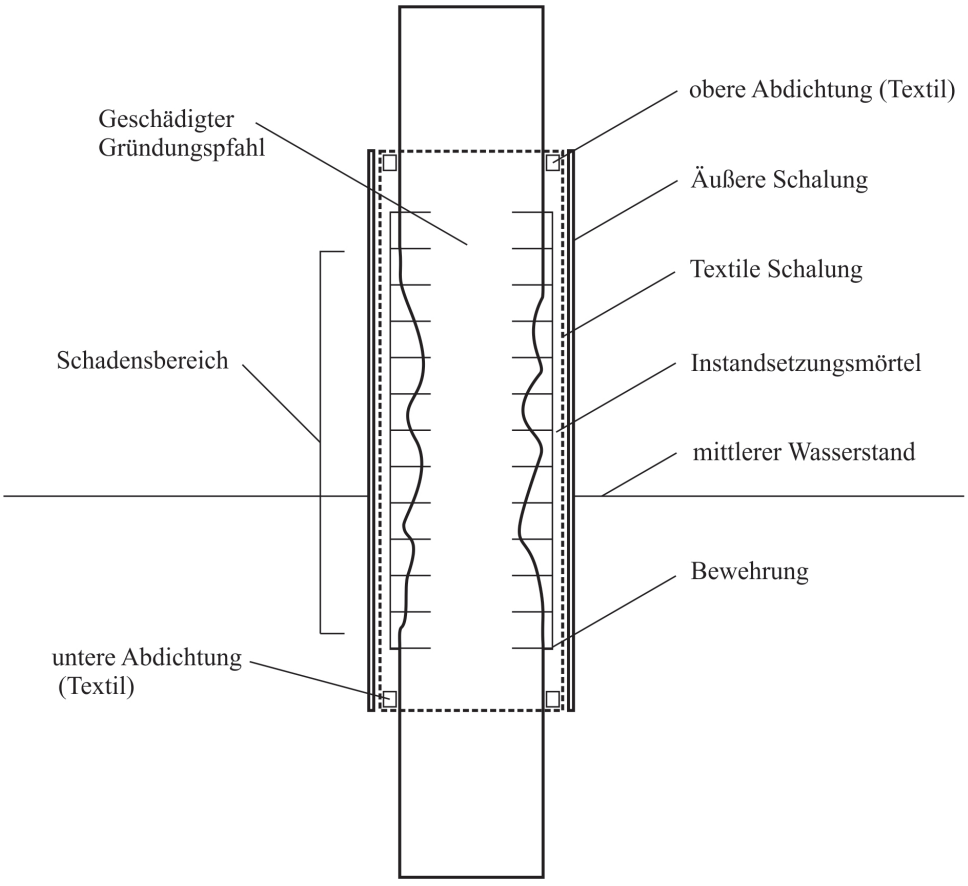
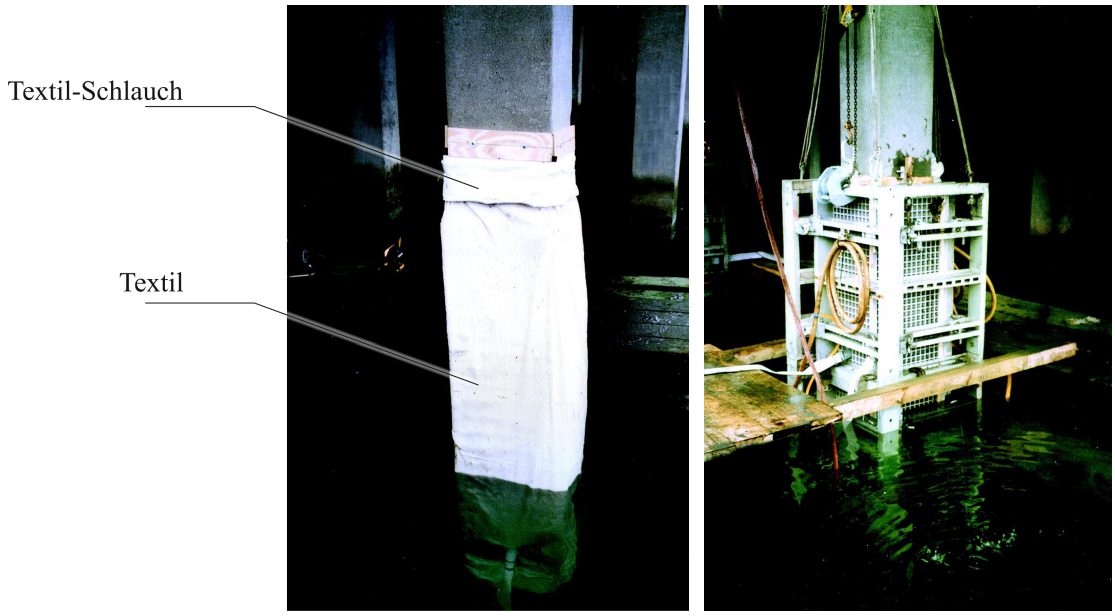


Abbildung 1.5.: Prinzipskizze der Betoninstandsetzung mit textiler Schalung

1.3.2.2. Versuchsdurchführung

Über die beiden Textilschläuche, die in Abbildung 1.6(a) zu sehen sind, wird der Beton in die Schalung eingebracht.



(a) Pfahl mit Textilschalung und Textilschläuchen am oberen und unteren Rand

(b) Pfahl mit kompletter Schalung

Abbildung 1.6.: Der instand zu setzende Pfahl aus [184]

Unter Druck werden die Schläuche mit Mörtel aufgefüllt. Dadurch erreicht man eine Abdichtung des instand zu setzenden Pfahlbereichs am oberen und unteren Übergangsbereich zum intakten Pfahlbereich. Mit einem Druck von etwa 4 bar wird Mörtel in den Zwischenraum zwischen Altbetonoberfläche und Textilschalung gepresst. Hierfür wird eine Schneckenpumpe verwendet. Durch die Textilschalung und die starre Schalung kann vorhandenes Wasser entweichen. In Abbildung 1.7 ist die starre Schalung mit der dahinterliegenden Textilschalung zu sehen. Der Mörtel entwässert bis zu einem gewissen Grad im Randbereich, der dem Textil zu-



Abbildung 1.7.: Starre Schalung mit dahinterliegender Textilschalung aus [184]

gewandt ist. Dadurch verringert sich das Wasser-Bindemittel-Verhältnis des Mörtels im Randbereich und verbessert somit die Dauerhaftigkeitseigenschaften wie der Frostwiderstand. [184]

Die auf diese Art und Weise instand gesetzte Pfähle sind in Abbildung 1.8 dargestellt. Das zuvor beschriebene Sanierungsverfahren für Pfähle mittels einer textilen Schalung hat sich in der Praxis bei der Ausführung unter Wasser und in der Wasserwechselzone bewährt. Der verwendete Mörtel wurde für das Verfahren speziell optimiert. [139]



Abbildung 1.8.: Instand gesetzte Pfähle nach dem Ausschalen aus [184]

Nach einer Standzeit von sechs Jahren wurde die Dauerhaftigkeit der sanierten Stellen der Pfähle untersucht. Die Pfähle wiesen teilweise dichte und graue oder angewitterte, weiße und abmehlende Oberflächen auf. Im sichtbaren Bereich waren oberhalb der Wasserlinie Risse zu beobachten (überwiegend Rissbreiten < 0,25 mm). Einige Oberflächen zeigten beim Abklopfen ein sprödes Verhalten und waren in dünnen Scheiben abgeplatzt. In einigen Bereichen klang der Hammerschlag hohl, so dass kein flächendeckender Verbund vorhanden war und es zu einer teilweise flächigen Ablösung des Instandsetzungsmörtels kam. Die ermittelten Haftzugfestigkeiten lagen im Bereich von 0,1 N/mm^2 und 1,4 N/mm^2, der Mittelwert betrug 0,86 N/mm^2 ([110]) und lagen somit unter den in Regelwerken geforderten Wert von 1,5 N/mm^2 (siehe Abschnitt 2.3). Die Prüfungen wurden an Bohrkernen durchgeführt. Aufgrund unvollständiger Dokumentation ist nicht mehr nachvollziehbar, ob und wie die Oberfläche des Altbetons vor der Instandsetzungsmaßnahme vorbehandelt wurde. Der BAW geht davon aus, dass der Verbund durch bessere Oberflächenbearbeitung des Altbetons (Reinigung von Ablagerungen und Bewuchs und Aufrauen der Oberfläche) erhöht werden kann. Der Bruch ereignete sich zum größten Teil in der Verbundzone zwischen Altbeton und Instandsetzungsmörtel - die Untergrundvorbereitung hat maßgeblichen Einfluss auf das Verbundverhalten [110].

Dem Bericht des BAW zufolge zeigten einige unauffällige Bereiche eine dauerhafte Instandsetzung. Im Herstellungsverfahren und der Zusammensetzung des Instandsetzungsmörtels besteht laut BAW noch Optimierungsbedarf. Das Instandsetzungsverfahren sei für schwierig zugängliche Bereiche unter Wasser und in der Wasserwechselzone gut denkbar, so die BAW. [110]

1.4. Bedarf und Zielsetzung

Eine erfolgreiche und dauerhafte Betoninstandsetzung unter Wasser erfordert eine umfassende und fachgerechte Planung.

Weitergehende Berichte zu Untersuchungen bzw. Materialprüfungen und Laboruntersuchungen zu Instandsetzungsverfahren unter Wasser sowie über die Dauerhaftigkeit dieser Maßnahmen sind derzeit nicht bekannt. Ob ein Zeitraum von sechs Jahren nach einer Betoninstandsetzung

bei einer Probeinstandsetzung bereits als dauerhafte Instandsetzung gelten kann, ist fraglich. Für die Anwendung unter Wasser existieren derzeit keine Normen, so dass das Instandsetzungssystem *Bullflex* keiner Richtlinie oder Norm für Instandsetzungssysteme entspricht (z. B. ZTV-W LB 219 [24] oder RL SIB [28]). Die Anwendung von *Bullflex* aus Abschnitt 1.3.2 (Seite 8) bei einer Pfahlinstandsetzung bedarf der Zustimmung im Einzelfall. [110]

In den vorangegangenen Beispielen werden für die Instandsetzung Schalungen verwendet. Auch die in den USA beschriebenen Sanierungsverfahren unter Wasser (siehe Abschnitt 1.2.2) werden fast ausschließlich nur mit Verschalungen ausgeführt.

Der händische Auftrag von Mörtel (*Hand Patching* [25] oder *Hand Placement* [2]) durch Taucher ist für die Instandsetzung großer Flächen ungeeignet. Diese Technik ermöglicht nur, kleine Flächen zu reparieren, insbesondere aufgrund der schlechten Sichtverhältnissen unter Wasser.

Die Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstraßen (EAU 2012) [4], die sich auch mit der Instandsetzung von Betonbauwerken unter Wasser beschäftigen, implizieren, dass für Unterwasserarbeiten spezielle Produkte auf dem Markt verfügbar wären. Dies entspricht nicht dem derzeitigen Stand wie auch der Verfasser des Abschnittes 10.12 in der EAU 2012 auf Anfrage bestätigte.

Zur Zeit ist daher kein Verfahren zur großflächigen Betoninstandsetzung unter Wasser auf senkrechten oder anderen nicht waagerechten Flächen durch einen Mörtelauftrag ohne Verschalung verfügbar. Auch Verfahren mit eingeschalten Bauwerken wurden bisher nur vereinzelt erprobt oder beschrieben.

Vor diesem Hintergrund ergibt sich der Bedarf durch Forschung, Laborversuche und Recherche die Möglichkeiten der Instandsetzung senkrechter Betonoberflächen unter Wasser zu untersuchen.

Für die Instandsetzung eines Betonbauwerkes am Wasser ohne Einschalen oder Trockenlegung des Bauwerks sind wissenschaftliche Grundlagen für eine Betoninstandsetzung durch Mörtelauftrag unter Wasser zu erarbeiten. Die wichtigsten Arbeitsschritte sind die Entwicklung eines Applikationsverfahrens und die darauf abgestimmte Mörteloptimierung. Es sollen neue Applikationstechniken sowie Mörtelrezepturen und –herstellungsverfahren erprobt und optimale Verfahrensparameter und Randbedingungen ermittelt werden.

2. Anforderungen an ein zukünftiges Instandsetzungsverfahren

Für die Erarbeitung von Grundlagen dieser Arbeit ist es notwendig die folgenden Anforderungen an den Betonuntergrund, an den Mörtel (insbesondere unter Wasser) und an die Applikationstechnik des Mörtels unter Wasser zu erarbeiten bzw. für die Versuche zu definieren.

2.1. Anforderungen an den Betonuntergrund

Der im Rahmen dieser Arbeit zu verwendende Betonuntergrund sollte möglichst den Betonen von bestehenden Wasserbauwerken entsprechen. Daher wurden die Anforderungen an den Betonuntergrund auf der Grundlage von Normen, Expositionsklassen, denen der Beton ausgesetzt ist, und der Zusammensetzung bestehender Wasserbauwerke zusammengestellt - Details siehe Anhang Abschnitt A.1. Nach Durchsicht mehrerer Regelwerke und Literatur konnten folgende allgemeine Anforderungen an die Betonuntergrund-Probekörper zusammengefasst werden:

- Abmessungen von 300 mm $\times$ 300 mm $\times$ 100 mm (nach DIN EN 1542 [46] und DIN EN 1766 [47])
- Zement: Portlandzement CEM I 42,5 R (für ein Referenzbeton Typ C (0,45) nach DIN EN 1766 [47])
- Größtkorn der Gesteinskörnung 8 mm oder 10 mm (nach DIN EN 1542 [46]).
- Abreißfestigkeit (geprüft nach DIN EN 1542 [46]) von mindestens 2,5 $\mathrm{N/mm^2}$ (nach DIN EN 1766 [47]), im Mittel 1,5 $\mathrm{N/mm^2}$ (nach ZTV-ING [22]) und im Mittel 0,8 bzw. 1,2 $\mathrm{N/mm^2}$ (für Altbetonklasse A2 bzw. A3, nach BAW-MSM [23])

Es gibt verschiedene Arten von Referenzbetonen. Der herzustellende Beton mit einer Druckfestigkeit von mehr als 30 $\mathrm{N/mm^2}$ soll in Anlehnung an den Referenzbeton Typ C (0,45) nach DIN EN 1766 [47] erstellt werden. Wegen einiger Abweichungen kann dies nur in Anlehnung an die DIN erfolgen und der Beton wird nicht exakt diesem Referenzbeton entsprechen: Die Zementsorte Portlandzement (CEM I, Referenzbeton nach DIN EN 1766 [47]) fand keine Anwendung bei dem im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchen. Der Grund hierfür ist, dass massige Bauteile wie Wasserbauwerke zum größten Teil aus Hochofenzement (CEM III) hergestellt werden (siehe im Anhang Abschnitt A.1 und im Anhang Tabelle A.3). Dies liegt an der geringeren Hydratationswärme, die sich beim Abbinden des Betons entwickelt. Außerdem besitzen Betone mit Hochofenzement eine sehr gute Nacherhärtung. Abweichend von DIN EN 1542 [46] für den zu prüfenden Betonuntergrund wird kein Größtkorn von 8 bzw. 10 mm verwendet. Dieses Größtkorn ist für einen Beton für Wasserbauwerke unüblich.

Das Alter des Betonuntergrundes muss mindestens vier Wochen betragen, damit der oberflächennahe Bereich bezogen auf seine Festigkeitsentwicklung und Schwindßvorgänge (weitere Rest-Schwindvorgänge sind vergleichsweise gering) ausreichend fortgeschritten ist und somit dauerhafte Beschichtungen möglich sind. Im oberflächennahen Bereich besitzen Betonbauteile andere Eigenschaften als im Inneren. [68, 158]

Bauwerke, die in Kontakt zu Meerwasser stehen, sind Meerwasserangriffen ausgesetzt und sind in der Wasserwechselzone diesen Angriffen mehr ausgesetzt verglichen zu Angriffen auf Beton, der ständig unter Wasser steht. Aufgrund von Ablagerungen befindet sich auf der Oberfläche des Betons, der ständig unter Wasser steht, eine schützende Schicht, die aus Brucit ($Mg(OH)_2$) und Aragonit ($CaCO_3$) besteht. [169] In Kontakt mit Meerwasser wird das $CaCO_3$ vorranging als Aragonit und nicht als Calcit abgelagert. [169]

Auch die Oberflächen von Trinkwasserbehältern aus zementgebundenen Mörteln zeigen, dass bei einem sehr dichten Mörtelgefüge keine Schäden durch den Wasserkontakt entstehen, da sich eine festsitzende Calcitschicht (CaO_3) bildet, die den zementgebundenen Baustoff schützt. [170] In der Wasserwechselzone jedoch wird die oben genannte „Schutzschicht“ aus Brucit und Aragonit aufgrund mechanischer Beanspruchungen wie Wellengang und Eisgang zerstört. Durch den Sauerstoff in der Wasserwechselzone ist eine Korrosionsentstehung möglich. [169]

Laut Taylor [169] sind die wichtigsten Voraussetzungen für das Erreichen der Betoneigenschaften, die in solchen Umgebungen notwendig sind, folgende: Ein hoher Zementgehalt, ein niedriger w/z-Wert, eine hohe Festigkeit und ausreichende Betonüberdeckung für den Bewehrungsstahl. Darüber hinaus sollen Puzzolanzement oder Hochofenzement (Anteil an Schlacke > 60 %) verwendet werden, weil diese zu einer höheren Dauerhaftigkeit führen als reiner Portlandzement. Wasserbauwerke der Römer sind bis heute in gutem Zustand. Diese haben Kalk-Puzzolan-Mörtel verwendet. [169] Damit der Instandsetzungsmörtel an der Betonoberfläche haften kann, ist das Aufrauen der Oberfläche durch eine Vorbehandlung notwendig. Beim Haftverbund zwischen Mörtel und Beton ist mit Versagen zu rechnen, wenn die Untergrundbearbeitung unzureichend war [106].

Von den allgemeinen Anforderungen, die aufgeführt wurden, werden die im folgenden Genannten für die Betonuntergrund-Probekörper berücksichtigt bzw. aus vorher genannten Gründen angepasst:

- Abmessungen von 300 mm x 300 mm x 100 mm (nach DIN EN 1542 [46] und DIN EN 1766 [47])
- Größtkorn der Gesteinskörnung > 10 mm
- Zement: Hochofenzement CEM III
- Alter der Betongrund-Probekörper mindestens vier Wochen

- Abreißfestigkeit geprüft nach DIN EN 1542 [46] im Mittel 1,5 N/mm^2 nach ZTV-ING [22] und für Albetonklasse A2 bzw. A3 nach BAW-MSM [23] im Mittel 0,8 bzw. 1,2 N/mm^2

Die tatsächliche Betonzusammensetzungen und Eigenschaften der Untergründe werden in Abschnitt 5.2 aufgeführt. Diese Zusammensetzungen wurden im Rahmen dieser Arbeit fortlaufend hergestellt und verwendet.

Vorbehandlung des Betonuntergrundes

Nach ZTV-ING Teil 3 Abschnitt 4 [22] muss der Betonuntergrund zur Sanierung so vorbereitet werden, dass zwischen dem aufzubringenden Betonersatzsystem und dem Betonuntergrund ein fester und dauerhafter Verbund erzielt wird. Der Betonuntergrund muss hierfür gleichmäßig fest sein und frei von trennenden Substanzen. Hierfür sind die alten Oberflächen von Beschichtungen und Nachbehandlungsfilmen sowie von Verunreinigungen, Zementschlämmen und minderfesten Schichten freizulegen. An der freigelegten Bewehrung sowie an ggf. anderen Metallteilen sind Rostprodukte zu entfernen. Abschließend ist die Betonunterlage von Staub und losen Teilen zu säubern und Wasser zu entfernen. [22]

Die DIN EN 1504, Teil 10 [45] beschreibt die Untergrundvorbereitung zum Schutz bzw. die Instandsetzung von Betonen. Je nach Stoff oder System, gibt es verschiedene Verfahren der Vorbereitung des Untergrundes. Für den Auftrag von Mörtel oder Beton sieht diese Norm vor, dass nicht ausreichend tragfähiger, beschädigter und zerstörter Beton entfernt werden muss. Der Untergrund muss frei von Staub, Verunreinigungen und Stoffen sein und darf keine trennend wirkenden Stoffe enthalten. [45]

Für die Vorbehandlung der Betonoberflächen und Ersatz von Bewehrung gibt es Techniken, Regeln und Empfehlungen zur Durchführung (z. B. ACI (2006) [2] und MCLEISH (1994) [101]). Auch ZTV-ING Teil 3 Abschnitt 4 [22] gibt Verfahren für die Vorbereitung von Betonunterlagen an: Stemmen, bürsten, fräsen, schleifen, flammstrahlen, staubfreies strahlen und säubern. Das tatsächlich angewendete Verfahren für die Vorbehandlung des Betonuntergrundes wird in Abschnitt 5.2 beschrieben.

2.2. Anforderungen an den Instandsetzungsmörtel

Für die Unterwasseranwendung ist es notwendig, einen Mörtel herzustellen, der unter Wasser nicht zerfällt und dessen Struktur durch das Wasser nicht aufgelöst wird. Ein Ziel der Arbeit ist die Optimierung der Mörtelrezeptur und somit die Entwicklung eines Mörtels, der für die Instandsetzung von senkrechten Betonoberflächen unter Wasser geeignet ist. Weiterhin soll der Mörtel ohne Einschalen des gesamten Wasserbauwerkes einsetzbar sein.

Ein Instandsetzungsmörtel, der unter Wasser einbaufähig sein soll und sich nicht von der instand zu setzenden Oberfläche ablöst, muss mit einem schnell erstarrenden Bindemittel angemischt

werden. Materialien mit normalen Erstarrungszeiten zementgebundener Baustoffe sind ungeeignet - sie fallen spätestens nach wenigen Minuten von der Betonoberfläche ab. [114]

Daher ergeben sich für den Mörtel, der unter Wasser aufgebracht werden kann und einen Anfangs-Verbund mit dem Betonuntergrund eingeht, folgende Eigenschaften [114]: Der Instandsetzungsmörtel muss

- eine gute Verarbeitbarkeit besitzen,
- ein gutes inneres Zusammenhaltevermögen (auch unter Wasser) haben, damit dieser unter Wasser nicht zerfällt,
- möglichst schnell erstarren und erhärten nach erfolgter Platzierung,
- einen Anfangs-Verbund herstellen, so dass die Struktur vom umgebenden Wasser möglichst unverändert bleibt,
- eine ausreichende Haftung zum Untergrund ausbilden und
- ausreichend dauerhaft und preiswert sein, damit auch große Flächen mit angemessenen Materialkosten instand gesetzt werden können.

An (Zement-)Mörtel werden durch die Regelwerke

- ZTV-ING (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen für Ingenieurbauten) [22]
- RL-SIB (Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen - Instandsetzungsrichtlinie) [28]
- ZTV-W (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau) [24]

Anforderungen gestellt. Die Anforderungen der genannten Regelwerke gelten nur für den Einsatz über Wasser, doch werden diese Randbedingungen und Anforderungen für die Instandsetzung unter Wasser herangezogen, weil es für den Einsatz unter Wasser keine Regelwerke in Deutschland gibt. Die Richtlinie des American Concrete Institute (ACI) [2] in den USA beschäftigt sich zwar mit der Instandsetzung unter Wasser, doch gibt sie keine konkreten Angaben zu Anforderungen und Prüfungen an. [114]

Es gibt eine Reihe von Materialien, die für die Unterwasserinstandsetzung einsetzbar sind. Grundsätzlich werden die zwei Typen Zementmörtel und Kunstharzmörtel unterschieden. Durch Zugabe von Betonzusatzmitteln erlangen konventionelle Zementmörtel verbesserte Eigenschaften, die die Kohäsion, die Festigkeit, die Verarbeitbarkeit, die Entmischungsneigung und das Schwinden betreffen. [102]

McLeish [102] sieht bei einem Gebrauch von Zementmörtel gegenüber Kunstharzmörtel bei Anwendung unter Wasser folgende Vorteile [102]:

- die mögliche Anpassung des Elastizitätsmoduls,
- die mögliche Anpassung der damit zusammenhängenden Dehnungen,
- die Möglichkeit den Mörtel in größeren Schichtdicken zu verwenden, ohne hohe Wärme aufzubauen, um temperaturbedingte Risse zu vermeiden,
- wesentlich günstigere Materialkosten
- geringere Anfälligkeit gegenüber Fehler in der Mischtechnik und Applikation und
- gefahrlose Anwendung durch Taucher.

Bei der Zusammensetzung kunststoffmodifizierter Mörtel und Betone wird zwischen CC und PCC und PC (internationale Nomenklatur) unterschieden. Ein CC (= Cement Concrete) ist ein Zementmörtel bzw. Zementbeton. Dabei ist Zement das alleinige Bindemittel und organische Zusätze liegen unter 0,5 % bezogen auf das Gesamtgewicht vor. Ein PCC (= Polymer Cement Concrete) ist ein polymermodifizierter Zementmörtel bzw. Zementbeton. Das Hauptbindemittel ist Zement und die Polymeren Zusätze liegen zwischen 0,5 % und 5 % (festes Polymerbindemittel) bezogen auf das Gesamtgewicht. Bei einem PC (= Polymer Concrete) hat das Polymer die Bindemittelfunktion und der Polymeranteil beträgt normalerweise mehr als 5 % bezogen auf das Gesamtgewicht. [157]

Die Instandsetzungsrichtlinie des DAfStb (RL SIB) [28] unterscheidet bei ihren Anforderungen und Randbedingungen für Instandsetzungsmörtel zwischen Zementmörteln und kunststoffmodifizierten Mörteln.

2.2.1. Zementmörtel

Ein Mörtel besteht i. d. R. aus einer Gesteinskörnung, einem Bindemittel und Wasser. Zusatzstoffe und Zusatzmittel werden je nach Anforderung ergänzt. Zusammen mit einem Bindemittel und Gesteinskörnung kann ein erhärtender Verbundbaustoff hergestellt werden, weil das Bindemittel als Kleber wirkt. Es wird zwischen mineralischen Bindemitteln und nicht mineralischen Bindemitteln unterschieden. Die wichtigsten mineralischen Bindemittel sind Zement, Baukalk und Gips. Erhärten mineralische Bindemittel sowohl an Luft als auch unter Wasser, so werden diese hydraulische Bindemittel genannt. Nicht mineralische Bindemittel sind z. B. Bitumen und Epoxidharz (EP). Das beim Mörtel meist verwendete Bindemittel ist Zement.

Zement stellt die Hauptbindemittelkomponente zementgebundener Schutz- und Instandsetzungsstoffe dar [135]. Ihre Hauptklinkerphasen sind Tricalciumsilicat (Alit, C_3S), Dicalciumsilicat (Belit, C_2S), Tricalciumaluminat (Aluminat, C_3A) und Tetracalciumaluminatferrit (Ferrit, C_4AF) (siehe Abschnitt 3.1.1). Bei der Hydratation der Calciumsilikate entsteht Calciumsilikathydrat (C-S-H). Aluminat (C_3A) und Ferrit (C_4AF) bilden zusammen mit dem Sulfatträger bei der Hydratation sogenannte AFm-Phasen ($Al_2O_3 - Fe_2O_3 - mono$) und AFt-Phasen

($Al_2O_3 - Fe_2O_3 - tri$). AFm-Phasen formen plättchenförmige Kristalle und AFt-Phasen formen prismatische Kristalle. [155, 169]

Maßgebend für die Festigkeitsbildung des Zementes sind die C-S-H-Phasen. Vom w/z-Wert hängt die Ausbildung des Porenraumes im Zementsteingefüge wesentlich ab. Wegen der begrenzten Abmessungen für die instand zu setzenden Bereiche und der Forderung nach einer minimalen Schichtdicke in Abhängigkeit vom Größtkorn werden überwiegend Mörtel als zementgebundene Schutz- und Instandsetzungsstoffe verwendet. [135]

Schichten mit einer Dicke von 2 bis 3 cm gelten als Beschichtungen. Im Gegensatz dazu werden neu aufgebrachte Beton bzw.- Mörtelschichten mit einer Dicke größer 5 cm als Verbundbetone bezeichnet und als eine tragende Konstruktion behandelt. [144]

Nach RL SIB Teil 2, Abschnitt 4.3.2 [28] gilt für Zementmörtel, dass der Zementgehalt mindestens 400 kg/m^3 betragen muss, ein Wasserzementwert 0,50 nicht überschritten werden darf und, dass ein Zement nach DIN EN 197-1 [50] zu verwenden ist. Die Festigkeit muss mindestens der Festigkeitsklasse 32,5 entsprechen. Nach RL SIB Teil 1, Abschnitt 6.4.2 (R) [28] muss Portlandzement CEM I nach DIN EN 197-1 [50] als Zement für Instandsetzungsmörtel bzw. -beton verwendet werden, wenn es sich um Maßnahmen des Instandsetzungsprinzips R (Korrosionsschutz durch Wiederherstellung des alkalischen Milieus) handelt.

2.2.2. Kunststoffmodifizierte Mörtel

Nach RL SIB Teil 2, Abschnitt 4.3.3 gilt für kunststoffmodifizierte Mörtel ein maximaler Polymergehalt von 10 % Zementgehalt (bei Instandsetzungsprinzip R - Korrosionsschutz durch Wiederherstellung des alkalischen Milieus) und die Verwendung von Portlandzement (CEM I) nach DIN EN 197-1 [50].

Die ZTV-ING [22] gibt für Zementmörtel mit Kunststoffzusatz (PCC - Polymer Cement Concrete) an, dass die Schichtdicken mindestens 1 cm und höchstens 5 cm betragen sollen. Darüber hinaus muss für Zementmörtel der Größtkorndurchmesser der Gesteinskörnung auf die erforderliche Schichtdicke abgestimmt sein. Dabei darf die Gesteinskörnung höchstens 1/3 der Schichtdicke bzw. höchstens 8 mm betragen [22].

Ergänzend steht in der ZTV-W [24], dass die Schichtdicke bei Zementmörteln i. d. R. 10 bis 50 mm beträgt und die Mindestschichtdicke muss dem 3-fachem Größtkorndurchmesser des eingesetzten Betonersatzsystems entsprechen [24].

Darüber hinaus ist eine sorgfältige Nachbehandlung unerlässlich, um eine Dauerhaftigkeit des Betonersatzes zu gewährleisten. Die Art und Dauer der Nachbehandlung soll entsprechend den Angaben des Herstellers verrichtet werden, mindestens jedoch 3 Tage. [22]

2.3. Anforderungen an den Verbund

Für die Instandsetzung unter Wasser gibt es keine Regelwerke in Deutschland. Die Richlinie des American Concrete Institute (AC) [2] zum Thema der Betoninstandsetzung unter Wasser macht keine Angaben zur Verbundqualität nach der Instandsetzung. Daher gibt es keine konkreten Anforderungen an den Verbund.

Die geforderte Haftzugfestigkeit für den Verbund zwischen Instandsetzungsmörtel und Betonuntergrund beträgt nach ZTV-ING im Mittel 1,5 N/mm^2 und für den zulässigen kleinsten Einzelwert 1,0 N/mm^2. [22]

Diese Anforderung der ZTV-ING [22] gilt zwar nicht für diesen Anwendungsfall, weil es keine Regelungen gibt, die für eine Unterwasseranwendung gültig ist. Die Anforderung wird aber als Anhaltswert für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit für die Instandsetzung unter Wasser herangezogen. Damit eine solche Maßnahme eine Zustimmung im Einzelfall erhalten kann, liegt man auf der sicheren Seite, wenn die Anforderungen und Bedingungen der Regeln, die für eine Instandsetzung im Trockenen bestimmt sind, erfüllt werden.

Die Versuchsergebnisse in Abschnitt 6.1.1 jedoch zeigen, dass der angestrebte Wert der Haftzugfestigkeit zwischen appliziertem Mörtel und Beton von 1,5 N/mm^2 nicht als strenger Grenzwert für die Beurteilung eines erfolgreichen Haftverbundes geeignet ist. Vielmehr ist diese Zahl als grober Richtwert zu verstehen, je nach Betonuntergrund und Bauwerk kann die tatsächlich erforderliche Festigkeit auch niedriger sein.

Die Relevanz dieses Grenzwertes für einen Praxiseinsatz der Instandsetzung unter Wasser ist zusammen mit Richtliniengebern zu diskutieren und mit Versuchsreihen zu überprüfen. Da bei der Haftzugfestigkeitsprüfung der Verbundproben bisher überwiegend ein Kohäsionsversagen im Beton stattfand, auch wenn Haftzugfestigkeiten unterhalb der 1,5 N/mm^2 erreicht wurden, ist diese Grenze für die Unterwasserinstandsetzung möglicherweise nicht notwendig. Dem stimmen auch Firmen aus der Praxis zu.

Auch aus der Literatur ist bekannt, dass Festigkeiten durchfeuchteter Betone meist geringere Werte aufweisen als trockener Beton [26]. Demzufolge werden im Rahmen dieser Arbeit Haftzugfestigkeiten von mindestens größer 1 N/mm^2 angestrebt.

2.4. Anforderungen an die Applikationstechnik

Ein Ziel dieser Arbeit ist die Erprobung verschiedener Applikationstechnik und die Entwicklung einer optimierten Technik zum Aufbringen von Mörtel unter Wasser. Dazu wurden mehrere Ansätze für die Applikation verfolgt. Verfahren mit Tauchern sollten vermieden werden. Die voran gegangenen Arbeiten in [116, 117] zeigten, dass eine Verdichtungsenergie für eine Auftragstechnik notwendig ist. Diese Verdichtungsenergie kann mechanisch aufgebracht werden.

Es werden die drei folgenden Applikationstechniken untersucht:

- Ein reines Auftragsverfahren durch Andrücken,
- das Spritzen unter Wasser,
- ein gleitendes Auftragsverfahren und
- ein Auftragsverfahren mit einer den Mörtel umgebenden Kammer.

Eine Applikationstechnik ist zu entwickeln, die es ermöglicht, den oder die entwickelten Mörtel unter Wasser mit Schichtdicken von 1 bis 2 cm aufzubringen, so dass ein Verbund zwischen Mörtel und Beton realisiert wird.

3. Grundlagen

3.1. Theoretische Grundlagen verwendeter Ausgangsstoffe

In diesem Kapitel werden Ausgangsstoffe kurz beschrieben, die in der Mörtelentwicklungsphase verwendet wurden. Es wurden als Zemente Portlandzement, Aluminatzement und Spritzbetonzement verwendet. Als Betonzusatzstoff wurde Flugasche verwendet und als Betonzusatzmittel wurden Fließmittel, Beschleuniger, Stabilisierer und Dichtungsmittel eingesetzt. Auf Polymerdispersionen und Abbindeverzögerer wird besonders eingegangen, weil sie im Rahmen dieser Arbeit überwiegend Einsatz in den Mörtelrezepturen gefunden haben und in vielen Versuchsreihen für die Unterwasseranwendung erprobt wurden.

3.1.1. Portlandzement

Portlandzementklinker ist Hauptbestandteil des Portlandzementes [72]. Portlandzement besteht im wesentlichen aus den vier Hauptklinkermineralien Tricalciumsilicat (Alit, C_3S), Dicalciumsilicat (Belit, C_2S), Tricalciumaluminat (Aluminat, C_3A) und Tetracalciumaluminatferrit (Ferrit, C_4AF), sowie aus einem Sulfatträger [9, 72, 126]. Die beiden silikatischen Phasen machen mit 80 Gew.% den Hauptbestandteil des Zementes aus und sind gleichzeitig die festigkeitsbildenden Phasen [9, 126]. Bei der Reaktion von Portlandzement (Verfestigungsprozess) bilden sich mehr oder weniger gut kristallisierte Hydratationsprodukte, die i. d. R. schwerer löslich sind als ihre Ausgangsstoffe [166].

Durch Feinmahlen von Portlandzementklinker entsteht Portlandzement, unter Zusatz von Calciumsulfat. Der Calciumsulfatzusatz wird benötigt, um das Erstarrungsverhalten zu regeln. Dies gilt für alle Zemente, sie enthalten einen geringen Zusatz eines Sulfatträgers, der die Erstarrung regelt. Der Portlandzementklinker würde sonst sehr schnell mit Wasser reagieren und erhärten. [72] Durch das werkseitige Zumahlen von Sulfatträger wird die Erstarrungszeit verlangsamt und es können günstigere Verarbeitungszeiten erreicht werden [9]. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Portlandzement und Aluminatzement ausgewählt, weil Literaturrecherchen ergaben, dass sich durch verschiedene Mischungsverhältnisse von Portlandzement und Aluminatzement unterschiedliche, auch sehr kurze, Erstarrungszeiten ermöglichen ließen (im Detail, siehe Abschnitt 3.1.9.4).

3.1.2. Aluminatzement

Tonerdezemente bestehen im Wesentlichen aus Calciumaluminaten und werden als Aluminatzemente bezeichnet [72, 126]. Die Hauptklinkerphasen sind Monocalciumaluminat ($CaO \cdot Al_2O_3$,

CA) und Calciumdialuminat ($CaO \cdot 2Al_2O_3$, CA_2) [126]. Aluminatzemente hydratisieren deutlich schneller als Portlandzemente und binden etwa doppelt so viel Wasser. [72, 112] Aluminatzemente erstarren normal und sind 1,5 bis 2 Stunden verarbeitbar, erhärten aber sehr schnell. [112] Deswegen erreichen sie auch bei hohen w/z-Werten dennoch sehr hohe Festigkeiten [112, 126].

Die Erhärtung von Aluminatzementen reagiert sehr empfindlich auf die eingeführte Mischenergie. Die Erstarrungszeiten hängen dabei von der Mischintensität ab. Eine sehr hohe Mischintensität kann sehr schnelles Erstarren hervorrufen. [169]

Die Anfangs-Druckfestigkeit, die schnelle Erhärtung, die Hitzebeständigkeit und die Resistenz gegen stark verdünnte Säuren zeichnen den Aluminatzement aus. Anders als beim Portlandzement wird kein Calciumhydroxid freigesetzt, sondern es entsteht Aluminiumhydroxid. Dieses bildet einen Schutzfilm um die Calciumaluminathydrate. Weil der sogenannte Schutzfilm im alkalischen Milieu angegriffen wird ist der Einsatz des Aluminatzementes begrenzt. Aufgrund der „Konversion“ von Aluminatzement, ist in Deutschland die Verwendung von Calciumaluminatzementen für tragende Beton- und Stahlbetonbauteile verboten [71, 126]. Unter „Konversion“ ist die Zunahme der Porosität und eine deutliche Festigkeitsminderung des bereits erhärteten Produktes bei Einwirken von Wasser und erhöhten Temperaturen zu verstehen, die auf einer Phasenumwandlung beruht. [71]

3.1.3. Spritzbetonzement

Hierbei handelt es sich i. d. R. um Portlandzemente, die einen optimierten Sulfatgehalt für den Anwendungsfall Spritzbeton im Trockenspritzverfahren besitzen. [55] Der Vorteil liegt im Verzicht auf alkalihaltige, beschleunigend wirkende Zusatzmitteln, wodurch das Risiko von Ausblühungen und Auslaugungen verringert wird [55, 141]. Im Gegensatz zu normal erstarrenden Zementen enthalten sie keinen oder eine geringe Menge Sulfatträger zur Steuerung des schnellen Erstarrens und Erhärtens [141]. Spritzbetonzement wird im Rahmen dieser Arbeit aufgrund seines schnellen Erstarrens und schnellen Festigkeitsentwicklung verwendet.

3.1.4. Flugasche

Flugaschen sind Rückstände, die bei der Kohleverbrennung in Kraftwerken entstehen. Der Kohlenstaub verbrennt, jedoch die begleitenden Gesteinspartikel werden aufgeschmolzen und erstarren bei einer schnellen Abkühlung glasig. Die Partikel haben eine kugelige Form und eine glatte Oberfläche. Sie bestehen im Wesentlichen aus Siliciumdioxid und Aluminiumoxid. Das Reaktionsvermögen von Flugasche hängt vom mineralogischen Aufbau und von der Feinheit ab. [72]

Im Beton hat Flugasche drei Wirkungsweisen: Eine rheologische und eine Füllerwirkung und durch eine puzzolanische Reaktion trägt sie zur Festigkeit des Betons bei [177]. Der rheologische Effekt kommt im Wesentlichen durch die Kornform zustande. Die Korngrößenverteilung normaler Flugaschen ist etwa so wie bei Zementen.

Die silikatischen und aluminatischen Verbindungen müssen möglichst fein verteilt und in glasiger Form vorliegen, damit sie reaktionsfähig sind. Die Verwendung von Flugasche beeinflusst die Verarbeitbarkeit bzw. den Wasseranspruch des Frischbetons. Im Wesentlichen wird der Einfluss auf die Verarbeitbarkeit durch die Korngröße und deren Verteilung bestimmt. Ein hoher Anteil der Kornfraktion kleiner als 10 μm ist günstig, weil solche Flugaschen das Lückenvolumen im Gefüge des Frischbetons ausfüllen können und das sonst vorhandene Wasser verdrängen. Dadurch senken sie den Wasseranspruch und verbessern die Verarbeitbarkeit. Wird Flugasche als Ersatz eines Teils des Zementes verwendet, so reagiert diese nicht sofort. Dadurch steht ein Teil des sonst gebundenen Zugabewassers für eine weitere Verflüssigung des Leims zur Verfügung. Weil die Oberfläche von Flugaschepartikeln überwiegend glatt und glasig ist, ist für ihre Benetzung nur wenig Wasser erforderlich. [9, 72]

Der Verwendung von Flugasche sind Grenzen gesetzt: Zum einen durch die die Anrechenbarkeit von Flugasche (siehe DIN Fachbericht 100 [31]) auf den Zementgehalt und den w/z-Wert [165] und zum anderen durch einen max. Mehlkorngehalt im Beton nach DIN 1045-2 [32].

3.1.5. Fließmittel

Fließmittel (FM) haben eine plastifizierende bzw. verflüssigende Wirkung [72]. Bei gleichem w/z-Wert verbessern die Fließmittel die Verarbeitbarkeit des Betons oder vermindern bei gleicher Verarbeitbarkeit den Wasseranspruch und gleichzeitig den w/z-Wert. Dies führt dann zu einer Erhöhung der Druckfestigkeit und der Dichtigkeit. [9]

Stoffkomponenten von Fließmitteln können Ligninsulfonate, Naphtalinformaldehydkondensatsulfonat, Melaminformaldehydkondensatsulfonat und Polycarboxylatether sein [155]. Im Wesentlichen beruht die Wirkung von Fließmitteln auf einer Dispergierung von Zementagglomeraten, zusätzlich können sie eine Schmierwirkung im Stoffgemisch zeigen. Hauptsächlich sind elektrostatische oder sterische Effekte für die dispergierende Wirkung verantwortlich. Ohne ein Fließmittel kommt es zu einer Agglomeration der Zementpartikel. [72]

3.1.6. Luftporenbildner

Luftporenbildner erhöhen den Luftgehalt im Beton und somit auch die Frost-Taumittel-Beständigkeit [9]. Der Luftporenbildner wird beim Mischen des Frischbetons zugegeben [165]. Während des Mischens werden kleine, fein verteilte, kugelförmige, geschlossene Luftporen eingeführt [72].

Luftporenbildner erzeugen künstlich eingebrachte Luftporen, die von innen hydrophobiert sind. Damit wird die Wasseraufnahme deutlich reduziert und die künstlich eingebrachten Luftporen bleiben ohne Wasserfüllung [155]. Die Luftporen wirken kapillarbrechend: Sie unterbrechen die röhrenförmigen Kapillaren und vermindern aufgrund ihres größeren Durchmessers dessen Saugwirkung. Die Eindringtiefe für das aufsteigende Wasser wird verringert. [9, 126, 155]

Beim Einsatz von Luftporenbildner wird kein Gas freigesetzt, vielmehr „stabilisieren sie mit einem Ende die Grenzfläche Luft und Flüssigkeit und mit dem anderen Ende binden sie sich an Zementpartikel“ [155].

Der Frischmörtel bzw. -beton neigt weniger zum Entmischen und hält besser zusammen [72, 165]. Dies führt ebenfalls zur besseren Verarbeitbarkeit [72]. Bei der Zugabe von Luftporenbildner muss, anders als bei den anderen Betonzusatzmitteln, der entstandene Luftporenraum bei der Stoffraumrechnung berücksichtigt werden. Luftporenbildner sollten nicht gleichzeitig mit Fließmitteln verwendet werden. Manche Fließmittel können Entschäumer enthalten, die dann zu einer Verminderung des Luftporengehaltes und damit verbunden zu einer Veränderung der Luftporenwerte führen. [72]

3.1.7. Stabilisierer

Mithilfe eines Stabilisierers (ST) kann der Frischbeton so verändert werden, dass dieser ein homogenes Gefüge behält und sich nicht entmischt [7]. Das Entmischen von Frischbeton- bzw. Frischmörtelsuspensionen wird unterbunden oder verringert. Durch diese Behinderung der Trennung von Gesteinskörnung und Bindemittel wird ein verbessertes Zusammenhaltevermögen erzielt. [155]. Deswegen wird beim Einbringen von Unterwasserbeton durch den Zusatz von Stabilisierern der Zusammenhalt verbessert und er wäscht sich weniger aus. [72, 155]

Durch die Zugabe eines Stabilisierers kann vorübergehend ein Ansteifen des Frischbetons bewirkt werden. Nach vollständiger Auflösung wird wieder die Ausgangskonsistenz des Frischbetons erreicht. [72]

Stabilisierer sind in der Lage, im alkalischen Milieu des Betons Wasser zu binden und es für nachfolgend ablaufende Hydratationsvorgänge wieder zur Verfügung zu stellen [9]. Methylcellulose gehört zu den wichtigsten Stabilisierern. Bei Methylcellulose handelt es sich um ein Polysaccharid (ein Vielfachzucker, ein Makromolekül aus vielen Glucose-Molekülen). Durch Einlagerung von Wasser in die in Knäuelform vorliegenden Makromoleküle werden sie zu langen Ketten gestreckt. Dadurch wird die Viskosität der Suspension erhöht und das Wasserrückhaltevermögen erhöht sich aufgrund der vorgenannten lockeren Einbindung des Wassers. [155]

Ist die Dosierung des Stabilisierers zu hoch, so kann eine schlechte Verarbeitbarkeit durch Kleben das Arbeiten mit dem Beton erschweren. Der Luftporenanteil steigt nur unwesentlich an,

so lange die Zugabe im Bereich der empfohlenen Zugabemenge bleibt. Stabilisierer beeinflussen nicht die Erhärtung des Zementes und ebenfalls nicht den Korrosionsschutz der Bewehrung. [72]

3.1.8. Polymerdispersionen

Aufgrund von Vorversuchen in einer studentischen Arbeit [116] war anzunehmen, dass Mörtel mit Polymeren als Inhaltsstoff im Mörtel unter Wasser gut einsetzbar sind. Im Rahmen der studentischen Arbeit wurden kommerzielle polymerhaltige Mörtel, die in der Kanalsanierung ihren Einsatz haben, verwendet. Händisch unter Wasser applizierte Mörtel erreichten in den Vorversuchen erste hohe Haftzugfestigkeiten zwischen Mörtel und Beton.

Mörtel kann durch den Einsatz von pulverförmigen Polymerdispersionen (sog. Dispersionspulvern) deutlich verbesserte Eigenschaften im Bereich der Haftung (Adhäsion), der Biegezugfestigkeit, der Dichtigkeit des Mörtelgefüges und der Verformungsfähigkeit durch Erhöhung der Flexibilität oder Erniedrigung des Elastizitätsmoduls erzielen. Auch die Verarbeitungseigenschaften und das Wasserrückhaltevermögen des Frischmörtels können beeinflusst werden. Für Polymere, die als wässrige Dispersion oder als Dispersionspulver zur Modifizierung von Mörteln verwendet werden, gelten besondere Anforderungen. [53]

Aus den vorgenannten Gründen wurden Polymerdispersionen im Rahmen dieser Arbeit verwendet. Im Folgenden werden Polymerdispersionen und ihre Eigenschaften kurz erläutert. Für tieferes und weitergehendes Verständnis zur Herstellung und Entwicklung von Polymerdispersionen wird auf folgende Literatur verwiesen: NÄGELE (1989) [111], OHAMA (1995) [118, 119], ETTEL (1998) [56], DISTLER (1999) [53], REUL (2005) [141], GIELER und OSBURG (2006) [68].

Dispersionen sind fein verteilte feste Stoffe (disperse Phase) in einem Dispersionsmittel (fluide Phase) [53, 141]. Die fein verteilten festen Stoffe sind thermoplastische Makromoleküle mit einer Teilchengröße zwischen etwa 0,1 μm bis 3 μm. Bei der Herstellung von Dispersionen entstehen die Makromoleküle durch Emulsionspolymerisation: Die Monomere werden in der wässrigen Phase mit Emulgatoren emulgiert und in diesen Monomertröpfchen zu langkettigen Polymeren polymerisiert. Dadurch erhalten die Polymerteilchen ihre gewisse Stabilität, sie stoßen sich im Wasser ab und ballen nicht zusammen. [56]

Die disperse Phase sind die Polymerpartikel und die fluide Phase besteht grundsätzlich aus Wasser [141]. DISTLER (1999) [53] definiert die *gewisse Stabilität* von Dispersionen damit, dass sich feste und fluide Phase für ein Jahr lang nicht trennen und daher kein Absetzen der festen Stoffe stattfindet [53]. Laut GIELER und OSBURG beträgt der Feststoffgehalt der im Bauwesen verwendeten Dispersionen zwischen 35 und 55 % [68]. Bei der festen Phase (dem dispergierten Stoff) handelt es sich um thermoplastische Polymere, die entweder als Emulsion (kleine kugelförmige plastische Tröpfchen) oder als Suspension (kleine feste Teilchen) vorliegen [68].

Es werden zwei Typen von Dispersionen hinsichtlich ihrer Stabilisierung unterschieden: Zwischen Schutzkolloid-Dispersionen und sogenannten Seifendispersionen. Die Schutzkolloid-Dispersionen erhalten ihre Stabilität durch Einhüllung der Partikel. [56, 111] Diese Schutzkolloide haben zum einen eine hohe Affinität zu den dispergierten Partikeln zum anderen reduzieren sie durch die Bindung vieler Wassermoleküle (siehe Abbildung 3.1) die Grenzflächenenergie. Die Benetzbarkeit durch das Dispersionsmittel (Wasser) ist stark erhöht [111]. Durch diesen hydrophilen Film wird nicht nur die Benetzung der dispergierten Teilchen verbessert, sondern auch der Teilchendurchmesser vergrößert. [56]

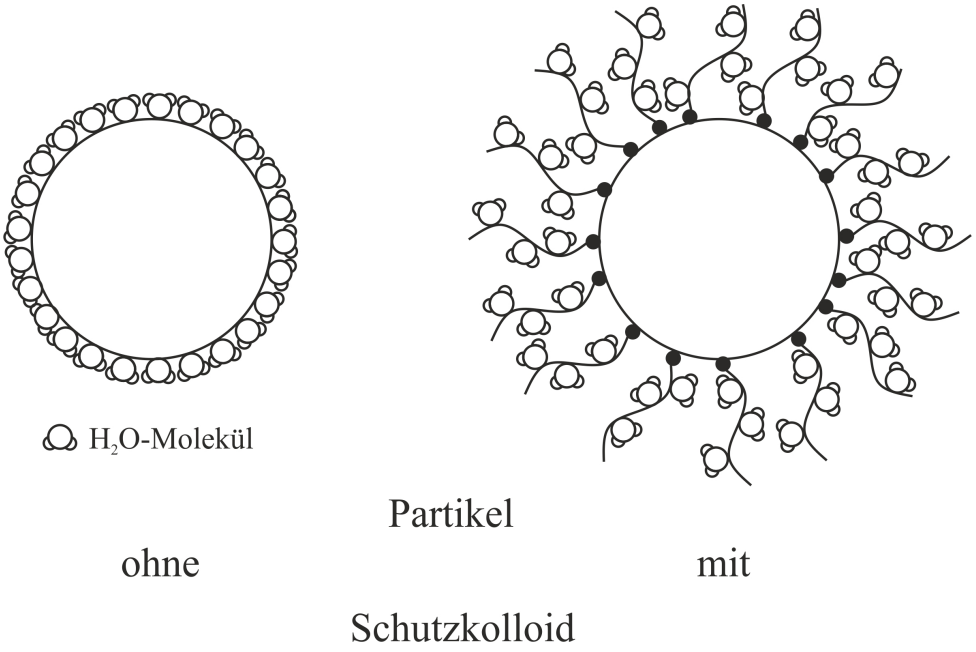


Abbildung 3.1.: Prinzip eines Schutzkolloid nach [56, 111]

Die Seifendispersionen (Tensidstabilisierte Dispersionen) erhalten ihre Stabilität durch die elektrische Ladung der Partikel oder durch Bildung von Tensidmizellen. Die Abbildung 3.2 zeigt schematisch eine Tensidmizelle: Die hydrophoben Polymerteilchen werden in Tensidmizellen eingeschlossen und so hydrophiliert. Die Enden der Tensidmoleküle sind hydrophob und adsorbieren am hydrophoben Polymer. Gegen das umgebende Wasser (Elektrolytlösung) gerichtet sind hingegen die hydrophilen Gruppen des Tensids. Der Gesamtkomplex verhält sich hydrophil. [56, 111]

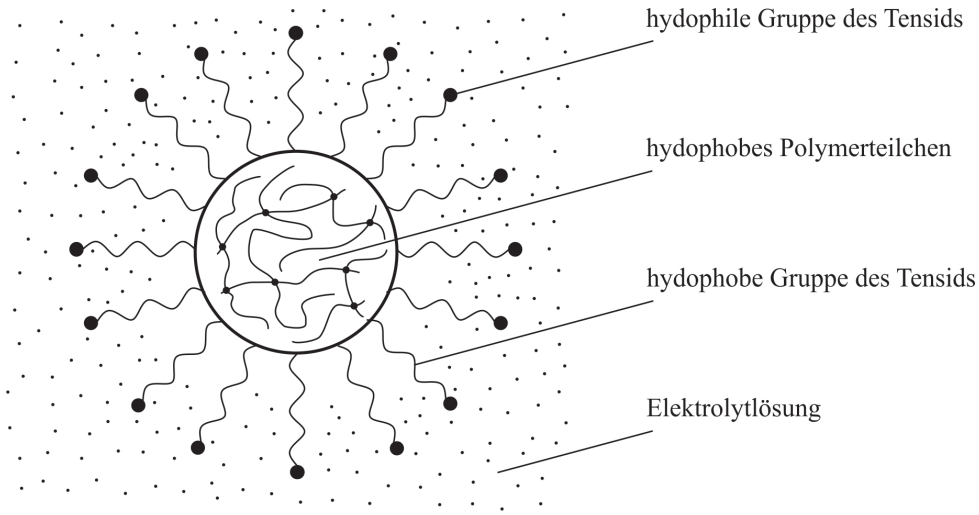


Abbildung 3.2.: Stabilität durch Bildung von Tensidmizellen nach [111]

Heute werden in der Regel redispergierbare Dispersionspulver eingesetzt. Sie werden durch Sprühtrocknung von Dispersionen erhalten und liegen als eine pulverförmige Dispersion vor. Sie besitzen die Bestandteile der ursprünglichen Dispersion und bilden beim Anrühren mit Wasser wieder eine stabile Dispersion. Damit bei der Herstellung der Dispersionspulver während der Sprühtrocknung nicht bereits eine Filmbildung stattfindet, welches einer irreversiblen „Verklebung“ entspricht, wird das feine Pulver von einem wasserlöslichen Schutzkolloid (z. B. Polyvinylalkohol, Cellulosederivate) umhüllt. Auf diese Weise sind die wasserunlöslichen Makromoleküle in einer wasserlöslichen Phase eingebettet. Die wasserlösliche Phase löst sich bei Kontakt mit Wasser auf und in dem Moment tritt der irreversible Filmbildungsprozess ein, der typisch für Dispersionen ist. [56, 68]

Laut GIELER und OSBURG (2006) [68] gibt es bei der Verarbeitung von Dispersionen mehrere Dinge zu beachten. Hierzu zählt das Einhalten der Mindestfilmbildetemperatur, die i. d. R. größer +5° C ist. Befinden sich die Temperaturen unterhalb der Mindestfilmbildetemperatur, kann es sein, dass die Filmbildung mangelhaft ist oder es gar nicht erst zu einer Filmbildung kommt. Des Weiteren muss das Dispersionsmittel verdunsten bzw. entweichen können. [68]

Baumaterialien wie Dispersionen bieten hohe Anwendungssicherheit und hohe Dauerhaftigkeit. Hauptsächlich werden im Bauwesen Polymerdispersionen auf Polyvinylacetatbasis und ihre vielfältige Kombination, auf Styrol-Butadienbasis und auf Polyacrylat-Polymethacrylatbasis verwendet. Zu den Polyvinylacetatdispersionen gehören beispielsweise Polyvinylacetathomopolymerdispersionen und Vinylacetat-Co- und Terpolymerisat-Dispersionen. [141]

3.1.9. Abbinderegler

Bei den sogenannten Abbindereglern wird zwischen Beschleuniger und Verzögerer unterschieden [126].

3.1.9.1. Beschleuniger

Beschleuniger (BE) können verschieden eingesetzt werden. Entweder sie beschleunigen das Erstarren des Zementes oder sie beschleunigen die Entwicklung der Festigkeit. Man unterscheidet daher zwischen Erstarrungs- und Erhärtungsbeschleunigern. [9, 72]

Erstarrungsbeschleuniger verkürzen den Zeitraum zwischen dem plastischen und dem festen Beton [9]. Der Erstarrungsbeschleuniger führt zu einem raschen Ansteifen, was z. B. das Ausbreitmaß des Frischbetons vermindert [155]. Er beschleunigt das Erreichen einer bestimmten Anfangsfestigkeit und erhöht die Druckfestigkeit innerhalb der ersten zwei Tage [9, 155].

Der Erhärtungsbeschleuniger kann die o. g. Wirkung erzielen mit oder ohne Einfluss auf die Erstarrung [9]. Es werden zur Beschleunigung Calciumsalze (Calciumchlorid und Calciumnitrit eingesetzt [126]. Vorwiegend bestehen die Beschleuniger in Deutschland aus Salzen, wie z. B. Carbonate (Natriumcarbonat), Aluminate und Silikate. Diese Salze reagieren in wässriger Lösung alkalisch. Des Weiteren werden auch nicht alkalisch reagierende Salze verwendet und organische Stoffe (Thiocyanate) [72]. Thiocyanate können ähnlich wie Chloride korrosionsfördernd wirken. Daher sollte man auf ihre Verwendung verzichten [72]. Die Verwendung von Calciumchloriden und Thiocyanaten als Beschleuniger in Stahlbetonbauten ist in Deutschland auch nicht zulässig [155].

Alkalifreie Beschleuniger bestehen aus Aluminiumsalzen [126]. Die chemische Zusammensetzung des Zementes hat einen sehr starken Einfluss auf die Wirkung des Beschleunigers. Der Gehalt an Alkalien und dem Sulfatträger bestimmen seine Wirkung. [72, 155] Die Beschleuniger wirken unterschiedlich auf die einzelnen Klinkerphasen [155]. Die Alkalimetallsilicate reagieren mit dem $Ca(OH)_2$ zu unlöslichen C-S-H. Dies führt zum raschen Ansteifen. Alkalimetallaluminate und alkalifreie Beschleuniger beeinflussen die frühe Hydratation von C_3A und C_3S. Sie bilden zusätzliche Hydratationsprodukte und greifen somit aktiv in den Hydratationsprozess ein. Chemisch gesehen wird eine beschleunigte Hydratation der Zementkomponenten bewirkt. [9]

Durch eine höhere Zugabe ist ein Umschlagen der Wirkung möglich. Im Allgemeinen wird die Frühfestigkeit des Betons erhöht, die Festigkeit nach 28 Tagen kann dagegen vermindert werden. [9, 72]

3.1.9.2. Verzögerer

Um einen Beton oder Mörtel länger verarbeiten zu können, ist es zweckmäßig oder erforderlich diesen Zeitraum zu verlängern. Das Erstarren von Zement wird durch die Zugabe von Verzögerern verlangsamt. [72] Abbindeverzögerer können Substanzen sein, die schwerlösliche Calciumsalze und Calciumkomplexe oder Schutzkolloide bilden. Am häufigsten genannt und am bewährtesten sind Abbindeverzögerer, die solche Schutzkolloide bilden. Dies sind zum Beispiel Methylcellulose und Carboxylmethylcellulose. Zu den Substanzen, die schwerlösliche Calciumsalze oder Ca-Komplexe bilden können, gibt es viele verschiedene (siehe auch

in REUL). [141] Allgemein werden hierbei organische und anorganische verzögernd wirkende Additive unterschieden [93, 141].

Im Rahmen dieser Arbeit werden daher erstarrungsverzögernde Stoffe verwendet, keine handelsüblichen Verzögerer (VZ), da deren genauen Zusammensetzung in der Regel unbekannt ist. Die Zementhydratation läuft über viele Einzelreaktionen ab, die sich gegenseitig beeinflussen. Es ist aus vielen Versuchen bekannt, dass die Wirkungsweise von Additiven bei bestimmten Dosierungen und / oder Zement-Zusatzmittel-Kombinationen umschlagen kann [5].

Verzögerer behindern die Einleitung der Hydratation, indem sie das Inlösunggehen der sich zuerst umsetzenden Bestandteile des Zementes eine gewisse Zeit verhindern. Es handelt sich insbesondere um die Aluminate. Es können sich aber auch Zwischenprodukte an den Oberflächen der Zementkörner bilden, die die Einwirkung des Wassers behindern. Vor allem wird der zeitliche Verlauf der Ettringitbildung beeinflusst. Verzögerer greifen demnach in die chemisch-mineralogischen Reaktionen zwischen Zement und Zugabewasser ein. Diese Reaktionen sind kompliziert. Verzögerer sind laut GRÜBL stets mit dem Zugabewasser zuzugeben. Ein Teil der maßgeblichen Reaktionen können bei einer nachträglichen Zugabe bereits abgelaufen sein. [72]

Es gibt mehrere Stoffe, die erstarrungsverzögernde Wirkung besitzen. Für handelsübliche anorganische und organische Wirkstoffe sind in Tabelle 3.1 ihre Eigenschaften übersichtlich dargestellt.

Tabelle 3.1.: Wirkstoffe für Betonverzögerer und ihre Eigenschaften nach [142, 173]

	Art	Eigenschaften
anorganisch	Phosphate	sehr gute Wirkung für Verzögerungszeiten > 24 h geeignet keine verflüssigende Wirkung moderate, stetige Zunahme der Wirkung mit Dosierung für verzögerten ZTV-K-Beton vorgeschrieben
organisch	Saccharose (Zucker)	sehr gute Wirkung Neigung zum Umschlagen für Verzögerungszeiten > 24 h geeignet bevorzugter Einsatz im Mörtelbereich
organisch	Hydroxycarbonsäuren (z. B. Citronensäure, L(+)-Weinsäure)	gute Wirkung wirkt gleichzeitig verflüssigend für Verzögerungszeiten bis wenige Stunden geeignet keine Zulassung für ZTV-K Beton
organisch	Ligninsulfonate	wirkt gleichzeitig verflüssigend geringe Wirkung

Wie groß die verzögernde Wirkung eines bestimmten Zusatzmittels bzw. Wirkstoffes ist, ist abhängig von der Zusammensetzung der Zemente. GRÜBL zitiert Untersuchungen von ALBRECHT und MANNHERZ (1968) [1] und BENZ (1979) [10]. ALBRECHT und MANNHERZ zeigten, dass trotz gleicher Zugabemenge eines Verzögerers, der Erstarrungsbeginn sehr variabel sein kein. Und laut BENZ reagieren Hochofenzemente besser auf Verzögerer als Portlandzemente. Auch bei unveränderter Zugabemenge und Betonzusammensetzung kann die Verzögerungszeit stark schwanken. [72]

Die Abbildung 3.3 zeigt, dass sich bei hohen Zugabemengen die angestrebte Verzögerung auch in das Gegenteil umschlagen kann. Das genaue Verzögerungsverhalten lässt sich nicht allgemein voraussagen, denn dies ist abhängig vom verwendeten Verzögerer, von der Zementart, der Betonzusammensetzung und von der Temperatur. Einige Verzögerer können gleichzeitig verflüssigend wirken. Die Dauer der verflüssigenden Wirkung ist abhängig vom Zement und ist daher nicht immer mit einer Wassereinsparung verbunden. [72]

Auch PLANK berichtet über die beschleunigende Wirkung, wenn Verzögerer überdosiert werden. So gibt er an, dass im Zement bei Dosierungen von 2-3 M.-% von Citronensäure dieses sogenannte „Umschlagen“ eintritt [126]. Laut ARNOLD werden in Deutschland als Rohstoffe

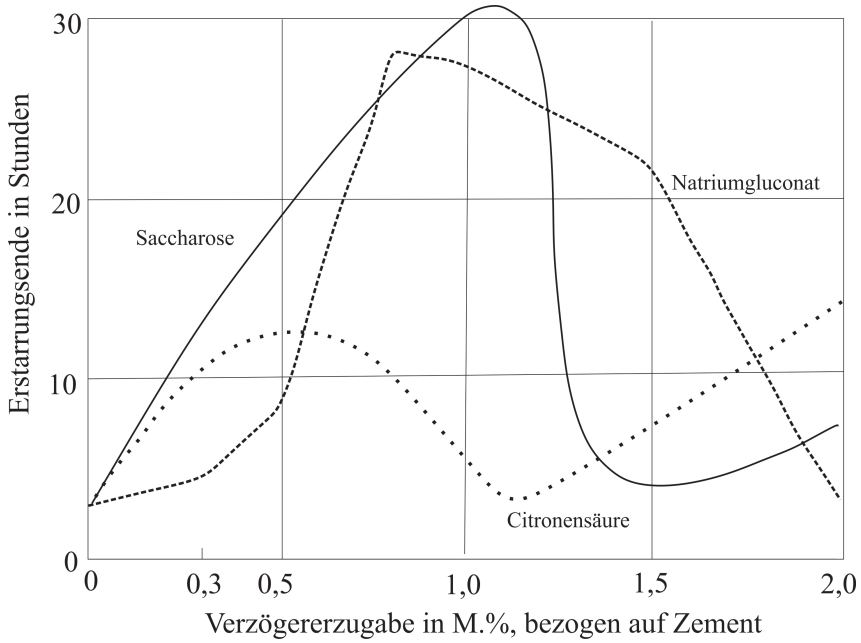


Abbildung 3.3.: Einfluss einer Verzögererzugabe (VZ) auf das Erstarrungsende von Zementleim, Prüfung nach DIN 1164 (3/90) mit Zement PZ 35 F nach [72]

für organische Verzögerer Saccharose, Gluconate, Ligninsulfonate und Hydroxycarbonsäuren, wie Weinsäure und Citronensäure verwendet [5].

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes werden organische Substanzen, wie L(+)-Weinsäure, Citronensäure und Natriumgluconat herangezogen.

3.1.9.3. Dosierung von Abbindeverzögerern

Portlandzement ohne Gipszusatz ist nur wenige Minuten verarbeitbar [142]. Anhydrit, Halbhydrat und Gips zögern die Zeit bis zum Erstarrungsbeginn von Zement heraus. Diese werden dem Zement bei der Herstellung bis zu 5 M. % zugegeben [5].

PLANK gibt an, dass zur Abbinderegelung dem gemahlenen Klinker ca. 3 bis 7 M.-% Gips und / oder Anhydrit als Erstarrungsverzögerer zugegeben werden [126]. Die verzögernde Wirkung von anderen abbindeverzögernden Stoffen (siehe Tabelle 3.1) steht REUL zufolge bei Dosierungen von 0,2 bis 0,5 % vom Zementgewicht im Vordergrund [142]. Für die im Forschungsprojekt verwendeten Wirkstoffe von Abbindeverzögerern gibt REUL [142] folgende Dosierungen an:

- Natriumgluconat ist stark verzögernd und Zugaben von 0,055 % bis 0,56 % vom Zementgewicht behindern das C-S-H-Kristallwachstum.

- Citronensäure kann bei Zugabe von weniger als 0,1 % vom Zementgewicht abbindebeschleunigend wirken und eine Zugabe von größer 0,1 % bis ca. 0,5 % vom Zementgewicht wirkt mit zunehmender Konzentration stark verzögernd.

- Für L(+)-Weinsäure wird für Trockenmörtel auf Gipsbasis eine Zugabe von ca. 0,02 bis 0,1 % vom Gipsgewicht angegeben.

PLANK [126] zufolge liegen Dosierungen für Verzögerer üblicherweise im Bereich von 0,05 bis 0,5 M.% bezogen auf das Bindemittel, bei Überdosierung schlägt das Verhalten um und sie zeigen eine beschleunigende Wirkung. Bei z. B. Citronensäure tritt ein Umschlagen bei einer Dosierung von 2 bis 3 M.% bezogen auf den Zement ein. [126]

Die unterschiedlichen Angaben zeigen, dass Vorversuche notwendig für genaue Dosierungsmengen sind. Die eben aufgeführten Angaben wurden als Richtwerte gesehen. In diesen Zugabebereichen wurden die Mengen der Abbindeverzögerer in den Vorversuchen gewählt und iterativ verändert.

3.1.9.4. Erstarrungszeit steuern über die Zementmischung

Ohne die Verwendung von Abbindeverzögerern ist es laut Literatur auch möglich, bestimmte Zementmischungen zu verwenden um Erstarrungszeiten zu steuern.

Portlandzement kann beschleunigend auf die Erstarrungszeit eines Aluminatzementes wirken und andersherum. Es soll laut Literatur möglich sein mit einer Mischung dieser beiden Zementsorten jede Erstarrungszeit zwischen normaler Erstarrungszeit des ursprünglichen Zementes bis hin zum praktisch sofortigen Erstarren einzustellen, indem der andere Zement schrittweise hinzugefügt wird. ROBSON [1] hat hierzu in den 50er Jahren etliche Untersuchungen (siehe [146]) durchgeführt und diese beschrieben. [145]

Damit Aluminatzemente hohe Festigkeiten und eine gute Dauerhaftigkeit erreichen, müssen bestimmte Randbedingungen eingehalten werden: Ein geringer w/z-Wert (< 0,4) und ein hoher Zementgehalt (> 400 kg/m^3). Eine einfache Rezeptur aus Portlandzement und Aluminatzement mit schneller Abbindezeit ist laut TAYLOR [169] z. B. 15-20 % Portlandzement, 10-30 % Aluminatzement , 10-25 % Calciumhydroxid sowie 40-60 % Sand. [169]

In Abbildung 3.4 sind beispielhaft Angaben zu Erstarrungszeiten (Beginn und Ende) von diversen Mischungsverhältnissen von Aluminatzement und Portlandzement dargestellt. Auf der Abszisse ist dabei der Anteil des Aluminatzements in der Mischung mit Portlandzement angegeben und auf der Ordinate die Erstarrungszeit in Minuten. Durch die höheren Zugaben von Aluminatzement zu Portlandzement verkürzen sich die Erstarrungszeiten der Mischungen. Das genaue Mischungsverhältnis für die minimale Erstarrungszeit ist stark abhängig von den jeweiligen Chargen des Aluminatzementes und des Portlandzementes. Es kann daher variieren. Häufig liegt laut ROBSON [145] das Mischungsverhältnis von Aluminatzement und Portlandzement zum Erreichen von sehr kurzen Erstarrungszeiten in folgenden Bereichen: Zum einen bei 50 % Aluminatzement und 50 % Portlandzement, zum anderen bei 70 % Aluminatzement

[1] Primärliteratur nicht vorliegend, jedoch die Sekundärliteratur - siehe ROBSON [145].

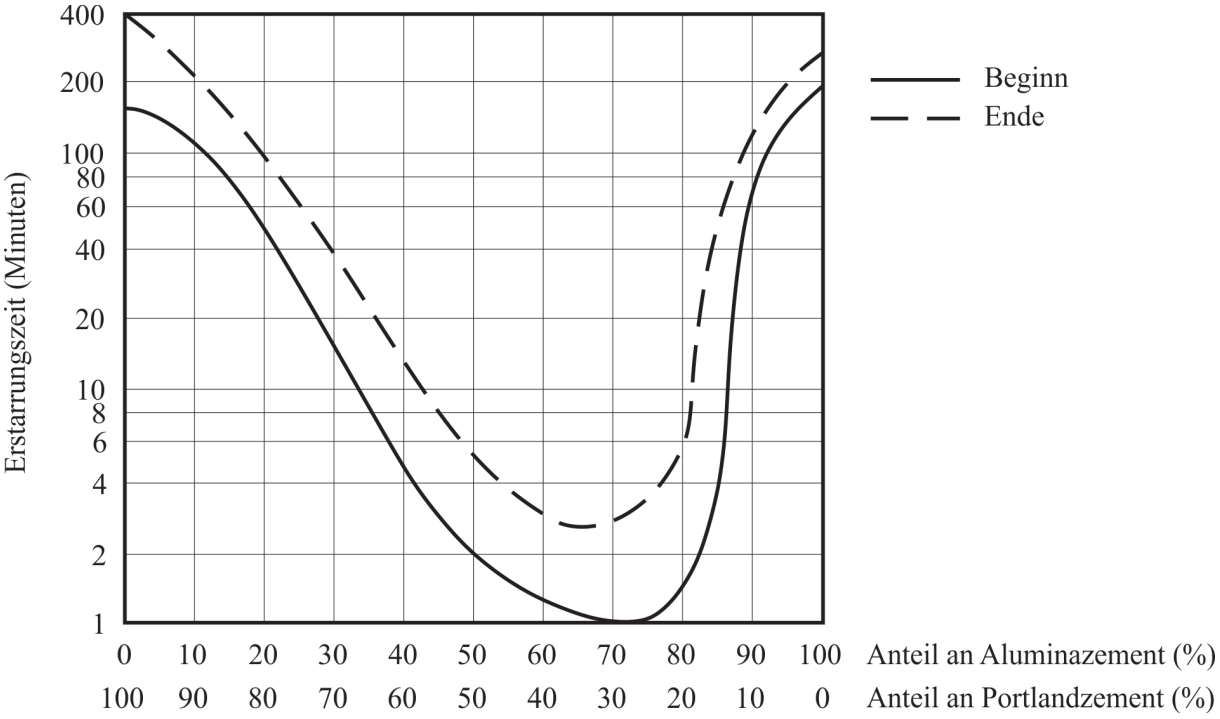


Abbildung 3.4.: Erstarrungszeiten zu Beginn und am Ende von Mischungen aus Aluminatzement und Portlandzement nach ROBSON [146]

und 30 %Portlandzement. Für die Praxis haben sich je nach gewünschter Erstarrungszeit folgende Mengenverhältnisse bewährt (Portlandzement / Aluminatzement): 3 zu 1, 2 zu 1 und 1,5 zu 1. Es ergeben sich Erstarrungszeiten von 5 bis 15 Minuten. Die Erstarrungszeiten dieser Mischungsverhältnisse sind deutlich kürzer als von reinen Portlandzementen. [145] Die Angaben der vorgenannten Abbildung sind nur als Anhaltswerte zu verstehen, weil viele weitere Faktoren Einfluss auf die Abbindezeit der Mischung haben (u. a. das Alter der Materialien, die Art des Portlandzementes und die Temperatur). [145, 169]

In den Abbildungen 3.5 und 3.6 sind Erstarrungszeiten (in Stunden) bei Erstarrungsbeginn und Erstarrungsende von Mischungen aus Aluminatzement und Portlandzement dargestellt. Sie beruhen auf Untersuchungen von LEA (1970) [91] und SCRIVENER und CAPMAS (2004) [162]. Die unterschiedlichen Angaben in den Abbildungen 3.4, 3.5 und 3.6 zu den Abbindezeiten und Mischungsverhältnissen zwischen Aluminatzement und normalem Zement zeigen, dass Erstarrungsbeginn und Erstarrungsende sehr unterschiedlich sein kann. Allgemein hängen sie von der Art des Portlandzements und besonders von Sulfatträgergehalt und -art ab [162].

Weitere Quellen bestätigen, dass diese Grafiken und Verhältnisse zwischen Aluminatzementen und Portlandzementen zum Einstellen einer deutlich schnelleren Erstarrung als ein Portlandzement nicht allgemein gültig sind. Siehe für weitere Details u. a. in LEA (1970) [91], MAILVAGANAM (1995) [96] und SCRIVENER und CAPMAS (2004) [162]. Die Autoren ROBSON (1962) [145] und LEA (1970) [91] verweisen beide auf Untersuchungen von ROBSON (1952) [146] (Literatur nicht auffindbar) und weiterhin auf Literatur und Untersuchungen aus

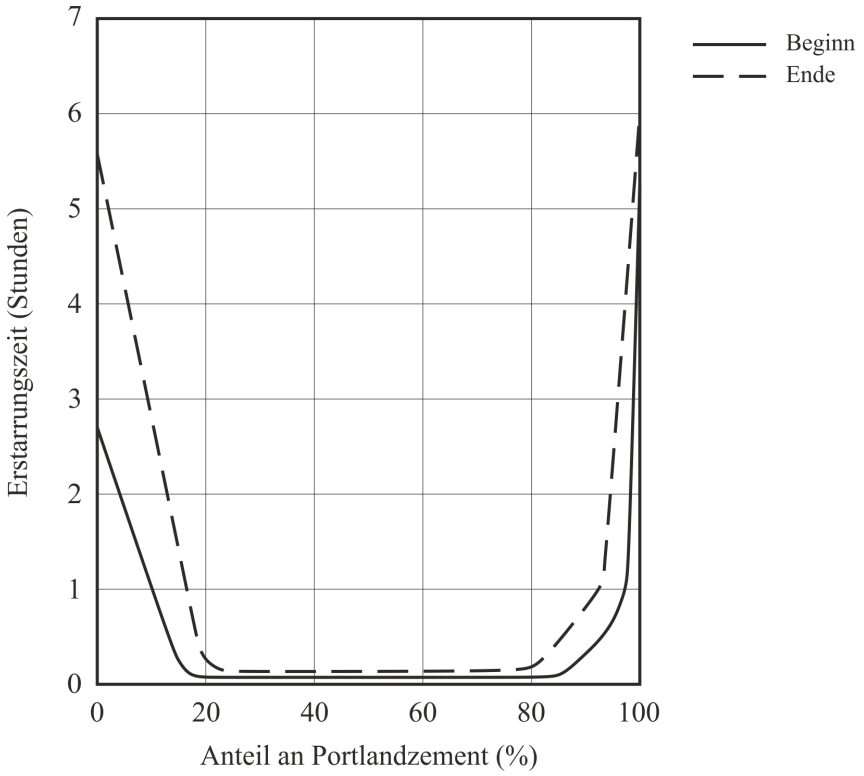


Abbildung 3.5.: Erstarrungszeiten (in Stunden) bei Erstarrungsbeginn und Erstarrungsende der Mischungen aus Aluminatzement und Portlandzement nach LEA [91], ebenfalls zitiert in [97]

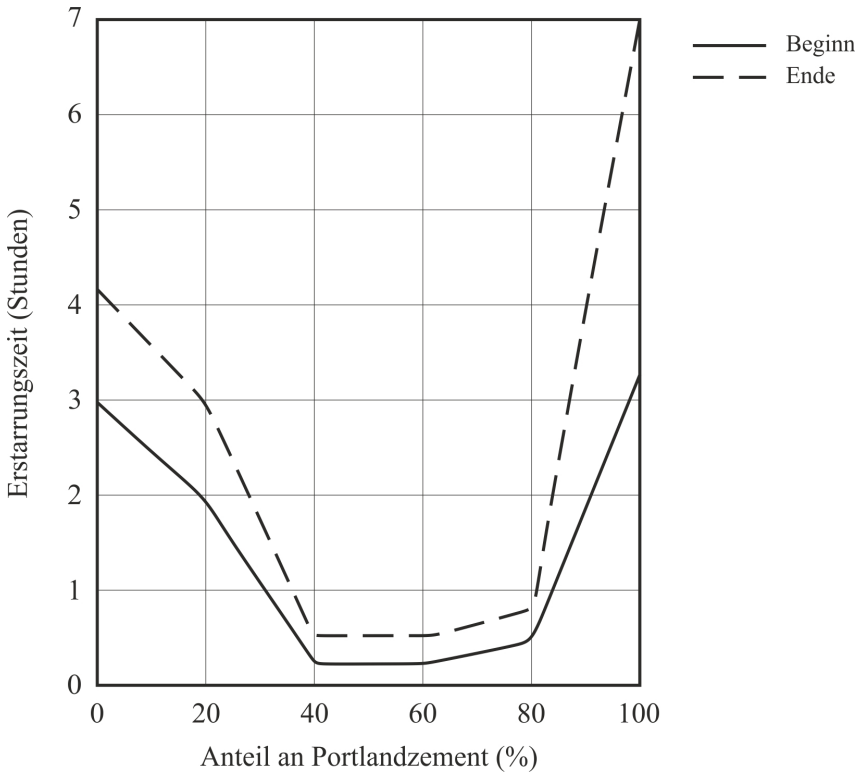


Abbildung 3.6.: Erstarrungszeiten (in Stunden) bei Erstarrungsbeginn und Erstarrungsende der Mischungen aus Aluminatzement und Portlandzement aus Untersuchungen von SCRIVENER und CAPMAS [162]

den 1930er Jahren hin, deren Bibliographie nicht eindeutig war und daher nicht zu sichten waren.

Es wird nach ROBSON [145] weiterhin empfohlen, das Mischen der Zemente im trockenen Zustand vorzunehmen. Bei der Verwendung von Zementschlämmen ist darauf zu achten, dass die geringere Komponente der größeren Komponente immer dazugerührt wird, andernfalls könnte ein sogenanntes *flash setting* (sofortiges Erstarren) eintreten, bevor die Zugabe der zweiten Komponente überhaupt beendet ist. Mischungen aus Aluminatzement und Portlandzement werden als Mörtel oder Beton, aber nicht für Stahlbeton verwendet. Je schneller die Erstarrungszeit einer Mischung einsetzt, desto geringer fällt die maximale Festigkeit aus. [145]

Für die Anwendung von Aluminatzement für die Einstellung von Erstarrungszeiten, die deutlich kürzer als die gängiger Portlandzemente ist, sind daher Vorversuche unumgänglich [91]. Um schnelle Erstarrungszeiten (*rapid set*) zu erreichen, variiert die Menge an Aluminatzement in einer Mischung aus Aluminatzement und Portlandzement zwischen 20 und 50 % für Standard-Aluminatzemente, so SCRIVENER und CAPMAS [162] (Mischungsverhältnisse siehe Seite 33). Aluminatzemente mit einem größeren Anteil an Monocalciumaluminat oder die feiner gemahlen sind, erreichen eine schnelle Erstarrungszeit bei der Zugabe geringerer Mengen an Aluminatzement.

3.2. Feinstoffoptimierung und Packungsdichte von Partikeln

Betone bestehen im Wesentlichen aus Gesteinskörnung, Zement und Wasser. Um bestimmte Frisch- und Festbetoneigenschaften zu erreichen, werden dem Beton Zusatzmittel und Zusatzstoffe hinzugefügt.

Die Betone enthalten größere Mengen an inerten oder reaktiven Feinstoffen, die unterschiedliche Feinheiten und Korngrößenverteilungen besitzen. In der Betontechnologie wird von Feinstoffen gesprochen, wenn der Anteil der Partikel am Stoff mit einer Korngröße von $< 125\ \mu$m überwiegt [66, 140]. Zu solchen Feinstoffen gehören Zemente, alle Arten von Zusatzstoffen nach DIN EN 206 [51] (Gesteinsmehle, Pigmente, Flugasche, Silikastaub), Mikrosilika und der Mehlkornanteil der Gesteinskörnung. [66]

Durch die Abstimmung der Korngruppen aufeinander ist es möglich, dass kleinere Körner die Zwickel zwischen größeren Körnern ausfüllen [104]. Auf diese Weise wird die Packungsdichte erhöht [66]. Die Festigkeit von Betonen lässt sich über die Packungsdichte der Feststoffe und den w/z-Wert steuern [14,152]. Auch für die Verarbeitbarkeit und die Dauerhaftigkeit von Beton ist die Abstimmung der Kornverteilung von großer Bedeutung [121].

3.2.1. Hohlraum von Korngemischen

Durch die Erhöhung der Packungsdichte wird das Hohlraumvolumen in einem Korngemisch gesenkt, indem feinere Partikel für das Ausfüllen der vorhandenen Hohlräume verwendet werden [66, 165]. In Abhängigkeit ihrer Granulometrie haben die inerten Stoffe (Typ I), wie Gesteinsmehle und der Mehlkornanteil der Gesteinskörnung einen Füllereffekt (physikalische Füllerwirkung) und füllen die Hohlräume zwischen den gröberen Partikeln aus. Betonzusatzstoffe des Typ II wiederum haben zusätzlich zur physikalischen Füllerwirkung eine gefüge- und festigkeitsbildende Rolle, wenn sie chemisch-mineralogisch reaktiv sind. Dabei reagieren sie mit dem bei der Hydratation des Zementsteins entstehenden Calciumhydroxid und bilden dabei zementsteinähnliche Erhärtungsprodukte und leisten damit einen Festigkeitsbeitrag. [85, 140]

Eine optimale oder auch dichteste Packung hängt von der Art, der Korngröße und der Menge der packungswirksamen Partikel ab [66]. So kann ein Beton verbessert werden, indem die Kornverteilung aller Feinstoffe gezielt abgestimmt wird oder sogar eine Kombination aus Feinstoffen gewählt wird [140]. Die genaue Kenntnis der granulometrischen und stofflichen Eigenschaften aller Feinstoffe müssen berücksichtigt und vorher ermittelt werden. Dies ist eine Voraussetzung einer Feinstoffoptimierung [140].

Der Hohlraumgehalt wird im Wesentlichen durch die Kornverteilung aller Feinstoffe bestimmt [140, 171]. Es gibt Vermutungen, dass sehr feine Füllerkomponenten gegenüber groben Komponenten eine schlechtere Verdichtbarkeit und einen höheren Hohlraumgehalt besitzen. Als Ursache werden zwischenpartikuläre Kräfte gesehen[2]. [140]

Durch diese zwischenpartikulären Kräfte kann die Zusammenlagerung der Feinstoffpartikel behindert werden, sowohl im trockenen Zustand als auch in einer Wasser-Feinstoff-Suspension von Zementleim mit Zusatzstoffen [171]. Ein geringer Hohlraumgehalt in einem Korngemisch und demnach eine höhere Packungsdichte, insbesondere im Feinkornbereich, bewirkt eine höhere Gefügedichtigkeit und gesteigerte Dauerhaftigkeit und erhöhte Druckfestigkeit [171, 172]. Es wird unterschieden zwischen Hohlraumgehalt und Hohlraumanteil. Der Hohlraumgehalt ist der reziproke Wert der Packungsdichte bzw. das Verhältnis des Hohlraumvolumens zum Gesamtvolumen und der Hohlraumanteil ist das Verhältnis des Hohlraumvolumens zum Feststoffvolumen. [66]

3.2.2. Packungsdichte von Partikeln und Feinstoffoptimierung

Es gibt eine Vielzahl von Arbeiten, die sich mit der Thematik der Packungsdichte beschäftigen. Grundlagen geschaffen haben FULLER und THOMPSON (1907) [61] und ANDREASEN (1930) [3]. Weitergehende Arbeiten sind von FUNK und DINGER (1980)[3] [63], SCHWANDA (1956) [160] und andere. [66] Dissertationen aus neuerer Zeit sind von RESCHKE (2001) [140], BORNEMANN (2005) [14], TEICHMANN (2008) [171] und GEISENHANSLÜKE (2008) [66].

[2] Weiterführendes Wissen siehe in RESCHKE [140].
[3] Sekundärliteratur GEISENHANSLUEKE [66] und FUNK und DINGER [62]

In diesem Abschnitt werden Grundlagen zur Packungsdichte und für diese Arbeit relevante Informationen aufgeführt. Weitergehende Theorien sind aus den obigen Werken zu entnehmen.

Die Packungsdichte D gibt das Verhältnis zwischen Feststoffvolumen und betrachtetem Raum an [66]. Sie wird als ein Maß für die Raumfüllung verwendet. Dabei ist D das Volumenverhältnis der Festkörnung V_k am Gesamtvolumen V_{Ges}. Auch kann die Packungsdichte über den Porenanteil P ermittelt werden. [121]

$$D = \frac{V_k}{V_{Ges}} = 1 - P \longleftrightarrow D + P = 1 \tag{3.1}$$

Zur Erzielung einer optimalen Wirkung der Feinstoffe werden zwei Wirkungsmechanismen unterschieden. Die physikalische Füllerwirkung und die chemisch-mineralogische Reaktivität. Unter der physikalischen Füllerwirkung wird das Ziel verstanden, die Packungsdichte der Partikel bzw. die Gefügedichte der Feinstoffmatrix zu erhöhen, indem durch Kornverteilungsoptimierung der Feinstoffe bzw. der gesamten Sieblinie vorhandene Hohlräume gefüllt werden. [66, 140] Durch eine höhere Packungsdichte steigt die Festigkeit und die Dauerhaftigkeit des Betons an. Grund dafür ist, dass weniger Hohlräume vorhanden sind, die das Gefüge des Festbetons schwächen. Vereinfacht lässt sich dies über den volumetrischen Wasser-Feststoffwert w/F_v beschreiben. Steigt der volumetrischen Wasser-Feststoffwert w/F_v an, so bedeutet dies eine Zunahme von Wasser in der Betonmischung und daher eine Zunahme des Hohlraumgehaltes bzw. eine Abnahme der Packungsdichte. [66]

Die tatsächliche Packungsdichte und der Hohlraumgehalt des Betons werden im Wesentlichen bestimmt durch die Kornverteilung der groben und feinen Betonbestandteile. Durch Mischen von Feinstoffen, die deutlich unterschiedliche Kornverteilungen und Feinheiten haben, wird die Packungsdichte deutlich gesteigert. [66]

Durch gut abgestimmte Kornverteilungen von Zement und Zusatzstoff kann der Wasseranspruch durch Erhöhung der Packungsdichte gesenkt werden [121].

Ziel einer solchen Granulometrieoptimierung und somit das Erreichen einer höchsten Packungsdichte ist, dass diese Mörtel den geringsten Wasseranspruch zum Erreichen einer bestimmten Konsistenz haben. Damit sinkt durch den Wasserzementwert auch der erforderliche Zementgehalt, der für eine bestimmte Festigkeit notwendig ist. [155]

3.2.3. Experimentelle Optimierung nach PUNTKE

Mit dem sogenannten PUNTKE-Verfahren [131] lässt sich der Sättigungswasserbedarf feiner und kohäsionsarmer Körnungen bzw. feiner Kornhaufwerke bei maximaler Packungsdichte des Korngefüges bestimmen. Dieses Verfahren wird z. B. bei selbstverdichtenden Betonen verwendet, um die Gleichmäßigkeit der Ausgangsstoffe bezüglich ihres Wasseranspruches zu prüfen. Zur Güteüberwachung zeichnet es sich durch einen relativ geringen Zeitaufwand aus und ist

daher für Annahmekontrollen gut geeignet [29, 131]. Feine Kornhaufwerke können nur dann eine stoffspezifische Packungsdichte erreichen, wenn der Wassergehalt für die Sättigung des Kornhaufwerkes ausreicht [156].

Die Oberflächenspannung (Kapillarspannung) des Wassers behindert die Umlagerung der Körner. Sobald die Wassersättigung des Kornhaufwerks erreicht ist, verschwinden die Kapillarspannungen und das Kornhaufwerk lässt sich zu der stoffspezifischen, dichtesten Packung umlagern. [131, 156] Zur Erzielung der Verdichtbarkeit des Kornhaufwerkes wird schrittweise der Wassergehalt gesteigert [131]. Dadurch wird der Sättigungswassergehalt und somit auch der Wasseranspruch bestimmt, der notwendig ist, um die Poren zwischen den Körnern zu füllen. [156]

Dieses Verfahren ist nicht nur für Zement geeignet, sondern hat den Vorteil, auch bei anderen Stoffen, wie z. B. Flugasche, Gesteinsmehle, Sand oder deren Gemische (daher auch für Mörtel: Sand-Bindemittel-Gemische) angewendet werden zu können. [29, 131] Basis für dieses Verfahren stellt die Feststellung dar, dass ein feinkörniges Kornhaufwerk durch leichte Stöße sich bis zu einer stoffspezifischen Packungsdichte reproduzierbar verdichten lässt, sobald der Wassergehalt ausreicht, um eine Sättigung des dichten Korngefüges zu erreichen. Durch vorsichtiges und schrittweises Erhöhen des Wassergehaltes, wird der Übergangspunkt zwischen „noch nicht verdichtbar“ und „gerade verdichtbar“ eingegrenzt. [29]

Beobachtungskriterium ist die Wassersättigung des Kornhaufwerkes. Der Übergangspunkt ist erreicht, wenn alle Partikel vollständig befeuchtet sind, aber noch kein überschüssiges, ungebundenes Wasser in der Mischung erkennbar ist (siehe Abbildung 3.7, beispielhaft aus [153]). Eine detaillierte Beschreibung des Vorgehens ist in Abschnitt 5.4.2 zu finden.

Dieser Übergang kann bereits bei einer Zugabe von weniger als 0,1 g Wasser eintreten. Durch Rückwägung wird der Sättigungswassergehalt bestimmt [29]. Durch die rechnerische Bestimmung des Gesamtvolumens aus Wasser- und Feststoffvolumen wird das Verfälschen des Ergebnisses durch eventuell im Gemisch enthaltene Luftbläschen ausgeschlossen [29, 131].

Der wassergefüllte Porenanteil des luftfreien Gemisches ergibt sich bei der erreichten Packungsdichte, ausgedrückt als Wasseranspruch n_w zu [29, 131, 156]:

$$n_W = \frac{V_W}{V_K + V_W} = \frac{\frac{m_W}{\rho_W}}{\frac{m_K}{\rho_K} + \frac{m_W}{\rho_W}} \tag{3.2}$$

n_W wassergefüllter Porenanteil [Volumenanteil von 1]
V_W Volumen des Wasserbedarfs bei Sättigung in dichtester Lagerung [cm^3]
V_K Volumen des eingewogenen Feststoffes [cm^3]
m_W Masse des Wasserbedarfs bei Sättigung in dichtester Lagerung [g]
m_K Masse des eingewogenen Feststoffes [g]
ρ_K Kornrohdichte [g/cm^3]
ρ_W Dichte des Wassers [g/cm^3]



(a) noch nicht gesättigt (b) gesättigt

Abbildung 3.7.: Übergang „noch nicht gesättigt“ zu „gesättigt“ mittels PUNTKE-Verfahren aus [154]

Da ρ_W für Wasser zu 1,0 g/cm^3 gesetzt werden kann, vereinfacht sich die Gleichung 3.2 bei Mitnahme der Einheiten zu 3.3:

$$n_W = \frac{m_W}{\frac{m_K}{\rho_K} + m_W} \tag{3.3}$$

Der Wasseranspruch nach PUNTKE ergibt sich dann wie folgt [29]:

$$W_P = n_W \cdot 100[\text{Vol.-\%}] \tag{3.4}$$

Durch Variation der Zusammensetzung des Kornhaufwerks kann die Zusammensetzung mit dem geringsten Wasseranspruch bzw. der höchsten Packungsdichte ermittelt werden. [156]

Die erreichbare Packungsdichte ist umso größer, je günstiger (d. h. korngestufter) der Feinstoff zusammengesetzt ist. Dadurch ist der Sättigungswasserbedarf kleiner, der notwendig ist, um den verbleibenden Hohlraum zwischen den Körnern beim Anmischen mit Wasser zu füllen. [180]

Im Rahmen dieser Arbeit werden mit diesen praktischen PUNTKE-Versuchen die Ergebnisse aus der theoretischen Optimierung (siehe Abschnitt 3.2.4) auf ihre tatsächliche Packungsdichte überprüft.

3.2.4. Theoretische Optimierung

Für das Erreichen einer optimalen Packungsdichte von Partikeln gibt es auch einen theoretischen Ansatz. Dieser wurde durch FULLER und THOMPSON bzw. ANDREASEN begründet. FUNK und DINGER haben diesen weiterentwickelt.

3.2.4.1. Optimierung nach FULLER und THOMPSON

FULLER und THOMPSON haben aus theoretischen Überlegungen und systematischen Untersuchungen optimale Kornzusammensetzungen abgeleitet, die als Idealsieblinien gesehen werden. Aus diesen experimentellen Untersuchungen stammt die sogenannte „Fullerkurve“. [104]

Die Gleichung 3.5 gibt die sogenannte FULLER-Parabel wieder [60, 62, 121].

$$\Theta_F(d) = 100 \cdot \left(\frac{d}{d_{max}} \right)^n \tag{3.5}$$

$\Theta_F(d)$	kumulativer Anteil der Korngröße d [%] nach der Fuller-Verteilung
d_{max}	maximale Korngröße [mm]
n	Fuller-Exponent

Höchste Packungsdichten ($0{,}65 < D < 0{,}70$) werden in Korngemischen erreicht, wenn FULLER-Exponenten zwischen $0{,}4 < n < 1{,}2$ für die Gleichung 3.5 verwendet werden. [121] Für niedrigere Fullerexponenten n wird ein Absinken der Packungsdichte D berichtet [121, 168]

3.2.4.2. Optimierung nach FUNK und DINGER

Im Bereich von Feinstoffen wird für das Erreichen von hohen Packungsdichten die Verteilung nach FUNK und DINGER verwendet. [121] FUNK und DINGER führen als Parameter die minimale Korngröße ein [16], da FULLER nur die maximale Korngröße berücksichtigt.

Die Arbeiten von FUNK und DINGER [62, 64] basieren auf den Artikeln von ANDREASEN [3] und FURNAS [65]. Die Begründung für die Einführung eines minimalen Korndurchmessers sahen FUNK und DINGER darin, dass in der Betrachtung von ANDREASEN mit Partikelgrößen von kleiner als 10^{-50} m zu rechnen ist. Solche eine Partikelgröße sei jedoch absurd. Abbildung 3.8 vergleicht die möglichen Partikelgrößen, insbesondere die kleinst möglichen Partikel, die durch den Ansatz von ANDREASEN bzw. durch die von FUNK und DINGER eingeführte Größe des minimalen Korndurchmessers Berücksichtigung finden würden.

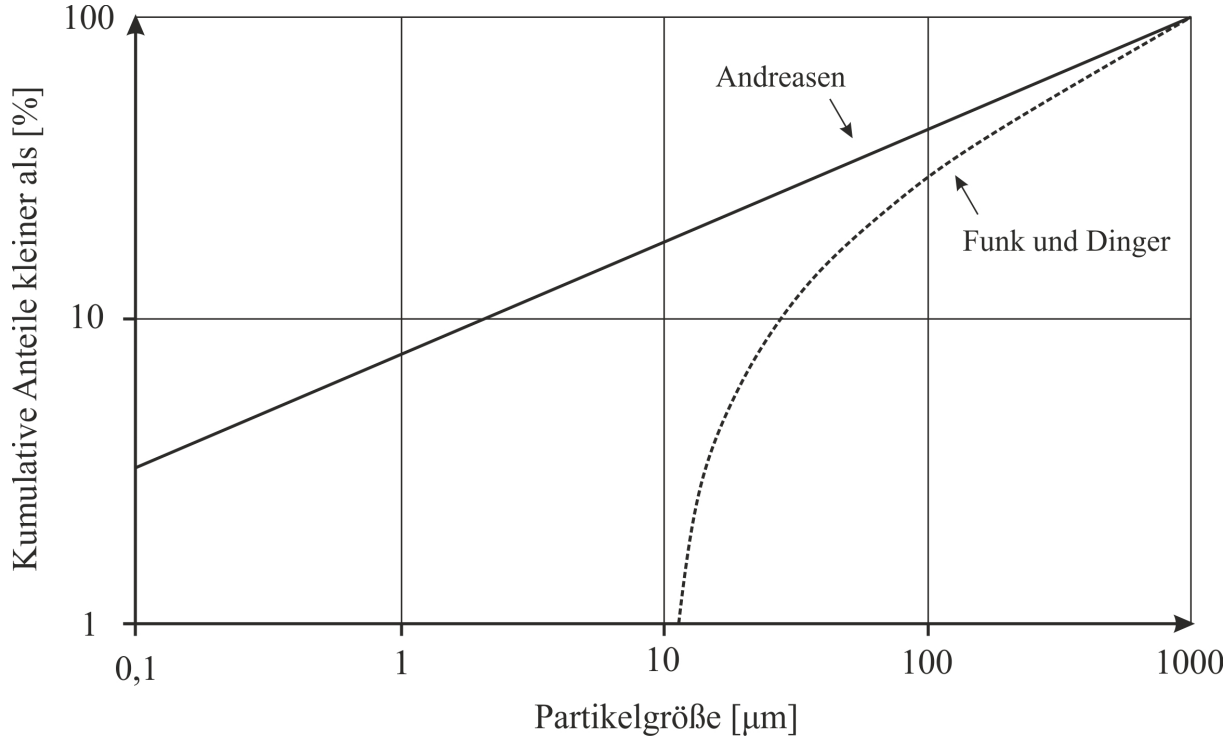


Abbildung 3.8.: Vergleich: Partikelgrößenverteilung nach ANDREASEN und nach FUNK-DINGER nach [52]

FUNK und DINGER zeigten damit, dass bei der Verteilung von ANDREASEN die Partikel immer kleiner werden und in Abbildung 3.8 den Diagrammbereich am linken Rand verlassen. Die Linie von ANDREASEN kann weiter gedacht werden und der Schnittpunkt mit der Abszisse läge bei < 1 nm: Partikel mit solch kleinem Durchmesser entsprechen jedoch nicht der Realität. Daher führten FUNK und DINGER eine minimale Korngröße d_{min} ein, die bei der Korngrößenverteilung zu berücksichtigen ist. [52]

$$\Theta_{FD}(d) = 100 \cdot \left(\frac{d^q - d_{min}^q}{d_{max}^q - d_{min}^q} \right) \tag{3.6}$$

$\Theta_{FD}(d)$	Funk-Dinger Verteilung der Korngrößen
d	Korngröße (*particle size*)
d_{min}	minimale Korngröße (*smallest particle size*)
d_{max}	maximale Korngröße (*largest particle size*)
q	Verteilungsmodul (*distribution modulus*) nach FUNK und DINGER

Das Verteilungsmodul q nach FUNK und DINGER unterscheidet sich vom Fuller-Exponenten n.

Laut PAULINI und SACHSER lassen sich für sämtliche Feststoffe (Zement inbegriffen) Packungsdichten von $0{,}75 > D > 0{,}85$ erreichen [121]. Die Wahl des Verteilungsmoduls q wird im Folgenden beschrieben.

3.2.4.3. Wahl des Verteilungsmoduls q

Für das Verteilungsmodul q gibt es in der Literatur und aufgrund verschiedener Versuchsreihen und Simulationen unterschiedliche Angaben zur Wahl dieses Exponenten. Dieser Exponent q liegt zwischen 0,2 und 0,37 [17].

Computersimulationen von FUNK und DINGER [62, 64] zeigten, dass für optimale Packungsdichten ein q = 0,37 zu verwenden ist. Dieser Wert liegt somit im ermittelten Bereich von ANDREASEN [3]. BROUWERS [16, 17] wiederum hat mathematisch gezeigt, dass ein q von 0,28 die optimale Packungsdichte (theoretisch) erreicht [17] (Gleichung von FUNK und DINGER). Experimentell wurde ein q im Bereich von 0,25 und 0,35 bestimmt [17, 121].

Eine weitere Veröffentlichung von DINGER zeigt, dass ein q von 0,37 eine optimale Packungsdichte liefert [52]. Auch hier wird von ideal kugelförmigen Körnern ausgegangen. Das Verteilungsmodul q ist für grobe Körner, umgeben von unregelmäßig geformten kleineren Körnern, kleiner als 0,37 zu wählen [52, 179]. Über das Verteilungsmodul und den Exponenten q kann der Anteil der Feinstoffe berücksichtigt werden. Nimmt q höhere Werte an, wie z. B. 0,4 bis 0,7, so führt dies zu einer grobkörnigen Mischung. Kleinere Werte von q bedeuten, dass der Anteil an Feinstoffen in der Mischung sehr hoch ist. [17]

Die theoretische Packungsdichteoptimierung kann berechnet werden, wenn die Korngrößenverteilungen aller verwendeten Feststoffe bekannt ist, indem die Gleichung 3.6 angewendet wird. In Abschnitt 3.2.5 werden die Vorgehensweise und die Grundlagen zur Berechnung vorgestellt.

3.2.5. Grundlagen zur Berechnung der Packungsdichteoptimierung

Die Berechnungen zur Optimierung der Packungsdichte geschieht im Rahmen dieser Arbeit mit MatLab (MathWorks). Grundlagen für die Berechnungen werden im Folgenden beschrieben.

Die optimale Verteilung der Korngrößen ist in Gleichung 3.6 (Seite 41) angegeben mit:

$$\Theta_{FD}(d) = \left(\frac{d^q - d_{min}^q}{d_{max}^q - d_{min}^q} \right) \forall d \in [d_{min}, d_{max}] \tag{3.6}$$

$\Theta_{FD}(d)$	Funk-Dinger Verteilung der Korngrößen
d	Korngröße (*particle size*)
d_{min}	minimale Korngröße (*smallest particle size*)
d_{max}	maximale Korngröße (*largest particle size*)
q	Verteilungsmodul (*distribution modulus*)

Das Optimierungsproblem: Es sollen Mengenanteile für die einzelnen Feststoffkomponenten der Mörtelrezeptur festgelegt werden, indem die Abweichungen der zu optimierenden Kornverteilung von der Optimalverteilung nach Gleichung 3.6 minimiert werden. Dabei handelt es sich um die sogenannte Fehlerquadratanpassung oder auch um die Methode der kleinsten Quadrate. Darunter ist die Summe der quadrierten Abweichungen, die minimiert wird, zu verstehen. Diese Abweichungen werden Residuen oder Fehler genannt [19]. Im Englischen wird das Prinzip der Fehlerquadratsumme als *residual sum of squares* bezeichnet und wird mit RSS abgekürzt. [57, 82] Das Minimierungsproblem kann wie folgt definiert werden (vgl. [82]):

$$RSS := \Sigma_{i=1}^{n} e_i^2 = \Sigma_{i=1}^{n} \left[P_m(d_i) - P_t(d_i)\right]^2 \rightarrow min! \forall d \in [d_{min}, d_{max}] \tag{3.7}$$

e_i	Residuum (Abweichung)
d_i	Korngröße (*particle size*) aller Korngrößen i und Stoffe
$P_m(d_i)$	Ist-Verteilung über Korngrößen d_i
$P_t(d_i)$	Theoretische optimale Verteilung über Korngrößen d_i, Zielfunktion
n	Anzahl der Korngrößen-Messwerte d_i

$P_m(d_i)$ ist dabei die zu optimierende Größe, und $P_t(d_i)$ ist somit die Zielfunktion. Die Kornverteilung der einzelnen Fraktionen liegen in Form diskreter akkumulativer Messwerte für die Durchmesser d_i, $i \in [1,n]$, vor, so dass die Ist-Verteilung $P_m(d_i)$ ebenfalls diskret ist. Dabei ist $d_1 = d_{min}$ und $d_n = d_{max}$.

Als Zielfunktion wird die Funk-Dinger Verteilung verwendet, vgl. Gleichung 3.6. Es sind diskrete Werte ausgewertet an den Punkten d_i, $i \in [1,n]$:

$$P_t(d_i) = \left(\frac{d_i^q - d_{min}^q}{d_{max}^q - d_{min}^q}\right) \forall d_i \in [d_{min}, d_{max}] \tag{3.8}$$

$P_t(d_i)$	Optimierte Packungsdichte
d_i	Korngröße (*particle size*)
d_{min}	minimale Korngröße (*smallest particle size*)
d_{max}	maximale Korngröße (*largest particle size*)
q	Verteilungsmodul (*distribution modulus*)

Bei $P_m(d_i)$ handelt es sich um die Ist-Verteilung aller Feststoffe (Index k bis Anzahl m) über die Korngrößen d_i. Für $P_m(d_{max})$ gilt:

$$P_m(d_{max}) = 1 \tag{3.9}$$

d_i	Korngröße (*particle size*) aller Korngrößen i und Feststoffe
$P_m(d_i)$	Ist-Verteilung aller Feststoffe (Index k bis Anzahl m) des Stoffgemisches über die Korngrößen d_i

$$P_m(d_i) = \Sigma_{k=1}^{m} V_{agg,k}(d_i) \cdot a_{vol,k} \tag{3.10}$$

$P_m(d_i)$	Ist-Verteilung aller Feststoffe (Index k bis Anzahl m) des Stoffgemisches über die Korngrößen d_i
d_i	Korngröße (*particle size*) aller Korngrößen i und Feststoffe
$V_{agg,k}(d_i)$	Messwerte der einzelnen Feststoffe für die Korngröße d_i für Feststoff k in [Vol%]
$a_{vol,k}$	Volumetrischer Anteil des Feststoffes k am Gesamtgemisch

Dabei ist $a_{vol,k}$ in Matlab die zu optimierende Größe und wird für jeden Feststoff als Anteil am Gesamtgemisch herausgegeben. Da $a_{vol,k}$ in Vol% ausgegeben wird, muss für die Berechnung der Mengenanteile mit Hilfe der Rohdichten der einzelnen Feststoffe umgerechnet werden (siehe Gleichung 5.16).

Für das Optimierungsproblem müssen Randbedingungen eingeführt werden, damit die Variablen realistische Werte annehmen und die Einschränkungen verschiedener Regeln oder Richtlinien zur Betonherstellung eingehalten werden. Solche Randbedingungen können für eine Mörtel-/Betonrezeptur z. B. folgende sein (vgl. [82]):

- $V_{agg,k} \geq 0$; Der volumetrische Anteil $v_{agg,k}$ eines jeden Feststoffes pro m^3 kann nicht negativ werden.
- $\Sigma\, a_{vol,k} = 1$; Plausibilität des Volumens: Die Summe $\Sigma v_{agg,k}$ aller Feststoffe muss 100 % ergeben
- Beschränkungen durch Regelwerke:
  - minimaler Zementgehalt $M_{Zement,min}$
  - maximaler Mehlkorngehalt $M_{Mehlkorn,max}$
  - Wasser/Bindemittel-Gehalt, w/z-Wert

Über die Stoffraumrechnung kann nach der Optimierung der Feststoffe die Betonrezeptur festgelegt werden. Bei der Stoffraumrechnung müssen alle Feststoffkomponenten (Gesteinskörnung, Zement, Zusatzstoffe) zusammen mit Zusatzmitteln, Luft und Wasser 1 m^3 ergeben:

$$V_{Gesamt} = V_{Feststoffe} + V_{Zusatzmittel} + V_{Wasser} + V_{Luft} = 1\text{m}^3 \tag{3.11}$$

Die Volumenanteile der Feststoffe (Gesteinskörnung, Zement, Zusatzstoffe) in Gleichung 3.11 stehen i. d. R. mit der Lösung des Optimierungsproblems fest. Dabei führt die Lösung des Optimierungsproblems dazu, dass eine Korngrößenverteilung erreicht wird, die sich mit den kleinsten Abweichungen von der Zielfunktion unterscheiden. Das Optimierungsproblem wird über

die Matlab Funktion fmincon gelöst. Genauere Erläuterung zu den verwendeten Gleichungen und Herleitungen für die Optimierung sind in Abschnitt 5.4.1.

3.3. Der Verbund

Bei Sanierungsmaßnahmen ist der Verbund zwischen Alt- und Neubeton die wesentliche Voraussetzung für die Dauerhaftigkeit der Maßnahmen [92].

Für die Ausbildung eines erforderlichen Haftverbundes zwischen Instandsetzungsbaustoff und Untergrund sind bestimmte Voraussetzungen zu erfüllen. In diesem Abschnitt werden die Grundlagen des Haftverbundes zusammengefasst und einige Begrifflichkeiten aufgeführt und erläutert.

Der Haftverbund zwischen Alt- und Neubeton ist eine Folge der Adhäsion oder adhäsionsähnlichen Kräften [138]. Allein durch den Haftverbund zwischen Alt- und Neubeton können signifikante Zug- und Schubspannungen übertragen werden. Bei mechanischen Haftwirkungen (siehe mechanische Adhäsion, Abschnitt 3.3.1) sind Verzahnungseffekte für den Verbund verantwortlich. Bei spezifischen Haftwirkungen (siehe spezifische Adhäsion, Abschnitt 3.3.1) sind für die Verbundwirkung physikalische oder chemische Bindungen verantwortlich. [108]

3.3.1. Adhäsion

Der Begriff der Adhäsion stammt aus dem Lateinischen, „adhaerere“ bedeutet so viel wie „haften, an etw. fest hängen“. Für die Dauerhaftigkeit von Schutz- und Instandsetzungsmaßnahmen ist eine ausreichende Adhäsion eine grundlegende Voraussetzung [135]. Die Vorgänge, die zur Haftung zwischen flüssigen und festen bzw. zwischen festen Phasen führen, werden mit dem Begriff „Adhäsion“ bezeichnet. Dabei wird in der Regel der feste Stoff (Substrat) als „Adhärens“[4] verstanden und das Beschichtungsmaterial als „Adhäsiv“ [4] (Kleber) [11, 59].

Die Adhäsion beschreibt den Zustand der Grenzflächenschicht. Diese bildet sich zwischen zwei in Kontakt tretenden Stoffen aus [94]. Die Kräfte zwischen den Molekülen zweier unterschiedlicher Körper wirken ebenso wie zwischen den einzelnen Molekülen eines Körpers. Man spricht bei der Kraft zwischen verschiedenen Körpern von einer Anhangskraft oder Adhäsion. [88] Adhäsion tritt nicht zwingend nur zwischen zwei Festkörpern auf. Auch der Kontakt von Flüssigkeiten mit festen Oberflächen führt zu Benetzungsvorgängen, die zurückzuführen sind auf das Wirken von Oberflächenkräften zwischen Flüssigkeit und Festkörper. [54]

Es gibt eine Reihe verschiedener Theorien und Modelle aus diversen Fachrichtungen, die die Adhäsion beschreiben. Jedoch ist es bis heute nicht gelungen, die Mechanismen der Adhäsion eindeutig und wissenschaftlich vollständig zu beschreiben. Allen Theorien und Modellen gemeinsam ist jedoch die Annahme, dass es sich bei der Adhäsion um eine Reihe von mechanischen, physikalischen und chemischen Wechselwirkungen handelt. [135] Die Abbildung 3.9

[4] Laut FIEBRICH [59] wird in der englischen Literatur vorzugsweise von Adhärens und Adhäsiv gesprochen.

zeigt, dass das Phänomen der Adhäsion jedoch nicht durch eine dieser Theorien allein beschrieben werden kann und wie komplex diese Thematik ist, dennoch liefert jedes dieser Modelle einen Anteil zur Beschreibung des Adhäsionsvorganges. [11] Es wird zwischen mechanischer und spezifischer Adhäsion unterschieden [11,58,59,135,164]. Die spezifische Adhäsion wiederum wird, wie in Abbildung 3.9 dargestellt, in molekularphysikalische und thermodynamische Mechanismen und in chemische Bindungen unterteilt [11, 58, 164].

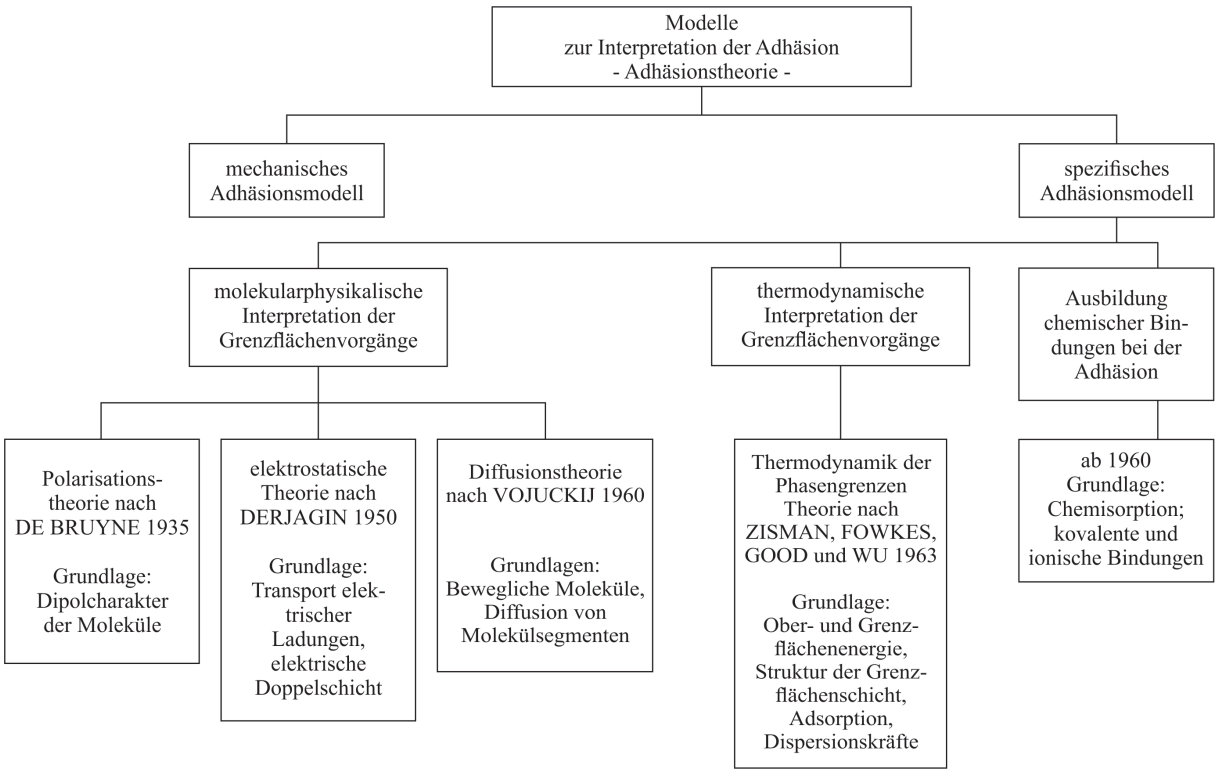


Abbildung 3.9.: Übersicht - Adhäsionsmodelle nach [11]

Im Folgenden werden die mechanische und spezifische Adhäsion erläutert.

3.3.1.1. Mechanische Adhäsion

Unter mechanischer Adhäsion (auch als mechanische Haftwirkung bezeichnet [108]) wird verstanden, dass das flüssige Adhäsiv in den Poren und Vertiefungen der Oberfläche des Adhärens aushärtet und sich dort wie Dübel oder Druckknöpfe verankert (siehe Abbildung 3.10). Dies ist in der Literatur auch als „Druckknopftheorie“ bekannt. [58, 94, 135, 147, 164] Daher ist die mechanische Adhäsion stark von der Oberflächengestalt des Substrates (Adhärens) abhängig [148]. Darunter werden die Verzahnungseffekte im mikroskopischen und submikroskopischen Bereich (siehe Abbildung 3.11) verstanden. Von der spezifischen Topografie des Untergrundes und von der Konsistenz und Beschaffenheit des nachträglich aufgebrachten Betons ist die Größe der mechanischen Adhäsion abhängig. Die mechanische Adhäsion trägt zur wirksamen Haftfestigkeit zweier Betonschichten bei. [138] Die mechanische Adhäsion darf aber nicht isoliert und

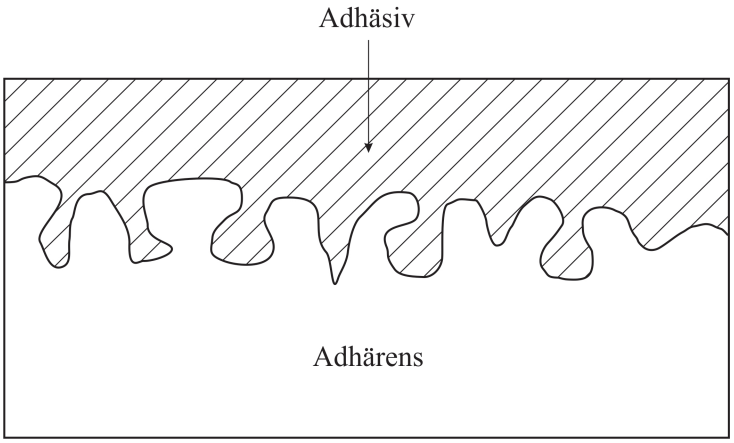


Abbildung 3.10.: Schematische Darstellung der „Druckknopftheorie“ nach [58, 59, 135]

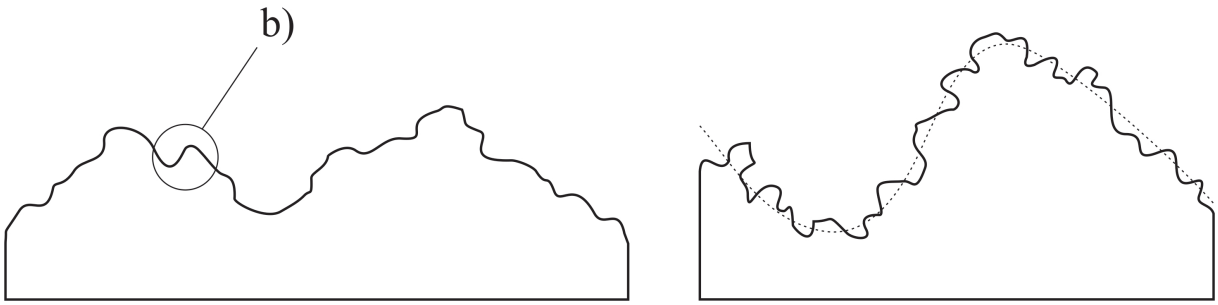


Abbildung 3.11.: Oberflächenrauheit und mikroskopische Verzahnung nach [137, 138, 148]

unabhängig von physikalischen Mechanismen betrachtet werden [58, 69, 164]. Die spezifische Adhäsion spielt ebenfalls eine Rolle und wird im folgenden Abschnitt erläutert.

3.3.1.2. Spezifische Adhäsion

Die spezifische Adhäsion, auch als spezifische Haftwirkung [108] bezeichnet, beruht auf physikalischen chemischen und thermodynamischen Wechselwirkungen [108, 135]. Die spezifische Adhäsion ist somit von der Oberflächengestalt des Substrates (Adhärens) unabhängig [148]. Wie in Abbildung 3.9 (Seite 46) dargestellt, gibt es für die spezifische Adhäsion mehrere Theorien bzgl. ihrer Mechanismen.

Für die molekurlaphysikalischen Mechanismen wurden mehrere Theorien aufgestellt [11, 58, 59, 135]:

- Polarisationstheorie (De Bruyne, 1935 zitiert in [11, 58, 59, 135]): Sie wird in Adhäsionsregeln zusammengefasst, die zum einen eine feste Verbindung zwischen Adhärens und Adhäsiv ausschließen, wenn einer der Partner polar ist und der andere unpolar ist. Darüber hinaus wird als eine notwendige Voraussetzung für adhäsive Bindungen ein maximaler Molekülabstand von 50 *nm* genannt. Die Adhäsion beruht auf dem Dipolcharakter der Moleküle.

- Elektrostatische Theorie (Derjagin, 1950 zitiert in [11,58,59,135]): Adhäsion infolge von Diffusion der Ladungsträger (Ladungsverschiebungen). Es bildet sich eine elektrische Doppelschicht (eine Raumladungszone mit mehreren Molekül- oder Atomschichten) in der Kontaktfläche. Geeignete Ladungsträger, wie Elektronen oder Ionen, müssen aber dafür vorhanden sein.

- Diffusionstheorie (Vojuckij 1963 [178], zitiert in [11, 58, 59, 135]): Im Falle der Adhäsion zweier Polymerphasen kann im molekularen Bereich (basierend auf der Brownschen Molekularbewegung) eine mechanische Verzahnung durch Diffusion von ganzen Molekülketten bzw. Kettensegmenten entstehen.

Einen besonderen Einfluss haben die Polaritätseigenschaften von Substrat und Adhäsiv für die Ausbildung physikalischer Bindungen [135]. Darüber hinaus gibt es ebenfalls thermodynamische Mechanismen (Benetzung und Adsorption) und die Ausbildung chemischer Bindungen (Chemisorption, kovalente und ionische Bindungen) [11, 135]. Die Ausbreitung einer Flüssigkeit auf einer festen Oberfläche wird als Benetzung verstanden [9]. Eine Voraussetzung für das Zustandekommen von Bindungsmechanismen ist daher die Benetzbarkeit des Substrats [135].

Auch die Van-der-Waals-Kräfte haben auf die Adhäsion einen entscheidenden Einfluss. Sie basieren auf lokalen Schwankungen der Ladungsdichte in der Elektronenhülle, da auch bei ungeladenen Molekülen und Atomen temporäre Dipole vorkommen können. Sowohl von der Polarisierbarkeit der Teilchen (= Leichtigkeit, mit der Ladungsverschiebung in einem Teilchen auftreten) als auch von dem Abstand der beiden Teilchen sind die Van-der-Waals-Kräfte abhängig. Da die Dipolachsen beweglich sind, ist der Effekt der Dipol-Dipol Kräfte temperaturabhängig. [138]

Chemische Bindungen (Chemisorption) werden generell nach der Art der Wechselwirkung der Elektronen der äußersten Schale (Valenzelektronen) unterschieden. Es werden drei Formen von Hauptvalenzbindungen unterschieden [58, 59, 135]:

- Die kovalente Bindung (auch Atombindung), sie beruht auf der Ausbildung gemeinsamer Elektronenpaare durch zwei Atomkerne.

- Die metallische Bindung, sie bewirkt den Aufbau der Metalle in Form von regelmäßigen, räumlich geometrischen Gitterstrukturen der metallischen Rumpfatome, zwischen denen sich frei bewegliche Elektronen („Elektronenwolke“) befinden.

- Die Ionenbindung, sie beruht auf der Aufnahme und Abgabe von Elektronen, die zu einer Veränderung der Atom- bzw. Molekülladung führt. Dies erzeugt ein starke Bindung zwischen den Atomen.

Die beschriebenen chemischen Bindungen spielen laut REINECKE [138] zur Betrachtung der Kräfte im Haftverbund bei der Betoninstandsetzung nur eine untergeordnete Rolle. Die molekularphysikalischen Mechanismen (Physisorption) werden durch intermolekulare Kräfte (Van-der-Waals-Kräfte und Wasserstoff-Brückenbindungen) verursacht. Es wird zwischen Orientierungskräften (Dipol - Dipol) und Induktionskräften (Dipol - Induzierter Dipol) unterschieden. [58,59,135] Orientierungskräfte (Dipol - Dipol) wirken zwischen Molekülen mit permanentem Dipol, die mittlere Wechselwirkungsenergie steht hier in Beziehung mit der Entfernung zwischen den Molekülen. Induktionskräfte (Dipol - Induzierter Dipol) entstehen durch die Wechselwirkung zwischen zwei Teilchen. Das eine trägt einen permanenten Dipol, das andere Teilchen wird vom ersten Teilchen polarisiert. Dispersionskräfte (Induzierter Dipol - Induzierter Dipol) sind Kräfte, die durch Selbstinduktion eines Dipols durch ein gleichartig schwingendes Zweiteilchensystem entstehen. Eine Sonderstellung nimmt die sog. Wasserstoff-Brückenbindung ein. Der positive Pol des Dipols zweier Moleküle wird von einem Wasserstoffatom gebildet. Dipol - Dipol - Wechselwirkungen bilden sich daher bei einer Wasserstoff-Brückenbindung aufgrund eines permanenten Dipol - Effekts. [135]

Durch die Begriffe der Oberflächenenergie bzw. Oberflächenspannung werden physikalische Effekte beschrieben, die an den Grenzflächen zwischen zwei unterschiedlichen Medien auftreten. Sie werden auch als Grenzflächenenergie bzw. Grenzflächenspannung bezeichnet. Mit Hilfe der YOUNGschen Gleichung (siehe Gleichung 3.12) lässt sich ein sogenanntes Dreiphasengleichgewicht zwischen der Oberflächenenergie eines Feststoffs (Annahme: Oberfläche ideal glatt), der Oberflächenspannung der Flüssigkeit und der Grenzflächenspannung σ_{sg} zwischen Flüssigkeit γ_{lg} und Feststoff γ_{ls} beschreiben. [103]

$$\sigma_{sg} = \gamma_{ls} + \gamma_{lg} \cdot cos\vartheta \tag{3.12}$$

lg	Grenzfläche flüssig - gasförmig
ls	Grenzfläche flüssig - fest
sg	Grenzfläche fest - flüssig
s	solidus, fest
l	liquidus, flüssig
g	gaseous, gasförmig
σ_{sg}	freien Oberflächenenergie des Festkörpers
γ_{ls}	Grenzflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Festkörper
γ_{lg}	Oberflächenspannung der Flüssigkeit
ϑ	Kontakt- oder Randwinkel

Legende zur Gleichung nach YOUNG [9, 103, 189]

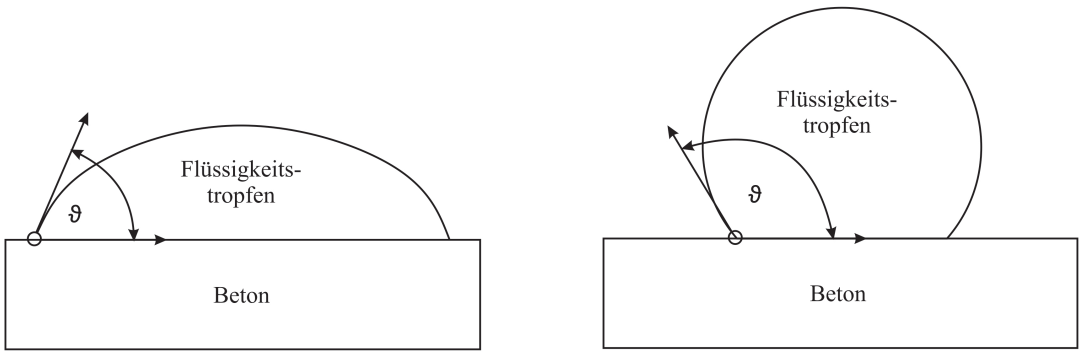
Über die Ausbildung eines Kontaktwinkels bzw. Benetzungswinkels ϑ lässt sich ein Maß für die Benetzbarkeit definieren. Dieser Kontaktwinkel bzw. Benetzungswinkel ϑ ist der Winkel zwischen Festkörperoberfläche und der Tangente an einem darauf ruhenden Wassertropfen an

den Phasengrenzen Wasser / Festkörper / Luft [9] (siehe Abbildung 3.12). Eine Feststoffoberfläche kann mit einem Flüssigkeitstropfen gut benetzt werden, wenn der Kontaktwinkel klein ist ($\vartheta \rightarrow 0$). Es wird unterschieden zwischen Flüssigkeiten, die nicht benetzen ($\vartheta > 90°$, auch als hydrophobe Oberflächen bezeichnet), die teilweise benetzen ($0° < \vartheta < 90°$) und die vollständig benetzen ($\vartheta = 0°$). Dabei wird bei Kontaktwinkeln $\vartheta < 90°$ in der Regel von hydrophilen Oberflächen gesprochen [5]. [9, 13, 103, 109]

Die notwendige Bedingung für die Gültigkeit der thermodynamischen Theorie als Ursache der Adhäsion ist eine benetzte Oberfläche. Die Grundlage dieser Theorie sind eine Reihe von experimentellen Untersuchungen. [11]

Nach ZISMAN kann eine Substanz nur dann von einer Oberfläche adsorbiert werden, wenn ihre Oberflächenenergie kleiner oder gleich der kritischen Oberflächenenergie des Feststoffes ist. Die Benetzungseigenschaften der Adhäsive auf verschiedenen Oberflächen wurde untersucht. Als Maß der Benetzung einer Oberfläche wird der Kontaktwinkel im Gleichgewicht, der sich zwischen Flüssigkeit und Adhärens einstellt, herangezogen. [11]

„Als Materialkonstante des Festkörpers lässt sich eine kritische Oberflächenenergie γ_c bestimmen. Die Oberflächenspannung derjenigen Flüssigkeit, die einen Festkörper vollständig benetzt ($\vartheta = 0°$), wird als kritische Oberflächenspannung γ_c bezeichnet und gleich der Oberflächenspannung des Festkörpers angenommen.“[6] [105] „Überschreitet die Oberflächenspannung der aufgebrachten Flüssigkeit die kritische Oberflächenenergie des Untergrundes, bildet der Tropfen einen Randwinkel größer Null. Die Flüssigkeit kann die Oberfläche dann nicht benetzen. Geprüft wird die Wasserbenetzbarkeit der Betonoberfläche durch das Aufsetzen von Wassertropfen auf die Betonoberfläche mittels Pipette. Die Oberfläche ist benetzbar, wenn sich der Wassertropfen unmittelbar aufspreizt. Wenn der Wassertropfen aber auf der Oberfläche stehen bleibt, so ist die Benetzbarkeit gering. In Abbildung 3.12 ist dies grafisch dargestellt.“[6] [135]



(a) Gute Benetzbarkeit des Betons (b) Geringe Benetzbarkeit des Betons

Abbildung 3.12.: Aufspreizen eines Wassertropfens auf einer Betonoberfläche nach [135]

[5] Metall-, Glas- und Keramikoberflächen besitzen hydrophile Oberflächen mit einer guten Benetzung. Wachse, Silikone und Teflon besitzen hydrophobe Oberflächen und weisen eine schlechte Benetzung auf [9]

[6] wörtlich aus [116]

„Die Art der Oberflächenbenetzung wird durch die Randwinkel zwischen zwei Stoffen (bzw. durch die spezifische Oberflächenspannung) beschrieben. Dies gibt Aufschluss über die Möglichkeiten zur Verbindung der beiden unterschiedlichen Materialien. Es bildet sich keine ausreichende Kontaktfläche aus, über die chemisch-physikalische Wechselwirkungen stattfinden können, wenn die Randwinkel groß sind und es kaum zu einer Benetzung der Oberfläche kommt. In Abbildung 3.13 sind verschiedene Randwinkel zwischen Flüssigkeit und festem Substrat dargestellt.“[6] [138]

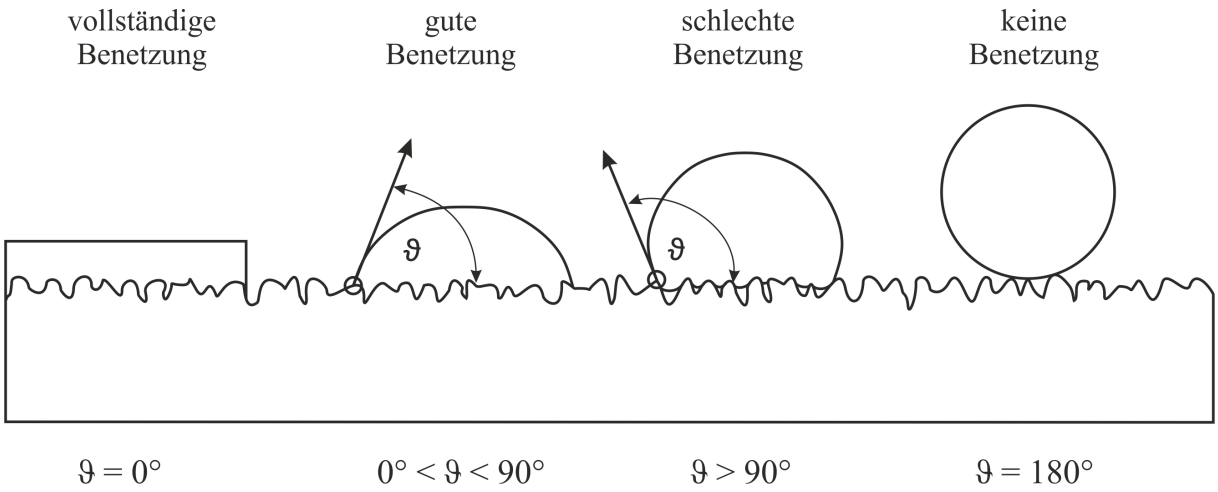


Abbildung 3.13.: Randwinkel zwischen Flüssigkeit und festem Substrat nach [109, 138]

„Die Wassersättigung aus der vorhandenen Luftfeuchtigkeit bzw. Wasserlagerung beeinflusst die Oberflächenenergie. Zur Messung oder Berechnung des Randwinkels von Neubeton an festem Altbeton lässt sich in der Literatur kein Hinweis finden.“[6] [138] Randwinkel oder Oberflächenenergien lassen sich nur für homogene Stoffe messen. Beton ist jedoch kein homogener Stoff, d. h. eigentlich muss man bei Randwinkelmessungen an Beton auf die Ebene von Mineralen heruntergehen.

Eine ausreichende Benetzung ist Voraussetzung für eine gute und dauerhafte Haftung eines Stoffes auf dem Untergrund. [94, 109, 130, 138] Zum Beispiel lässt sich Holz mit einer Oberflächenenergie von 80 mN/m mit verschiedenen Klebstoffen kleben. Stoffe mit Oberflächenenergien von größer 70 mN/m zeigen für alle Klebfilme eine gute Adhäsion. [75, 76]

Für den Haftverbund zwischen Instandsetzungsmörtel und Beton lässt sich zusammenfassend sagen, dass die mechanische Adhäsion und physikalischen Wirkungen von entscheidender Bedeutung sind. Wie groß der Anteil der mechanischen Adhäsion an der Gesamtadhäsion ist, kann man nicht abschätzen.

3.3.2. Oberflächenbeschaffenheit und Verbund

„Die adhäsive Wirkung von nachträglich aufgebrachtem Beton auf eine bereits verfestigte Altbetonschicht wird unter folgenden Randbedingungen größer“[6] [138]:

- „Der Randwinkel zwischen Alt- und flüssigem Neubeton muss möglichst klein sein, um dadurch eine größere Kontaktfläche nach der Benetzung der Oberfläche zu erhalten (vgl. Abbildung 3.13).“[6]

- „Die absolute Haftfläche muss möglichst groß sein. Eine wirksame mechanische Adhäsion, bzw. die Möglichkeit zur mikromechanischen Verzahnung zwischen den Alt- und Neubeton muss gegeben sein.“[6]

Alle vorgenannten theoretischen Modelle der Adhäsion (abgesehen von dem mechanischen Modell) gehen von einer idealisierten ebenen Oberfläche aus. Der Einfluss der Oberflächengeometrie auf die Adhäsion wird vernachlässigt. Die Rauigkeit von Festkörperoberflächen hat einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Festigkeit des Haftverbundes mit im Vergleich zur Oberflächenstruktur rauem Korn. Durch eine mechanische Vorbehandlung der Oberfläche wie z. B. Schleifen mit im Vergleich zur Oberflächenstruktur rauem Korn, Reiben oder Strahlen kann die Rauigkeit einer Fläche vergrößert werden. Durch die Rauigkeit wird die geometrische Gestalt und somit die sogenannte wahre Oberfläche bestimmt. Die wahre Oberfläche entspricht der Fläche, die einer möglichen adhäsiven Wechselwirkung zur Verfügung steht. [11]

Damit sich eine optimale Verbindung zwischen Neu- und Altbeton ausbilden kann, bedarf es einer Oberflächenvorbehandlung. Dies geschieht oft durch das Aufrauen der Oberfläche, z. B. durch das Sandstrahlen. Durch eine solche mechanische Vorbereitung nimmt die Rauheit des Betons zu, so dass i. d. R. damit die Verbundfestigkeit steigt. Ein Maß für die Rauheit einer Oberfläche in mm ist die Rautiefe. Diese kann im Regelfall nach dem Sandflächenverfahren nach KAUFMANN [135] (bzw. DIN EN 1766, Abschnitt 7.2 [47]) ermittelt werden. Die Vorgehensweise wird in Abschnitt 4.2.2 beschrieben. [135]

Für die Ausbildung des Verbundes zwischen Alt- und Neubeton gibt es mehrere maßgebliche Faktoren. Diese können laut LÜDERS [92] in vier Faktorkomplexe zusammengefasst werden:

- Altbeton

- Neubeton

- Betonverbund

- Einwirkungen

In Abbildung 3.14 ist der Prozess zur Herausbildung eines Verbundes nach LÜDERS [92] veranschaulicht.

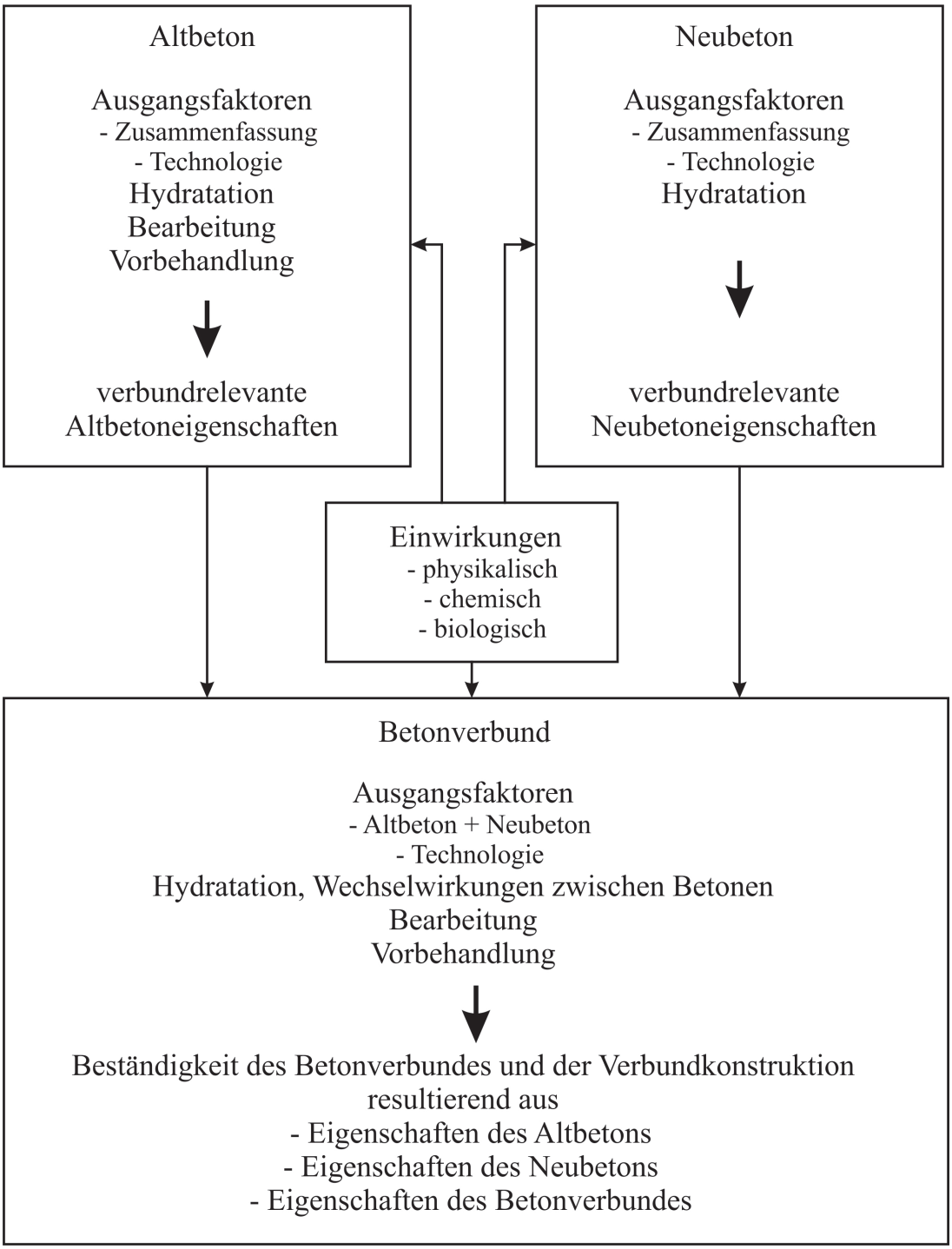
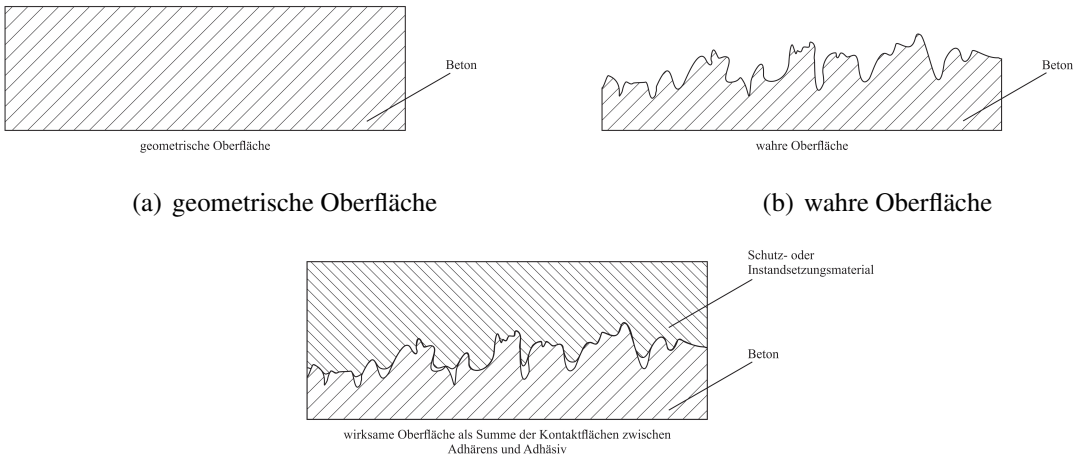


Abbildung 3.14.: Prozess der Herausbildung des Verbundes nach [92]

Die Eigenschaften des Altbetons resultieren aus der Hydratation, einer möglichen weiteren Bearbeitung, der Vorbehandlung und aus verschiedenen äußeren physikalischen, chemischen und biologischen Einwirkungen. Keinen direkten Einfluss auf die Herausbildung des Verbunds haben die Festigkeit, der E-Modul oder das Kriech- und Schwindverhalten [92]. Nach LÜDERS [92] haben sie jedoch wesentlichen Einfluss auf die Beständigkeit / Dauerhaftigkeit des Betonverbundes.

„Eine realistische Annahme der Oberfläche ist ein grundsätzliches Problem bei der Berechnung der Verbundfestigkeit. Unterschieden wird zwischen geometrischer, wahrer und wirksamer Oberfläche [135].“[6] Schematisch sind sie in Abbildung 3.15 dargestellt:

- Geometrische Oberfläche: Die Oberflächenrauigkeit der Fläche wird nicht berücksichtigt. Bei der Bestimmung der Oberflächenhaftzugfestigkeit wird sie als Bezugsfläche verwendet.
- Wahre Oberfläche: Optisch sichtbare Oberfläche
- Wirksame Oberfläche: Die Oberfläche, von der physikalisch-chemische Wechselwirkungen ausgehen.



(a) geometrische Oberfläche

(b) wahre Oberfläche

(c) wirksame Oberfläche

Abbildung 3.15.: Schematische Darstellung der geometrischen, wahren und wirksamen Oberfläche nach [58, 59, 135]

„Im Gegensatz zur geometrischen Oberfläche wird bei der Bestimmung der wahren Oberfläche die Rauheit berücksichtigt. Die Größe der wirksamen Oberfläche ist nicht ausschließlich von der Topografie der Oberfläche, sondern auch von der Oberflächenspannung und damit auch vom Benetzungsverhalten abhängig.“[6] [94, 135] Die wirksame Oberfläche wird als Summe der Kontaktflächen zwischen Adhärens und Adhäsiv gesehen, siehe Abbildung 3.15(c) [135].

4. Prüfverfahren an Mörtel und Beton

Der Betonuntergrund und der Mörtel wurden im Rahmen dieser Arbeit auf verschiedene Eigenschaften geprüft. Zur Beschreibung der verwendeten Betonprobekörper und entwickelten Mörtel waren verschiedene Prüfverfahren notwendig. Der hergestellte Betonuntergrund wurde auf seine Druck- und Abreißfestigkeit und seine Rautiefe geprüft. Der Mörtel wurde auf seine Frisch- und Festmörteleigenschaften geprüft: Der Frischmörtel wurde auf seine Verarbeitbarkeit, Konsistenz und Erstarrungszeiten geprüft und der Festmörtel auf seine Biegezug- und Druckfestigkeiten. Diese Prüfungen sollten zeigen, dass die Betonuntergründe und die entwickelten Mörtel für den Unterwassereinsatz gute Eigenschaften besitzen und diese den Anforderungen für den Beton in Abschnitt 2.1 und den Anforderungen für den Mörtel in Abschnitt 2.2 entsprechen. Besonders wichtig ist die Beurteilung des Verbundes zwischen Mörtel und Betonuntergrund (siehe Anforderungen an den Verbund in Abschnitt 2.3). An den Verbundkörpern wurden die Haftzugfestigkeiten bei der Applikation unter Wasser geprüft und damit die erreichbare Qualität des Haftverbundes zwischen Mörtel und Beton, die unter Wasser appliziert wurden, untersucht.

In diesem Kapitel werden die verschiedenen Prüfverfahren an Mörtel und Beton beschrieben und die Versuchsabläufe, die im Rahmen dieser Arbeit angewendet wurden.

Auf die Oberflächenzug-, Abreiß- und Haftzugfestigkeit wird besonders eingegangen (siehe Abschnitt 4.2.3), weil es eine Vielzahl von Regelwerken hierzu gibt. Nach Sichten der Regelwerke und ergänzender weiterführender Literaturrecherche ergaben sich für die Abreißfestigkeitsprüfung am Betonuntergrund und für die Haftzugfestigkeitsprüfung am Verbund die in den Abschnitten 4.2.4 und 4.3.1 aufgeführten Versuchsabläufe.

4.1. Prüfungen am Frisch- und Festmörtel

Für die Unterwasseranwendung und die Applikationstechnik ist das Zusammenhaltevermögen und eine gute Verarbeitbarkeit sowie auch der Zusammenhang zwischen der Konsistenz und dem notwendigen Anpressdruck bestimmter Applikationstechniken (siehe Abschnitt 5.6 und 6.2) von großer Bedeutung. Die Konsistenz wurde mit Hilfe des Ausbreitmaßes beschrieben.

4.1.1. Verarbeitbarkeit und Konsistenz

Die Verarbeitbarkeit beschreibt das Verhalten eines Mörtels und Betons beim Mischen, Transportieren, Fördern, Einbringen, Verdichten und Abgleichen. Die Verarbeitbarkeit kann vereinfacht über die Konsistenz beschrieben werden. Es handelt sich dabei um den messbaren Steifezustand des Mörtels bzw. Betons. Es wird unterschieden in sehr steif, steif, plastisch, weich,

sehr weich und fließfähig, wobei sehr steif die größte Steifigkeit und fließfähig die geringste Steifigkeit bedeutet. [72]

Die DIN EN 1015-3 [38] regelt die Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel mit Hilfe eines Ausbreittisches.

Es hat sich auch in der Praxis als zweckmäßig erwiesen, die Verarbeitbarkeit durch die Einführung von Konsistenzbereichen zu beschreiben [72].

Die Konsistenz und die Verarbeitbarkeit eines Mörtels bzw. Betons ist dabei abhängig von der Rezeptur. Besonders hängen diese vom Wassergehalt, dem Mehlkorngehalt und der Kornzusammensetzung und Art der Gesteinskörnung ab. Weitere Einflüsse können auch bestimmte Zusatzmittel und Zusatzstoffe haben. [72]

4.1.2. Erstarrungszeiten

Die Erstarrungszeit des zu applizierenden Mörtels ist ein entscheidendes Kriterium. Von dieser Zeit hängt es ab, ob ein Mörtel, der unter Wasser appliziert wird, sich im Wasser nicht auswäscht und eine Verbindung mit dem Betonuntergrund eingehen kann. Der optimale Zeitpunkt für die Applikation ist kurz vor dem Erstarrungsbeginn (vgl. Abschnitt 5.6).

Es war ursprünglich vorgesehen, das Erstarrungsverhalten mit Hilfe von Untersuchungen nach VICAT zu erfassen. Der sogenannte VICAT-Versuch ist in der DIN EN 196-3 [49] beschrieben. Das Prinzip dieses VICAT-Versuches liegt darin, dass als Erstarrungszeit der Zeitraum gilt, nach dem eine Nadel bis zu einer bestimmten Tiefe in einen Zementleim eingedrungen ist. [49]

Der VICAT-Versuch wurde jedoch nicht angewendet, weil zum einen bei der Anwendung dieses Verfahrens in einem Mörtel, der Gesteinskörnung beinhaltet, die Nadel im Versuch auf die Gesteinskörnung treffen und dadurch fälschlicherweise einen Erstarrungsbeginn anzeigen kann. Dies haben Vorversuche bestätigt. Außerdem betrugen die Erstarrungszeiten der entwickelten Mörtel im kürzesten Fall zwei bis vier Minuten, an denen der Vicat-Versuch aufgrund dieser sehr kurzen Erstarrungszeiten nicht durchgeführt werden konnte.

Konventionelle rheologische Messungen sind aufgrund der kurzen notwendigen Verarbeitungszeit daher praktisch nicht möglich. Hauptsächlich wurden Spritzbetonzemente als Bindemittel eingesetzt. Aufgrund dessen musste ein alternatives, reproduzierbares und einfaches Verfahren gefunden werden. Eine Literaturrecherche hatte ergeben, dass der Erstarrungsbeginn mit dem sogenannten Eindrückversuch bestimmt werden kann. In der DIN 1164-11 [35] „Zement mit besonderen Eigenschaften - Zusammensetzung, Anforderungen und Übereinstimmungsnachweis von Zement mit verkürztem Erstarren“ ist der sogenannte Eindrückversuch zur Ermittlung der Erstarrungszeiten schnell erstarrender Zemente beschrieben. Ziel der Verwendung eines genormten Verfahrens ist zum einen, dass das Verfahren reproduzierbar ist. Zum anderen soll

die Ermittlung des Erstarrungszeitpunktes objektiv und dadurch mit anderen Ergebnissen vergleichbar sein. Die Erstarrungszeiten der verschiedenen entwickelten Mörtel sollen beschrieben werden können und untereinander vergleichbar bleiben.

Versuchsbeschreibung: Angepasstes Prüfverfahren - Erstarrungszeiten für schnell erstarrende Mörtel

Die Erstarrungszeiten geeigneter Mörtel wurden mit einem modifizierten Eindrückversuch in Anlehnung an DIN 1164-11 [35] geprüft. Das genormte Verfahren wurde gewählt, da das Verfahren reproduzierbar ist und es eine objektive Ermittlung des Erstarrungszeitpunktes bietet. Beides ist Voraussetzung für den Vergleich der Prüfergebnisse verschiedener Mörtel. Vorversuche zeigten, dass der Eindrückversuch nach DIN 1164-11 [35] zur Bestimmung von Erstarrungszeiten für dieses Projekt modifiziert werden musste. Die Norm sieht vor, dass mit vorgekühltem Spritzbetonzement und Eiswasser gearbeitet wird und als Unterlage eine Glasplatte verwendet wird. Es zeigte sich jedoch, dass die vorgekühlten Komponenten zusammen mit dem Eiswasser bereits beim Mischvorgang erstarrten und zerbröselten. Die Glasplatte zersprang bei den vorgenannten Vorversuchen mehrfach durch das zu harte Auftreffen des Rundstabes auf die Glasplatte, da die Mörtel nicht mehr flexibel waren und beim Auftreffen des Stabes brachen.

Bei den Versuchen wurde daher von der Vorgehensweise in DIN 1164-11 [35] in folgenden Punkten abgewichen:

- die Erstarrungszeit wurde nicht von Zement, sondern eines Mörtels geprüft,
- es wurde kein Eiswasser verwendet,
- die Komponenten des Mörtels wurden nicht auf eine Temperatur von (-18 $\pm$2) °C vorgelagert. Die Komponenten hatten Raum- / Lagertemperatur.
- Der Mörtel-„Kuchen“ hatte keinen Durchmesser von 10 cm und keine Höhe von 1 bis 1,5 cm, wie in Abbildung 4.1 schematisch dargestellt.
- Der Mörtel wurde nicht auf einer Glasplatte frei geformt.

Es wurden stattdessen zylinderförmige Silikonformen verwendet, die einen Durchmesser von 10,5 cm und eine Höhe von 2 cm hatten, so dass eine einfache Handhabung und gute Reproduzierbarkeit vorlag. Dies hatte den Vorteil, dass die Mörtel-“Kuchen“ immer die gleichen Abmessungen hatten, siehe Abbildung 4.1. Des Weiteren wurden ein Mischbehälter, ein Hobart-Mischer (Stufenmischgerät nach DIN EN 196-3 [49]), ein Kurzzeitmesser, Längenmessstab und ein spezieller Rundstab aus Stahl, mit den Abmessungen wie in Abbildung 4.2 dargestellt, verwendet. Um den Erstarrungsbeginn und die Erstarrungszeit zu ermitteln, wird mittels des Eindrückversuches ein Rundstab im Abstand von 15 mm zum Rand der Form bis zum Formboden gedrückt (siehe schematische Darstellung in Abbildung 4.2). Der Erstarrungsbeginn ist dadurch zu erkennen, dass sich beim Eindrücken des Stabes ein Kantenriss bildet, der radial

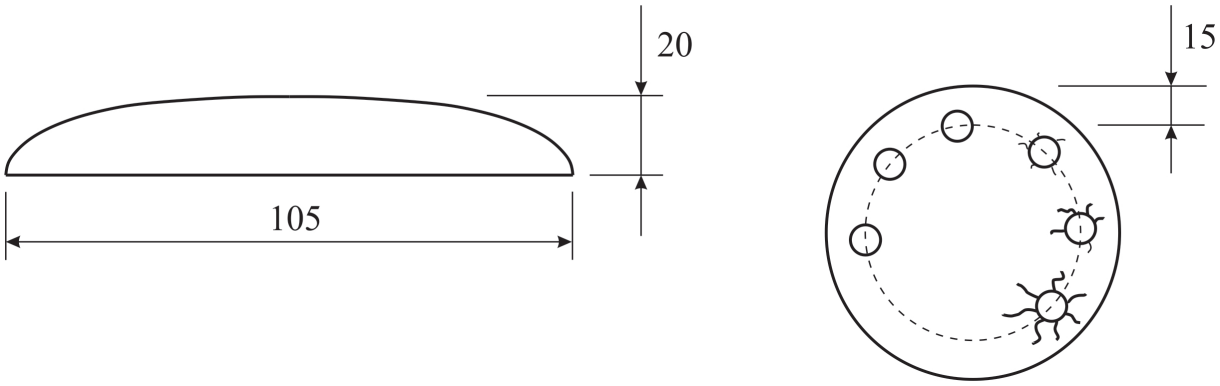


Abbildung 4.1.: Eindrückversuch nach DIN 1164-11 [35], geänderte Abmessungen

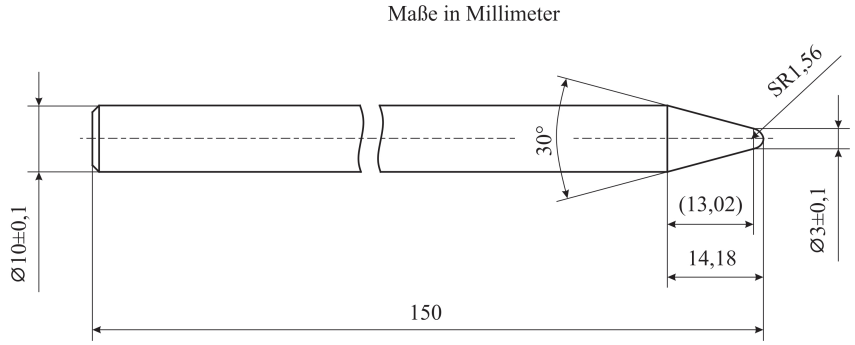


Abbildung 4.2.: Rundstab nach DIN 1164-11 [35]

vom Rand der Druckstelle verläuft. Die Norm macht keine Vorgaben, in welchem zeitlichen Abstand der Eindrückversuch wiederholt werden soll. Der Kurzzeitmesser wird angehalten, wenn radial angeordnete Kantenrisse zu erkennen sind. Abweichend von DIN 1164-11 [35] wurde die Erstarrungszeit nicht auf 5 Sekunden angegeben, denn dafür müsste der Stab alle 5 Sekunden in eine andere Stelle des Mörtelkuchens gedrückt werden. Im Ergebnis wäre der Mörtelkuchen vollständig „durchlöchert“.

Folgende Randbedingungen wurden für die Versuche festgelegt:

- Eine feste Mischzeit von 1 Minute nach Wasserzugabe (die trockenen Feststoffe werden vorher im Flachbeutel vermischt),
- ein standardisierte Silikonform mit einem Durchmesser von 10,5 cm mit einer Höhe von 2 cm,
- der Beginn des Eindrückversuchs ist 2 Minuten nach Beginn des Mischvorgangs,
- ein Zeitabstand von 30 Sekunden zwischen dem Eindrücken,
- die festgelegten Kriterien für die Bestimmung des Endes der Erstarrungszeit: Entstehen radialer Risse zum Rand oder das Eindrücken in den Kuchen bis auf den Boden ist nicht mehr möglich.

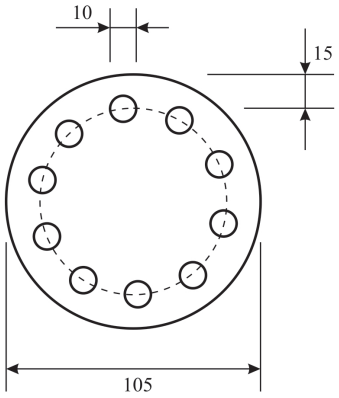


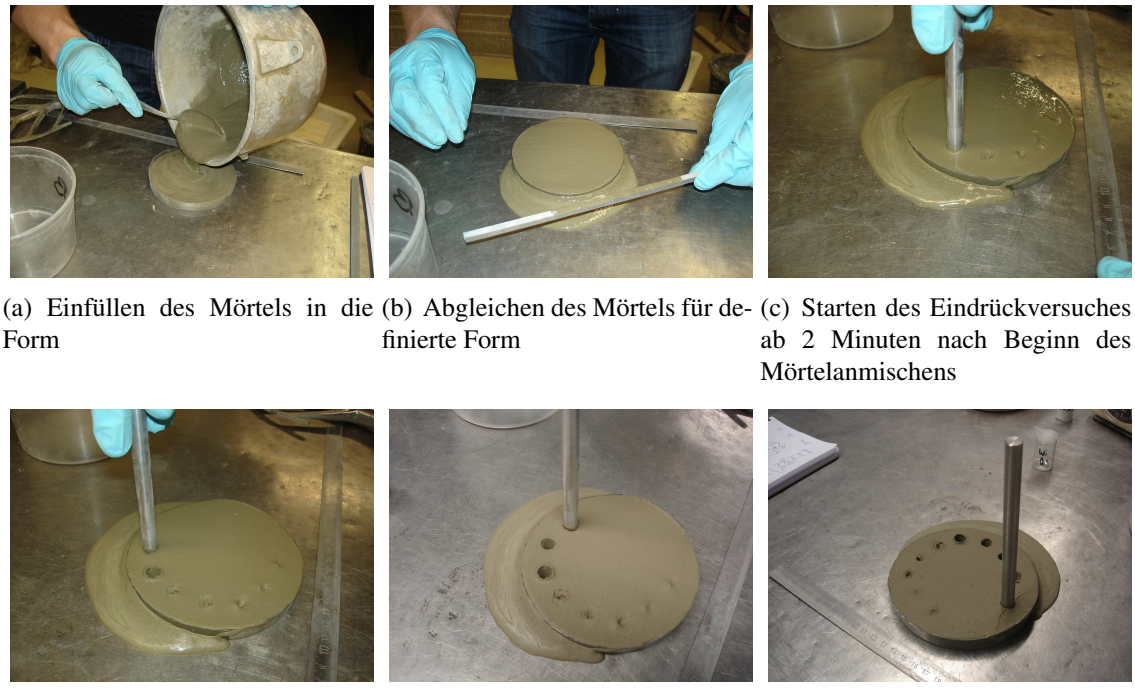
Abbildung 4.3.: Schema für Eindrücke in den Kuchen zur Ermittlung der Erstarrungszeit

Dieses Vorgehen macht es möglich, die Erstarrungszeiten zwischen den unterschiedlichen Mörtelrezepturen miteinander zu vergleichen. In Abbildung 4.4 ist der Ablauf mit den einzelnen Schritten des Versuches abgebildet: Jede Mörtelrezeptur wurde mit derselben Mischart (Stufe I, Hobartmischer) und -zeit (1 Minute nach Zugabe des Anmachwassers) angemischt, die für alle anderen Anwendungen im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurden. Der Zement und der zugegebene Sand wurde trocken in einem Flachbeutel vorgemischt. Anschließend wurde das Wasser zugegeben und der Kurzzeitmesser mit dem Mischvorgang (Stufe I, Hobartmischer) gestartet. Der Mörtel wurde in die o. g. Silikonform eingefüllt (siehe Abbildung 4.4(a)). Vorsichtig wurde durch eine sägeartige Bewegung eines geeigneten geradkantigen Werkzeuges der überschüssige Mörtel bündig abgestrichen, damit der Mörtel in der Form eine glatte Oberfläche aufwies, siehe in Abbildung 4.4(b). Zwei Minuten nach Beginn des Mischvorganges wurde der Eindrückversuch mit dem Rundstab (siehe Abbildung 4.2) begonnen. Dabei wurde der Stab alle 30 Sekunden in den Mörtelkuchen radial eingedrückt. Der Abstand zum Rand betrug ca. 1,5 cm (gemessen bis zur Längsachse des Rundstabes). Der Abstand zwischen den Eindrückpunkten betrug etwa 2,5 cm.

Das Ende des Versuchs zeichnet sich durch deutliche radiale Risse am Rand des Kuchens aus oder wenn der Mörtel nicht mehr eingedrückt werden kann.

Bei Mörteln mit längerer Erstarrungszeit wird der Beginn des Eindrückens etwas später durchgeführt und ggf. werden die Abstände zwischen den einzelnen Eindrückzeitpunkten vergrößert. Ansonsten wäre der Mörtelkuchen vollständig durchlöchert, bevor der Erstarrungsbeginn einsetzt und die Ermittlung der Erstarrungszeit wäre ergebnislos. Dieses Vorgehen ist nur dann möglich, wenn durch Vorversuche die zu erwartende längere Erstarrungszeit des Mörtels bekannt ist.

Dieses angepasste Verfahren ist für die Ermittlung von Erstarrungszeiten für Mörtel mit verschiedenen Konsistenzen geeignet. Das Verfahren ist reproduzierbar und einfach durchführbar.



(a) Einfüllen des Mörtels in die Form

(b) Abgleichen des Mörtels für definierte Form

(c) Starten des Eindrückversuches ab 2 Minuten nach Beginn des Mörtelanmischens

(d) Nach weiteren 30 Sekunden zusätzliches Eindrücken

(e) Der Abstand zu den Eindrückpunkten beträgt ca. 2,5 cm

(f) Der Abstand zwischen Rand und Eindrückpunkt beträgt ca. 1,5 cm, Ende des Eindrückens

Abbildung 4.4.: Verwendetes Verfahren zur Ermittlung der Erstarrungszeit

Demnach sind die Ergebnisse nach Anwendung dieses Verfahrens vergleichbar. Ebenso vorteilhaft war dieses Verfahren, weil dieses für sämtliche im Rahmen dieser Arbeit angewendeten Mörtelrezepturen anwendbar war.

4.1.3. Biegezug- und Druckfestigkeit des Mörtels

Die applizierten Mörtel (im ausgehärteten Zustand) und ihre Eigenschaften sind für die Bewertung der Versuchsergebnisse wichtig. Es wurden Biegezug- und Druckfestigkeit der Mörtel untersucht.

Die Bestimmung der Druckfestigkeit von Reparaturmörteln ist in DIN EN 12190 [40] geregelt. Diese Norm verweist bei der Herstellung und Prüfung auf die Vorgehensweise der DIN EN 196-1 [48], die die Prüfverfahren zur Druck- und Biegezugfestigkeit von Zement beschreibt. Ebenfalls verweist die DIN 18555-3 [36] bei der Bestimmung dieser Festigkeiten auf die DIN EN 196-1 [48] bzw. auf die DIN 1164-7, die 1991 zurückgezogen wurde und durch die DIN EN 196-1 ersetzt wurde.

Die Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel kann auch nach DIN EN 1015-11 [39] geprüft werden. Jedoch unterscheidet sich das Prüfverfahren bei den Belastungsgeschwindigkeiten, der Vorbereitung und der Lagerung der Prüfproben von dem Prüfverfahren in DIN EN 196-1 [48].

Es wurde entschieden, in Anlehnung an DIN EN 196-1 [48] Mörtelprismen mit den Abmessungen von 160 mm × 40 mm × 40 mm herzustellen und zu prüfen. Anders als in der DIN EN 196-1 [48] vorgeschrieben, werden die Prismen nach 7, 28 und 56 Tagen geprüft. Die Altersstufen von 24 h, 28 h und 72 h wurden im Rahmen dieser Arbeit als nicht relevant betrachtet, weil der genaue zeitliche Verlauf der Hydratationsreaktion für die Arbeit nicht von Interesse ist. Daher wurde das Prüfalter der Mörtelprismen nach 7, 28 (vgl. [40, 48]) und zusätzlich nach 56 Tagen gewählt. Es wurden alle verwendeten Mörtelrezepturen geprüft, die in den Vorversuchen zur Rezepturfindung und bei den Applikationen angewendet wurden. Daher wurden von jeder relevanten Mörtelrezeptur mindestens neun Mörtelprismen in drei Arbeitsgängen unmittelbar nach dem Anmischen hergestellt, wobei je drei Mörtelprismen zu den o. g. drei gewählten Zeitpunkten geprüft wurden. Es wurde ein zugelassenes Alternativ-Verdichtungsgerät, das auch im Anhang A der DIN EN 196-1 [48] aufgeführt ist, für das Verdichten des Mörtels verwendet. Es handelte sich dabei um einen Vibrationstisch des Typs A. Für genaue technische Angaben wird auf den Anhang A, Abschnitt A.2 der DIN EN 196-1 [48] verwiesen.

In einem Prüfgerät für die Biegezugfestigkeit (wie in DIN EN 196-1 [48] beschrieben) wurde das Drei-Punkt-Lastverfahren angewendet. Die Auswertung der Biegeprüfungen erfolgte nach DIN EN 1015-11 [39], da in dieser Norm im Gegensatz zu DIN EN 196-1 zwischen der Höhe und der Breite der Prüfkörper unterschieden wird.

4.2. Prüfverfahren am Beton

Der Betonuntergrund der Verbundkörper wurde charakterisiert durch seine Druckfestigkeit, seine Rautiefe nach Untergrundvorbereitung und die Oberflächenzugfestigkeit. Diese Eigenschaften haben großen Einfluss auf den Erfolg und die Dauerhaftigkeit einer Instandsetzungsmaßnahme von Betonflächen.

4.2.1. Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit von Beton-Probekörpern wurde nach DIN EN 12390-3 [42] geprüft. Es wurden würfelförmige Betonproben mit einer Kantenlänge von 150 mm hergestellt. Diese Würfel wurden einer Druckbelastung mit über die Zeit ansteigender Druckkraft ausgesetzt. Die Probekörper wurden bei der Prüfung so in die Prüfmaschine eingebaut, dass die Belastung senkrecht zur Achse der Einfüllrichtung erfolgte. Die Belastungsgeschwindigkeit (zeitliche Zunahme der Druckkraft) betrug 0,6 ± 0,2 MPa/s bzw. $\mathrm{N/mm^2}$ pro Sekunde. Für Würfel mit der Kantenlänge von 150 mm bedeutet dies eine Lastzunahme von 13,5 kN pro Sekunde. Der Prüfkörper wurde bis zum Versagen durch Bruch geprüft. Die Druckfestigkeit wurde auf 0,1 MPa bzw. $\mathrm{N/mm^2}$ genau angegeben. [42]

Für die Einordnung des Betons in eine Festigkeitsklasse ist der Bezugswert maßgebend. Darunter wird die Festigkeit des Betons bei einem Prüfalter von 28 Tagen verstanden. [72] Die Betonwürfel wurden 28 Tage lang feucht gelagert. Hierzu lagerten die Würfel einen Tag in der

Schalung und 27 Tage bis zur Druckfestigkeitsprüfung unter Wasser (nach DIN EN 12390-2 [41]).

4.2.2. Rautiefe der Betonoberfläche

In mehreren Regelwerken wird zur Bestimmung der Rautiefe von Betonoberflächen das Prinzip des Sandflächenverfahrens nach KAUFMANN [86] beschrieben, so z. B. in der DIN EN 1766 [47], in der RL-SIB [28] und in der ZTV-ING [21].

Dabei stimmen die beschriebenen Vorgehensweisen in der RL-SIB und der ZTV-ING weitestgehend überein. In der DIN EN 1766 liegt die Abweichung zu den anderen beiden Regelwerken nur in der Korngröße des zu verwendenden Quarzsandes und beim Aufbau der zu verwendenden Holzscheibe, die bei diesem Verfahren zum Einsatz kommt. Der Durchmesser der Holzscheibe beträgt nach DIN EN 1766 65 $\pm$ 5 mm und ist 1,5 $\pm$ 0,5 cm hoch und nach RL-SIB [28] und der ZTV-ING [21] beträgt der Durchmesser 50 mm und die Höhe 10 mm. Letztere Holzscheibe wurde verwendet, siehe Abbildung 4.5.

Die Bestimmung der Rautiefe von Betonoberflächen erfolgte mit dem Sandflächenverfahren nach ZTV-ING [21] und RL-SIB [28], das im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

Nach REINECKE [137] stellt dies eine einfache Methode zur Beschreibung einer Oberflächenrauheit dar, jedoch ist bei einer Anwendung mit einer breiten Streuung infolge der manuell durchgeführten Messung zu rechnen. Untersuchungen von REINECKE zeigten, dass die Standardabweichung bei zehn Messungen an identischer Messstelle bei Durchführung von ein und derselben Person 3 bis 5 % betrug und bei unterschiedlichen Anwendern auf 10 % anstieg. [137, 138]

Sandflächenverfahren nach ZTV-ING und RL-SIB

In der Instandsetzungs-Richtlinie (RL-SIB) [28], Teil 3, Abschnitt 3.2.5 und ZTV-ING [21], Teil 1, Abschnitt 3 wird zur Bestimmung der Rauheit das Sandflächenverfahren nach KAUFMANN [86] vorgesehen. Das Verfahren dient der Bestimmung der Rautiefe auf der Oberseite von Betonunterlagen, Betonersatzsystemen und ggf. alten Oberflächenschutzsystemen. Es wird nach der Oberflächenvorbereitung und nach erfolgtem Nachweis der Abreißfestigkeit durchgeführt. [21] Bei dem Sandflächenverfahren wird eine definierte Sandmenge (Volumen V) auf der zu prüfenden Oberfläche kreisförmig so verteilt, dass die Vertiefungen gerade gefüllt sind. Definiert ist die mittlere Rautiefe R_t als Höhe des gedachten Zylinders mit dem Durchmesser d und dem Sandvolumen V. [28]

Als Geräte und Hilfsmittel sind einzusetzen:

- ein Gefäß mit bekanntem Hohlraumgehalt zwischen 25 cm^3 und 50 cm^3

- trockener Quarzsand, Körnung 0,1 mm bis 0,5 mm nach ZTV-ING [21] / Körnung 0,1 mm bis 0,3 mm nach RL-SIB [28]

- eine runde Hartholzscheibe (Durchmesser 5 cm und Dicke 1 cm) mit einem Griff in der Mitte der Oberseite

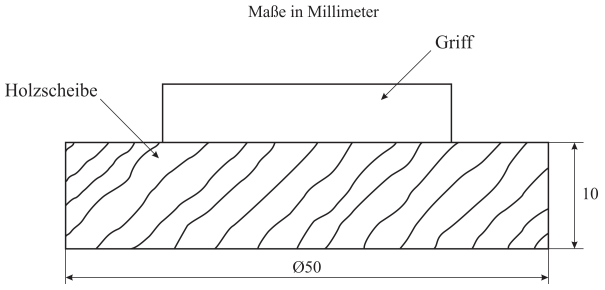


Abbildung 4.5.: Schematische Darstellung der verwendeten Scheibe für die Prüfung der Rautiefe

Nach RL-SIB muss die Lage der Messstellen so gewählt werden, dass die Prüfergebnisse repräsentativ für den Prüfbereich (Bauwerksteil) sind. Je Prüfbereich sind 3 Messstellen vorzusehen. [28]

Die Durchführung der Bestimmung der Rautiefe geschieht folgendermaßen [21]:

1. Das Gefäß wird mit Quarzsand gefüllt und der Inhalt wird auf die trockene und saubere Oberfläche geschüttet.

2. Mit der Scheibe wird der Sand durch sich spiralförmig erweiternde Kreisbewegungen in die Vertiefungen der Oberfläche ohne Druck eingerieben.

3. Gemessen wird der Durchmesser des Kreises. Dabei sind örtliche Unstetigkeiten für die Einzelprüfungen bei der Auswahl der Stellen nicht zu berücksichtigen.

Die Auswertung [28]: Die Rautiefe R_t (in mm) ergibt sich für das Sandvolumen V (in cm^3) und dem Durchmesser (in cm) des etwa kreisförmig verteilten Sandes zu:

$$R_t = \frac{40 \cdot V}{\pi \cdot d^2} \tag{4.1}$$

Bei einer maximalen Rautiefe von 1,0 mm bis 1,5 mm bzw. 2,0 mm darf der Durchmesser in Abhängigkeit vom Volumen die in Tabelle 4.1 angegebenen Mindestdurchmesser nicht unterschreiten.

Dieses zuvor beschriebene Sandflächenverfahren nach KAUFMANN [86] wurde im Rahmen dieser Arbeit zur Ermittlung der Rautiefen der Betonoberflächen verwendet. Dieses entspricht der Messmethode nach ZTV-ING [21].

Tabelle 4.1.: Mindestdurchmesser d_{min} in Abhängigkeit vom Volumen V nach ZTV-ING Teil 1, Abschnitt 3.4 [21]

		V [cm^3]					
		25	30	35	40	45	50
R_t = 1.0 mm	d_m in [cm]	18	20	21	23	24	25
R_t = 1.5 mm	d_m in [cm]	15	16	17	18	20	21
R_t = 2.0 mm	d_m in [cm]	13	14	15	16	17	18

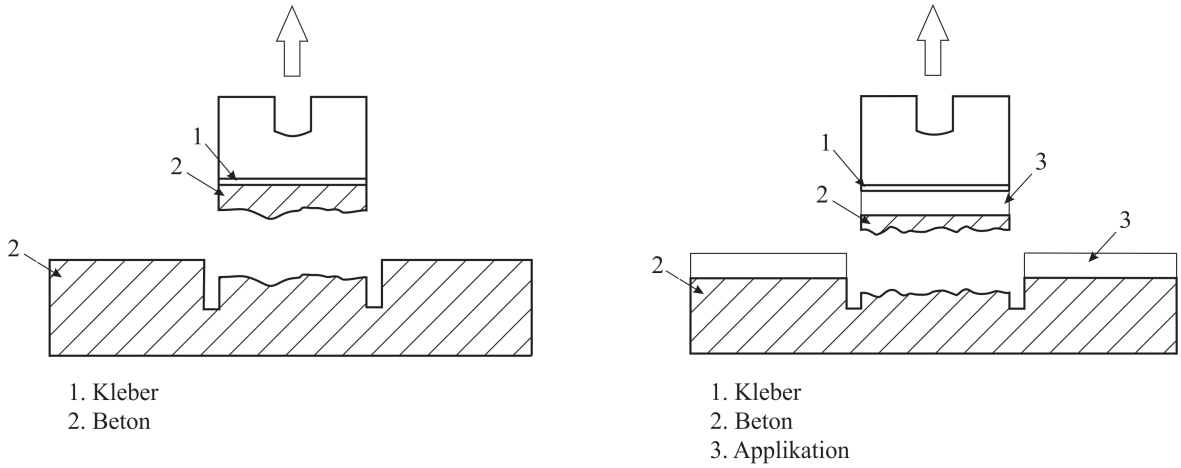
4.2.3. Technische Regeln zu Prüfverfahren von Oberflächenzug-, Abreiß- und Haftzugfestigkeiten

Es gibt eine Vielzahl von Normen und Richtlinien, die Aussagen und Angaben zur Prüfung der Oberflächenzugfestigkeit, Abreißfestigkeit und Haftzugfestigkeit machen. Es wird dabei generell zwischen der Haftzugfestigkeit und der Oberflächenzugfestigkeit, ebenfalls als Abreißfestigkeit bezeichnet, unterschieden. Bei einer Haftzugfestigkeitsprüfung wird geprüft, wie gut zwei Schichten miteinander verbunden sind (Adhäsion). Bei der Oberflächenzugfestigkeit bzw. Abreißfestigkeit wird das Zusammenhaltevermögen (Kohäsion) innerhalb eines Stoffes geprüft. Im Folgenden wird hierfür der Begriff der Abreißfestigkeit verwendet.

In Abbildung 4.6 wird der Unterschied zwischen Abreißfestigkeit und Haftzugfestigkeit beispielhaft dargestellt: In Abbildung 4.6(a) wird die Abreißfestigkeit von Beton illustriert. Das Prinzip einer Haftzugfestigkeitsprüfung zwischen einer Applikation (z. B. eine Oberflächenschicht oder ein Mörtel) und dem Beton als Untergrund wird in Abbildung 4.6(b) gezeigt. Bei der Bestimmung der Adhäsion wird die Haftung zwischen verschiedenen Schichten bzw. die Haftung einer Schicht auf einem Untergrund untersucht [106]. Die Haftzugfestigkeitsprüfung wird in Abschnitt 4.3.1 beschrieben. Die in Abbildung 4.6 zu erkennende Ringnut um die Prüffläche wird in Abschnitt 4.2.3.2 erklärt und ihre Erfordernis diskutiert. Die Abreißfestigkeit ist ein Maß für die Kohäsion der Betonrandzone unter Zugbeanspruchung [106] und ist definiert als die maximale Zugkraft bezogen auf die Fläche eines auf die Betonoberfläche geklebten Prüfstempels. Die Abreißprüfung ist die häufigste Prüfmethode zur Beurteilung der mechanischen Beschaffenheit oberflächennaher Betonschichten, obwohl Zugbeanspruchungen senkrecht zur Oberfläche einen geringen Teil der tatsächlich auftretenden Beanspruchungen ausmachen. [136]

Das liegt daran, dass die Festigkeit in der Betonrandzone entscheidend für die Dauerhaftigkeit nachträglich aufgebrachter Schichten ist. Ist der Untergrund von unzureichender Betonqualität, ist unabhängig von Untergrundvorbereitung und Ausführung einer Beschichtung bzw. eines Auftrags einer Instandsetzungsschicht keine ausreichende Oberflächeneigenschaft zu erwarten. Die Höhe der Abreißfestigkeit eines Betonuntergrundes wird als Indikator für seine Beschichtungsfähigkeit gesehen. [106]

In der DIN 1048-2 [33] ist die Durchführung der Abreißfestigkeitsprüfung von Beton geregelt. Die Ermittlung der Haftzugfestigkeit (im Abreißversuch) wird durch die europäische DIN EN



(a) Prüfung zur Abreißfestigkeit

(b) Prüfung zur Haftzugfestigkeit zwischen Applikation und Beton

Abbildung 4.6.: Unterschied zwischen Oberflächenzugfestigkeit (Abreißfestigkeit) und Haftzugfestigkeit

1542 [46] geregelt. Die DIN EN 1542 [46] macht Vorgaben zur Ermittlung der Haftzugfestigkeit von Reparaturmörteln und Betonen (siehe Abschnitt 4.3.1). Die Instandsetzungsrichtlinie (RL-SIB) [28] nimmt hinsichtlich des Prüfverfahrens keine Differenzierung zwischen Oberflächenzugfestigkeit und Haftzugfestigkeit vor [136]. Die ZTV-ING [21] macht zur Bestimmung der Abreißfestigkeit von Betonunterlagen und harten Schichten ebenfalls Angaben, verweist jedoch bei der Durchführung auf die DIN EN 1542 [46]. Dabei differenziert die ZTV-ING [21] nicht zwischen Abreißfestigkeit und Haftzugfestigkeit.

In Tabelle 4.2 sind die vorgenannten relevanten Regelwerke übersichtlich aufgeführt. Dabei wird die DIN EN 12636 [43] zur Bestimmung der Verbundwirkung Beton - Beton nicht berücksichtigt und aufgeführt. Sie ist für diese Arbeit nicht relevant, da als Instandsetzungsprodukt ausschließlich Mörtel verwendet wird.

Tabelle 4.2.: Übersicht: Regelwerke zur Prüfung der Oberflächenzugfestigkeit

Regelwerk	Titel des Regelwerkes / Bezeichnung Prüfverfahren	Stand
DIN EN 1542 [46]	Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken: Messung der Haftzugfestigkeit im Abreißversuch	1999-07
RL-SIB [28]	Instandsetzungsrichtlinie, Prüfverfahren: Abreißprüfung zur Ermittlung der Oberflächenzugfestigkeit und der Haftzugfestigkeit	2001-10
DIN 1048-2 [33]	Prüfverfahren für Beton: Prüfung der Oberflächenzugfestigkeit 2015-09 zurückgezogen, ohne Ersatz	1991-06
ZTV-ING Teil 1 [21]	Prüfung während der Ausführung: Bestimmung der Abreißfestigkeit	2006-07
ZTV-ING Teil 2 [22]	Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen: Prüfung der Abreißfestigkeit	2010-04
DIN 18555-6 [37]	Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln: Bestimmung der Haftzugfestigkeit	1987-11

Mit Hilfe der Vorgaben aus diesen technischen Regeln wurden die Versuchsabläufe, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, für die Bestimmung der Abreißfestigkeit (siehe Abschnitt 4.2.4) und der Haftzugfestigkeit (siehe Abschnitt 4.3.1) abgestimmt. Dabei blieben diejenigen Vorgaben erhalten, die sich durch zusätzliche Literaturrecherche als am sinnvollsten für diese Arbeit herausgestellt haben. Diese Vorgehensweise wurde aufgrund der vielen - sich teilweise überschneidenden und teilweise widersprechenden - Regelwerke gewählt. Kriterien für die Wahl der durchzuführenden Versuchsabläufe waren zum einen die Vermeidung negativer Einflüsse auf die Verbundproben (z. B. die Beanspruchung des Verbundes durch ein Vorbohren der Ringnut im Trockenverfahren - Erklärung folgt im folgenden Abschnitt). Zum anderen sollte ein reproduzierbarer und vergleichbarer Ablauf für die Prüfung am Beton (Abreißfestigkeit, siehe Abschnitt 4.2.4) und am Verbund zwischen Mörtel und Beton (Haftzugfestigkeit, siehe Abschnitt 4.3.1) sichergestellt werden.

In den folgenden Abschnitten werden die Unterschiede und Gemeinsamkeiten, die sich aus den technischen Regeln zur Oberflächenzug-, Abreiß- und Haftzugfestigkeitsprüfung ergeben, beschrieben.

4.2.3.1. Unterschiede der technischen Regeln

Bei den verschiedenen Regelwerken gibt es Unterschiede, insbesondere bei der Erstellung der Ringnut. Nach der RL-SIB [28] (für harte Flächen), DIN EN 1542 [46] und nach ZTV-ING [21] wird das Vorbohren einer Ringnut ausdrücklich gefordert [80], nach DIN 1048-2 [33] wird es jedoch freigestellt.

Nach der DIN 1048-2 [33] steht es dem Anwender frei, ob der Versuch mit unmittelbar aufgeklebtem Prüfstempel durchgeführt wird oder nachdem die Prüffläche freigebohrt wurde. Wird die Prüffläche vorgebohrt, so ergibt sich eine definierte Fläche, auf die die Kraft eingeleitet wird. Bei einer nicht vorgebohrten Fläche wird ein größerer Kegel aus der Oberfläche gerissen. [33]

Der Vorteil einer vorgebohrten Ringnut ist, dass eine definierte Lastfläche sichergestellt wird, die eine genaue Ermittlung der Zugspannung ermöglicht. Wird hingegen keine Ringnut vorgebohrt, ergibt sich ein ungleichmäßiges Bruchbild in der Betonoberfläche, so dass die Ermittlung der Lastflächengröße erschwert wird. [98]

Nach Angaben der DIN EN 1542 [46] ist eine Ringnut zwar vorgesehen, aber sie trifft keine Aussage darüber, ob die Ringnut im Trockenbohr- oder Nassbohrverfahren durchzuführen ist. Die ZTV-ING [22] verweist bei der Durchführung jedoch auf die DIN EN 1542 [46].

Durch die beim Trockenbohren entstehende Wärme kann es zu thermischen Spannungen im Probekörper kommen, die die Versuchsergebnisse stark beeinflussen können, so dass das vorgenannte Trockenbohrverfahren als kritisch angesehen wird. Das Nassbohren wird im Vergleich zum Trockenbohren als schonenderes Verfahren angesehen. [98] Das Trockenbohrverfahren ist daher z. B. in ZTV-ING [22] und in RL-SIB [28] nicht vorgesehen.

In Tabelle 4.3 sind die unterschiedlichen Forderungen an das Vorhandensein einer Ringnut, der Art des Vorbohrens und die Bohrtiefe aus den verschiedenen Regelwerken gegenüber gestellt.

Tabelle 4.3.: Übersicht: Regelwerke zur Prüfung der Oberflächenzugfestigkeit bzgl. der Notwendigkeit einer Ringnut (ggf. nass oder trocken vorgebohrt) und Angabe der Bohrtiefe

Regelwerk	Ringnut	nass oder trocken gebohrt	Tiefe in Beton
DIN EN 1542 [46]	ja	keine Angabe	15 $\pm$ 5 mm tief
RL-SIB [28]	ja bei harten Schichten	nass	5 - 10 mm tief
DIN 1048-2 [33]	nicht festgelegt, beides möglich	beides möglich	min. 5 mm tief sonst 10 mm
ZTV-ING Teil 1 [21] und Teil 2 [22]	ja	nass	10 mm tief
DIN 18555-6 [37]	ja	beides möglich	min. 5 mm tief

Ebenso gibt es in den Regelwerken Unterschiede bei den Abmessungen der Prüfstempel und dem Material, aus dem die Prüfstempel bestehen sollen. In der Tabelle 4.4 sind die Vorgaben der vorgenannten Regelwerke übersichtlich dargestellt. Der Durchmesser D von ca. 50 mm ist allen gemeinsam, doch die Forderung der Mindestdicke d und das Material der Prüfstempel unterscheiden sich:

Tabelle 4.4.: Übersicht: Abmessungen und Material der Prüfstempel gemäß technischen Regelwerken

Regelwerk	Abmessungen (Durchmesser D)	Abmessungen (Dicke d)	Material
DIN EN 1542 [46]	50 $\pm$ 0,5 mm	$\geq$ 20 mm	Stahl
DIN EN 1542 [46]	50 $\pm$ 0,5 mm	$\geq$ 30 mm	Aluminium
RL-SIB [28]	50 + 2 mm	$\geq$ 25 mm	Stahl
DIN 1048-2 [33]	min. 50 mm	1/2 D	Stahl
ZTV-ING Teil 1 [21]	50 mm	$\geq$ 25 mm	keine Angabe
DIN 18555-6 [37]	50 mm	$\geq$ 20 mm	Stahl

MOMBER und SCHULZ [106] zufolge, sollte die Dicke der Prüfstempel mindestens 25 mm betragen bzw. mindestens 1/4 des Durchmessers des Stempels. Außerdem gibt es Unterschiede in der Angabe der erforderlichen Anzahl der Prüfungen für die Ermittlung der Haftzugfestigkeit bzw. Oberflächenzugfestigkeit. In der Tabelle 4.5 sind die Angaben aus den vorgenannten Regelwerken aufgeführt.

Tabelle 4.5.: Übersicht: Erforderliche Anzahl Prüfungen nach technischen Regelwerken

Regelwerk	Erforderliche Anzahl
DIN EN 1542 [46]	5 je Prüfkörper 1 Prüfkörper je Instandsetzungsprodukt
RL-SIB [28]	15 (3 Probekörper a 5 Prüfungen)
DIN 1048-2 [33]	je nach Anwendungsbestimmung
ZTV-ING Teil 3 [22]	6 je 500 m^2
	5 je angefangene 250 m^2 für Spritzbeton
DIN 18555-6 [37]	5

4.2.3.2. Gemeinsamkeiten der technischen Regeln

Allen technischen Regeln gemeinsam ist die geforderte Kraftsteigerung von ca. 100 N/s, wie in Tabelle 4.6 aufgeführt.

Eine Erklärung für die Kraftsteigerung von ca. 100 N/s: Bis zum Bruch soll in den meisten Normen und Richtlinien die Kraft stetig so ansteigen, dass die Zugspannung in der Klebefuge um etwa 0,05 N/mm^2 pro Sekunde ansteigt. Für einen Prüfstempel mit einem Durchmesser von 50 mm entspricht dies einer Spannungssteigerung von ungefähr 100 N/s. [28, 33, 46]

Tabelle 4.6.: Übersicht: Kraftsteigerung für Prüfungen nach technischen Regelwerken [a]

Regelwerk	Spannungssteigerung	Kraftsteigerung für ⌀= 50 mm	Kraftsteigerung für ⌀= 50 mm
DIN EN 1542 [46]	**0,05** ± **0,01** MPa/s		≈ 100 N/s
RL-SIB [28]	**0,05** MPa/s		≈ 100 N/s
DIN 1048-2 [33]	**0,05** MPa/s	**100** N/s	≈ 100 N/s
ZTV-ING Teil 1 [21]			**100** N/s
DIN 18555-6 [37]			**100 bis 200** N/s [b]

[a] **dick gedruckt** sind Angaben unmittelbar aus dem Regelwerk, dünn gedrückt sind ermittelte Werte
[b] abhängig von zu erwartender Haftzugfestigkeit

Nur DIN 18555-6 [37] weicht ab und sieht Belastungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der zu erwartenden Haftzugfestigkeit vor. Da die zu erwartenden Haftzugfestigkeiten nicht vorherzusagen waren, wurde als Belastungsgeschwindigkeit 100 N/s verwendet (siehe Abschnitte 4.2.4 und 4.3.1), welche in den vorher genannten Normen zugelassen ist.

Der Durchmesser von 50 mm für die Prüfstempel ist für alle Normen und Richtlinien entweder vorgeschrieben oder zumindest zugelassen (siehe Tabelle 4.4).

4.2.3.3. Einschränkungen der technischen Regeln

Das Prüfverfahren in der DIN EN 1542 [46] für die Haftzugfestigkeit von Vergussmörteln, Reparaturmörteln, Betonen und Oberflächenschutzsystemen ist nur für Produkte anzuwenden, deren Schichtdicken 50 mm nicht überschreiten. [46]

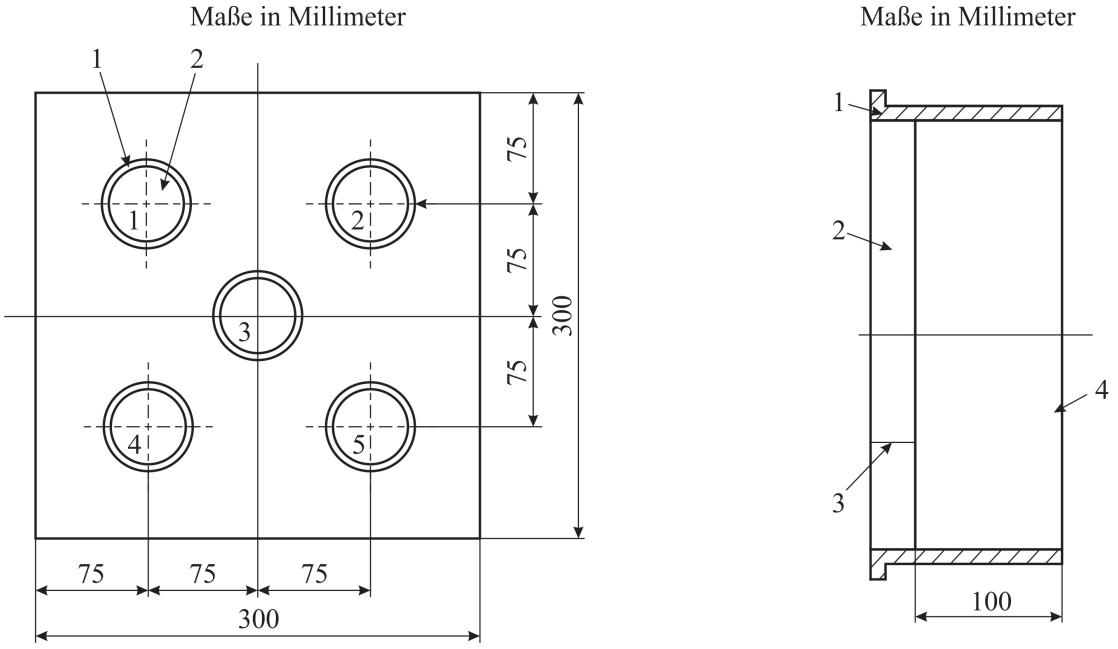
4.2.4. Abreißfestigkeit des Betonungergrundes (Ermittlung der Abreißfestigkeit)

Der Begriff der Abreißfestigkeit ist definiert als flächenbezogene Kraft, die benötigt wird, um einen auf der zu untersuchenden Oberfläche aufgeklebten Prüfstempel abzureißen [56]. Die geforderte Abreißfestigkeit des Betonuntergrundes für Betonersatzsysteme beträgt nach ZTV-ING [22] im Mittel mindestens 1,5 N/mm^2 und der kleinste zulässige Einzelwert ist 1,0 N/mm^2. [22]

Versuchsbeschreibung: Abreißfestigkeitsprüfung

Im Folgenden wird der für diese Arbeit nach Durchsicht der relevanten Regelwerke und diverser Literatur ([20, 28, 46, 77, 80, 106, 159]) festgelegte Ablauf der Abreißfestigkeitsprüfung beschrieben. Dabei entsprachen viele Punkte der Vorgehensweise in DIN EN 1542 [46], die ergänzt wurde um einige Punkte aus der vorgenannten Literatur.

Die Prüfkörper, sowie die Anordnung und Lage der Prüfstempel wurden in Anlehnung an die DIN EN 1542 [46] festgelegt. Die Abmessungen der Prüfkörper betrugen 300 mm $\times$ 300 mm $\times$ 100 mm [46]. Die Anzahl, Anordnung und Lage der Stempel wurde wie in DIN EN 1542 [46] (siehe Abbildung 4.7) gewählt. Dies gilt für die Prüfungen der Abreißfestigkeit als auch der Haftzugfestigkeit, die in 4.3.1 beschrieben werden. Die Oberflächen der Betonuntergründe



1. durch Kernbohrung hergestellte Bohrnut um die Prüffläche
2. Stahl- oder Aluminiumscheibe mit Durchmesser von 50 mm

1. Form
2. Produkt oder System
3. durch Befestigung der Form eingestellte Dicke
4. Referenzprüfkörper aus Beton

Abbildung 4.7.: Anordnung und Lage der Stempel nach DIN EN 1542 [46]

wurden zuvor durch Sandstrahlen aufgeraut. Dabei wurde im Wesentlichen der Zementstein mechanisch entfernt [159]. Es wurde mit einem nass arbeitenden Diamant-Kernbohrgerät eine Ringnut vorgebohrt, so dass diese Ringnut eine definierte Betonfläche mit einem Durchmesser von 50 mm hatte.

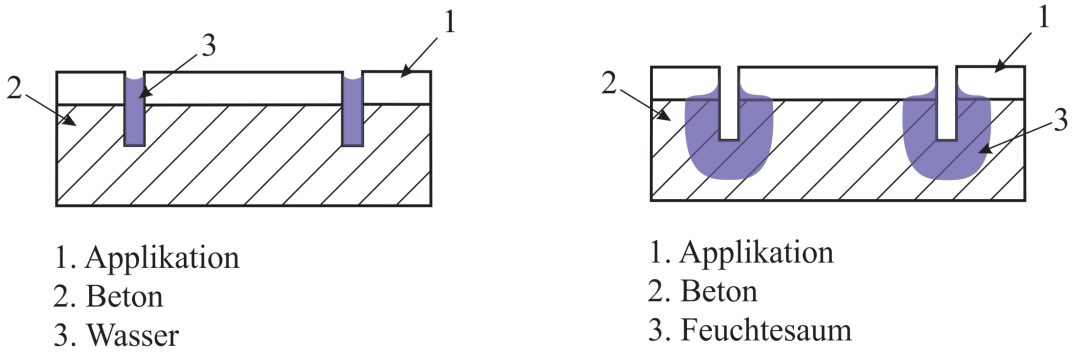
Um die Ergebnisse der Abreißfestigkeit des Betonuntergrundes und der Haftzugfestigkeit des Verbundes zwischen Mörtel und Beton (vgl. Abschnitt 4.3.1) auch in Abhängigkeit zueinander beurteilen zu können, wurde abweichend von DIN 1048-2 [33] (min. 5 mm, sonst 10 mm tief) 20 mm tief in den Betonuntergrund gebohrt (Erläuterung folgt in Abschnitt 4.3.1). Dies entsprach

noch der DIN EN 1542 [46], die vorgibt, dass die Bohrung bis zu einer Tiefe von (15 ± 5) mm in den Beton auszuführen ist (vgl. Tabelle 4.3).

Ohne den Prüfkörper zu beschädigen wurde die Diamantbohrkrone entfernt (nach [46]). Das Bohrmehl bzw. der Bohrschlamm wurde gründlich entfernt (nach [28]). Nach dem Nassbohren wurde die Ringnut von Wasser befreit und die kerngebohrten Betonproben senkrecht zum Trocknen aufgestellt. Laut MOMBER und SCHULZ [106] bildet sich durch das Nassbohren im Bereich der Ringnut ein Feuchtesaum (siehe Abbildung 4.8), der zum Quellen des Betons und zu Eigenspannungen führen kann und somit ein Herabsetzen der Festigkeit zur Folge hat. Dadurch würden niedrige Haftzugwerte ermittelt werden [77, 80, 106].

Die Feuchte ist ungleichmäßig über den Betonrandbereich verteilt und es ist davon auszugehen, dass der Feuchtegehalt im oberflächennahen Randbereich höher ist als im Innern des Kerns [77, 80].

Daher ist das Wasser sofort nach dem Nassbohren der Ringnut zu entfernen, um ein tiefes Eindringen von Feuchtigkeit zu vermeiden (siehe auch Abbildung 4.8) [77, 80, 106]. Es wurden



(a) zum Zeitpunkt der Bohrung

(b) zum Zeitpunkt der Prüfung

Abbildung 4.8.: Feuchtezustand zum Zeitpunkt der Bohrung und zum Zeitpunkt der Prüfung

Prüfstempel aus Stahl mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Dicke von 25 mm verwendet. Für die Klebeverbindung musste die zu prüfende Fläche ausreichend trocken sein [28] und die Prüffläche musste von Schmutz und losen Bestandteilen befreit werden, damit der Prüfstempel aufgeklebt werden konnten [28, 33].

Als Kleber können schnellhärtende Zweikomponenten-Epoxidkleber nach DIN EN 1542 [21, 46], pastöse Reaktionsharze als schnellhärtende Kleber nach DIN 1048-2 [33] oder Klebstoffe auf Kunstharzbasis (z. B. Epoxidharz oder Methylmethacrylatharz) nach DIN 18555-6 [37] verwendet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein PMMA-Kleber (Polymethylmethacrylat-Harze) verwendet: SILIKAL Härtepulver und SILIKAL RI/21 Kleber.

Beim Aufbringen der Stempel war darauf zu achten, dass eine gleichmäßige Schicht zwischen Stempel und zu untersuchender Oberfläche entstand, jedoch durfte der Kleber nicht in die Ringnut gelangen. Um die Luft zwischen Stempel und Untergrund herauszutreiben, war genügend

Druck auf die Stempel auszuüben. Der herausgedrückte Kleber war anschließend zu entfernen. Der aufgeklebte Stempel sollte parallel zur Prüffläche liegen. [33, 46]

Nach weiteren Stunden Wartezeit für die Aushärtung des Klebers wurde die Abreißfestigkeitsprüfung durchgeführt. MOMBER und SCHULZ [106] zufolge spielt es unter Standard-Klimabedingungen keine Rolle, ob die Prüfung 1,5 oder 24 Stunden nach dem Vorbohren erfolgt. Da die Prüfungen jedoch nicht unter Standard-Klimabedingungen stattfinden konnten, wurde der Zeitpunkt der Prüfung auf 24 Stunden nach dem Vorbohren festgelegt. So konnte sichergestellt werden, dass die Zeitpunkte (Ringnut bohren - Prüfstempel aufkleben - Prüfung durchführen) bei jedem Versuch identisch waren und dass der Kleber ausgehärtet war, unabhängig von der aktuellen Umgebungstemperatur der Prüfungen.

Die Kraftsteigerung des Stempels betrug ca. 100 N/s und entspricht somit den Anforderungen der Regelwerke, da eine Kraftsteierung von 100 N/s in allen erlaubt ist (vgl. Abschnitt 4.2.3).

Für den Versuch der Abreißfestigkeit (sowie auch der Haftzugfestigkeit, siehe 4.3.1) wurde das Prüfgerät konzentrisch über den Stempel und zur kerngebohrten Fläche aufgestellt (nach [33, 46]). Die Last beim Bruch wurde aufgezeichnet, die Bruchbilder wurden beschrieben und die maximale Bruchlast bezogen auf die Fläche notiert. Aus der Bruchlast und dem Durchmesser wurde die Abreißfestigkeit ermittelt.

Der Wert der Abreißfestigkeit wurde als Mittel aus fünf Werten ermittelt (siehe in Abschnitt 4.3.1, Abbildung 4.7).

In Anlehnung an die ZTV-ING [22] wurde die Abreißfestigkeit auf 0,1 N/mm^2 genau angegeben und für jede Abreißprüfung wurde ein Protokoll angefertigt. Erfolgten Abrisse zu mehr als 25 % in der Kleberfuge, wurden diese Werte nicht in der Auswertung berücksichtigt (gemäß ZTV-ING [22], siehe auch [98]).

4.3. Prüfungen des Verbundes zwischen Mörtel und Beton

Der erreichte Verbund zwischen Instandsetzungsmörtel und Beton ist entscheidend für eine erfolgreiche Instandsetzung. Zur Beurteilung des erreichten Verbundes zwischen dem unter Wasser aufgebrachten Mörtel und Beton wurde die Haftzugfestigkeit zwischen Mörtel und dem Beton geprüft und mit Hilfe der Mikroskopie wurde die Qualität der Verzahnungen zwischen Mörtel und Beton betrachtet und beurteilt.

4.3.1. Haftzugfestigkeit zwischen Mörtel und Beton (Ermittlung der Haftzugfestigkeit)

In Abschnitt 4.2.3 wurde bereits der Unterschied zwischen Abreißfestigkeit und Haftzugfestigkeit beschrieben. Für beide Prüfungen wurde der Versuchsablauf einheitlich festgelegt, um die Möglichkeit zu erhalten, etwaige Zusammenhänge zwischen der Abreißfestigkeit von Betonuntergrund und erreichter Haftzugfestigkeit zwischen Mörtel und Betonuntergrund erkennen zu können. Die Untersuchungsbedingungen sollten daher möglichst einheitlich sein. Der Idealfall ist, wenn die Haftzugfestigkeit gleich oder gar höher ist als die Abreißfestigkeit des Betonuntergrundes (siehe auch Abschnitt 6.1.1.3).

Versuchsbeschreibung: Haftzugfestigkeitsprüfung

Die zeitliche Abfolge der Schritte: Bohren der Ringnut, Trockenzeit, Kleben der Prüfstempel und Durchführung der Prüfung waren einheitlich (vgl. Abschnitt 4.2.4). Abweichungen, die sich ergaben, weil nicht der Betonuntergrund allein, sondern ein Verbund zwischen Mörtel und Beton geprüft wurden, werden im Folgenden beschrieben.

Die Gesamtbohrtiefe unterschied sich aufgrund dessen, dass sich beim Verbundkörper die Bohrtiefe durch die Dicke der Applikation erhöht (zur Veranschaulichung vgl. Abbildung 4.6). Die Kernbohrung ging bis in den Festbetonuntergrund hinein.

Nach DIN EN 1542 [46] resultiert die Gesamtbohrtiefe d_i der Kernbohrung aus der Gleichung 4.2. Die Dicke der Mörtelschicht d_d war der Tiefe von (15 ± 5) mm hinzu zu addieren. [46]

$$d_i = d_d + (15 \pm 5) \tag{4.2}$$

Für die Herstellung gleicher Untersuchungsbedingungen (in der Annahme, dass unterschiedliche Einflüsse so minimiert wurden) wurde auch hier 20 mm tief in den Betonuntergrund gebohrt. Diese Tiefe war somit mit der Angabe der DIN EN 1542 [46] (vgl. Tabelle 4.3) konform.

Die Prüfung der Haftzugfestigkeit der Verbundprobe (Mörtel und Beton) stimmt im Rahmen dieser Arbeit in vielen Punkten mit der DIN EN 1542 [46] überein und wurde in Anlehnung an diese durchgeführt. Abweichungen werden im Weiteren benannt. Wie in Abschnitt 4.2.3.1 beschrieben, wird das Trocken- oder Nassbohren der Ringnut nicht festgelegt, doch wie in Abschnitt 4.2.4 begründet (Versuchsablauf der Abreißfestigkeit im Rahmen dieser Arbeit), wurde die Ringnut nass auch für die Prüfung der Haftzugfestigkeit vorgebohrt. Das zu prüfende Instandsetzungsprodukt ist nach Norm auf vertikale Oberflächen aufzubringen.

Die Probekörper mussten laut DIN EN 1542 [46] anschließend drei Tage in vertikaler Lage mit einem Mindestabstand von 100 mm zueinander gelagert werden, bevor sie in die waagerechte Lage gebracht werden durften. Aufgrund der Aufgabenstellung dieser Arbeit musste von den Klimavorgaben für die Aushärtung und die Konditionierung der Proben der DIN EN 1542 [46] abgewichen werden.

Statt dessen wurde der Mörtel gemäß Aufgabenstellung unter Wasser aufgetragen und die Verbundprobe blieb anschließend bis zum 7. Tag unter Wasser. Die Verbundproben blieben aber in vertikaler Lage gelagert (Mindestabstand 100 mm), bevor sie zum Bohren der Ringnut und zur Prüfung der Haftzugfestigkeit in die waagerechte Lage gebracht wurden. Nach der Entnahme aus dem Wasser wurden die Verbundproben visuell auf Schäden geprüft. Der zeitliche Ablauf verlief dann wie bei der Prüfung der Abreißfestigkeit in Abschnitt 4.2.4: Es wurde nass vorgebohrt und nach mehreren Stunden Trockenzeit wurden Prüfstempel aus Stahl auf die zu prüfende Fläche geklebt. Nach einer weiteren Wartezeit für die Aushärtung des Klebers wurde die Haftzugfestigkeitsprüfung 24 Stunden nach dem Vorbohren durchgeführt. Anschließend wurde eine Haftzugprüfung durchgeführt.

4.3.2. Untersuchungen in der Verbundzone

Neben der erreichten Haftfestigkeit wurden auch Verbundproben mit Hilfe von Auflicht-, Durchlicht- und Raster-Elektronen-Mikroskopie (REM) untersucht. Für diese Untersuchungen wurden keine Regelwerke und Normen angewendet. Details zu den mikroskopischen Untersuchungen siehe in Abschnitt 6.1.2.

5. Werkstoffe und Applikationstechnik inklusive Diskussion

Ziele dieser Arbeit waren die Entwicklung eines Betonersatzsystems und die Erprobung von möglichen Applikationstechniken für die Unterwasseranwendung. Hierzu gibt es Anforderungen an den Mörtel / Beton (Betonersatzsystem) und an die Applikationstechnik unter Wasser (siehe Kapitel 2).

5.1. Herangehensweise

Der Projektablauf sah es vor, mit der Mörtelentwicklung zu beginnen um zunächst einen Mörtel zu finden, der unter Wasser einbaufähig ist und gute Haftzugfestigkeiten erreicht. Die Entwicklung und Untersuchung von Applikationstechniken folgte im zweiten Schritt. Aus diesem Grund wurde zunächst der händische Auftrag durch Andrücken des Mörtels unter Wasser angewendet, um den Prozess der Mörtelrezepturoptimierung und Testen des möglichen Haftverbundes zwischen Mörtel und Beton unter Wasser voran zu treiben. Noch vor den Versuchen zur Applikationstechnik wurden Mörtel konzipiert und unter Wasser aufgebracht. Diese wurden händisch waagerecht unter Wasser appliziert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Abschnitt 6.1.1.1 zusammengefasst. Weil zu Beginn dieser Forschungsarbeit unklar war, ob unter Wasser aufgebrachter Mörtel tatsächlich gute Verbundeigenschaften erreichen kann, war wichtig, mit solchen Untersuchungen zu beginnen.

Als die ersten erfolgreichen Versuchsreihen im Durchschnitt die erforderlichen Haftzugfestigkeiten überwiegend erfüllten und teilweise übertrafen (siehe Abschnitt 6.1.1.1), wurden die ersten Applikationstechniken untersucht (siehe Abschnitt 5.6).

Im Laufe der Suche nach einer geeigneten Applikationstechnik (siehe Abschnitt 5.6) wurden einige Rezepturen (Abschnitt 5.5), die in Abschnitt 6.1.1.1 hohe Haftzugfestigkeiten aufwiesen, optimiert (siehe Abschnitt 5.4). Des Weiteren wurden die Rezepturen bezüglich ihrer Konsistenz an die Applikationstechnik angepasst. Während der Entwicklung der Applikationstechnik wurden ebenfalls Verbunduntersuchungen durchgeführt, diese sind in Abschnitt 6.1.1.2 zusammengefasst.

5.2. Verwendeter Betonuntergrund

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei verschiedene, jedoch gleichbleibende Rezepturen für die Betonuntergründe verwendet. Dabei handelte es sich um einen Beton mit einer geplanten

Festigkeitsklasse C12/15 (im folgenden als Beton 1 bezeichnet) und einer geplanten Festigkeitsklasse C30/37 (im folgenden als Beton 2 bezeichnet). Die Abmessungen dieser Betonuntergründe betrugen $30 \times 30 \times 10$ cm (Anforderungen nach DIN EN 1542 [46], siehe Abschnitt 2.1).

Beide Betone wurden mit einem Hochofenzement (CEM III/A 42,5N) hergestellt. Der Beton 1 hat einen EFA Füller (Flugasche) als Betonzusatzstoff, ist als unbewehrter Beton geeignet und entspricht demnach von seiner Zusammensetzung her der Expositionsklasse X0. Der Beton 2 entspricht von seiner Zusammensetzung den Anforderungen der Expositionsklassen XC4, XD1, XS1, XF1, XA1, XM1 und ist ein WU-Beton, als Zusatzmittel hat dieser Beton einen Betonverflüssiger (BV). Die Betonuntergründe der Sorte „Beton 1“ wurden stampfend hergestellt, weil dieser Beton ein erdfeuchter Beton war. Die Betonuntergründe der Sorte „Beton 2“ wurden mit Hilfe eines Rütteltisches bis zu 120 Sekunden verdichtet. Als Nachbehandlung wurden die Betone mit einer befeuchteten Abdeckung eingedeckt, der Beton 1 zwei Tage und der Beton 2 einen Tag bis zum Ausschalen.

Zur Wahl dieser Betonqualitäten sind die Entscheidungshilfen detailliert im Anhang in Abschnitt A.1 beschrieben. Es wurden die Anforderungen nach Normen, nach Expositionsklassen und die Zusammensetzung bestehender Wasserbauwerke gegenübergestellt und miteinander verglichen. Das Ergebnis lässt sich kurz zusammenfassen: Die Wahl fiel auf einen Beton mit einer Druckfestigkeit von ca. 10 $\mathrm{N/mm^2}$ (Grenze zwischen Altbetonklasse A1 und A2 in Tabelle A.2) und einen Beton mit einer Druckfestigkeit von mehr als 30 $\mathrm{N/mm^2}$ (Altbetonklasse A4 in Tabelle A.2). Diese Tabelle befindet sich im Anhang A.

Es wurde bewusst ein Beton mit einem Hochofenzement (CEM III) gewählt, weil dieser Zement für massige Bauteile, wie Wasserbauwerke, überwiegend eingesetzt wird (vgl. im Anhang Abschnitt A.1.3). Es wird weniger Hydratationswärme frei, was in Abbildung 5.1 gut veranschaulicht ist: Im Vergleich wird weniger Hydratationswärme bei der Verwendung von CEM III (Hochofenzement) als bei einem CEM I (Portlandzement) freigesetzt. Eine hohe Hydratationswärme bei massigen Bauteile würde zu Rissbildungen im Beton führen.

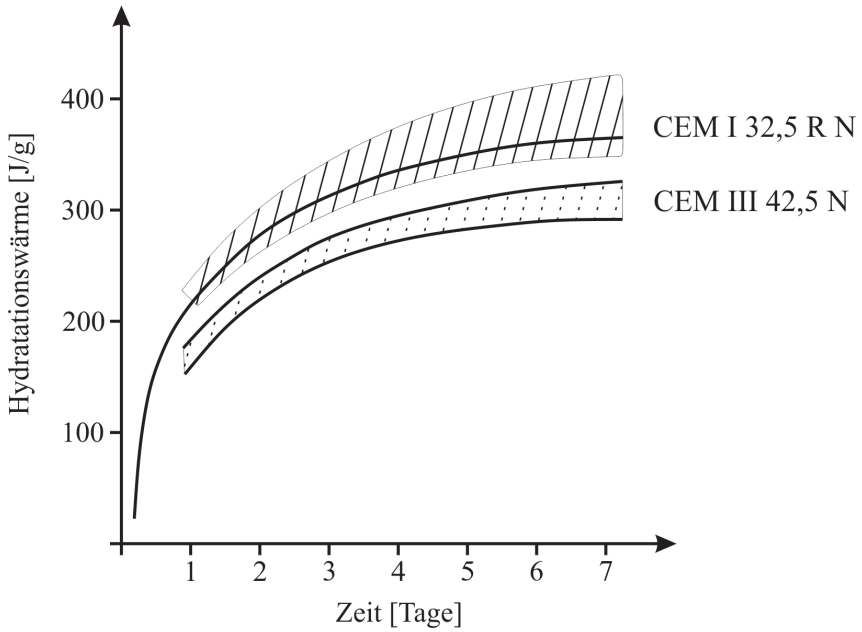


Abbildung 5.1.: Bereiche für die Hydratationswärme verschiedener Zemente nach [175, 176]

In Tabelle 5.1 sind die verwendeten Ausgangsstoffe und die Zusammensetzung der verwendeten Betonuntergründe aufgeführt.

Tabelle 5.1.: Ausgangsstoffe und Zusammensetzung der Betone

	Beton 1 (C12/15)	**Beton 2 (C30/37)**
Anforderungen der Expositionsklassen	X0	XC4, XD1, XS1, XF1, XA1, XM1
Konsistenz	C 1	F 3
Zementmenge	CEMIII/A 42,5 N 250 kg	CEMIII/A 42,5 N 320 kg
Zusatzstoffe	EFA 50 kg	[-]
Zusatzmittel	[-]	BV 1,92 kg
w/z-Wert	0,46	0,50

Vergleicht man die Zusammensetzung der Betone aus der Tabelle 5.1 mit denen im Anhang aus Abbildung, A.3 so kommt der Beton 2 realen Wasserbauwerken sehr nahe: Die Betone sind aus Hochofenzement und die Zementmenge, der w/z-Wert, die Menge an Zusatzstoffen wie Flugasche liegen in denselben Bereichen. Es wurden wichtige Kriterien wie Carbonatisierung (XC), Frostbeanspruchungen (XF), Chemischer Angriff (XA), Verschleißbeanspruchung (XM; z. B. Schiffskollision) und der Angriff durch Chloride aus Meerwasser (XS) berücksichtigt, wenn auch mit unterschiedlichen Stufen.

Vorbehandlung der Betonoberflächen

Am besten geeignet für die Vorbehandlung der Betonoberflächen unter Wasser werden Hochdruckwasserstrahlen durch Taucher oder durch maschinelle Einrichtungen, die von Booten aus

bedient werden, sein. Neben der besseren praktischen Umsetzung (ohne Absenken des Wasserspiegels) sprechen auch Ergebnisse aus anderen Veröffentlichungen, die Vorbehandlungsverfahren von Betonoberfläche im Hinblick auf eine verbesserte Haftzugfestigkeit untersucht haben, für die Anwendung des Hochdruckwasserstrahlens.

Laut SILFWERBRAND zeigten in seinen Versuchen mit Hochdruckwasserstrahlen vorbehandelte Oberflächen durchschnittlich höhere Haftzugfestigkeiten im Vergleich zu gesandstrahlten Oberflächen. Die Rautiefe der mit Hochdruckwasserstrahlen vorbehandelten Oberflächen ist im Vergleich zu gesandstrahlten Oberflächen deutlich größer. Die von SILFWERBRAND festgestellten Unterschiede in der Haftzugfestigkeit fielen trotz der unterschiedlichen Rautiefen geringer aus als erwartet. [163] Trotzdem ist Hochdruckwasserstrahlen wenn möglich vorzuziehen.

Im Rahmen der im Laborversuch zur Verfügung stehenden Möglichkeiten wurden die Betonproben nicht unter Wasser mit Hochdruckwasserstrahlen behandelt, sondern wurden als Vorbehandlung beidseitig sandgestrahlt. Die Platten wurden dafür vorher aus der Wasserlagerung genommen. In der Praxis wird das „Sandstrahlen“ am häufigsten eingesetzt und ist sehr effektiv [158], vgl. Abbildung 5.2.

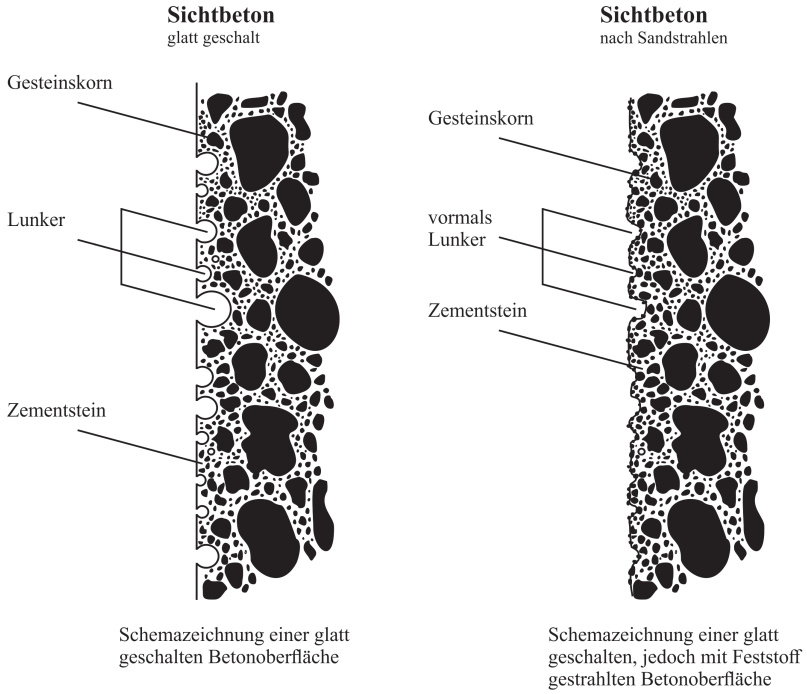


Abbildung 5.2.: Vergleich einer geschalten (links) und einer gesandstrahlten Betonoberfläche (rechts) nach [158] (abgeändert)

LUNK ermittelte für das Sandstrahlen einen Einfluss auf die Haftzugfestigkeit von +10 bis +30 %, für Hochdruckwasserstrahlen (500 - 1000 bar) ebenfalls +10 bis +30 % und bei Hochdruckwasserstrahlen > 1000 bar sogar einen Einfluss von +20 bis +35 % [94]. Die Anwendung des Sandstrahlens für das Aufrauen der Oberflächen wird daher als ausreichend betrachtet.

Die Vorbehandlung der Betonoberfläche geschah in Anlehnung an DIN EN 1766 [47]: Luftdruck $\approx$ 0,5 MPa, Düsendurchmesser 8 bis 12 mm und handelsübliche Strahlmittel mit einer Korngröße von 0,25 bis 1,00 mm (jedoch keine eisenhaltigen Bestandteile) [47]. Damit das Prozedere möglichst realitätsnah war, wurden die Betonoberflächen zeitnah vor den jeweiligen Applikationen sandgestrahlt.

5.2.1. Betonuntergrundeigenschaften

Wie in Abschnitt 4.2 aufgeführt, wurde der Betonuntergrund geprüft auf Druckfestigkeit, Abreißfestigkeit und Rautiefe vor und nach der Oberflächenvorbehandlung durch Sandstrahlen. In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse zu den vorgenannten Prüfungen dargestellt.

5.2.1.1. Druckfestigkeit

Während der Herstellung der Betonuntergründe wurden im Rahmen dieser Arbeit zu jeder Betonsorte mindestens drei Betonwürfel der Abmessungen 150 mm $\times$ 150 mm $\times$ 150 mm nach DIN EN 12390-2 [41] hergestellt. Mit diesen Würfeln wurde die jeweilige Druckfestigkeit der Betonsorte und Charge nach DIN EN 12390-3 [42] (siehe auch Abschnitt 4.2.1) ermittelt. Die Druckfestigkeiten wurden nach 28 Tagen und nach 56 Tagen ermittelt. Die Betonplatten wurden ab einem Mindestalter von 3 Monaten und andauernder Wasserlagerung für die Herstellung der Verbundproben verwendet. Deswegen war nicht nur die 28 Tage Druckfestigkeit von Interesse, sondern auch der Wert nach 56 Tagen. Die Ergebnisse zur Druckfestigkeit der Betonuntergründe sind in den Tabellen A.3 und A.4 im Anhang aufgeführt. Der Beton 1 erreicht nach 28 Tagen eine Druckfestigkeit von 12 bis 29 $\mathrm{N/mm^2}$ und nach 56 Tagen 23 bis 29 $\mathrm{N/mm^2}$. Der Beton 2 erreicht nach 28 Tagen eine Druckfestigkeit von 44 bis 48 $\mathrm{N/mm^2}$ und nach 56 Tagen 58 bis 69 $\mathrm{N/mm^2}$.

5.2.1.2. Abreißfestigkeit

Die Abreißfestigkeiten des Betons 2 (Festigkeitsklasse C30/37) lagen zwischen 0,36 $\mathrm{N/mm^2}$ (Betonalter 10 Monate) und 3,78 $\mathrm{N/mm^2}$ (Betonalter 10 Monate), der Mittelwert betrug 2,33 $\mathrm{N/mm^2}$. Für den Beton 1 (Festigkeitsklasse C12/15) lagen die Abreißfestigkeiten im Bereich von 0,86 (Betonalter 12 Monate) bis 3,30 $\mathrm{N/mm^2}$ (Betonalter 7 Monate) und der Mittelwert lag bei 1,84 $\mathrm{N/mm^2}$. Eine Erklärung für die hohen Abreißfestigkeiten des Betons 1, trotz niedriger Beton-Druckfestigkeit, könnte der vergleichsweise niedrige Wasserzementwert dieses Betons sein (vgl. w/z-Wert = 0,46 in Tabelle 5.1).

5.2.1.3. Rautiefen

Für den Beton 1 lagen die Rautiefen vor dem Sandstrahlen zwischen 0,25 und 0,73 mm und nach dem Sandstrahlen zwischen 0,40 und 0,88 mm. Der Mittelwert aus jeweils 36 Messungen vor dem Sandstrahlen betrug 0,43 mm und nach dem Sandstrahlen 0,57 mm.

Für den Beton 2 lagen die Rautiefen im Bereich von 0,22 - 0,39 mm vor dem Sandstrahlen und nach dem Sandstrahlen bei bis zu 0,62 mm. Der Mittelwert aus jeweils 18 Messungen vor dem Sandstrahlen betrug 0,27 mm und nach dem Sandstrahlen 0,46 mm.

Die Rautiefen wurden mit Hilfe des Sandflächenverfahrens nach KAUFMANN [86] ermittelt (siehe Abschnitt 4.2.2).

5.2.2. Oberflächenenergie und Kontaktwinkel

In Abschnitt 3.3.1.2 wurde das Thema Benetzung und Oberflächenenergie behandelt. Damit ein Instandsetzungsstoff auf dem Untergrund haftet, sollte der Instandsetzungsstoff idealerweise eine geringere (bis gleiche) Oberflächenenergie als der Untergrund aufweisen. Die Oberflächenenergie von Feststoffen ist messbar und ist wichtig für die Fähigkeit der sog. Benetzung. Es gibt Testtinten mit definierten Oberflächenenergien, die zur Messung herangezogen werden können. Der Messbereich der auf dem Markt erhältlichen Testtinten erstreckt sich von 18,4 mN/m bis 105 mN/m (Stand: Mai 2011, Zeitpunkt der Untersuchungen). Versuche und Literaturrecherche haben ergeben, dass die verfügbaren Testtinten nicht geeignet sind, um die Oberflächenenergie des Betonuntergrundes zu messen, weil die Testtinten nur für glatte Oberflächen verwendbar sind. Die ZISMAN Methode, die die Grundlage für die Testtinten bildet, ist nur auf polymeren festen und glatten Oberflächen gültig (siehe folgende Literatur zu Grundlagen für die Testtinten: YOUNG [189] und ZISMAN [191]; weiterführend: OWENS [120], WENZEL [181], WU [188], GOOD & ELBING [70]).

Mineralische Baustoffe, wie z. B. Keramik, siehe Tabelle 5.2, können Oberflächenenergien von 500 bis 1500 mN/m aufweisen. Die Oberflächenenergie von Beton wird vermutlich im ähnlichen Bereich wie die Keramik liegen. Aus diesem Grund kann die Oberflächenenergie von Betonuntergründen nicht mit den auf dem Markt verfügbaren Testtinten gemessen werden.

In Tabelle 5.2 sind Oberflächenenergien verschiedener Werkstoffe in mN/m dargestellt.

Tabelle 5.2.: Oberflächenenergien verschiedener Werkstoffe in mN/m aus [130]

Metalle		Kunststoffe		Mineralische Baustoffe		Sonstiges	
Eisen	2500	PTFE	19	Glas	290-300	Wasser	73
Chrom	2400	Silikone	24	Keramik	500-1500	Wachs	26
Aluminium	1200	Naturkautschuk	24			Silikonöl	22
Kupfer	1900	Polypropylen	29-31				
Zink	1000	Polyethylen	31-35				
Titan	2000	PMMA	33-44				
Nickel	2400	Polycarbonat	34-37				
		PETP	42				
		Polyamid	47				

Die genaue Zusammensetzung der einzelnen Werkstoffe beeinflusst die Werte der Oberflächenenergien für verschiedene Werkstoffe sehr stark [130]. Daher sind alle Angaben nur als Anhaltspunkte zu verwenden. MOLLET [105] zufolge sind zuverlässige Werte schwierig in der Literatur zu finden [13, 105].

Eine direkte Messung der Oberflächenenergie von Festkörpern ist physikalisch nicht möglich [78, 105]. Über die Bestimmung des Kontaktwinkels von Flüssigkeiten mit der Oberfläche des Festkörpers kann sie jedoch näherungsweise bestimmt werden (siehe HILLEMEIER ET AL. [78, 79]: Es wurden über gemessene Kontaktwinkel (Methode nach YOUNG) von Flüssigkeiten (reines Wasser und Zementporenlösungen) die Energiezustände (Adsorptionsarbeit nach FOWKES und OWENS ET. AL.) zwischen Zementleim und Schalhaut untersucht und bestimmt.). [78]

In Abbildung 3.12(a) (Abschnitt 3.3.1.2) ist schematisch der Kontaktwinkel eines Tropfens dargestellt. Durch Messen des Kontaktwinkels mit einer oder mehrerer Flüssigkeiten kann über die Gleichung 3.12 von YOUNG [189] die freie Oberflächenenergie eines Festkörpers σ_{sg} berechnet werden.

Mit Hilfe eines Kontaktwinkelmessgerätes der Firma Krüss (siehe Abbildung 5.3) wurde der Kontaktwinkel zwischen abgenutschter (mit Unterdruck durch einen Filter gesaugten) Porenlösung eines Frischmörtels auf einer vorgenässten Betonoberfläche (= Betonbauwerk unter Wasser), die zuvor durch Sandstrahlen aufgeraut wurde, gemessen.

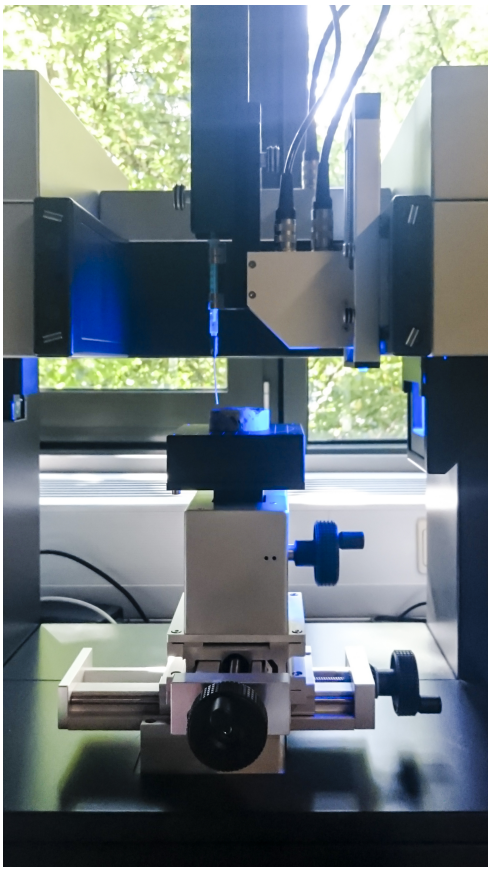
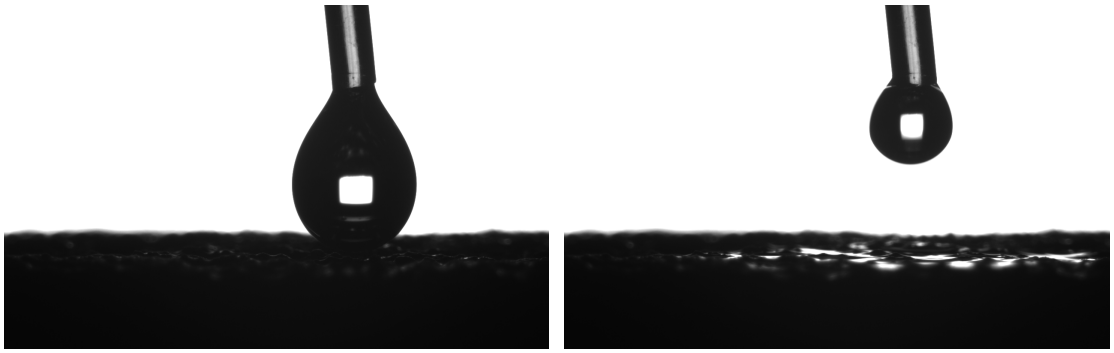


Abbildung 5.3.: Untersuchungen am Kontaktwinkelmessgerät der Firma Krüss

Die verwendete Methode ist eine Tropfenkonturanalyse (*drop shape analysis*, DSA). Dabei werden anhand eines Bildes eines liegenden Tropfen die sogenannten Dreiphasenpunkte gemessen. Die Dreiphasenpunkte sind Schnittpunkte zwischen Tropfenkontur und der Projektion der Oberfläche. [90]

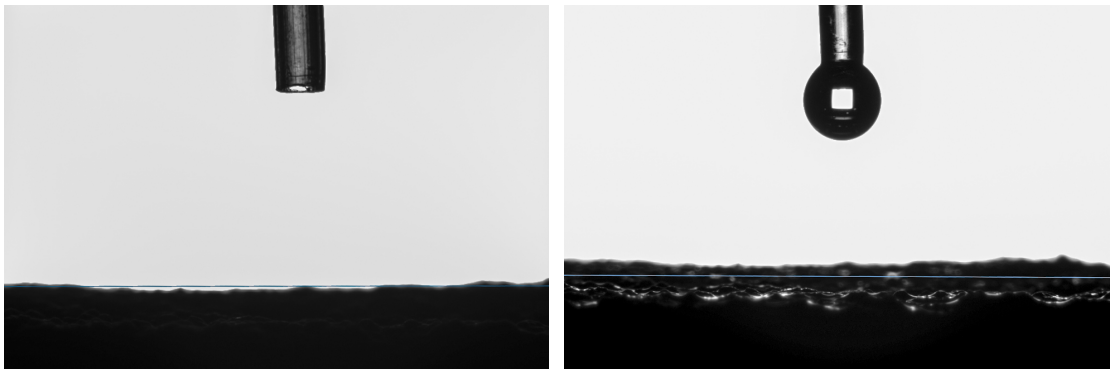
Für die Verwendung eines Kontaktwinkelmessgeräts gibt es folgende Problemstellungen: Die Betonoberfläche ist rau und inhomogen und es sind verschiedene Kontaktwinkel, die sich einstellen können, zu erwarten. Aufgrund der rauen Betonoberfläche besteht ebenfalls die Möglichkeit, dass der Flüssigkeitstropfen direkt in den Beton sickert und so kein Kontaktwinkel messbar ist. Es wurde Beton mit einem Durchmesser von 50 mm und einer max. Höhe von 10 bis 15 mm aus dem Untergrund entnommen. Eine Porenlösung wurde aus dem Mörtel der Rezeptur M (mit Polymer) und der Rezeptur W (für Kartusche, ohne Polymer) abgenutscht. Mit Wasser und den abgenutschten Porenlösungen wurde die Kontaktwinkelmessung angewendet. Versuche zeigten, dass bei einer Zugabe eines reinen Wassertropfens in Abbildung 5.4 keine Kontaktwinkelmessung möglich ist. Dieser Wassertropfen geht direkt in die Poren des Betons über.



(a) Zugabe des Tropfens auf die Betonoberfläche (b) Tropfen geht direkt in den Beton über

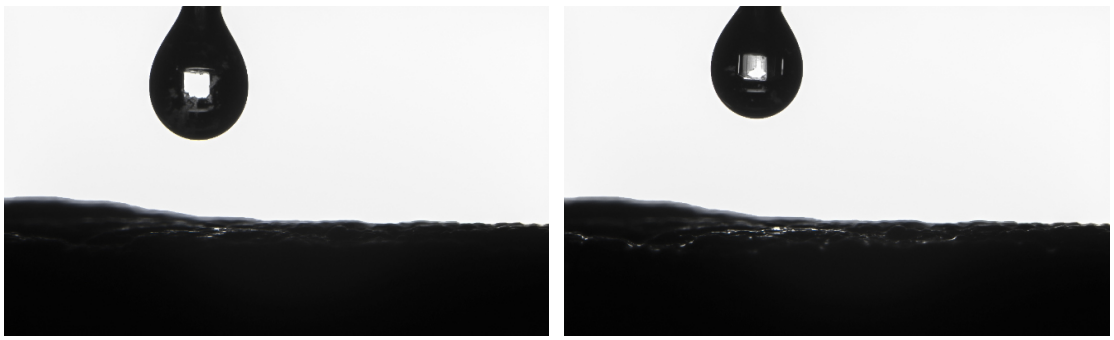
Abbildung 5.4.: fehlgeschlagene Kontaktwinkelmessung

Auch mit den abgenutschten Porenlösungen der Mörtel W und M konnte keine Kontaktwinkelmessung (Abbildungen 5.5 und 5.6) durchgeführt werden. Aufgrund der Rauheit der Betonoberfläche ging der Tropfen direkt in die Poren des Betons über. Die Oberflächenenergie und der Kontaktwinkel konnte nicht gemessen werden. Das Stehenbleiben des Tropfens war nicht gegeben und konnte nicht gemessen werden.



(a) Zugabe des Tropfens auf die Betonoberfläche (b) Tropfen geht direkt in den Beton über

Abbildung 5.5.: fehlgeschlagene Kontaktwinkelmessung mit W



(a) Zugabe des Tropfens auf die Betonoberfläche (b) Tropfen geht direkt in den Beton über

Abbildung 5.6.: fehlgeschlagene Kontaktwinkelmessung mit M

5.3. Mörtelentwicklungen

In Abschnitt 2.2 wurde auf die Anforderungen an den Instandsetzungsmörtel eingegangen. Damit der Mörtel kurze Erstarrungszeiten, ein gutes Zusammenhaltevermögen (auch unter Wasser) und eine gute Verarbeitbarkeit besitzt, gibt es verschiedene Möglichkeiten, derer man sich in der Baustofftechnologie bedienen kann.

5.3.1. Vorüberlegungen

Es waren folgende Eigenschaften für den zu entwickelten Mörtel im Fokus:

- Schnelles Erstarren und Erhärten nach erfolgter Platzierung,
- inneres Zusammenhaltevermögen (auch unter Wasser),
- gute Verarbeitungsfähigkeit (auch unter Wasser) und
- die Ausbildung einer ausreichenden Haftung zum Untergrund.

Die Herstellung eines Anfangs-Verbundes unter Wasser muss rasch erfolgen und die Struktur des Mörtels muss trotz umgebenden Wasser möglichst unverändert bleiben. Mit Hilfe der theoretischen Grundlagen und Eigenschaften verschiedener Materialien (aufgeführt im Abschnitt 3.1) konnten die folgenden Vorüberlegungen zur Mörtelentwicklung gemacht werden.
Wichtige Parameter sind die Erstarrungszeiten und die gute Verarbeitbarkeit und das Zusammenhaltevermögen der zu entwickelnden Mörtel.

5.3.1.1. Erstarrungszeiten

Materialien mit normalen Erstarrungszeiten zementgebundener Baustoffe sind ungeeignet für die Unterwasserinstandsetzung ohne Einschalen des Bauwerkes. Diese lösen sich spätestens nach wenigen Minuten von der Betonoberfläche ab, insbesondere bei größeren Schichtdicken.

Normal erstarrende Zemente haben Erstarrungszeiten, die i. d. R. $\geq$ 45 Minuten betragen. Für eine ausreichende Verarbeitbarkeit darf der Erstarrungsbeginn je nach Festigkeitsklasse des Zementes frühestens nach 45 bis 75 Minuten eintreten [112]. Schnell erstarrende Zemente (SE-Zement) erstarren gemäß [15] per Definition $\leq$ 45 Minuten. Die Erstarrungszeit lässt sich im Allgemeinen durch die Dosierung bzw. Vorhandensein oder Abwesenheit von Sulfatträgern steuern, ebenso durch die Zugabe von Betonzusatzmitteln. Laut TAYLOR erstarrt Zement sehr schnell, wenn zu wenig oder gar kein Sulfatträger vorhanden ist. Im englischen Fachjargon spricht man von *flash set* oder *quick set*. Es handelt sich dabei um eine schnelle Erstarrung mit großer Wärmeentwicklung. Selbst bei andauerndem Rühren lässt sich die Plastizität nicht mehr zurückgewinnen und die weitere Festigkeitsentwicklung bleibt gering. [169]

Kurze Erstarrungszeiten können erreicht werden, indem man einem normal erstarrenden Zement einen Beschleuniger (siehe auch Abschnitt 3.1.9.1) hinzugibt oder ein schnell erstarrender Zement (siehe Abschnitt 3.1.3) verwendet wird, zum Beispiel ein Spritzbetonzement, der keinen oder nur sehr wenig Sulfatträger enthält.

In Vorversuchen [116] zeigte sich, dass schnell erstarrende Mörtel, die auf einem Spritzbetonzement basieren, für den Unterwassereinsatz möglicherweise geeignet sind. Diese Mörtel gehen auch unter Wasser einen Verbund mit dem Betonuntergrund ein. Daher wurden im Rahmen dieser Arbeit eigene Mörtelrezepturen mit Spritzbetonzement als Bindemittel hergestellt.

Wie in Abschnitt 3.1.9.4 bereits detailliert beschrieben, kann auch ohne Abbindeverzögerer durch bestimmte Mischungsverhältnisse zwischen Aluminatzement und Portlandzement die Erstarrungszeit gesteuert werden.

Zusammenfassend können kurze Erstarrungszeiten erreicht werden durch das Verwenden von:

- einem normal erstarrenden Zement in Kombination mit einem Beschleuniger (BE)
- einem schnell erstarrenden Spritzbetonzement, dessen Erstarrungszeit mit Verzögerern eingestellt wird und
- einer Kombination eines normal erstarrenden Portlandzementes mit einem Aluminatzement.

5.3.1.2. Verarbeitbarkeit und Zusammenhaltevermögen

Die Verarbeitbarkeit kann auf mehrere Art und Weise beeinflusst werden: Beispielsweise durch Betonverflüssiger (BV) und Fließmittel (FM). Dabei kann der Wasseranspruch vermindert werden, weil BV und FM eine plastifizierende bzw. verflüssigende Wirkung haben. BV und FM bewirken eine Verbesserung des Zusammenhaltes des Frischbetons und verringern somit auch die Entmischungsneigung. Ebenfalls können Verzögerer, Dichtungsmittel oder Luftporenbildner die Verarbeitbarkeit -bei unverändertem Wassergehalt- verbessern. [72]
Luftporenbildende Betonzusatzmittel haben einen großen Einfluss auf die Verarbeitbarkeit. Sie ermöglichen einen besonders guten Zusammenhalt im Beton und verhindern das Entmischen. Bei zement- und mehlkornarmen Mischungen ist diese Verbesserung der Verarbeitbarkeit besonders ausgeprägt. Eine ähnliche Verbesserung des Zusammenhaltevermögens kann durch die Zugabe eines Stabilisierers erreicht werden, wenn z. B. keine zusätzlichen Luftporen erwünscht sind. [72]

Anti-washout admixtures sind z. B. Stabilisierer (Eigenschaften von Stabilisierern siehe Abschnitt 3.1.7). Sie werden für die Unterwasserbetonierung eingesetzt. Betone, die diese *anti-washout admixtures* enthalten, haben zwar eine gute Kohäsion, so dass dieser auch direkt durch Wasser fallen gelassen werden kann, ohne dass sich ein Auswascheffekt einstellt [149], doch

ist diese Eigenschaft allein für diese Arbeit nicht sinnvoll gewesen. Darüber hinaus sind sogenannten *anti-washout admixtures* für die Unterwasseranwendung von z. B. der Fa. Grace, die in den USA verwendet werden, in Deutschland nicht zugelassen und daher nicht erhältlich[1]. Die Verwendung dieser wurde daher nicht in Betracht gezogen.

Zusatzstoffe können die Verarbeitbarkeit des Frischbetons ebenfalls beeinflussen. Auch bei der Verwendung höherer Grobkornteile in der Gesteinskörnung können gut verarbeitbare Betone hergestellt werden: Silikastaub trägt dazu bei, die Kohäsion des Frischbetons zu verbessern. Ebenso vermindert er die Entmischungsneigung. [72]

Flugasche beeinflusst die Verarbeitbarkeit und den Wasseranspruch des Frischbetons durch ihr puzzolanisches Reaktionsvermögen und durch ihre Kornform. Bestimmt wird ihr Einfluss auf die Verarbeitbarkeit im Wesentlichen aufgrund ihrer Kornform und des Restkohleanteils. Flugasche dient der Verbesserung des Kornaufbaus im Mehlkornbereich durch ihre Korngröße, -form und -zusammensetzung [9]. Durch einen hohen Anteil der Kornfraktion kleiner als 10 μm kann das Lückenvolumen im Gefüge des Frischbetons im Feinstbereich ausgefüllt werden und das dort sonst vorhandene Wasser verdrängt werden. Dadurch wird der Wasseranspruch gesenkt und die Verarbeitbarkeit verbessert. [72, 85] Im Allgemeinen kann das Zusammenhaltevermögen und die Verarbeitbarkeit des Frischbetons verbessert werden, wenn man den Gehalt an Feinstoffen erhöht. Zu den Feinstoffen im Beton gehören das Mehlkorn (0/0,125 mm) und der Feinstsandanteil 0,125/0,25 mm. [72] Der Feinstoffgehalt darf jedoch nicht zu hoch sein, weil eine Erhöhung des Feinstoffgehaltes in der Regel die Verarbeitbarkeit (ohne eine gesonderte Granulometrieoptimierung im Feinststoffbereich) verschlechtert. Feinanteile können den Verbund zwischen Korn und Bindemittel behindern, wenn sie auf der Oberfläche gröberer Körner anhaften [112]. Wenn es jedoch gelingt die Korngrößenverteilung (siehe Abschnitt 3.2) zu verbessern, verbessert sich auch die Verarbeitbarkeit.

Zusammenfassend kann eine gute Verarbeitbarkeit und ein gutes Zusammenhaltevermögen erzielt werden durch die Anwendung von:

- Fließmittel (FM)- Verbesserung der Verarbeitbarkeit
- Dichtungsmittel (DM) - Hydrophobierung des Kapillarporensystems
- Luftporenbildner (LP) - innere Hydrophobierung, auch Frostschutz und auch bessere Verarbeitbarkeit
- Stabilisierer (ST) - Verringerung der Entmischungsneigung
- Flugasche (FA) - Kugelform begünstigt eine verbesserte Packungsdichte
- Kalksteinmehl - Verbesserung der Korngrößenverteilung im Feinkornbereich

[1] Stand:2010, zu Beginn der Arbeiten

- Silikastaub - schnellere Reaktion als Flugasche (jedoch ist die Verwendung eines Fließmittels unumgänglich aufgrund des hohen Wasseranspruchs [85])

5.3.1.3. Randbedingungen aus Regelwerken

Hinzu kommen die Randbedingungen für die Mörtelrezepturen. Es werden die Expositionsklassen nach DIN 1045-2 [32], wie in Tabelle A.1 im Anhang angegeben, verwendet. Da der Instandsetzungsmörtel denselben Umgebungsbedingungen ausgesetzt ist, wie der instand zu setzende Beton des Betonbauwerkes am Wasser. Es ergeben sich folgende Randbedingungen aus Regelwerken:

- nach DIN 1045-2 [32] minimaler Zementgehalt $V_{Zement,min}$ = 320 kg/m^3
- nach DIN 1045-2 [32] maximaler Mehlkorngehalt $V_{Mehlkorn\leq 125,max}$ = 550 kg/m^3

Bei der Verwendung von Polymeren gilt zusätzlich:

- max. Polymergehalt = 10 % vom Zementgehalt nach RL-SIB [28]

Auch ein Mindestmehlkorngehalt hat für die Anwendung im Rahmen dieser Arbeit mehrere positive Aspekte: Die Verbesserung der Verarbeitbarkeit, das geschlossene Gefüge und die Verminderung des Wasserabsonderns.

5.3.2. Vorgehensweise

Es wurden Vorversuche vorgenommen, indem bestimmte Mörtelrezepturen in ihren Bestandteilen mehrfach variiert wurden. Diese Vorversuche sollten es ermöglichen, mengenmäßig und qualitativ die Einzelkomponenten, die für die möglichen Mörtel verwendet werden sollten, einzuschätzen.

Mit dem Verhältnis 1 : 0,5 : 4 (in Raumteilen) für Zement, Wasser und Gesteinskörnung wurde begonnen. Dies ist ein typisches Verhältnis für einen klassischen Mauermörtel (laut inzwischen zurückgezogener DIN 1053 [34]). Die Verhältnisse Bindemittel, Gesteinskörnung und Wasser wurden variiert und nach dem Anmischen wurden die Mörtel hinsichtlich der Entmischungsneigung unter Wasser und ihrer Erstarrungszeiten untersucht. In den Vorversuchen wurden Erstarrungszeiten zunächst nur subjektiv beurteilt, zum späteren Zeitpunkt und in den Hauptversuchen wurden sie in Anlehnung an DIN 1164 Teil 11 [35] (siehe Versuchsbeschreibung in Abschnitt 4.1.2) ermittelt.

Unter der Berücksichtigung der Anforderungen und Randbedingungen für den Instandsetzungsmörtel nach RL SIB [28] (siehe Abschnitt 2.2.1 für Zementmörtel und siehe Abschnitt 2.2.2 für Kunststoffmodifizierte Mörtel) wurden die Rezepturen konzipiert und iterativ abgeändert. Diesem Mörtelsystem wurden Polymerdispersionen, Luftporenbildner, Chemikalien wie Weinsäure, Natriumgluconat und Citronensäure als Verzögerer und verschiedene Fließmittel zugegeben

wie auch Zusatzstoffe wie Flugasche - in unterschiedlicher Dosierung. Darüber hinaus wurden der Wasserzementwert (w/z-Wert) und das Verhältnis Zement zu Gesteinskörnung variiert.

Die Versuche wurden folgendermaßen systematisch durchgeführt: Variation der Verhältnisse zwischen den einzelnen Bestandteilen, Hinzufügen von Additiven, wie Polymere und verzögernden Wirkstoffen, Hinzufügen von Betonzusatzmitteln und -stoffen.

Die Gesteinskörnung und Zement wurden in ihrem Verhältnis variiert (Zement zu Gesteinskörnung):

- 1 : 4 nach inzwischen zurückgezogener DIN 1053 [34]
- 1:2 und 1:3 nach NÄGELE (1989) [111]
- 1: 1,5 nach experimentellen Versuchen in einer studentischen Arbeit von NGUYEN [116]

Die Gesteinskörnung mit 0/2 mm Sand wurde festgelegt, weil der Mörtel gleichmäßiger und homogener war als mit großen Gesteinskörnungen. Diese Größe der Gesteinskörnung ließ eine gute Verarbeitbarkeit und Formbarkeit sowie ein gutes inneres Zusammenhaltevermögen zu. Die bei der Betonherstellung übliche größere Gesteinskörnung war für den als Reparaturmörtel zu entwickelnden Mörtel nicht notwendig, da nur vergleichsweise kleine Volumen hergestellt und aufgebracht werden sollten. Es wurde die Verwendung von Portlandzement, Aluminatzement und Spritzbetonzement erprobt.

Die Mörtelentwicklung verlief iterativ: Händische Applikation unter Wasser, Prüfung des Verbundes (Haftzugfestigkeitsprüfung), modifizieren der Rezepturen. Die Mörtelentwicklung und –optimierung wurde parallel zur Findung einer Applikationstechnik vorangetrieben. Sie musste der Applikationstechnik angepasst werden. Die Qualität des Verbundes wurde u. a. als Kriterium für die Qualität und Eignung des Mörtels genutzt. Ebenso spielten die Erstarrungszeiten / -verhalten und das Zusammenhaltevermögen eine Rolle. Die Mörtelkompositionen wurden in einem Optimierungszyklus optimiert, verworfen oder weiterverwendet. Alle konzipierten Mörtel wurden auch auf Verhalten unter Wasser beurteilt. Der Zusammenhalt wurde hierbei subjektiv und visuell bewertet.

Im Rahmen der Entwicklung von Applikationstechniken wurden weitere Variationen der Mörtelrezepturen vorgenommen, um die Verarbeitbarkeit den Anforderungen der jeweiligen Applikationsweise anzupassen. Im Anschluss an die Applikationstechnikentwicklung wurde die Auswirkung einer Packungsdichteoptimierung beispielhaft anhand einer Mörtelrezeptur untersucht.

5.3.2.1. Mischungsverhältnis Aluminat- und Portlandzement

Wie in Abschnitt 3.1.9.4 dargelegt, gibt es eine Vielzahl an Veröffentlichungen, laut denen durch die Variation des Mischungsverhältnisses zwischen Aluminat- und Portlandzement unterschiedliche Erstarrungszeiten einstellbar sind.

In Versuchen wurde ein Aluminatzement mit zwei verschiedenen Portlandzementen gemischt, um bestimmte Erstarrungszeiten gezielt zu erreichen. Einer der Portlandzementen galt als sehr gleichförmig und homogen hergestellter Zement. Dieser wurde ausgewählt, weil angenommen wurde, dass dieser besser und reproduzierbarer mit anderen Baustoffen reagiert als ein herkömmlicher Zement.

Als Anhaltspunkt für das zu verwendende Mischungsverhältnis zwischen Aluminatzement und Portlandzement wurden die Angaben in Abbildung 3.4 nach ROBSON [145, 169] verwendet. Die Aluminatzementzugabe zwischen 40 % bis 85 % vom Portlandzementgehalt soll ein Erstarrungszeitbeginn zwischen 0 bis 4 Minuten einstellen. In den Versuchen war es nicht möglich, Erstarrungszeiten von 0 bis 4 Minuten zu erreichen. Vielmehr war der Mörtel zwar länger verarbeitbar, erstarrte aber nicht in einem Zeitfenster von 20 Minuten, danach wurden die Versuche abgebrochen. Auch durch die Verwendung des gleichförmigen Portlandzements und die Variation des Verhältnisses zwischen Portland- und Aluminatzement konnte nicht die gewünschte kurze Erstarrungszeit erzielt werden.

Diese Versuchsreihe zeigte, dass die in den Veröffentlichungen angegebenen Verhältniswerte und zusammengehörigen Erstarrungszeiten nicht reproduzierbar waren. Die unterschiedlichen Ergebnisse aus der Literatur zeigen, dass eine große Abhängigkeit von der Art des Portlandzementes und besonders dem Sulfatträgergehalt und -art besteht. Für das Mischen von Aluminatzement mit Portlandzement sind deutlich ausgedehntere Versuchsreihen notwendig, um kurze Erstarrungszeiten planmäßig über ihr Mischungsverhältnis zu erzielen.

Hier sind sehr wahrscheinlich in Abhängigkeit des jeweiligen Produktes an Aluminatzement und Portlandzement umfangreiche Untersuchungen zu machen, um die in der Literatur dargestellte Abbindezeiten zu erreichen.

Die Anwendung von Aluminatzement im Rahmen dieser Arbeit wurde daher verworfen. Außerdem ist Aluminatzement in Deutschland nicht für tragende Bauteile aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton zugelassen. [72, 112] Hohe Porosität, Risse und Festigkeitsabfall können unter bestimmten Randbedingungen Ursachen für Schadensfälle werden. [126] Weitere Angaben zur sogenannten Konversion siehe in Abschnitt 3.1.2.

5.3.2.2. Mischungen Spritzbetonzement mit verschiedenen verzögernden Mitteln

Für das Erreichen von kurzen Erstarrungszeiten wurden die in Abschnitt 5.3.1 vorgeschlagenen Wege erprobt. Ergebnis dieser Erprobung war, dass die Verwendung eines Spritzbetonzements, dessen Erstarrungszeit mit Verzögerern wie Weinsäure, Natriumgluconat und Citronensäure verzögert wird, für den weiteren Mörtelentwicklungsprozess am sinnvollsten war. In dieser Zusammensetzung war es möglich sehr kurze Erstarrungszeiten von 2 bis 15 Minuten einzustellen.

Wie in Abschnitt 3.1.9.3 aufgeführt, wurden Dosierempfehlungen von REUL [142] als Anhaltspunkt für die Verzögerung des Spritzbetonzementes für beginnende Versuche verwendet:

- Natriumgluconat: 0,055 % bis 0,56 % des Zementgewichts
- Citronensäure: mehr als 0,1 % bis ca. 0,5 % des Zementgewichts
- L(+)-Weinsäure: 0,02 % des Zementgewichts

Die Angabe für die L(+)-Weinsäure war in REUL [142] bezogen auf das Gipsgewicht (ca. 0,02 % bis 0,1 %). Da keine anderen Angaben in der Literatur explizit für L(+)-Weinsäure recherchiert werden konnten, wurde die kleinste Angabe 0,02 % bezogen auf den Zement verwendet (anstatt auf das Gipsgewicht), in der Erwartung, dass diese Angabe zementbezogen bereits eine Verzögerung auslöst. Weitere Dosierungen wurden in Versuchen erprobt.

Im Rahmen dieser Arbeit haben sich folgende Dosierungen für die vorgenannten Abbindeverzögerer ergeben:

- Natriumgluconat: 0,1 bis 0,25 % des Zementgewichts für Erstarrungszeiten von 3,5 bis 17 Minuten
- Citronensäure: 0,02 % bis 0,10 % des Zementgewichts für Erstarrungszeiten von 4 - 15 Minuten
- L(+)-Weinsäure: 0,01 bis 0,03 % des Zementgewichts für Erstarrungszeiten von 4-13 Minuten

Die genannten Bereiche für die Dosierungen und die resultierenden Erstarrungszeiten sind experimentell ermittelt und nicht linear. Die Schwankungen der Randbedingungen wie die Chargen der Baustoffe, die Umgebungstemperatur und ggf. die Einwiegegenauigkeit haben Einfluss auf die Erstarrungszeiten. Für das Erzielen einer genauen Erstarrungszeit musste diese vor jeder Applikation neu getestet werden (siehe Abschnitt 6.3). Anschließend konnte die Dosierung des Verzögerers der für die Applikationstechnik benötigten Erstarrungszeit angepasst werden.

Ergebnis dieser Versuchsreihen war, dass die Verwendung von L(+)-Weinsäure für die weitere Rezepturentwicklung am zielführendsten war. Grund war die deutlich schwierigere Dosierung für Natriumgluconat und Citronensäure, bei beiden Stoffen waren die Erstarrungszeiten unstetig und wechselhaft. Insbesondere bei der Citronensäure war kein proportionales Verhalten zwischen Erstarrungszeiten und Zugabemenge zu erkennen. Dies bestätigten auch weitere Versuche, die im Rahmen einer studentischen Arbeit von SCHIMANSKI [151] durchgeführt wurden.

Bei der Verwendung von Weinsäure zeigten sich zwar die beschriebenen Schwankungen, durch Prüfung und Anpassung der Dosierung unmittelbar vor den Versuchen konnten aber i. d. R. die gewünschten Erstarrungszeiten eingestellt werden.

5.3.2.3. Mischungen mit Zusatzmitteln / Zusatzstoffen

Die im Abschnitt 5.3.1 aufgeführten Zusatzmittel wurden zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit und des Zusammenhaltevermögens des Mörtels in Versuchen erprobt. Resultat dieser Versuche war, dass Fließmittel für die bessere Verarbeitbarkeit und Luftporenbildner aufgrund des Frostschutzes und gleichzeitig für eine gute Verarbeitbarkeit in den weiteren Versuchen verwendet wurden.

Die Wasseraufnahme kann durch Dichtungsmittel stark vermindert werden [72]. Dichtungsmittel enthalten oft Methylcellulose (Stabilisierer) und Wasser reduzierende Zusatzmittel [149] und können den Frischbeton stabilisieren, indem der Frischbeton ein homogenes Gefüge beibehält und sich dadurch nicht entmischt. Stabilisierer bewirken aber ein vorübergehendes Ansteifen des Frischbetons. [72] Die Vorversuche in [116, 117] zeigten, dass ein solches vorübergehendes Ansteifen des Frischmörtels für die Verarbeitbarkeit von Nachteil und für eine anschließende Anwendung unter Wasser nicht gut geeignet ist. Daher wurde die Anwendung von Stabilisierern im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

Es wurde Flugasche als Betonzusatzstoff für die Weiterentwicklung der Rezepturen verwendet. Zum einen als Füllwerkstoff und zum anderen für das Senken des Wasseranspruches und die verbesserte Verarbeitbarkeit (siehe auch Abschnitt 3.1.4). Von Kalksteinmehl und Silikastaub wurde bei den weiteren Versuchen abgesehen, weil diese den Wasseranspruch deutlich erhöhen und andere Rezepturen in der Versuchsreihe mit Zusatzstoffen und Zusatzmitteln sich aufgrund ihrer Erstarrungszeiten, Verarbeitbarkeit und Verhalten unter Wasser (Zusammenhaltevermögen) als vorteilhafter erwiesen hatten.

Im weiteren Verlauf der Rezepturentwicklung wurden Rezepturen mit Fließmittel, Luftporenbildner und Flugasche zu Grunde gelegt. Fließmittel und Luftporenbildner haben die Verarbeitbarkeit deutlich erhöht, ohne den w/z-Wert zu erhöhen. Durch die Zugabe von Flugasche konnten die hohen Mengen an Zement in den ersten erfolgreich unter Wasser aufgebrachten Rezepturen gesenkt werden. Die in Experimenten festgestellten Einflüsse von Fließmittel, Luftporenbildner und Flugasche entsprachen den vorangehend beschriebenen Angaben aus der Literatur (in den Abschnitten 3.1 und 5.3.3.

5.3.2.4. Mischungen mit Polymeren

In Abschnitt 3.1.8 wurde beschrieben, dass Polymerdispersionen im Mörtel u. a. zur Verbesserung im Bereich der Haftung (Adhäsion), der Verarbeitungseigenschaften und des Wasserrückhaltevermögens führen. Es wurden von einem Hersteller drei verschiedene Polymerdispersionen, die in Abschnitt 5.3.3.6 aufgeführt sind, verwendet. Bei diesen Versuchen wurde bei der Zugabe mit Anhaltspunkten, die sich nach NÄGELE (1989) [111] für polymermodifizierte Mörtel ergaben, begonnen:

- Verhältnis Zement / Gesteinskörnung liegt zwischen 1:2 und 1:3
- w/z-Wert liegt zwischen 0,3 und 0,6
- K/Z Wert (Kunststoff / Zement) liegt zwischen 0,05 und 0,2

Laut NÄGELE [111] sind für Mörtel je nach Verwendungszweck Polymergehalte zwischen 1 und 20 % Polymergehalt bezogen auf den Feststoff üblich. Die Empfehlungen von NÄGELE [111] für die Eigenschaften und Leistung von polymermodifizierten Mörteln widersprechen teilweise dem zugelassenen Polymeranteil der RL SIB [28]. Dort sind max. 10 % Polymer vom Zementgehalt erlaubt. [28]

NÄGELE gibt einen Mindestpolymergehalt im Mörtel von 3 bis 5 % bezogen auf die Feststoffe an. Bei einem geringeren Polymergehalt kann keine Filmbildung eintreten und die Mörtel weisen keine dispersionsmodifizierten Baustoffeigenschaften auf. Geringere Zugaben sind jedoch sinnvoll, wenn gezielt lediglich eine Klebewirkung oder plastifizierende Wirkung der Dispersion genutzt werden soll und die mechanischen Eigenschaften der Mörtel konventioneller, hydraulisch gebundener Stoffe angenähert werden sollen. [111]

Nach Versuchen mit den drei Polymerdispersionen wurde schnell klar, dass das ein redispergierbares Dispersionspulver auf Basis von Vinylchlorid, Ethylen und Vinyllaurat mit hydrophobem Charakter für die weiteren Untersuchungen und Mörtelentwicklung am geeignetsten war.

Die Polymerdispersionen auf Basis von Vinylacetat und Ethylen zeigten eine schlechte Verarbeitbarkeit und / oder erstarrten zusammen mit verschiedenen Zementen nicht. Die neutrale Polymerdispersion auf Basis von Vinylacetat und Ethylen zeigte im Gemisch mit dem gleichförmigen Zement eine sehr weiche Konsistenz und war in Vorversuchen keinen Verbund mit dem Untergrund eingegangen (Auftrag händisch unter Wasser). Zusammen mit dem Spritzbetonzement war die Kohäsion schlecht und der Mörtel erstarrte nicht.

Die hydrophobe Polymerdispersion auf Basis von Vinylacetat und Ethylen wiederum zeigte zusammen mit dem gleichförmigen Zement zwar eine gute Verarbeitbarkeit, erstarrte jedoch nicht. Zusammen mit dem Spritzbetonzement war die Verarbeitbarkeit schlecht und der Mörtel erstarrte sehr schnell.

Die Besonderheit durch die Verwendung der Polymerdispersion auf Basis von Vinylchlorid, Ethylen und Vinyllaurat mit hydrophobem Charakter war die sehr gute Verarbeitbarkeit und das gute Verhalten unter Wasser beim Auftrag und letztlich auch die Haftzugfestigkeit des Verbundes (siehe auch Abschnitt 6.1.1).

Die gute Verarbeitbarkeit zeichnete sich durch eine gute Konsistenz und hohe Homogenität aus. Dadurch hatte der Mörtel eine hohe Kohäsion, hat unter Wasser gut zusammengehalten und war gut applizierbar.

5.3.2.5. Erkenntnisse aus den Vorversuchen

Aufgrund der Erkenntnisse der Versuchsreihen wurde die Verwendung der folgenden Stoffe verworfen: Aluminatzement, Dichtungsmittel/Stabilisierer, Polymerdispersionen auf Basis von Vinylacetat und Ethylen. Natriumgluconat und Citronensäure wurden nur eingeschränkt verwendet.

Um kurze Erstarrungszeiten, ein gutes Zusammenhaltevermögen und eine gute Verarbeitbarkeit (auch unter Wasser) zugleich zu erreichen, wurden nach vielen Vorversuchen (siehe Abschnitt 6.1.1.1), auch mit händischer Applikation von Mörtel unter Wasser auf Betonuntergründe, folgende Komponenten verwendet:

- Spritzbetonzement
- Gesteinskörnung
- Flugasche
- Luftporenbildner
- Fließmittel
- redispergierbares Dispersionspulver
- L(+)-Weinsäure

5.3.3. Verwendete Baustoffe

Im Folgenden werden die auf Basis der Vorversuche ausgewählten Baustoffe (siehe vorangehende Aufzählung in Abschnitt 5.3.2.5) mit ihren Spezifikationen und Besonderheiten beschrieben. Die theoretischen Grundlagen und Funktionsweisen der Stoffe sind beschrieben in Abschnitt 3.1.

5.3.3.1. Spritzbetonzement

Der verwendete Spritzbetonzement (R-SE) ist ein Portlandzement CEM I 32,5 R-SE. Dieser besteht aus Portlandzementklinker und Sulfatträger (laut Herstellerangaben). Der Sulfatträger wird als Erstarrungsregler benötigt. Dieser Zement wird i. d. R. für den Einsatz als Spritzbeton verwendet und hat dementsprechend eine sehr kurze Erstarrungszeit. Er enthält entsprechend sehr wenig Sulfatträger. Diese kurze Erstarrungszeit war wesentlicher Grund für die Auswahl im Rahmen dieser Arbeit.

5.3.3.2. Gesteinskörnung

Als Gesteinskörnung wird Sand der Körnung 0/2 mm verwendet. Es wurden Sande zweier Chargen im gesamten Projekt verwendet: 2010 und 2014.

5.3.3.3. Flugasche

Es wurde eine Steinkohleflugasche verwendet. Sie hat zur Zementeinsparung geführt und wurde im Rahmen der Optimierung der Mörtelrezeptur verwendet.

5.3.3.4. Luftporenbildner

Um Frostbeständigkeit zu erzielen kann entweder die Festigkeit erhöht werden oder Luftporenbildner genutzt werden. Im Fall der Instandsetzung kann die Festigkeitserhöhung unpraktisch sein bzgl. großer Unterschiede in den Eigenschaften von Neu- und Altbeton. Daher kann die Nutzung von Luftporenbildner von Vorteil sein, weil sich eine beliebige Festigkeit des Mörtels / Beton einstellen lässt. Dies ist von großem Vorteil für die Instandsetzung unter Wasser.

Es wurde ein Luftporenbildner ausgewählt, der auch unter erschwerten Bedingungen kleinste, gleichmäßig verteilte Luftporen bildet und Ausdehnungsmöglichkeit für gefrierendes Wasser bietet. In Tabelle 5.3 sind die wesentlichen Produktdaten aufgeführt.

Tabelle 5.3.: Produktdaten vom verwendeten Luftporenbildner (Herstellerangaben)

Form & Farbe	rotbraune Flüssigkeit
Wirkstoffbasis	modifiziertes Wurzelharz
pH-Wert	ca. 12,5
Empfohlener Dosierbereich	0,2 - 0,8 % des Zementgewichtes

Im Versuch zeigte die Rezeptur mit Luftporenbildner (Rezeptur D, siehe Abschnitt 5.5) eine gute Verarbeitbarkeit und gutes Zusammenhaltevermögen. Dieser Mörtel wurde durch die Zugabe von Luftporenbildner „geschmeidiger“. Durch eine mögliche Verbesserung der Frostbeständigkeit blieb Rezeptur D in der Auswahl der vorgestellten Rezepturen.

5.3.3.5. Fließmittel

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Fließmittel mit Naphtalinsulfonat als wirksamer Bestandteil verwendet. Vorversuche und Hauptversuche zeigten, dass dieses Fließmittel für die Mörtelrezepturen, die unter Wasser angewendet werden sollen, gute Eigenschaften bzgl. Verarbeitbarkeit und Konsistenz aufweisen. Untersuchungen einer studentischen Arbeit [151] bestätigten, dass im Zusammenhang mit den verwendeten Abbindeverzögerern (siehe Abschnitt 5.3.2.2) und Spritzbetonzement (siehe Abschnitt 5.3.3.1), Fließmittel auf Basis von Naphtalinsulfonat den Polycarboxylaten vorzuziehen sind [151].

Laut Herstellerangaben ist dieses Fließmittel zur Herstellung hochwertiger Betone, Fließbetone und Hochleistungsbetone konzipiert. Besonders gut eignen sich mit diesem Fließmittel hergestellte Betone für schwierig herzustellende Betonbauteile, bei denen eine ausreichende Verdichtung schwer erreichbar ist.

Die erforderliche Mischzeit nach Zugabe des Produktes ist von der eingeführten Mischenergie abhängig. Dabei war zu beachten, dass die Mindestmischzeit von 45-60 Sekunden nicht unterschritten wurde. Die Zugabe erfolgte nach Herstellerangaben gleichzeitig mit dem Wasser. In Tabelle 5.4 sind die wesentlichen Produktdaten aufgeführt.

Tabelle 5.4.: Produktdaten vom verwendeten Fließmittel (Herstellerangaben)

Form & Farbe	flüssig und braun
Wirkstoffbasis	Naphtalinsulfonat
pH-Wert	$8{,}0 \pm 1$
Empfohlener Dosierbereich	0,2 - 3,24 % des Zementgewichtes

Der Einsatz dieses Fließmittels hat die Entmischungsneigung und das Wasserabsondern des Mörtels verringert. Dabei wurden keine zusätzlichen Luftporen in den Mörtel eingeführt und sein Einsatz wirkte nicht verzögernd. Dieses Fließmittel hatte eine hohe verflüssigende Wirkung. Das Fließmittel wurde unter den vorgestellten Rezepturen in Abschnitt 5.5 in Rezeptur W verwendet.

5.3.3.6. Polymerdispersionen

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Polymere als Dispersionspulver eingesetzt. Diese Dispersionspulver basierten auf:

- Vinylchlorid, Ethylen und Vinyllaurat, mit hydrophoben Charakter,
- Vinylacetat und Ethylen, mit einem neutralen Charakter und
- Vinylacetat und Ethylen, mit einem hydrophoben Charakter.

Alle drei redispergierbaren Dispersionspulver besaßen als Schutzkolloid-Emulgatorsystem Polyvinylalkohol. Die Eigenschaften und Besonderheiten dieser Bestandteile werden im folgenden beschrieben.

Vinylacetat und Vinylchlorid gehören zu den häufig verwendeten Monomeren für Misch- und Copolymerisate. Beide Monomere besitzen eine haftungsverbessernde Wirkung. [68]

Vinylacetat-Ethylen-Dispersionen können durch ihren Ethylengehalt die Flexibilität des Films erhöhen und damit auch die Eigenschaft der Adhäsionsfähigkeit erhöhen. Im Wesentlichen, so REUL, verbessert die Copolymerisation mit Ethylen die Erweichungsneigung nach Wasserbelastung. Durch diese innere Weichmachung wird die Versprödungsneigung reduziert (i. Vgl. zu weichmacherhaltigen Polymeren). Vinylacetat-Ethylen-Dispersionen werden für Anstrichsysteme innen und außen eingesetzt. [141]

Ein **Redispersionspulver auf Basis von Vinylacetat-Ethylen** enthält i. d. R. Polyvinylalkohol als Schutzkolloid. Sie sind schnell redispergierbar und besitzen eine Mindestfilmbildetemperatur zwischen 0 und 4° C und eine Glasübergangstemperatur von ca. 13° C. Die Verwendung anderer Schutzkolloide kann die Mindestfilmbildetemperatur und die Flexibilität beeinflussen und die plastifizierende Wirkung in Mörteln erhöhen. [141] In Tabelle 5.5 sind allgemeine Eigenschaften von Vinylacetat-Ethylen aufgeführt.

Tabelle 5.5.: Allgemeine Eigenschaften von Vinylacetat-Ethylen nach [141]

Schutzkolloid	i. d. R. Polyvinylalkohol
Restfeuchte	max. 1 %
Aschegehalt bei 1000° C	zwischen 8 und 14 %
pH-Wert	zwischen 4,5 und 8,0
Mindestfilmbildetemperatur	zwischen 0 und 4° C
Film	zäh und elastisch, geprägt von opakem Aussehen

Redispersionspulver auf Basis von Vinyllaurat-Ethylen-Vinylchlorid werden als Bindemittel für Pulverfarben verwendet, doch vielmehr als Zusatz für Fußbodenausgleichsmassen, Fliesenklebern, Kalkzementputze und für Dichtungsschlämme.

Die Zugabemenge der Dispersionspulver kann in Rezepturen entweder als Zusatzmittel oder als Zusatzstoff (Zugabemenge $\geq$ 10 oder 5 %) gesehen werden. Laut DISTLER [53] spricht man bei Einsatzmengen von Polymerdispersionen über 5 Gew.-% von Betonzusatzstoff und es ist eine allg. bauaufsichtliche Zulassung als organischer Zusatzstoff nach DIN 1045 erforderlich. [30, 53]

Die Mindestfilmbildetemperaturen (MFT) der verwendeten redispergierbaren Dispersionspulver liegen bei 0 ° C (laut Herstellerangaben).

5.3.3.7. Weinsäure

Der Verzögerer L(+)-Weinsäure ist ein farbloser kristalliner Feststoff. Er wird vor der Zugabe zum Mörtel in Wasser gelöst und dann mit dem Anmachwasser zusammen dem Mörtel zugegeben.

5.3.4. Kornform gewählter Stoffe

Die Kornform von Partikeln hat großen Einfluss auf die Verarbeitbarkeit des Frischmörtels und ebenfalls auf die Packungsdichte. Runde Partikel lassen sich besser packen als anguläre Partikel [66]. In diesem Abschnitt werden die Partikel der meist verwendeten Baustoffe beschrieben. Die Gestalt der Körner lässt sich durch die Form, Kugeligkeit und Rundung bestimmen [174].

Nach ZINGG [190] lässt sich die Kornform in Abhängigkeit vom Verhältnis der drei Hauptachsen (a > b > c) beschreiben (siehe Abbildung 5.7) . Entsprechend dem Verhältnis der Achsen kann man die Kornform in vier Klassen einteilen (zitiert in [174]):

- tafelig oder plattig,
- isometrisch (kubisch oder rund),
- flachstengelig und
- stengelig.

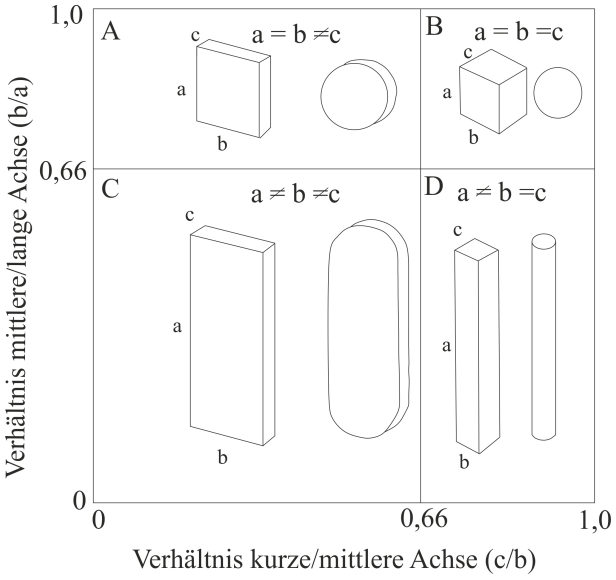


Abbildung 5.7.: Kornform nach ZINGG [190], Abb. nach [174]

In Abbildung 5.8 ist die Darstellung für die verschiedenen Rundungen (*roundness*) und Klassen dargestellt. Dabei wird gezeigt, dass ähnliche Rundungsklassen auch bei unterschiedlicher Kugeligkeit erreicht werden können. Die Kugeligkeit ist ein Maß für die Annäherung des Partikels an eine Kugel. Die obere Zeile in der Abbildung 5.8 steht für eine hohe Kugeligkeit und die

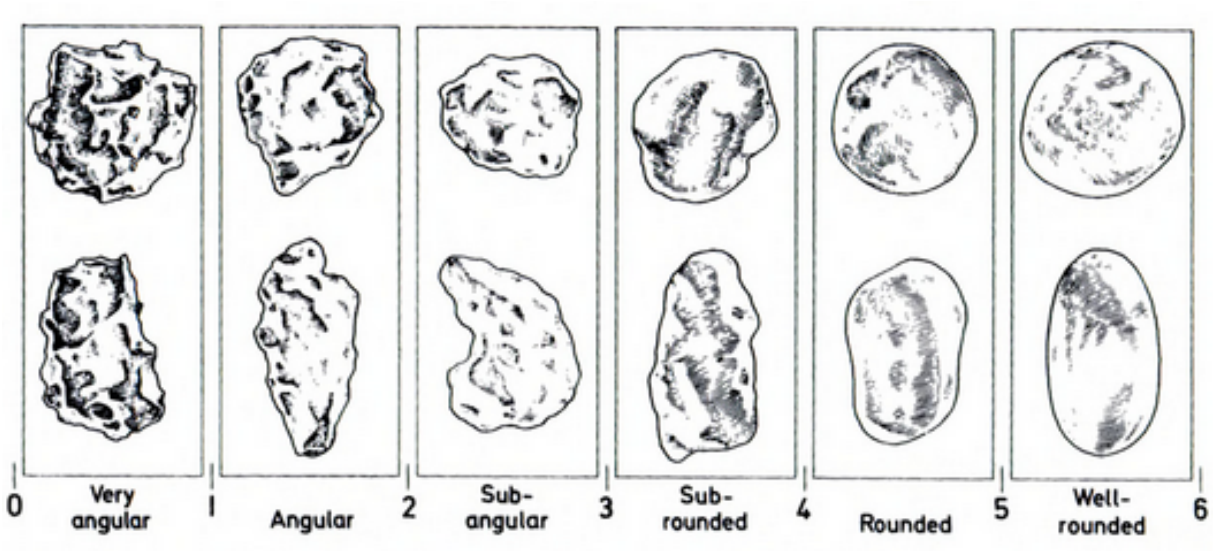


Abbildung 5.8.: Rundungen (*Roundness*) nach POWERS [127] aus [123]

untere Zeile für eine geringe Kugeligkeit (vgl. [174]). In Abbildung 5.8 wird unterschieden in sechs Rundungsklassen - von sehr eckig (*very angular*) bis gut gerundet (*well rounded)*. [174]

Beispielhaft wurden die verwendeten Baustoffe Flugasche, Spritzbetonzement, redispergierbares Dispersionspulver und Sand mikroskopisch betrachtet und ihre Kornform, Kugeligkeit und Rundung beschrieben. In den Tabellen 5.6, 5.7 und 5.8 sind Kornformen nach ZINGG [190] beschrieben und die ermittelten Kugeligkeiten und Rundungen nach POWERS [127] aufgeführt. Die Ergebnisse wurden im Rahmen einer studentischen Arbeit [186] erzeugt. Es wurden stets 50 Körner betrachtet und die %-Angaben sind dementsprechend ihre Anteile an den 50 betrachteten Körnern je Baustoff. Die Verhältnisse zwischen mittlerer und langer Achse (b/a-Verhältnis)

Tabelle 5.6.: Hauptachsenverhältnisse nach ZINGG [190], aus [186]

b/a-Verhältnis	**Spritzbetonzement**	**redispergierbares Dispersionspulver**	**Flugasche**
größer 0,66	72 %	56 %	100 %
kleiner 0,66	28 %	44 %	0 %
Mittelwert	0,75	0,71	1,0

für die Partikel des Spritzbetonzementes lagen zwischen 1,0 und 3,83. Die Partikel des redispergierbares Dispersionspulver wiesen Verhältnisse zwischen mittlerer und langer Achse (b/a-Verhältnis) zwischen 1,0 und 4,19 auf. Die Flugasche hatte Partikel mit einem b/a-Verhältnis von 1,0 (siehe Definition in Abbildung 5.7).

Beim Spritzbetonzement zeigten 52 % der Körner eine hohe Kugeligkeit und 48 % eine geringe Kugeligkeit. 60 % der betrachteten Körner des redispergierbaren Dispersionspulvers wiesen eine geringe Kugeligkeit auf. Die Partikel von Flugasche wiesen alle eine hohe Kugeligkeit auf. Im Sand traten annähernd gleich oft Partikel hoher und geringer Kugeligkeit auf.

Tabelle 5.7.: Einteilung der untersuchten Proben in in den Grad der Kugeligkeit nach POWERS [127], aus [186]

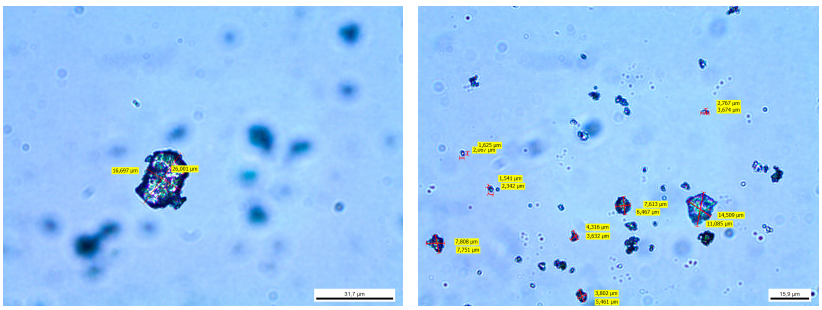
Kugeligkeit	**Spritzbetonzement**	**redispergierbares Dispersionspulver**	**Flugasche**	**Sand**
hohe Kugeligkeit	52 %	40 %	100 %	54 %
geringe Kugeligkeit	48 %	60 %	0 %	46 %

Tabelle 5.8.: Einteilung der untersuchten Proben in Rundungsklassen nach POWERS [127], aus [186]

roundness	**Spritzbetonzement**	**redispergierbares Dispersionspulver**	**Flugasche**	**Sand**
0 (*very angular*)	0 %	0 %	0%	2 %
1 (*angular*)	18 %	32 %	0 %	22 %
2 (*sub angular*)	58 %	42 %	0 %	28 %
3 (*sub rounded*)	18 %	24 %	0 %	30 %
4 (*rounded*)	6 %	2 %	0 %	18 %
5 (*well rounded*)	0 %	0 %	100 %	0 %

Der Spritzbetonzement wies mit 58 % für die Mehrheit der Körner eine Rundungsklasse 2 (*sub angular*) auf. Diese Körner sind eckig mit beginnender Kantenrundung (vgl. [174]). Das redispergierbare Dispersionspulver zeigte mit 42 % einen hohen Anteil an Körnern der Rundungsklasse 2, 32 % der Rundungsklasse 1 (*angular*, eckig) und 24 % angerundete (*sub rounded*) Körner. Die angerundeten Körner gehören zur Rundungsklasse 4. Die Flugasche zeigte zu 100 % gut gerundete Körner, was der Rundungsklasse 5 entspricht. Der Sand zeigte keine Mehrheit für eine Rundungsklasse. Körner der Rundungsklasse 1 bis 4 waren alle vertreten, ein größerer Anteil ensprach der Rundungsklasse 2 (*sub angular*, eckig mit beginnender Kantenrundung) und 3 (*sub rounded*, angerundet).

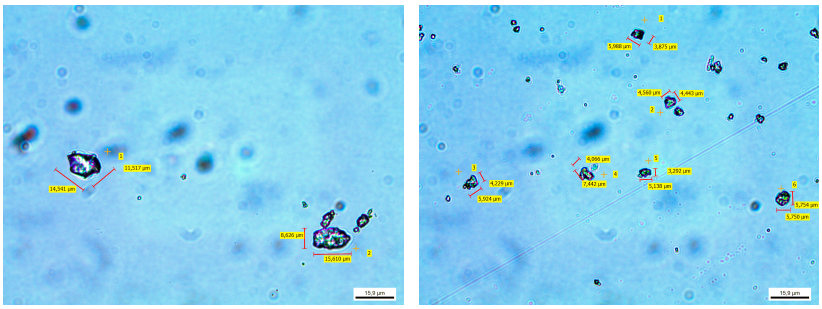
Die nachfolgenden mikroskopischen Aufnahmen wurden mit einem Durchlichtmikroskop aufgenommen. Abbildung 5.9 zeigt beispielhaft Größen der Partikel des Spritzbetonzementes. Es wurden Längen von 0,85 μm bis 19,38 μm und Breiten von 0,79 μm bis 13,71 μm gemessen. Das Partikel des Polymers hatten Längen von 1,23 μm bis 35,64 μm und Breiten von 1,23 bis



(a) (b)

Abbildung 5.9.: Kornform und Korngröße des Spritzbetonzementes aus [186]

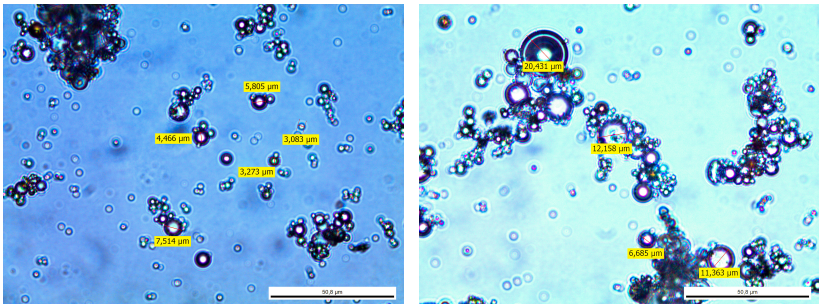
12,27 μm (siehe Abbildung 5.10). Die Flugaschepartikel waren rund und hatten Durchmes-



(a) (b)

Abbildung 5.10.: Kornform und Korngröße des redispergierbaren Dispersionspulvers aus [186]

ser von 1,47 μm bis 38,08 μm. In Abbildung 5.11 sind beispielhaft einige Abmessungen der Flugasche-Partikel dargestellt.



(a) (b)

Abbildung 5.11.: Kornform und Korngröße der Flugasche aus [186]

5.3.5. Korngrößenverteilung gewählter Stoffe

Die Korngrößenverteilungen wurden mittels lasergranulometrischer Untersuchung ermittelt. Es wurde ein Masterziser 3000 der Fa. Malvern eingesetzt. Im Rahmen einer studentischen Arbeit [186] wurden viele Messreihen durchgeführt und eine Vorgehensweise erarbeitet zur Vermeidung von fehlerbehafteten Messungen und fehlerbehaftete Durchführungsmethoden. Diese Vorgehensweise wurde ebenfalls bei den Messungen, die im Folgenden dargestellt werden, angewendet. In Tabelle 5.9 sind die Korngrößenverteilungen der verwendeten Stoffe dargestellt. Die vollständigen Messwerte aus den lasergranulometrischen Untersuchungen befinden sich im

Tabelle 5.9.: Werte aus lasergranulometrischen Untersuchungen von [153]

Durchmesser [mm]	0,00001	0,00005	0,0001	0,0005	0,001	0,01	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4
Sand	0	0	0	0	0	0	0	0,267	2,050	19,283	54,119	83,610	99,817	100
Zement	0	0	0	0,08	2,165	47,996	79,785	100	100	100	100	100	100	100
Polymer	0	0	0	0,48	1,582	6,584	8,614	17,630	46,041	83,305	98,039	100	100	100
Flugasche	0	0	0	0	4,047	40,400	56,616	82,865	95,57	100	100	100	100	100

Anhang B.1.2. Die Messwerte aus Tabelle 5.9 bildeten die Grundlage für die mathematische Packungsdichteoptimierung in Abschnitt 5.4.1.

Von Sand wurden die Siebanalysen verwendet.

In den Abbildungen 5.12 und 5.13 sind die Sieblinien der verwendeten Sande zweier Chargen dargestellt.

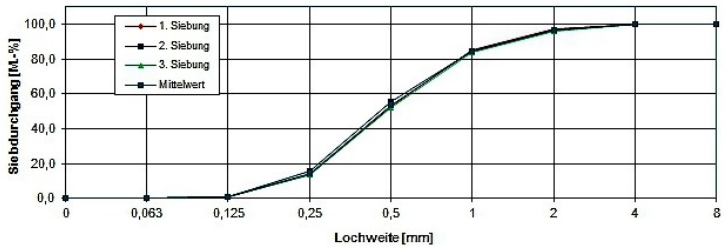


Abbildung 5.12.: Sieblinie Sand 2010 Quelle: TUHH B-3, M. Petersen

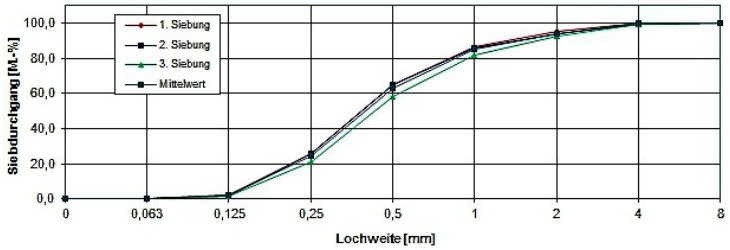


Abbildung 5.13.: Sieblinie Sand 2014 Quelle: TUHH B-3, U. Nowottnik

Im Rahmen der Entwicklung der Applikationstechnik wurde der Sand aus Gründen des Qualitätsmanagements (siehe Abschnitt 6.3) auf 2 mm abgesiebt, siehe Abbildung 5.14.

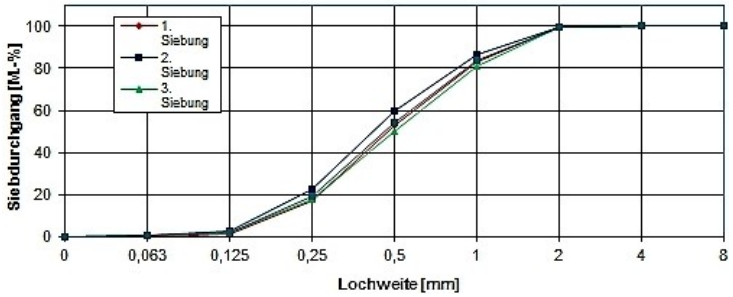


Abbildung 5.14.: Sieblinie Sand 2014 auf 2 mm abgesiebt Quelle: TUHH B-3, U. Nowottnik

5.4. Packungsdichteoptimierung

Zur Optimierung der verwendeten Mörtel wurden die Ansätze aus Abschnitt 3.2.4 verwendet. Dabei wurden die lasergranulometrischen Untersuchungen (Messwerte aus [153]) als Grundlage für die Korngrößenverteilung der einzelnen Komponenten und die Sieblinien des Sandes aus

Abschnitt 5.3.5 verwendet. Da die Messwerte der Korngrößen bei den Sandsieblinien auf die Korngrößen (in mm) 0 - 0,063 - 0,125 - 0,25 - 0,5 - 1 - 2 - 4 - 8 beschränkt waren, wurden die folgenden Korngrößen (in mm) als Grundlage für die Packungsdichteoptimierung verwendet: 0 - 0,00001 - 0,00005 - 0,0001 - 0,0005 - 0,001 - 0,01 - 0,063 - 0,125 - 0,25 - 0,5 - 1 - 2 - 4.

Diese wurden aus den lasergranulometrischen Untersuchungen ausgelesen (Messdaten, siehe Tabelle 5.9). Es wurden kumulative Messwerte verwendet. Dies entspricht bei einer Siebung den Siebdurchgängen für die jeweilige Siebweite. Der Messwert für einen Durchmesser d_i drückt folglich den Anteil der Partikel aus, die $\leq d_i$ sind. Für die Sande wurden ihre Sieblinien verwendet.

5.4.1. Theoretische Optimierung mit Matlab

Wie in Abschnitt 3.2.5 beschrieben, wird Gleichung 3.8 für die theoretische Optimierung verwendet:

$$P_t(d_i) = \left(\frac{d_i^q - d_{min}^q}{d_{max}^q - d_{min}^q} \right) \forall d_i \in [d_{min}, d_{max}] \tag{3.8}$$

$P_t(d_i)$	Optimierte Packungsdichte
d_i	Korngröße (*particle size*)
d_{min}	minimale Korngröße (*smallest particle size*)
d_{max}	maximale Korngröße (*largest particle size*)
q	Verteilungsmodul (*distribution modulus*)

Der minimale Durchmesser d_{min} und maximale Durchmesser d_{max} können aus lasergranulometrischen Untersuchungen für die Stoffmischungen entnommen werden. Aufgrund der Literaturrecherche im Abschnitt 3.2.4.3 wurde für die theoretische Optimierung für den Exponenten q ein Bereich zwischen 0,28 und 0,37 festgelegt.

In Abschnitt 3.2.5 wurde das zu optimierende Problem erläutert und durch Gleichung 3.7 definiert:

$$RSS := \Sigma_{i=1}^{n} e_i^2 = \Sigma_{i=1}^{n} \left[P_m(d_i) - P_t(d_i) \right]^2 \rightarrow min! \forall d \in [d_{min}, d_{max}] \tag{3.7}$$

e_i	Residuum (Abweichung)
d_i	Korngröße (*particle size*)
$P_m(d_i)$	Ist-Verteilung über Korngrößen d_i
$P_t(d_i)$	Theoretische optimale Verteilung über Korngrößen d_i, Zielfunktion
n	Anzahl der Korngrößen-Messwerte d_i

Der Abstand zwischen der Ist-Verteilung über die Korngrößen d_i ($P_m(d_i)$) und der theoretischen optimalen Verteilung (Zielfunktion) über die Korngrößen d_i ($P_t(d_i)$) wird minimiert. Über diesen Weg werden die volumetrischen Anteile der Feststoffe k am Gesamtgemisch ($a_{vol,k}$) mit

der kleinsten Abweichung (Residuum) mit Hilfe der Optimierung ermittelt. Dies wird auch als Fehlerquadratminimierung bezeichnet.

Als Randbedingungen für die Optimierung wurden Bedingungen für polymermodifizierte Mörtel mit berücksichtigt. Grund dafür waren die Erfahrungen aus positiven Vorversuchen (vgl. im Anhang Abschnitt D) mit polymermodifizierten Instandsetzungsmörteln. Die Randbedingungen für eine Mörtel-/Betonrezeptur aus Abschnitt 5.3.1.3 wurden für die Optimierung angewendet. Es wurde unterschieden zwischen Grenzwerten aus der Betontechnologie für die Optimierung in Form von Ober- und Untergrenzen für den Zement-, Polymer- und Flugaschegehalt (*lower boundaries (lb)* und *upper boundaries* (ub)) und Randbedingungen, die für die Plausibilität einer Betonrezeptur notwendig sind. Der Polymer- und Flugaschegehalt sind abhängig von den durch die Optimierung berechneten Zementgehalten. Grenzwerte für die zu optimierenden Bestandteile sind:

1. Der minimale Zementgehalt $V_{Zement,min}$ beträgt 320 kg/m^3 nach DIN 1045-2 [32].

2. Der Polymergehalt ist auf maximal 10 % bezogen auf das Zementgewicht begrenzt nach RL-SIB [28].

3. Der Flugaschegehalt ist auf maximal 33 % bezogen auf das Zementgewicht begrenzt nach DIN EN 206-1 [51].

Die Plausibilitätsrandbedingungen sind:

1. $V_{agg,k} \geq 0$; Der volumetrische Anteil $a_{vol,k}$ eines jeden Feststoffes kann nicht negativ werden.

2. $\Sigma\, a_{vol,k} = 1$; Die Summe der volumetrischen Anteile aller Feststoffe muss 100 % ergeben.

5.4.1.1. Herleitung der mathematisch ausgedrückten Randbedingungen

Für das Aufstellen der Randbedingungen für die Optimierung ist aufgrund unterschiedlicher Vorgaben und unterschiedlicher Rohdichten der Ausgangsstoffe eine Umrechnung notwendig. In Tabelle 5.10 sind die verwendeten Rohdichten der Feststoffe aufgelistet.

Tabelle 5.10.: Rohdichten der Feststoffe

Feststoff	$[g/cm^3]$	$[kg/m^3]$
$\rho_{agg,Gesteinsk.}$	2,65	2650
$\rho_{agg,Zement}$	3,1	3100
$\rho_{agg,Zusatzstoff,Flugasche}$	2,36	2360
$\rho_{agg,Zusatzstoff,Polymer}$	1,07	1070
$\rho_{agg,Zusatzmittel,Fließmittel}$	1,20	1200
ρ_{Wasser}	1	1000

Die vorher genannten Obergrenzen für den Polymeranteil und den Flugascheanteil lassen sich wie folgt in Abhängigkeit des Zementvolumens ausdrücken:

$$V_{Polymer} \leq \beta_3 \cdot V_{Zement} \tag{5.1}$$

$$V_{Zusatzstoff} \leq \beta_5 \cdot V_{Zement} \tag{5.2}$$

$V_{Polymer}$	Volumen des Polymergehaltes [m^3]
$V_{Zusatzstoff}$	Volumen des Zusatzstoffes [m^3]
V_{Zement}	Volumen des Zementgehaltes [m^3]
β_3	Ausdruck der maximalen Zugabe des Polymers als Volumenanteil
β_5	Ausdruck der maximalen Zugabe des Zusatzstoffes als Volumenanteil

Die vorgenannten betontechnologischen Vorgaben beziehen sich jedoch auf die Masse und sie sind daher von Massen- in Volumenanteil umzurechnen. Diese Umrechnung geschieht für β_3 und β_5 über die Gleichungen 5.3 und 5.4:

$$\beta_3 = \alpha_3 \cdot \frac{\rho_{Zement}}{\rho_{Polymer}} \tag{5.3}$$

$$\beta_5 = \alpha_5 \cdot \frac{\rho_{Zement}}{\rho_{Zusatzstoff}} \tag{5.4}$$

α_3	Dosierung des Polymers als Massenanteil
α_5	Dosierung des Zusatzstoffes als Massenanteil
β_3	Ausdruck der maximalen Zugabe des Polymers als Volumenanteil
β_5	Ausdruck der maximalen Zugabe des Zusatzstoffes als Volumentanteil
ρ_{Zement}	Rohdichte des Zementes [kg/m^3]
$\rho_{Polymer}$	Rohdichte des Polymers [kg/m^3]
$\rho_{Zusatzstoff}$	Rohdichte des Betonzusatzstoffes [kg/m^3]

Die Packungsdichteoptimierung umfasst nur die Feststoffe, in diesem Fall Sand, Zement, Polymer und Flugasche. Die Bestandteile Wasser, Luft und Zusatzmittel werden nicht in die Optimierung einbezogen, weil sich die zugrunde liegende Theorie der Packungsdichteoptimierung auf Kornhaufwerke bezieht. Um die Untergrenze des volumetrischen Zementanteils $a_{vol,Zement}$ aus dem Mindestzementgehalt, der in kg/m^3 angegeben und auf das Gesamtvolumen des Betons bezogen ist, berechnen zu können, müssen jedoch auch die nicht optimierten Bestandteile betrachtet werden. Für den Luftporengehalt wird ein Anteil des Gesamtvolumens angenommen. Das Volumen des Wasseranteils ist aus dem w/z-Wert zu berechnen. Die Menge des Zusatzmittels wird als Anteil der Masse des Zementvolumens vorgegeben. Daraus ergeben sich folgende Gleichungen:

$$V_{Luft} = \alpha_1 \cdot V_{Gesamt} \tag{5.5}$$

$$V_{Wasser} = \beta_2 \cdot V_{Zement} \tag{5.6}$$

$$V_{Zusatzmittel} = \beta_1 \cdot V_{Zement} \tag{5.7}$$

V_{Luft}	Luftvolumen [m^3]
α_1	Luftporen als Volumenanteil
V_{Gesamt}	Gesamtvolumen [m^3]
V_{Wasser}	Wasservolumen [m^3]
β_2	Ausdruck der Wasserzugabe als Volumenanteil
V_{Zement}	Volumen des Zementgehaltes [m^3]
$V_{Zusatzmittel}$	Volumen des Zusatzstoffes [m^3]
β_1	Ausdruck der Dosierung des Zusatzmittels als Volumenanteil

Für Gleichungen 5.6 und 5.7 sind folgende Umrechnungen notwendig, um die Anteile volumetrisch auszudrücken:

$$\beta_2 = \frac{\rho_{Zement}}{\rho_{Wasser}} \cdot \text{w/z-Wert} \tag{5.8}$$

$$\beta_1 = \alpha_2 \cdot \frac{\rho_{Zement}}{\rho_{Zusatzmittel}} \tag{5.9}$$

β_2	Ausdruck der Wasserzugabe als Volumenanteil
ρ_{Zement}	Rohdichte des Zementes [kg/m^3]
ρ_{Wasser}	Rohdichte des Wassers [kg/m^3]
w/z-Wert	Wasser/Bindemittel-Gehalt
β_1	Ausdruck der Dosierung des Zusatzmittels als Volumenanteil
α_2	Dosierung des Zusatzmittels als Massenanteil

Die Gleichung 5.7 und zugehöriges β_1 aus Gleichung 5.9 können auch analog für weitere Zusatzmittel aufgestellt werden, falls mehr als ein Zusatzmittel verwendet wird.

Die Untergrenze für den Zementanteil führt zu folgenden Gleichungen, wobei Gleichung 5.11 berücksichtigt, dass für die Optimierung die Grenzwerte volumenbezogen anzugeben sind:

$$V_{Zement} \geq \beta_4 \cdot V_{Gesamt} \tag{5.10}$$

$$\beta_4 = \frac{\alpha_4}{\rho_{Zement}} \tag{5.11}$$

α_4	Vorgabe für Mindestzementgehalt [kg/m^3]; hier = 320 kg/m^3
V_{Wasser}	Wasservolumen [m^3]
V_{Gesamt}	Gesamtvolumen [m^3]
V_{Zement}	Volumen des Zementgehaltes [m^3]
β_4	Vorgabe als Volumenanteil für Mindestzementgehalt (bezogen auf V_{Gesamt})

Der Mindestzementgehalt bezieht sich auf das Gesamtgewicht bzw. das Gesamtvolumen (β_4). Für die Optimierung ist aber eine Untergrenze bezogen auf das Volumen aller Feststoffe ($V_{Feststoffe}$) notwendig. Darum bedarf es weiterer Umrechnungen.

Das Volumen der in der Optimierung berücksichtigten Feststoffe Zement, Sand, Polymerdispersionspulver und Flugasche wird zusammengefasst als $V_{Feststoffe}$. Da $a_{vol,Zement}$ der prozentuale Anteil des Zementvolumens am Gesamtvolumen der zu optimierenden Bestandteile ist, lässt sich folgende Gleichung formulieren:

$$V_{Feststoffe} = \frac{1}{a_{vol,Zement}} \cdot V_{Zement} \tag{5.12}$$

Die Gleichung 3.11:

$$V_{Gesamt} = V_{Feststoffe} + V_{Zusatzmittel} + V_{Wasser} + V_{Luft} = 1\text{m}^3 \tag{3.11}$$

lässt sich dann mit den Termen 5.7, 5.6, 5.5 und 5.12 alternativ darstellen zu:

$$V_{Gesamt} = \frac{1}{a_{vol,Zement}} \cdot V_{Zement} + \beta_1 \cdot V_{Zement} + \beta_2 \cdot V_{Zement} + \alpha_1 \cdot V_{Gesamt} = 1\text{m}^3 \tag{5.13}$$

Durch Einsetzen von Gleichung 5.13 in Ungleichung 5.10 und durch Umformungen lässt sich die Bedingung für den Mindestzementgehalt wie folgt ausdrücken:

$$a_{vol,Zement} \geq \frac{1}{\frac{(1-\alpha_1)}{\beta_4} - \beta_1 - \beta_2} \tag{5.14}$$

- α_1 Luftporen in [Vol%]
- β_1 Ausdruck der Dosierung des Zusatzmittels in [Vol%]
- β_2 Ausdruck der Wasserzugabe in [Vol%]
- β_4 Vorgabe in [Vol%] für Mindestzementgehalt (bezogen auf V_{Gesamt})

Über die Gleichung 5.14 wird der Mindestzementgehalt berücksichtigt. Damit sich Beton gut verarbeiten lässt, ein geschlossenes Gefüge erreicht und kein Wasser absondert, ist eine ausreichende Menge an Mehlkorn erforderlich. Ein zu hoher Mehlkorngehalt hat einen erhöhten Wasseranspruch zur Folge. Dadurch können die Eigenschaften Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel und Frost-Tausalz-Einwirkung, Widerstand gegen chemischen Angriff oder mechanischen Verschleiß verschlechtert werden. [173] Der maximale Mehlkorngehalt $V_{Mehlkorn,max}$ beträgt 550 kg/m^3 nach DIN 1045-2 [32]. Im wesentlichen handelt es sich hierbei um Zement und Zusatzstoffe. Weil die lasergranulometrischen Messungen aller Stoffe vorliegen, wird hier als Mehlkorn der Feststoffanteil aller Komponenten mit einem Durchmesser $\leq$ 0,125 mm betrachtet (vgl. auch [12]. Da der Mehlkorngehalt aufgrund von betontechnologischen Aspekten

beschränkt ist, ist diese Überprüfung erforderlich. Diese Überprüfung findet außerhalb der Optimierung in Matlab statt, da die mit dem Optimierungsalgorithmus errechneten Volumenanteile $a_{vol,k}$ als Eingangswerte der Berechnung des Mehlkorngehalts vorliegen müssen.

$$\begin{aligned} M_{Mehlkorn} = a_{vol,Gesteinsk.} \cdot V_{agg,Gesteinsk.(d=0{,}125mm)} \cdot \rho_{agg,Gesteinsk.} \\ + a_{vol,Zement} \cdot V_{agg,Zement} \cdot \rho_{agg,Zement} \\ + a_{vol,Zusatzstoff} \cdot V_{agg,Zusatzstoff(d=0{,}125mm)} \cdot \rho_{agg,Zusatzstoff} \\ + a_{vol,Polymer} \cdot V_{agg,Polymer(d=0{,}125mm)} \cdot \rho_{agg,Polymer} \end{aligned} \tag{5.15}$$

$M_{Mehlkorn,max}$	Maximaler Mehlkorngehalt [kg/m^3]	
$a_{vol,Gesteinsk.}$	Volumetrischer Anteil der Gesteinskörnung	
$V_{agg,Gesteinsk.(d_i=0{,}125mm)}$	Messwert der Gesteinskörnung für die Korngröße d = 0,125 mm	[Vol%]
$a_{vol,Zement}$	Volumetrischer Anteil des Zementes	
$V_{agg,Zement(d_i=0{,}125mm)}$	Messwert von Zement für die Korngröße d = 0,125 mm	[Vol%]
$a_{vol,Zusatzstoff}$	Volumetrischer Anteil des Zusatzstoffes	
$V_{agg,Zusatzstoff(d_i=0{,}125mm)}$	Messwert des Zusatzstoffes für die Korngröße d = 0,125 mm	[Vol%]
$a_{vol,Polymer}$	Volumetrischer Anteil des Polymers	
$V_{agg,Polymer(d=0{,}125mm)}$	Messwert des Polymers für die Korngröße d = 0,125 mm	[Vol%]
$\rho_{agg,Gesteinsk.}$	Rohdichte der Gesteinskörnung	[kg/m^3]
$\rho_{agg,Zement}$	Rohdichte des Zementes	[kg/m^3]
$\rho_{agg,Zusatzstoff}$	Rohdichte des Zusatzstoffes	[kg/m^3]
$\rho_{agg,Polymer}$	Rohdichte des hinzugefügten Polymers	[kg/m^3]

5.4.1.2. Ergebnisse der theoretischen Optimierung

Für die Optimierung mit Matlab wurden nur die Feststoffe betrachtet. Es wurde die Matlab-Funktion *fmincon* (*Find minimum of constrained nonlinear multivariable function*) verwendet. *Fmincon* ist ein Algorithmus, der das Minimum einer ihm übergebenen Funktion sucht. Die zu minimierende Funktion ist in diesem Fall Gleichung 3.7. Sie beschreibt den Abstand zwischen der Ist-Verteilung des Feststoffgemisches und der optimalen Funk und Dinger-Verteilung. Die zu variierende Variable, anhand derer das Minimum der Funktion gesucht wird, ist hier ein Vektor a_{vol}, dessen Einträge $a_{vol,k}$ die Anteile der zu optimierenden Bestandteile am Volumen $V_{Feststoffe}$ darstellen. Ausgehend von einem Startwert $a_{vol,0}$ wird der Vektor a_{vol} iterativ in kleiner werdenden Schritten variiert, bis keine Abnahme der zu minimierenden Funktion mehr festzustellen ist.

Der Optimierungsalgorithmus verwendet ein Innere-Punkte-Verfahren. Bei diesem Verfahren wird zur Lösung des Optimierungsproblems eine Sequenz von ähnlichen Problemen, bei denen

die Randbedingungen direkt mit einbezogen werden, gelöst. Die Randbedingungen werden berücksichtigt durch gewichtete Logarithmen, die von der Ursprungsfunktion abgezogen werden. Diese ähnlichen Probleme sind einfacher zu lösen, da sie keine Ungleichungen als Randbedingung mehr enthalten. [99]

Es können zur Einschränkung der zulässigen Lösungen Ober- und Untergrenzen *lower boundaries* (lb) und *upper boundaries* (ub) für die Einträge von a_{vol} vorgegeben werden. Dies wird für die Randbedingung nach Gleichung 5.14 verwendet. Außerdem können als Randbedingungen Gleichungen und Ungleichungen der Form $A_{eq} \cdot a_{vol} = b_{eq}$ sowie $A \cdot a_{vol} \leq b$ vorgegeben werden, die a_{vol} erfüllen müssen. Die Randbedingung 5.13 wird in Form einer solchen Gleichung formuliert. Die Randbedingungen 5.1 und 5.2 werden wiederum in Form einer gemeinsamen Ungleichung der beschriebenen Form formuliert. Da A eine Matrix sowie a_{vol} und b Vektoren sind, können beide Randbedingungen in einer Ungleichung ausgedrückt werden. Diese beiden Randbedingungen können nicht als einfache Obergrenzen ub beschrieben werden, da sie von dem zweiten Eintrag des Vektors a_{vol} abhängen, der den Zementanteil ($a_{vol,Zement}$) darstellt. Im Anhang B.2 ist der Matlab-Code aufgeführt. Die Berechnungen werden beispielhaft mit folgenden Parametern vorgestellt. Für die Korngrößenverteilung im folgenden Beispiel wurden die Werte aus Tabelle 5.9 verwendet. Die Faktoren α_i wurden vom Verfasser im Rahmen von betontechnologischen Regeln und empfohlene Dosierungen nach Herstellerangaben festgelegt (siehe Tabelle 5.11). Es wurde für die Optimierung und der darauffolgenden Stoffraumberechnung ein

Tabelle 5.11.: Festgelegte Faktoren α_i der Dosierung der Feststoffe und Zusatzmittel für die Optimierung und verwendeter w/z-Wert

Parameter		
Luftporengehalt	α_1	0,0150
Zusatzmittel, z. B. Fließmittel	α_2	0,0240
Polymer	α_3	0,0250
Mindestzementgehalt [kg/m^3]	α_4	320,0000
Zusatzstoff Flugasche	α_5	0,3300
w/z-Wert		0,40

w/z-Wert von 0,4 zugrunde gelegt. Dies hat mehrere Gründe:

- Ein w/z-Wert $\leq$ 0,4 ist zwar nicht vollständig hydratisiert und es verbleiben unhydratisierte Kerne, jedoch ist dies nicht schädlich. Eine Absenkung des w/z-Wertes führt zu einem dichteren, festeren und dauerhaften Zementstein. Die Zementkörner liegen dichter beieinander, da weniger Wasser zwischen den Zementkörnern ist.

- Ab einem w/z-Wert von 0,5 bildet sich ein zusammenhängendes Porensystem, was nicht gewünscht ist, da die Durchlässigkeit des Zementsteins und des Betons und daher auch die Dauerhaftigkeit negativ beeinflusst wird.

- Die mit Matlab optimierten Rezepturen sollen mit dem POM Stempel (POM ST) unter Wasser testweise auf senkrechte Flächen aufgebracht werden. In Versuchen variierten die w/z-Werte dieser Applikationstechnik zwischen 0,3 und 0,4.

Diese Faktoren α_i wurden mit Hilfe der vorangegangenen Gleichungen umgerechnet in β_i (siehe Tabelle 5.12).

Tabelle 5.12.: Berechnete Faktoren β_i für die Verwendung in der Optimierung

Parameter	Gleichung Nr.		
Dosierung ZM	5.9	β_1	0,0620
Wasserzugabe	5.8	β_2	1,24
Dosierung Polymer	5.3	β_3	0,0724
Mindestzementgehalt (bezogen auf V_{Gesamt})	5.11	β_4	0,1032
Dosierung Zusatzstoff Flugasche	5.4	β_5	0,4335

Für die Optimierungsberechnung wurden für die Startwerte folgende Werte angenommen:
Sand 57 Vol%
Zement 30 Vol%
Polymer 3 Vol%
Flugasche 10 Vol%

Ein wirksamer Grenzwert wird nur für den Zementanteil als *lower boundary* festgelegt. Der Mindestzementgehalt $a_{vol,Zement,min}$ lässt sich über die Gleichung 5.14 ermitteln. Die Bedingung für den Mindestzementgehalt und hiermit auch die untere Grenze für den Zementgehalt ist $a_{vol,Zement,min}$ mit 11,95 % (Annahme: w/z-Wert 0,4, Luftporengehalt 1,5 %; weitere Faktoren siehe Tabelle 5.11. Diese *lower* und *upper boundaries* (Tabelle 5.13) mussten nicht weiter

Tabelle 5.13.: Grenzwerte, sog. *lower* und *upper boundaries*, für die Verwendung in der Optimierung

	lb *lower boundary*	ub *upper boundary*
Sand	0	100 %
Zement	11,95 %	100 %
Polymer	0	100 %
Flugasche	0	100 %

angepasst werden, weil die Optimierungsberechnung gezeigt hatte, dass auch ohne Einschränkung des zulässigen Bereiches weitere Grenzwerte gar nicht berührt wurden.

Versuche einer studentischen Arbeit [8] zeigten bei theoretischer Optimierung (Excel-Makro) nach Gleichung 3.6 von FUNK und DINGER, dass die Verwendung des Wertes von 0,28 für den

Exponenten q die höchste Packungsdichte und den geringsten Wasseranspruch aufweist. Mit Hilfe von PUNTKE-Versuchen wurde die Optimierung verfeinert. Das Ergebnis war, dass für eine optimierte Rezeptur mit dem Exponenten q =0,28 ein geringer Wasseranspruch gefunden wurde. Der Mehlkorngehalt wurde dabei eingehalten. Für den Exponenten q = 0,37 war Ergebnis der Untersuchungen, dass keine höheren Packungsdichten als für q = 0,28 sowie keine gute Konsistenz erreicht wurde und sich zudem auch der Mehlkorngehalt als zu hoch erwies. [8]

Es wurde daher mit einem Verteilungsmodul q von 0,28 und 0,37 gerechnet (siehe auch Abschnitt 3.2.4.3) und die beste Annäherung an die Gleichung 3.6 von FUNK und DINGER gesucht:

$$\Theta_{FD}(d) = \left(\frac{d^q - d_{min}^q}{d_{max}^q - d_{min}^q} \right) \forall d \in [d_{min}, d_{max}] \tag{3.6}$$

$\Theta_{FD}(d)$	Funk-Dinger Verteilung der Korngrößen
d	Korngröße (*particle size*)
d_{min}	minimale Korngröße (*smallest particle size*)
d_{max}	maximale Korngröße (*largest particle size*)
q	Verteilungsmodul (*distribution modulus*)

Als Ergebnis mit q von 0,28 wurde das Diagramm in Abbildung 5.15 ausgegeben. Das Ergebnis aus dem Diagramm in Abbildung 5.15 bedeutet, dass folgende Volumina bzw. Mengen für die Optimierung ausgegeben wurden: Der volumetrische Anteil $a_{vol,k}$ des Feststoffes k am Gesamt-

Tabelle 5.14.: Ergebnisse für q = 0,28

	$a_{vol,k}$ (aus Matlab)	[kg/m^3] (Umrechnung)
Sand	0,7661	1507,779
Zement	0,2303	530,186
Polymer	$4{,}04 \cdot 10^{-6}$	0,003
Flugasche	$3{,}56 \cdot 10^{-3}$	6,232

gemisch (Ergebnis der Optimierungsrechnung), kann folgendermaßen in einen Massenanteil umgerechnet werden:

$$a_{mas,k} = \frac{\rho_{agg,k} \cdot a_{vol,k}}{\sum_{k=1}^{m} a_{vol,k} \cdot \rho_{agg,k}} \tag{5.16}$$

$a_{vol,k}$	Anteil des Feststoffes k am Gesamtgemisch
$a_{mas,k}$	Anteil des Feststoffes k am Gesamtgemisch in
$\rho_{agg,k}$	Rohdichte des Feststoffes k

Betrachtet man allein das Kriterium der Packungsdichte, so würde das Polymer kaum zugegeben werden. Der Flugaschegehalt ist sehr gering. Der Mehlkorngehalt übersteigt hier jedoch

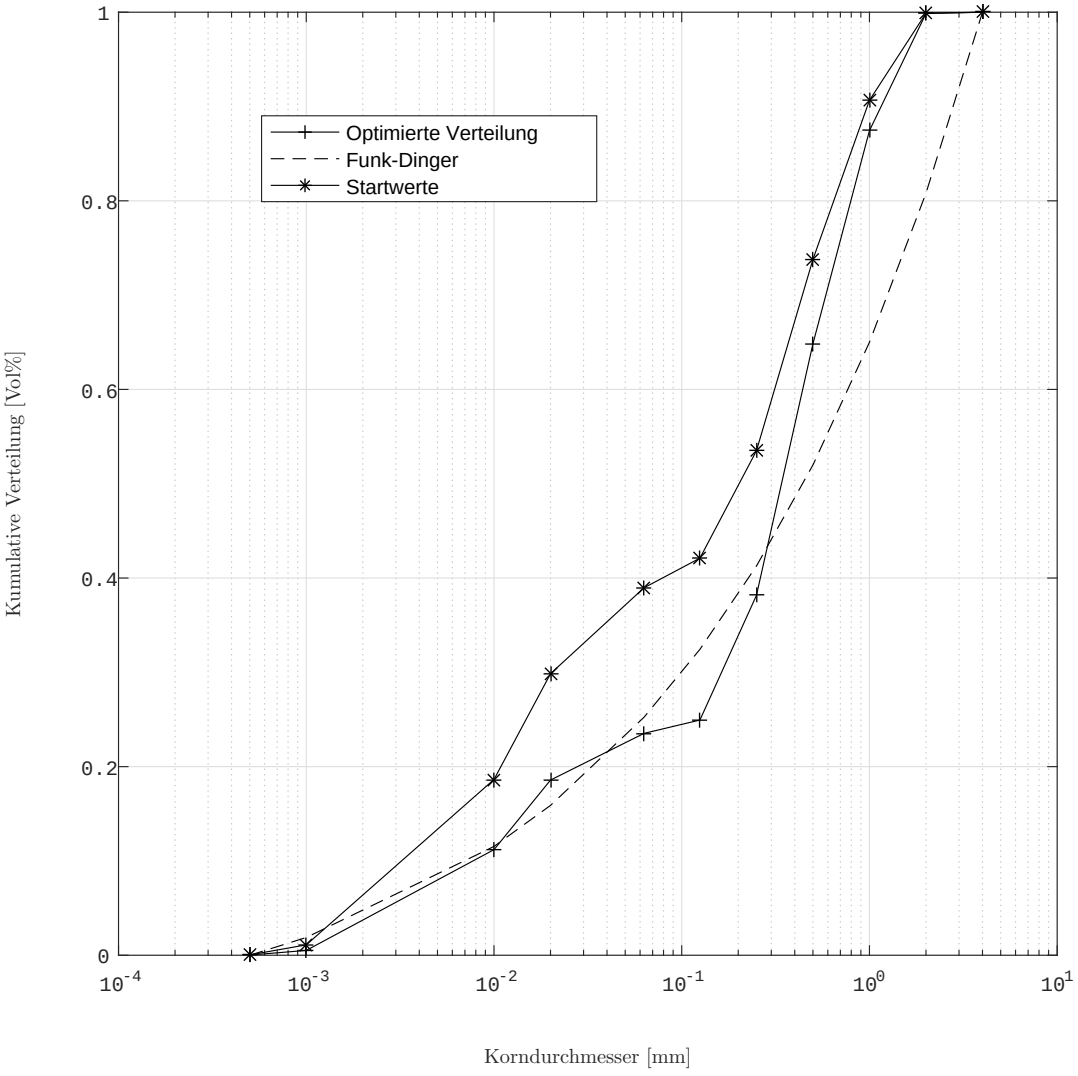


Abbildung 5.15.: Verteilung mit Verteilungsmodul q = 0,28

den max. Mehlkorngehalt von 550 kg/m^3. Er beträgt hier 567,051 kg/m^3. Da die Korngrößenverteilungen von Zement, Flugasche und Polymer bekannt sind, wurde der Mehlkorngehalt über alle Feststoffe mit den Korngrößen $\leq$ 0,125 mm aufsummiert.

Die Summe aller Fehlerquadrate (als Maß für die Abweichung zwischen der optimierten Verteilung und der FUNK und DINGER Verteilung) beträgt für dieses Beispiel (q = 0,28; w/z-Wert = 0,40;) 0,111. Als Ergebnis mit einem Verteilungsmodul q von 0,37 wurde das Diagramm in Abbildung 5.16 ausgegeben.

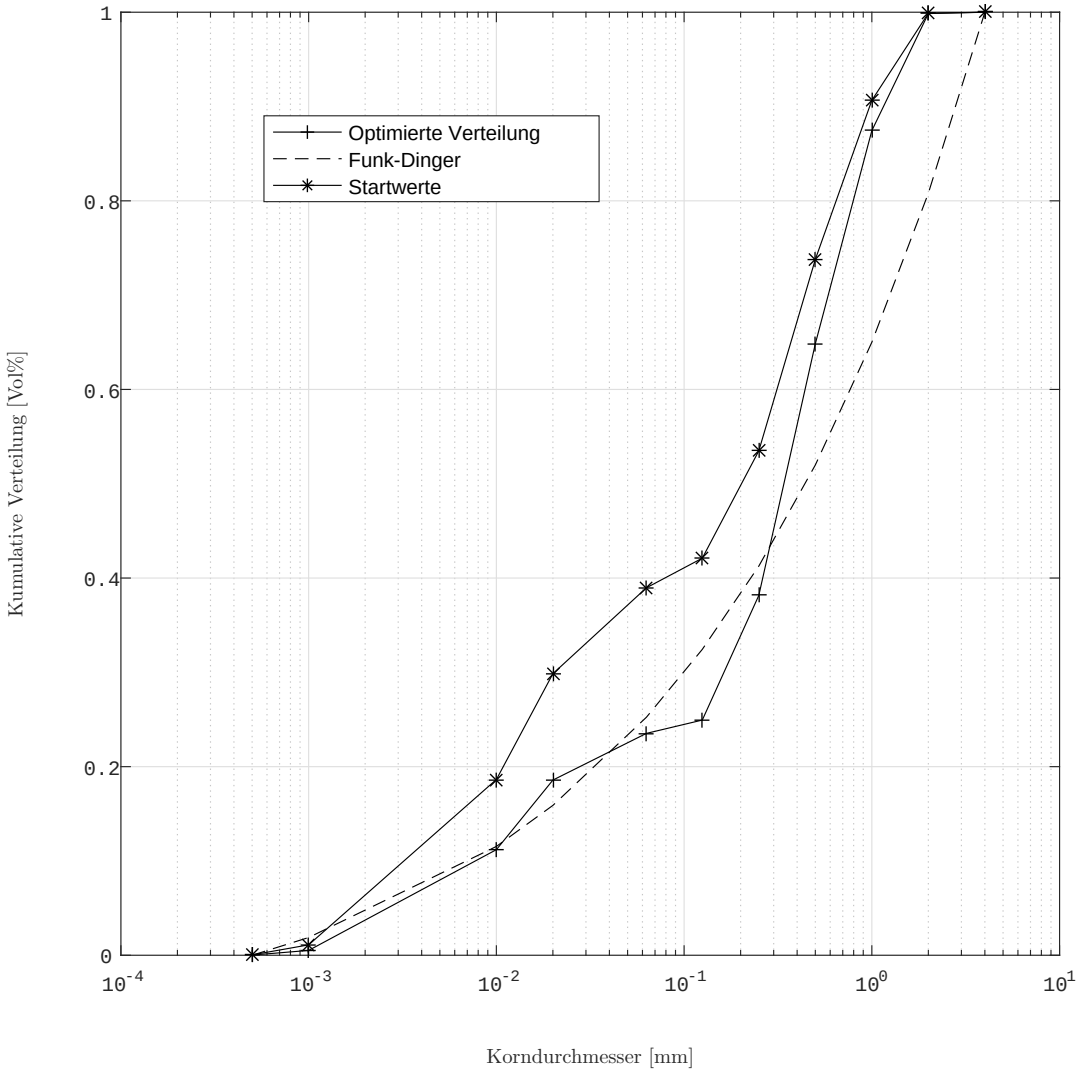


Abbildung 5.16.: Verteilung mit Verteilungsmodul q = 0,37

Für das Verteilungsmodul q = 0,37 wurden folgende Volumina bzw. Mengen für die Optimierung berechnet: Auch hier wurde der volumetrische Anteil über die Gleichung 5.16 in M% umgerechnet. Der Polymer- und Flugaschegehalt ist kaum mehr vorhanden. Der Mehlkorngehalt von 412,735 kg/m^3 ist im Rahmen und unterschreitet den max. Mehlkorngehalt. Die Summe aller Fehlerquadrate beträgt für dieses Beispiel (q = 0,37; w/z-Wert = 0,40;) 0,1675.

Tabelle 5.15.: Ergebnisse für q = 0,37

	$a_{vol,k}$ (aus Matlab)	[kg/m^3] (Umrechnung)
Sand	0,8493	1809,865
Zement	0,1507	375,624
Polymer	$6{,}15 \cdot 10^{-7}$	0,001
Flugasche	$5{,}19 \cdot 10^{-6}$	0,011

Die Matlab Funktion fmincon findet lokale Minima. Zur Überprüfung wurden die Startwerte variiert, um sicherzustellen, dass das lokale Minimum auch ein globales Minimum des zu optimierenden Problems (Gleichung 3.7) ist.

Die Startwerte wurden variiert zu:

1. Sand 20 Vol%
   Zement 60 Vol%
   Polymer 10 Vol%
   Flugasche 10 Vol%

2. Sand 40 Vol%
   Zement 40 Vol%
   Polymer 10 Vol%
   Flugasche 10 Vol%

Es kamen dieselben Ergebnisse, wie in Tabelle 5.15 für q = 0,37 und 5.14 für q = 0,28 aufgeführt, heraus. Daher ist aller Wahrscheinlichkeit nach das lokale Minimum auch das globale Minimum der Optimierungsfunktion (Gleichung 3.7).

Für das Gemisch der Feststoffe gemäß den Startwerten liegt die Korngrößenverteilung für alle Größen oberhalb der Optimalverteilung. Das bedeutet, dass mehr feine Partikel im Stoffgemisch enthalten sind als für die optimale Packungsdichte zulässig. Um die Packungsdichte zu erhöhen ist folglich eine Reduzierung der feinen Partikelanteile notwendig. Die Abbildung 5.17 zeigt, dass die Bestandteile Zement, Polymer und Flugasche nur aus feinen Partikeln bestehen. Sand ist der einzige Feststoff mit Anteilen größerer Korngrößen bis 4 mm.

Eine Annäherung an die Optimalverteilung ist also nur möglich durch eine deutliche Reduzierung der Anteile von Zement, Polymer und Flugasche. Dies spiegelt sich im Ergebnis der rechnerischen Optimierung wieder. Das Ergebnis der Optimierung ist ein besonders hoher Sandanteil, Polymer und Flugasche sind dagegen nur in minimaler Menge enthalten. Auch der Zementanteil ist sehr niedrig. Damit wird zwar die Packungsdichte gegenüber der Ausgangsrezeptur deutlich erhöht, das Ergebnis führt aber zu keinem gut verarbeitbaren Mörtel. Ein Erhöhen

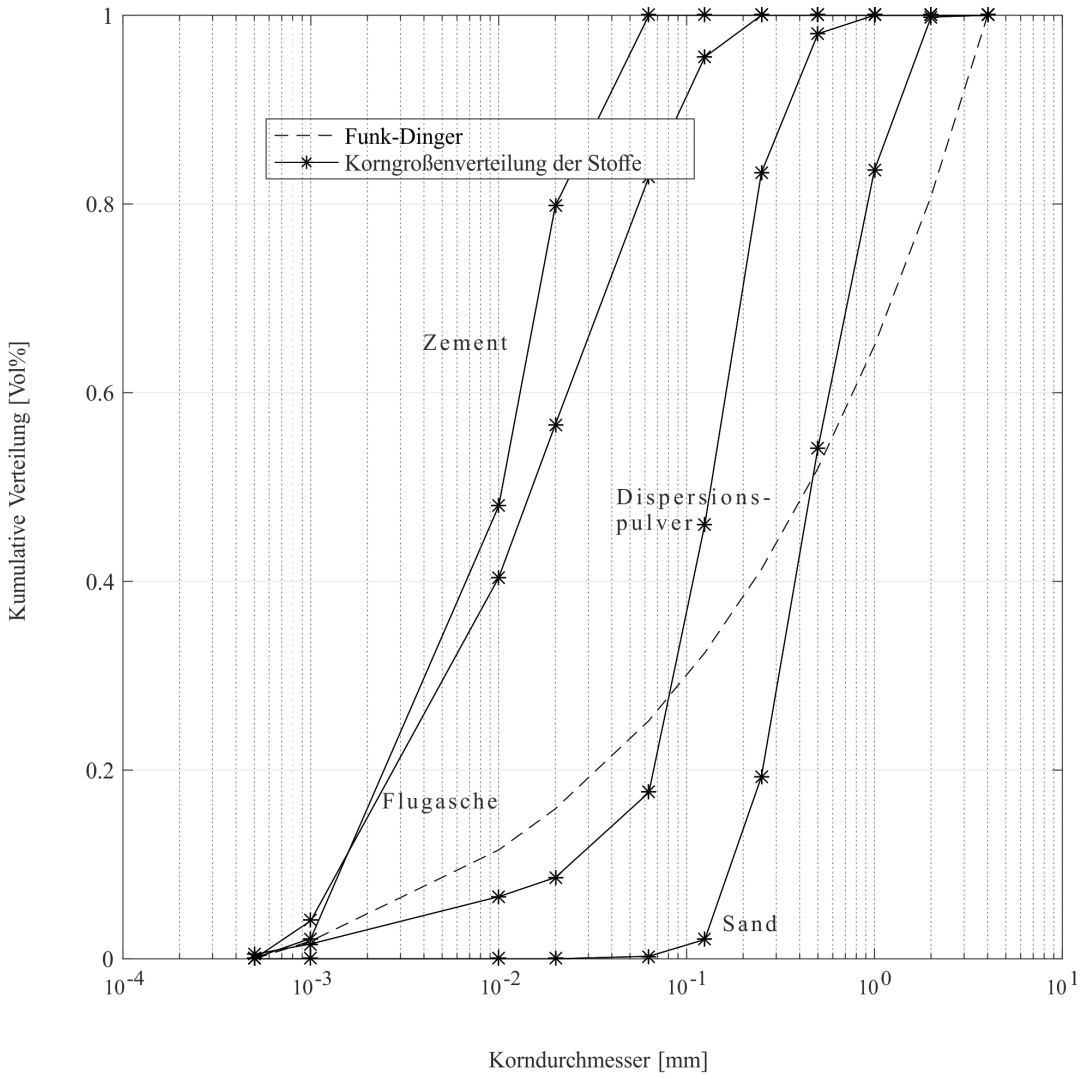


Abbildung 5.17.: Korngrößenverteilung der Stoffe und die Funk-Dinger Verteilung bei q = 0,28

der Untergrenzen für den Zement-, Flugasche- oder Polymeranteil würde wiederum zu einer Entfernung von der Optimalverteilung und damit einer geringeren Packungsdichte führen, was dem Ziel der rechnerischen Optimierung zuwider liefe. Ein möglicher Ansatz für dieses Problem könnte sein, nur grobkörnigere Gesteinskörnung zu verwenden, also Sand mit wenig oder keinem feinkörnigen Anteil. Für die anderen Feststoffe stehen keine Varianten mit gröberer Kornverteilung zur Verfügung. Ein Ausblick für eine bessere und zielführendere Herangehensweise für die Entwicklung geeigneter Mörtel wird in Abschnitt 5.4.3 vorgestellt.

Mit den vorangegangenen Ergebnissen aus der rechnerischen Optimierung wurde im nächsten Schritt die experimentelle Optimierung nach PUNTKE begonnen, siehe folgenden Abschnitt 5.4.2.

Durch die theoretische Packungsdichteoptimierung nach FUNK und DINGER konnte ein Bereich bestimmt werden, mit welcher Mischung der Feststoffe eine höchste Packungsdichte erreicht werden kann. Mit diesem Mischungsverhältnis kann durch die sog. PUNTKE-Versuche die Form der Körner und ihr Einfluss auf die Packungsdichte mit berücksichtigt werden. Die praktischen PUNTKE-Versuche gelten als einfacher und effektiver [156] als die Herangehensweise der mathematischen Optimierungsberechnung.

5.4.2. Experimentelle Optimierung

Die experimentelle Optimierung der Packungsdichte bzw. die Bestimmung des Wasseranspruchs wird nach PUNTKE durchgeführt. Details zur Versuchsdurchführung siehe in [29, 131]. Zur Auswertung und der Ermittlung des Wasseranspruchs ist es erforderlich, dass die Dichten der im Gemisch enthaltenen Stoffe (siehe Tabelle 5.10) bekannt sind [29]. Der Wasseranspruch W_P nach PUNTKE für die Rezepturen aus der Packungsdichteoptimierung (Abschnitt 5.4.1.2) ergibt sich nach Gleichung 3.4 (siehe Seite 39).

Mit den Ergebnissen aus Tabellen 5.14 und 5.15 wurden PUNTKE-Versuche durchgeführt. Die Rezepturen wurden so umgerechnet, dass für die PUNTKE-Versuche Rezepturen verwendet wurden, die in Summe Feststoffe von 100 g ausmachten. Versuche zeigten, dass die Rezeptur aus Tabelle 5.14 mit Verteilungsmodul q = 0,28 mit 17,7 % den geringsten Wasseranspruch ergab.

5.4.3. Erkenntnisse aus der Optimierung

Die Rezeptur in Tabelle 5.14, die sich durch reine Betrachtung der Packungsdichte ergeben hat, zeigte in Versuchen, dass der Zementanteil und Flugascheanteil zu gering war und die Abwesenheit von Feinanteilen und Polymer für die Konsistenz nachteilig war. Trotz der mathematisch höchsten Packungsdichte fehlen die Komponenten, die für eine gute Verarbeitbarkeit und gute Haftung notwendig sind.

Vorversuche (Ergebnisse in Anhang Abschnitt D) mit Mörteln, die hohe Zement- und Polymergehalte aufwiesen und erfolgreich einen Verbund zwischen Mörtel und Beton eingegangen waren, zeigten, dass der besondere Fall der Anwendung unter Wasser mit schnellen Erstarrungszeiten, deutlich höhere Zementgehalte erfordert. Mörtel ohne Polymerzusätze gingen einen Verbund unter Wasser ein, jedoch war die Verarbeitbarkeit nicht für die Erprobung der verschiedenen Applikationstechniken (siehe Abschnitt 5.6) geeignet.

Um diese Optimierung sinnvoller einzusetzen und zusammen mit der Weiterentwicklung der Applikationstechnik zu einer erfolgreichen Methode der Instandsetzung unter Wasser ohne Einschalen des Bauwerkes beizutragen, kann folgendermaßen vorgegangen werden:

1. Für Sand (verschiedene Sande) und Zement wird eine mathematische Optimierung verwendet, um ihre Anteile für eine optimale Packungsdichte zu berechnen.

2. Mit Hilfe von PUNTKE-Versuchen wird der Wasseranspruch in der Nähe der durch mathematische Optimierung gefundenen Rezepturen bestimmt und optimiert.

3. Durch praktische Versuche wird der Polymer- und Flugaschegehalt für eine bessere Verarbeitbarkeit bestimmt (Anwendungsbereich unter Wasser).

4. Auch der Zementgehalt sollte für die Anwendung angepasst werden. Für eine Anwendung unter Wasser sollte der Mindestzementgehalt höher liegen als 320 kg/m^3.

Der erhöhte Mindestzementgehalt sollte bei der Optimierung bereits berücksichtigt werden. Zementgehalte von ≥ 550 kg/m^3 haben sich bewährt und liegen deutlich unter den sehr hohen Zementgehalten der Anfangsrezepturen, die eine Machbarkeit für die Anwendung unter Wasser ohne Einschalen des Bauwerks bestätigten. Auch die Verwendung verschiedener Sande (gröberes Korn) um eine optimale Packungsdichte zu erreichen, könnte vorteilhaft sein, z. B. durch die Anpassung der Sieblinien im Bereich der Korngrößen zwischen 0,5 und 2 mm. Die Kornklassen des Sandes können in 0,063 / 0,125 - 0,125 / 0,25 - 0,25 / 0,5 - 0,5 / 1 und 1 / 2 aufgeteilt werden und durch Verwendung der entsprechenden Menge jeder Kornklasse kann die ideale Korngrößenverteilung angestrebt werden. In einer studentischen Arbeit [153] konnte dadurch der Wasseranspruch gesenkt werden und die Packungsdichte des Mörtels erhöht werden. Dies haben PUNTKE-Versuche bestätigt.

Nach der rechnerischen und nachgestellten praktischen Optimierung der Packungsdichte ist es unabdingbar, die Komponenten, die für eine gute Verarbeitbarkeit und gute Haftung für die Unterwasseranwendung sorgen, wie z. B. Flugasche und Polymer, zu ergänzen.

Die Ergebnisse aus theoretischer Optimierung mit Hilfe von Matlab zeigten, dass das Ergebnis sensibel auf die Eingangsdaten reagiert. Wenige % Unterschied im Vorhandensein des Größtkorn 2 bzw. 4 mm (vgl. Tabelle 5.9) zeigten deutliche Unterschiede in der Idealkorngrößenverteilung der verwendeten Ausgangsstoffe.

5.5. Mörtelrezepturen

In diesem Abschnitt werden Rezepturen vorgestellt, die im Rahmen dieser Arbeit am häufigsten verwendet wurden und sowohl als Frischmörtel- als auch Festmörtel gute Eigenschaften aufwiesen. Dazu zählen auch die Verbundeigenschaften zwischen Mörtel und Beton, deren wichtigstes Kriterium die Haftzugfestigkeit ist. (siehe Abschnitt 6.1.1).

Mit den Rezepturen B, H, T, W (siehe Tabelle 5.16) wurden vor Beginn der Applikationstechnikentwicklung Rezepturen gefunden, die einen guten Verbund mit dem Betonuntergrund (siehe Abschnitt 6.1.1.1), aufgetragen unter Wasser, eingingen. Die Rezepturen B, H, T, W wurden experimentell ermittelt und unter Wasser aufgebracht. Die Rezepturen M und D wurden aus den Rezepturen B, H, T, W weiterentwickelt. Die Rezepturen B, H, T, W wurden während der Rezepturentwicklung in Reihen unter Wasser appliziert, um die Reproduzierbarkeit von hohen Haftzugfestigkeiten zwischen Mörtel und Beton zu prüfen. Diesen Reihenuntersuchungen gingen zahlreiche andere Rezepturen voran, die nach dem im Abschnitt 5.3.2 beschriebenen Schema erstellt und untersucht wurden.

Tabelle 5.16.: Überblick verschiedener verwendeten Rezepturen

Rezeptur	Bestandteile	Eigenschaften
B	Spritzbetonzement, Sand, Weinsäure	
H	Spritzbetonzement, Sand, Polymer, Weinsäure	gut knetbar, Stempeln / Andrücken
T	Spritzbetonzement, Sand, Citronensäure	
W	Spritzbetonzement, Sand, Fließmittel, Weinsäure	
M	Spritzbetonzement, Sand, Polymer, Weinsäure	eher steife Konsistenz, Stempeln / Andrücken
D	Spritzbetonzement, Sand, mit/ohne Polymer, Luftporenbildner, Weinsäure	weiche Konsistenz, Applikation mit Applikationsplatte
E	Spritzbetonzement, Sand, Polymer, Luftporenbildner, Weinsäure	weiche Konsistenz, Applikation mit Applikationsplatte
Op	Spritzbetonzement, Sand, Polymer, Flugasche, Weinsäure	Feststoffe optimiert (via Matlab)

Durch theoretische und experimentelle Packungsdichteoptimierung (vgl. Abschnitte 5.4.1 und 5.4.2) wurden weitere Rezepturen konzipiert und untersucht. Bestandteile der optimierten Rezepturen waren diejenigen, die positive Ergebnisse aus den vorangegangenen Versuchen mit Rezepturen H, W, M und D erzielten: Sie waren unter Wasser applizierbar und erreichten einen guten Verbund. In Tabelle 5.21 ist übersichtlich dargestellt, welche Rezepturen für welche Applikationstechnikentwicklung angewendet wurde. Durch theoretische und experimentelle Packungsdichte-Optimierung entstand die Rezeptur Op (siehe in Tabelle 5.16).

In Tabelle 5.17 sind die Bestandteile der vorgenannten Rezepturen mit ihren Massen in kg pro m^3 aufgelistet.

Tabelle 5.17.: Rezepturen für Mörtel auf einen m^3 umgerechnet

Rezeptur [kg/m^3]	B	H	T	W	M	D	E	Op1	Op2
Sand	1082,43	1060,07	1044,16	986,13	825,78	835,76	860,12	1433,40	1515,87
Zement	865,94	848,05	835,33	788,91	550,52	557,17	573,48	453,19	479,27
Wasser	277,10	254,42	284,01	315,56	275,26	304,59	304,18	226,00	191,91
Flugasche					275,26	278,59	286,64	82,80	87,57
Polymer		12,72			41,2	(41,79)	14,48	9,39	9,93
Fließmittel				18,93				10,86	
Citronensäure			0,84						
Weinsäure	0,17	0,17		0,08	0,18	0,19	0,02	0,1	0,14
LP Mittel						1,11	1,18		
K/Z Verhältnis		0,015			0,075	0,075	0,025	0,0002	0,021
W/Z-Wert	0,32	0,30	0,34	0,40	0,50	0,55	0,53	0,50	0,40

Jede dieser Rezepturen hat spezifische Vor- und Nachteile, Besonderheiten und Grenzen hinsichtlich der Anwendung unter Wasser. Diese werden im Folgenden erläutert.

Rezepturen B und H: Ihre Frischmörteleigenschafen waren sich sehr ähnlich. Die Bestandteile der Rezepturen unterschieden sich im Wesentlichen durch das Vorhandensein eines Polymerdispersionspulvers. Rezeptur H war durch den Einsatz eines hydrophoben Polymerdispersionspulver besser verarbeitbar als die Rezeptur B. Auch der Zusammenhalt des Mörtels der Rezeptur H war unter Wasser besser.

Rezeptur T: Diese Rezeptur ließ sich gut kneten und formen. Die Frischmörteleigenschaften unterlagen deutlichen Schwankungen.

Rezeptur M: Diese Rezeptur wurde im Rahmen einer studentischen Arbeit [186] optimiert hinsichtlich einer geringeren Zementmenge und durch Ergänzen von Flugasche im Hinblick auf eine bessere Packungsdichte des Mörtels. Ausgangspunkt war die Rezeptur H, weil diese bereits vielversprechende Ergebnisse bzgl. einer dauerhaften Anwendung unter Wasser zeigte. Sie erreichte nach Auftrag unter Wasser eine hohe Haftzugfestigkeit. Die Verarbeitbarkeit dieses Mörtel war noch besser als die der Rezeptur H. Grund dafür war der sehr hohe Anteil an redispergierbaren Dispersionspulver mit 7,5 % bezogen auf das Zementgewicht (siehe in Tabelle 5.17). Mit dieser Menge an Polymer wird die auf max. 10 % zementgewichtbezogene Beschränkung durch die Instandsetzungsrichtlinie RL-SIB [28] noch eingehalten, sie liegt jedoch über den Empfehlungen des Herstellers des redispergierbaren Dispersionspulvers. Diese Rezeptur zeigte im weiteren Verlauf der Versuche insbesondere bei der Entwicklung der Applikationstechnik sehr hohe Haftzugfestigkeiten. Darauf wird in Abschnitt 6.1.1 weiter eingegangen.

Rezepturen W, D und E: Diese Rezepturen wurden so konzipiert, dass sie mit einer Applikationsplatte, wie in Abschnitt 5.6.4 beschrieben, unter Wasser aufgebracht werden konnten.

Hierzu war es erforderlich, dass der Mörtel fließfähig ist, zumindest für den Zeitraum zwischen Anmischen und Zuführen des Mörtels in die Applikationsplatte. Rezeptur W erreicht seine Fließfähigkeit durch die Verwendung eines Fließmittels und die Rezepturen D und E durch die Verwendung eines Luftporenbildners, der hier im Hinblick auf einen möglichen Vorteil bzgl. einer Frostschutzwirkung im wassernahen Bereich verwendet wurde. Die Rezeptur D wurde mit 7,4 % zementgewichtbezogen an redispergierbaren Dispersionspulver und ohne redispergierbaren Dispersionspulver erprobt. Rezeptur E wurde zum Vergleich mit max. 2,5 % zementgewichtbezogen an Polymerzugabe erprobt, was der Dosierungsempfehlung des Herstellers des redispergierbaren Dispersionspulvers entspricht.

Rezeptur Op1 und Op2: Diese Rezepturen wurde mittels Packungsdichteoptimierung wie in Abschnitt 5.4 beschrieben, konzipiert. Die Rezeptur Op1 stammte aus der studentischen Arbeit [153] unter Anwendung eines Excel-Makros aus [8] mit einem Verteilungsmodul q = 0,37 für die FUNK und DINGER Verteilung. Die Rezeptur Op2 stammte aus den Matlab-Berechnungen im Rahmen dieser vorliegenden Arbeit (siehe Abschnitt 5.4.1.2) mit einem Verteilungsmodul von 0,28. In Abschnitt 5.4.3 wurden bereits Nachteile dieser Vorgehensweise beschrieben und mögliche Schritte, die zur Verbesserung der Packungsdichte und der Anwendbarkeit unter Wasser führen, vorgeschlagen.

Die Rezepturen B, H, T und W besitzen hohe Zementgehalte. Sie wurden experimentell entwickelt und erreichten hohe Haftzugfestigkeiten, wie in Abschnitt 6.1.1.1 beschrieben. Begleitend mit der Erprobung von Applikationstechniken wurden diese Rezepturen weiterentwickelt. Im Zuge dessen konnte der Zementgehalt gesenkt werden.

Rezeptur H besitzt eine steife Konsistenz. Sie wurde für weitere Applikationstechniken aufgrund der hohen Anzahl von Versuchen, die hohe Verbundfestigkeiten zwischen Mörtel und Beton (siehe D.1) erreichten, weiter verwendet. Um flexibel auf die Ergebnisse bei der Applikationstechnikentwicklung reagieren zu können, wurde eine weitere Rezeptur mit weicher Konsistenz für den weiteren Prozess ausgewählt - Rezeptur W. Rezepturen M, D und E beruhten auf Verbesserungsmaßnahmen der Rezepturen H und W im Rahmen der Applikationstechnikentwicklung (siehe Abschnitt 5.6).

Rezeptur B wurde aufgrund ihrer schlechteren Verarbeitbarkeit im Vergleich zur Rezeptur H bei den nachfolgenden Untersuchungen zur Entwicklung einer Applikationstechnik nicht weiter verfolgt. Ebenso wurde Rezeptur T bei weiteren Versuchen nicht verwendet, weil die Frischmörteleigenschaften deutlichen Schwankungen unterlag. Die Erstarrungszeiten, die Konsistenz und das Ausbreitmaß variierten sehr. Es wurde vermutet, dass sich die kristallin vorliegende Citronensäure unterschiedlich gut im Anmachwasser auflöste und daher zu diesen unterschiedlichen Frischmörteleigenschaften führte.

5.5.1. Ausbreitmaß und Konsistenz

Das Ausbreitmaß wurde nach DIN EN 1015-3 [38] ermittelt. Aus Tabelle 5.18 kann das Ausbreitmaß im Mittel und die zugehörige Konsistenz entnommen werden für die vorgenannten Rezepturen.

Tabelle 5.18.: Ausbreitmaß und Konsistenz der Mörtel; n. e.: nicht ermittelt

Rezeptur	Ausbreitmaß im Mittel [cm]	Konsistenz
B	14,8	plastisch
H	9,5	steif
T	11,75	steif
W	n. e.	zu flüsssig
M	19,3	plastisch
D	23,7	weich
E	22,4	weich

5.5.2. Erstarrungszeiten

Die Erstarrungszeiten der Mörtel wurden mit einem modifizierten Eindrückversuch in Anlehnung an DIN 1164-11 ermittelt (siehe Abschnitt 4.1.2). Überwiegend wurden Mörtel untersucht, die Erstarrungszeiten von 4 bis 8 Minuten besaßen. Das Verfahren zur Erfassung der Erstarrungszeiten wurde modifiziert angewendet, damit es reproduzierbar und einfach durchführbar blieb und für Mörtel verschiedener Konsistenzen anwendbar war. Konventionelle rheologische Messungen waren aufgrund der kurzen notwendigen Verarbeitungszeit praktisch nicht möglich. Für die Entwicklung der Applikationstechnik wurden die Erstarrungszeiten je nach Applikationstechnik (siehe Abschnitt 5.6) verlängert. Die verlängerten Erstarrungszeiten betrugen bis zu 16 Minuten. Bei diesen verlängerten Erstarrungszeiten wäre zwar die Ermittlung der Erstarrungszeit durch den sog. VICAT-Versuch möglich gewesen, doch damit die Prüfungen der Erstarrungszeiten vergleichbar für die verschiedenen Erstarrungszeiten von 4 bis 16 Minuten blieben, wurde das vorgenannte angepasste Verfahren in Anlehnung an DIN 1164-11 zur Ermittlung der Erstarrungszeit während des gesamten Zeitraumes des Forschungsprojektes beibehalten. In Tabelle 5.19 sind die Bereiche der ermittelten Erstarrungszeiten dargestellt, die mit dem in Abschnitt 4.1.2 beschriebenen Verfahren ermittelt wurden.

Die Schwankungen von zwei bis fünf Minuten konnten durch verschiedene Einflüsse begründet sein:

- Temperatur und Luftfeuchte der Umgebung
- Rohstoffe und verschiedene Chargen mit variierenden Eigenschaften
- Zugabezeitpunkt der verzögernden Wirkstoffe

Tabelle 5.19.: Ermittelte Erstarrungszeiten der Mörtel

Rezeptur	Erstarrungszeit		Zementcharge
	von [Min]	bis [Min]	
B	7:00	9:50	R-SE Jan13
H	5:30	8:30	R-SE Jan14
T	13:00	> 15:00	R-SE Jan13
W	13:00	15:30	R-SE Jan13 / R-SE Jan14
W	9:30		R-SE Jan14
M	7:00	10,5	R-SE Jan14 / R-SEJan16
D	10:30	15:30	R-SE Jan16
E	8:30		R-SE Jan16

- Lagerungsdauer und -bedingungen der Rohstoffe

Zu den o. g. Punkten wurden Versuchsreihen durchgeführt und die Temperatur und Luftfeuchte der Umgebung parallel gemessen. Die Messergebnisse zeigten keine klare Korrelation zu den variierenden Erstarrungszeiten. Auch eine Versuchsreihe, in der der Einfluss der Zugabe der verzögernden Wirkstoffe zu verschiedenen Zugabezeitpunkten untersucht wurde, gab entgegen Literaturhinweisen (z. B. [143]) keinen eindeutigen Hinweis für die sich unterschiedlich einstellenden Erstarrungszeiten.

Aufgrund der sich unterschiedlich einstellenden Erstarrungszeiten derselben Rezepturen musste für die Fortsetzung der Versuche der Applikationstechniken, wie in Abschnitt 5.6.4.3 beschrieben, die Erstarrungszeit direkt vor jedem neuen Versuch ermittelt werden.

5.5.3. Biegezug- und Druckfestigkeiten

In Tabelle C.1 im Anhang C sind von Mörtelprismen der Rezepturen B, H, T, W, M und D die Biegezug- und Druckfestigkeiten angegeben. Die Biegezugfestigkeiten der vorgenannten Rezepturen erstreckten sich in einem Bereich von 4,05 N/mm^2 bis 10,94 N/mm^2. Bei den Mörtelprismen der Rezepturen B, H, T und W war zu beobachten, dass die Biegezugfestigkeiten bei einem Prüfalter von 56 Tagen im Vergleich zum Wert bei 28 Tagen abfielen.

Die Druckfestigkeiten für die o. g. Rezepturen lagen in einem Bereich von 25,60 N/mm^2 bis 67,47 N/mm^2. Die Zugabe eines redispergierbaren Dispersionspulvers bewirkte keine Erhöhung der Biegezug- und Druckfestigkeiten. Es trug aber zur besseren Verarbeitbarkeit für die Unterwasseranwendung bei (vgl. Prismen der Rezeptur B und H).

Die Mörtel der Rezeptur M zeigten im Vergleich zu B, H, T, W und D deutlich geringere Druck- und Biegezugfestigkeiten (siehe Tabelle C.1 im Anhang). Applikationen mit der Rezeptur M und der Stempel Applikationstechnik (siehe Abschnitt 5.6.1.2) zeigten jedoch mit Abstand die höchsten Haftzugfestigkeiten zwischen Mörtel und Beton (siehe Tabelle 6.2 und Abbildung 6.3).

Mörtel der Rezeptur D erreichte höhere Biegezug- und Druckfestigkeiten als die Rezeptur M. Mit der Applikationsplatte als Auftragstechnik wurden schlechtere Haftzugfestigkeiten erreicht.

Dass die Rezepturen B, H, T und W deutlich höhere Biegezug- und Druckfestigkeiten erreichten, lag an den sehr hohen Zementgehalten, die in den Rezepturen D, M und Op-1 und Op-2 aufgrund besserer Wirtschaftlichkeit und im Rahmen von Optimierungsmaßnahmen reduziert wurden.

5.5.4. Fazit Mörtel

Die verwendeten Rezepturen (insb. B, H, T und W) weisen im Vergleich zu konventionellen Mörtelzusammensetzungen einen überdurchschnittlichen Zementgehalt auf. Im iterativen Entwicklungsprozess hat sich früh gezeigt, dass Rezepturen mit hohem Zementgehalt das beste Potential für die erfolgreiche Unterwasseranwendung haben. Im Vergleich zu herkömmlichen Mörteln müssen die in dieser Arbeit entwickelten Mörtel ein gutes Mischbarkeitsverhalten und ein hohes Zusammenhaltevermögen in möglichst knetfesten, wasserarmen Zustand aufweisen, um ein Entmischen bei oder nach dem Applizieren unter Wasser zu verhindern. Hohe Zementanteile helfen dabei, dieses wichtige Kriterium für den Unterwassereinsatz zu erfüllen.

Die Ergebnisse mathematischer Packungsdichteoptimierung aus Abschnitt 5.4.1.2 zeigten, dass die höchste Packungsdichte erreicht wird, wenn das Polymer und Flugasche kaum bis gar nicht vertreten sind. Ohne Polymer und / oder Flugasche wird aufgrund fehlender guter Verarbeitbarkeit und Haftung zum Untergrund das Ziel nicht erreicht, einen Mörtel zu konzipieren, der sich unter Wasser aufbringen lässt und zudem auch hohe Haftzugfestigkeiten erreicht. Die Rezeptur Op wurde mit der Applikationstechnik des Stempels (POM ST, siehe Abschnitt 5.6.1.2) aufgebracht, da diese die höchste Zuverlässigkeit in der Reproduzierbarkeit guter Verbundeigenschaften bietet. Auf diese Weise lässt sich die Leistungsfähigkeit des Mörtels gut isoliert betrachten. Die Einflüsse der Applikationstechnik auf das Verbundergebnis sind bei der Stempeltechnik am geringsten.

In Tabelle 5.20 sind die Kennwerte der verwendeten Mörtel aufgeführt: Die Biegezugfestigkeiten der in dieser Arbeit unter Wasser verwendeten Mörtel lagen zwischen 4,05 N/mm^2 und 11,28 N/mm^2. Die Druckfestigkeiten lagen im Bereich zwischen 27,48 N/mm^2 und 70,4 N/mm^2. Die Festmörteleigenschaften im Detail befinden sich in Tabelle C.1 im Anhang.

Damit konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, Mörtel mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften herzustellen. Im Abschnitt 6.1 wird gezeigt, dass diese Mörtel mit erfolgreicher Anhaftung unter Wasser auf einen Betonuntergrund appliziert werden können. Daraus ergibt sich die Perspektive, die Mörtelrezeptur gezielt auf den Betonuntergrund einzustellen, um die Dauerhaftigkeit einer Instandsetzungsmaßnahme zu erhöhen. Diese Form der Abstimmung war nicht Teil dieser Forschungsarbeit. In Abschnitt 6.1.1.3 sind Empfehlungen von RISTIC [144] zusammengefasst, damit die Beeinträchtigung zwischen neuem und altem Beton durch ihre unterschiedlichen Eigenschaften minimiert werden kann.

Tabelle 5.20.: Kennwerte der verwendeten Mörtel; n. e.: nicht ermittelt

Rezeptur	Frischmörtelkennwerte		Festmörtelkenntwerte (28 d)	
	w/z-Wert	Ausbreitmaß [cm]	Biegezug-festigkeit [N/mm^2]	Druck-festigkeit [N/mm^2]
B	0,32	n. e.	10,77	59,48
H	0,30	n. e.	10,07	60,20
T	0,34	n. e.	10,06	61,75
W	0,4	n. e.	7,03	54,23
M	0,5	19,3	5,43	35,00
D	0,51	23,7	6,65	48,82
E	0,51	22,4	6,43	42,13
Op1	0,5	n. e.	5,21	31,81
Op2	0,4	n. e.	6,58	48,27

Es ist möglich, durch den Auftrag mineralischer und damit kostengünstiger Mörtel unter Wasser Haftzugfestigkeiten des Systems zu erreichen, die für eine erfolgreiche Instandsetzung notwendig sind und den vorhandenen Regeln für eine Betoninstandsetzung im Trockenen entsprechen.

Die Filmbildung von Dispersionen bzw. Dispersionspulvern in PCC (= Polymer Cement Concrete) erfolgt nur optimal, wenn der Baustoff austrocknen kann. Dies ist bei der Betoninstandsetzung unter Wasser nicht gegeben. Man konnte nicht davon ausgehen, dass sich kunststoffmodifizierte Mörtel unter Wasser besser verhalten als reine Zementmörtel. In den bislang durchgeführten Versuchen konnte mit der Zugabe einer Polymerdispersion eine verbesserte Verarbeitbarkeit erzielt werden. Die höchste Haftzugfestigkeit wurde jedoch mit einer Rezeptur ohne Polymerzugabe erzielt. Die Zugabe von Polymerdispersion wurde deshalb mit betrachtet, stand aber nicht im Mittelpunkt der Mörtelentwicklung. Rezepturen mit Polymerzugabe erreichten bei Auftrag unter Wasser appliziert einen besseren Verbund als an Luft appliziert (vgl. [84]).

5.6. Entwickeln einer Applikationstechnik

Es wurden verschiedene Applikationstechniken erprobt. Allen gemein ist, dass sie sehr stark von der Erstarrungszeit der zu applizierenden Mörtel abhängen.

Vorversuche und Hauptversuche zeigten, dass der optimale Zeitpunkt der Aufbringung kurz vor Erstarrungsbeginn des Mörtels ist. Der Mörtel muss genau zu diesem Zeitpunkt unter Wasser auf den Betonuntergrund mit einer Verdichtungsenergie aufgebracht werden. Nur dann kann der Mörtel mit dem Untergrund einen Verbund erzielen.

Tabelle 5.21 zeigt in einer Übersicht, welche Rezepturen für die verschiedenen Applikationstechniken verwendet wurden.

Tabelle 5.21.: Verwendete Mörtel und Applikationstechnik im Überblick

Applikationstechnik	beschrieben in Abschnitt	angewendete Rezeptur
händisch	5.6.1	B
händisch, Stempel, Mörtelschlitten	5.6.1, 5.6.2.2, 5.6.3.2	H
händisch	5.6.1	T
händisch	5.6.1	W
Applikationsplatte	5.6.4	W
händisch, Stempel, Mörtelschlitten, MSK	5.6.1, 5.6.3.2, 5.6.3.3	M
Applikationsplatte	5.6.4	D

Für die Untersuchungen von möglichen Mörtelrezepturen und ihrem erreichbaren Verbund wurden in Abschnitt 6.1.1.1 die Rezepturen B, H, T und W händisch unter Wasser appliziert auf waagerechten Betonproben (Gründe siehe in Abschnitt 5.1). Die Rezepturen H, W, M und D wurden senkrecht appliziert (Stempel, MSK, Applikationsplatte). Die erreichten Haftzugfestigkeiten zwischen Mörtel und Beton, die mit den folgenden Applikationstechniken erreicht wurden, werden im Abschnitt 6.1.1 genannt und diskutiert.

5.6.1. Andrücken mit Handkraft

Die Applikation mit reiner Hand- bzw. Armkraft war zu Beginn der Forschungsarbeit die einfachste Methode, um neue Rezepturen zu erproben.

Das Applizieren mit bloßen Händen hatte jedoch mehrere Nachteile. Durch das Anpressen mit der Hand kann kein konstanter Druck aufgebracht werden. Weiterhin ist die Oberflächenbeschaffenheit durch die Finger uneben. Durch die unregelmäßige Beschaffenheit und die nicht gleichmäßig verdichtete Mörtelschicht konnte der oberflächennahe Mörtel ausgewaschen und direkt abgetragen werden.

Demnach war ein Andrücken des Mörtels mit Hand- bzw. Armkraft nur mit Hilfsmitteln, die einen flächigen Andruck ermöglichen, sinnvoll.

Unabhängig von der Wahl der Applikationstechnik wurde schnell klar, dass der Zeitpunkt für die Applikation des Mörtels unter Wasser exakt gewählt werden musste. Der geeignete Zeitpunkt für die Applikation ist kurz vor dem Erstarrungsbeginn. Wird der Mörtel zu früh appliziert, kann kein Verbund eingegangen werden, weil der Mörtel unter Wasser auseinander fällt oder sich entmischt. Wird der Mörtel zu spät appliziert, kann aufgrund seines fortgeschrittenen Erstarrungsprozesses, welcher übergeht in den Erhärtungsprozess, kein Verbund mit dem Untergrund eingegangen werden.

5.6.1.1. Andrücken mit einer Kelle

Das Andrücken von Mörtel unter Wasser mit einer Kelle macht das streifenweise Auftragen von Mörtel möglich. Durch das Eintrüben des Wassers bei Eintrag von Mörtel im Wasser ist die Sicht jedoch erschwert. Die Betonoberfläche muss daher zuvor blind erfühlt werden. Oberflächennah kam es beim Versuch zu einem geringen Abbröckeln des Mörtels, aber der Großteil des Mörtels blieb haften. In Abbildung 5.18 sind das Auftragsverfahren mit der Kelle und Verbundprobe nach Auftrag unter Wasser dargestellt. Wie in Abbildung 5.18(b) zu erkennen ist, ergab



(a) Händischer Auftrag mit einer Kelle

(b) Verbundprobe nach Auftrag mit einer Kelle,

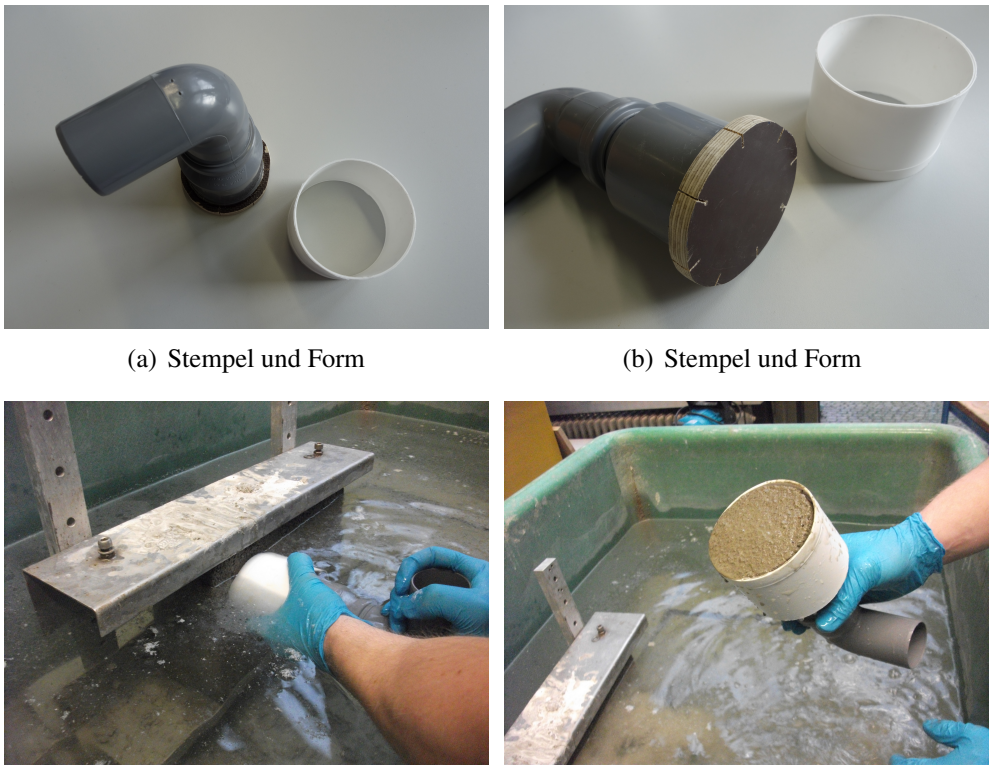
Abbildung 5.18.: Händischer Auftrag mit einer Kelle unter Wasser

die Applikation unter Wasser zwei Streifen. Für eine Materialprüfung (Haftzugfestigkeitsprüfung) am Verbundkörper bot sich nur der obere Streifen an. Der untere Streifen war aufgrund der schlechten Sichtverhältnisse schwierig zu applizieren und ergab kein befriedigendes Ergebnis.

Diese Versuche zeigten, dass für einen definiert flächigen Mörtelauftrag möglicherweise der Mörtelauftrag eingegrenzt oder eingerahmt werden sollte.

5.6.1.2. Andrücken mit einem Stempel

Um den Mörtelauftrag einzugrenzen und definierte Mörtelflächen beim Auftrag zu erzeugen, wurde ein Stempel mit einer einfassenden Form getestet (siehe Abbildung 5.19). Die Stempelplatte wurde mit Löchern versehen als Auslass für das beim Andrücken aus der Form verdrängte Wasser. Das Aufbringen eines Mörtels zusammen mit einer Form und einem Stempel funktioniert nicht. Der Mörtel blieb in der Form stecken, anstatt eine Verbindung mit dem Untergrund einzugehen. Daher wurde im nächsten Schritt auf die Form verzichtet. Ein neuer Stempel mit einer besonders haftungsarmen Oberfläche aus Polyoxymethylen (POM) wurde entwickelt, um das Problem der Anhaftung am Stempel zu reduzieren. In Abbildung 5.20 ist die Vorgehensweise bei der Applikation mit diesem POM-Stempel aufgeführt. Die Abbildung 5.20(a) zeigt den Mörtel als Kugel geformt auf der geölten Fläche des Stempels. Im weiteren Verlauf wurde



(a) Stempel und Form

(b) Stempel und Form

(c) Die Form und Stempel werden an der Betonfläche unter Wasser angesetzt

(d) Der Mörtel bleibt innerhalb der Form

Abbildung 5.19.: Stempelwerkzeug mit Form

der zuvor zur Haftungsreduzierung mit Schalöl eingeölte Stempel mit dem Mörtel gegen die Betonfläche unter Wasser gedrückt. Der Zeitpunkt dieses Andrückens war kurz vor Erstarren des Mörtels. Dies wurde im Versuch nach Erfahrungswerten und Erscheinungsbild des Mörtels bestimmt. In Erstarrungszeit-Versuchen wurden der Beginn und das Ende der Erstarrungszeit im Vorfeld ermittelt.

Bei der Applikationstechnik mit dem Stempel war besonders zu beachten, dass der Stempel nach dem Andrücken nicht in einer Bewegung senkrecht von der Oberfläche weg abgezogen wurde, sondern durch eine waagerechte Bewegung parallel zur Oberfläche entfernt wurde.

Die Versuche zeigten, dass ein Entfernen des Stempels in einer Bewegung senkrecht zur Oberfläche den Mörtel mit abgezogen hatte. Die Ursache hierfür lag vermutlich an dem Unterdruck, der zwischen Applikationsmörtel und Stempeloberfläche größer war als die Oberflächenkräfte / Verbundkräfte zwischen Betonoberfläche und Mörtelapplikation. Wie in Abbildung 5.20(d) zu erkennen, konnte mit dieser Applikationsmethode ein Verbund zwischen Mörtel und Betonuntergrund erzielt werden (Haftzugfestigkeiten siehe Abschnitt 6.2).

Für das Andrücken mit einem definierten Anpressdruck wurde ein Drucksensor (HBM Miniatur Kraftaufnehmer, Schutzart IP 67) verwendet, der zwischen Stempelfläche und Stempelgriff verbaut wurde. Mit einem Messverstärker (HBM-Messverstärkersystem MGCplus) wurden die Anpressdrücke aufgezeichnet (Zusammenhang und Auswertung siehe Abschnitt 6.2).



(a) Frischmörtelkugel auf dem Stempel



(b) Andrücken des Stempels mit Mörtel



(c) Andrücken des Stempels mit Drucksensor



(d) Mörtel bleibt auf Betonuntergrund haften

Abbildung 5.20.: Auftragsverfahren mit angedrücktem Stempel

Diese Applikationstechnik ist mit steifer bis weicher Mörtelkonsistenz einsetzbar. Bei steifem Mörtel war ein hoher Anpressdruck erforderlich, um den Mörtel aufzubringen. Hatte der Mörtel eine weiche Konsistenz, genügte dagegen ein geringer Anpressdruck. Der hohe Anpressdruck bei steifem Mörtel vergrößerte die Schwierigkeit, den Stempel nach dem Applizieren zu entfernen, ohne den aufgebrachten Mörtel wieder vom Betonuntergrund abzuziehen. Wie obenstehend beschrieben, war ein schadfreies Entfernen aber durch eine vorsichtige seitliche Scherbewegung möglich, dies gilt auch nach hohem Anpressdruck.

Der Applikationszeitpunkt ist ein wichtiger Aspekt, da sich der Mörtel bei zu früher Applikation unter Wasser entmischt, bei zu später Applikation jedoch keine Haftung mehr mit dem Untergrund eingeht. Der Mörtel muss kurz vor seinem Erstarrungsbeginn, wenn er noch matt feucht ist, appliziert werden. Je nach tatsächlicher Erstarrungszeit musste das Andrücken des Stempels zum Teil länger erfolgen als in den Vorversuchen, da die Erstarrungszeit variieren kann und zum Teil länger war als erwartet. Auf die Erstarrungszeiten geht Abschnitt 6.3 weiter ein.

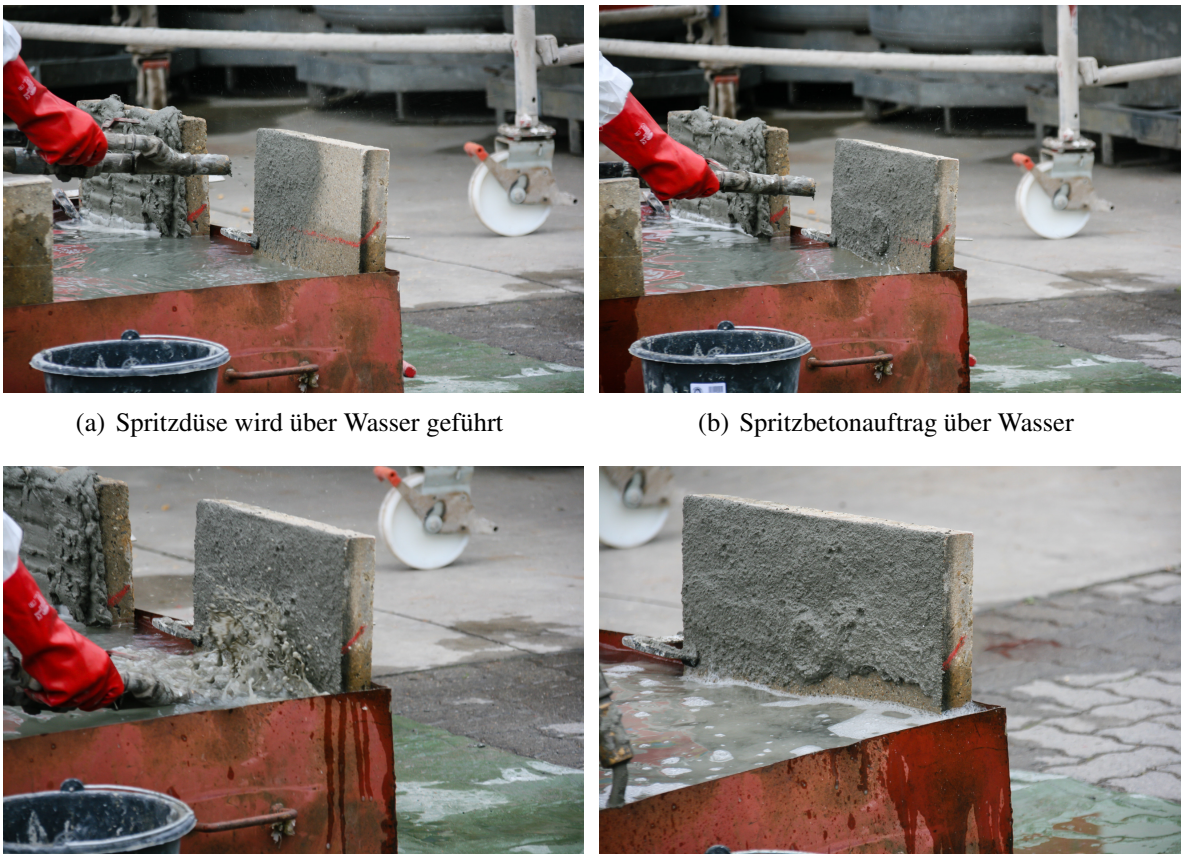
5.6.2. Maschineller Auftrag (Ansätze)

Für einen flächigen Auftrag wurde angestrebt, durch *Spritzen von Mörtel unter Wasser* ein maschinelles Verfahren zu realisieren. Im Trockenen ist die Instandsetzungsmaßnahme mit Spritzbeton von flächigen senkrechten Bauteilen die Instandsetzungsmaßnahme der Wahl. Praktische Beispiele verdeutlichen dies, weil sie bisher am erfolgreichsten durchgeführt werden. Als dickschichtige Instandsetzungsmaßnahme bei Schleusenkammerwänden werden Vorsatzschalen z. B. aus Spritzbeton verwendet [184]. Solche Spritzverfahren benötigen kurze Zeitrahmen, sind reproduzierbar und besonders wirtschaftlich. Im Fall einer Schleuse z. B. werden durch Einsatz von Spritzverfahren kurze Betriebszeiteneinschränkungen während einer Instandsetzungsmaßnahme und eine zeitige Freigabe möglich.

5.6.2.1. Applikation durch Spritzen unter Wasser, im Dichtstromverfahren mit Luft

Die Anwendung des *herkömmlichen* Spritzverfahrens unter Wasser wurde von NGUYEN [117] geprüft. Mit einer Spritzdüse im Dichtstromverfahren mit Luft konnte ein Auftrag des Mörtels *an Luft* erfolgen (siehe Abbildungen 5.21(a) und 5.21(b)). Sobald die Spritzdüse jedoch die Wasserlinie unterschreitete (siehe Abbildung 5.21(c)), wurde das Wasser durch die Druckluft so sehr aufgemischt, dass der zuvor aufgetragene Mörtel sofort wieder abgerissen wurde.

In Abbildung 5.21(d) ist das Resultat dargestellt: Die herkömmliche Spritzbetontechnik, wie z. B. das Spritzen im Dichtstromverfahren, ist unter Wasser aufgrund der abrasiven Wirkung des Wassers nicht anwendbar. [117]



(a) Spritzdüse wird über Wasser geführt

(b) Spritzbetonauftrag über Wasser

(c) Spritzdüse wird unter Wasser geführt

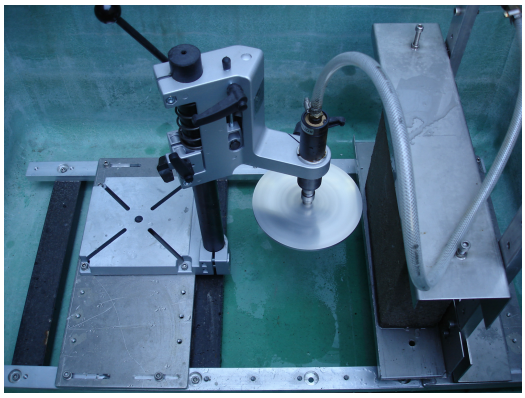
(d) Mörtelschicht abgetragen

Abbildung 5.21.: Herkömmliches Spritzen im Dichtstromverfahren mit Luft aus [117]

5.6.2.2. Applikation durch Spritzen unter Wasser mit Druckluftmotor und Scheibe

Eine Methode der mechanischen Beschleunigung des Mörtels erschien als Applikationstechnik wünschenswert, da diese Methode sich über Wasser bewährt hatte. Die Beschleunigung von Mörtel unter Wasser erfolgte daher in einer Versuchsreiche durch einen schnell laufenden Drehteller, durch den der Mörtel gegen die Betonoberfläche geschleudert wird. Der Versuchsaufbau (siehe Abbildung 5.22(a)) bestand aus einem Bohrständer, der innerhalb einer Konstruktion verschraubt war und den druckluftbetriebenen Motor einspannte. Radial zum Bohrständer war die Position des Motors verstellbar. In das Bohrfutter des Motors wurden unterschiedliche Scheiben eingespannt (siehe Abbildung 5.24, siehe Seite 134) und angetrieben. Bestandteil des Aufbaus war eine Halterung für die Betonprobe, so dass konstante Abmessungen und Abstände in jedem Versuch eingehalten wurden. Der Mörtel traf portionsweise auf die Scheibe und wurde dann gegen die Betonoberfläche „geschossen“. Ein Druckluftmotor wurde gewählt, damit dieser auch unter Wasser einsatzfähig war.

Diese Spritz- oder auch Schleudertechnik wurde zunächst im Trockenen getestet, um die Machbarkeit zu überprüfen. Diese Technik erforderte einen Mörtel, der im Verarbeitungszustand unter Wasser ein sehr gutes Zusammenhaltevermögen hat, damit dieser auf dem Weg durch das



(a) Aufbau der Spritzapparatur



(b) Aufbau mit Spritzapplikation in Probehalterung



(c) Eingespannte Scheibe im Druckluftmotor



(d) Aufbau der Spritzapparatur

Abbildung 5.22.: Spritzvorrichtung für Spritzen mit Druckluft

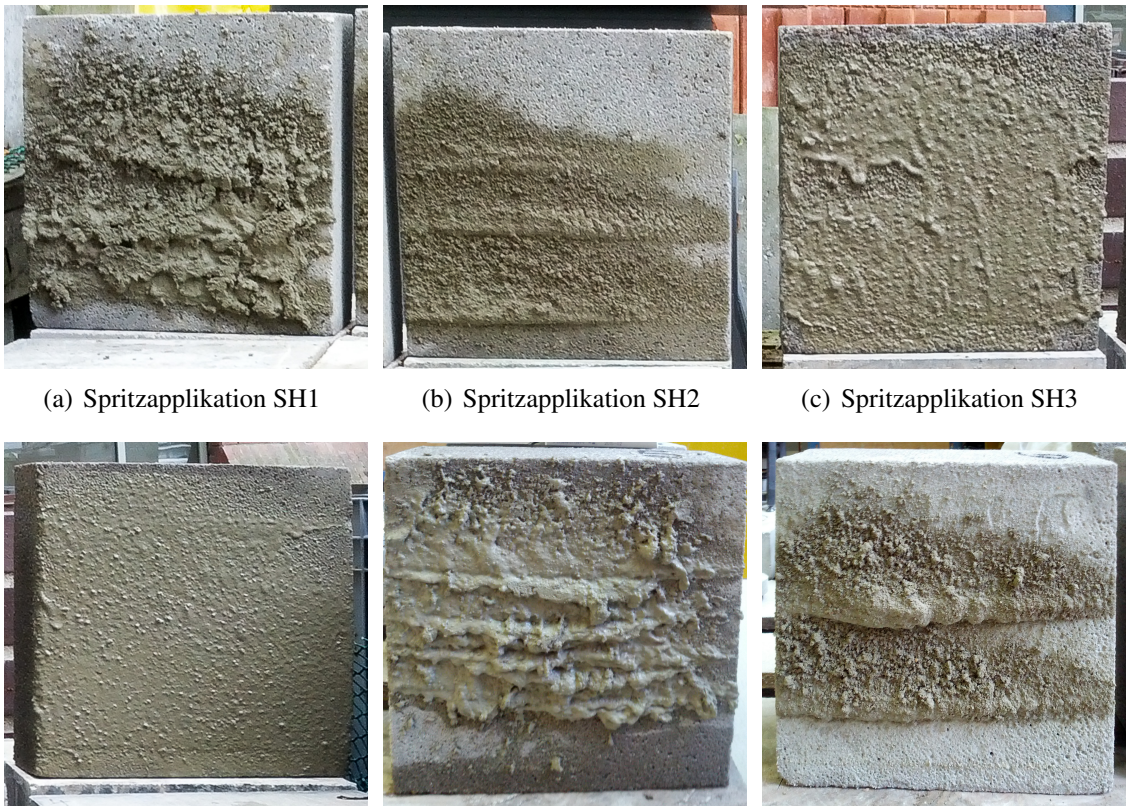
Wasser nicht zerfällt. Es wurde daher von einem wasseruntersättigten Mörtel ausgegangen, der durch die Kapillarkräfte zusammengehalten wird.

Es wurde Frischmörtel angemischt, der in Form von kleinen Kugeln und Klümpchen auf die rotierende Scheibe (siehe Abbildung 5.22(c)) fallen gelassen wurde. Durch die rotierende Scheibe wurde dann der Mörtel in Richtung des Betonuntergrundes, der sich im Probenhalter befand, befördert.

Folgende Randbedingungen wurden in diesen Versuchsreihen variiert:

- Δp, Druckluftzufuhr wurde gesteigert $\longrightarrow$ Motorleistung gesteigert $\longrightarrow$ die Drehzahl der eingespannten rotierenden Scheibe erhöht sich
- Konsistenz des Mörtels
- Abstand des Betonuntergrundes und der rotierenden Scheibe
- Art der Scheibe (Variation von Gewicht, Anzahl und Form der Streben und Durchmesser)

Die Abbildung 5.23 zeigt die Resultate dieser Versuche. Die Anwendung dieser Spritztechnik im Trockenen, Mörtel auf die Betonfläche zu schleudern, erfolgte teilweise erfolgreich und flächig. Es wurde angenommen, dass der Mörtel für das „Spritzen“ mit der Spritzapparatur an Luft



(a) Spritzapplikation SH1 (b) Spritzapplikation SH2 (c) Spritzapplikation SH3

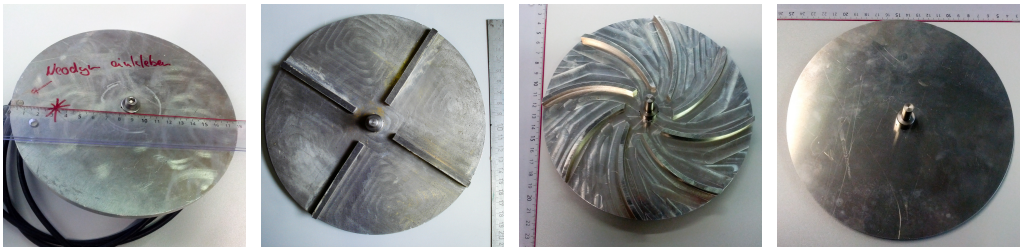
(d) Spritzapplikation SH4 (e) Spritzapplikation SH5 (f) Spritzapplikation SH6

Abbildung 5.23.: Verbundproben nach Spritzen mit rotierender Scheibe

eher von flüssiger Konsistenz sein und für die Anwendung unter Wasser mit der Spritzapparatur eher eine knetbare Konsistenz besitzen muss. In Anhang Abschnitt F.1 wird auf die Konsistenz der aufgetragenen Mörtel und die Ergebnisse eingegangen.

Die Verbundproben (Abbildung 5.23) zeigen, dass für eine ebene Oberfläche ein Glätten der Oberfläche vor Erhärten des Mörtels unverzichtbar für das äußere Erscheinungsbild ist. Sie wurden mit der Scheibe II (siehe Abbildung 5.24(b), 2,5 mm dicke Metallscheibe mit vier Streben) *gespritzt*.

Im Rahmen dieser Spritzversuche wurden verschiedene Scheiben konstruiert. Zunächst aus Holz (schnelle Anpassbarkeit), später aus Metall (nachdem sich die Holzausführung als nützlich erwiesen hatte). Die Abbildung 5.24 zeigt eine Auswahl dieser Scheiben. Die unterschiedlich ausgeführten Streben wurden geplant, um den Mörtel gezielter zu beschleunigen. Insgesamt wurden sieben verschiedene Scheiben aus Metall gefertigt (siehe im Anhang Abschnitt F.2). Im



(a) Scheibe I, Rückseite mit Neodym-Magnet (b) Scheibe II (c) Scheibe III (d) Scheibe IV

Abbildung 5.24.: Scheiben in unterschiedlicher Ausführung

Anhang Abschnitt F.2 werden alle sieben Scheiben aufgelistet und ihre Eigenschaften beschrieben.

Vor Inbetriebnahme der Apparatur unter Wasser wurde eine Drehzahlmessung der Scheiben durchgeführt. Dabei wurde ermittelt, mit welcher Drehzahl und mit welcher Scheibe der Mörtel am besten auf den Betonuntergrund geschleudert werden konnte. Die Drehzahlmessung musste sowohl an der Luft als auch unter Wasser durchgeführt werden. Die gängigsten Drehzahlmessungen beruhen auf optischen Verfahren, diese sind aber für die hier angestrebte Anwendung unter Wasser ungeeignet. Trübheit, Verwirbelungen und Brechung an der Wasseroberfläche würden eine zuverlässige optische Drehzahlmessung verhindern. Aus diesem Grund wurde individuell für diese Applikationstechnik ein Drehzahlmesser konstruiert, der auf einem magnetisch-induktiven Verfahren beruht. Genauere Angaben und Ergebnisse zu dieser Entwicklung befinden sich im Anhang Abschnitt F.2.

Notwendige Umdrehungszahlen:

Mit Hilfe der Drehzahlmessung an Luft und unter Wasser wurde untersucht, wie hoch die Umdrehungszahlen der jeweiligen Scheibe sein musste, damit ein Mörtel an der Betonprobe haften blieb.

Die Scheibe II (Abbildung 5.24(b), erforderliche Umdrehungszahl 62 U/Sek bzw. 3720 U/Min) und III (Abbildung 5.24(c), erforderliche Umdrehungszahl 162 U/Sek bzw. 9720 U/Min) waren in der Lage *an der Luft* Mörtel auf die Betonoberfläche haftend zu schleudern (siehe in Abschnitt F.3 im Anhang). In Tabelle 5.22 ist dies übersichtlich dargestellt. Glatte Scheiben oder

Tabelle 5.22.: Erforderliche Umdrehungszahlen für ausgewählte Scheiben

Scheibe	erf. Umdrehungszahl n	
	[1/Sek]	[1/Min]
II	62	3720
III	162	9720

Scheiben mit gefrästen Furchen waren für einen Mörtelauftrag in dieser Form nicht geeignet, da sie den Mörtel nicht ausreichend beschleunigen konnten. Ergebnisse der Drehzahlmessung aller Scheiben befinden sich im Anhang Abschnitt F.2.

Für eine erfolgreiche Spritztechnik-Applikation müsste die Geschwindigkeit des Mörtels beim Aufprall auf die Betonoberfläche unter Wasser in der selben Größenordnung liegen, wie bei der Anwendung an Luft. Unter Wasser sind für eine erfolgreiche Applikation folglich noch deutlich höhere Umdrehungszahlen notwendig, um die nötige Beschleunigung des Mörtels zu erreichen.

Dies resultiert aus dem deutlich größeren zu überwindenden Widerstand für den Mörtel bei einer Bewegung unter Wasser von der Scheibe zur Betonoberfläche.

Die Ergebnisse der Drehzahlmessung unter und über Wasser zeigten zusammen mit Berechnungen auf hydromechanischer Grundlagen, dass eine Unterwasserspritztechnik mit Motor und rotierender Scheibe nicht zielführend ist.

Dabei wurde beispielhaft mit der erforderlichen Umdrehungszahl von 3720 U/Min der Scheibe II die erforderliche Umdrehungszahl der Scheibe unter Wasser berechnet. Dabei wurden folgende Annahmen getroffen:

- Mörtelkugel entspricht idealerwiese einer Kugel mit einem Strömungswiderstandskoeffizienten von $c_W = 0{,}45$
- Abstand zwischen Scheibe und Betonoberfläche beträgt 0,8 m
- erforderliche Geschwindigkeit im Aufprallmoment ist unter Wasser und an Luft ist gleich, damit der Mörtel auf der Oberfläche haften bleibt

Zunächst wurde die Anfangs-/Umfangsgeschwindigkeit in [1/Sek] berechnet:

$$v_0 = \frac{n}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot 60} \tag{5.17}$$

v_0 Anfangs-/Umfangsgeschwindigkeit [m/s]
n Umdrehungszahl der Scheibe [U/Min]

Weitere Parameter wurden berechnet und sind in Tabelle 5.23 übersichtlich aufgeführt. Mit Hil-

Tabelle 5.23.: Verwendete Parameter für Berechnungen

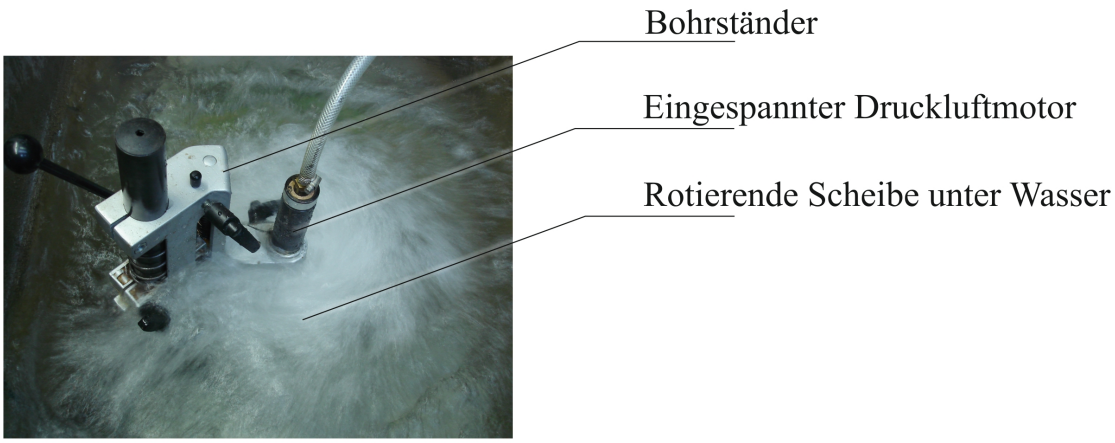
n	3720	[U/Min]	erf. Umdrehungszahl Scheibe (Luft)
v_0	ca. 39	[m/s]	erf. Umfangsgeschwindigkeit (Luft)
r	0,10	[m]	Schreibenradius
D_K	0,01	[m]	Kugeldurchmesser
m	0,0013	[kg]	Kugelmasse
A	7,854 x 10^{-5}	[m^2]	Kugel-Projektionsfläche
c_W	0,45	[-]	Strömungswiderstandskoeffizient
x	0,8	[m]	Abstand Scheibenrand-Wand

fe von Matlab Simulink wurde mit den oben genannten Angaben berechnet, dass unter Wasser ein v_0 von 120 m/s erforderlich wäre, damit bei der Überwindung des Reibungswiederstandes die Mörtelkugel unter Wasser über einen Weg von 0,8 m mit derselben Aufprallgeschwindigkeit ankommt, wie an Luft bei einem v_0 von 38,956 m/s. Für eine Umfangsgeschwindigkeit von v_0 = 120 m/s ist eine Umdrehungszahl von 11459 U/Min erforderlich. In der Annahme, dass die Leistung P proportional zu Umdrehungszahl n^3 ist, ist für den Antrieb der Scheibe ein Motor mit ca. 11 kW erforderlich.

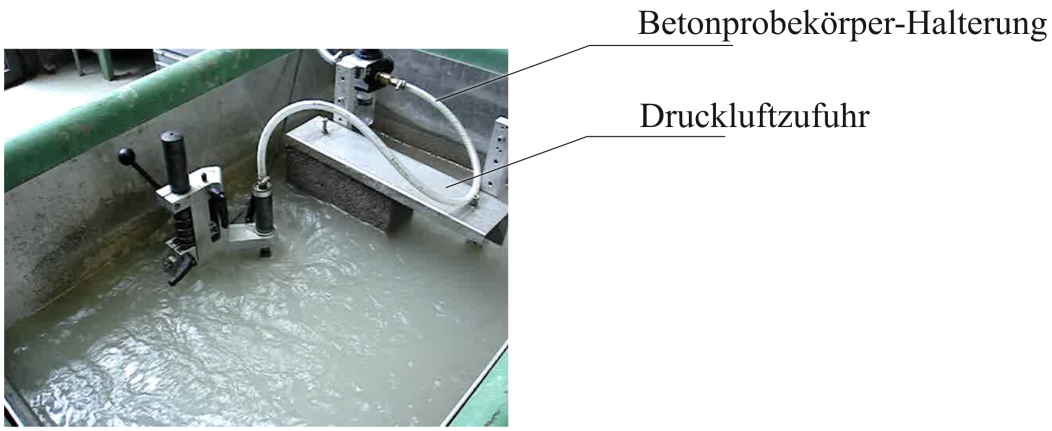
Die Berechnung unterlag der Annahme, dass die Mörtelkörper idealerweise die Form einer Kugel haben und, dass die Geschwindigkeit des transportierenden Mörtels unter Wasser nach den hydromechanischen Regeln abgebremst wird.

Der Antrieb einer Scheibe mit einem solchen Motor würde eine zu starke abrasive Wirkung durch den dann erzeugten Strudel auf den Mörtelauftrag haben (siehe Abbildung 5.25(a)). Ein 0,6 kW Motor bei voller Leistung erzeugt bereits einen starken Wasserstrudel. Mit größerem Abstand zwischen rotierender Scheibe und Betonoberfläche ließe sich die abrasive Wirkung des erzeugten Strudels zwar verringern, durch die größere Strecke, die der beschleunigte Mörtel unter Wasser zurücklegen müsste, wäre aber die nötige Anfangsbeschleunigung und damit die erforderliche Drehzahl der Scheibe wiederum größer. Folglich lässt sich das Problem der abrasiven Wirkung nicht durch eine Variation des Abstandes lösen.

Das Spritzen eines Mörtels unter Wasser mit der entwickelten Spritzapparatur funktionierte nicht. Auch andere denkbare Spritztechniken, bei denen die Beschleunigung des Mörtels rein mechanisch erfolgt, erscheinen aufgrund der abrasiven Wirkung des bewegten Wassers und der hohen Abbremswirkung des Wassers auf den sich bewegenden Mörtel nicht möglich. Dieser Ansatz wurde daher verworfen.



(a) Versuch für Drehzahlmessung



(b) Versuchsdurchführung für erste Spritzversuche unter Wasser

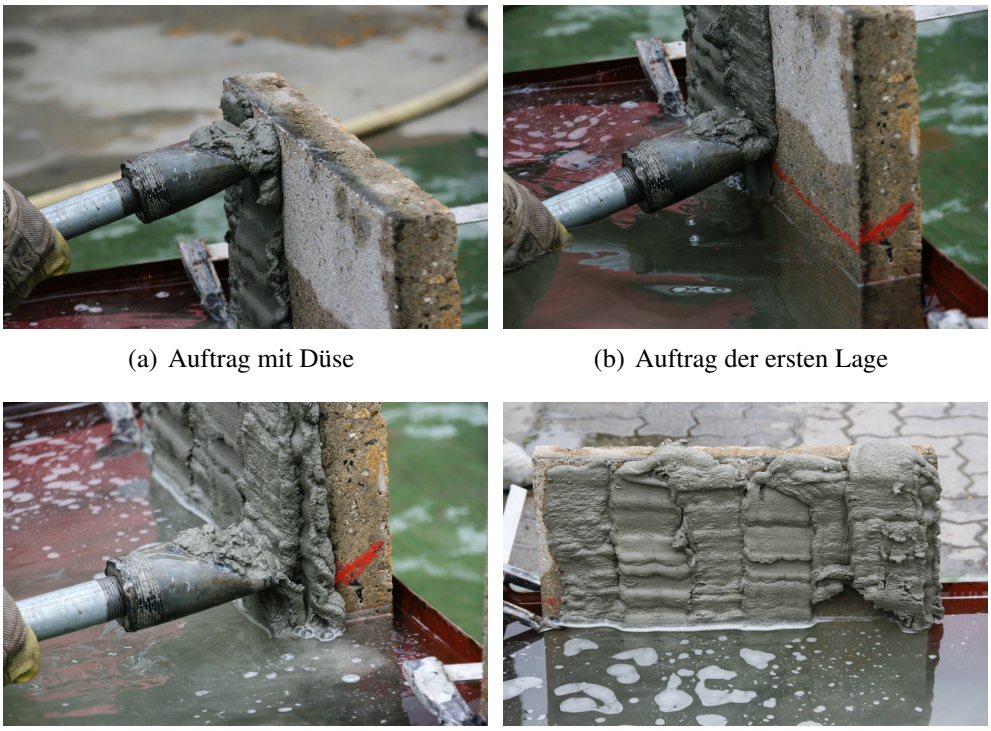
Abbildung 5.25.: Versuchsdurchführung der Spritzversuche unter Wasser und Drehzahlmessung

5.6.3. Kontinuierlicher Auftrag

Für einen schnellen großflächigen Auftrag wäre ein Verfahren zielführend, dass ein flächiges Aufbringen des Mörtels in Streifen oder Schichten ermöglicht. Im folgenden werden Ansätze vorgestellt, die mit diesem Ziel erprobt wurden.

5.6.3.1. Auftragsverfahren mit Düse

Ein reines Auftragsverfahren mit einer Spritzdüse ist nicht anwendbar, da es an einer ausreichend großer Verdichtungsenergie fehlt, so dass der Mörtel kein Anfangs-Haftverbund (siehe Abbildung 5.26) eingehen kann. [117] Bei Versuchen mit einer Düse mit geringem Druck trat



(a) Auftrag mit Düse

(b) Auftrag der ersten Lage

(c) Auftrag der zweiten Lage

(d) Mörtelauftrag abgefallen

Abbildung 5.26.: Auftragsverfahren mit Düse

der Mörtel wie aus einer Zahnpastatube aus und wurde sowohl an der Luft als auch unter Wasser über die Betonoberfläche geführt (siehe Abbildungen 5.26(a) und 5.26(b)). Es wurde zunächst eine Lage aufgetragen (siehe Abbildung 5.26(b)) und dann eine zweite Lage, wie in Abbildung 5.26(c) zu erkennen. Zunächst blieb der Mörtel sowohl an der Luft als auch unter Wasser haften. Doch nach weniger als zwei Minuten fiel ein Teil des mehr-lagigen Mörtelauftrages an der Wasseroberfläche ab. Grund dafür war die mangelnde Haftung, das Eigengewicht und die lange Erstarrungszeit des Mörtels. Ein reines Auftragsverfahren unter Wasser scheint prinzipiell möglich. Es zeigte sich aber, dass diese Art des reinen Auftragsverfahrens einer Verdichtungsenergie bedarf, damit ein Verbund zwischen Mörtel und Beton erfolgt. [117]

5.6.3.2. Auftragsverfahren mit Mörtelschlitten

Die Grundidee bei dem Auftragsverfahren des Mörtelschlittens ist, den Mörtel in einem gleitenden stufenweisen Vorgang auf die Betonunterlage aufzubringen. Für Versuche wurde der in Abbildung 5.27(a) dargestellte Schlitten verwendet. Es wurden dabei drei Modelle von Mörtel-



(a) Aufbau kleiner Schlitten

(b) Aufbau kleiner Schlitten, von der Seite

(c) Aufbau großer Schlitten

(d) Aufbau großer Schlitten, untere Seite

Abbildung 5.27.: Auftragsverfahren mit Mörtelschlitten

schlitten getestet:

- Ein kleines Modell mit 5 cm Breite (siehe Abbildung 5.27(a)) aus Stahl,
- ein großes mit 10 cm Breite (siehe Abbildung 5.27(c)) aus Stahl und
- ein mittelgroßes (so breit wie das 10 cm breite, jedoch etwas kürzer und kompakter) aus POM (aus Polyoxymethylen, siehe Abbildung 5.28(e)).

Der große Schlitten war ein Nachbau des vorherigen kleinen Modells aus Stahl in doppelter Größe.

Mit dem größeren Schlittens sollte es möglich sein, möglichst viele nutzbare Prüfflächen für die Haftzugfestigkeit des Verbundes herstellen zu können (siehe Abschnitt 4.3.1, Seite 74). Der kleine Schlitten ermöglichte zwar theoretisch 50 mm breite Streifen, doch in den Versuchen waren die erforderlichen 50 mm Durchmesser für die Kernbohrung praktisch zu klein, dass eine Prüfung der Haftzugfestigkeit nicht immer möglich war. Mit den in der Höhe verschieblichen Kufen war es möglich, die Schichtdicke des Mörtelstreifens einzustellen. Der Mörtel wurde in

den Schlitten gedrückt und der Schlitten dabei in horizontaler Richtung über die senkrechte Betonprobe gezogen. In der Abbildung 5.28 ist das Auftragen des Mörtels mit den Schlitten sowie die Ergebnisse nach der Applikation aufgeführt. Es stellte sich heraus, dass die starre



(a) Auftrag unter Wasser mit kleinem Schlitten

(b) Verbundprobe nach Auftrag mit kleinem Mörtelschlitten

(c) Auftrag unter Wasser mit großem Schlitten

(d) Verbundprobe nach Auftrag mit großem Schlitten

(e) Mörtelschlitten aus POM

(f) Verbundprobe nach Auftrag mit Mörtelschlitten aus POM

Abbildung 5.28.: Auftragsverfahren mit Mörtelschlitten

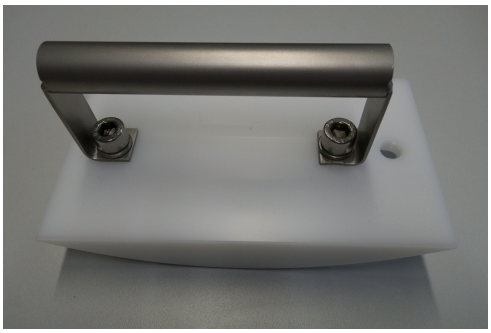
Konstruktion des Mörtelschlittens nicht geeignet war, einen ausreichend großen Druck für die Applikation eines Streifens aufzubringen. Außerdem blieb der Mörtel oft im starren Gebilde der Schlitten stecken, obwohl dieser eingeölt war. Aus den Ergebnissen wird geschlossen, dass die Konstruktion es möglich machen muss, ausreichend Druck auf den zu applizierenden Mörtel auszuüben und eine Applikation durch eine abscherende Bewegung abzuschließen.

5.6.3.3. MSK - Mörtelschlittenkelle

Die vorgenannte Forderung erfüllt die Mörtelschlittenkelle (MSK). Die Mörtelschlittenkelle (MSK) aus POM (Polyoxymethylen) besitzt abgerundete Kufen (siehe Abbildung 5.29(a)), damit eine Abscherbewegung nach der Applikation des Mörtels möglich ist. Bei der Mörtelschlittenkelle (MSK) muss die Konsistenz des Mörtels zwischen weich und plastisch sein. Der Mörtel muss in der Lage sein, direkt haften und hängen zu bleiben. Die Verbundprobe nach Applikation mit der MSK erfolgte zwar nicht glatt, konnte aber relativ gerade aufgetragen werden. Um ebene Flächen / Streifen zu erzeugen, bedürfe es viel Übung in der Handhabung des Werkzeuges. Der Zeitpunkt der Applikation war optimal, wenn die Oberfläche des Mörtels ansteifte. Für einen flächigen Auftrag war die Methode mit der Mörtelschlittenkelle (MSK) nicht geeignet, weil die MSK schwierig an den vorangegangene Applikation anzusetzen ist. Daher war diese



(a) Aufbau Mörtelschlittenkelle mit abgerundeten Kufen



(b) Aufbau Mörtelschlittenkelle



(c) Erforderliche Konsistenz des Mörtels beim Auftrag



(d) Verbund nach Auftrag mit Mörtelschlittenkelle

Abbildung 5.29.: Mörtelschlittenkelle

Applikation nur streifenweise möglich. Diese Zwischenergebnisse bestätigten die vorangegangenen Vermutungen, dass sich mit ausreichend Druck auf den Mörtel ein Mörtelstreifen größerer Breite herstellen ließ und durch eine Abscherbewegung nach dem Aufbringen der Mörtel auch auf dem Untergrund haften blieb und nicht innerhalb des Konstrukts für den Auftrag (vgl. Nachteile von Mörtelschlitten in 5.6.3.2).

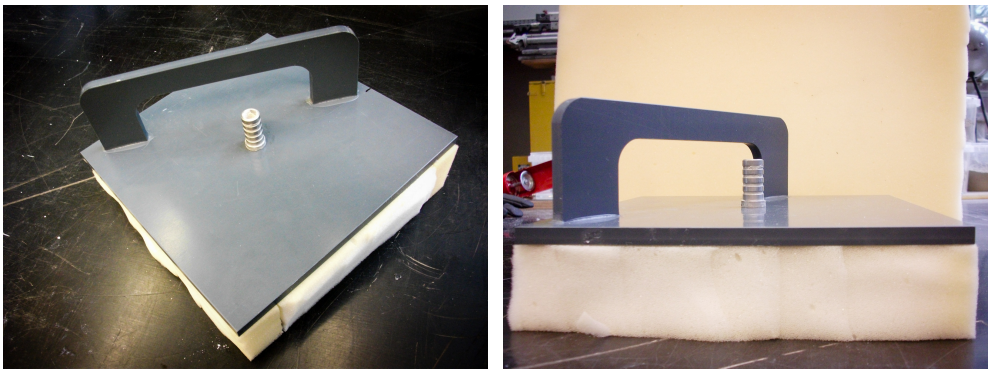
5.6.4. Modifikation für flächigen Auftrag: Applikationsplatte

Aufgrund der vorherigen Versuchsergebnisse war eine weitere Modifikation mit dem Ziel, eine möglichst große und ebene Mörtelfläche mit definierter Dicke zu erreichen, notwendig. Auf Basis der Erfahrungen der vorangegangenen Versuche wurde eine Applikationsplatte konstruiert. Sie besteht aus einer PVC-Platte, die an den Rändern mit einem Schaumstoffrahmen abgeschlossen wird und mittig über einen Stutzen zur Mörtelzufuhr verfügt (siehe Abbildung 5.30). Die Größe der Platte beträgt 15 x 15 cm. Vorherige Versuche zeigten, dass feste Ränder, bestehend aus demselben Material wie die Platte, ungünstig waren und nicht für einen Mörtelauftrag geeignet waren. Feste Ränder waren hinderlich, um den notwendigen Anpressdruck auszuüben (vgl. Schlitten aus Stahl in Abschnitt 5.6.3.2). Mit dieser Applikationstechnik wurden die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit abgeschlossen. Diese Applikationstechik wurde kontinuierlich verbessert, mit dem Ziel einen Verbund von mehreren Applikationen aneinander ohne Lücken zu erreichen.

Die Konsistenz des Mörtels musste bei diesem Verfahren weich bis fließfähig sein, mit gezielt steuerbaren Erstarrungszeiten. Die Erstarrungszeit des Mörtels war so zu wählen, dass er flüssig genug war, um förderfähig zu sein, sich jedoch bei Verlassen der Applikationsplatte unter Wasser nicht mehr entmischte und sich auf den Betonuntergrund andrücken ließ (siehe Abbildung 5.30(a)).

Die Schichtdicke des Mörtelauftrags ergab sich aus der Höhe der Applikationsplatte (siehe Abbildung 5.30(b)). Sie wurde zu den Seiten mit Schaumstoff abgegrenzt. Der Schaumstoff war zusammendrückbar und variierbar in der Höhe. Bei diesem Verfahren war nur während eines kurzen Zeitraums ein Kontakt zwischen dem noch nicht erstarrten Frischmörtel und dem umgebenden Wasser vorhanden. Die Notwendigkeit eines sehr guten Zusammenhaltevermögens des Mörtels im noch nicht erstarrten Verarbeitungszustand ist deshalb nicht ausschlaggebend. Aufgrund der seitlich mit Schaumstoff eingegrenzten Applikationsplatte konnte das Wasser heraustreten, der Mörtel jedoch nicht.

Dieses Verfahren funktionierte deutlich besser als der Mörtelschlitten (siehe Abbildung 5.27), weil dieses Konstrukt keine starren seitlichen Kufen besaß. Das Andrücken der Applikationsplatte ermöglichte einen flächigen Auftrag bei ebener Einzelfläche.



(a) Aufsicht Applikationsplatte mit Zufuhrmöglichkeit für Schlauch

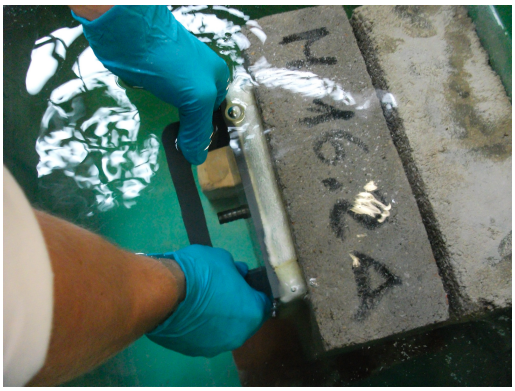
(b) Ansicht der Platte mit Schaumstoffdicke erkennbar

Abbildung 5.30.: Applikationsplatte für Auftragsverfahren

Die Abbildung 5.31(a) zeigt die Applikationsplatte, die an den Betonuntergrund in Position gebracht ist. Um eine definierte Schichtdicke und einen gewissen Anpressdruck innerhalb der Applikationsplatte zum Zeitpunkt der Applikation zu erzeugen, wurde die Applikationsplatte mit den Schaumstoffrändern bis zum Anschlag an die Betonoberfläche angedrückt (siehe Abbildung 5.31(b)). In dieser angedrückten Position blieb die Platte während des gesamten Vorganges der Applikation. Der Mörtel wurde durch einen Schlauch über den Stutzen in die Applikationsplatte gedrückt. Wie in Abbildung 5.31(c) erkennbar, wurde der vorher gefüllte Raum innerhalb der Applikationsplatte mit Mörtel von unten nach oben aufgefüllt. Dies ist gut daran zu erkennen, dass der eingebrachte Mörtel nach oben einen geraden Abschluss an der Füllgrenze bildete (siehe Abbildung 5.31(d)).



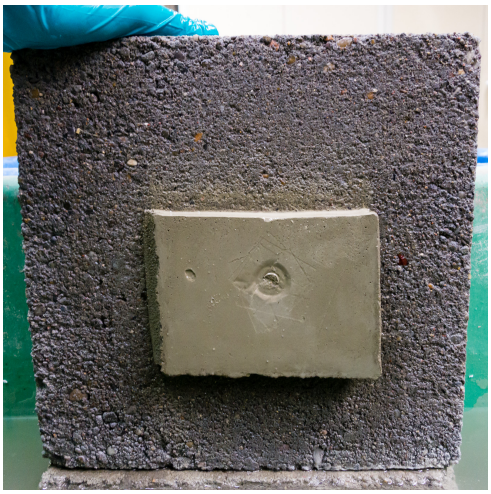
(a) Applikationsplatte an Betonoberfläche



(b) Applikationsplatte wird unter Wasser angedrückt



(c) Applikationsplatte nach Applikation



(d) Verbundprobe nach Applikation

Abbildung 5.31.: Auftragsverfahren mit Applikationsplatte

Bei diesem Verfahren kann die Applikationsplatte senkrecht abgezogen werden, weil der Mörtel vor Abnahme der Applikationsplatte bereits erstarrt ist und einen Verbund mit dem Untergrund eingegangen ist.

Dieser Ansatz wurde weiterverfolgt und modifiziert, um mit dieser Auftragstechnik möglichst größere Fläche an Mörtel unter Wasser applizieren zu können.

5.6.4.1. Gleitender Auftrag des Mörtels

Es war geplant, einen gleitenden Auftrag des Mörtels zu realisieren. An einen bereits applizierten Streifen Mörtel auf dem Betonuntergrund wurde die Applikationsplatte (siehe Abbildungen 5.33(a) und 5.33(b)) zum Aufbringen eines weiteren Mörtelstreifens angedrückt. Hierfür wurde der Schaumstoffrand auf der Seite, die auf dem vorhandenen Streifen anliegt gegen einen dünneren Rand als auf der anderen Seite der Applikationsplatte getauscht.

In Abbildung 5.32 ist schematisch dargestellt, wie der Vorgang der Applikation an einem vorher aufgebrachten Streifen ausgeführt wird: Wie in der Draufsicht zu sehen, wird die Auftragsplatte mit dem bis zu 2 cm dicken Schaumstoffrand auf die vorhandene Applikation aufgesetzt und wie in der Ansicht zu erkennen angedrückt. Die Auftragsplatte wird so angedrückt, dass der Schaumstoff auf der Seite des bereits applizierten Streifen zusammengedrückt wird, damit eine möglichst plane Oberfläche entstehen kann, wenn Mörtel für die Applikation zugeführt wird, erstarrt und eine Verbindung mit dem vorherigen Streifen und mit der Betonoberfläche eingeht.

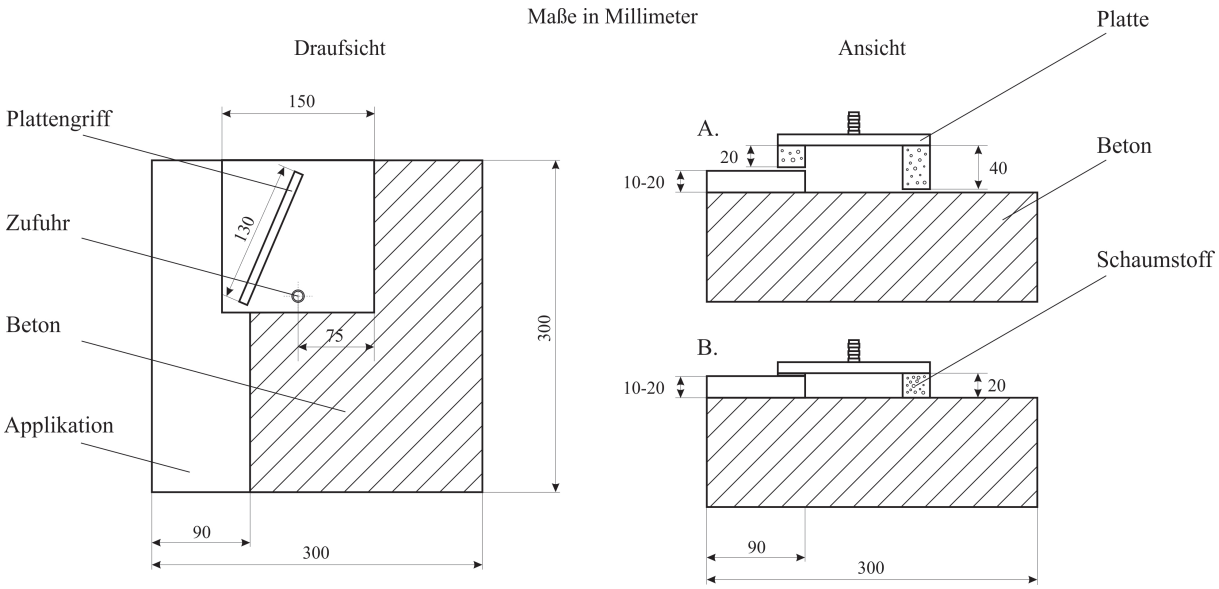
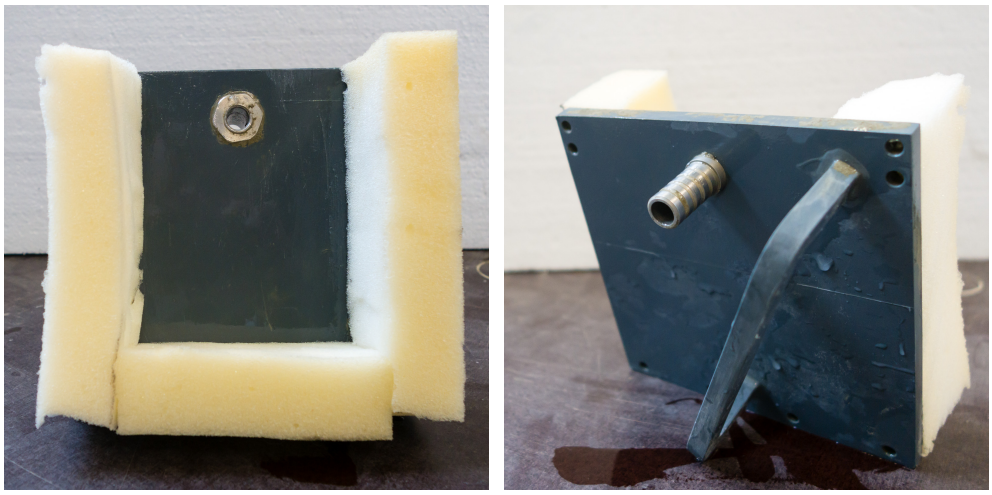


Abbildung 5.32.: Schematische Darstellung für die Applikation am Streifen

Es war geplant, dass an einem zuvor applizierten Streifen im gleitenden Vorgang Mörtel appliziert wird. Hierzu sollte die Applikationsplatte von oben nach unten (in Abbildung 5.32) während des Auftrages bewegt werden. Aufgrund des notwendigen Anpressdruckes und des kurzen Zeitfensters um den idealen Zeitpunkt für das Auftragen des Mörtels unter Wasser genau zu treffen, war die Mobilität der Platte während der Applikation eingeschränkt. Von einem gleitenden Auftrag musste abgesehen werden, weil das System so sensibel war, dass die Applikationsplatte bis zum Erstarren des Mörtels nicht bewegt oder abgenommen werden konnte. Nur so konnte sichergestellt werden, dass der Mörtel vollständig haften blieb und einen Verbund mit dem Betonuntergrund einging. Die Idee des gleitenden Auftrages wurde daher verworfen. Eine maschinelle Realisierung mit konstantem Anpressdruck und sehr langsamem Vorschub der Platte scheint aber nicht ausgeschlossen.

In Abbildung 5.33 ist die modifizierte Applikationsplatte dargestellt, vgl. Abbildung 5.32.



(a) Sicht von unten (b) Ansicht der Platte mir Griff

Abbildung 5.33.: Weitere Modifikation an der Applikationsplatte mit Schaumstoffrändern

5.6.4.2. Flächen aneinander setzen

Nachdem der gleitende Auftrag als Methode für die Applikation einer größeren Fläche nicht zielführend war, wurde der kachelförmige Auftrag von lückenlos aneinander gesetzten Einzelflächen getestet. In Abbildungen 5.34 und 5.35 ist schematisch dargestellt, wie dies durchgeführt werden sollte.

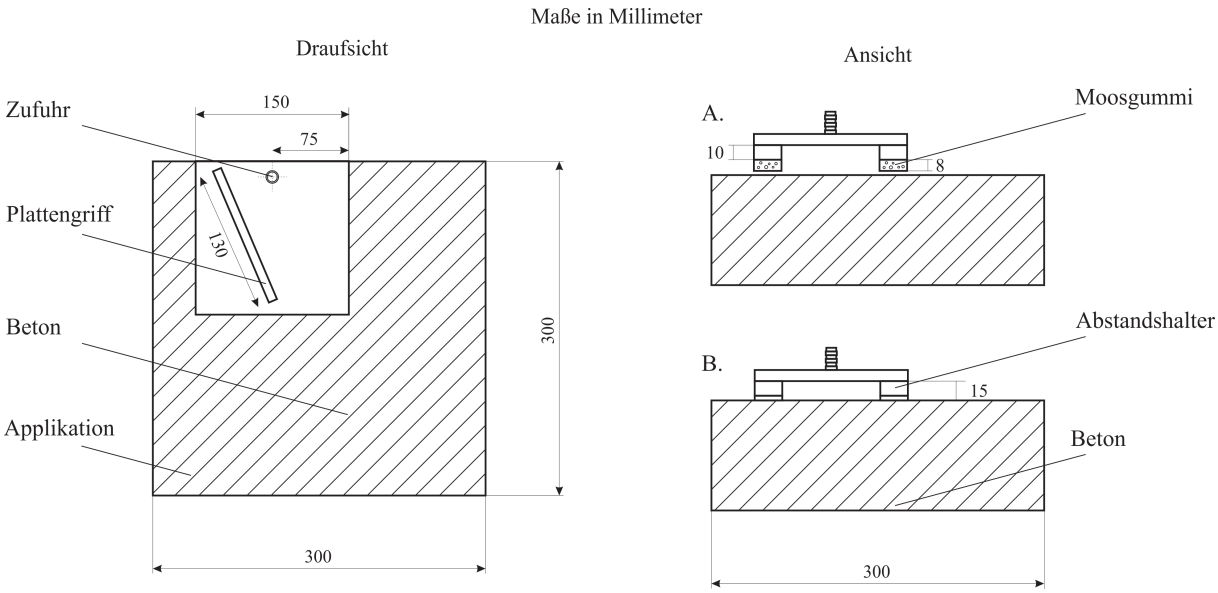


Abbildung 5.34.: Schematische Darstellung für das Aneinandersetzen von Mörtelflächen: Erster Schritt

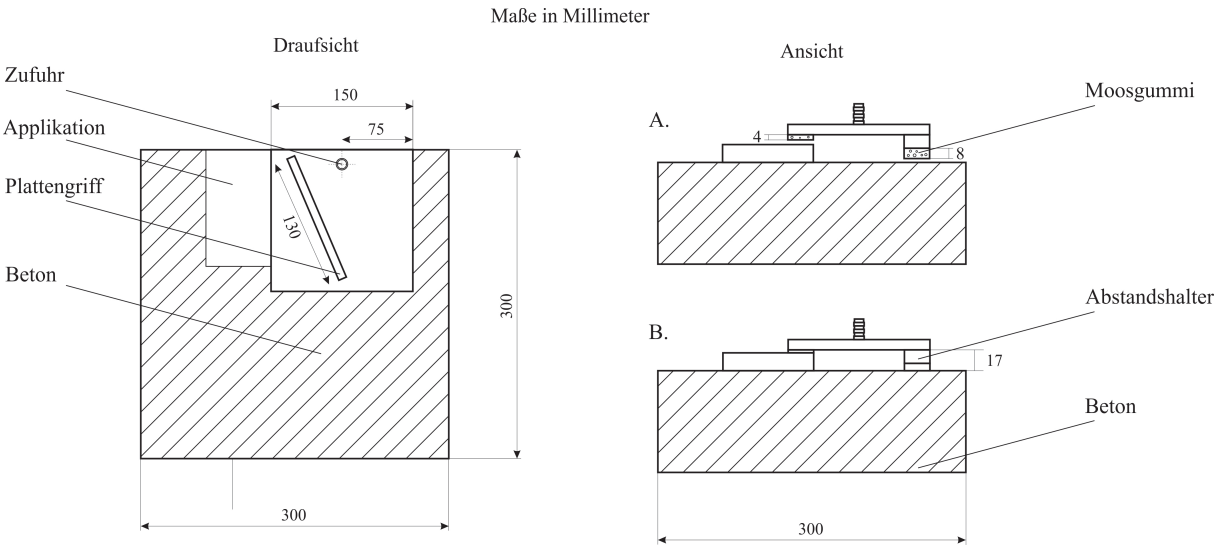


Abbildung 5.35.: Schematische Darstellung für das Aneinandersetzen von Mörtelflächen: weitere Schritte

Zum Einsatz kamen zwei Applikationsplatten gleicher Größe, jedoch mit unterschiedlich ausgeführten Moosgummi-Rändern (siehe Abbildung 5.36). Die eine Applikationsplatte (rechts in der Abbildung) besaß drei gleich hohe Ränder (1,8 cm). Sie wurde für die Applikation der ersten Mörtelfläche auf den Betonuntergrund verwendet (siehe Abbildung 5.37(a)). Die weitere Applikationsplatte hatte zu einer Seite (hier zur rechten Seite) einen weniger hohen Rand (siehe Abbildung 5.36, links).



Abbildung 5.36.: Applikationsplatten in unterschiedlicher Ausführung für Vorgehen in Abbildungen 5.34 und 5.35

Auf diese Weise konnte die zweite Platte an die Stufe angesetzt werden, die nach dem Aufbrin-

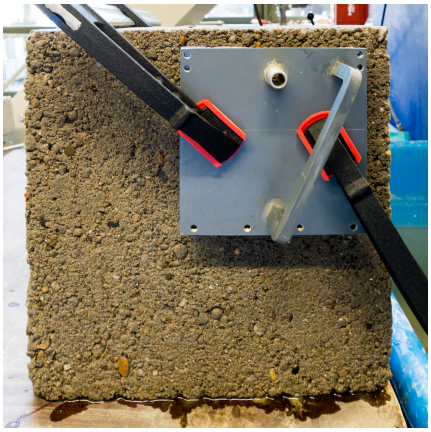
gen der ersten Mörtelkachel entstanden war (siehe Abbildung 5.37(e)). Abbildung 5.37(c) zeigt die Aufsicht der Auftragsplatte, angesetzt an die Mörtelfläche (rechts), die zuvor appliziert wurde. In die resultierende Kammer wird der Mörtel für die weitere Applikation eingebracht. Dieser Vorgang wurde mehrfach wiederholt, um eine zusammenhängende Fläche zu erzeugen. Der Gesamtablauf ist in Abbildungen 5.34 und 5.35 schematisch dargestellt und in Abbildung 5.37 im realen Versuchsablauf schrittweise gezeigt. Die ersten Versuche dieser Applikationstechnik wurden mit Arm- und Handkraft durchgeführt (siehe Abbildung 5.38(a)). Zu diesem Zweck besaß die Applikationsplatte einen Griff. Damit im weiteren Verlauf der Anpressdruck gleichmäßig und ausreichend lange war, wurde das Anpressen der Applikationsplatte mit Schraubzwingen durchgeführt (siehe Abbildung 5.38(b)). Spätere Versionen der Applikationsplatte wurden daher ohne Griff gefertigt. In den Abbildungen 5.39(b), 5.39(c) und 5.39(d) ist die Applikationsplatte nach sukzessiven Veränderungen von Versuch zu Versuch dargestellt. Die letzte Version der Applikationsplatte ist mit starren Rändern aus Kunststoff ausgestattet. Die Ränder haben 10 mm Breite und 12 mm Höhe. Auf der Unterseite der Kunststoffränder ist Moosgummi mit 8 mm Stärke angebracht. Die Variante der Platte zum Ansetzen weiterer Mörtelkacheln an eine vorhanden Applikationsfläche ist an einer Seite nur mit Moosgummi ausgestattet ohne den starren Kunststoffrand. Der Abschluss aus Moosgummi ermöglicht beim Andrücken einen dichten Abschluss zum Betonuntergrund bzw. zur nebenliegenden Applikationsfläche, ohne den vorher aufgetragenen Mörtel der nebenliegenden Fläche zu beschädigen. Gegenüber der Versionen aus Abbildung 5.33 und 5.39(a) wurden die Schaumstoffränder also durch den beschriebenen zweilagigen Aufbau ersetzt, was sich als vorteilhaft für das Aneinandersetzen mehrerer Mörtelflächen erwiesen hat. Die zuletzt genannte Applikationsplatte, die für einen flächigen Auftrag iterativ modifiziert wurde, konnte lückenlose Übergänge von nacheinander und aneinander applizierten Mörtelkacheln realisieren. Die applizierten Einzelflächen besaßen die Abmessungen von ca. 9 cm $\times$ 12 cm.

Beispielhaft zeigt Abbildung 5.40 drei lückenlos aneinander gesetzte Teilflächen, die nacheinander appliziert wurden. Die Applikationen in Abbildung 5.40 erzielten gute Übergänge.

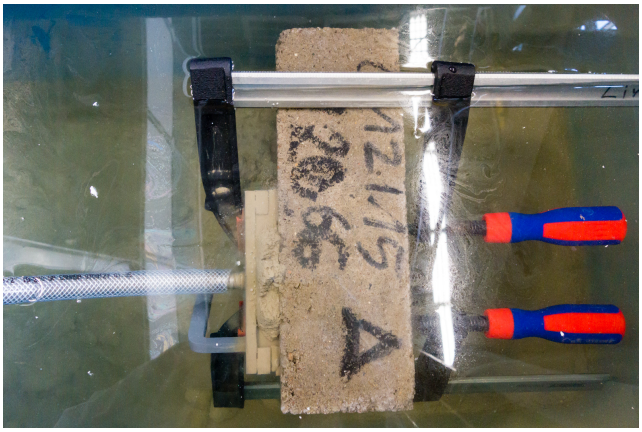
5.6.4.3. Entwicklungsschritte für das Aneinandersetzen von Mörtelflächen

Die zuletzt genannte Applikationstechnik wurde für einen flächigen Auftrag iterativ verbessert, indem auftretende Probleme gelöst bzw. nicht optimale Bedingungen verbessert wurden. Im Folgenden werden die aufgetretenen Probleme und iterativen Lösungsansätze aufgeführt.

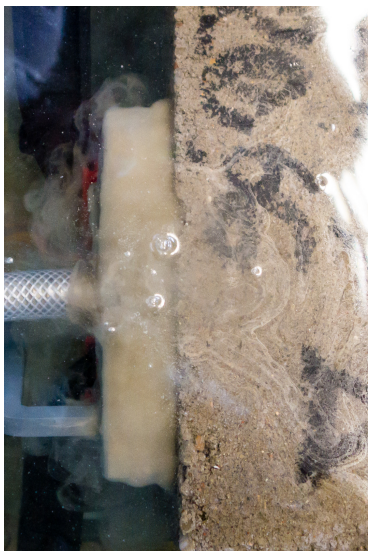
Problem: Gesteinskörnung blockierte die Öffnung der Mörtelzufuhr an der Applikationsplatte (siehe Abbildung 5.41) oder die Öffnung am Vorratsbehälter 5.41(a). Folge war ein fehlgeschlagener Versuch, bei dem kein oder nicht ausreichend Mörtel in die Applikationsplatte geführt werden konnte. Weitere Versuche wie Haftzugfestigkeitsprüfung waren aufgrund der sehr unebenen Fläche nicht möglich.



(a) Ansicht: Applikationsplatte für Auftrag Nr. 1 mit Schraubzwingen befestigt



(b) Aufsicht: Aufbau unter Wasser mit angesetztem Schlauch



(c) beim Verpressen des Mörtels in die Applikationsplatte



(d) nach Verpressen des Mörtels in die Applikationsplatte



(e) Aufsicht Applikationsplatte an vorherige Appl. befestigt



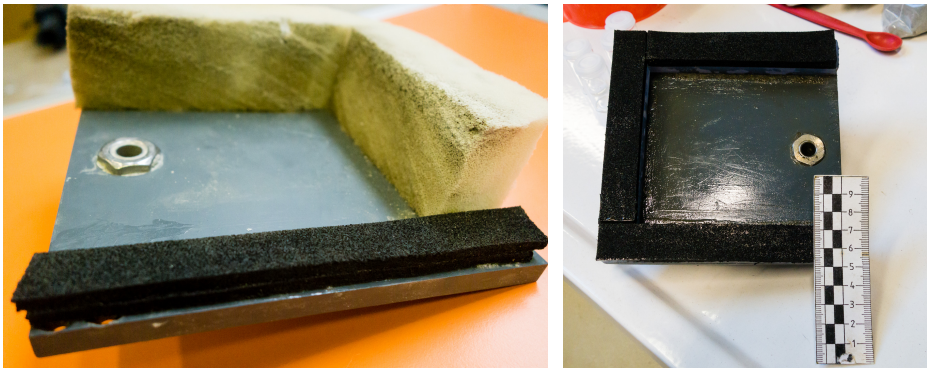
(f) Schraubzwingen mit Hilfsmaßnahme für weitere Appl.

Abbildung 5.37.: Auftrag Mörtel mit erweiterter Modifikation der Applikationsplatte

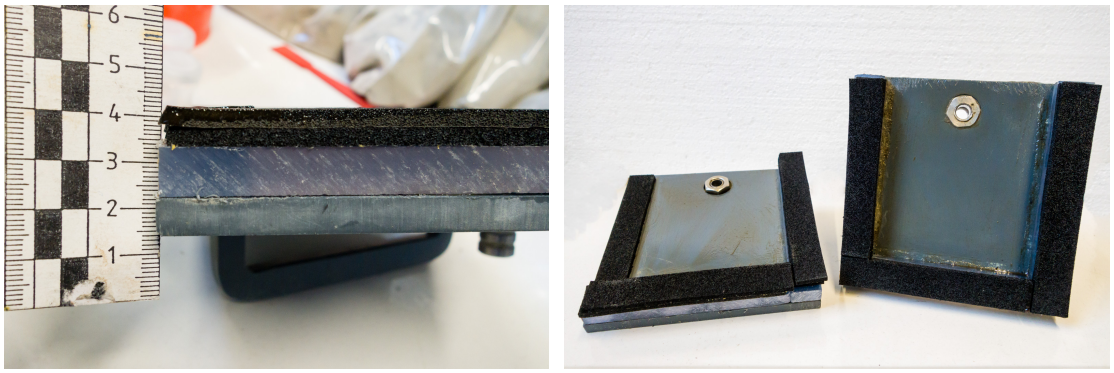


(a) Platte durch Armkraft angebracht (b) Platte mit Schraubzwingen angebracht

Abbildung 5.38.: Applizieren einer größeren Fläche, per Armkraft mit Schraubzwingen angedrückte Applikationsplatte



(a) (b)



(c) (d) Applikationsplatten

Abbildung 5.39.: Auftragsplatte vorherige und erweiterte Modifikation



(a) Auftrag Mörtelfläche 1

(b) Auftrag Mörtelfläche 2 an 1

(c) Nahaufnahme Mörtelfläche 1 und 2

(d) Auftrag Mörtelfläche 3 an 2/1

Abbildung 5.40.: Verbund von drei applizierten Mörtelflächen zu einer Gesamtfläche



(a) Verstopfte Öffnung am Vorratsbehälter

(b) Öffnung der Platte

Abbildung 5.41.: Öffnungen der Mörtelzufuhr an der Platte und an der Kartusche

Lösung: Da in dem verwendeten 0/2 mm Sand auch größere Gesteinskörnung als 2 mm vorkommen kann, wurde in Folgeversuchen der Sand gesiebt. So konnte sichergestellt werden, dass tatsächlich nur Gesteinskörnungen $\leq$ 2 mm für die weiteren Applikationsversuche verwendet wurden. Seitdem ist ein Verstopfen in der Mörtelzufuhr nicht mehr aufgetreten und die Versuche erfolgten überwiegend erfolgreich.

Problem: Bei verschiedenen Versuchen ergaben sich sehr unterschiedliche Erstarrungszeiten von Mörteln derselben Rezeptur. Das Mörtelsystem ist sehr sensibel, kleine Abweichungen, wie z. B. beim Abwiegen von Wasser, Additiven (Verzögerer) und Zusatzmittel haben sehr große Auswirkungen auf die Erstarrungszeit.

Lösung: Die Menge des Anmachwassers und flüssiger Zusatzmittel wurden auf 0,01 g genau abgewogen. Dies galt auch für Additive, wie z. B. die verzögernden Wirkstoffe, die im festen Zustand vorliegen.

Problem: Verzögernde Wirkstoffe zeigten nach längerer Lagerung Verfärbungen und Verklumpungen. Dies hatte auch zu unterschiedlichen Erstarrungszeiten geführt.

Lösung: Vermutlich haben die verzögernden Wirkstoffe Feuchtigkeit aus der Luft aufgenommen. Damit die verzögernden Wirkstoffe keine Feuchtigkeit mehr aus der Luft aufnehmen, wurden sie vor der Versuchsdurchführung am selben Tag, an dem die Versuche statt fanden, abgewogen. Lagerort für die verzögernden Wirkstoffe war ein Ekksikator, damit gewährleistet war, dass bei Lagerung keine Feuchtigkeitsaufnahme mehr in die kristallin vorliegenden Feststoffe stattfinden kann.

Problem: Bei der Entwicklung der Applikationstechnik sind genaue Erstarrungszeiten unumgänglich. Trotz schrittweiser Einführung von Qualitätsmanagement-Aufgaben (Kontrolle Ausgangsstoffe / Rohstoffe des Mörtels, siehe Abschnitt 6.3) waren die Erstarrungszeiten bei selber Rezeptur und überwachter Lagerung der Rohstoffe unterschiedlich ausgefallen. Dies führte zu fehlgeschlagenen bzw. abgebrochenen Versuchen.

Lösung: Um die Versuche zuverlässig durchzuführen, wurden die Erstarrungszeiten vor jedem Versuch neu ermittelt nach dem in Abschnitt 4.1.2 beschriebenen Verfahren. Die Applikationszeiten (Beginn der Applikation, Dauer des Anpressens) wurden an die ermittelten Zeiten individuell angepasst. Die Rate der fehlgeschlagenen Versuche konnte dadurch signifikant gesenkt werden. Auf diese Weise konnten die Versuche zur Applikationstechnik zuverlässiger weitergeführt werden.

Problem: Ungleichmäßiger Anpressdruck auf die Applikationsplatte durch Armkraft.

Lösung: Schraubzwingen wurden eingesetzt und erzeugten einen gleichmäßigen Anpressdruck.



(a) (b)

Abbildung 5.42.: Verbund zwischen aufgebrachten Mörtelschichten

Problem: Der Schaumstoff hatte sich beim Andrücken mit dem Mörtel verkeilt. Die Ränder der einzelnen Mörtelflächen waren dadurch schräg und ungleichmäßig, beispielhaft zu sehen in Abbildung 5.42. Das Ansetzen weiterer Mörtelkacheln war dadurch nicht zuverlässig und ohne Lücken möglich.

Lösung: Der Schaumstoff als Randmaterial wurde ausgetauscht, zunächst an einer Seite mit Moosgummi (siehe Abbildung 5.39(a))). Im weiteren Verlauf wurden die übrigen Ränder durch einen zweischichtigen Aufbau aus einem festen Kunststoffrand und einem Abschluss aus Moosgummi ersetzt, zu sehen in Abbildungen 5.39(b), 5.39(c) und 5.39(d). Der starre Rand ermöglichte einen graden Abschluss der Applikation. Die Moosgummischicht ermöglichte ein dichtes

Anpressen an den Untergrund und verhinderte, dass vorher applizierte Mörtelflächen beschädigt wurden, wenn neue Flächen daran angesetzt wurden.

Problem: Durch das Einpressen hat sich der Mörtel mit den Rändern der Applikationsplatte verkeilt, wie in Abbildung 5.43 erkennbar. Beim Entfernen der Applikationsplatte wurde dadurch der Mörtel wieder mit abgezogen. Die Maserung der Unterseite des abgezogenen Mörtels zeigt, dass das Anpressen an den Untergrund funktioniert hatte und der Mörtel einen Haftverbund mit dem Beton eingehen würde. Die Anfangshaftung reicht jedoch nicht, um die Applikationsplatte schadlos entfernen zu können.



Abbildung 5.43.: Kein Verbund durch eingepressten Mörtel in Applikationsplatte mit festen Rändern

Lösung: Aus diesem Grund wurde direkt im Versuch improvisiert, indem zwei Plastikstäbe als Abstandhalter zwischen Mörtel und den Plattenrändern in der Applikationsplatte eingesetzt wurden (siehe Abbildung 5.44). Die Stäbe wurden vor dem Einbringen des Mörtels angebracht. Nach dem die benötigte Mörtelmenge eingebracht war, wurden die Stäbe entfernt und die Platte anschließend mit Hilfe der Schraubzwingen angepresst. Durch den seitlichen Freiraum konnte der Mörtel sich beim Anpressvorgang ausbreiten ohne sich mit den Rändern der Platte zu verkeilen. Das Abnehmen der Platte nach erfolgter Applikation war nun problemlos möglich.



(a) Aufbau vor Versuchsbeginn



(b) Beim Einbringen des Mörtels



(c) Nach dem Entfernen der Abstandsstäbe

Abbildung 5.44.: Modifikation innerhalb des Versuches durch Abstandhalter

Die Versuche für die Anwendung verschiedener Auftragstechniken in Abschnitt 5.6 ergaben folgende Anforderungen und Kriterien:

- Es ist keine starre Konstruktion mit festen Rändern zu verwenden.
- Es sollte die Möglichkeit bestehen, variable Dicken herzustellen.
- Das Wasser muss trotz abgeschlossener Ränder austreten können.
- Die Ränder der Konstruktion müssen aus einem flexiblen bzw. komprimierbaren Material bestehen, jedoch so beschaffen sein, dass der Mörtel sich nicht mit dem Material verkeilt oder in dieses eindringt.
- Die Ränder sollen trotzdem einen festen Abschluss für den Mörtel bieten.

5.6.5. Fazit Applikationstechnik

Die umfangreichen Erprobungen verschiedener Applikationstechniken zeigen, dass ein gleichmäßiger und flächiger Anpressdruck beim Applizieren des Mörtels mechanisch aufgebracht werden muss. Die Möglichkeit eines Spritzverfahrens wurde ausführlich getestet und stellte sich als nicht realisierbar heraus. Bei der Applikation mittels eines gleitenden Schlittens war es nur in Ansätzen möglich, den nötigen Anpressdruck im Gleitvorgang aufrecht zu erhalten, um einen ausgedehnten Auftrag zu ermöglichen. Im Ergebnis ist dieser Ansatz nicht als fehlgeschlagen zu bewerten, ob eine Entwicklung eines Schlittensystem zur Anwendungsreife möglich ist, lässt sich aber noch nicht abschließend beurteilen. Die Entwicklung dieser Technik ist daher noch mit einer großen Unsicherheit behaftet.

Das senkrechte Andrücken eines in der Konsistenz eher steifen Mörtels mittels eines Stempels mit Antihaftoberfläche erzielte eine hohe Quote erfolgreicher Applikationen und die höchsten Haftzugwerte, wie die späteren Messungen in Abschnitt 6.1.1 zeigen. Für den gleichmäßigen flächigen Auftrag mit sauberen Abschlüssen und der Möglichkeit, Teilflächen zu einer großen lückenlosen Gesamtfläche aneinander zu setzen, ist das System der Applikationsplatte am vielversprechendsten. Da in der Platte ein Einfüllstutzen vorhanden ist und der Mörtel hier eine recht weiche Konsistenz haben kann, ist bei dieser Technik auch eine Mörtelzufuhr aus einer Zufuhreinheit über Wasser möglich.

Die Versuche zeigten, dass ein flexibler Rand als Abschluss der Platte notwendig ist. Jedoch darf der Rand nicht aus offenporigem Material bestehen, um ein Verkeilen des Mörtels mit der Platte zu verhindern. Ein Rand aus Gummi mit einem Hohlraum oder ein Schaumstoff mit geschlossener Oberfläche wären mögliche Ansätze, die sich weiter verfolgen ließen. Die bisher getestete Randkonstruktion aus Moosgummi hat bereits vielversprechende Ergebnisse ermöglicht. Ein noch kontrollierteres Anpressen der Applikationsplatte und eine gleichmäßigere Verteilung des Anpressdrucks wären weitere Verbesserungsansätze, um die erreichbaren Haftzugwerte dieser Technik zu steigern.

6. Verbundeigenschaften und Qualitätsmanagement inklusive Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse zu Verbundeigenschaften und mögliche Applikationstechniken vorgestellt. Des weiteren werden erforderliche Qualitätsmanagement-Aufgaben zu dem Thema der Betoninstandsetzung unter Wasser vorgestellt, die sich im Rahmen dieser Arbeit aufgrund der sensiblen Mörtelsysteme ergeben haben.

6.1. Verbundeigenschaften

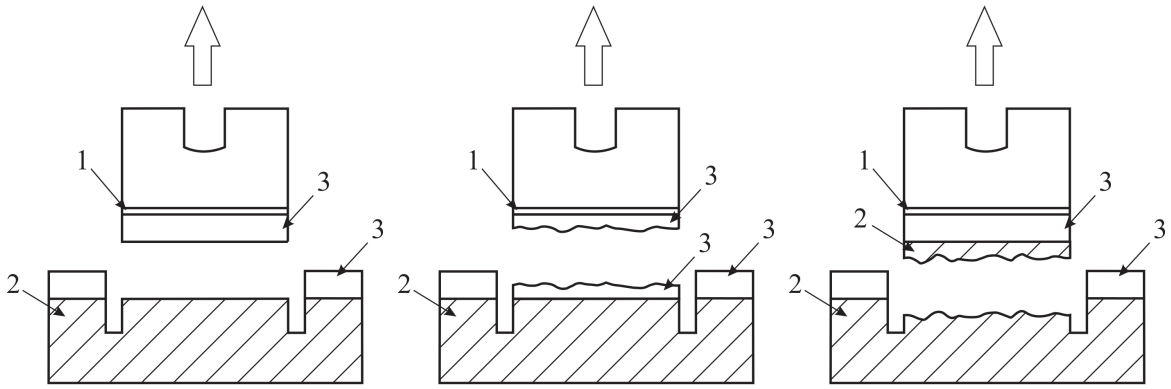
6.1.1. Erreichte Haftzugfestigkeiten

Die Haftzugfestigkeit wurde jeweils sieben Tage nach Herstellung des Verbundes nach DIN EN 1542 [46] geprüft (Versuchsbeschreibung siehe Abschnitt 4.3.1). Mit Hilfe der Haftzugfestigkeiten konnten die unterschiedlichen Mörtel für die Unterwasseranwendung beurteilt und untereinander verglichen werden. Ebenso gab die Haftzugfestigkeit Aufschluss darüber, in welche Richtung die Mörteloptimierung vorangetrieben werden sollte, da dies ein iterativer Prozess war (siehe Abschnitt 5.1 zur Herangehensweise).

Nach Durchführung der Haftzugfestigkeitsprüfung (Vorgehensweise siehe Abschnitt 4.3.1) wurden die Versagensarten, wie in Abbildung 6.1 beispielhaft dargestellt, bestimmt. Unter einem Adhäsionsversagen wird das Versagen zwischen Mörtel und Beton verstanden (siehe Abbildung 6.1(a)) und unter einem Kohäsionsversagen das Versagen innerhalb eines Stoffes, in Abbildung 6.1(b) Versagen innerhalb des Mörtels / Applikation und in Abbildung 6.1(c) Versagen innerhalb des Betonuntergrundes.

Wie in Abschnitt 2.3 aufgeführt, beträgt die geforderte Haftzugfestigkeit für den Verbund zwischen Instandsetzungsmörtel und Betonuntergrund nach ZTV-ING im Mittel 1,5 N/mm^2 und für den zulässigen kleinsten Einzelwert 1,0 N/mm^2 [22].

Im Folgenden werden Haftzugfestigkeiten der Verbundproben während der Rezepturentwicklung (Abschnitt 6.1.1.1) und während der Entwicklung der Applikationstechnik (Abschnitt 6.1.1.2) aufgeführt. Sie unterscheiden sich in der Anzahl der gewonnenen Haftzugfestigkeiten. Während der Rezepturentwicklung wurden Versuchsreihen von mehreren Rezepturen und ihrem erreichten Verbund untersucht. Auch Variationen von Betonuntergrundsorte und verwendeter Seite der Betonprobe für die Applikation wurden durchgeführt. Jede Verbundprobe hat



1. Kleber
2. Beton
3. Applikation

(a) Adhäsionsversagen zwischen Mörtel und Beton

1. Kleber
2. Beton
3. Applikation

(b) Kohäsionsversagen in der Applikation bzw. Mörtel

1. Kleber
2. Beton
3. Applikation

(c) Kohäsionsversagen im Beton

Abbildung 6.1.: Mögliche Versagensarten nach Durchführung der Haftzugfestigkeitsprüfung

bei der Rezepturentwicklung fünf Messwerte der Haftzugfestigkeit ergeben. Während der Suche nach einer geeigneten Applikationstechnik war die Anzahl der gewonnenen Haftzugfestigkeiten je nach Applikationstechnik jedoch sehr unterschiedlich. Die Anzahl je Verbundprobe variierte von ein bis vier Haftzugfestigkeiten je Verbundprobe.

6.1.1.1. Untersuchungen an Verbundproben während der Rezepturentwicklung

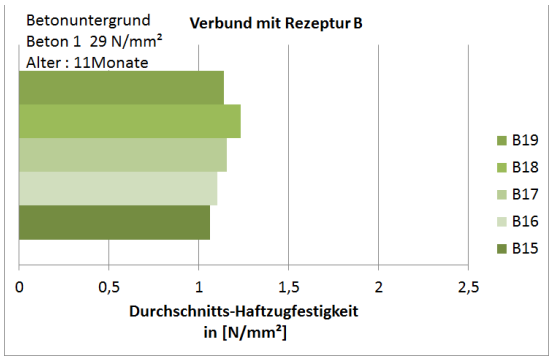
In diesem Abschnitt beziehen sich die Ergebnisse für die Haftzugfestigkeit auf waagerecht aufgebrachte Mörtel unter Wasser. Da zu diesem Zeitpunkt noch keine geeignete Applikationstechnik für eine senkrechte Applikation zur Verfügung stand und weil geprüft werden musste, ob ein geeigneter Mörtel unter Wasser aufgebracht werden kann und dabei einen guten Haftverbund zwischen Mörtel und Betonuntergrund erzielen kann, wurde der Mörtel auf waagerechte Flächen aufgebracht.

Die Haftzugfestigkeiten für die Rezepturen B, H, T und W ließen darauf schließen, dass unabhängig von der Qualität des Untergrundes (unterschiedliche Festigkeitsklassen) ein guter Haftverbund zwischen Mörtel und Beton erzielt wurde. Für die vorgenannten Rezepturen wurden je zwischen 100 und 160 Einzelwerte von Haftzugfestigkeiten geprüft.

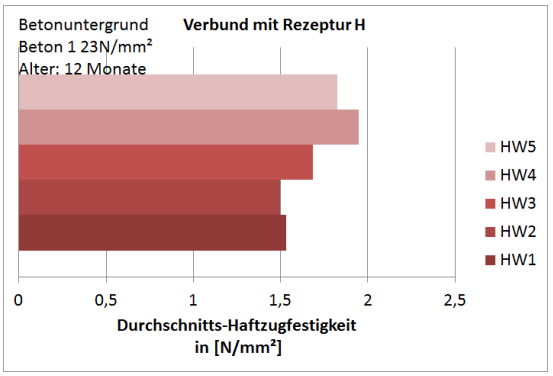
In Reihenuntersuchungen wurden systematisch für jede vorgenannte Rezeptur je Betonsorte 10 Verbundproben hergestellt. Jede Verbundprobe ermöglichte 5 Messungen - insgesamt wurden also 100 Haftzugmessungen je Rezeptur durchgeführt, davon je Betonsorte 50 Haftzugmessungen.

Die Höhe der Haftzugfestigkeit und die damit verbundene Qualität des Haftverbundes war von der Betonsorte unabhängig.

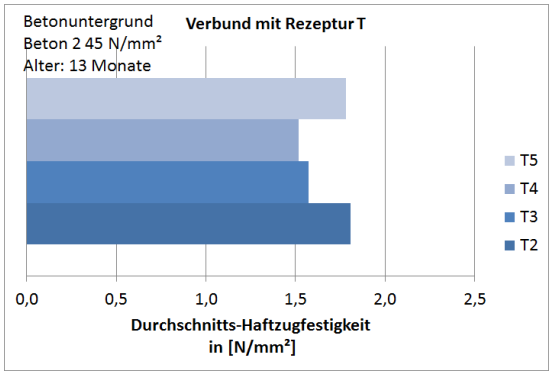
In Abbildung 6.2 sind beispielhaft Haftzugfestigkeiten der Verbundkörper, die mit den Rezepturen B, H, T und W unter Wasser appliziert wurden, abgebildet. Hinter einem Balken stecken i. d. R. fünf Messwerte, die zu einer Durchschnitts-Haftzugfestigkeit zusammengefasst wurden (nur B24 und B22 in Abbildung 6.2(a) und T3 und T4 in Abbildung 6.2(c) sind der Durchschnitt von vier Einzelwerten auf einer Verbundprobe).



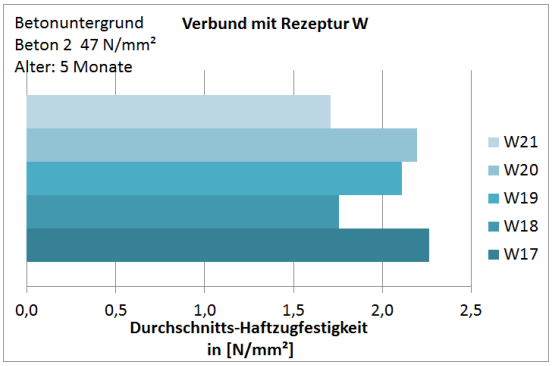
(a) Haftzugwerte für Rezeptur B auf Beton 1



(b) Haftzugwerte für Rezeptur H auf Beton 1 Werte aus [84]



(c) Haftzugwerte für Rezeptur T auf Beton 2



(d) Haftzugwerte für Rezeptur W auf Beton 2

Abbildung 6.2.: Haftzugfestigkeiten der Verbundkörper mit Rezepturen B, H, T und W

Die Zahlen neben den Rezepturbuchstaben entspringen einer Nummerierung der fortlaufenden Versuche. Die Durchschnitts-Haftzugfestigkeiten für den Verbund mit Rezeptur B fielen überwiegend unter den erforderlichen 1,5 N/mm^2 aus, siehe beispielhaft in Abbildung 6.2(a). Beim Verbund mit Rezeptur H wiederum haben sich in [84] Durchschnitts-Haftzugfestigkeiten von über 1,5 N/mm^2 gezeigt (siehe Abbildung 6.2(b)). Abbildung 6.2(c) zeigt den Verbund mit Rezeptur T. Die Durchschnitts-Haftzugfestigkeiten weisen überwiegend ein Übertreffen der geforderten Haftzugfestigkeit auf. Rezeptur W zeigte beispielhaft in Abbildung 6.2(d), dass nicht nur die geforderte Haftzugfestigkeit eingehalten werden kann, sondern, dass sie auch deutlich übertroffen werden kann.

Eigene Versuchsreichen und solche von JORDAN (2012) [84] zeigten, dass die Haftzugfestigkeiten sehr streuen konnten. Zur Qualität der Verbundfestigkeiten ließen sich jedoch folgende Tendenzen ablesen:

- Rezeptur B aufgetragen auf die Betonsorte „Beton 2“ zeigte sowohl ein Kohäsionsversagen im Mörtel als auch im Beton, aufgetragen auf die Betonsorte „Beton 1“ tritt eher ein Kohäsionsversagen im Beton auf.

- Rezeptur H auf beiden Betonsorten aufgetragen wies alle Versagensarten gleichermaßen auf.

- Rezeptur T aufgetragen auf die Betonsorte „Beton 2“ wies eher ein Adhäsionsversagen zwischen Mörtel und Beton auf und beim „Beton 1“ ist überwiegend mit einem Kohäsionsversagen im Beton zu rechnen.

- Rezeptur W sowohl aufgetragen auf die Betonsorte „Beton 1“ als auch auf die Betonsorte „Beton 2“ führte meist zu einem Kohäsionsversagen im Beton.

In Tabelle 6.1 sind einige erreichte max. Haftzugfestigkeiten (max. Einzelwert und max. Durchschnittswert aus vier oder fünf Einzelwerten) aufgelistet. Dies zeigt, dass sehr hohe Haftzugfestigkeiten durch den Mörtelauftrag unter Wasser erreicht wurden. Auf Basis dieser Ergebnisse wurde die Entwicklung einer Applikationstechnik begonnen. Beim Verbund mit Rezeptur B wa-

Tabelle 6.1.: Auszug erreichter max. Haftzugfestigkeiten verschiedener Rezepturen

Rezeptur	Haftzugfestigkeit max. Einzelwert [N/mm^2]	Haftzugfestigkeit max. Durchschnittswert [N/mm^2]
B	3,33	2,36
H	2,82	2,46
T	2,73	2,20
W	2,85	2,20

ren die Verbundprüfungen im weiteren Verlauf deutlich unter 1,5 N/mm^2 geblieben. Aus diesem Grund wurde diese Rezeptur im weiteren Prozess bei der Entwicklung eines Instandsetzungsverfahrens nicht verwendet. Die Rezeptur B zeigte auch eine schlechtere Verarbeitbarkeit im Vergleich zu den anderen Rezepturen. Die Rezeptur H erreichte in den Versuchsreihen für Verbunduntersuchungen als Durchschnittswert (von fünf Einzelwerten je Betonprobe) für die Haftzugfestigkeit oft über 1,5 N/mm^2. Nur teilweise lagen die Durchschnittswerte unter 1,5 N/mm^2, jedoch stets über 1 N/mm^2 (siehe Abbildung D.1). Der Verbund mit Rezeptur T hat im Durchschnitt Haftzugfestigkeiten über 1,5 N/mm^2 erreicht. Applikationen mit der Rezeptur W erzielten für die Haftzugfestigkeit als Durchschnittswert aus fünf Einzelwerten auf einer Verbundprobe stets über 1 N/mm^2 und mehrheitlich mehr als 1,5 N/mm^2.

Im Rahmen der Weiterentwicklung der Rezepturen und der Applikationstechnik-Entwicklung wurden die Rezepturen H und W verwendet. Rezeptur H wurde für den Beginn der Entwicklung eines Auftragsverfahrens durch Andrücken (siehe Abschnitt 5.6.1) eingesetzt, weil ein knetbarer Mörtel für dieses Verfahren erforderlich war. Die Rezeptur W wurde für die Erprobung eines kontinuierlichen, flächigen Auftrages (siehe Abschnitt 5.6.4) verwendet.

Die Versagensart des Kohäsionsversagens im Beton trat in den vorgenannten Versuchsreihen bei beiden Betonsorten „Beton 1“ und „Beton 2“ gleichermaßen auf, insbesondere beim Verbund mit den Rezepturen H und W. Bei der Rezeptur B trat Kohäsionsversagen im Beton eher bei „Beton 2“ auf und mit der Rezeptur T bei „Beton 1“. Ein Kohäsionsversagen im Beton zeigt, dass der Verbund zwischen Mörtel und Beton größer ist, als die Abreißfestigkeit des Betons. Unabhängig von den gemessenen Haftzugwerten sind diese Ergebnisse als erfolgreicher Haftverbund zu bewerten und ein deutliches Indiz für die Realisierbarkeit eines dauerhaften Mörtelauftrags unter Wasser.

Das Alter und die Druckfestigkeit der Betonprobekörper hat bei der Haftzugfestigkeit sicherlich eine Relevanz. Eine genaue Aussage kann mit den vorliegenden Ergebnissen nicht getroffen werden.

Des Weiteren wurde in Abschnitt D.2 untersucht, welchen Einfluss es hat, ob die Applikation auf der Abgleichseite oder auf der Unterseite der Beton-Probekörper stattfindet. Die Probekörper wurden beidseitig für Applikationsversuche verwendet. Die Abbildungen D.2 und D.3 deuteten darauf hin, dass der Verbund auf der Abgleichseite geringere Haftzugfestigkeiten aufwies. Diese Tendenz bestätigt sich jedoch nicht beim Vergleich der Abbildungen D.2(c) und 6.2(d). Die Abbildung 6.2(d) zeigt auf der Abgleichseite sehr hohe Haftzugfestigkeiten.

Die Untersuchung der Verbundkörper mittels Haftzugfestigkeitsermittlung zeigte, dass die Zugabe von Polymerdispersionen zu keiner Erhöhung der Haftzugfestigkeit beitrug. Erwähnenswert ist ein Ergebnis aus der Versuchsreihe in [84], in der die polymermodifizierten Mörtel unter Wasser einen besseren Verbund eingingen als bei ihrer Applikation an Luft.

Die Qualität (Festigkeit und Abreißfestigkeit) der Betonflächen hatte den Untersuchungen zufolge keinen direkten Einfluss auf die Haftzugfestigkeiten der Mörtel-Beton-Verbundproben. Jedoch spielten die vorher aufgerauten Betonflächen und deren Oberflächenvorbereitung eine Rolle (siehe Abschnitt 5.2.1.3). Der zeitliche Abstand zwischen Sandstrahlen und Verbundherstellung zeigte keinen Einfluss auf die Haftzugfestigkeiten und den Verbund. Bei längeren Zeiträumen in anderem Milieu als Trinkwasser ist jedoch mit einem möglichen Einfluss zu rechnen. Auch die Festigkeitsklasse der Betonproben zeigte keinen besonderen Einfluss auf die Qualität des Verbundes.

6.1.1.2. Untersuchungen an Verbundproben während der Entwicklung der Applikationstechnik

Für den Auftrag des Mörtels unter Wasser auf senkrecht stehende Betonprobekörper wurde Rezeptur H gewählt, weil aus einer Vielzahl von Untersuchungen der Haftzugfestigkeiten alle Durchschnittswerte stets Werte größer 1 N/mm^2 erreichten und überwiegend auch 1,5 N/mm^2 übertrafen (siehe Abbildung D.1 im Anhang).

In Tabelle 6.2 sind auszugsweise erreichte Haftzugfestigkeiten von Verbundprobekörpern aufgelistet. Die Zusammensetzung der verwendeten Rezepturen sind in Tabelle 5.17 im Abschnitt 5.5 aufgeführt.

Diese Verbundkörper wurden mit verschiedenen Auftragstechniken aus Kapitel 5.6 und verschiedenen Rezepturen aus Abschnitt 5.5 auf senkrecht aufgestellten Betonproben unter Wasser aufgebracht. Die Werte liegen alle deutlich über 1 N/mm^2, größtenteils auch deutlich über den angestrebten 1,5 N/mm^2.

Tabelle 6.2.: Auszug erreichter Haftzugfestigkeiten verschiedener Auftragstechniken

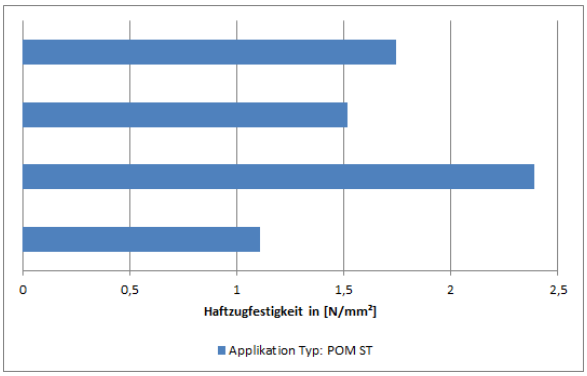
Rezeptur	Applikationstechnik	Haftzugfestigkeit Einzelwert [N/mm^2]
H	Kelle	1,78
H	MSK	1,4
H	Stempel (ST)	1,71
H	Stempel (ST)	1,32
H	Gleitschlitten	1,71
M	POM Stempel (POM-ST)	2,39
M	POM Stempel (POM-ST)	1,80
M	POM Stempel (POM-ST)	1,63
W	Applikationsplatte	1,24
D	Applikationsplatte	1,65

In Abbildung E.1 im Anhang sind Einzelwerte von Haftzugprüfungen dargestellt, die mit dem Stempel (ST, siehe Abb. 5.19) und der Rezeptur H unter Wasser aufgebracht wurden. Alle 21 Werte der Haftzugprüfung sind größer 0,5 N/mm^2, siebzehn von diesen sind größer 1 N/mm^2 und drei Werte für die Haftzugfestigkeit größer als 1,5 N/mm^2. Einzelwerte der Haftzugfestigkeit für den Auftrag mit dem Stempel aus POM (POM-ST, siehe Abbildung 5.20 im Anhang) zeigten, dass 17 von 27 Haftzugfestigkeiten größer 1 N/mm^2, sieben größer 1,5 N/mm^2 und nur drei unter 0,5 N/mm^2 betrugen. In Abbildung E.2 im Anhang sind diese Ergebnisse im Diagramm dargestellt.

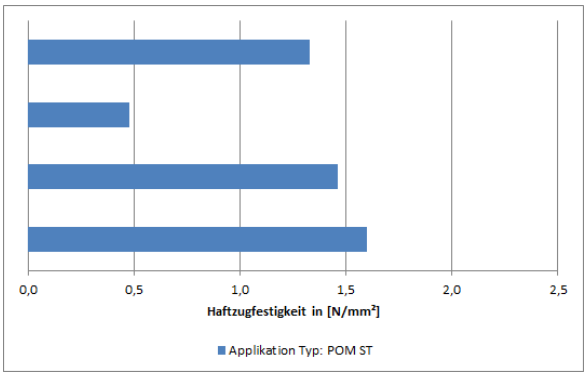
Diese Werte sind zwar Einzelwerte und keine Durchschnittswerte, zeigen jedoch, dass auch unter Wasser mit auf senkrechten Flächen aufgebrachtem Mörtel ein guter Verbund zu erzielen ist.

In Abbildung 6.3 sind die Haftzugfestigkeiten von drei Verbundkörpern dargestellt. An jedem Verbundprobekörper konnten vier Haftzugfestigkeiten von erfolgreich aufgebrachtem Mörtel unter Wasser mit der Rezeptur M und dem POM Stempel (POM-ST) ermittelt werden.

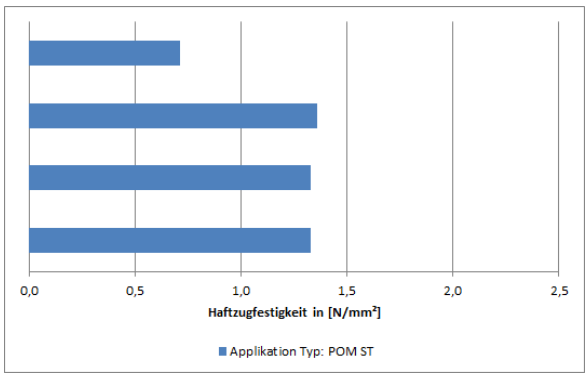
Mit der Rezeptur M und POM Stempel (POM-ST, siehe Abb. 5.20) als Applikationstechnik wurde in [186] 2,39 N/mm^2 als maximaler Einzelwert erreicht (siehe Abbildung 6.3(a)). Der Durchschnittswert aus den vier Einzelwerten auf einer Verbundprobe betrug 1,689 N/mm^2.



(a) Verbundprobe 1



(b) Verbundprobe 2



(c) Verbundprobe 3

Abbildung 6.3.: Haftzugfestigkeiten der Verbundkörper mit Rezepturen M auf Beton 2

Weitere Durchschnittswerte aus den vier Einzelwerten in Abb. 6.3(b) betrugen 1,22 und den Einzelwerten in Abb. 6.3(c)) 1,18 N/mm^2.

Mit der Applikationsplatte aus Abschnitt 5.6.4 konnten Haftzugfestigkeiten von bis zu 1,65 N/mm^2 (Einzelwerte) erreicht werden. Mittelwerte aus jeweils drei Einzelwerten wurden erzielt mit 1,0 N/mm^2 und 1,1 N/mm^2 mit Rezeptur W und 1,37 N/mm^2 mit Rezeptur D Mod (modifizierte Wassermenge und ohne Polymer). Als Versagensarten zeigten diese Haftzugprüfungen Kohäsionsversagen im Beton, so dass unabhängig von den gemessenen Festigkeiten ein funktionierender Haftverbund vorlag.

Von den Rezepturen W, D (mit Polymer), D Mod (modifizierte Wassermenge und ohne Polymer) und E sind in Abbildung 6.4 die Haftzugfestigkeiten, die mit angedrückter Platte und Schaumstoffrändern bzw. Modifikationen der Platte (siehe Abschnitt 5.6.4.3) realisiert wurden, dargestellt.

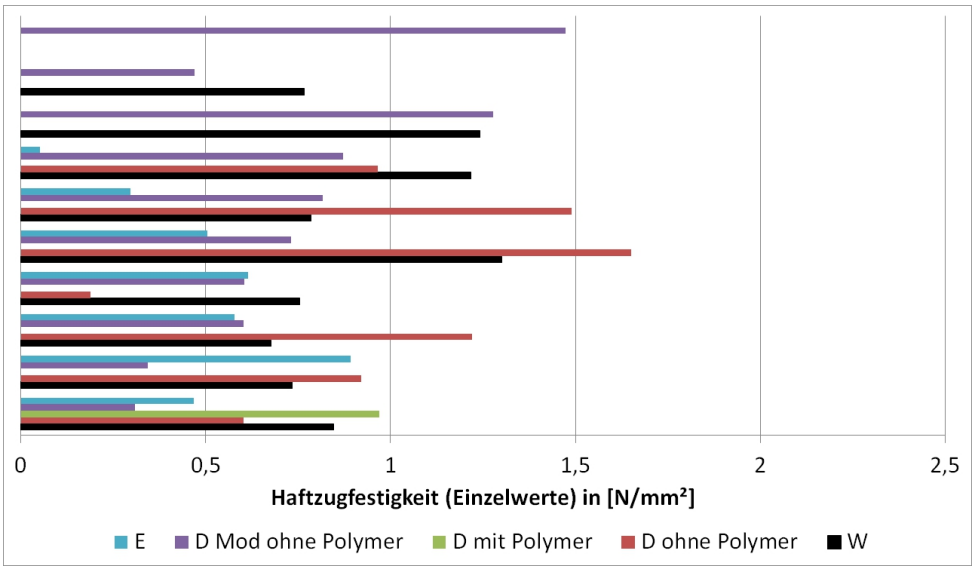


Abbildung 6.4.: Haftzugfestigkeiten (Einzelwerte) Mörtel mit angedrückter Platte aufgetragen, versch. Rezepturen

Die Abbildung 6.4 lässt nicht direkt auf die Qualität der Rezepturen schließen. Vielmehr sind aufgrund dessen, dass diese Versuche kontinuierlich verändert und verbessert wurden die Messwerte nicht untereinander direkt vergleichbar. Das Diagramm zeigt aber, das mittlere bis hohe Haftzugfestigkeiten mit dem verwendeten Applikationsverfahren erreicht wurden.

Bei der Applikation mit POM ST wurden mit den Rezepturen mit Polymer deutlich höhere Haftzugfestigkeiten erreicht als ohne Zugabe eines Polymers. Bei der Applikation mit der Applikationsplatte hingegen war dies bei den Rezepturen mit Polymer nicht der Fall. Anhand der vorliegenden Ergebnisse aus den Haftzugprüfungen zu dieser Applikationstechnik ist keine signifikante Zuordnung hoher oder niedriger Haftzugfestigkeiten zur Zugabe oder Nichtzugabe eines Polymers möglich. Wahrscheinlicher ist der Rückschluss auf einen unterschiedlich hohen Anpressdruck, wie vergleichsweise beim Versuch beim Andrücken mit dem Stempel POM ST.

Mit der Applikationsplatte wurden Versuche zunächst per „Arm-Andrückkraft“ und im späteren Verlauf mit Schraubzwingen, die kurz vor Erstarrungsbeginn enger verschraubt wurden, durchgeführt. „D Mod“ (ohne Polymer) in Abbildung 6.4 wurde per Armkraft angedrückt und wies Ergebnisse überwiegend über 0,5 N/mm^2 und wenige über 1 N/mm^2 auf.

Weitere Versuche zeigten bei haften gebliebenen Applikationen mit der selben Methode der Applikationsplatte und weiteren Modifikationen der Auftragstechnik Haftzugfestigkeiten von unter 1 N/mm^2. Dies zeigt wiederum die Sensibilität des bisherigen Instandsetzungsverfahrens. Die Mörtelrezeptur, Zeitpunkte des Anmischens und des Einfüllens in den Vorratsbehälter und in die Applikationsplatte und Andrücken der Platte kurz vor Erstarrungsbeginn spielen eine sehr große Rolle.

Ist z. B. der Zeitpunkt des Andrückens zu früh, so verursacht der angewendete Anpressdruck ein Austreten aus der Applikationsplatte und durch den noch nicht eingetretenen Erstarrungsprozess des Mörtels geht dieser keinen guten Verbund mit dem Untergrund ein. Ist der Zeitpunkt des Andrückens zu spät, so verhindert der vorangeschrittene Erstarrungsprozess den Verbund mit dem Untergrund.

6.1.1.3. Fazit Haftzugprüfungen

Haftzugprüfungen waren der wichtigste Indikator für die Bewertung der hergestellten Verbundproben. Ein hoher Haftzugwert bedeutet, dass Mörtel und Betonuntergrund einen stabilen Verbund eingegangen sind und die Applikation erfolgreich war. Im Rahmen der durchgeführten umfangreichen Messreihen wurde eine Vielzahl hoher Haftzugwerte gemessen. Folglich ist es wiederholt und bei vielen Verbundproben gelungen, Mörtel unter Wasser zu applizieren und einen stabilen Verbund herzustellen. Der angestrebte Wert von 1,5 N/mm^2 ist dabei nicht als scharfer Grenzwert, sondern vielmehr als Richtwert zu verstehen. Auch bei Haftzugmessungen die unter diesem Wert liegen, kann ein ausreichender Verbund vorliegen, wenn der Mörtel dauerhaft auf der Betonoberfläche haftet. Dies gilt insbesondere, da auch bei Haftzugwerten unter 1,5 N/mm^2 Kohäsionsversagen im Beton zu beobachten war. Bei der Bewertung der Haftzugmesswerte ist daher die Versagensart mit zu berücksichtigen. Unabhängig von dem erreichten Haftzugwert ist bei Kohäsionsversagen im Beton von einem erfolgreichen Haftverbund auszugehen, die tatsächliche Belastbarkeit des Verbunds war in diesen Fällen nicht messbar.

Da auch bei gleichem Betonuntergrund, Mörtel und Applikationstechnik die Einzelwerte der Haftzugmessungen deutlich streuen können, ist eine Betrachtung von Mittelwerten über mehrere Messungen am aussagekräftigsten. Diese Streuung zeigt auch, wie wichtig ein präzises Vorgehen bei der Mörtelherstellung und Applikation ist und dass viele Faktoren das Ergebnis der Applikation beeinflussen können. Das auch wiederholt niedrige Haftzugwerte gemessen wurden oder aufgrund fehlgeschlagener Applikationen gar keine Haftzugmessung möglich war, unterstreicht dies. Es zeigt vor allem auch, dass es eingehender Entwicklung und Abstimmung von Mörtel und Applikationstechnik bedarf und die erfolgreiche Applikation von Mörtel unter Wasser eine anspruchsvolle Aufgabe bleibt.

Im weiteren Schritt, um einen möglichst guten und dauerhaften Verbund zwischen Mörtel und Beton zu erzielen, ist die Qualität des Mörtels an den Untergrund anzupassen. Neu aufgebrachte Instandsetzungsstoffe (Mörtel / Beton) können sich mit der Zeit vom Betonuntergrund (Altbeton) lösen. Dies geschieht infolge Schwinden, Kriechen, thermischen Spannungen und durch dynamische Beanspruchungen und führt zum Ablösen des neu aufgebrachten Betons. RISTIC gibt Empfehlungen an, wie das Wirken der inneren Kräfte zwischen neuem und alten Beton minimiert werden kann. [144]:

- Druckfestigkeit des Altbetons > Druckfestigkeit des Neubetons bzw. Mörtel
- Elastizitätsmodul des Altbetons > Elastizitätsmodul des Neubetons
- w/z-Wert < 0,45, damit Schwindmaß reduziert
- Störungen durch Schwingungen und Vibrationen meiden, Schwingungen können die Kontaktfläche beeinträchtigen

Auch in DIN EN 1504-10 [45] wird empfohlen, dass die Haftzugfestigkeit zwischen Mörtel und Beton nicht größer als die Zugfestigkeit des Betons sein sollte. DIN EN 1504-10 [45] gibt eine Mindest-Haftzugfestigkeit von 1,2 bis 1,5 N/mm^2 für statisch relevante und einen Mindestwert von 0,7 N/mm^2 für statisch nicht relevante Instandsetzungen vor.

6.1.2. Mikroskopische Beobachtungen

In einer studentischen Arbeit [117] hatte sich gezeigt, dass die Untersuchung der Verbundzone mit Hilfe der optischen Auflichtmikroskopie nicht geeignet ist, um die Qualität in der Verbundzone zwischen Beton und Mörtel zu beschreiben und zu analysieren. Es wurden daraufhin von einigen Verbundproben, die sehr hohe Haftzugfestigkeiten erreichten, für das Raster-Elektronen-Mikroskop (REM) Proben präpariert und untersucht. Es war schwierig, den genauen Übergang an der Grenze zwischen Beton und Mörtel auszumachen. Dies wies daher auf einen sehr guten Verbund hin. Mittels REM wurden keine interpretierbaren Ergebnisse bezogen auf den Verbund erzeugt. Die betrachteten Proben zeigten zwischen hohen und niedrigen Haftzugfestigkeiten keine signifikanten Unterschiede des Verbundes, wegen der vorgenannten Schwierigkeit die Grenzfläche genau zu bestimmen.

Daraufhin wurden mehrere Proben als Dünnschliffe aufbereitet und untersucht. Die Untersuchung wurde mit einem Polarisationsmikroskop durchgeführt. Dabei handelt es sich um ein spezielles Durchlichtmikroskop, bei dem ein Polarisationsfilter vor der Probe angebracht ist und ein weiterer, mit dazu senkrechter Polarisationsebene, nach der Probe in den Strahlengang eingeschaltet werden kann. So sind zwei optische Untersuchungen möglich: Die Betrachtung des normalen vergrößerten Durchlichtbildes im polarisierten Licht und eine Untersuchung mit gekreuzten Polarisatoren. Im letzteren Fall sind die beiden linearen Polarisationsfilter senkrecht

zueinander (gekreuzt) angeordnet. Durch den ersten Filter tritt nur linear polarisiertes Licht einer Richtung durch die betrachtete Probe. Der zweite Filter ist für genau diese Polarisation undurchlässig, da er in senkrechter Richtung zum ersten Filter angeordnet ist. Im Normalfall tritt folglich kein Licht durch das Mikroskop und das Bild ist dunkel. Nur wenn Bereiche der Probe die Polarisationsrichtung des einfallenden Lichtes verändern, werden diese Bereiche sichtbar, da der zweite Filter für diese veränderte Polarisationsrichtung teilweise durchlässig ist. Diese Veränderung der Polarisationsrichtung geschieht nur beim Lichtdurchtritt durch optisch anisotrope Materialien, auch doppelbrechend genannt. Diese Eigenschaft haben vor allem kristalline, nichtkubische Materialien. In den vorliegenden Proben sind das zum Beispiel die mineralische Gesteinskörnung oder Calcit, dass sich in folge von Carbonatisierung des Zementsteins gebildet hat. [87]

Die Dünnschliffe der Proben sind mit 25 bis 30 μm von so geringer Dicke, dass das eigentlich opake Material lichtdurchlässig wird und eine Durchlichtuntersuchung ermöglicht. Die Tabelle 6.3 gibt eine Übersicht zu den untersuchten Proben, der Art der Applikation und der erreichten Haftzugfestigkeit.

Tabelle 6.3.: Zuordnung der Dünnschliffe und der Applikationen unter Wasser

Probennr.	Verbund unter Wasser aus Abschnitt	Betonprobe steht waagerecht/senkrecht	erreichte Haftzugfestigkeit (Einzelwert) [N/mm^2]
1	6.1.1.1	waagerecht	1,479
2	6.1.1.1	waagerecht, (an Luft)	1,898
3	6.1.1.1	waagerecht	2,021
4	6.1.1.2	senkrecht	1,60
5	6.1.1.2	senkrecht	2,388
6	6.1.1.2	senkrecht	1,518
8	5.6.4.2	senkrecht (aneinander gesetzte Flächen)	-
9	5.6.4.2	senkrecht (aneinander gesetzte Flächen)	-

Die Proben 1 und 3 stammen aus Verbundproben der Applikationen der Rezeptur H, die waagerecht unter Wasser auf den Untergrund appliziert wurden (siehe Abschnitt 6.1.1.1). Probe 2 stammte aus einem Verbundkörper der Applikation der Rezeptur B an Luft auf den Betonuntergrund (Verbundkörper wurde in studentischer Arbeit [84] hergestellt).

Die Proben 4, 5 und 6 wurden aus Verbundkörpern entnommen, die im Abschnitt 6.1.1.2 durch das senkrechte Andrücken von Mörtel mit einem Stempel (siehe Abschnitt 5.6.1.2) unter Wasser hergestellt wurden.

Die Proben 8 und 9 wiederum wurden aus einem Verbundkörper entnommen, der mit der Applikationsplatte, die für das aneinander setzen von Mörtelflächen entwickelt wurde, hergestellt

wurde (siehe Abschnitt 5.6.4.2). In Tabelle 6.3 sind für diese Proben 8 und 9 keine Haftzugfestigkeiten dargestellt, weil diese Proben zwischen den einzelnen Applikationsflächen entnommen wurden (siehe Abbildung 6.16). In Abschnitt 6.1.2.3 sind weitere Erläuterungen zu den Proben 8 und 9 aufgeführt.

Es wurde angestrebt, auch Verbundproben für die mikroskopische Betrachtung heranzuziehen aus Verbundkörpern, die geringe Haftzugfestigkeiten aufwiesen. Angestrebt worden wären Vergleiche der Grenzflächen zwischen gutem und schlechtem Haftverbund auf mikroskopischer Ebene. Die Herstellung geeigneter Proben war jedoch nicht möglich, da sich beim Kernbohrvorgang der applizierte Mörtel vom Beton gelöst hat. Bei makroskopischer Betrachtung jedoch waren keine Hohlstellen zwischen Mörtel und Beton zu erkennen.

6.1.2.1. Dünnschliff-Proben 1-3

Es sind Proben, die nach der Haftzugfestigkeitsprüfung am Verbund von Mörtel und Beton im Beton versagt haben. Dabei wurden die kerngebohrten Reststücke, die am Stempel hafteten, verwendet und aufbereitet. In Abbildung 6.5 sind die Verbundstücke zu sehen, die vorsichtig aus den kerngebohrten Reststücken gesägt wurden. Es sind also die Querschnitte durch die Kernbohrungen zu sehen.



(a) Probe 1 (b) Probe 2 (c) Probe 3

Abbildung 6.5.: Proben 1-3 vor Anfertigung der Dünnschliffe; Breite der Proben: 50 mm

Deutlich erkennbar sind in Abbildung 6.5 die Schicht des applizierten Mörtels (oberer Teil, dunkle Farbe) und die Schicht des Betonuntergrunds (unterer Teil, helle Farbe). Die ungleichmäßige Unterkante der Proben ist die Abrisskante, an der der Beton bei der Haftzugprüfung versagt hat. Mit bloßem Auge betrachtet erscheint die Verbindung zwischen Mörtel und Betonuntergrund lückenlos und gleichmäßig. Deutlich sichtbar ist die Gesteinskörnung unterschiedlicher Größe. Der Beton enthält mehr und vor allem größere Körnung im Vergleich zum Mörtel. Es sind vielfach im Beton und etwas seltener auch im Mörtel Hohlräume zu erkennen, die als Verdichtungsporen bei der Herstellung des Betons bzw. des Mörtels entstehen. Im Mörtel sind Poren unterschiedlicher Art und Größe. Es wird unterschieden in Gelporen, Kapillarporen, Luftporen und Verdichtungsporen. [72]

- Gelporen: Diese Poren entstehen durch physikalisch gebundenes Wasser.

- Kapillarporen: Nicht chemisch oder physikalisch gebundenes Wasser, das nach der Hydratation im Beton oder Mörtel zurückbleibt. Dies ist bei w/z-Werten von ca. > 0,35 (bei realen Hydratationsgraden) der Fall. Auch im wassergesättigten Beton befinden sich Kapillarporen.

- Luftporen: Künstlich eingebrachte Luftporen entstehen durch Luftporenbildner beim Mischen und sind von innen hydrophobiert.

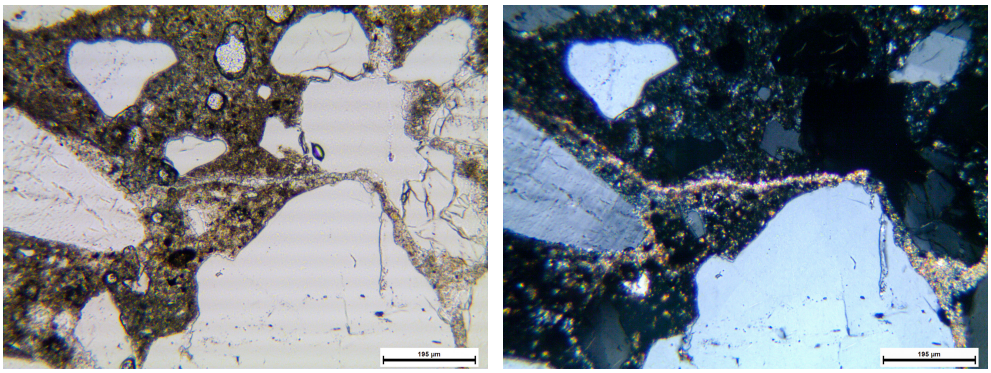
- Verdichtungsporen: Auch ohne luftporenbildende Zusatzmittel enthält verdichteter Beton einen Rest untergemischter Luft. I. d. R. sind es 1 bis 2 Vol.-% Luft.

Beim Großteil der Proben von Applikationen unter Wasser ist als Grenze zwischen Betonuntergrund und aufgebrachtem Mörtel ein Saum zu erkennen, der unter gekreuzten Polarisatoren deutlicher hervortritt. Dieser zieht sich durch den gesamten Dünnschliff und ist nur dort so ausgeprägt zu erkennen. Es handelt sich um einen carbonatisierten Rand bzw. Calcit, das durch seine doppelbrechende Eigenschaft unter gekreuzten Polarisatoren hell erscheint, wie eingangs beschrieben.

Der Saum entsteht durch Carbonatisierung der Betonoberfläche vor dem Applizieren des Mörtels. Diese Reaktion fand nach dem Sandstrahlen an Luft statt, bevor die Betonkörper wieder in Wasser gelagert wurden.

Bei der gleichmäßigen, in dunklen Graustufen gesprenkelten Fläche mit leicht bräunlicher Färbung aus Abbildung 6.6(a), die in Abbildung 6.6(b) weitgehend dunkel erscheint, handelt es sich um das zu Zementstein erstarrte Bindemittel. Die hellen Punkte in diesem Bereich unter gekreuzten Polarisatoren deuten auf kristalline Strukturen im Zementstein hin. Die hellen Flächen mit scharfem Umriss in Abbildung 6.6 sind Gesteinskörner verschiedener Form und Größe. Viele der Gesteinskörner sind in Abbildung 6.6(b) auch unter gekreuzten Polarisatoren hell zu erkennen, da sie aus optisch anisotropen (doppelbrechenden) Mineralen bestehen. Einige dieser scharf umrissenen hellen Flächen erscheinen dagegen schwarz unter gekreuzten Polarisatoren. Die doppelbrechenden Eigenschaften einer kristallinen Struktur sind richtungsabhängig. Da die Ausrichtung der kristallinen Strukturen in der Probe zufällig ist, wird nicht jeder Partikel mit doppelbrechender Eigenschaft auch unter gekreuzten Polarisatoren tatsächlich sichtbar.

In Abbildung 6.6(a) ist die Grenze der Schicht zwischen Mörtel und Beton auch ohne gekreuzte Polarisatoren als heller Rand zu erkennen, wenn auch weniger deutlich. Dies ist jedoch nicht immer der Fall, vgl. Abbildung 6.7.



(a) ohne (b) mit

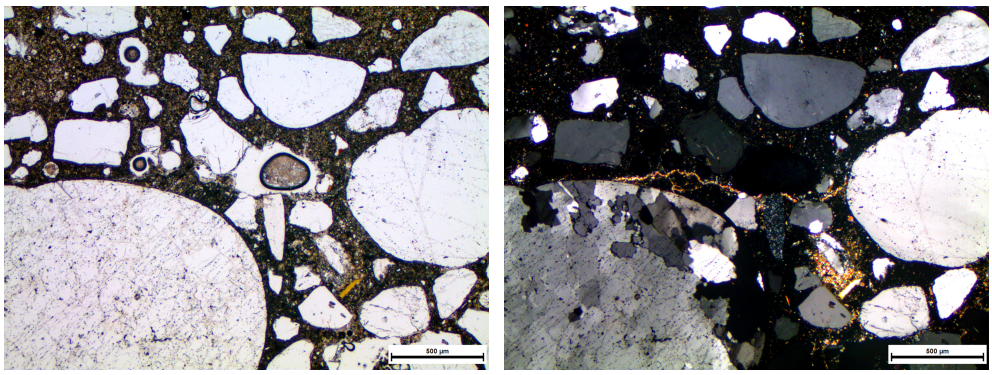
Abbildung 6.6.: Probe 1: Polarisationsmikroskopische Bilder ohne und mit gekreuzten Polarisatoren; unten Beton, oben Mörtel; Maßstab: 195 μm

Die Grenzfläche wurde mit und ohne gekreuzter Polarisation und in unterschiedlicher Vergrößerung betrachtet. In Abbildung 6.7 sind die mikroskopischen Bilder mit einem Maßstab von 500 μm und mit Abbildung 6.8 in einem Maßstab von 200 μm dargestellt.

Die Grenze zwischen Mörtel und Beton ist in Abbildung 6.7 sehr fein und daher nur unter gekreuzten Polarisatoren klar zu erkennen. Der unter gekreuzten Polarisatoren leuchtende Saum aus Calcit zeigt sich nur in Bereichen, in denen Zementstein die Oberfläche des Betons bildet. Dort, wo größere Gesteinskörner den Abschluss des Betons bilden, ist kein Saum zu sehen. Dies bestätigt die Annahme, dass es sich um eine Carbonatisierung des Zementsteins an der Betonoberfläche handelt.

Bei den in Abbildung 6.7(a) und 6.8(a) erkennbaren Luftblasen handelt es sich um Lufteinschlüsse, die beim Verkleben des Dünnschliffs mit dem Probenträger oder dem Abdeckglas entstanden sind. Die weißen Flächen, in denen sich die Luftblasen gebildet haben, sind Verdichtungsporen, also Hohlräume, die im Mörtel und auch im Beton vorkommen können. Im normalen Durchlichtbild sind diese Poren oft schwierig von den hellen Gesteinskörnern zu unterscheiden. Nur die weniger klare und glatte Kontur oder die beschriebenen Luftblasen geben einen Hinweis darauf, dass es sich nicht um Gesteinskörnung handelt. Unter gekreuzten Polarisatoren dagegen sind Hohlräume grundsätzlich schwarz, da hier kein doppelbrechendes Material vorliegt.

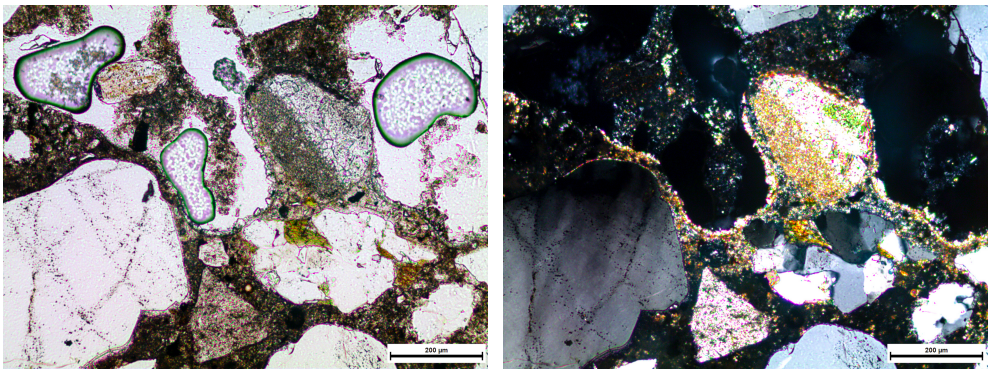
Die Poren sind zwar Fehlstellen im Gefüge, jedoch sind Poren in Beton und Mörtel als porigem Baustoff in gewissen Grenzen normal. Nur wenn Sie in größerer Ausdehnung oder Menge und direkt an der Grenzfläche auftreten, handelt es sich um die Haftung schwächende Fehlstellen.



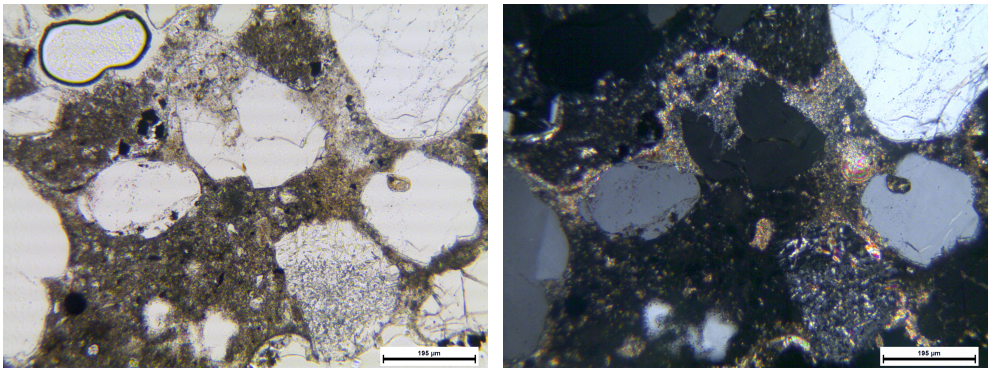
(a) ohne (b) mit

Abbildung 6.7.: Probe 1: Polarisationsmikroskopische Bilder ohne und mit gekreuzten Polarisatoren; unten Beton, oben Mörtel; Maßstab: 500 μm

In Abbildung 6.8(a) sind viele Verdichtungsporen in Form ausgefranster weißer Flächen zu sehen, zum Teil überlagert mit Luftblasen die beim Verkleben des Dünnschliffs entstanden sind. Diese Poren befinden sich im Mörtel an der Grenzfläche zum Beton, so dass hier von Fehlstellen auszugehen ist. Die Grenzfläche ist unter gekreuzten Polarisatoren als Calcitsaum gut zu erkennen. Ihr mäandernder Verlauf würde eine hohe Verzahnung gemäß der "Druckknopftheorie"(siehe Abschnitt 3.3.1) ermöglichen, was durch die gehäuften Fehlstellen an der Oberfläche in diesem Bereich aber verhindert wurde. Demgegenüber zeigt Abbildung 6.8(c) keine Fehlstellen oder Hohlräume an der Grenzfläche. Auch hier ist die Grenzfläche durch den Calcitsaum unter gekreuzten Polarisatoren (Abb. 6.8(d)) gut zu erkennen. Eine Verdichtungspore zeigt sich nur oben links im Bild mit Abstand zur Grenzfläche. Die in Abschnitt 3.3.1.1 beschriebenen Art der Verzahnung hat hier stattgefunden, da der Mörtel sich dem Verlauf der Betonoberfläche genau anpasst und auch die Vertiefungen der Betonoberfläche ausfüllt. Die Bilder in Abbildung 6.8 stammen aus der selben Probe. Mögliche Ursachen für die unterschiedlich gute Verzahnung an verschiedenen Stellen innerhalb einer Applikation sind eine ungleichmäßige Verteilung des Anpressdrucks beim Applizieren, eine lokal weiter fortgeschrittene Aushärtung des Mörtels zum Applikationszeitpunkt oder Wassereinschlüsse, die bei der Applikation nicht mehr entweichen konnten und nicht vom Mörtel bei der Hydratation aufgenommen wurden.



(a) ohne (b) mit



(c) ohne (d) mit

Abbildung 6.8.: Probe 1: Polarisationsmikroskopische Bilder ohne und mit gekreuzten Polarisatoren; unten Beton, oben Mörtel; Maßstab: 200 μm

Mit einer höheren Vergrößerung wurde die Grenzfläche unter gekreuzten Polarisatoren betrachtet (siehe Abbildung 6.9). Es ist zu erkennen, wie sich die Carbonatisierung von der Oberfläche her in den Beton herein erstreckt. Es gibt keine Anzeichen von Fehlstellen im Bereich der Grenzfläche zwischen Mörtel und Beton.

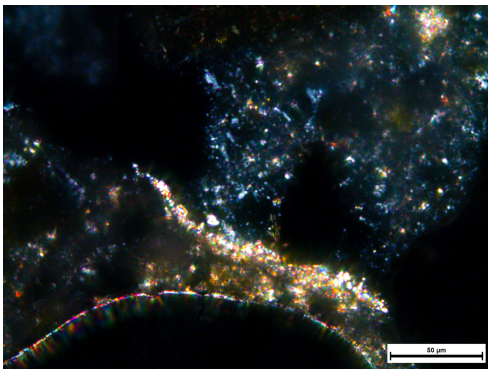
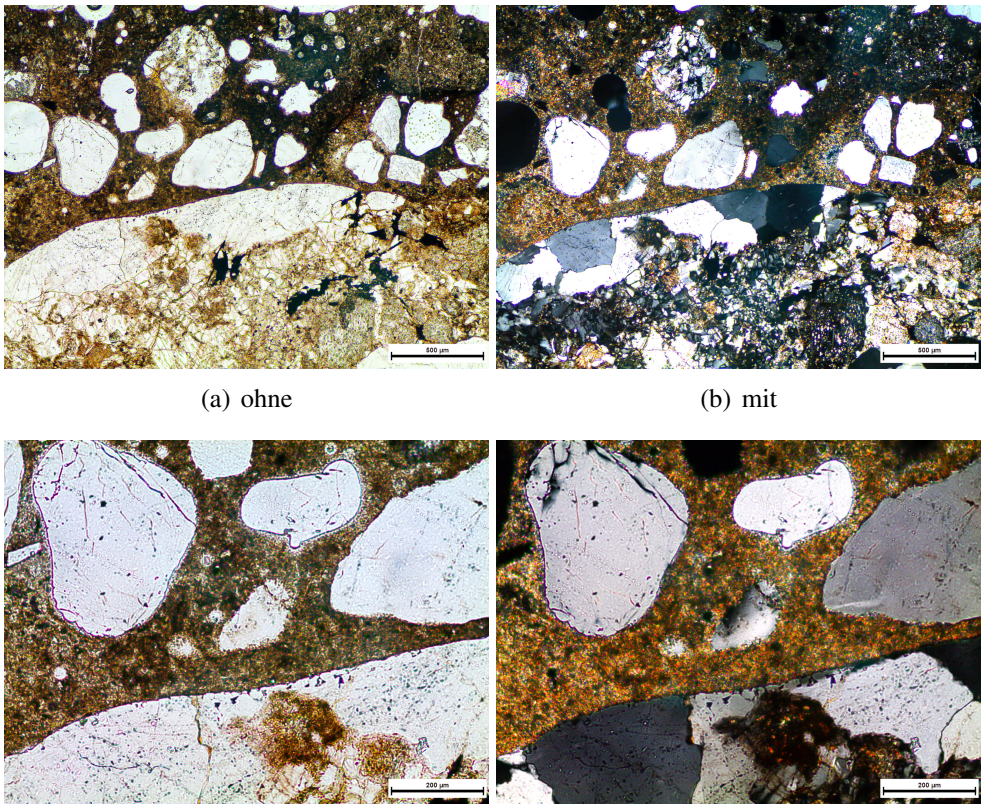


Abbildung 6.9.: Probe 1: Vergrößerung mit gekreuzten Polarisatoren; unten Beton, oben Mörtel; Maßstab: 50 μm

In Abbildung 6.10 ist die Grenzfläche zwischen Beton und Mörtel nicht als Saum zu erkennen. Hier bildet ein großes Gesteinskorn die Betonoberfläche, der applizierte Mörtel schließt

nahtlos an das Gesteinskorn an. Die Grenze zwischen diesem großen Korn des Betons und dem Bindemittel des Mörtels unterscheidet sich augenscheinlich nicht von der Grenze zwischen Gesteinskörnern und Bindemittel innerhalb des Mörtels, was auf eine gute Verbindung des Mörtels mit dem Untergrund hinweist.



(a) ohne (b) mit

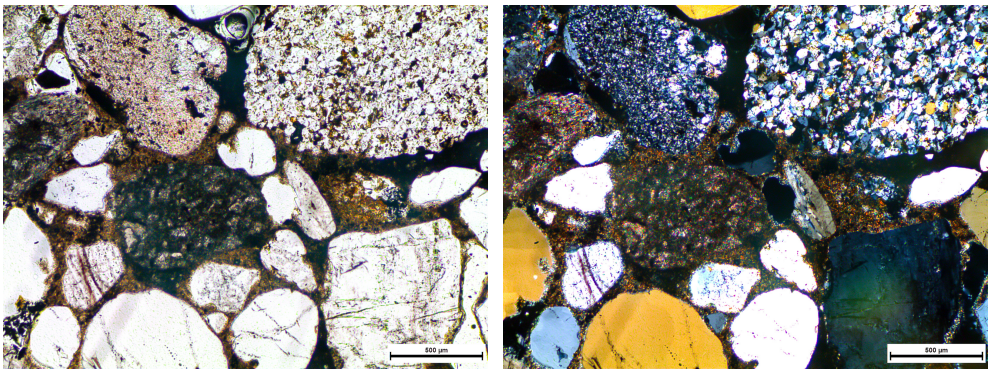
(c) ohne (d) mit

Abbildung 6.10.: Probe 3: Polarisationsmikroskopische Bilder ohne und mit gekreuzten Polarisatoren; unten Beton, oben Mörtel; Maßstab: 200 μm

Probe 2 - appliziert an Luft:

Für einen Vergleich wurde auch ein Verbund (Probe 2, Abbildung 6.5(b)), der durch Applikation von Mörtel an der Luft auf einen feuchten Betonuntergrund aufgebracht wurde, mikroskopisch untersucht.

Der Übergang von Beton zu Mörtel lässt sich nicht klar lokalisieren, nur eine Veränderung der Gesteinskörnung und eine deutlich geringere Lichtdurchlässigkeit des Zementsteins deutet auf den Übergang hin. Die Aufnahmen deuten darauf hin, dass bei Mörtelaufbringung über Wasser eine noch nahtlosere Verbindung zwischen Mörtel und Beton möglich ist. Der Haftzugwert der untersuchten Probe liegt jedoch nicht signifikant höher als die Werte der betrachteten Proben aus Unterwasserapplikationen.



(a) ohne (b) mit

Abbildung 6.11.: Probe 2: Polarisationsmikroskopische Bilder ohne und mit gekreuzten Polarisatoren; unten Beton, oben Mörtel; Maßstab: 500 μm

Fazit Dünnschliffe 1-3:

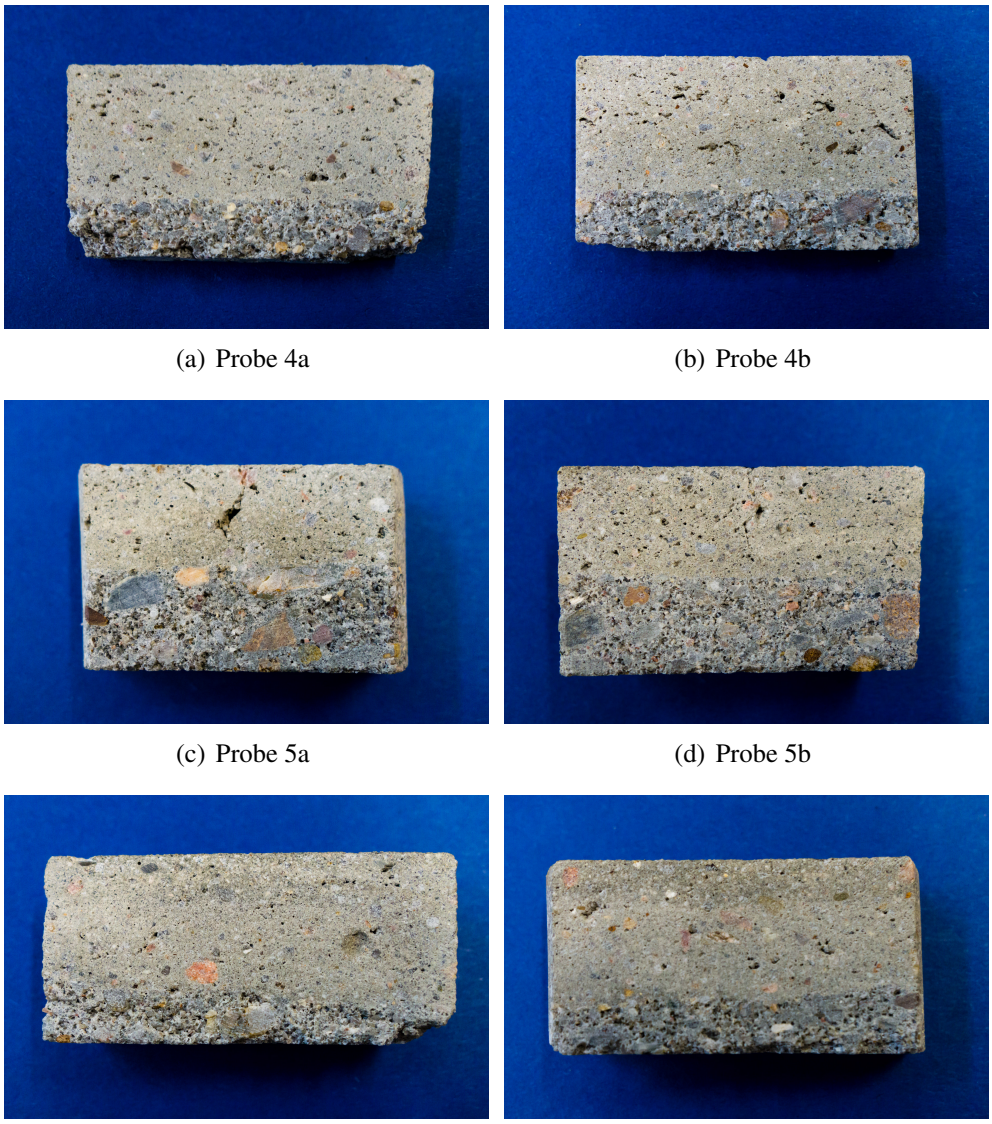
Ein Rückschluss auf die Höhe und Qualität der Haftzugfestigkeit ließ sich bei Untersuchungen an den vorgenannten Dünnschliffen nicht ziehen. Ohne gekreuzte Polarisatoren war die Grenzfläche schwieriger zu erkennen und ließ sich aufgrund der unterschiedlichen Gesteinskörnung von Mörtel und Beton erahnen (2 mm für den Mörtel bzw. mit Überkorn bis zu 4 mm und bis zu 8 / 16 mm für den Beton). Aufgrund der Verdichtung bei der Betonherstellung ist oberflächennah oft das Kleinstkorn angereichert, so dass dies zur Verwechslung von Mörtel und Beton führen kann. Der Beton ließ sich oft durch seine carbonatisierten Bereiche identifizieren. Die Betonproben wurden vor Verwendung für die Versuche im Projekt gesandstrahlt und befanden sich kurzzeitig an Luft. Dies erklärt teilweise carbonatisierte Bereiche im Beton.

Positiv ist, dass der Verbund zwischen Mörtel und Beton keine Fehlstellen aufwies und die Verzahnung zwischen den beiden Materialien so gut war, dass die Grenze schwierig auszumachen war.

6.1.2.2. Dünnschliff-Proben 4-6

Die in Abbildung 6.12 dargestellten Proben waren durch Kernbohren aus Verbundkörpern entnommen. Dabei handelte es sich um Verbunde, die mit der Auftragstechnik des Stempels (POM ST) unter Wasser aufgebracht wurden (siehe 5.6.1.2). Sie wurden neben den Stellen der Haftzugfestigkeitsprüfungen aus dem Verbundkörper entnommen, die Haftzugfestigkeiten in einem Bereich von 1,5 bis 2,4 N/mm^2 erzielten.

Die Mörtel- und Betonschichten sind in Abbildung 6.12 deutlich zu erkennen, die obenliegende Mörtelschicht ist heller im Vergleich zum Betonuntergrund. Die unterschiedliche Gesteinskörnung im Beton und im Mörtel wird bei Betrachtung der Querschnitte deutlich. Der Übergang von Beton zu Mörtel ist lückenlos, es sind mit dem bloßen Auge keine Fehlstellen an der Grenzfläche zu erkennen. Der Mörtel erscheint gleichmäßig und kompakt, nur in Abbildung 6.12(c) (c) ist eine größere Fehlstelle innerhalb der Mörtelfläche zu erkennen.



(a) Probe 4a (b) Probe 4b

(c) Probe 5a (d) Probe 5b

(e) Probe 6a (f) Probe 6b

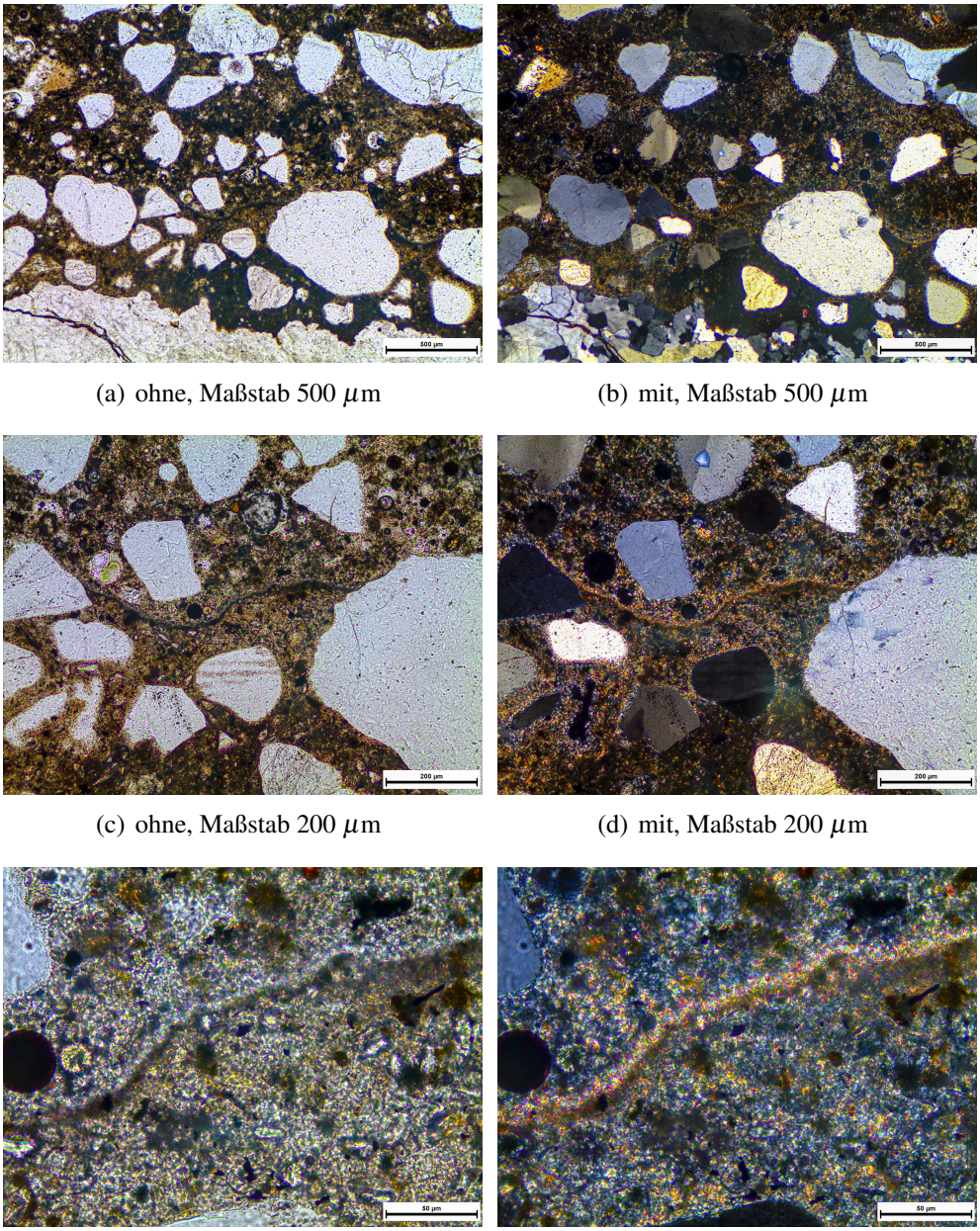
Abbildung 6.12.: Proben 4-6 vor Anfertigung der Dünnschliffe; Breite der Proben: $\leq$ 50 mm

Mikroskopische Bilder:

Die Dünnschliffe der Proben 4a und 4b wiesen sehr ähnliche mikroskopische Bilder auf zu den Dünnschliff-Proben 1-3 (siehe Abschnitt 6.1.2.1). An der Grenze zwischen Mörtel und Beton waren keine Fehlstellen zu erkennen. Es war schwierig die Grenze zwischen Mörtel und Beton auszumachen, was auf eine gute Verzahnung zwischen Mörtel und Beton hinweist.

Im Folgenden wird darauf verzichtet, jede Probe abzubilden, es werden exemplarisch nur einige Bilder der Probe 5a gezeigt. Die mikroskopischen Bilder ohne Fehlstellen oder Besonderheiten würden den vorangegangenen Bildern aus Abschnitt 6.1.2.1 sehr ähneln. In Probe 5a war die Grenze zwischen Mörtel und Beton deutlicher zu erkennen (siehe z. B. Abbildung 6.15). An Stellen, an denen größere Gesteinskörner des Betons zur Grenze hin lagen, ist die Grenzfläche klar zu erkennen (vgl. Abbildung 6.15(a) und 6.15(b)).

Helle Carbonatisierungssäume unter gekreuzten Polarisatoren, wie in den vorangegangenen Abbildungen, sind in Abbildung 6.13 und 6.15 nicht zu erkennen. Die Grenzfläche zwischen Beton und Mörtel ist in diesen Aufnahmen vielmehr als dunkler Saum mit leicht reliefartigen Kanten zu erkennen. Auch hier ist der Saum aber nur in Bereichen zu erkennen, in denen Zementstein die Betonoberfläche bildet. Dort wo Gesteinskörnung an der Betonoberfläche liegt, zeigt sich kein dunkler Saum. Dort wo der Saum auftritt, ist er etwas breiter als der helle Saum auf den Bildern der Proben 1 - 3. Abbildung 6.13 zeigt eine schrittweise Vergrößerung des Übergangs zwischen Mörtel und Beton mit diesem dunklen Saum.



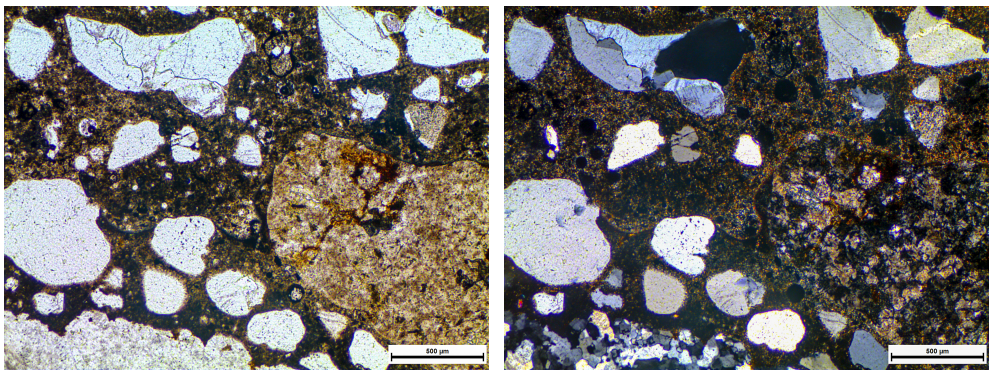
(a) ohne, Maßstab 500 μm (b) mit, Maßstab 500 μm

(c) ohne, Maßstab 200 μm (d) mit, Maßstab 200 μm

(e) ohne, Maßstab 50 μm (f) mit, Maßstab 50 μm

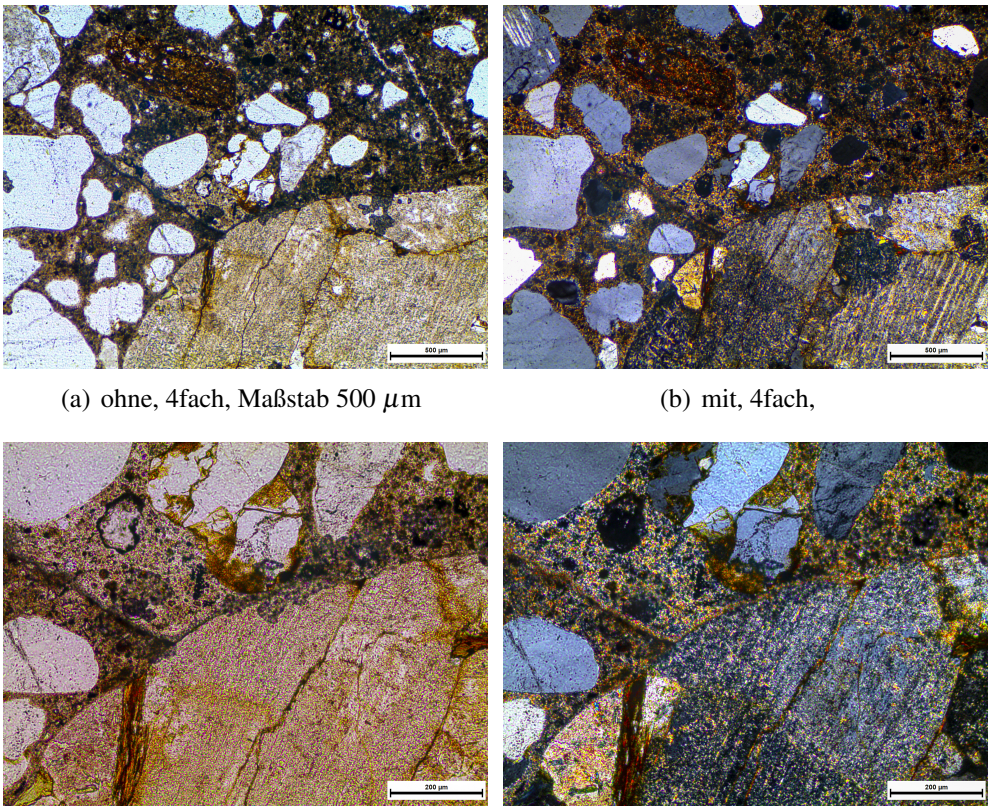
Abbildung 6.13.: Probe 5a: Polarisationsmikroskopische Bilder ohne und mit gekreuzten Polarisatoren; unten Beton, oben Mörtel; versch. Vergrößerungen

Die Abbildungen 6.14(a) und 6.14(b) zeigen einen Abschnitt der Grenzfläche zwischen Mörtel und Beton, in dem die Betonoberfläche besonders ungleichmäßig ist. Hier scheint es in der Vertiefung neben dem großen Gesteinskorn rechts im Bild eine Ansammlung von opaken (undurchsichtigen) Mineralen zu geben. Die schwarze Fläche zwischen Mörtel und Betonoberfläche kann jedoch kein Hohlraum sein, da dieser im Durchlichtbild von 6.14(a) weiß erscheinen müsste. Eine genaue Bestimmung woraus die opaken Bereiche bestehen, ist anhand der Bilder nicht möglich.



(a) ohne (b) mit

Abbildung 6.14.: Probe 5a: Polarisationsmikroskopische Bilder ohne und mit gekreuzten Polarisatoren an Grenzfläche: unten Beton, oben Mörtel; Maßstab 500 μm;



(a) ohne, 4fach, Maßstab 500 μm (b) mit, 4fach,

(c) ohne, 10fach, Maßstab 200 μm (d) mit, 10fach, Maßstab 200 μm

Abbildung 6.15.: Probe 5a: Polarisationsmikroskopische Bilder ohne und mit gekreuzten Polarisatoren an Grenzfläche: unten Beton, oben Mörtel;

Die Proben 4a, 4b, 6a und 6b zeigten keine Fehlstellen und keine derart ausgeprägten dunklen Grenzflächen wie Probe 5a. Sie ähnelten in ihren Bildern sehr denen der Proben 1 - 3.

Fazit Dünnschliffe 4-6:

Das Fazit aus den Dünnschliffen 4-6, die Ergebnis von appliziertem Mörtel unter Wasser auf senkrecht stehende Betonproben waren, zeigten ähnliche mikroskopische Bilder wie in Abschnitt 6.1.2.1. Lediglich war es bei diesen Dünnschliffen bei der Probe 5a möglich geringfügige Fehlstellen bzw. stellenweise deutlich dunkle Grenzen zwischen Mörtel und Beton zu erkennen. Grenzen zwischen aufgebrachtem Mörtel und größerer Gesteinskörnung waren (ausgenommen Probe 5a) deutlicher zu erkennen, als angrenzend an kleiner Gesteinskörnung des Betonuntergrundes.

Der Verbund war überwiegend ohne Lücken und Fehlstellen. Die mikroskopische Betrachtung ließ keine Rückschlüsse auf die unterschiedliche Höhe der Haftzugfestigkeit zu.

6.1.2.3. Dünnschliff-Proben 8-9

Unter Anwendung der Applikationstechnik aus Abschnitt 5.6.4.2 wurde durch Aneinandnersetzen von drei Mörtelflächen (1, 2 und 3) ein Verbundprobekörper hergestellt. Neben der Unter-

suchung der Qualität des Verbundes zwischen Mörteln und Beton an der Grenzfläche, wurde überprüft, ob über den Verbund zwischen den Applikationen 1, 2 und 3 ebenfalls Aussagen getroffen werden können. Die in Abbildung 6.17 dargestellten Proben sind aus dem Verbundkörper, der in Abbildung 6.16 abgebildet ist, an den rot eingekreisten Stellen entnommen. Die Betrachtung dieser Übergänge sollte überprüfen, ob der Auftrag des Mörtels mit der Applikationstechnik der Applikationsplatte aus Abschnitt 5.6.4.2 tatsächlich ohne Lücken zwischen den Einzelflächen realisiert wurde.

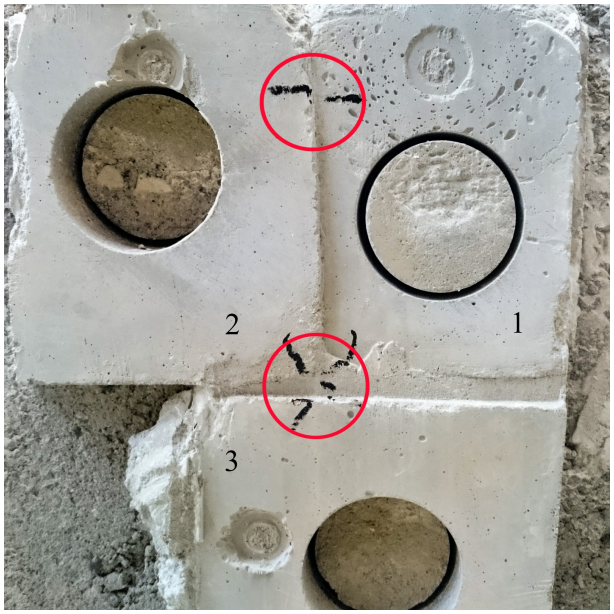
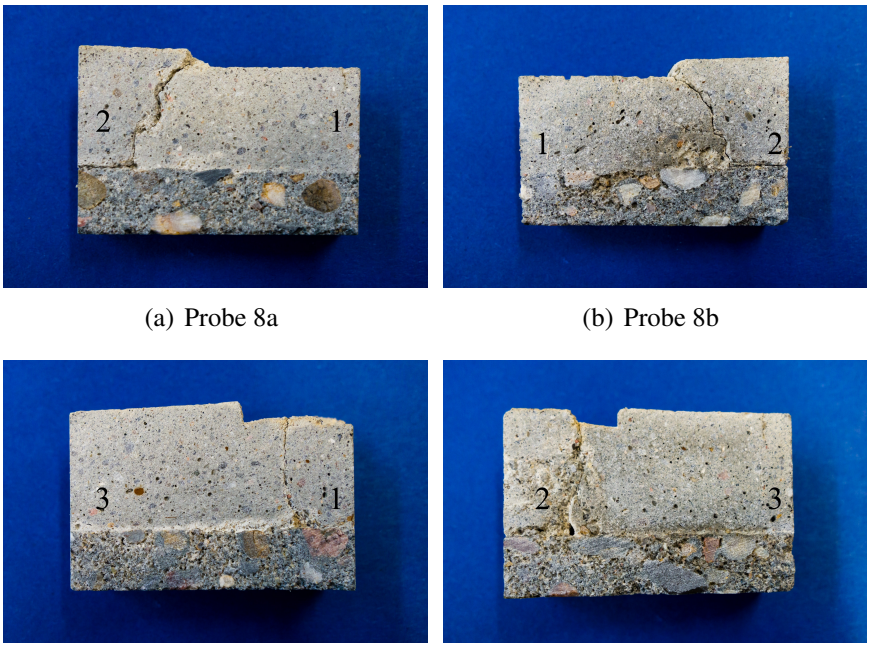


Abbildung 6.16.: Verbundkörper, Mörtel appliziert mit der Applikationsplatte, rot markiert die Entnahmestellen der Proben

In Abbildung 6.17 sind Probe 8 und 9 jeweils von der Vorder- und Rückseite abgebildet. Es wurden Dünnschliffe von beiden Seiten erstellt. Diese Scheiben wurden aus Kernbohrungen (⌀ = 50 mm) gesägt und haben daher eine Breite von $\leq$ 50 mm.



(a) Probe 8a (b) Probe 8b

(c) Probe 9a (d) Probe 9b

Abbildung 6.17.: Proben 8-9 vor Anfertigung der Dünnschliffe, oben Mörtel unten Beton; Breite der Proben: 50 mm

Die Herkunft der Proben ist in Tabelle 6.4 übersichtlich dargestellt, vgl. auch Abbildung 6.17. Die Probe 8a in Abbildung 6.17(a) wurde am Übergang zwischen Appl. 2 (links) und Appl. 1 (rechts entnommen). Der kleinere linke Teil (Appl. 2) hatte eine geringe Haftzugfestigkeit erreicht (kleiner 0,5 N/mm^2) und war nach dem Kernbohren, Sägen und der mehrfachen Begutachtung der Proben beweglich geworden. Bei der Weiterverarbeitung zum Dünnschliff war dieser Teil weggebrochen. Der Verbund zwischen Applikation 2, 1 und dem Beton konnte daher nicht betrachtet werden. Die Mörtel- und Betonschichten sind in Abbildung 6.17 gut zu erkennen, der Mörtel ist auch hier durch eine hellere Farbe und feinere Gesteinskörnung gekennzeichnet. Auch die Grenzen zwischen den einzelnen Applikationsflächen ist deutlich zu erkennen. Zwischen Applikation 2 und 3 ist in Abbildung 6.17(d) eine Fehlstelle zu sehen. Auch sind hier die Ränder der Applikation 2 besonders deutlich und breit, was mit dem geringen Haftzugwert einher geht. Applikation 1 und 3 zeigen kleine sichtbare Fehlstellen untereinander, sie schließen nahtlos an den Betonuntergrund an. In Tabelle 6.4 sind die Applikationsnummern zu den vorgenannten Proben in Abbildung 6.17 aufgelistet, dort sind auch die gemessenen Haftzugfestigkeiten der jeweiligen Applikation aufgeführt.

Tabelle 6.4.: Zuordnung der Applikationen zu den Proben

Probennr.	Appl. 1	Appl. 2	Appl. 3
8a	rechts	links	-
8b	links	rechts	-
9a	rechts	-	links
9b	-	links	rechts
Haftzugfestigkeit N/mm^2	1,277	0,471	1,473

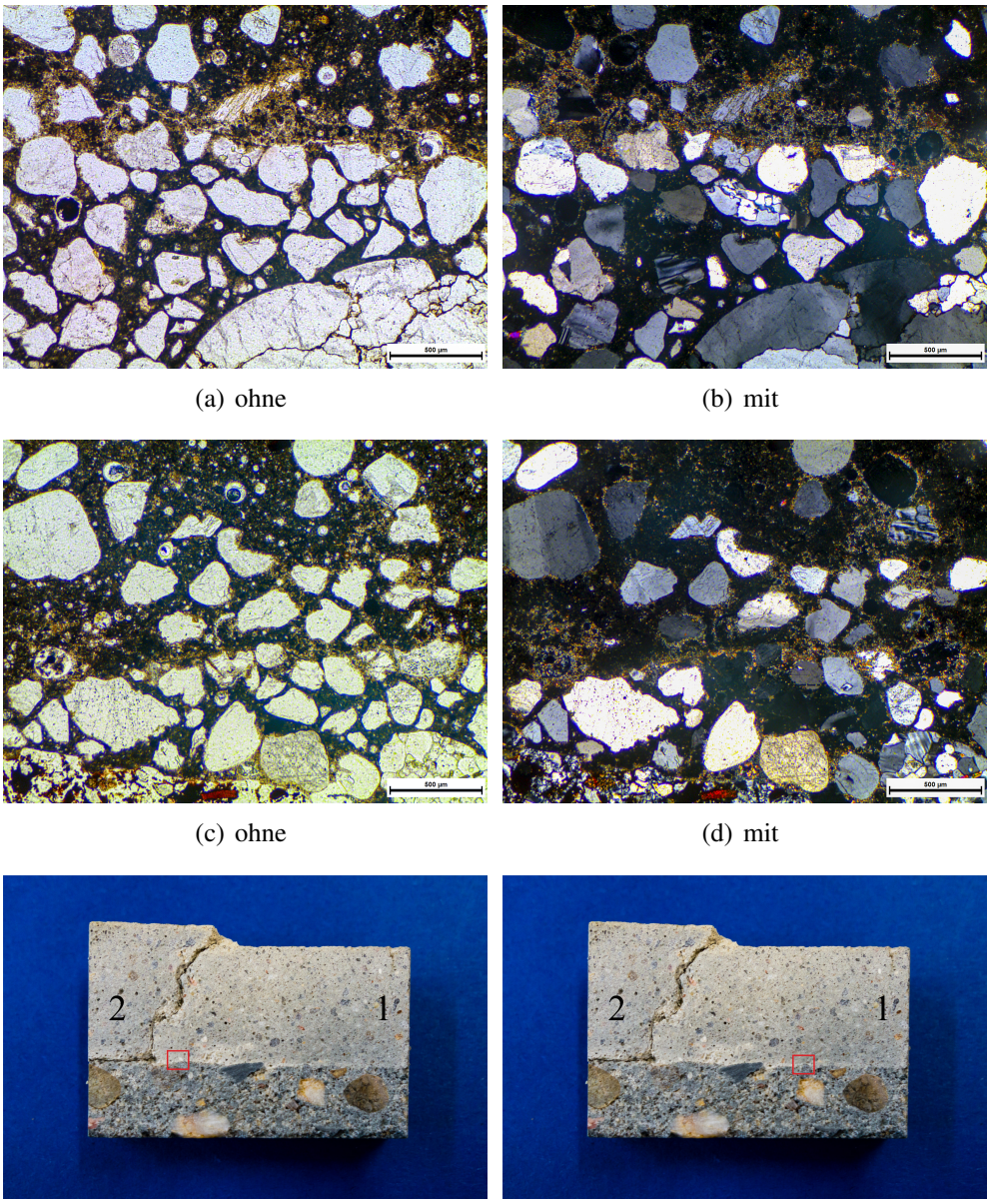
Diese Mörtelapplikationen wurden hintereinander aufgetragen (siehe Applikationstechnik in Abschnitt 5.6.4.2). Die Besonderheit der Probe 9 ist, dass dies ein Verbund aus drei Applikationen ist: Applikation 1, 2 und 3 - in Abbildung 6.16 an der Stelle des unteren roten Kreises. Dabei ist Probe 9a (Abb. 6.17(c)) der Verbund von Appl. 1 (rechts) und Appl. 3 (links) und die Probe 9b (Abb. 6.17(d)) der Verbund von Appl. 2 (links) und Appl. 3 (rechts).

An den aufbereiteten Dünnschliffen an diesen Stellen wurde der Verbund betrachtet, um Rückschlüsse zumindest zwischen schlechten Haftzugfestigkeiten (kleiner 0,5 N/mm^2) und guten Haftzugfestigkeiten (größer 1,5 N/mm^2 und mehr) ziehen zu können und ihr Gefüge und ihre Unterschiede zu beschreiben.

Im Folgenden wird neben den mikroskopischen Aufnahmen jeweils auch die ungefähre Position der mikroskopischen Aufnahmen in der Probe gezeigt. Die Positionen sind nicht exakt, da die Fotos die gesägte Probe und nicht den Dünnschliff zeigen. Es gab durch die Entnahme des Dünnschliffes an zwei verschiedenen Stellen der Probe Nr. 9 die Möglichkeit den Verbund zwischen 1.) Appl. 1, Appl. 3 und dem Betonuntergrund und 2.) zwischen Appl.2, Appl. 3 und dem Betonuntergrund zu untersuchen, vgl. Tabelle 6.4.

Mikroskopische Bilder:

In Abbildung 6.18 sind die Verbundzonen zwischen Mörtelappl. 1 und dem Betonuntergrund an zwei verschiedenen Stellen dargestellt, jeweils mit und ohne gekreuzte Polarisatoren. Außerdem sind die Bereiche markiert, in denen die mikroskopischen Aufnahmen gemacht wurden.



(a) ohne (b) mit

(c) ohne (d) mit

(e) Stelle (a) / (b) (f) Stelle (c) / (d)

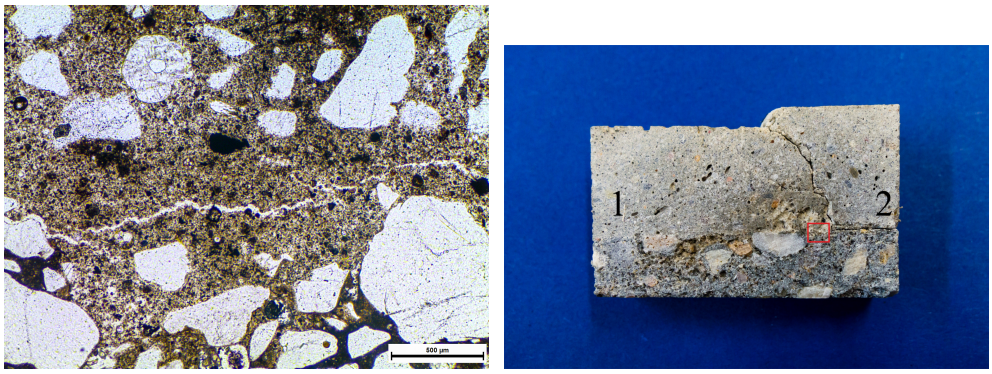
Abbildung 6.18.: Probe 8a: Polarisationsmikroskopische Bilder ohne und mit gekreuzten Polarisatoren; unten Beton, oben Mörtel; an zwei verschiedenen Stellen; Maßstab 500 μm;

Die Verzahnungen zwischen Mörtelappl. 1 und Betonuntergrund sind in den vorangegangenen Abbildungen von guter Qualität (bei einer gemessenen Haftzugfestigkeit > 1 N/mm^2). Es wurden keine Fehlstellen beobachtet.

In Abbildung 6.18(a) ist ein feiner weißer Saum an der Grenzfläche zwischen Mörtel und Beton zu erkennen. Unter gekreuzten Polarisatoren zeigt sich kein Saum mehr. In Abbildung 6.18(c)und 6.18(d) ist nur im Mittleren Bereich an zwei Stellen ein leichter dunkler Saum zu erkennen, der unter gekreuzten Polarisatoren als carbonatisierter Rand hell hervortritt. Ansons-

ten lässt sich die Grenze nur anhand der Lage der Gesteinskörnung und der Schattierung des Zementsteins lokalisieren.

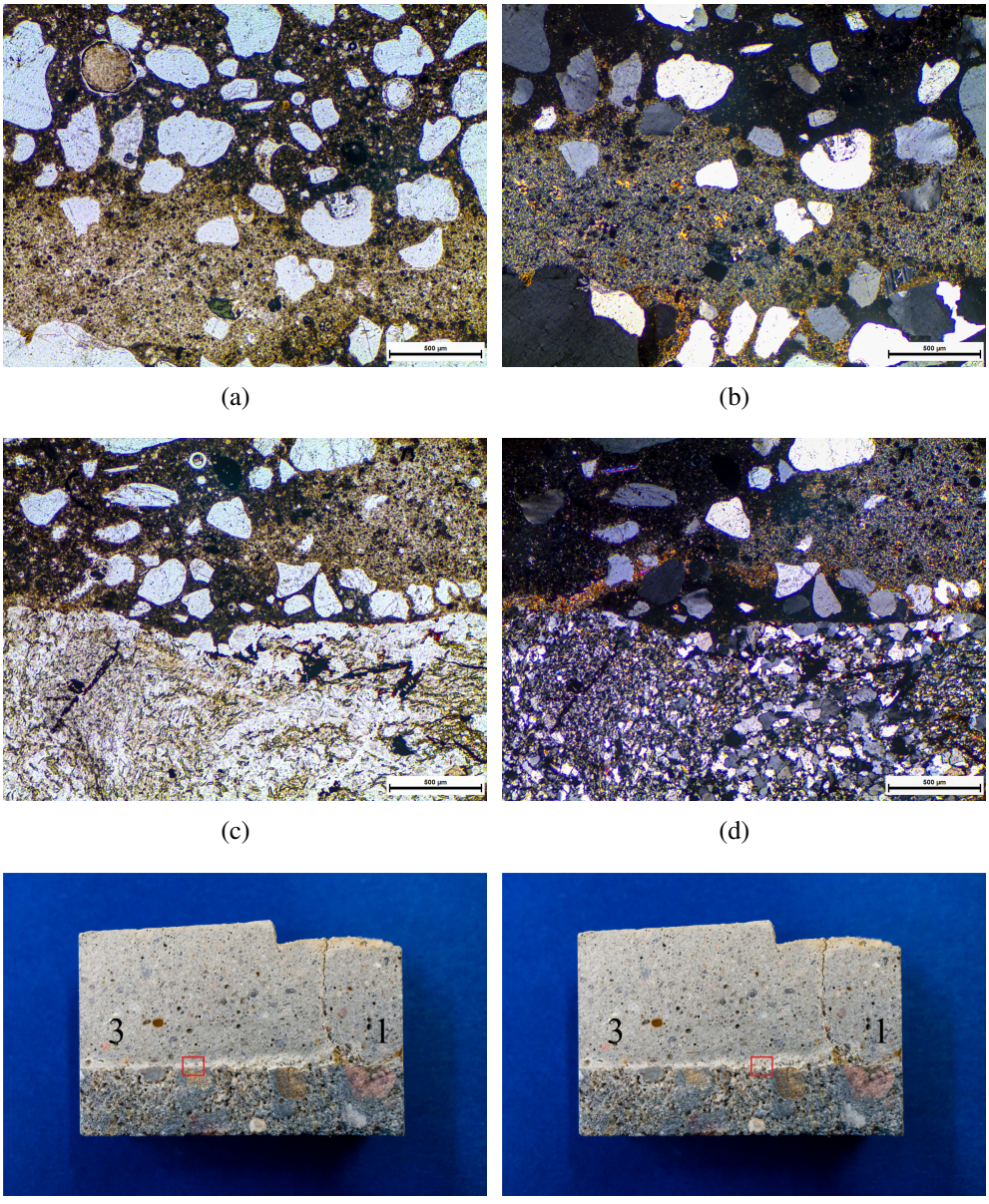
Fehlstellen oder Hohlräume wurden erst am Rand von der Mörtelapplikation entdeckt, siehe Abbildung 6.19(a). Die Grenzfläche zwischen Mörtel und Beton zeigt sich in diesem Randbereich als deutliche sichtbarer heller Spalt, was auf einen Riss oder Abstand zwischen Mörtel und Beton hinweist.



(a) ohne gekreuzte Polarisatoren (b) an dieser Stelle

Abbildung 6.19.: Probe 8b: Fehlstelle am Rand von Applikation 1

Abbildung 6.20 zeigt den Übergang von Mörtelapplikation 3 zum Betonuntergrund, Abbildung 6.20(e) und 6.20(f) gibt die ungefähre Position der Aufnahmen an.



(a) (b)

(c) (d)

(e) (f)

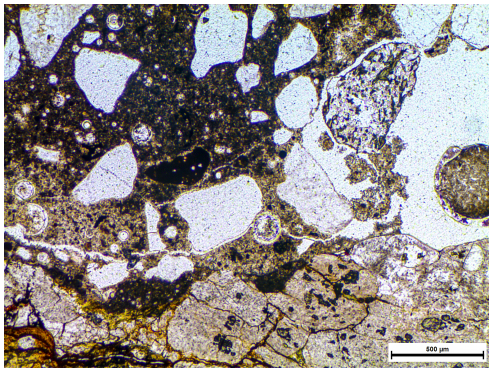
Abbildung 6.20.: Probe 9a: Polarisationsmikroskopische Bilder ohne und mit gekreuzten Polarisatoren; unten Beton, oben Mörtel; im Bereich zwischen Mörtel der Applikation 3 und dem Betonuntergrund; Maßstab 500 μm;

Die Haftzugfestigkeit zwischen Applikation 3 und Betonuntergrund betrug 1,47 N/mm^2. Es waren keine Fehlstellen und Lücken erkennbar. Dies bestätigt den guten Verbund zwischen Mörtel und Beton.

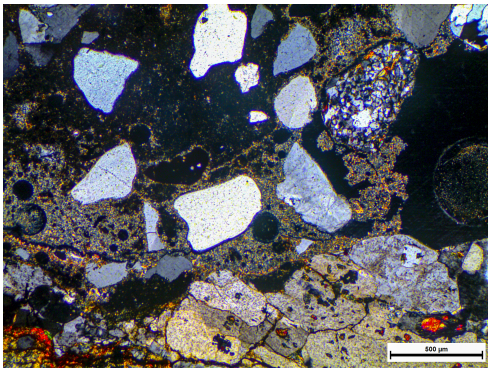
In Abbildung 6.20(a) ist ein sehr feiner Saum zu erkennen, der vermutlich die Grenze zwischen Mörtel und Beton markiert. Unter gekreutzen Polarisatoren ist der Saum nicht zu sehen. Dort

zeigen sich helle, farbige Bereiche die auf Carbonatisierung hindeuten, jedoch keine Trennung zwischen Beton und Mörtel markieren. In Abbildung 6.20(c) und 6.20(d) besteht die Betonoberfläche aus einem großen Gesteinskorn. Der Mörtel passt sich lückenlos und ohne erkennbaren Saum an die Oberfläche des Korns an.

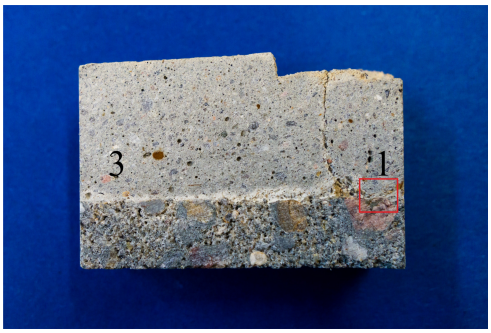
Es sind Fehlstellen zwischen Appl. 1 und Beton im Randbereich der Appl. 1 zu erkennen in Abb. 6.21, obwohl in Abb. 6.18 zwischen der Mörtelapplikation 1 und dem Betonuntergrund gute Verbundzonen beobachtet wurden. Mögliche Ursache für diese Fehlstellen im Randbereich ist eine ungleichmäßige Verteilung des Anpressdrucks innerhalb der Platte und daraus resultierend ein geringerer Anpressdruck am Plattenrand. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass auch die Belastung des Kernbohrens bei der Probengewinnung zu Beschädigungen geführt hat. In Abbildung 6.21(a) zeigen sich die Fehlstellen als ausgefranste weiße Fläche am rechten Bildrand. Im linken Bildteil zeigt sich ein weißer Riss an der Grenzfläche zwischen Beton und Mörtel.



(a) ohne



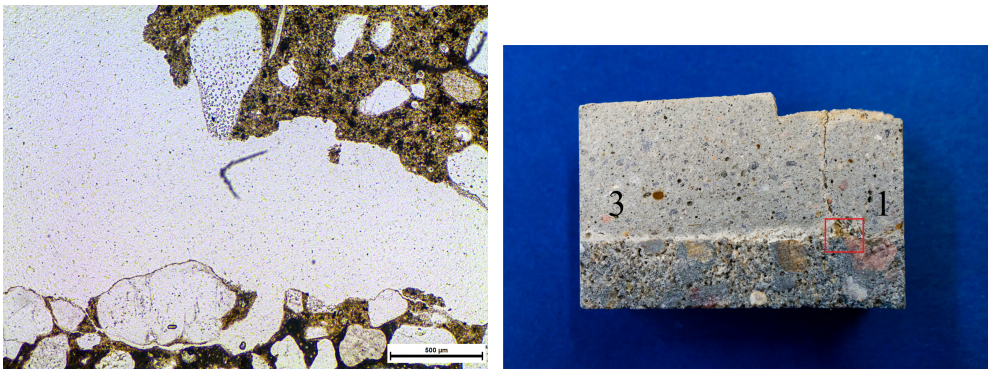
(b) mit



(c) an dieser Stelle

Abbildung 6.21.: Probe 9a: Polarisationsmikroskopische Bilder ohne und mit gekreuzten Polarisatoren; unten Beton, oben Mörtel; Maßstab 500 μm; rot markiert in Abb. 6.21(c): Bereich der mikroskopischen Aufnahme

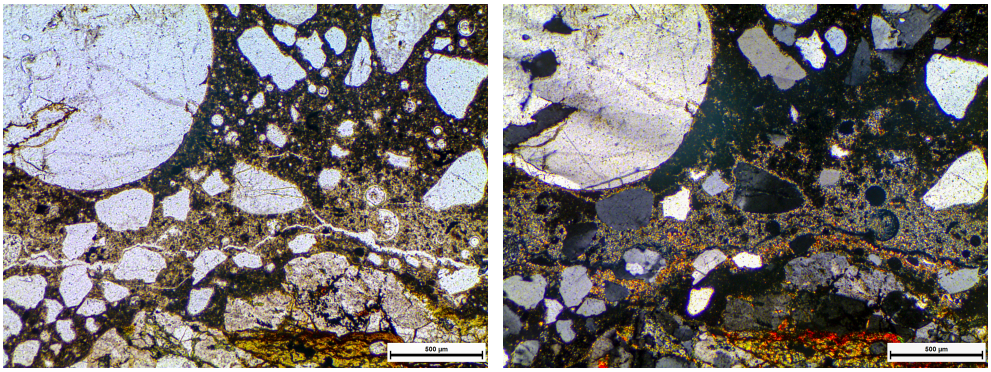
Zwischen den Applikationen 3, 1 und dem Betonuntergrund ist ein Zwischenraum erkennbar, der mehr als 500 μm einnimmt (siehe Abb. 6.22).



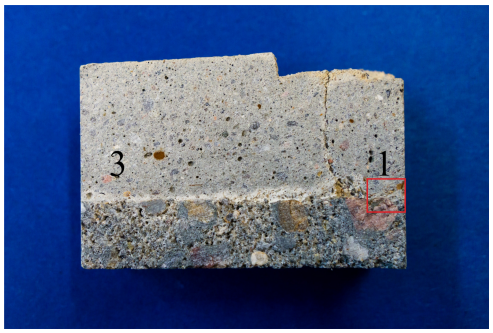
(a) (b)

Abbildung 6.22.: Probe 9a: Im Bereich der Lücke zwischen Appl. 1 und 3 und dem Betonuntergrund; rot markiert in 6.22(b) der Bereich der mikroskopischen Aufnahme

Zwischen der Mörtelapplikation 1 und Beton ist in Abbildung 6.23 ein breiter weißer Saum oder Riss zu erkennen, der einer Lücke zwischen Mörtel und Beton entspricht.



(a) ohne (b) mit

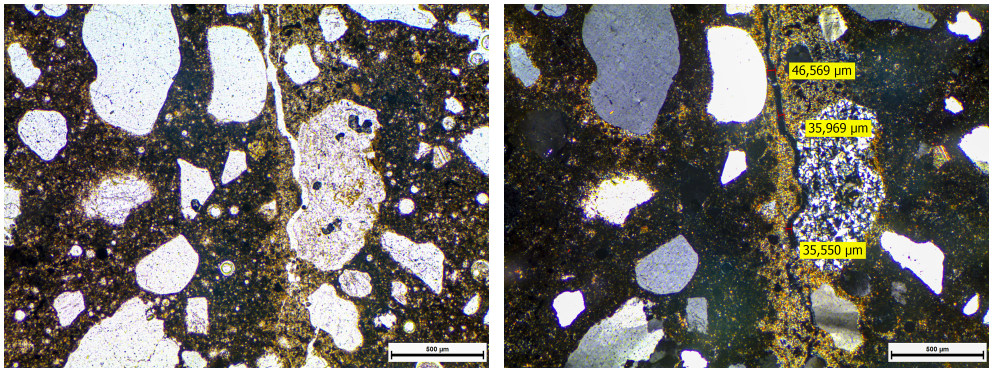


(c) an dieser Stelle

Abbildung 6.23.: Probe 9a: Polarisationsmikroskopische Bilder ohne und mit gekreuzten Polarisatoren; unten Beton, oben Mörtel; im Bereich zwischen Mörtel Appl. 1 und dem Betonuntergrund; Maßstab 500 μm; in Abb. 6.23(c) rot markiert der Bereich der mikroskopischen Aufnahme

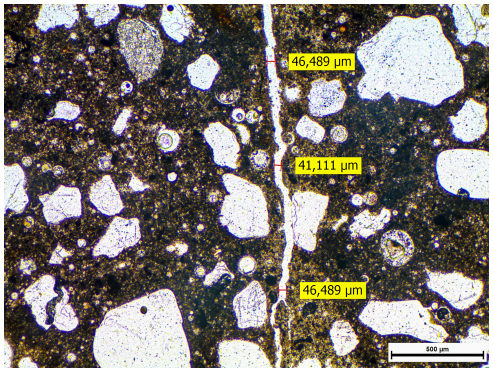
Die Betrachtung des Übergangs zwischen Applikation 1 und 3 in Abbildung 6.35 zeigt einen

Riss oder Abstand von 35 bis 45 μm breite. In Abbildung 6.35 zeigt sich dieser Abstand als weiße, bzw. unter gekreuzten Polarisatoren schwarze, Linie in der Bildmitte. Diese Beobachtung deutet darauf hin, dass der Verbund zwischen den Applikationen noch nicht lückenlos und stabil war.

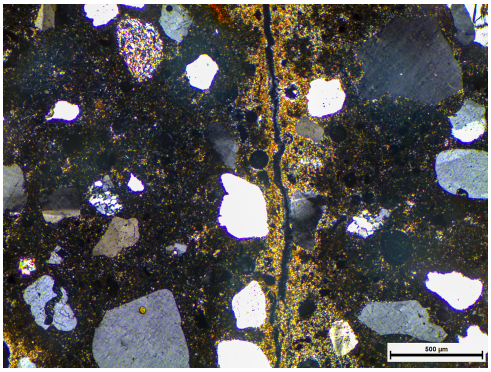


(a)

(b)



(c)



(d)

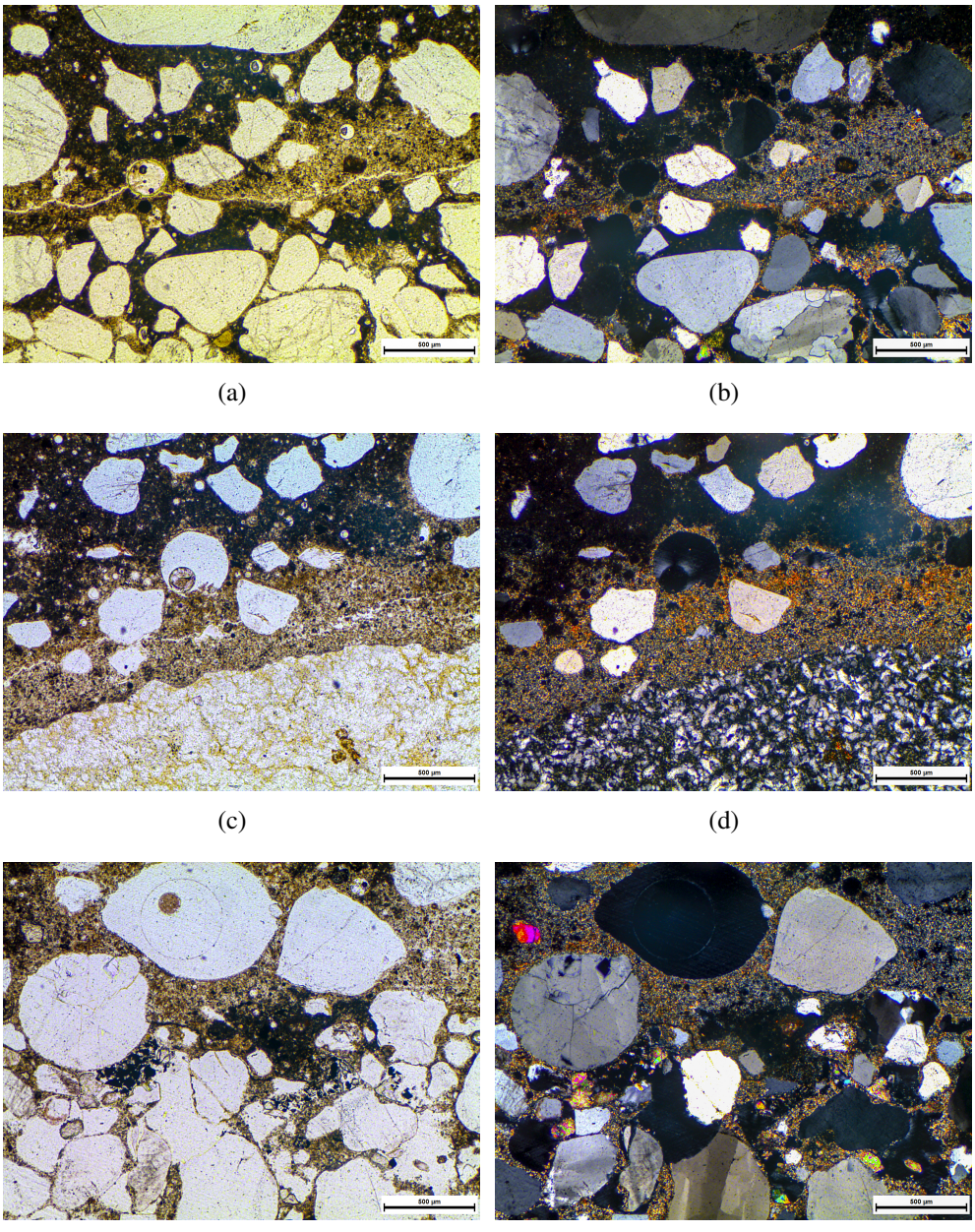


(e) an dieser Stelle

Abbildung 6.24.: Probe 9a: Polarisationsmikroskopische Bilder ohne und mit gekreuzten Polarisatoren; im Bereich der Lücke zwischen Appl. 1 (links) und 3 (rechts) und dem Betonuntergrund; Maßstab 500 μm;

Abbildung 6.25 zeigt den Verbund zwischen Applikation 3 und dem Betonuntergrund an drei nebeneinanderliegenden Positionen. Die Applikation hatte eine Haftzugfestigkeit von knapp 1,5 N/mm^2 erreicht. In Abbildung 6.25(a) und 6.25(c) ist jeweils ein feiner weißer Saum zu

erkennen, der die Grenzfläche zwischen Mörtel und Beton markiert. Das der Saum hell ist, deutet auf einen leichten Abstand zwischen Mörtel und Beton hin. In Abbildung 6.25(e) ist kein weißer Saum zu erkennen, hier ist die Grenzfläche nur stellenweise in Form einer schwarzen Linie erkennbar, die sich auch unter gekreuzten Polarisatoren zeigt.



(a) (b)

(c) (d)

(e) (f)

Abbildung 6.25.: Probe 9b: Polarisationsmikroskopische Bilder ohne und mit gekreuzten Polarisatoren; unten Beton, oben Mörtel; im Bereich zwischen Mörtel Appl. 3 und dem Betonuntergrund; Maßstab 500 μm;



Abbildung 6.26.: Untersuchte Stelle für die in Abb. 6.25 gezeigten Bilder

Der Verbund zwischen Applikation 2 und Betonuntergrund war ebenfalls nicht bewertbar aufgrund der vorher beschriebenen Herstellungsschwierigkeiten.

Fazit Dünnschliffe 8-9:

In den Übergangsbereichen zwischen den Applikationen sind Fehlstellen und Abstände zu beobachten, obwohl die Applikationen auf der Betonplatte lückenlos aneinander anschließen. Daraus folgt, dass für eine belastbare Verbindung der Einzelapplikationen untereinander auch ein Anpressdruck oder eine Verdichtungsenergie in seitlicher Richtung notwendig ist.

Zwischen Beton und Applikationen zeigen sich Bereiche mit gutem Verbund und Bereiche mit sichtbarem Abstand oder Fehlstellen. Auch die Applikation 3, für die ein guter Haftzugwert gemessen wurde, weist Bereiche mit solchen Fehlstellen auf. Dies deutet auf eine ungleichmäßige Verteilung des Anpressdrucks bei der Applikation hin.

Fazit mikroskopische Untersuchungen

Mikroskopische Untersuchungen helfen den Verbund zu beschreiben, jedoch kann nicht auf die Höhe der Haftzugfestigkeit geschlossen werden. Zu Detektierung und Überprüfung von Fehlstellen zwischen dem unter Wasser aufgebrachten Mörtel und dem Betonuntergrund ist die Betrachtung von Dünnschliffen mit einem Durchlichtmikroskop gut geeignet und dem Rasterelektronenmikroskop vorzuziehen. Mit Hilfe von gekreuzten Polarisatoren ist die Grenzfläche zum Beton in vielen Fällen besser zu identifizieren. Die Herstellung von Proben durch Kernbohren in die Verbundproben hat sich bewährt.

Ein direkter Zusammenhang zwischen Höhe der Haftzugfestigkeit und mikroskopischer Beschaffenheit der Grenzfläche zwischen Mörtel und Beton konnte nicht beobachtet werden. Auch bei Applikationen mit hoher Haftzugfestigkeit wurden stellenweise Fehlstellen oder Bereiche schlechterer Verzahnung gefunden, was zeigt, dass die Mörtelbeschaffenheit und die Bedingungen bei der Applikation im mikroskopischen Bereich nicht vollständig homogen sind. Zum überwiegenden Teil zeigt sich eine gute Anpassung des Mörtels an die Betonoberfläche ohne Lücken oder Abstände, oft ist der Übergang zwischen Beton und Mörtel dadurch selbst unter dem Mikroskop schwierig auszumachen. Der Vergleich zwischen Beton- und Mörtelaufbau sowohl auf den makroskopischen als auch auf den mikroskopischen Aufnahmen zeigt, dass der

geringere Anteil und die kleinere Größe der Gesteinskörnung im Mörtel verglichen mit klassischen Betonrezepturen für einen guten Verbund zum Beton wichtig ist. Die gute Anpassung des Mörtels an die Unebenheiten der Betonoberfläche wird auf diese Weise ermöglicht. Mehr oder größere Gesteinskörnung im Mörtel wäre dagegen für den Verbund hinderlich, da der Mörtel weniger homogen wäre und sich weniger flexibel der Betonoberfläche anpassen könnte. Dies deckt sich mit den praktischen Erfahrungen der Mörtelentwicklung in Abschnitt 5.3.

6.2. Benötigter Anpressdruck für die Applikation

Im Zuge der Applikationstechnikentwicklung zeigte sich, dass ein ausreichender Anpressdruck beim Aufbringen des Mörtels ein wichtiger Faktor für eine erfolgreiche Applikation war. Es wurde daher eine Versuchsreihe mit dem POM Stempel (siehe Abbildung 5.20) durchgeführt, bei der ein Sensor die aufgewendete Kraft gemessen hat. Der Verlauf der Druckkraft wurde über die Versuchsdauer mit einer Messrate von 5 Hz aufgezeichnet. Zum Einsatz kam der Sensor „K-U9C-00K5-03M0-F-S Miniatur-Kraftaufnehmer für Zug- und Druckkräfte“ der Firma HBM. Abbildung 6.27 zeigt beispielhaft den aufgezeichneten Kraftverlauf einer Messung.

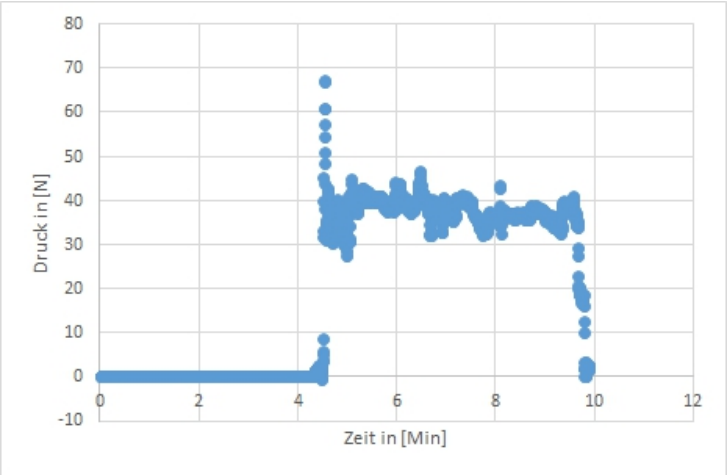


Abbildung 6.27.: Beispielhafter Kraftverlauf beim Andrücken des Stempels

Die Auswertung der Messreihe hat keinen klaren Zusammenhang zwischen der Höhe der Kraft und der erreichten Haftzugfestigkeit ergeben. Die erreichten Haftzugfestigkeiten der Applikationen aus der Messreihe variieren stark, sind jedoch nicht proportional zum gemessenen Druckverlauf. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die genaue Höhe des Anpressdrucks nicht entscheidend ist. Vielmehr ist es nur wichtig, dass der Druck ausgeübt wird, er gleichmäßig über die Applikationsfläche verteilt ist und so lange aufrechterhalten wird, bis eine Anfangshaftung zwischen Mörtel und Beton hergestellt ist.

Grundsätzlich unterliegt das Gesamtsystem der Mörtelapplikation vielen variablen Einflüssen, die in der Summe für einen guten Verbund verantwortlich sind. Es ist daher schwierig, den Einfluss einzelner Faktoren auf den Verbund isoliert zu beziffern.

6.3. Erforderliches Qualitätsmanagement

Die in diesem Projekt gesammelten Erfahrungen haben gezeigt, dass das Gesamtsystem aus aufeinander abgestimmtem Mörtel, Applikationstechnik und Anwendungsablauf sehr sensibel ist. Die bisher übliche grobe Genauigkeit und Arbeitsweise bei der Herstellung und Verarbeitung von Beton und Mörtel stößt bei der anspruchsvollen Aufgabe der Betoninstandsetzung unter Wasser an ihre Grenzen. Präzision und Reproduzierbarkeit müssen gesteigert werden, um die Betoninstandsetzung unter Wasser realisierbar werden zu lassen. Es ist unbedingt notwendig, ein konsequentes und umfassendes Qualitätsmanagement in alle Prozessschritte einzuführen, um weitere Fortschritte zur Anwendungsreife zu ermöglichen.

Qualitätsmanagement dient der Optimierung - die nur möglich ist, wenn schon ein Prozess besteht, für den gezeigt wurde, dass er grundsätzlich funktioniert. Dieser grundsätzliche Nachweis wurde für den Prozess der Mörtelapplikation unter Wasser im Rahmen dieser Arbeit erbracht. Für die grundlegende Neuentwicklung von bisher unbekannten Verfahren oder Prozessen ist Qualitätsmanagement kein geeignetes Werkzeug und wurde daher in dieser Arbeit noch nicht umfassend angewendet, auch wenn bereits viele Optimierungen und Problemlösungen von Teilaspekten des Gesamtprozesses erreicht wurden. Ein systematisches Qualitätsmanagement bedeutet jedoch eine konsequente Optimierung aller Prozessschritte sowie eine Überprüfung der Zusammenhänge und des Gesamtprozesses. Eine kritische Betrachtung aller Aspekte aus einer objektiven Beobachterperspektive ist dazu notwendig.

Zu diesem Zweck wurde im Rahmen einer studentischen Arbeit [81] ein Vorschlag für ein Qualitätsmanagementprozess für dieses Forschungsprojekt ausgearbeitet. Ergebnisse dieser Ausarbeitung waren die Aufstellung eines Qualitätsmanagementplans (QM-Plan) Bezeichnung: QP-001, die Überarbeitung existierender Arbeitsanweisungen (AA) und Verfahrensprotokolle und die Aktualisierung dieser durch neu gewonnene Erkenntnisse, die beobachtet wurden. Desweiteren wurden Verfahrensanweisungen (VA) und Checklisten (CH) erstellt.

Der Qualitätsmanagementplan QP-001 gibt einen Überblick über das Ablaufschema für die Versuche und stellt die Prozesse dar, an denen Qualitätsmanagement zu betreiben sind. Dieser QM-Plan wurde zum Abschluss dieser Arbeit angepasst und ist in Abbildung 6.28 als QM-Plan QP-002 dargestellt. Der QM-Plan beschreibt gemäß dem Diagramm in Abbildung 6.28 folgenden Ablauf: Bei neuer Lieferung eines Baustoffes (neue Charge) wird dieser auf seine Eigenschaften geprüft, fällt die Prüfung positiv aus, kann dieser für die Mörtelrezeptur verwendet werden. Wurden Baustoffe gelagert, sind diese ebenfalls vor der Verwendung auf ihre Eigenschaften zu prüfen. Einige Materialien, wie z. B. Zement, zeigten nach wenigen Wochen und Monaten Einbußen in den schnellen Erstarrungszeiten oder z. B. Weinsäure kann nach längerer Lagerung seine verzögernde Wirkung verlieren.

Die zu verwendenden Komponenten werden im nächsten Schritt abgewogen und in der Halle wird der Versuchsbereich aufgebaut und vorbereitet (die Checklisten CH-001 und CH-002 sind zu verwenden). Nachdem Aufbau wird der Mörtel hergestellt. Trotz bekannter Erstarrungszeit

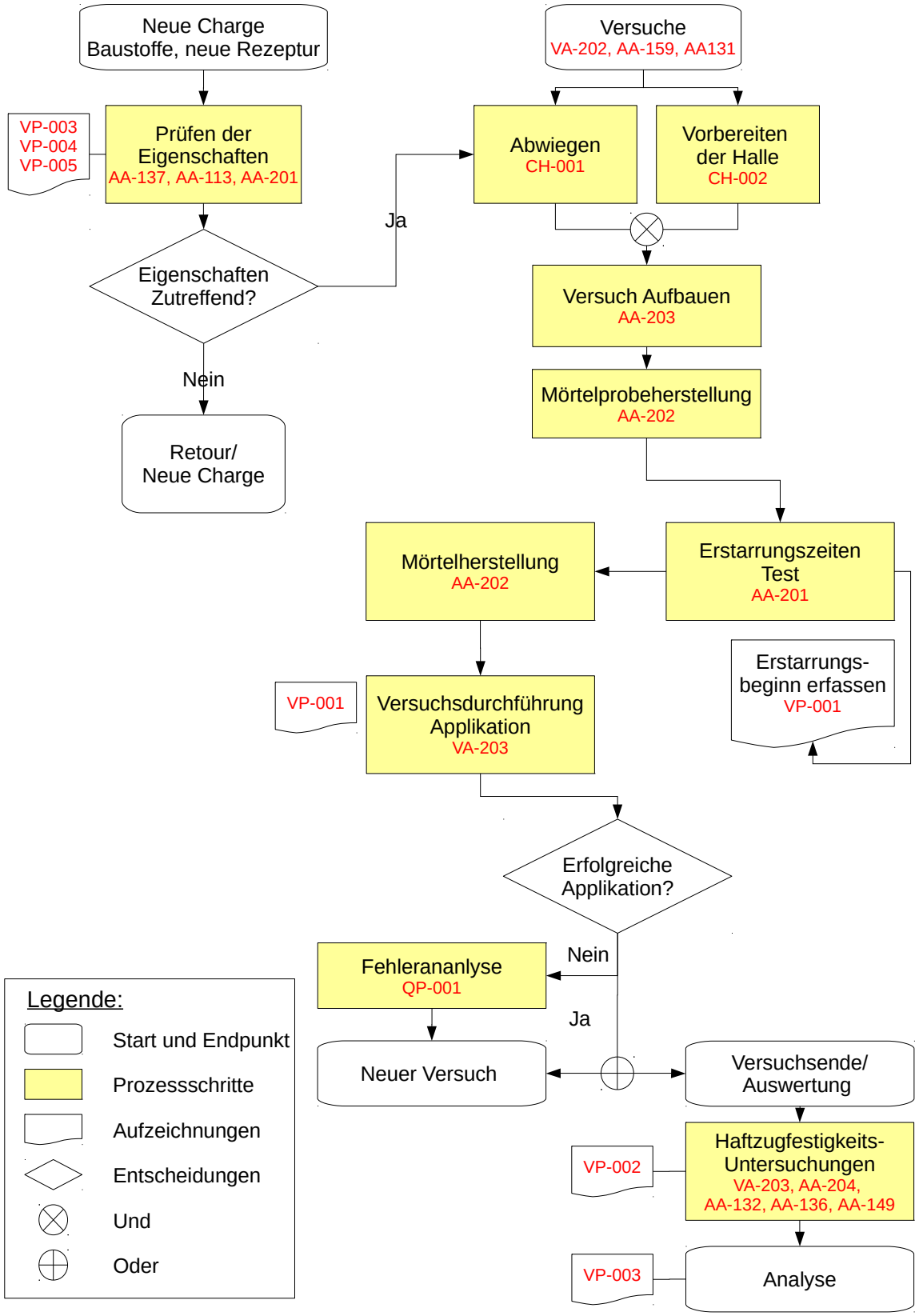


Abbildung 6.28.: QM Plan (QP-002), aus [81] (abgeändert)

aus Vorversuchen ist vor Applikationsversuchen ein Erstarrungszeiten-Versuch durchzuführen (AA-201). Nach bekannter Erstarrungszeit für den Moment (Temperatur, Luftfeuchte, Umgebung, abgewogenes Material) kann mit dieser Kenntnis die Durchführung der Applikation stattfinden. Für den weiteren zeitlichen Versuchsablauf ist die Kenntnis der Erstarrungszeit sehr wichtig, um den optimalen Zeitpunkt für das Aufbringen des Mörtels einzugrenzen. In Abhängigkeit der zu verwendenden Applikationstechnik kann dieser optimale Zeitpunkt variieren.

Die Applikation des Mörtels unter Wasser wird durchgeführt. Bleibt der Mörtel auf der Betonoberfläche haften und erzielt einen Verbund, ist der Versuch zunächst erfolgreich. Mittels der Auswertung mit nachgeschalteter Haftzugfestigkeitsprüfung wird der Haftverbund der Applikation bewertet.

Fällt der Mörtel nach Applikation ab, gilt dies als gescheiterte Applikation. Eine Fehleranalyse ist durchzuführen. Ein neuer Versuch wird begonnen. Bei Fortführung dieses Forschungsthemas ist dieser QM-Plan fortzuschreiben und anzupassen.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Zu Beginn dieses Forschungsprojektes war offen, ob eine Applikation von Mörtel auf Betonoberflächen unter Wasser in der angestrebten Form überhaupt möglich ist. Im Laufe des Projektes ist es gelungen, zu zeigen, dass es möglich ist, Mörtel unter Wasser zu applizieren - sowohl auf waagerechte als auch auf senkrechte Flächen und ohne Einschalen des Betonbauwerks. Es konnten viele Erkenntnisse und Grundlagen zu diesem neuen Anwendungsfeld gesammelt werden.

Es wurden mehrere Mörtel entwickelt, die unter Wasser applizierbar sind und einen stabilen Verbund mit dem Betonuntergrund eingehen. Dabei war es möglich unterschiedliche Eigenschaften zu erzeugen, um den Mörtel an die Applikationstechnik anzupassen. Die Mörtelrezepturen waren das Ergebnis eines umfangreichen Versuchs- und Testprozesses mit iterativen Anpassungen und Optimierungen, da es keine bestehenden Rezepturen oder Methoden als Grundlage gab. Allen einsetzbaren Rezepturen gemeinsam ist, dass Sie auf schnell erstarrendem Bindemittel beruhen. Materialien mit normalen Erstarrungszeiten zementgebundener Baustoffe sind ungeeignet, auch wenn sie mit Erstarrungsbeschleunigern gemischt werden – nach Auftrag unter Wasser fallen sie spätestens nach wenigen Minuten von der Betonoberfläche ab. Beim Einsatz von schnell erstarrendem Zement konnte die Erstarrungszeit durch Zugabe von Verzögerern auf die Applikationstechnik eingestellt werden. Verschiedene Zusatzstoffe- und Mittel wurden eingesetzt um Eigenschaften der Mörtel wie Konsistenz und Verarbeitbarkeit, Wasserbedarf, etc. anzupassen. Grundsätzlich basieren die Mörtel alle auf handelsüblichen mineralischen Hauptbestandteilen, die zu vertretbaren Kosten verfügbar sind.

Eine besondere Herausforderung lag in der Entwicklung von Applikationstechniken zum Aufbringen des Mörtels unter Wasser. Die für den normalen Einsatz an Luft bekannten Auftragsverfahren waren für eine Unterwasseranwendung ungeeignet. Daher wurden auch in diesem Bereich zahlreiche Versuche durchgeführt, um verschiedene Verfahrensansätze zu testen. Das Ziel bei diesen Untersuchungen war es, Grundlagen zu schaffen und Möglichkeiten der Unterwasserapplikation zu erforschen, um herauszuarbeiten, ob das Aufbringen von Mörtel unter Wasser realistisch möglich ist und auf welchen Verfahren es basieren kann. Für die Anwendungsperspektive war dabei auch interessant, ob eine großflächige bzw. in der Fläche fortsetzbare Anwendung machbar ist. Ein anwendungsreifes Applikationsverfahren herzustellen war nicht Ziel dieser Arbeit, da erst die Grundlagen geschaffen werden mussten.

Ein unter Wasser anwendbares Spritzverfahren wäre wünschenswert, wurde aber nach eingehenden Tests als nicht realisierbar verworfen. Als grundlegendes Kriterium für das erfolgreiche Applizieren unter Wasser wurde ein zuverlässiges mechanisches Andrücken des Mörtels an den Beton identifiziert. Nur wenn ein ausreichender Andruck vorliegt und ausreichend lange aufrecht erhalten wird, geht der Mörtel einen Haftverbund mit dem Untergrund ein - dies

sicherzustellen, ist Hauptaufgabe der Applikationstechnik. Ein gleitender Auftrag wurde mit verschiedenen Ansätzen erprobt, konnte jedoch das beschriebene Kriterium des gleichmäßigen und ausreichenden Andrucks nicht erfüllen und führte damit nicht zu erfolgreichen flächigen Applikationen. Erfolgversprechend war das Applizieren mittels eines Stempels oder einer formgebenden Platte, die den Mörtel an den Untergrund pressen. Mit diesen Verfahren konnten hohe Haftzugfestigkeiten bzw. gleichmäßige Mörtelflächen erreicht werden. Auch das lückenlose Aneinandersetzen von Mörtelflächen für einen fortgesetzten Mörtelauftrag ist mit dieser Technik bereits gelungen. Die erzielten Schichtdicken erfolgreicher Applikationen lagen im Bereich mehrerer Zentimeter, was eine Anwendung an beschädigten Bauwerken im Wasser realistisch macht.

Mit hohen Haftzugwerten (maximal 2,4 N/mm^2 bzw. 1,7 N/mm^2 als höchster Mittelwert einer Verbundprobe) konnten die Forderungen nach RL-SIB erreicht und teilweise übertroffen werden.

Es wurden Strategien entwickelt, um trotz der Sensibilität des Systems und der Streuung der Mörteleigenschaften (insbesondere der Erstarrungszeit) eine hohe Quote erfolgreicher Applikationen sicherzustellen.

Mit dieser Arbeit wurden Grundlagen für die Betoninstandsetzung unter Wasser geschaffen, die zeigen, dass ein solches bisher nicht existierendes Instandsetzungsverfahren realistisch möglich ist. Weitere Untersuchungen, Erbrobungen und Entwicklung sind nötig, um einer praktischen Anwendungsreife näher zu kommen. Eine fortschreitende Standardisierung und Mechanisierung der Abläufe ist ein zukünftiges Ziel, um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu erhöhen. Die Untersuchung der Streuung der Ergebnisse bei exakt identischen Versuchsabläufen und Strategien zur Eindämmung der Streuung würden helfen, die Zuverlässigkeit des Systems zu erhöhen. Da der in der Beton- und Mörtelverarbeitung bisher übliche Grad an Präzision und Reproduzierbarkeit bei diesem Thema an seine Grenzen stößt, ist eine Zusammenarbeit mit Baustoffherstellern notwendig, um eine höhere Konstanz der Baustoffeigenschaften als bisher verfügbar zu ermöglichen. Die Baustoffe müssen vor der Verwendung auf Einhaltung vorher erprobter Qualitätskriterien geprüft werden.

Zukünftige Untersuchungen können auch Umgebungseinflüsse wie das Wassermilieu oder die Form der Betonoberfläche berücksichtigen. Genauso ist eine Betrachtung der Auswirkung auf die Wasserumgebung interessant, z. B. Veränderungen der Wassertrübung oder des pH-Wertes, um die Umweltverträglichkeit des Verfahrens zu berücksichtigen. Im Rahmen einer studentischen Arbeit [117] wurde die Trübung bereits betrachtet, die beobachteten Trübungswerte lagen unter denen der Elbe.

Für die Weiterentwicklung der Applikationstechnik und das Konzipieren einer ausreichend exakten und skalierbaren Misch- und Fördertechnik ist eine interdisziplinäre Zusammenarbeit mit Fachleuten aus anderen Bereichen wie Verfahrenstechnik, Maschinenbau und anwendender Bauindustrie notwendig. Die Weiterentwicklung einer Applikationsplatte mit formgebenden

aber kompressiblen Rändern und einer direkten Mörtelzufuhr an den Ort der Applikation ist das aktuell vielversprechendste Konzept für eine Weiterentwicklung. Ein nächster Schritt wäre eine Modifikation dieser Technik, die ein seitliches Andrücken beim fortgesetzten Aneinanderfügen von Teilflächen zu einer großen Gesamtfläche ermöglicht. Wichtig für eine Anwendbarkeit der Technik ist eine zuverlässige Automatisierung, da unter realen Bedingungen keine rein manuelle Anwendung mit visueller Kontrolle möglich sein wird. Eingeschränkte Sicht und schlechte Erreichbarkeit der Instandsetzungsstellen würden dies verhindern. Durch eine Automatisierung können auch Parameter wie Anpressdruck und -dauer konstant gehalten werden, um eine gleichbleibende Applikationsqualität zu ermöglichen.

Nach dem in dieser Arbeit gewonnenen Kenntnisstand scheint folgendes Anwendungsszenario als Fernziel realistisch: Ein computergesteuerter Industrieroboterarm, wie in vielen Industriebereichen bereits zur Automation im Einsatz, der von einer Überwasserplattform aus betrieben wird, dient als Grundsystem. Durch diesen Arm wird die schadhafte Oberfläche mit einem Ultraschall-Sonarsystem systematisch gescannt. Die gewonnenen Daten werden in einem 3D-Modell visualisiert. Anhand der Visualisierung wird der Instandsetzungsbereich festgelegt und als Koordinaten in die Steuerung einprogrammiert. Mit einer Hochdruckwasserstrahldüse fährt der Arm den programmierten Bereich ab und reinigt die Oberfläche. Ein erneuter Sonarscan ermöglicht die Begutachtung der Reinigung. Anschließend wird eine Applikationsplatte passender Größe ausgewählt und an dem Roboterarm befestigt. Die Mörtelzufuhr erfolgt durch ein Schlauchsystem direkt in die Platte. Ein geprüfter, vorgemischter und geschützt abgepackter Werktrockenmörtel wird direkt auf der Operationsplattform automatisiert mit Wasser gemischt, was eine präzise Dosierung und Mischung sicherstellt. Ein Teil des angemischten Mörtels wird kontinuierlich abgeführt, um mit einem mechanischen Verfahren die Erstarrungszeit zu messen. Die Fördergeschwindigkeit des Mörtels in die Platte wird der Erstarrungszeit angepasst, um den optimalen Applikationszeitpunkt und die benötigte Konsistenz einzuhalten. Wenn die Schadstelle größer als die verfügbare Applikationsplatte ist, wird die Platte Stück für Stück so versetzt, dass eine lückenlose Abdeckung des instandzusetzenden Bereichs erfolgt.

Bis zur Umsetzung dieses Szenarios bedarf es weiterer umfangreicher Forschungs- und Entwicklungsarbeit mit substanziellem Ressourceneinsatz. Aufgrund der zunehmenden Alterung von Betonbauwerken im Wasser, erscheint dieser Ressourceneinsatz durchaus lohnend. Die vorliegende Arbeit hat erfolgreich den Grundstein für diesen Weg gelegt.

Literaturverzeichnis

[1] Albrecht, Walter; Mannherz, Ursula (1968): Zusatzmittel, Anstrichstoffe, Hilfsstoffe für Beton und Mörtel. 8. Aufl. Wiesbaden [u.a.]: Bauverlag.

[2] American Concrete Institute (ACI) (2006): Guide to Underwater Repair of Concrete. Reported by ACI Committee 546, vom November 2006. Online verfügbar unter http://www.concrete.org/COMMITTEES/pdf/TempDoc/546.2R_to_TAC.pdf, Zuletzt geprüft am: 15.12.2010.

[3] Andreasen, A. H. M. (1930): Ueber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten). In: Kolloid-Zeitschrift 50 (3), S. 217–228. DOI: 10.1007/BF01422986.

[4] Arbeitsausschuss Ufereinfassungen der Hafentechnischen Gesellschaft e.V. und der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (2012): Empfehlungen des Arbeitsausschusses Ufereinfassungen - Häfen und Wasserstraßen - EAU 2012. 11., vollständig überarbeitete Auflage. Berlin: Ernst & Sohn.

[5] Arnold, Markus (2004): Polymergesteuerte Kristallisation von Calciumhydroxid und Calciumsilicathydrat. Dissertation. Universität Siegen, Siegen. Fachbereich 8.

[6] Becker, D. (1994): Süllkästen für die Inspektion und Instandsetzung. In: Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft 49, S. 154–156.

[7] Beitzel, Marc (2014): Frischbetondruck unter Berücksichtigung der rheologischen Eigenschaften. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IMB). Online verfügbar unter http://primo.bibliothek.kit.edu/primo_library/libweb/action/dlDisplay.do?vid=KIT&docId=KITSRCE1000025281&tab=kit_evastar&srt=date, Zuletzt geprüft am Zuletzt geprüft am: 25.12.2016.

[8] Bellmann, Torben (2016): Sandbetone mit moderaten Bindemittelgehalten. Masterarbeit am Institut für Baustoffe, Bauphysik und Bauchemie. Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg. Institut für Baustoffe, Bauphysik und Bauchemie, (unveröffentlicht).

[9] Benedix, Roland (2014): Bauchemie für das Bachelor-Studium. Modern - Kompetent - Kompakt. Wiesbaden: Springer Vieweg.

[10] Benz, G. H. (1979): Erstarrungsverzögerer für Beton. In: Schweizer Bauwirtschaft 57, Seitenangabe nicht bekannt, [zitiert in GRÜBL [72]].

[11] Bischof, Claus; Possart, Wulff (1983): Adhäsion : theoretische und experimentelle Grundlagen. Berlin: Akademie-Verl.

[12] Biscoping, Michaela: Gesteinskörnungen für Normalbeton. Ausgabe 01-2012. In: Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hg.): Zement-Merkblätter, B 2. Forschungsinstitut der Zementindustrie. Düsseldorf (Zement-Merkblätter). Online verfügbar unter http://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Zementmerkblaetter/B2.pdf, Zuletzt geprüft am: 25.12.2016.

[13] Bobe, Ulrich (2008): Die Reinigbarkeit technischer Oberflächen im immergierten System. Dissertation. Technische Universität München, München. Lehrstuhl für Maschinen- und Apparatekunde. Online verfügbar unter http://mediatum.ub.tum.de/doc/649731/649731.pdf, Zuletzt geprüft am: 25.12.2016.

[14] Bornemann, Roland (2005): Untersuchungen zur Modellierung des Frisch- und Festbetonverhaltens erdfeuchter Betone. Dissertation. Universität Kassel, Kassel. Online verfügbar unter www.uni-kassel.de/upress/online/frei/978-3-89958-132-4.volltext.frei.pdf, Zuletzt geprüft am: 14.11.2013.

[15] Bosold, Diethelm; Pickhardt, R.: Zemente und ihre Herstellung. Ausgabe 04-2014. In: Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hg.): Zement-Merkblätter, B 1. Forschungsinstitut der Zementindustrie. Düsseldorf (Zement-Merkblätter). Online verfügbar unter http://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Zementmerkblaetter/B1.pdf, Zuletzt geprüft am: 16.02.2016.

[16] Brouwers, H. J. H. (2006): Particle-size distribution and packing fraction of geometric random packings. In: Phys. Rev. E 74 (3), S. 031309-1 - 031309-14. DOI: 10.1103/PhysRevE.74.031309.

[17] Brouwers, H. J. H. (2006): Topics in Cement and Concrete Research. In: F. A. Finger - Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar und Jochen Stark (Hg.): 16. ibausil, internationale Baustofftagung, Bd. 1. ibausil - Internationale Baustofftagung. Weimar, 20.-22.09. F. A. Finger - Institut für Baustoffkunde. 2 Bände. Weimar, S. 265–295. Online verfügbar unter http://purl.utwente.nl/publications/58006, Zuletzt geprüft am: 01.03.2016.

[18] Brux, Gunther (1958): Das Colcrete-Verfahren, seine Weiterentwicklung und Anwendung als Massen-, Unterwasser- und Spritzbeton sowie für Zement-Kolloid-Injektionen in Deutschland. In: Baumaschine und Bautechnik 5 (9), S. 299–305.

[19] Büchter, A.; Henn, H. W. (2007): Elementare Stochastik: Eine Einführung in die Mathematik der Daten und des Zufalls: Springer Berlin Heidelberg.

[20] Budnik, Joachim; Dornauer, Hermann (1993): Sichere Grundlagen für Beschichtungen. Untersuchungen über die Abreißfestigkeit von Betonen. In: beton 43 (12), S. 650–653.

[21] Bundesanstalt für Straßenwesen (2007): ZTV-ING, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. Teil 1 Allgemeines.

[22] Bundesanstalt für Straßenwesen (2010): ZTV-ING, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. Teil 3 Massivbau.

[23] Bundesanstalt für Wasserbau (BAW): Spritzmörtel/Spritzbeton nach ZTV-W LB 219, Abschnitt 5 (MSM), BAW-MSN, vom 2012. In: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) (Hg.): BAW-Merkblätter und Richtlinien. Online verfügbar unter http://vzb.baw.de/publikationen/merkblaetter/0/BAWMerkblatt_Spritzmoertel_MSM_2012.pdf, Zuletzt geprüft am: 17.02.2016.

[24] Bundesminister für Verkehr: Abt. Binnenschiffahrt und Wasserstraßen (2013): ZTV-W, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen - Wasserbau für Schutz und Instandsetzung der Betonbauteile von Wasserbauwerken (Leistungsbereich 219). ZTV-W, LB 219. Online verfügbar unter http://vzb.baw.de/publikationen/stlk-w_ztv-w/0/ztv-w_lb219_2013.pdf, Zuletzt geprüft am: 16.02.2016.

[25] Collins, Thomas J. (1999): Underwater Concrete Construction and Repair. In: R. K. Dhir und N. A. Henderson (Hg.): International Conference on Specialist Techniques and Materials for Concrete Construction. London: Thomas Telford, S. 257–267.

[26] Dahms, J. (1968): Einfluss der Eigenfeuchtigkeit auf die Druckfestigkeit des Betons. In: Betontechnische Berichte, S. 113–126. Online verfügbar unter http://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Fachaufsaetze/1961_1970/Betontechnische_Berichte_68_Einfluss_der_eigenfeuchtigkeit_auf_die_Druckfestigkeit_des_Betons.pdf, Zuletzt geprüft am: 25.11.2013.

[27] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (April 2008): Schutz und Instandsetzung von Betonbauwerken in kommunalen Kläranlagen. DWA-M 211.

[28] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) (2001): DAfStb-Richtlinie Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (Instandsetzungs-Richtlinie). RL SIB.

[29] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) (2012): Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie). SVB-Rili.

[30] Deutsches Institut für Bautechnik - DIBt - (Juni 2005): Grundsätze für die Erteilung von Zulassungen für Betonzusatzmittel (Zulassungsgrundsätze). Zulassungsgrundsätze, vom Juni 2005. In: Schriften des Deutschen Instituts für Bautechnik (10). Online verfügbar unter https://publikationen.dibt.de, Zuletzt geprüft am: 03.12.2015.

[31] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2005): Beton: Zusammenstellung von DIN EN 206-1 Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität und DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1. DIN Fachbericht 100. 2. Aufl. Berlin [u.a.]: Beuth. [bereits zurückgezogen und ersetzt durch den DIN Fachbericht 100 (2010), jedoch in dieser Version zitiert in SPRINGENSCHMID [165]]

[32] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN 1045-2, 2008-08: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1.

[33] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN 1048-2, 1991-06: Prüfverfahren für Beton; Festbeton in Bauwerken und Bauteilen. [2015-09 zurückgezogen ohne Ersatz]

[34] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN 1053-1, 1996-11: Mauerwerk - Teil 1: Berechnung und Ausführung.

[35] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN 1164-11, 2003-11: Zement mit besonderen Eigenschaften- Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Übereinstimmungsnachweis von Zement mit verkürztem Erstarren.

[36] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN 18555-3, 1982-3: Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln: Festmörtel, Bestimmung der Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit und Rohdichte.

[37] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN 18555-6, 1987-11: Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln: Festmörtel, Bestimmung der Haftzugfestigkeit.

[38] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 1015-3, 2007-05: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch).

[39] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 1015-11, 2007-05: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 11: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel.

[40] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 12190, 1998-12: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken Prüfverfahren: Bestimmung der Druckfestigkeit von Reparaturmörteln.

[41] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 12390-2, 2009-08: Prüfung von Festbeton - Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen.

[42] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 12390-3, 2009-07: Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern.

[43] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 12636, 1999-08: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken Prüfverfahren – Bestimmung der Verbundwirkung Beton – Beton.

[44] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 1504-9, 2008-11: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Definitionen, Anforderungen, Qualitätsüberwachung und Beurteilung der Konformität - Teil 9: Allgemeine Grundsätze für die Anwendung von Produkten und Systemen.

[45] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 1504-10, 2004-05: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Definitionen, Anforderungen, Qualitätsüberwachung und Beurteilung der Konformität - Teil 10: Anwendungen von Stoffen und Systemen auf der Baustelle, Qualitätsüberwachung der Ausführung;

[46] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 1542, 1999-07: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Prüfverfahren - Messung der Haftfestigkeit im Abreißversuch.

[47] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 1766, 2000-03: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Prüfverfahren - Referenzbetone für Prüfungen.

[48] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 196-1, 2005-05: Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit.

[49] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 196-3, 2009-02: Prüfverfahren für Zement - Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit.

[50] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 197-1, 2009-09: Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien.

[51] DIN EN 206-1, 2014-07: DIN EN 206-1 Beton, Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität.

[52] Dinger, Dennis R. (2003): Particle Packing and Pore Size Distributions. In: Ceramic Processing E-zine 1 (9), Online verfügbar unter http://www.dingerceramics.com/CeramicProcessingE-zine/CPEBackIssues/Vol1Num9.htm, Zuletzt geprüft am: 01.03.2016.

[53] Distler, D. (1999): Wässrige Polymerdispersionen: Synthese, Eigenschaften, Anwendungen: Wiley-VCH.

[54] Dutschk, Victoria (2000): Oberflächenkräfte und ihr Beitrag zu Adhäsion und Haftung in glasfaserverstärkten Thermoplasten. Dissertation. Technische Universtität Dresden, Fakultät Maschinenwesen. Dresden. Online verfügbar unter http://www.ipfdd.de/fileadmin/user_upload/pg/arbeitsgebiete/Dissertation-deutsch_dutschk.pdf, Zuletzt geprüft am: 10.09.2013.

[55] Eichler, K.; Flohrer, C.; Pichler, W. (2003): Spritzbeton-Technologie: Bindemittel und Verfahren - Bautechnik und Umwelt - Verstärken und Instandsetzen - Sichern und Schützen. Renningen: Expert-Verlag.

[56] Ettel, Wolf-Peter (1998): Kunstharze und Kunststoffdispersionen für Mörtel und Betone. Struktur der Polymere : Planung, Bemessung, Prüfung. Düsseldorf: Beton-Verlag.

[57] Fahrmeir, Ludwig; Kneib, Thomas; Lang, Stefan (2009): Regression : Modelle, Methoden und Anwendungen. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

[58] Fiebrich, Michael (1994): Grundlagen der Adhäsionskunde. In: H. Rainer Sasse (Hg.): Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen unter Verwendung von Kunststoffen. Berlin: Beuth (Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, 443), S. 75–90.

[59] Fiebrich, Michael (1987): Zur Adhäsion zwischen polymeren Bindemitteln und Beton unter besonderer Berücksichtigung von Wassereinwirkungen. Dissertation. Technische Hochschule Aachen, Aachen.

[60] Fischböck, Eva K.; Nischer, Peter (2009): Kornzusammensetzung des Mehlkorns. Notwendigkeit der Ermittlung und Einfluss der Bestimmungsmethode auf das Ergebnis. In: zement + beton (5), S. 20–25. Online verfügbar unter http://www.zement.at/Service/literatur/fileupl/05_09kornzusammensetzung.pdf, Zuletzt geprüft am: 24.05.2016.

[61] Fuller, W. B.; Thompson, S. E. (1907): The laws of proportioning concrete. In: Transactions of the American Society of Civil Engineers 59 (Paper Nr. 1053), S. 67–143. Online verfügbar unter https://archive.org/download/transactionsofam59amer/transactionsofam59amer_bw.pdf, Zuletzt geprüft am: 04.03.2016.

[62] Funk, James E.; Dinger, Dennis R. (2001): Predictive process control of crowded particulate suspensions. Applied to ceramic manufacturing. 4. printing. Boston: Kluwer.

[63] Funk, James E.; Dinger, Dennis R.; Funk, J. E., JR. (1980): Coal Grinding and Particle Size Distribution Studies for Coal-Water Slurries at High Solids Concentrations. Empire State Electric Energy Research Corporation (ESEERCO). New York.

[64] Funk, James E.; Dinger, Dennis R.; Funk, J. E., JR. (1980): Status Report of Development of a 75 Weight Percent Coal-Water Slurry. In: Proceedings of the 5th International Conference on Slurry Transportation. Lake Tahoe, NV, März 1980. Slurry Transport Association, S. 115–118.

[65] Furnas, C. C. (1931): Grading Aggregates - I. - Mathematical Relations for Beds of Broken Solids of Maximum Density. In: Ind. Eng. Chem. 23 (9), S. 1052–1058. DOI: 10.1021/ie50261a017.

[66] Geisenhanslüke, Carsten (2008): Einfluss der Granulometrie von Feinstoffen auf die Rheologie von Feinstoffleimen. Influence of the granulometry of fine particles on the rheology of pastes. Dissertation. Kassel: Kassel University Press.

[67] Geisenhanslüke, Carsten (2002): Excelbasiertes Makro zur Berechnung von Packungsdichten von Stoffgemischen über jeweils 128 Korngrößen. Universität Kassel, (unveröffentlicht).

[68] Gieler, Rolf P.; Dimmig-Osburg, Andrea (2006): Kunststoffe für den Bautenschutz und die Betoninstandsetzung. Basel: Birkhäuser.

[69] Gleich, Henning (2004): Zusammenhang zwischen Oberflächenenergie und Adhäsionsvermögen von Polymerwerkstoffen am Beispiel von PP und PBT und deren Beeinflussung durch die Niederdruck-Plasmatechnologie. Dissertation. Universität Duisburg-Essen, Duisburg.

[70] Good, Robert J.; Elbing, Enn (1970): Generalization of Theory for Estimation of Interfacial Energies. In: Ind. Eng. Chem 62 (3), S. 54–78. DOI: 10.1021/ie50723a009.

[71] Götz-Neunhoeffer, Friedlinde (2006): Modelle zur Kinetik der Hydratation von Calciumaluminatzement mit Calciumsulfat aus kristallchemischer und mineralogischer Sicht. Habilitationsschrift. Erlangen: Univ.-Bund Erlangen-Nürnberg e.V..

[72] Grübl, Peter; Weigler, Helmut; Karl, Sieghart (2001): Beton. Arten, Herstellung und Eigenschaften. 2. Aufl. Berlin: Ernst & Sohn.

[73] Hahn, André; Uhlig, Hagen (2013): Beton – interessante betontechnologische Effekte aus der Praxis. In: Beton-Informationen 53 (3/4), S. 35–59. Online verfügbar unter http://www.beton-informationen.de/downloads/1-2013-03-01.pdf, Zuletzt geprüft am: 25.12.2016.

[74] Heiss, R. (2013): Haltbarkeit und Sorptionsverhalten wasserarmer Lebensmittel. Berlin, Heidelberg: Springer.

[75] Henning, O.; Knöfel, D.; Stephan, D. (2014): Baustoffchemie: Eine Einführung für Bauingenieure und Architekten. Hg. v. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 7., vollständig überarbeitete Auflage. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

[76] Henning, Otto; Knöfel, Dietbert (2002): Baustoffchemie. Eine Einführung für Bauingenieure und Architekten. 6., aktualisierte Auflage. Berlin: Verl. Bauwesen.

[77] Hillemeier, Bernd; Flohrer, Claus; Krell, Jürgen; Marquardt, Gabriele; Orlowsky, Jeanette; Raupach, Michael et al. (2010): Instandsetzung und Erhaltung von Betonbauwerken. In: Konrad Bergmeister, Frank Fingerloos und Johann-Dietrich Wörner (Hg.): Beton-Kalender 2011. Schwerpunkte: Kraftwerke, Faserbeton. Weinheim: Ernst & Sohn, S. 279–410.

[78] Hillemeier, Bernd; Herr, R.; Kannenberg, M.; Schubert, Karsten (2005): Sichtbeton - Schalhaut und Trennmittel. In: Harald S. Müller, Dipl.-Wirt.-Ing. Ulrich Nolting und Dipl.-Ing. Michael Haist (Hg.): Symposium. Sichtbeton – Planen, Herstellen, Beurteilen. 2. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung. Universität Karlsruhe (TH), 17. März 2005. Institut für Massivbau und Baustofftechnologie. Karlsruhe: Universtiätsverlag Karlsruhe, S. 45–56.

[79] Hillemeier, Bernd; Herr, R.; Schubert, Karsten; Kannenberg, M. (2005): Sichtbeton - Schalhaut und Trennmittel. In: Gesellschaft deutscher Chemiker und Fachgruppe Bauchemie (Hg.): Tagung Bauchemie, Bd. 35. Berlin, 29.-30. September 2005. Gesellschaft deutscher Chemiker (35), S. 128–149.

[80] Hillemeier, Bernd; Stenner, R.; Flohrer, Claus; Polser, H.; Buchenau, G. (1999): Instandsetzung und Erhaltung von Betonbauwerken. In: Josef Eibl (Hg.): Beton-Kalender 1999, Bd. 2. 2 Bände. Berlin: Ernst & Sohn, S. 595–702.

[81] Hünerberg, Eva (2016): Qualitätsmanagement im Bauwesen. Beschreibung des Qualitätsmanagements im Bauwesen und Erstellung eines Vorschlages für Qualitätsmanagement in einem Forschungsprojekt. Projektarbeit am Institut für Baustoffe, Bauphysik und Bauchemie. Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg, (unveröffentlicht).

[82] Hüsken, G.; Brouwers, H. J. H. (2006): Theoretical and experimental study of earth-moist concrete. In: F. A. Finger - Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar und Jochen Stark (Hg.): 16. ibausil, internationale Baustofftagung, Bd. 1. 20.-22.09.2006. 2 Bände. Weimar, S. 1143–1152. Online verfügbar unter http://doc.utwente.nl/58027/1/Brouwers_Conference19.pdf, Zuletzt geprüft am: 25.12.2016.

[83] Jander, Gerhart; Blasius, Ewald; Strähle, Joachim; Schweda, Eberhard (1995): Lehrbuch der analytischen und präparativen anorganischen Chemie. Mit 45 Tabellen. 14., neu bearb. Aufl. Stuttgart: Hirzel.

[84] Jordan, Philipp (2012): Untersuchung des Haftverbundes zwischen Neu- und Altbeton. Bachelorarbeit am Institut für Baustoffe, Bauphysik und Bauchemie. Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg, (unveröffentlicht).

[85] Kampen, Rolf: Betonzusätze, Zusatzmittel und Zusatzstoffe. Ausgabe 02-2014. In: Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hg.): Zement-Merkblätter, B 3. Forschungsinstitut der Zementindustrie. Düsseldorf. Online verfügbar unter http://www.vdz-online.

de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Zementmerkblaetter/B3.pdf, Zuletzt geprüft am: 03.03.2015.

[86] Kaufmann, Norbert (1971): Das Sandflächenverfahren. In: Straßenbau-Technik 24 (3), S. 131–135.

[87] Kleber, Will (1998): Einführung in die Kristallographie. 18. Aufl.: Verl. Technik.

[88] Krass, Jens; Mitransky, Bärbel; Rupp, Gerhard (2009): Grundlagen der Bautechnik. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.

[89] Kröpke, Finn (2014): Die Abhängigkeit zwischen Feuchtegehalt im Beton zum Zeitpunkt der Prüfung und seiner Festigkeit. Bachelorarbeit am Institut für Baustoffe, Bauphysik und Bauchemie. Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg, (unveröffentlicht).

[90] Krüss GmbH: Drop Shape Analyzer - DSA 100. Das universelle, hochwertige Instrument zur Benetzungs- und Beschichtungsanalyse. Online verfügbar unter https://www.kruss.de/de/produkte/kontaktwinkel/dsa100/drop-shape-analyzer-dsa100/, zuletzt geprüft am 25.12.2016.

[91] Lea, Frederick Measham (1970): The chemistry of cement and concrete. 3. ed. London: Edward Arnold.

[92] Lüders, Frank (1990): Verbund zwischen Alt- und Neubeton. Stahlbetonkonstruktionen: experimentelle und theoretische Untersuchungen. In: Bauinformation Wissenschaft und Technik: BWT 260 (3), S. 15–21.

[93] Ludwig, U. (1983): Über die Wirkung von Verzögerern auf das Erstarren von Zementen. In: Beton-Informationen 23 (3), S. 31–35.

[94] Lunk, Peter (2000): Oberflächenfestigkeit: Untergrund (Beton). In: Roland Wolfseher (Hg.): Haften zwischen zementgebundenen Schichten. Freiburg [Breisgau], Unterengstringen/Zürich: Aedificatio-Verl. (WTA conference notes / Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V, no. 2), S. 19–28.

[95] Macht, Jürgen; Nischer, Peter (2006): Mehlkornoptimierung– Notwendigkeit und Möglichkeiten zur Ermittlung der Korneigenschaften. In: Betonwerk Fertigteil-Technik: BFT; Fachzeitschrift für Beton- u. Stahlbetonfertigteile, Betonwaren u. offizielles Organ d. Bundesverbandes Deutsche Beton- und Fertigteilindustrie 72 (4), S. 38–47.

[96] Mailvaganam, Noel P. (1995): Admixtures for Repair and Restoration of Concrete. In: V. S. Ramachandran (Hg.): Concrete admixtures handbook. Properties, science, and technology. 2nd ed. Park Ridge, N.J., U.S.A.: Noyes Publications (Building materials science series), S. 839–876.

[97] Mailvaganam, Noel P. (1995): Miscellaneous admixtures. In: V. S. Ramachandran (Hg.): Concrete admixtures handbook. Properties, science, and technology. 2nd ed. Park Ridge, N.J., U.S.A.: Noyes Publications (Building materials science series), S. 939–1024.

[98] Mann, Oliver (2011): Prüfung der Oberflächenzugfestigkeit von Beton. Verschiedene Regelwerke - unterschiedliche Anforderungen. In: beton 61 (1/2), S. 14–18. Online verfügbar unter http://mpva.de/?smd_process_download=1&download_id=1482, Zuletzt geprüft am: 25.12.2016.

[99] Matlab Hilfe: fmincon. Hg. v. The MathWorks, Inc. Online verfügbar unter https://de.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html?searchHighlight=fmincon&s_tid=doc_srchtitle, Zuletzt geprüft am 19.07.2016.

[100] McDonald, J. E.; Neeley, B. (1999): Underwater concrete placement: materials, methods and case studies. In: R. K. Dhir und N. A. Henderson (Hg.): International Conference on Specialist Techniques and Materials for Concrete Construction. London: Thomas Telford, S. 239–255.

[101] McLeish, Andrew (Hg.) (1994): Underwater concreting and repair. Unter Mitarbeit von Tony C. Liu. London, [New York]: Edward Arnold; J. Wiley.

[102] McLeish, Andrew (1994): Underwater repair of concrete. In: Andrew McLeish (Hg.): Underwater concreting and repair. Unter Mitarbeit von Tony C. Liu. London, New York: Edward Arnold; J. Wiley, S. 85–114.

[103] Mertler, Michael (2007): Herstellung und Charakterisierung hoch poröser nanostrukturierter Filtermembranen. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Technische Chemie des Forschungszentrums Karlsruhe. Online verfügbar unter http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2008/3383/pdf/FZKA7358_mit_Aussentitel.pdf, Zuletzt geprüft am: 12.02.2016. DOI: 10.18419/opus-1752

[104] Meyer, Lars (2007): Zum Einfluss der Kontaktzone bei der Modellierung des Elastizitätsmoduls von Beton. Dissertation. RWTH Aachen, Aachen. Online verfügbar unter darwin.bth.rwth-aachen.de/opus3/volltexte/2008/2112/pdf/Meyer_Lars.pdf, Zuletzt geprüft am: 16.09.2014.

[105] Mollet, Hans (1999): Formulierungstechnik. Emulsionen, Suspensionen, feste Formen. Weinheim: Wiley-VCH.

[106] Momber, Andreas W.; Schulz, Rolf-Rainer (2006): Handbuch der Oberflächenbearbeitung Beton. Bearbeitung, Eigenschaften, Prüfung. Basel [u.a]: Birkhäuser.

[107] Monnet, Walter; Dartsch, Bernhard; Wehefritz, Kurt W. (1980): Colcrete-Beton im Wasserbau. Düsseldorf: Beton-Verlag.

[108] Müller, Andreas Josef (2005): Beton - ein Baustoff der (sich) verbindet. In: Roland Niedermeier (Hg.): Massivbau in ganzer Breite. Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Konrad Zilch. Berlin: Springer Verlag, S. 485–490.

[109] Müller, Bodo; Rath, Walter (2015): Formulierung von Kleb- und Dichtstoffen. Das kompetente Lehrbuch für Studium und Praxis. 3., vollst. überarb. Aufl. Hannover: Vincentz (Farbe und Lack Bibliothek).

[110] Müller, Hilmar (2013): Probeinstandsetzung im Unterwasserbereich (Olpenitz),Langzeiterfahrungen. Untersuchungsbericht. Hg. v. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW). Abteilung: Bautechnik; Referat: Baustoffe (B3). Karlsruhe, (unveröffentlicht).

[111] Nägele, Erich W. (1989): Dispersions-Baustoffe. Köln: R. Müller.

[112] Neroth, Günter; Vollenschaar, Dieter (2011): Wendehorst Baustoffkunde. Grundlagen - Baustoffe - Oberflächenschutz ; mit 363 Tabellen. 27. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.

[113] Nguyen, Lina Phan Anh; Schmidt-Döhl, Frank (2015): Betoninstandsetzung unter Wasser. Mörtelentwicklung und Applikationstechniken. Vortrag. Digitaler Tagungsband. 50. Aachener Baustofftag - Innovation in der Instandhaltung. RWTH Aachen; ibac - Bauwerkserhaltung und Polymerkomposite. Institut für Bauforschung. Aachen, 19.11.2015.

[114] Nguyen, Lina Phan Anh; Schmidt-Döhl, Frank (2015): Betoninstandsetzung unter Wasser. Mörtelentwicklung und Applikationstechniken. In: F. A. Finger - Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar und Horst Michael Ludwig (Hg.): 19. ibausil, internationale Baustofftagung. Weimar, 16.-18.09.2015. 2 Bände. Weimar, Bd. 2, S. 157–164.

[115] Nguyen, Lina Phan Anh (2013): Betoninstandsetzung unter Wasser auf senkrechten Flächen durch Mörtelauftrag ohne Schalung. In: Rolf Breitenbücher und Peter Mark (Hg.): Innovationen in Beton. Forschung & Praxis treffen sich. 1. Jahrestagung mit 54. Forschungskolloquium des DAfStb. 7./8. November. Lehrstuhl für Baustofftechnik und Lehrstuhl für Massivbau der Universität Bochum. Bochum, S. 201–206.

[116] Nguyen, Lina Phan Anh (2010): Instandsetzung senkrechter Betonflächen unter Wasser. Studiengang Bauingenieurwesen und Umwelttechnik. Diplomarbeit am Institut für Baustoffe, Bauphysik und Bauchemie. Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg, (unveröffentlicht).

[117] Nguyen, Lina Phan Anh (2009): Instandsetzung von Stahlbetonoberflächen unter Wasser. Studiengang Bauingenieurwesen und Umwelttechnik; Vertiefung: Massivbau. Studienarbeit am Institut für Massivbau und am Institut für Baustoffe, Bauphysik und Bauchemie. Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg, (unveröffentlicht).

[118] Ohama, Yoshihiko (1995): Handbook of polymer-modified concrete and mortars. Properties and process technology. Park Ridge, N.J: Noyes Publications.

[119] Ohama, Yoshihiko (1995): Polymer-Modified Mortars and Concretes. In: V. S. Ramachandran (Hg.): Concrete admixtures handbook. Properties, science, and technology. 2nd ed. Park Ridge, N.J., U.S.A.: Noyes Publications (Building materials science series), S. 558–656.

[120] Owens, D. K.; Wendt, R. C. (1969): Estimation of the surface free energy of polymers. In: J. Appl. Polym. Sci 13 (8), S. 1741–1747. DOI: 10.1002/app.1969.070130815.

[121] Paulini, Peter; Saxer, Andreas (2008): Grenzen der Kornoptimierung von Zement und Zusatzstoff. Universität Innsbruck, Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften. In: beton 58 (3), S. 110–112.

[122] Peronius, N.; Sweeting, T. J. (1985): On the correlation of minimum porosity with particle size distribution. In: Powder Technology 42 (2), S. 113–121. DOI: 10.1016/0032-5910(85)80043-7.

[123] Pettijohn, F. J.; Potter, P. E.; Siever, R. (2012): Sand and Sandstone. 3. Aufl.: Springer

[124] Pettijohn, F. J. (1987): Sand and Sandstone. 2. Aufl.: Springer.

[125] Pettijohn, F. J.; Potter, P. E.; Siever, R. (1973): Sand and Sandstone. 1. Aufl.: Springer.

[126] Plank, Johann Peter (2012): Bauchemie. In: Konrad Zilch, C. J. Diederichs, Rolf Katzenbach und Klaus J. Beckmann (Hg.): Handbuch für Bauingenieure. Technik, Organisation und Wirtschaftlichkeit. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 158–205.

[127] Powers, Maurice Cary (1953): A new roundness scale for sedimentary particles. In: Journal of Sedimentary Petrology 23, S. 117–119.

[128] Presse, Kommunikation und Marketing, Universität Karlsruhe (TH) (18.12.2006): IfMB zeigt Großversuch zu neuem Instandsetzungsverfahren. Innovativ und dauerhaft. Pressemeldung. Karlsruhe.

[129] Presse, Kommunikation und Marketing, Universität Karlsruhe (TH) (20.12.2006): Karlsruher Bauingenieure führen neues Instandsetzungsverfahren vor. Betonieren unter Wasser. Pressemeldung. Karlsruhe.

[130] Pröbster, Manfred (2008): Baudichtstoffe. Erfolgreich Fugen abdichten ; 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.

[131] Puntke, Wolfgang (2002): Wasseranspruch von feinen Kornhaufwerken. In: beton 52 (5), S. 242–248.

[132] Rauhe, Michael (2007): Hochsaison für Stauseebeton. Karlsruher Ingenieure reparieren Bauwerke auch unter Wasser. In: unikath - Magazin der Universität Karlsruhe 38, S. 32–33.

[133] Raupach, Michael (2016): Die neue Instandhaltungsrichtlinie des DAfStb - Prinzipien und Verfahren. Vortrag. 52. Aachener Baustofftag - Die neue Instandhaltungsrichtlinie. ibac - Bauwerkserhaltung und Polymerkomposite. RWTH Aachen. Aachen, 03.11.2016.

[134] Raupach, Michael (2015): Die neue Instandhaltungsrichtlinie des DAfStb – was erwartet uns? Vortrag. 50. Aachener Baustofftag. ibac - Bauwerkserhaltung und Polymerkomposite. RWTH Aachen. Aachen, 19.11.2015.

[135] Raupach, Michael; Orlowsky, Jeanette (2008): Erhaltung von Betonbauwerken: Baustoffe und ihre Eigenschaften. Wiesbaden: Teubner Verlag.

[136] Raupach, Michael; Orlowsky, Jeanette (2008): Schutz und Instandsetzung von Betontragwerken. Düsseldorf: Verlag Bau + Technik GmbH.

[137] Reinecke, R. (2005): Die Rolle der Oberflächenrauheit in der Altbetonsanierung. In: Roland Niedermeier (Hg.): Massivbau in ganzer Breite. Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Konrad Zilch. Berlin: Springer Verlag, S. 475–483.

[138] Reinecke, R. (2004): Haftverbund und Rissverzahnung in unbewehrten Betonschubfugen. Dissertation. Lehrstuhl für Massivbau der TU München, München.

[139] Reschke, Thorsten (2004): Betoninstandsetzung an Wasserbauwerken. Aspekte und Entwicklungen. Vortrag. In: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) (Hg.): Instandsetzung von Wasserbauwerken.

[140] Reschke, Thorsten (2001): Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton. Dissertation. Düsseldorf, Weimar: Verl. Bau + Technik. (Schriftenreihe der Zementindustrie, 62).

[141] Reul, Horst (2005): Produkte für das Bauwesen, Beschichtungen, Bauklebstoffe, Dichtstoffe. 2. völlig neu berarbeitete und erweiterte Auflage. (Band-Hrsg.). In: Hans Kittel (Hg.): Lehrbuch der Lacke und Beschichtungen, Bd. 7. 2. Aufl. 8 Bände. Stuttgart: Hirzel (Lehrbuch der Lacke und Beschichtungen), 1976-2005.

[142] Reul, Horst (1991): Handbuch Bauchemie. Einführung in die Grundlagen - Rohstoffe, Rezepturen. Augsburg: Verl. für Chem. Industrie Ziolkowsky.

[143] Rickert, Jörg (2004): Zum Einfluss von Langzeitverzögerern auf der Basis von Phosphonsäure auf die Hydratation einzelner Klinkerphasen, Portlandzementklinker und Portlandzemente. Dissertation. Bauhaus-Universität Weimar, Weimar. Fakultät Bauingenieurwesen.

[144] Ristic, V. (2000): Sicherung der Verbundfestigkeit zwischen den Schichten. In: Roland Wolfseher (Hg.): Haften zwischen zementgebundenen Schichten. Freiburg [Breisgau], Unterengstringen/Zürich: Aedificatio-Verl. (WTA conference notes / Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V, no. 2), S. 1–12.

[145] Robson, T. D. (1962): High-aluminia cements and concretes. New York (N.Y.) [u.a.]: Wiley [u.a.].

[146] Robson, T. D. (1952): Characteristics and Applications of Mixtures of Portland and High Alumina Cements. In: Chemistry and Industry (1), S. 2-7, [zitiert in LEA [91] und ROBSON [145]].

[147] Sasse, H. Rainer (Hg.) (1994): Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen unter Verwendung von Kunststoffen. Berlin: Beuth. (Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, 443).

[148] Sasse, H. Rainer (1987): Die Adhäsion zwischen Estrich und Beton - Adhesion on Concrete. In: Industriefußböden, S. 47–56.

[149] Scanlon, John M. (1993): Admixtures - What's new on the Market. In: American Concrete Institute (ACI) (Hg.): Chemical Admixtures. Compilation 23. Detroit, Michigan: American Concrete Institute, S. 3–7.

[150] Schießl, Peter; Meng, Birgit; Rößler, Günther; Schröder, Petra; Schwamborn, Bernd; Spengler, Annette; Wallner, Bernd (2012): Baustoffe. In: Konrad Zilch, C. J. Diederichs, Rolf Katzenbach und Klaus J. Beckmann (Hg.): Handbuch für Bauingenieure. Technik, Organisation und Wirtschaftlichkeit. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 966–1471.

[151] Schimanski, Christoph Paul (2013): Wirkungsweisen von Additiven in Mörtelrezepturen auf deren Verarbeitbarkeit(szeit) und Anwendung unter Wasser. Bachelorarbeit am Institut für Baustoffe, Bauphysik und Bauchemie. Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg, (unveröffentlicht).

[152] Schmidt, Michael (1999): Erdfeuchte Betone: Anforderungen, Verarbeitbarkeit, Grünstandfestigkeit und Prüfverfahren. In: Betonwerk Fertigteil-Technik: BFT; Fachzeitschrift für Beton- u. Stahlbetonfertigteile, Betonwaren u. offizielles Organ d. Bundesverbandes Deutsche Beton- und Fertigteilindustrie 65 (11), S. 14–24.

[153] Schmidt, Phillip (2016): Bestimmung der Packungsdichte und des Wasseranspruchs von Mörtel mit dem PUNTKE-Verfahren. Untersuchung und Beschreibung vorgegebener Mörtel auf ihre Korngrößenverteilung und Ihre Optimierung. Bachelorarbeit am Institut für Baustoffe, Bauphysik und Bauchemie. Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg. Institut für Baustoffe, Bauphysik und Bauchemie, (unveröffentlicht).

[154] Schmidt, Phillip (2016): Bestimmung der Packungsdichte und des Wasseranspruchs von Mörtel mit dem PUNTKE-Verfahren. Untersuchung und Beschreibung vorgegebener Mörtel auf ihre Korngrößenverteilung und Ihre Optimierung. Vortrag zur Bachelorarbeit am Institut für Baustoffe, Bauphysik und Bauchemie. Technische Universität Hamburg-Harburg. Hamburg, 23.12.2016.

[155] Schmidt-Döhl, Frank (2015): Mineralische Baustoffe. Vorlesungsskript SoSe 2015. Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg. Institut für Baustoffe, Bauphysik und Bauchemie.

[156] Schmidt-Döhl, Frank (2013): Materialprüfung im Bauwesen. 1. Aufl.: Fraunhofer IRB Verlag.

[157] Schröder, Manfred (Hg.) (2006): Schutz und Instandsetzung von Stahlbeton. Anleitung zur sachkundigen Planung und Ausführung ; mit 54 Tabellen. 3., überarb. und erw. Auflage: Renningen: Expert-Verlag.

[158] Schröder, Manfred (2014): Eine Frage der Haftung. Betonoberflächen für Beschichtungen vorbereiten. In: Bautenschutz + Bausanierung 36 (2), S. 18–24.

[159] Schulz, Rolf-Rainer (1984): Beton als Beschichtungsuntergrund - Über die Prüfung des Festigkeitsverhaltens von Betonoberflächen mit dem Abreißversuch. Dissertation. RW-TH Aachen, Aachen. Fakultät für Bauwesen.

[160] Schwanda, Fritz (1956): Der Bestwert der Kornzusammensetzung von Betonzuschlagstoffen. In: Der Bauingenieur 31, S. 41–46.

[161] Schwotzer, Matthias: Zur Wechselwirkung zementgebundener Werkstoffe mit Wässern unterschiedlicher Zusammensetzung am Beispiel von Trinkwasserbehälterbeschichtungen. Dissertation. Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), Karlsruhe. Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften.

[162] Scrivener, Karen L.; Capmas, Alain (2004): Calcium Aluminate Cements. In: Peter C. Hewlett (Hg.): Lea's chemistry of cement and concrete. 4. ed. Amsterdam: Elsevier/Butterworth Heinemann, S. 713–782.

[163] Silfwerbrand, J. (1990): Improving concrete bond in repaired bridge decks: Water Jett. In: Concrete International, the magazine of the American Concrete Institute, S. 61–66.

[164] Silfwerbrand, J.; Beushausen, H.; Courard, Luc (2011): Bond. Chapter 4. In: Benoît Bissonnette, Luc Courard, David W. Fowler und Jean-Louis Granju (Hg.): Bonded Cement-Based Material Overlays for the Repair, the Lining or the Strengthening of Slabs or Pavements. Dordrecht: Springer Netherlands, S. 51–79.

[165] Springenschmid, Rupert (2007): Betontechnologie für die Praxis. 1. Aufl. Berlin: Bauwerk.

[166] Stark, Jochen; Wicht, Bernd (2000): Zement und Kalk. Der Baustoff als Werkstoff. Basel [u.a.]: Birkhäuser (Baupraxis).

[167] Stark, Jochen; Krug, Hartmut (1999): Baustoffpraktikum. Band 1: Physikalische Untersuchungen. Skriptum. Bauhaus-Universität Weimar, Weimar. F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde.

[168] Stark, Ursula; Müller, Anette (2006): Korngröße und Kornform von Gesteinskörnungen. In: F. A. Finger - Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar und Jochen Stark (Hg.): 16. ibausil, internationale Baustofftagung, Bd. 1. ibausil - Internationale Baustofftagung. Weimar, 20.-22.09.2006. 2 Bände. Weimar, S. 1295–1304.

[169] Taylor, Harry F. W. (1997): Cement chemistry. 2nd ed. London: Thomas Telford Publishing.

[170] Technisches Komitee Wasserspeicherung des DVGW (2002): Herstellung dauerhafter Oberflächen in Trinkwasserbehältern aus zementgebundenen Mörteln. In: ENERGIE WASSER PRAXIS 53 (Sonderdruck), S. 1–5. Online verfügbar unter http://www.aquazem.eu/pdf/dvgw_sonder.pdf, Zuletzt geprüft am: 13.01.2012.

[171] Teichmann, Thomas (2008): Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein. Dissertation. Kassel: Kassel University Press GmbH. Online verfügbar unter http://www.upress.uni-kassel.de/katalog/Download.php?ISBN=978-3-89958-441-7&type=pdf-f, Zuletzt geprüft am: 25.12.2016.

[172] Teichmann, Thomas; Schmidt, Michael (2004): Influence of packing density of fine particles on structure, strength and durability. In: Michael Schmidt (Hg.): Ultra high performance concrete (UHPC). Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, September 13 - 15, 2004. Kassel: Univ. Press (Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, 3), S. 313–322.

[173] Thienel, Karl-Christian (2013): Werkstoffe des Bauwesens - Frischbeton. Skript. Universität der Bundeswehr München, München. Institut für Werkstoffe des Bauwesens. Online verfügbar unter http://www.unibw.de/werkstoffe/lehre/skripte/frischbeton.pdf, Zuletzt geprüft am: 04.08.2015.

[174] Tucker, Maurice E.; Schöttle, Manfred (1985): Einführung in die Sedimentpetrologie. 20 Tabellen. Stuttgart: Enke.

[175] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hg.) (2002): Zement-Taschenbuch - VDZ - Forschung, Technologie, Überwachen und Zertifizieren. 50. Aufl. Düsseldorf: Bau+Technik GmbH. Online verfügbar unter http://www.vdz-online.de/zement-taschenbuch.html, Zuletzt geprüft am: 06.06.2012.

[176] Vinkeloe, R.; Weber, R. (1986): Ermittlung der Temperatur des frischen und des erhärtenden Betons. In: Beton-Informationen 26 (5), S. 47–52.

[177] Vom Berg, Wolfgang (2001): Flugasche als Betonzusatzstoff. Hg. v. Verband Deutscher Betoningenieure e.V. Düsseldorf (VDB-information, 87/01). Online verfügbar unter www.betoningenieure.de/Downloads/info87_01.pdf, Zuletzt geprüft am: 22.05.2016.

[178] Voyutskii, S. S. (1963): Autohesion and adhesion of high polymers. New York [u.a.]: Wiley.

[179] Walker, William J., Jr. (2003): Persistence of Granular Structure during Compaction Processes. In: KONA 21, S. 133–142. Online verfügbar unter https://www.jstage.jst.go.jp/article/kona/21/0/21_2003016/_pdf, Zuletzt geprüft am 01.03.2016.

[180] Weingart, Wolfgang (2009): Eignung von Gemischen für hydraulisch gebundene Tragschichten nach Europäischer Norm für Anwendungen in Deutschland. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag N. W. Verlag für neue Wissenschaft. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1021.

[181] Wenzel, Robert N. (1936): Resistance of solid surfaces to wetting by water. In: Ind. Eng. Chem 28 (8), S. 988–994. DOI: 10.1021/ie50320a024.

[182] Westendarp, Andreas (2006): Expositionsklassen von Wasserbauwerken. In: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) (Hg.): Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau N.89. Karlsruhe: (im Eigenverlag): Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), S. 15–27.

[183] Westendarp, Andreas (2006): Hinweise zu Beton und Bauausführung bei Wasserbauwerken. In: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) (Hg.): Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau N.89. Karlsruhe: (im Eigenverlag): Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), S. 103–110.

[184] Westendarp, Andreas (2001): Betoninstandsetzung im Verkehrswasserbau - Neue Anforderungen und Entwicklungen. Unter Mitarbeit von Bundesanstalt für Wasserbau (BAW). In: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) (Hg.): Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 83. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), S. 51–57. Online verfügbar unter http://vzb.baw.de/publikationen.php?file=mitteilungsblaetter/0/westendarp.pdf, Zuletzt geprüft am: 22.04.2014.

[185] Winter, Christian Alexander Johannes (2007): Untersuchungen zur Verträglichkeit von Polycarboxylaten mit den Hydratationsverzögerern Citrat und Tartrat und zur Wirkung der Caseinfraktionen a- [Alpha-], b- [Beta-] und k-Casein [Kappa-Casein] im ternären Bindemittelsystem Portlandzement- Tonerdeschmelzzement- Synthetischer Anhydrit. Dissertation. Technische Universität München, München. Fakultät für Chemie, Lehrstuhl für Bauchemie. Online verfügbar unter http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?idn=985313412, Zuletzt geprüft am: 29.11.2012.

[186] Wittern, Michael (2014): Korngrößenverteilung und –untersuchung mittels Lasergranulometrie. Particle size distribution and analysis through laser granulometry. Bachelorarbeit am Institut für Baustoffe, Bauphysik und Bauchemie. Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg, (unveröffentlich).

[187] Wittmann, Folker H. (Hg.) (1994): Adherence and fracture energy. Unter Mitarbeit von Folker H. Wittmann und T. Müller. Adherence of Young on Old Concrete, Proc. 2nd Bolomey Workshop. Sion/Sitten, 1.-2. April 1994: Aedificatio Publishers.

[188] Wu, Souheng (1970): Surface and interfacial tensions of polymer melts. II. Poly(methyl methacrylate), poly(n-butyl methacrylate), and polystyrene. In: J. Phys. Chem 74 (3), S. 632–638. DOI: 10.1021/j100698a026.

[189] Young, Thomas (1804): An Essay on the Cohesion of Fluids. In: Philosophical Transactions of the Royal Society of London 95, S. 65–87. Online verfügbar unter rstl.royalsocietypublishing.org, Zuletzt geprüft am 04.06.2016.

[190] Zingg, Theodor (1935): Beitrag zur Schotteranalyse. Die Schotteranalyse und ihre Anwendung auf die Glattalschotter. Dissertation. ETH Zürich, Zürich. Online verfügbar unter e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:21472/eth-21472-02.pdf, zuletzt geprüft am 19.02.2017.

[191] Zisman, William A. (1964): Relation of the Equilibrium Contact Angle to Liquid and Solid Constitution. In: Frederick Mayhew Fowkes und William A. Zisman (Hg.): Contact angle, wettability and adhesion. The Kendall award symposium honoring William A. Zisman, Los Angeles, Calif., April 2-3, 1963. Washington, D.C: American Chemical Society, S. 1–51.

Abbildungsverzeichnis

1.1. Beispiel für einen Süllkasten an gerader Wand (vgl. [6]) 4
1.2. Einhängen eines Süllkastens (links) und eingehängter Süllkasten (rechts) aus [6] 5
1.3. Baustofftechnologen beim Pumpvorgang 7
1.4. Neues Verfahren für die Betoninstandsetzung unter Wasser im Großversuch . . 8
1.5. Prinzipskizze der Betoninstandsetzung mit textiler Schalung 9
1.6. Der instand zu setzende Pfahl aus [184] 10
1.7. Starre Schalung mit dahinterliegender Textilschalung aus [184] 10
1.8. Instand gesetzte Pfähle nach dem Ausschalen aus [184] 11

3.1. Prinzip eines Schutzkolloid nach [56, 111] 26
3.2. Stabilität durch Bildung von Tensidmizellen nach [111] 27
3.3. Einfluss einer Verzögererzugabe (VZ) auf das Erstarrungsende von Zementleim, Prüfung nach DIN 1164 (3/90) mit Zement PZ 35 F nach [72] 31
3.4. Erstarrungszeiten zu Beginn und am Ende von Mischungen aus Aluminatzement und Portlandzement nach ROBSON [146] 33
3.5. Erstarrungszeiten (in Stunden) bei Erstarrungsbeginn und Erstarrungsende der Mischungen aus Aluminatzement und Portlandzement nach LEA [91], ebenfalls zitiert in [97] 34
3.6. Erstarrungszeiten (in Stunden) bei Erstarrungsbeginn und Erstarrungsende der Mischungen aus Aluminatzement und Portlandzement aus Untersuchungen von SCRIVENER und CAPMAS [162] 34
3.7. Übergang „noch nicht gesättigt“ zu „gesättigt“ mittels PUNTKE-Verfahren aus [154] 39
3.8. Vergleich: Partikelgrößenverteilung nach ANDREASEN und nach FUNK-DINGER nach [52] 41
3.9. Übersicht - Adhäsionsmodelle nach [11] 46
3.10. Schematische Darstellung der „Druckknopftheorie“ nach [58, 59, 135] 47
3.11. Oberflächenrauheit und mikroskopische Verzahnung nach [137, 138, 148] . . . 47
3.12. Aufspreizen eines Wassertropfens auf einer Betonoberfläche nach [135] 50
3.13. Randwinkel zwischen Flüssigkeit und festem Substrat nach [109, 138] 51
3.14. Prozess der Herausbildung des Verbundes nach [92] 53
3.15. Schematische Darstellung der geometrischen, wahren und wirksamen Oberfläche nach [58, 59, 135] 54

4.1. Eindrückversuch nach DIN 1164-11 [35], geänderte Abmessungen 58
4.2. Rundstab nach DIN 1164-11 [35] 58
4.3. Schema für Eindrücke in den Kuchen zur Ermittlung der Erstarrungszeit 59
4.4. Verwendetes Verfahren zur Ermittlung der Erstarrungszeit 60

4.5. Schematische Darstellung der verwendeten Scheibe für die Prüfung der Rautiefe 63
4.6. Unterschied zwischen Oberflächenzugfestigkeit (Abreißfestigkeit) und Haftzugfestigkeit . . . 65
4.7. Anordnung und Lage der Stempel nach DIN EN 1542 [46] . . . 71
4.8. Feuchtezustand zum Zeitpunkt der Bohrung und zum Zeitpunkt der Prüfung . . 72

5.1. Bereiche für die Hydratationswärme verschiedener Zemente nach [175, 176] . . 79
5.2. Vergleich einer geschalten (links) und einer gesandstrahlten Betonoberfläche (rechts) nach [158] (abgeändert) . . . 80
5.3. Untersuchungen am Kontaktwinkelmessgerät der Firma Krüss . . . 84
5.4. fehlgeschlagene Kontaktwinkelmessung . . . 85
5.5. fehlgeschlagene Kontaktwinkelmessung mit W . . . 85
5.6. fehlgeschlagene Kontaktwinkelmessung mit M . . . 85
5.7. Kornform nach ZINGG [190], Abb. nach [174] . . . 99
5.8. Rundungen (*Roundness*) nach POWERS [127] aus [123] . . . 100
5.9. Kornform und Korngröße des Spritzbetonzementes aus [186] . . . 101
5.10. Kornform und Korngröße des redispergierbaren Dispersionspulvers aus [186] . 102
5.11. Kornform und Korngröße der Flugasche aus [186] . . . 102
5.12. Sieblinie Sand 2010 Quelle: TUHH B-3, M. Petersen . . . 103
5.13. Sieblinie Sand 2014 Quelle: TUHH B-3, U. Nowottnik . . . 103
5.14. Sieblinie Sand 2014 auf 2 mm abgesiebt Quelle: TUHH B-3, U. Nowottnik . . 103
5.15. Verteilung mit Verteilungsmodul q = 0,28 . . . 113
5.16. Verteilung mit Verteilungsmodul q = 0,37 . . . 114
5.17. Korngrößenverteilung der Stoffe und die Funk-Dinger Verteilung bei q = 0,28 . 116
5.18. Händischer Auftrag mit einer Kelle unter Wasser . . . 127
5.19. Stempelwerkzeug mit Form . . . 128
5.20. Auftragsverfahren mit angedrücktem Stempel . . . 129
5.21. Herkömmliches Spritzen im Dichtstromverfahren mit Luft aus [117] . . . 131
5.22. Spritzvorrichtung für Spritzen mit Druckluft . . . 132
5.23. Verbundproben nach Spritzen mit rotierender Scheibe . . . 133
5.24. Scheiben in unterschiedlicher Ausführung . . . 134
5.25. Versuchsdurchführung der Spritzversuche unter Wasser und Drehzahlmessung . 137
5.26. Auftragsverfahren mit Düse . . . 138
5.27. Auftragsverfahren mit Mörtelschlitten . . . 139
5.28. Auftragsverfahren mit Mörtelschlitten . . . 140
5.29. Mörtelschlittenkelle . . . 141
5.30. Applikationsplatte für Auftragsverfahren . . . 142
5.31. Auftragsverfahren mit Applikationsplatte . . . 143
5.32. Schematische Darstellung für die Applikation am Streifen . . . 144
5.33. Weitere Modifikation an der Applikationsplatte mit Schaumstoffrändern . . . 145
5.34. Schematische Darstellung für das Aneinandersetzen von Mörtelflächen: Erster Schritt . . . 145

5.35. Schematische Darstellung für das Aneinandersetzen von Mörtelflächen: weitere Schritte . . . 146
5.36. Applikationsplatten in unterschiedlicher Ausführung für Vorgehen in Abbildungen 5.34 und 5.35 . . . 146
5.37. Auftrag Mörtel mit erweiterter Modifikation der Applikationsplatte . . . 148
5.38. Applizieren einer größeren Fläche, per Armkraft mit Schraubzwingen angedrückte Applikationsplatte . . . 149
5.39. Auftragsplatte vorherige und erweiterte Modifikation . . . 149
5.40. Verbund von drei applizierten Mörtelflächen zu einer Gesamtfläche . . . 150
5.41. Öffnungen der Mörtelzufuhr an der Platte und an der Kartusche . . . 151
5.42. Verbund zwischen aufgebrachten Mörtelschichten . . . 152
5.43. Kein Verbund durch eingepressten Mörtel in Applikationsplatte mit festen Rändern . . . 153
5.44. Modifikation innerhalb des Versuches durch Abstandhalter . . . 154

6.1. Mögliche Versagensarten nach Durchführung der Haftzugfestigkeitsprüfung . . 158
6.2. Haftzugfestigkeiten der Verbundkörper mit Rezepturen B, H, T und W . . . 159
6.3. Haftzugfestigkeiten der Verbundkörper mit Rezepturen M auf Beton 2 . . . 163
6.4. Haftzugfestigkeiten (Einzelwerte) Mörtel mit angedrückter Platte aufgetragen, versch. Rezepturen . . . 164
6.5. Proben 1-3 vor Anfertigung der Dünnschliffe; Breite der Proben: 50 mm . . . 168
6.6. Probe 1: Polarisationsmikroskopische Bilder ohne und mit gekreuzten Polarisatoren; unten Beton, oben Mörtel; Maßstab: 195 μm . . . 170
6.7. Probe 1: Polarisationsmikroskopische Bilder ohne und mit gekreuzten Polarisatoren; unten Beton, oben Mörtel; Maßstab: 500 μm . . . 171
6.8. Probe 1: Polarisationsmikroskopische Bilder ohne und mit gekreuzten Polarisatoren; unten Beton, oben Mörtel; Maßstab: 200 μm . . . 172
6.9. Probe 1: Vergrößerung mit gekreuzten Polarisatoren; unten Beton, oben Mörtel; Maßstab: 50 μm . . . 172
6.10. Probe 3: Polarisationsmikroskopische Bilder ohne und mit gekreuzten Polarisatoren; unten Beton, oben Mörtel; Maßstab: 200 μm . . . 173
6.11. Probe 2: Polarisationsmikroskopische Bilder ohne und mit gekreuzten Polarisatoren; unten Beton, oben Mörtel; Maßstab: 500 μm . . . 174
6.12. Proben 4-6 vor Anfertigung der Dünnschliffe; Breite der Proben: $\leq$ 50 mm . . . 175
6.13. Probe 5a: Polarisationsmikroskopische Bilder ohne und mit gekreuzten Polarisatoren; unten Beton, oben Mörtel; versch. Vergrößerungen . . . 176
6.14. Probe 5a: Polarisationsmikroskopische Bilder ohne und mit gekreuzten Polarisatoren an Grenzfläche: unten Beton, oben Mörtel; Maßstab 500 μm; . . . 177
6.15. Probe 5a: Polarisationsmikroskopische Bilder ohne und mit gekreuzten Polarisatoren an Grenzfläche: unten Beton, oben Mörtel; . . . 178
6.16. Verbundkörper, Mörtel appliziert mit der Applikationsplatte, rot markiert die Entnahmestellen der Proben . . . 179

6.17. Proben 8-9 vor Anfertigung der Dünnschliffe, oben Mörtel unten Beton; Breite der Proben: 50 mm 180
6.18. Probe 8a: Polarisationsmikroskopische Bilder ohne und mit gekreuzten Polarisatoren; unten Beton, oben Mörtel; an zwei verschiedenen Stellen; Maßstab 500 μm; 182
6.19. Probe 8b: Fehlstelle am Rand von Applikation 1 183
6.20. Probe 9a: Polarisationsmikroskopische Bilder ohne und mit gekreuzten Polarisatoren; unten Beton, oben Mörtel; im Bereich zwischen Mörtel der Applikation 3 und dem Betonuntergrund; Maßstab 500 μm; 184
6.21. Probe 9a: Polarisationsmikroskopische Bilder ohne und mit gekreuzten Polarisatoren; unten Beton, oben Mörtel; Maßstab 500 μm; rot markiert in Abb. 6.21(c): Bereich der mikroskopischen Aufnahme 185
6.22. Probe 9a: Im Bereich der Lücke zwischen Appl. 1 und 3 und dem Betonuntergrund; rot markiert in 6.22(b) der Bereich der mikroskopischen Aufnahme . . . 186
6.23. Probe 9a: Polarisationsmikroskopische Bilder ohne und mit gekreuzten Polarisatoren; unten Beton, oben Mörtel; im Bereich zwischen Mörtel Appl. 1 und dem Betonuntergrund; Maßstab 500 μm; in Abb. 6.23(c) rot markiert der Bereich der mikroskopischen Aufnahme 186
6.24. Probe 9a: Polarisationsmikroskopische Bilder ohne und mit gekreuzten Polarisatoren; im Bereich der Lücke zwischen Appl. 1 (links) und 3 (rechts) und dem Betonuntergrund; Maßstab 500 μm; 187
6.25. Probe 9b: Polarisationsmikroskopische Bilder ohne und mit gekreuzten Polarisatoren; unten Beton, oben Mörtel; im Bereich zwischen Mörtel Appl. 3 und dem Betonuntergrund; Maßstab 500 μm; 188
6.26. Untersuchte Stelle für die in Abb. 6.25 gezeigten Bilder 189
6.27. Beispielhafter Kraftverlauf beim Andrücken des Stempels 190
6.28. QM Plan (QP-002), aus [81] (abgeändert) 192

A.1. Geforderte Abreißfestigkeiten der Betonunterlage (Mindestwerte) nach ZTV-ING [22] 226
A.2. Expostitionsklassen [182] 227
A.3. Zusammensetzung und Kennwerte von Bauvorhaben der WSV [183] 229

D.1. Verbund mit Rezeptur H, diverse Durchschnitts-Haftzugfestigkeiten 251
D.2. Haftzugfestigkeiten der Verbundkörper mit Rezepturen B und W im Vergleich: Abgleichseite vs. Untere Seite (2013/2014) 252
D.3. Haftzugfestigkeiten der Verbundkörper mit Rezepturen H und T im Vergleich: Abgleichseite vs. Untere Seite (2013/2014) 253

E.1. Einzelwerte für Haftzugfestigkeit mit ST (siehe Abb. 5.19), Rezeptur H 255
E.2. Einzelwerte für Haftzugfestigkeit mit POM-ST (siehe Abb. 5.20), Rezeptur M . 256

F.1. Applikationen SH 1 bis 6 mit Spritzapparatur an Luft 257
F.2. Spule (eingeharzt) 259

F.3. Sensorplatine für Pulsaufbereitung; geplant und gebaut: H. Fielitz 259
F.4. Platinenlayout; H. Fielitz 260
F.5. Schaltplan für Pulsaufbereitung; H. Fielitz 260
F.6. Drehzahlmessgerät FWE 13A007 FS 261
F.7. Versuchsaufbau für die Drehzahlmessung unter Wasser 261
F.8. Schematischer Aufbau für Drehzahlmessung mit Abmessungen a, b und c . . . 262
F.9. Messreihe - Drehzahlen unter Wasser - Scheiben im Vergleich 264
F.10. Die Scheiben II, III, VI und VII. Sie werden für das Spritzen über Wasser mit Drehzahlmessung getestet. 266
F.11. Scheiben II, III, VII - Versuch über Wasser mit begleitender Drehzahlmessung . 266

Tabellenverzeichnis

3.1. Wirkstoffe für Betonverzögerer und ihre Eigenschaften nach [142, 173] 30

4.1. Mindestdurchmesser d_{min} in Abhängigkeit vom Volumen V nach ZTV-ING Teil 1, Abschnitt 3.4 [21] 64
4.2. Übersicht: Regelwerke zur Prüfung der Oberflächenzugfestigkeit 66
4.3. Übersicht: Regelwerke zur Prüfung der Oberflächenzugfestigkeit bzgl. der Notwendigkeit einer Ringnut (ggf. nass oder trocken vorgebohrt) und Angabe der Bohrtiefe 68
4.4. Übersicht: Abmessungen und Material der Prüfstempel gemäß technischen Regelwerken 68
4.5. Übersicht: Erforderliche Anzahl Prüfungen nach technischen Regelwerken . . . 69
4.6. Übersicht: Kraftsteigerung für Prüfungen nach technischen Regelwerken 70

5.1. Ausgangsstoffe und Zusammensetzung der Betone 79
5.2. Oberflächenenergien verschiedener Werkstoffe in mN/m aus [130] 82
5.3. Produktdaten vom verwendeten Luftporenbildner (Herstellerangaben) 96
5.4. Produktdaten vom verwendeten Fließmittel (Herstellerangaben) 97
5.5. Allgemeine Eigenschaften von Vinylacetat-Ethylen nach [141] 98
5.6. Hauptachsenverhältnisse nach ZINGG [190], aus [186] 100
5.7. Einteilung der untersuchten Proben in in den Grad der Kugeligkeit nach POWERS [127], aus [186] 101
5.8. Einteilung der untersuchten Proben in Rundungsklassen nach POWERS [127], aus [186] 101
5.9. Werte aus lasergranulometrischen Untersuchungen von [153] 102
5.10. Rohdichten der Feststoffe 105
5.11. Festgelegte Faktoren α_i der Dosierung der Feststoffe und Zusatzmittel für die Optimierung und verwendeter w/z-Wert 110
5.12. Berechnete Faktoren β_i für die Verwendung in der Optimierung 111
5.13. Grenzwerte, sog. *lower* und *upper boundaries*, für die Verwendung in der Optimierung 111
5.14. Ergebnisse für q = 0,28 112
5.15. Ergebnisse für q = 0,37 115
5.16. Überblick verschiedener verwendeten Rezepturen 119
5.17. Rezepturen für Mörtel auf einen m^3 umgerechnet 120
5.18. Ausbreitmaß und Konsistenz der Mörtel; n. e.: nicht ermittelt 122
5.19. Ermittelte Erstarrungszeiten der Mörtel 123
5.20. Kennwerte der verwendeten Mörtel; n. e.: nicht ermittelt 125
5.21. Verwendete Mörtel und Applikationstechnik im Überblick 126

5.22. Erforderliche Umdrehungszahlen für ausgewählte Scheiben 135
5.23. Verwendete Parameter für Berechnungen 136

6.1. Auszug erreichter max. Haftzugfestigkeiten verschiedener Rezepturen 160
6.2. Auszug erreichter Haftzugfestigkeiten verschiedener Auftragstechniken 162
6.3. Zuordnung der Dünnschliffe und der Applikationen unter Wasser 167
6.4. Zuordnung der Applikationen zu den Proben 181

A.1. Anforderungen nach Expositionsklassen, Kaje im Meer in Wasserwechselzone 228
A.2. Einordnung des Altbetons im Bereich der Instandsetzungsebene aus ZTV-W LB 219 [24] 229
A.3. Druckfestigkeiten von Beton 1 (i. d. R. nach 28 d) 231
A.4. Druckfestigkeiten von Beton 2 (i. d. R. nach 28 d) 232

B.1. Sanddurchgänge, Sand 0/2 mm, Charge: Juni 2010 233
B.2. Sanddurchgänge, Sand 0/2 mm, Charge: März 2011 233
B.3. Sanddurchgänge, Sand 0/2 mm, Charge: Juni 2014 234
B.4. Sand 0/2 mm, Charge: Juni 2014, auf 2 mm abgesiebt 234
B.5. Lasergranulometrische Untersuchungen, Werte aus [153] 234

C.1. Biegezug- und Druckfestigkeit von Mörtelprismen 249

F.1. Eigenschaften der Scheiben 263
F.2. Abmessungen im Versuch 263
F.3. Werte der Drehzahlmessung unter Wasser - Scheiben im Vergleich 265

A. Betonuntergrund

A.1. Entscheidungshilfen für die Auswahl des Betonuntergrundes

Der im Rahmen dieser Arbeit zu verwendende Betonuntergrund sollte möglichst den Betonen von bestehenden Wasserbauwerken entsprechen. Daher wurden die Anforderungen an den Betonuntergrund auf der Grundlage von Normen, Expositionsklassen, denen der Beton ausgesetzt ist, und der Zusammensetzung bestehender Wasserbauwerke zusammengestellt.

Die möglichen Anforderungen und im folgenden genannten Regelwerke gelten nur für den Einsatz über Wasser, doch werden diese Randbedingungen und Anforderungen für die Instandsetzung unter Wasser herangezogen, weil es für den Einsatz unter Wasser keine Regelwerke in Deutschland gibt. Bei Einhaltung dieser Vorgaben dürfte ein mögliches Verfahren unter Wasser mit größerer Wahrscheinlichkeit eine bauaufsichtliche Zulassung oder eine Zustimmung im Einzelfall erhalten können.

A.1.1. Anforderungen nach Normen

Regelwerke und Normen wie die DIN EN 1542 [46] (Prüfverfahren - Messung der Haftfestigkeit im Abreißversuch) und die DIN EN 1766 [47] (Prüfverfahren - Referenzbetone für Prüfungen) treffen Festlegungen zu Prüfverfahren im Rahmen von Produkten und Systemen für den Schutz und die Instandhaltung von Betontragwerken). In diesen beiden Normen werden Angaben zu den Betoneigenschaften der zu prüfenden Betonprüfkörper gemacht.

DIN EN 1542 [46] legt fest, dass bei Prüfkörpern aus Beton, die zur Bestimmung der Haftfestigkeit im Abreißversuch für Beton oder einen Reparaturmörtel verwendet werden, die Abmessungen von 300 mm $\times$ 300 mm $\times$ 100 mm betragen und das Größtkorn der Gesteinskörnung 8 mm oder 10 mm ist. Darüber hinaus ist die Oberfläche sandzustrahlen.

In DIN EN 1766 [47] ist festgelegt, welche Zusammensetzung, Eigenschaften und Vorbereitungen die Referenz-Betonuntergründe bedürfen, die für Prüfverfahren zur Messung der Leistungsanforderungen von Produkten und Systemen für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken verwendet werden. Die Festlegungen gelten für Normalbeton mit einer Höchstkorngröße der Gesteinskörnung von 16 mm oder 20 mm und für Feinbeton mit einer Höchstkorngröße der Gesteinskörnung von 8 mm oder 10 mm. Für das Prüfen und Messen der Eigenschaften von Instandsetzungsprodukten werden einheitliche Probekörper aus Referenzbeton mit einer reproduzierbaren Oberflächenstruktur hergestellt. Die Abmessungen der Betonuntergründe betragen 300 mm x 300 mm x 100 mm. Als Zement ist Portlandzement CEM I 42,5 R zu verwenden. Es gibt verschiedene Arten von Referenzbetonen.

Aus den eben genannten Festlegungen wurden für die Betonuntergründe im Rahmen dieser Arbeit die Abmessungen der Betonuntergründe von 300 mm × 300 mm × 100 mm (nach DIN EN 1542 [46] und DIN EN 1766 [47]) festgelegt.

Nach ZTV-ING [22] ist die geforderte Abreißfestigkeit der Betonunterlage (siehe Abbildung A.1) für Betonersatzsysteme 1,5 N/mm^2 (Mittelwert) und der zulässige kleinste Wert beträgt 1,0 N/mm^2. Auch die Abreißfestigkeit zwischen der Betonunterlage und dem Betonersatz (al-

	System		Mittelwert [N/mm²]	Zulässiger kleinster Einzelwert [N/mm²]
1	Betonersatzsysteme		1,5	1,0
2a	Oberflächenschutzsysteme *)	OS-B	—	0,6
2b		OS-D (System ohne Feinspachtel)	1,0	0,6
2c		OS-C, OS-D, OS-E (Systeme mit Feinspachtel)	1,3	0,8
2d		OS-F	1,5	1,0

Abbildung A.1.: Geforderte Abreißfestigkeiten der Betonunterlage (Mindestwerte) nach ZTV-ING [22]

so die Haftzugfestigkeit, vgl. Abschnitt 4.3.1, Seite 74) muss nach ZTV-ING [22] im Mittel mindestens 1,5 N/mm^2 betragen. An keiner Stelle dürfen Einzelwerte von 1,0 N/mm^2 unterschritten werden (vgl. Abschnitt 2.3, Seite 19).

Die Abreißfestigkeit bzw. die Oberflächenzugfestigkeit muss z. B. für einen Referenzbeton des Typs C (0,45) nach DIN EN 1766 [47] eine Abreißfestigkeit (geprüft nach DIN EN 1542 [46]) von mindestens 2,5 N/mm^2 aufweisen.

Im Merkblatt von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) für Spritzmörtel / Spritzbeton nach ZTV-W LB 219, Abschnitt 5 (BAW-MSM) [23] wird gefordert, dass die Druckfestigkeit nach DIN EN 12390-3 [42] an Würfeln (150 mm-Würfel) im Alter von 28 d zu prüfen ist. An den geschalten Rückseiten der Betonuntergründe ist nach der Vorbehandlung durch Strahlen mit festen Strahlmitteln gemäß DIN EN 1766 [47] die Rautiefe (Sandflächenverfahren nach DIN EN 1766 [47] und die Oberflächenzugfestigkeit (Abreißfestigkeit) nach DIN EN 1542 [46] zu bestimmen. Die Rautiefe hat 1,0 mm zu betragen. Die Oberflächenzugfestigkeit (Abreißfestigkeit) hat für die Altbetonklasse 2 im Mittel (fünf Einzelwerte) mindestens 0,8 N/mm^2 (Einzelwerte mindestens 0,5 N/mm^2) und für Altbetonklasse 3 im Mittel mindestens 1,2 N/mm^2 und Einzelwerte mindestens 0,8 N/mm^2 zu betragen (vgl. Tabelle A.2, Seite 229) [23, 24].

Die Anforderungen der bisher und im folgenden genannten Regelwerke gelten zwar nur für den Einsatz im Trockenen, doch wurden diese Randbedingungen und Anforderungen für die Instandsetzung unter Wasser herangezogen, weil es für den Einsatz unter Wasser keine Regelwerke in Deutschland gibt. Die Richtlinie des ACI [2] in den USA beschäftigt sich zwar mit

der Instandsetzung unter Wasser, doch gibt sie keine konkreten Angaben zu Anforderungen und Prüfungen an.

A.1.2. Anforderungen nach Expositionsklassen

Grundsätzlich werden die Expositionsklassen unterschieden in Angriff auf die Bewehrung (Bewehrungskorrosion) und Angriff auf den Beton selbst (Betonkorrosion), siehe Abbildung A.2. Die Intensität der Angriffe wird durch Zahlen von 1-3 bzw. 1-4 angegeben.

Bewehrungskorrosion		Betonkorrosion	
XC1 - XC4	Carbonatisierung	XF1 - XF4	Frost mit / ohne Taumittel
XD1 - XD3	Chloride (außer Meerwasser)	XA1 - XA3	Chemischer Angriff
XS1 - XS3	Chloride aus Meerwasser	XM1 - XM3	Verschleißbeanspruchung
X0 Kein Korrosions- oder Angriffsrisiko			

Abbildung A.2.: Expostitionsklassen [182]

Die Wahl der Expositionsklassen eines Bauwerks wurde möglichst realitätsnah abgebildet.

Betrachtet man eine Kaje im Meerwasserbereich, so ist dieses Bauteil grundsätzlich der Expositionsklasse XA2 (wegen des Meerwassers) zuzuordnen. Bei mäßiger Wassersättigung dürfte die Frostbeanspruchung von Bauteilen im Meerwasserbereich in XF1 oder XF2 und bei hoher Wassersättigung in XF3 oder XF4 einzuordnen sein. Die Flächen einer Kaje im Bereich unterhalb des mittleren Tideniedrigwassers (MTnw) sind ständig unter Meerwasser. Nur sehr eingeschränkt können Kohlendioxid und Sauerstoff durch die wassergefüllten Poren hindurch in den Beton eindringen. Chloride außer Meerwasser (Expositionsklasse XD) ist in diesem Fall nicht gegeben. Chloride aus Meerwasser dagegen können in den Beton eindringen. Die Passivschicht auf dem Bewehrungsstahl ist gefährdet oder zerstört, wenn die Chloridgehalte auf Höhe der Bewehrung sehr hoch sind. Jedoch tritt eine chloridinduzierte Bewehrungskorrosion meistens nicht oder in geringem Umfang auf, da an die Bewehrung kaum Sauerstoff gelangen kann, weil der Transport von Sauerstoff durch die wassergefüllten Poren hindurch nicht möglich oder stark eingeschränkt ist. Es werden Bauteilflächen, die ständig unter Meerwasser sind, pauschal der Expositionsklasse XS2 zugeordnet. Bis etwa 2 m unter der Wasserwechselzone sind die Bauteilbereiche kritisch zu betrachten. Der Sauerstoffeintrag in den Beton durch das bewegte und sauerstoffreichere Wasser wird begünstigt. Oberhalb des mittleren Tideniedrigwassers (MTnw) bis zum Ende des Spritzwasserbereiches verhält es ich etwas anders: Bedingt durch die Gezeiten stellt sich eine Wasserwechselzone mit anschließendem Spritzwasserbereich ein und der Wassersättigungsgrad dieser Flächen ist die meiste Zeit so hoch, dass Kohlendioxid nur in beschränktem Umfang in den Beton eindringen (XC2). Die Chlorideintragsraten sind erheblich höher, da der Chlorideintrag nicht nur durch Diffusion innerhalb der wassergefüllten Poren erfolgt, sondern auch (temporär) durch kapillares Saugen (XS3). An vertikalen Flächen

ist die Ausbildung hoher Sättigungsgrade möglich (XF4), dies ist bedingt durch die Wasserstandsänderungen (Gezeiten). Für den chemischen Angriff auf den Beton aus Meerwasser gilt das Gleiche wie unterhalb MTnw: XA2. Durch Eisgang oder Schiffsanfahrt ist für die mechanische Beanspruchung die Zuordnung XM1 angemessen. [182]

In Tabelle A.1 sind die eben aufgeführten Expositionsklassen und ihre Anforderungen (Grenzwerte für die Zusammensetzung und Eigenschaften des Betons) nach DIN 1045-2 [32] dargestellt.

Tabelle A.1.: Anforderungen nach Expositionsklassen, Kaje im Meer in Wasserwechselzone

Expositionsklasse	max. w/z [-]	Mindestdruckfestigkeit [-]	Mindestzementgehalt [kg/m^3]
XA2	0,5	C35/45	320
XC2	0,72	C16/20	240
XS3	**0,45**	**C35/45**	**320**
XF4	0,50	C30/37	320
XM1	0,55	C30/37	300

Die fett dargestellten Anforderungen sind die Grenzwerte für die Zusammensetzung und Eigenschaften des Betons, wenn dieser sich in Meerwasser befindet (Beispiel Kaje im Meerwasser).

A.1.2.1. Altbetonklassen nach ZTV-W LB 219

In der ZTV-W LB 219 [24] sind Betone in Altbetonklassen eingeordnet. In Tabelle A.2 ist die Einordnung des Altbetons im Bereich der Instandsetzungsebene nach ZTV-W LB 219 [24] dargestellt.

Die Wahl fiel auf einen Beton mit einer Druckfestigkeit von ca. 10 N/mm^2 (Grenze zwischen Altbetonklasse A1 und A2 in Tabelle A.2) und einen Beton mit einer Druckfestigkeit von mehr als 30 N/mm^2 (Altbetonklasse A4 in Tabelle A.2). Laut RAUPACH [134] wird in der neuen Instandhaltungsrichtline des DAfStb (als Ersatz der RL SIB [28]) [1] diese Einordnung in Altbetonklassen nach ZTV-W LB 219 [24] ebenfalls einen Platz finden [134]. 1) Mittelwert der Druckfestigkeit (Bestimmung nach DIN EN 12504-1 2) Kleinster Einzelwert / (Bestimmung nach DIN EN 1542)

A.1.3. Zusammensetzung des Betons bestehender Wasserbauwerke

Darüber hinaus zeigt eine Übersicht von Kennwerten (2006) von Bauvorhaben der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) (siehe Abbildung A.3, u. a. welche Zementsorte und welcher Zementgehalt die Betone der Wasserbauwerke haben. In den letzten 25 Jahren sind

[1] der Gelbdruck erschien im Sommer 2016, der Weißdruck ist Ende 2017 zu erwarten [133])

Tabelle A.2.: Einordnung des Altbetons im Bereich der Instandsetzungsebene aus ZTV-W LB 219 [24]

Altbetonklasse	Druckfestigkeit [1]	Abreißfestigkeit [2]	
		Mittelwert	Kleinster Einzelwert
	N/mm^2	N/mm^2	N/mm^2
A1	≤ 10	-	-
A2	> 10	$\geq 0{,}8$	$\geq 0{,}5$
A3	> 20	$\geq 1{,}2$	$\geq 0{,}8$
A4	> 30	$\geq 1{,}5$	$\geq 1{,}0$

Bauvorhaben	Bauteil	Zementart		Fluga-sche	W/Z-Wert	LP-Be-ton	Druckfestigkeit				adiabatische Wärmeentwicklung			
		Art	Gehalt				2d	7d	28d	56d	Bestim-mung[1]	T_0	T_{max}	ΔT
		---	kg/m³	kg/m³	---	---	N/mm²				---	°C	°C	K
Schleuse Münster	Kammer-wand	CEM III/A 32,5 N	310	---	0,53	X	12	27	45		K (BAW)	23	65	42
Schleuse Münster	Kammer-wand	CEM II/B-S 32,5 N	310	---	0,53	X					B (AN)	20	61	41
Schleuse Uelzen II	Kammer-wand	CEM II/B-S 32,5 R	270	---	0,53	X	---	20	33	35	K (BAW)	20	56	36
Schleuse Sülfeld	Kammer-wand	CEM III/A 32,5	330	---	0,50	X	4	16	26	30	K (BAW)	20	52	32
Kanalbrücke Lippe	Pfeilerbeton	CEM III/A 32,5 (60%)	300	50	0,53	---	6	21	39	43	K (BAW)	20	50	31
Schleuse Hohenwarthe	Kammer-wand	CEM III/A 32,5 NW/NA (63%)	270	80	0,48	---	---	23	38	42	K (BAW)	23	53	30
Schleuse Spandau	Kammer-wand	CEM III/A 32,5 NA	310	---	0,48	X	---	15	26	31	K (BAW)	19	55	36
Schleuse Offenbach	Kammer-wand	CEM I 32,5 R	290	60	0,53	X	16	25	33	36	B (AN)	25	61	36
Stever-Durchlass	Pfeiler	CEM III/A 32,5 (63%)	320	50	0,49	X	---	---	42	48	K (BAW)	21	59	38
Schleuse Hirschhorn	Kammer-wand	CEM II/B-S 32,5 R	320	---	0,53	X	14	26	35	40	B (AN)	27	67	40
Schleuse Hirschhorn	Planie (XF3)	CEM II/B-S 32,5 R	330	---	0,53	X	17	27	37		B (AN)	30	72	42

[1] K (BAW): Bestimmung mittels adiabatischem Betonkalorimeter durch BAW; B (AG): Bestimmung am Betonblock 2x2x2 m³ durch bauausführende Firma

Abbildung A.3.: Zusammensetzung und Kennwerte von Bauvorhaben der WSV [183]

beim Bau der meisten frostbeanspruchten Bauteile von Wasserbauwerken laut Mitteilungsblatt der BAW [183] folgende Betonrezepturen eingebaut worden:

- Zementgehalt: 270 bis 290 kg/m^3 und meistens Zementsorte: CEM III/A
- Wasser/Bindemittel-Wert: maximal 0,55
- Flugaschegehalt: 30 bis 60 kg/m^3
- Luftporenbildner

A.2. Druckfestigkeiten des Betonuntergrundes

Tabelle A.3.: Druckfestigkeiten von Beton 1 (i. d. R. nach 28 d)

Bezeichnung	**Druckfestigkeiten ß$_{W200}$ [N/mm^2]**			**Mittelwert [N/mm^2]**
M.3.1-10	**M.3a**	**M.3b**	**M.3c**	
	28	26	27	27
M.4.1-10	**M.4a**	**M.4b**	**M.4c**	
	21	18	18	19
M.5.1-10	**M.5a**	**M.5b**	**M.5c**	
	24	25	20	23
M.6.1-10	**M.6a**	**M.6b**	**M.6c**	
	19	18	18	18
M.7.1-10	**M.7a**	**M.7b**	**M.7c**	
	20	15	19	18
M.8.1-10	**M.8a**			
	29			29
M.9.1-10	**M.9a**			
	31			31
M.11.1-10	**M.11a**	**M.11b**	**M.11c**	
	24	24	25	24
M.12.1-10	**M.12a**			
	28			28
M.14.1-10	**M.14a**			
	20			20
M.15.1-10	**M.15a**	**M.15b**	**M.15c**	
	11	14	13	13
M.16.1-10	**M.16a**	**M.16b**	**M.16c**	
	18	18	20	19
M.17.1-10	**M.17a**	**M.17b**	**M.17c**	
	14	12	13	13
M.18.1-10	**M.18a**	**M.18b**	**M.18c**	
	14			14
M.19.1-10	**M.19a**	**M.19b**		
	25	23		24
M.20.1-10	**M.20a**	**M.20c**	**M.20c**	
	11	14	11	12
M.21.1-10	**M.21a**			
	26	28		27

Tabelle A.4.: Druckfestigkeiten von Beton 2 (i. d. R. nach 28 d)

Bezeichnung	**Druckfestigkeiten ß$_{W200}$ [N/mm^2]**			**Mittelwert [N/mm^2]**
H1.1-10	**H.1a**	**H.1b**	**H.1c**	
	46	52	45	48
H.2.1-10	**H.2a**	**H.2b**	**H.2c**	
56 d	60	58	58	58
H.3.1-10	**H.3a**			
	47			47
H.4.1-10	**H.4a**	**H.4b**	**H.4c**	
	47	47	45	46
H.5.1-10	**H.5a**	**H.5b**	**H.5c**	
	48	44	44	45
H.6.1-10	**H.6a**	**H.6b**	**H.6c**	
56 d	74	64	68	69
H.7.1-10	**H.7a**	**H.7b**	**H.7c**	
	44	49	52	48
H.8.1-10	**H.8a**	**H.8b**	**H.8c**	
	49	49	48	49
H.9.1-10	**H.9a**	**H.9b**	**H.9c**	
	46	49	46	47
H.10.1-10	**H.10a**	**H.910b**	**H.10c**	
	45	46	41	44

B. Packungsdichteoptimierung

B.1. Messwerte aus Untersuchungen an den Mörtelkomponenten

B.1.1. Sieblinien des Sandes

Tabelle B.1.: Sanddurchgänge, Sand 0/2 mm, Charge: Juni 2010

Messung	1	2	3	**Mittelwert**
μm	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	**[M.-%]**
0	0,00	0,00	0,00	**0,00**
63	0,00	0,00	0,00	**0,00**
125	0,60	1,00	0,70	**0,70**
250	13,30	15,30	13,40	**14,00**
500	52,90	55,30	52,00	**53,40**
1000	85,00	84,40	83,50	**84,30**
2000	96,90	96,40	95,90	**96,40**
4000	99,90	99,80	99,90	**99,90**
8000	100,00	100,00	100,00	**100,00**

Tabelle B.2.: Sanddurchgänge, Sand 0/2 mm, Charge: März 2011

Messung	1	2	3	**Mittelwert**
μm	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	**[M.-%]**
0	0,00	0,00	0,00	**0,00**
63	0,10	0,10	0,00	**0,10**
125	1,00	0,90	1,00	**1,00**
250	14,30	13,90	14,60	**14,30**
500	54,80	55,00	56,00	**55,30**
1000	84,10	84,50	84,60	**84,40**
2000	96,30	96,40	96,30	**96,40**
4000	100,00	100,00	100,00	**100,00**
8000	100,00	100,00	100,00	**100,00**

Tabelle B.3.: Sanddurchgänge, Sand 0/2 mm, Charge: Juni 2014

Messung	1	2	3	**Mittelwert**
μm	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	**[M.-%]**
0	0,00	0,00	0,00	**0,00**
63	0,00	0,00	0,10	**0,33**
125	2,20	1,80	1,60	**1,90**
250	25,60	25,50	21,20	**24,10**
500	64,80	65,00	58,40	**62,70**
1000	86,50	85,80	81,80	**84,70**
2000	94,90	93,90	92,60	**93,80**
4000	99,70	99,50	99,50	**99,60**
8000	100,00	100,00	100,00	**100,00**

Tabelle B.4.: Sand 0/2 mm, Charge: Juni 2014, auf 2 mm abgesiebt

Messung	1	2	3	**Mittelwert**
μm	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	**[M.-%]**
0	0,00	0,00	0,00	**0,00**
63	0,15	0,35	0,30	**0,27**
125	1,25	2,79	2,11	**2,05**
250	17,20	22,85	17,79	**19,28**
500	52,55	59,78	50,03	**54,12**
1000	83,20	86,53	81,10	**83,61**
2000	99,80	99,80	99,85	**99,82**
4000	100,00	100,00	100,00	**100,00**
8000	100,00	100,00	100,00	**100,00**

B.1.2. Lasergranulometrische Untersuchungen

Tabelle B.5.: Lasergranulometrische Untersuchungen, Werte aus [153]

d_i in mm	Zement	Polymer	Flugasche
0,0000100	0,00	0,00	0,00
0,0000114	0,00	0,00	0,00
0,0000129	0,00	0,00	0,00
0,0000147	0,00	0,00	0,00
0,0000167	0,00	0,00	0,00
0,0000189	0,00	0,00	0,00
0,0000215	0,00	0,00	0,00
0,0000244	0,00	0,00	0,00
0,0000278	0,00	0,00	0,00
0,0000315	0,00	0,00	0,00

Fortsetzung folgt auf folgender Seite

Tabelle B.5 – *Fortsetzung von vorheriger Seite*

d_i in mm	Zement	Polymer	Flugasche
0,0000358	0,00	0,00	0,00
0,0000407	0,00	0,00	0,00
0,0000463	0,00	0,00	0,00
0,0000526	0,00	0,00	0,00
0,0000597	0,00	0,00	0,00
0,0000679	0,00	0,00	0,00
0,0000771	0,00	0,00	0,00
0,0000876	0,00	0,00	0,00
0,0000995	0,00	0,00	0,00
0,0001130	0,00	0,00	0,00
0,0001280	0,00	0,00	0,00
0,0001460	0,00	0,00	0,00
0,0001660	0,00	0,00	0,00
0,0001880	0,00	0,00	0,00
0,0002140	0,00	0,00	0,00
0,0002430	0,00	0,00	0,00
0,0002760	0,00	0,00	0,00
0,0003140	0,00	0,00	0,00
0,0003570	0,00	0,07	0,00
0,0004050	0,00	0,17	0,00
0,0004600	0,00	0,31	0,00
0,0005230	0,08	0,48	0,00
0,0005940	0,25	0,69	0,16
0,0006750	0,53	0,91	0,65
0,0007670	0,92	1,14	1,50
0,0008720	1,44	1,36	2,65
0,0009910	2,11	1,57	3,96
0,0011300	2,96	1,76	5,31
0,0012800	4,01	1,94	6,66
0,0014500	5,27	2,10	8,01
0,0016500	6,75	2,25	9,42
0,0018800	8,41	2,42	10,91
0,0021300	10,23	2,61	12,49
0,0024200	12,21	2,82	14,15
0,0027500	14,33	3,07	15,87
0,0031200	16,60	3,36	17,67
0,0035500	19,03	3,69	19,57
0,0040300	21,62	4,05	21,60
0,0045800	24,38	4,43	23,79

Fortsetzung folgt auf folgender Seite

Tabelle B.5 – *Fortsetzung von vorheriger Seite*

d_i in mm	Zement	Polymer	Flugasche
0,0052100	27,37	4,82	26,15
0,0059200	30,63	5,19	28,70
0,0067200	34,21	5,55	31,40
0,0076400	38,17	5,90	34,23
0,0086800	42,57	6,23	37,14
0,0098600	47,44	6,55	40,09
0,0112000	52,76	6,88	43,06
0,0127000	58,50	7,23	46,04
0,0145000	64,54	7,59	49,03
0,0164000	70,72	7,98	52,03
0,0187000	76,80	8,39	55,04
0,0212000	82,54	8,82	58,07
0,0241000	87,66	9,26	61,10
0,0274000	91,95	9,71	64,10
0,0311000	95,26	10,21	67,07
0,0353000	97,60	10,80	70,00
0,0401000	99,02	11,56	72,90
0,0456000	99,74	12,60	75,77
0,0518000	100,00	14,08	78,62
0,0589000	100,00	16,17	81,44
0,0669000	100,00	19,02	84,22
0,0760000	100,00	22,78	86,91
0,0864000	100,00	27,51	89,47
0,0981000	100,00	33,20	91,84
0,1110000	100,00	39,75	93,96
0,1270000	100,00	46,94	95,80
0,1440000	100,00	54,48	97,31
0,1630000	100,00	62,04	98,48
0,1860000	100,00	69,30	99,29
0,2110000	100,00	75,96	99,78
0,2400000	100,00	81,78	100,00
0,2720000	100,00	86,66	100,00
0,3100000	100,00	90,56	100,00
0,3520000	100,00	93,54	100,00
0,4000000	100,00	95,72	100,00
0,4540000	100,00	97,26	100,00
0,5160000	100,00	98,31	100,00
0,5860000	100,00	99,01	100,00
0,6660000	100,00	99,46	100,00

Fortsetzung folgt auf folgender Seite

Tabelle B.5 – *Fortsetzung von vorheriger Seite*

d_i in mm	Zement	Polymer	Flugasche
0,7560000	100,00	99,74	100,00
0,8590000	100,00	99,91	100,00
0,9760000	100,00	100,00	100,00
1,1100000	100,00	100,00	100,00
1,2600000	100,00	100,00	100,00
1,4300000	100,00	100,00	100,00
1,6300000	100,00	100,00	100,00
1,8500000	100,00	100,00	100,00
2,1000000	100,00	100,00	100,00
2,3900000	100,00	100,00	100,00
2,7100000	100,00	100,00	100,00
3,0800000	100,00	100,00	100,00
3,5000000	100,00	100,00	100,00

B.2. Matlab Code

B.2.1. Datenblatt als Excel-Sheet

Durchmesser in mm	Sand	R-SE	Polymer	Flugasche KMC
d_i	V_agg,Sand	V_agg, Zement	V_agg, add	V_agg, FA
0,001	0,00	1,23	1,17	4,71
0,01	0,00	50,00	5,75	43,25
0,02	0,00	82,19	7,56	58,76
0,063	0,27	100,00	20,12	86,24
0,125	2,05	100,00	58,59	99,50
0,25	19,28	100,00	94,69	100,00
0,5	54,12	100,00	100,00	100,00
1	83,61	100,00	100,00	100,00
2	99,82	100,00	100,00	100,00
4	100	100	100	100

Daten von Matlab einlesen lassen

Durchmesser in mm	0,00001	0,00005	0,0001	0,0005	0,001	0,01	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4
Sand	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27	2,05	19,28	54,12	83,61	99,82	100
Zement, R-SE	0,00	0,00	0,00	0,08	2,17	48,00	79,78	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100
Polymer	0,00	0,00	0,00	0,48	1,58	6,58	8,61	17,63	46,04	83,31	98,04	100,00	100,00	100
Flugasche KMC	0,00	0,00	0,00	0,00	4,05	40,40	56,62	82,86	95,57	100,00	100,00	100,00	100,00	100

Überblick für Vektor

Durchmesser	1
Sand	2
Zement	3
Polymer	4
Flugasche	5

d_min	0,0005	in mm
d_max	4	in mm

Rohdichten — Rohdichten hier eingetragen, auslesen aus Excel

roh_agg, Sand	2,65	in g/cm3	bzw.	kg/L	2650	in kg/m³	Otto Dörner	0/2 mm	
roh_agg, Zement	3,1	in g/cm3	bzw.	kg/L	3100	in kg/m³	Heidelberg Zement	R-SE	
roh_agg, add	1,07	in g/cm3	bzw.	kg/L	1070	in kg/m³	Wacker Polymers		als Annäherung von Produkt 530ND
roh_agg, FA	2,36	in g/cm3	bzw.	kg/L	2360	in kg/m³	BauMineral	Knepper	
roh_ZM	1,2	in g/cm3	bzw.	kg/L	1200	in kg/m³	Grace	Daracem	
roh_Wasser	1	in g/cm3	bzw.	kg/L	1000	in kg/m³	Wasser		

	Gleichung Nr.	Stand 16.08.2016					
Mindestzementgehalt		wird berechnet					
Bedingung Mindestzementgehalt als a_vol, Zement	13	a_vol_Zmin	0,1195	Bedingung des Mindestzementgehaltes berechnet aus Variablen Zugaben der Komponenten wird unten über lower boundaries eingelesen			
PARAMETER		betas werden berechnet		Bemerkungen			
Dosierung ZM als Volumentanteil	5	beta_1	0,0620	Umrechnungen aus M% als Volumentanteil			FM oder LP
Wasserzugabe als Volumentanteil	6	beta_2	1,2400	Umrechnungen aus M% als Volumentanteil			
Dosierung Polymer als Volumentanteil	7	beta_3	0,0724	Umrechnungen aus M% als Volumentanteil			
Mindestzementgehalt als Volumentanteil	10	beta_4	0,1032	Umrechnungen aus kg/m³ als Volumentanteil			
Vorgaben von LN für Rezeptur							
Dosierung ZM in M%		alpha_2	0,0240	Vorgabe LN		FM oder LP	auf das Gewicht von Zement bezogen
Dosierung Polymer in M%	Grenzwert	alpha_3	0,0250	Vorgabe LN	bis max. Wert und drunter kann eingegeben werden		auf das Gewicht von Zement bezogen
Vorgabe Mindestzementgehalt in kg/m³	Grenzwert	alpha_4	320,0000	Vorgabe LN	nach DIN EN 206 bzw. alte DIN 1045		
Dosierung ZS FA in M%	Grenzwert	alpha_5	0,3300		nach DIN EN 206 bzw. alte DIN 1046		auf das Gewicht von Zement bezogen
Lufportengehalt		alpha_1	0,0015	Vorgabe LN			
Wasser Zement Wert		w/z-Wert	0,40	Vorgabe LN	Variation zwischen 0,37 / 0,40 /0,45 / 0,5		

VARIATIONEN

Dosierung Polymer in M%	alpha_3	dazugehöriges beta_3			
Polymer	0,0100	0,0290	von	Bereich vom Hersteller	auf das Gewicht von Zement bezogen
Polymer	0,0250	0,0724	bis	Bereich vom Hersteller	auf das Gewicht von Zement bezogen
Polymer	0,1000	0,1967	max.	nach RL-SIB	auf das Gewicht von Zement bezogen

PARAMETER, weitere	als Grenzwert	betas werden berechnet		Bemerkungen		
Dosierung Zusatzstoff Flugasche	max.	beta_5	0,4335	Umrechnungen aus M% als Volumenanteil		für Berechnung ub

Sand:

Zement:
lower boundary = Mindestzementgehalt 320 kg/m³
also beta_4 in Excel zu lösen und in Matlab einlesen
lower boundary (Zement) = Bedingung aus Mindestzementgehalt ausgerechnet

Polymer:
upper Boundary = 10 M % Zementbezogen = alpha 3 (Gleichung 5.7)
also beta_3 in Excel zu lösen und in Matlab einlesen
upper Boundary = beta_3

Flugasche:
upper Boundary = 33 M % Zementbezogen 0,33
nach DIN EN 206-1
also beta_5 in Excel zu lösen und in Matlab einlesen
upper Boundary = beta_5

Daten von Matlab einlesen lassen

Startwerte a_vol_0 für die Optimierung	Startwerte für a_vol			in Vol%	bzgl. V_Feststoffe	Startwerte variierbar		
Sand				0,57	Vorgabe LN			
Zement R-SE				0,3	Vorgabe LN			
Polymer				0,03	Vorgabe LN			
Flugasche KMC				0,1	Vorgabe LN			
				1	Summe der Startwerte muss 1 ergeben			
Grenzwerte für die Optimierung	Vol%	lb		ub				
Sand		0		1				
Zement R-SE	wird von oben eingelesen=	0,1195		1		Bedingung Mindestzementgehalt als a_vol, Zement	s. o.	
Polymer		0		1		wird definiert um später besser zu reagieren, 0 bis 1 erstmal einlesen		
Flugasche KMC		0		1		wird definiert um später besser zu reagieren, 0 bis 1 erstmal einlesen		
Weitere Grenzwerte (abh. Von a_vol Zement)								
Polymer	beta_3	0,0290		0,0724	wie gleichung 5.7		abh. Von Zement	untere grenze kann möglicherweise auch zu 0 geändert werden, sind im Moment Herstellerangaben
Flugasche KMC	beta_5	0		0,4335	wie gleichung 5.7 nur mit FA		abh. Von Zement	
Bedingungen für die Optimierung								
Mindestzementgehalt								
Alle Komponenten größer 0								
Alle Komponenten zusammen 100 %								
	Verteilungsmodul	q		0,28	variation	0,28	0,37	

Kontrollen per Hand
Mehlkorngehalt
Der äquivalente Wasserzementwert (w/z)eq wird als w/(z + 0,7·f) berechnet.
Stoffraumrechnung für 1 m³ Beton
Achtung 100% aus Optimierung bezieht sich nicht auf V_Gesamt, sondern auf V_Feststoffe

B.2.2. Datei zum Auslesen der Daten aus dem Excel-Sheet

```
function [V_agg, d_min, d_max, c_min_max, beta_3, beta_5, a_vol_lb,...
    a_vol_ub, a_vol_0, q ] = read_xslx_data

% Beschreibung: Eine Funktion, welche Daten aus einem Excel Dokument
% einliest und für die weitere Verwendung aufbereitet

% Name des Dokuments
filename = 'DatenSieblinien.xlsx' ;

%%
% Einlesen der Mengenanteile des Feststoffes u am Gesamtgemisch

% Startzeile angeben, ab welcher Daten eingelesen werden sollen (enthält
% auch den Durchmesser!!, folgende Daten sind die Korngrößen)
r1 = 'B14';

% Endspalte angeben, bis zu der Daten eingelesen werden sollen
c2 = 'O18';

% Der (rechteckige) Bereich, der eingelesen werden soll
xlrange =[r1 ':' c2];

% Die Nummer des Excel Blattes, das eingelesen werden soll
n = 2 ;

% Die Mengenanteile aus dem xlsx Dokument werden in 'V_agg' gespeichert
V_agg = xlsread(filename,n,xlrange,'basic') ;

V_agg(2:end,:) = V_agg(2:end,:)/100;

%%
% Bestimmung von 'd_min, d_max'
V_agg_column_sum=sum(V_agg(2:end,:),1) ;

non_negative_columns = find(V_agg_column_sum);

% Spalte, welche den kleinsten Wert enthält, der noch betrachtet wird
c_min = min(non_negative_columns) ;

% der minimale Durchmesser, der noch betrachtet wird
d_min = min(V_agg(1,non_negative_columns)) ;

% Anzahl an Zeilen der reduzierten Matrix V_agg ohne Durchmesser D_i
amount_of_rows = size(V_agg,1)-1 ;

% Teilen der Zeilensumme der reduzierten Matrix V_agg durch die Anzahl an
% Zeilen (V_agg_column_sum ist ein Vektor)
V_agg_column_sum = V_agg_column_sum / amount_of_rows ;

% Nehme die erste Spalte, in der die Summe über alle Zeilen einem Wert von
% 100 entspricht
max_value_column = find(V_agg_column_sum==1, 1 ) ;

c_max = max_value_column ;

d_max = V_agg(1,max_value_column);

c min max = [c min c max] ;
```

```
%%
% Einlesen der beta 3 (Ausdruck der maximalen Zugabe des Polymers [Vol%]) für
nonlinear constraint
% Startzeile angeben, ab welcher Daten eingelesen werden sollen
r1 = 'D102';
%
% Endspalte angeben, bis zu der Daten eingelesen werden sollen%
c2 = 'D102';
% Der (rechteckige) Bereich, der eingelesen werden soll
xlrange =[r1 ':' c2];
%
% Die Nummer des Excel Blattes, das eingelesen werden soll
n = 2 ;
%
beta_3 = xlsread(filename,n,xlrange,'basic') ;
%
%%
% Einlesen der beta 5 (Ausdruck der maximalen Zugabe des Zusatzstoffes [Vol%], hier
Flugasche) für nonlinear constraint
% Startzeile angeben, ab welcher Daten eingelesen werden sollen
r1 = 'D103';
%
% Endspalte angeben, bis zu der Daten eingelesen werden sollen%
c2 = 'D103';
% Der (rechteckige) Bereich, der eingelesen werden soll
xlrange =[r1 ':' c2];
%
% Die Nummer des Excel Blattes, das eingelesen werden soll
n = 2 ;
%
% Die Betas für Gleichungen 5.3, 5.4, 5.8 und 5.9 aus dem xlsx Dokument werden in
'beta_123' gespeichert
beta_5 = xlsread(filename,n,xlrange,'basic') ;

%%
%Einlesen Startwerte (Sand, Zement, Polymer, Flugasche)
% Startzeile angeben, ab welcher Daten eingelesen werden sollen
r1 = 'D90';
% Endspalte angeben, bis zu der Daten eingelesen werden sollen%
c2 = 'D93';
% Der (rechteckige) Bereich, der eingelesen werden soll
xlrange =[r1 ':' c2];
% Die Nummer des Excel Blattes, das eingelesen werden soll
n = 2 ;
% Der Startwert für Sand wird aus dem xlsx Dokument gelesen und in 'Sand_lb'
gespeichert
a_vol_0 = xlsread(filename,n,xlrange,'basic') ;

%%
%Grenzwerte für Optimierung - werden aus der Excel Tabelle gelesen,
%dies hat die Variation vereinfacht.
%Lower Boundaries
%Flugasche_lb = xlsread(filename,n,xlrange,'basic') ;
%als Vektor
r1 = 'C96';
c2 = 'C99';
xlrange =[r1 ':' c2];
```

```
n = 2 ;
a_vol_lb = xlsread(filename,n,xlrange,'basic') ;

%%
%Grenzwerte für Optimierung - werden aus der Excel Tabelle gelesen,
%dies hat die Variation vereinfacht.
% Upper Boundaries
%als Vektor
r1 = 'D96';
c2 = 'D99';
xlrange =[r1 ':' c2];
n = 2 ;
a_vol_ub = xlsread(filename,n,xlrange,'basic') ;
%lb und ub als Vektor geschrieben, ist besser, damit Ax = b je ub und lb

%%
% Verteilungsmodul q wird aus Excel Datei gelesen, hat die Variation
% vereinfacht.
r1 = 'D109';
c2 = 'D109';
xlrange =[r1 ':' c2];
n = 2 ;
q = xlsread(filename,n,xlrange,'basic') ;

end
```

B.2.3. Haupt-Matlab-File

```
% Dies ist das 'main.m' File, welches für die Optimierung genutzt wird und
% schrittweise weitere Funktionen aus anderen '.m' Files aufruft

% Löschen des Command Windows
clc

% Löschen des Workspace
clear all

% Schließen aller geöffneten Fenster
close all

%%

% 1. Laden der Daten aus dem Excel Dokument anhand von 'read_xslx_data.m'

% Der Nutzer muss in der Funktion festlegen, welchen Daten eingelesen
% werden sollen -> Das File benötigt eine Anpassung durch den Nutzer

[V_agg, d_min, d_max, c_min_max,beta_3, beta_5, a_vol_lb,...
    a_vol_ub, a_vol_0, q] = read_xslx_data ;

%%

% 2. Definition der Optmierungs-Funktion

J_func = @(a_vol) opt_function(a_vol, V_agg, d_min, d_max,...
    c_min_max, false, q) ;

%%
% 3. Minimierung der Funktion und Lösung des Optimierungs-Problems
% Initiale Parameter / Anfangs-Schätzwerte / Startwerte festlegen

% Der Anfangswert a_vol_0 ist ein Zeilenvektor, dessen Anzahl an Zeilen
% der Anzahl an Feststoffen entspricht


%%
%RANDBEDINGUNGEN
% 1. Randbedingung: Summe über alle a_vol muss 1 sein (entspricht 100%)  (Gleichung
3.11)
Aeq = ones(1,size(a_vol_0,1)) ;
%Erzeuge einsen, eine Zeile, anzahl Spaltenanzahl von a_vol_o und 1 zeile
beq = 1 ;

% 2.Randbedingung: Alle V_i sind größer gleich 0
% lb: lower bound / Untere Grenze aller a_vol_i
lb = a_vol_lb ;
ub = a_vol_ub ;
% als linear constraint, da abh. von Zement aus a vol,was in Matlab zu berechnen
ist

%% Alte Eingaben - alphas werden nun in Excel berechnet und in betas umgerechnet
% 3.1 Definition aller Randbedingungen
%alpha_1 = ; % Luftporen
%alpha_2 = ; % Dosierung des Zusatzmittels
%alpha_3 = ; % Dosierung des Polymer
```

```
%alpha_4 = ; % Mindestzementgehalt
%alle alphas werden in Excel eingegeben und zu den betas berechnet

%%
% Bedingung: V_Polymer = beta_3 * V_zement (Gleichung 5.1)
%
% beta_3 = alpha_3 * rho_agg(2) / rho_agg(3) ; auslesen aus Excel
%
A_2 = zeros(1,size(a_vol_0,1)) ;
A_2(3) = 1; %Da Zeile Polymer
A_2(2) = -beta_3; %Da Zeile Zement; beta_3 steht in D43
%
b_2 = 0 ;
%
%

A_3 = zeros(1,size(a_vol_0,1)) ;
A_3(4) = 1; %Da Zeile Flugasche
A_3(2) = -beta_5; %Da Zeile Zement; beta_3 steht in D43
%
b_3 = 0 ;
%
%

A = [A_2; A_3] ;
%
b = [b_2; b_3];
% Berücksichtigung der Grenzwerte für die Optimierung
% Bedingung: V_Polymer = beta_5 * V_zement
%

%%

% Lösung des Optimierungsproblems anhand von fmincon

% -> siehe hier für weitere Informationen :

% http://de.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html

[p_opt, J_opt, Exit] = fmincon(J_func,a_vol_0,A,b,Aeq,beq,lb,ub) ;

% J_opt ist die Summe der Fehlerquadrate

%%
plot_opt(V_agg,p_opt,c_min_max,q,d_min,d_max,a_vol_0)
```

B.2.4. Optimierungsfunktion fmincon

```
function J = opt_function(a_vol, V_agg, d_min, d_max, c_min_max,...
    plotMode, q)

% Beschreibung: Eine Funktion, in welcher die zu minimierende Funktion
% abgebildet ist
%%x est ist a vol
% Festlegung des Exponenten q
%q = 0.37 ; wird durch Auslesen aus Excel Tabelle gemacht

%%

% Die Funktion, welche minimiert werden soll

objective = 0 ;

for i = c_min_max(1) : c_min_max(2)

  % Wird hier auf null gesetzt, damit nur die Summe über die jeweilige
  % Spalte gebildet wird
  p_m_di = 0 ;

  % Schleife ab der zweiten Zeile, da V_agg auch die Durchmesser in der
  % ersten Zeil enthält
    for j = 2 : size(V_agg,1)

        p_m_di =  V_agg(j,i) * a_vol(j-1,1) + p_m_di ;

    end

    d = V_agg(1,i) ;
    % die erste Zeile der Matrix V_agg enthält die Durchmesser,
    % da diese im xls-file über den Messwerten stehen und wurden eingelesen

    p_t_di = (d^q - d_min^q) / (d_max^q-d_min^q) ;    % Funk und Dinger Verteilung

    objective = (p_m_di - p_t_di)^2 + objective ;

end

%%

% Darstellung der Zwischenergebnisse

if (plotMode == true)


grid on
hold on


end

J = objective ;


end
```

C. Untersuchungen am Mörtel

C.1. Biegezug- und Druckfestigkeit von Mörtelprismen

Tabelle C.1.: Biegezug- und Druckfestigkeit von Mörtelprismen

Rezeptur	Mörtelprismen Bezeichnung	Prüfalter [d]	Biegezugfestigkeit [N/mm^2]	Druckfestigkeit [N/mm^2]
	B1-3	7	**10,49**	49,57
B	B4-6	28	**10,77**	59,48
	B7-9	56	**9,43**	66,67
	H1-3	7	**8,94**	44,34
H	H4-6	28	**10,07**	60,20
	H7-9	56	**8,04**	56,77
	T1-3	7	**10,94**	54,13
T	T4-6	28	**10,06**	61,75
	T7-9	56	**9,90**	67,47
	W1-3	7	**8,19**	43,90
W	W4-6	28	**7,03**	54,23
	W7-9	56	**6,18**	61,17
	M1-3	7	**4,05**	27,48
M	M4-6	28	**5,43**	35,00
	M7-9	56	**5,97**	41,47
	D1-3	7	**5,91**	34,80
D	D4-6	28	**6,65**	48,82
	D7-9	56	**6,65**	59,10
	E1-3	7	**5,46**	29,20
E	E4-6	28	**6,43**	42,13
	E7-9	56	**6,74**	49,26
	Op1 1-3	7	**4,29**	25,60
Op1	Op1 4-6	28	**5,21**	31,81
	Op1 7-9	56	**5,84**	36,35
	Op2 1-3	7	**5,52**	35,50
Op2	Op2 4-6	28	**6,58**	48,27
	Op2 7-9	56	**6,99**	52,07

D. Untersuchungen an Verbundproben während der Rezepturentwicklung

D.1. Überblick: Rezeptur H - Verbund

Die Abbildung D.1 zeigt die Durchschnitts-Haftzugfestigkeiten von neunzehn Verbundproben á fünf Haftzugfestigkeiten.

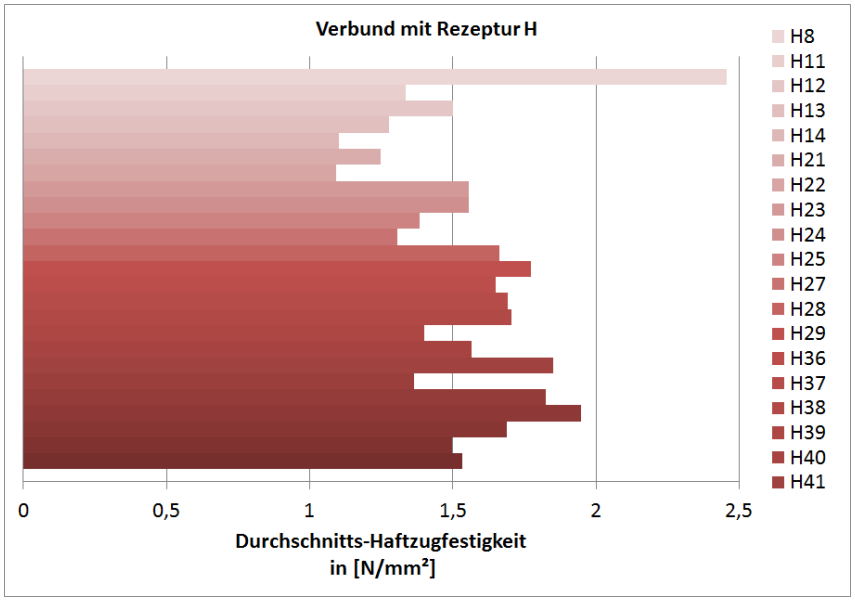
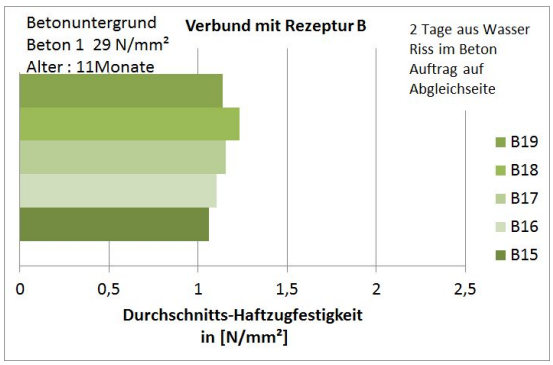


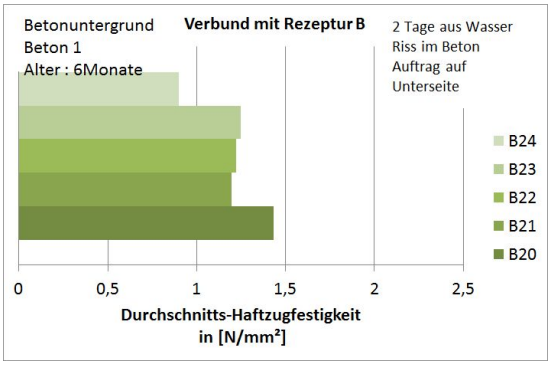
Abbildung D.1.: Verbund mit Rezeptur H, diverse Durchschnitts-Haftzugfestigkeiten

D.2. Vergleich - Applikation auf Abgleichseite / untere Seite

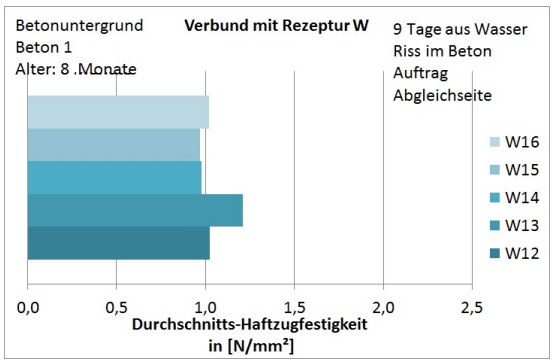
Im Folgenden sind Ergebnisse während der Rezepturentwicklung dargestellt. Dabei wurden die Rezepturen B, H, T und W auf die verschiedenen Betonuntergründe unter Wasser aufgebracht. Der Verbund auf den Unterseiten der gesandstrahlten Betonuntergründe schienen bessere Werte erreichen zu können. Da die Haftzugfestigkeitsprüfung Streuungen unterliegt (siehe Abschnitt 6.1.1), kann diese Aussage nicht pauschalisiert werden.



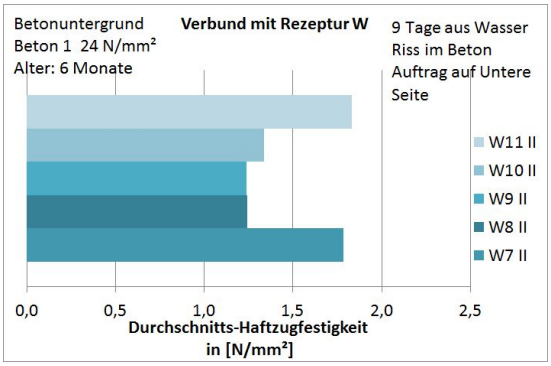
(a) Verbund mit Rezeptur B, aufgetragen auf Abgleicheite



(b) Verbund mit Rezeptur B, aufgetragen auf untere Seite

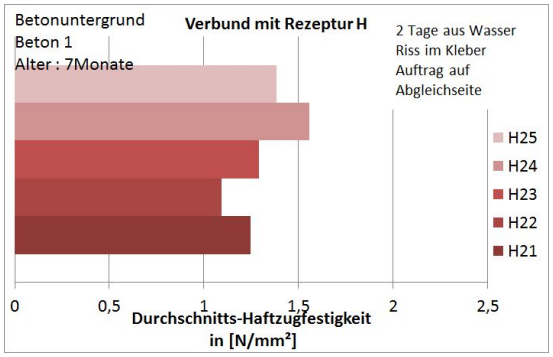


(c) Verbund mit Rezeptur W, aufgetragen auf Abgleicheite

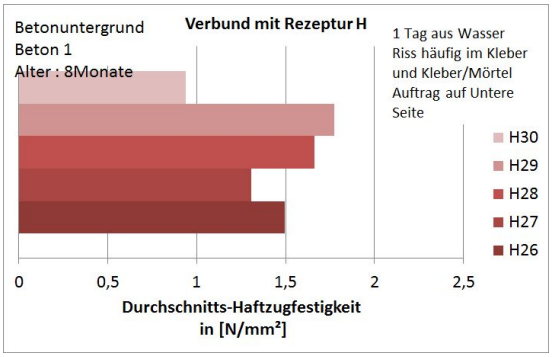


(d) Verbund mit Rezeptur W, aufgetragen auf untere Seite

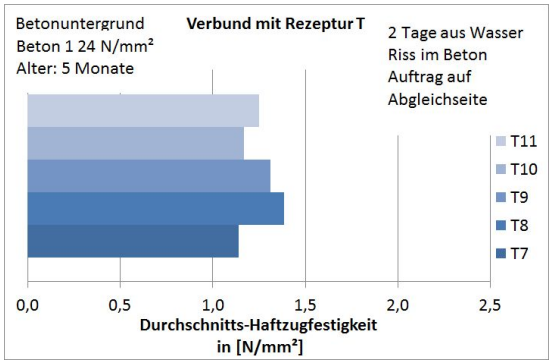
Abbildung D.2.: Haftzugfestigkeiten der Verbundkörper mit Rezepturen B und W im Vergleich: Abgleichseite vs. Untere Seite (2013/2014)



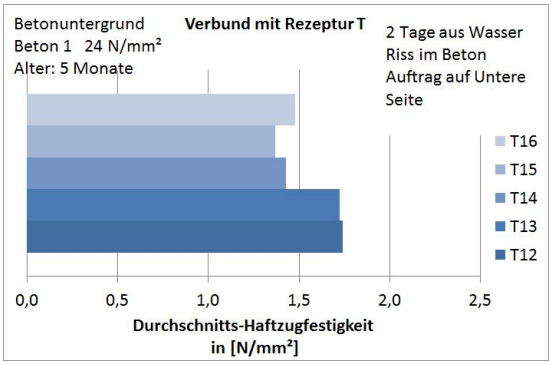
(a) Verbund mit Rezeptur H, aufgetragen auf Abgleicheite



(b) Verbund mit Rezeptur H, aufgetragen auf untere Seite



(c) Verbund mit Rezeptur T, aufgetragen auf Abgleichseite



(d) Verbund mit Rezeptur T, aufgetragen auf untere Seite

Abbildung D.3.: Haftzugfestigkeiten der Verbundkörper mit Rezepturen H und T im Vergleich: Abgleichseite vs. Untere Seite (2013/2014)

E. Untersuchungen an Verbundproben während der Entwicklung der Applikationstechnik

E.1. Auftrag mit Stempel (ST), POM Stempel (POM-ST)

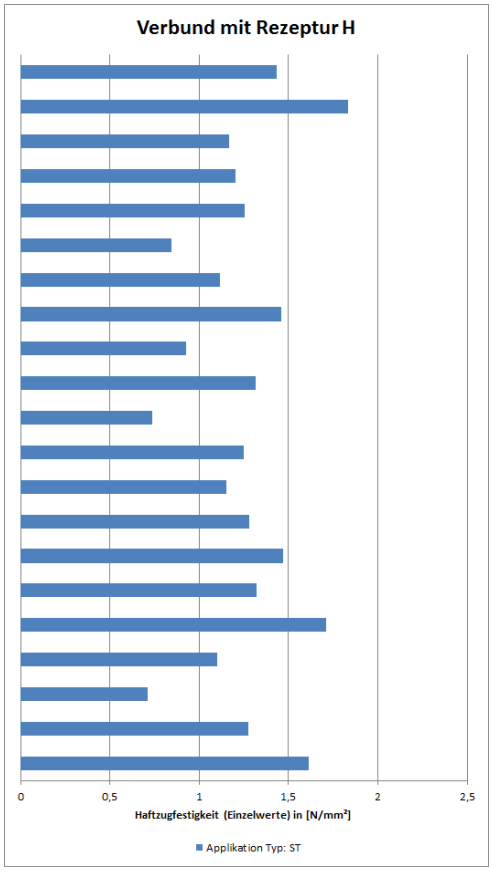


Abbildung E.1.: Einzelwerte für Haftzugfestigkeit mit ST (siehe Abb. 5.19), Rezeptur H

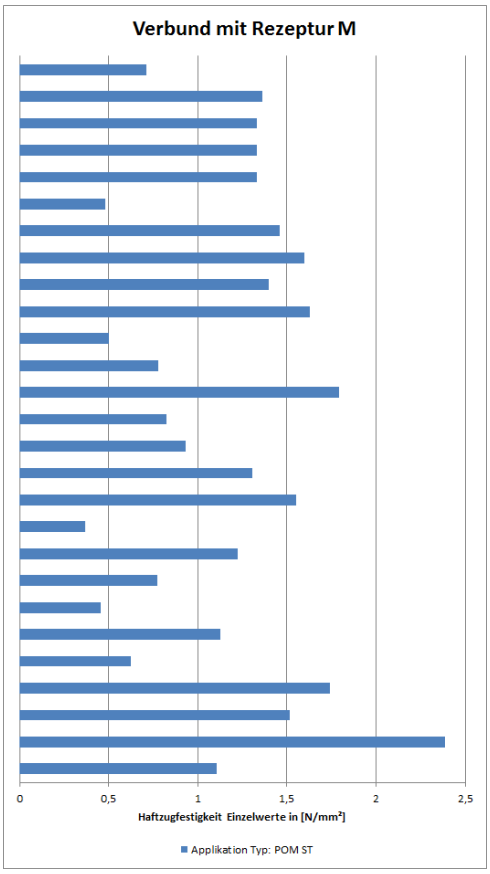
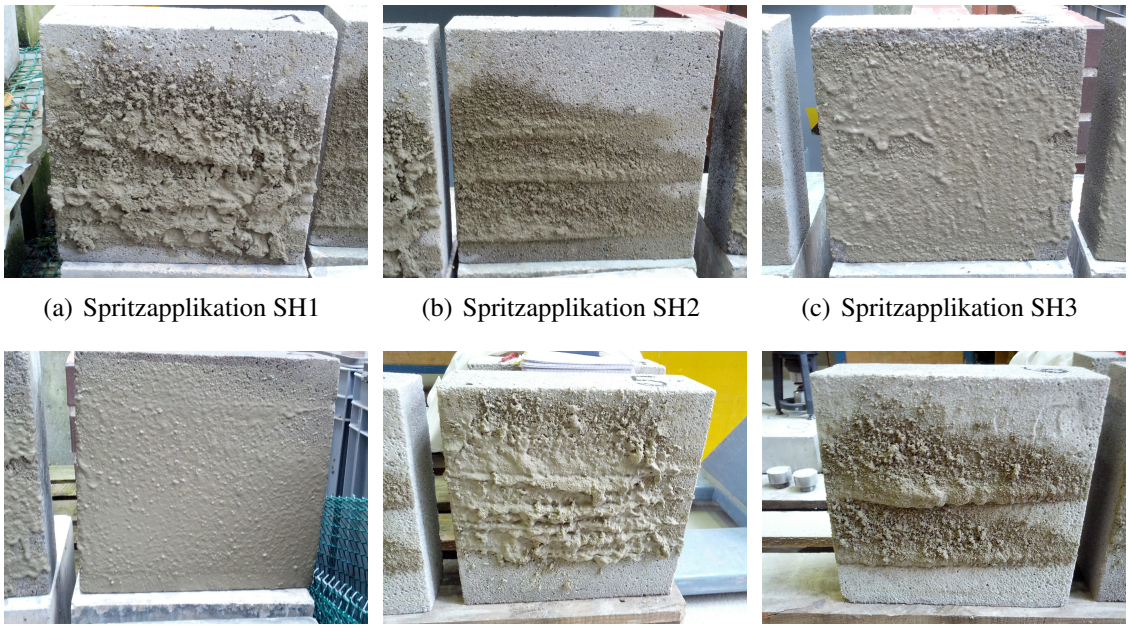


Abbildung E.2.: Einzelwerte für Haftzugfestigkeit mit POM-ST (siehe Abb. 5.20), Rezeptur M

F. Applikationstechniken - weitere Untersuchungen

F.1. Spritzapplikationen

In Abbildung F.1 sind die bereits in Abschnitt 5.6.2.2 erwähnten Verbundproben, die durch Spritzapplikationen realisiert wurden, gezeigt. Hauptsächlich wurde die Mörtelkonsistenz und /



(a) Spritzapplikation SH1 (b) Spritzapplikation SH2 (c) Spritzapplikation SH3

(d) Spritzapplikation SH4 (e) Spritzapplikation SH5 (f) Spritzapplikation SH6

Abbildung F.1.: Applikationen SH 1 bis 6 mit Spritzapparatur an Luft

oder die Druckluftzufuhr für die Spritzapplikationen variiert. Verwendet wurde die Rezeptur H (siehe Abschnitt 5.5) für diese Spritzapplikationen. Die Rezepturen wurden teilweise im w/z-Wert modifiziert, um zu prüfen, mit welcher Konsistenz sie für den Auftrag mit dieser Technik am besten „geschleudert“ werden konnte. Die Unterscheidungen in den Spritzapplikationen können wie folgt beschrieben werden:

Die Spritzapplikation SH1 (siehe Abbildung F.1(a)) zeigt das Spritzen eines schwerflüssigen Mörtels, der zusammenhielt und bei Auftrag mit der Apparatur auch an dem Betonuntergrund hängen blieb. Im Ergebnis wurde keine glatte Oberfläche erzielt. Druckluftzufuhr: 0,25 bar; Wasser-Zement-Wert des Mörtels: w/z=0,36;

Die Abbildung F.1(b) zeigt, dass ein Mörtel (Rezeptur SH2), der knetbar und erdfeucht war und in Form von Kugeln und Stückchen auf die rotierende Scheibe traf, in dünnen Schichten

auf den Betonuntergrund traf. Es waren jedoch drei Streifen erkennbar, die dadurch entstanden, dass der Bohrständer in seiner Position sowohl vertikal als auch horizontal verändert wurde. Druckluftzufuhr: 0,25 bar; Wasser-Zement-Wert des Mörtels: w/z=0,3;

Ein flüssiger Mörtel wurde für die Applikation SH3 in Abbildung F.1(c) verwendet. Der flüssige Mörtel wurde in Maßen auf die Scheibe gegossen. Druckluftzufuhr: 0,25 bar; Wasser-Zement-Wert des Mörtels: w/z=0,40;

In Abbildung F.1(d) wurde eine sehr dünne Schicht auf die Betonoberfläche getragen. Der Mörtel war sehr flüssig und wurde direkt aus dem Mischtopf auf die Scheibe gegossen. Druckluftzufuhr: 0,25 bar; Wasser-Zement-Wert des Mörtels: w/z=0,40;

Bei der Spritzapplikation SH5 (siehe Abbildung F.1(e)) wurde schwerflüssiger Mörtel, der ebenfalls zusammenhielt, verwendet. Dieser blieb durch die Applikation mit der rotierenden Scheibe am Betonuntergrund hängen. Jedoch bildete sich keine glatte Oberfläche. Diese frisch aufgetragene Mörtelschicht wirkte „dichter“ und zusammenhängender als bei der Spritzapplikation SH1 (siehe Abbildung F.1(a)). Druckluftzufuhr: 0,5 bar; Wasser-Zement-Wert des Mörtels: w/z=0,36;

Für die Spritzapplikation der Platte in Abbildung F.1(f) (SH6) wurde ein knetfester und erdfeuchter Mörtel verwendet. Es wurden Kugeln und Stückchen des Frischmörtels auf die rotierende Scheibe gelassen. Langsam bildeten sich gewisse Schichtdicken: Zuerst blieb kaum Mörtel hängen, dann entstand die Schichtdicke durch schrittweise Anhäufung von Mörtel. Eine stufenweise Applikation war möglich. Druckluftzufuhr: 0,5 bar; Wasser-Zement-Wert des Mörtels: w/z=0,3;

F.2. Drehzahlmessung unter Wasser

Für die Untersuchung einer möglichen Spritztechnik mit einer drehenden Scheibe unter Wasser, die über einen Druckluft betriebenen Motor in Bewegung versetzt wird wurde eine Drehzahlmessung benötigt, die auch unter Wasser funktioniert. Herkömmliche Drehzahlmesser mittels Laserstrahl konnten nicht angewendet werden.

Es wurden in alle Scheiben sogenannte Neodym-Magnete eingeklebt. Diese sind sehr kleine Magnete, die aber magnetisch sehr stark wirken. Mittels einer Spule, die für den Unterwassereinsatz eingeharzt wurde (siehe Abbildung F.2), konnte die Drehzahl gemessen werden, indem ein Impuls gemessen wurde, sobald der Neodymmagnet die Spule passierte. Vom Institut für Messtechnik (TUHH) wurde eine Sensorplatine (siehe Abbildung F.3) für die Pulsaufbereitung entworfen und gefertigt (H. Fielitz).

- Spannungsversorgung: 8-30V DC, gegen Verpolung geschützt
- Ausgang: Pulse, Pegel 5V, gegen Kurzschluss geschützt

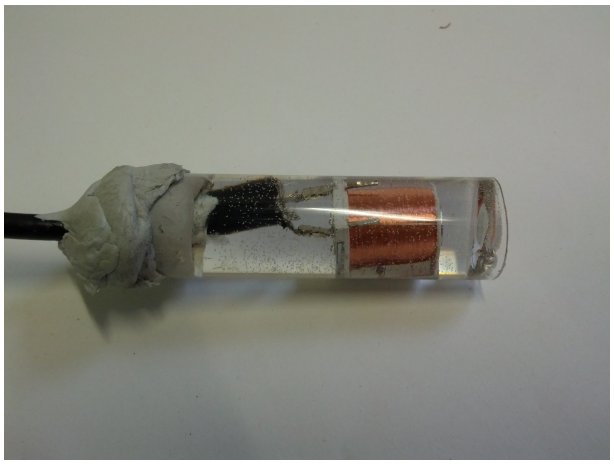


Abbildung F.2.: Spule (eingeharzt)

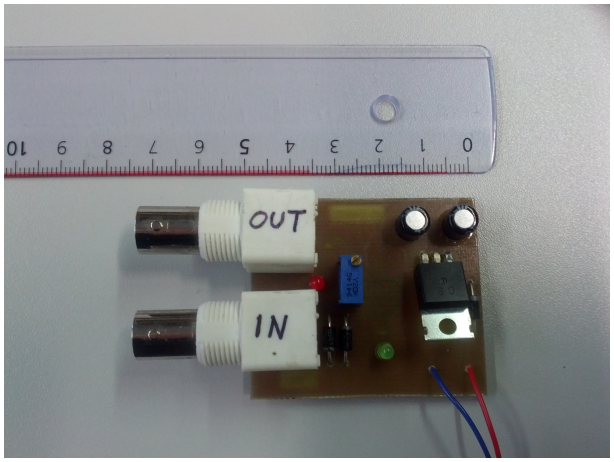


Abbildung F.3.: Sensorplatine für Pulsaufbereitung; geplant und gebaut: H. Fielitz

- Eingang: Anschluss für Sensorspule, gegen Überlastung geschützt

Die Inbetriebnahme: Nach dem Anschließen der Spannungsversorgung muss die grüne LED leuchten. Anschließend wird der Sensor am Eingang angeschlossen und das „Poti“ (Potentiometer) wird verdreht, bis die rote LED dauerhaft leuchtet. Danach wird das „Poti“ soweit zurückgedreht, bis die rote LED ausgeht. Jeder registrierte Puls wird durch ein aufblitzen der roten LED angezeigt. Die Abbildung F.4 zeigt eine schematische Darstellung der Platine. Das Schalt-

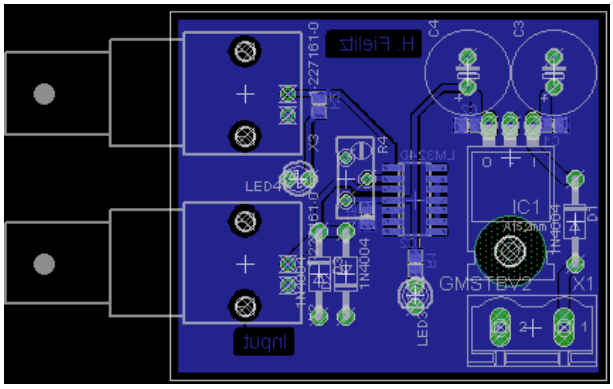


Abbildung F.4.: Platinenlayout; H. Fielitz

bild ist eine schematische Darstellung, wie die einzelnen Bauteile auf der Platine miteinander verbunden sind (siehe Abbildung F.5). Jeder Impuls wird von dem Impulszähler gemessen. Die

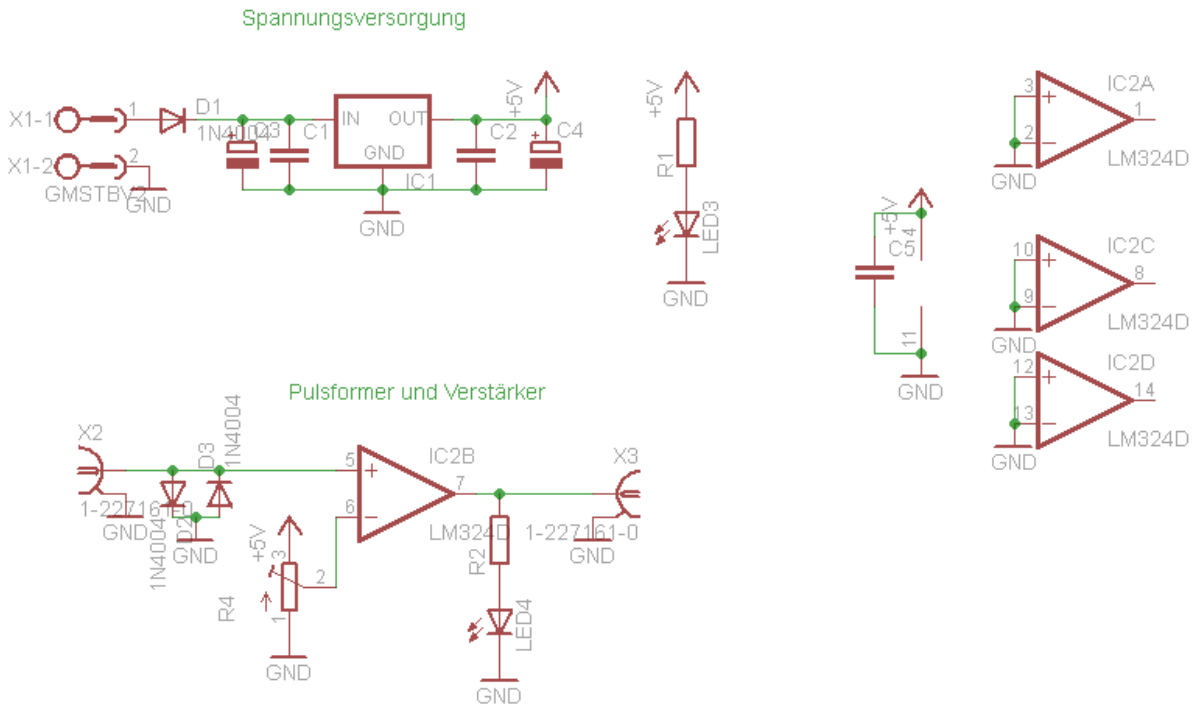


Abbildung F.5.: Schaltplan für Pulsaufbereitung; H. Fielitz

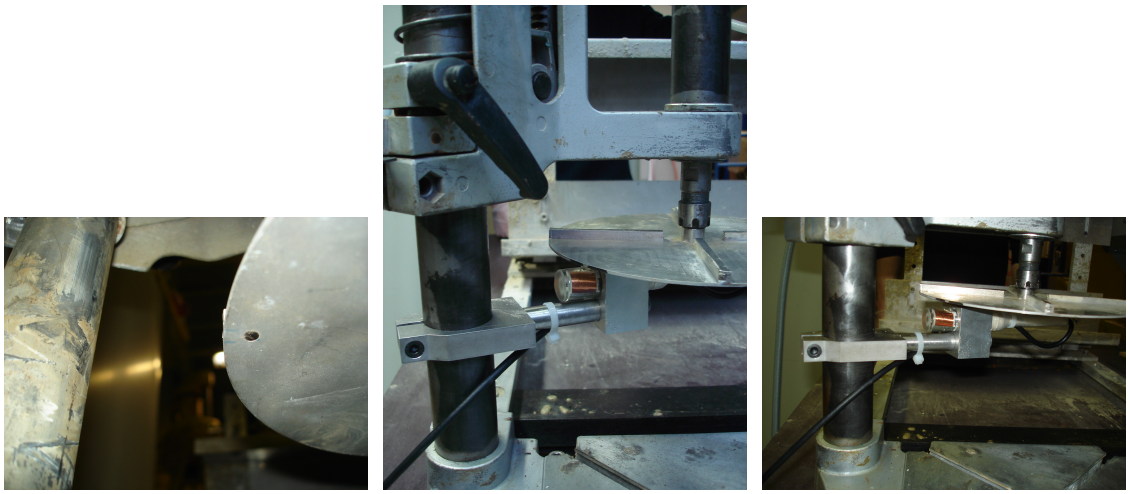
angezeigte Zahl entspricht der Angabe von einer Umdrehung pro Sekunde, multipliziert mit dem Faktor 60 ergibt sie die Anzahl Umdrehungen pro Minute. In Abbildung F.7 ist der Aufbau des Versuchs für die Drehzahlmessung abgebildet. Am Bohrständer wird die eingeharzte Spule



(a) Innenaufbau des Drehzahlmessgerätes (b) Drehzahlmessgerät (c) Anzeige des Impulszählers

Abbildung F.6.: Drehzahlmessgerät FWE 13A007 FS

(Abbildung F.7(c)) so angebracht, dass der Abstand zwischen Scheibe und Spule ca. 1,5 cm betrug. Der Abstand zwischen Spule und Scheibe durfte nicht größer als 2 cm sein, weil sonst keine Impulse messbar waren.



(a) Scheibe mit eingelassenen Magneten (b) Aufbau mit Scheibe (c) Aufbau mit Sensor

Abbildung F.7.: Versuchsaufbau für die Drehzahlmessung unter Wasser

Schematisch ist der Aufbau der Apparatur für die Applikation und die Drehzahlmessung unter Wasser in Abbildung F.8 dargestellt. Dabei sind die Parameter a, b und c die Abmessungen von Bohrständer Oberkante bis zur Scheibenoberkante (Abmessung a), die Abmessung ab Wasserspiegelhöhe bis zur Scheibenoberkante (Abmessung b) und die Abmessung von Scheibenoberkante bis zum Boden der Wanne (Abmessung c). Um Ergebnisse der Drehzahlmessungen für die verschiedenen Scheiben und ihre Applikationsmöglichkeit zu testen, musste darauf geachtet werden, dass die Parameter a, b und c des Versuchsaufbaus gleich sind, damit die Ergebnisse vergleichbar waren. Der Einfluss der ansteigenden Wasserdruckes wurde mit zunehmender Tiefe im Wasser größer. Je tiefer die Scheibe unter Wasser war, desto mehr Widerstand hatte die Scheibe zu überwinden.

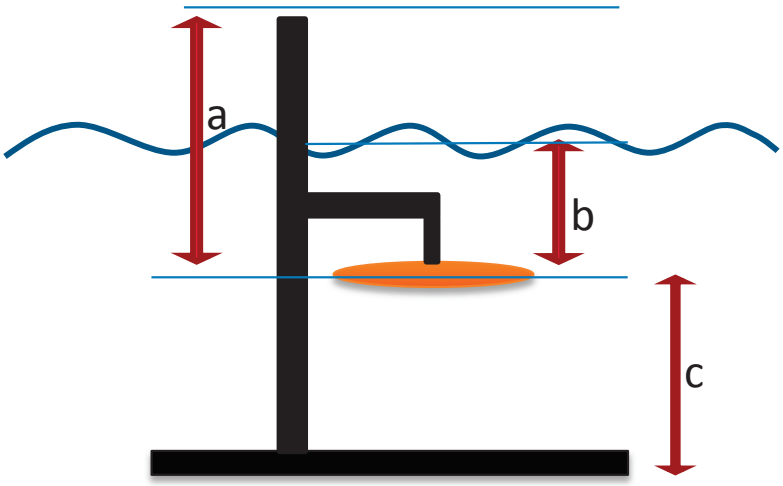


Abbildung F.8.: Schematischer Aufbau für Drehzahlmessung mit Abmessungen a, b und c

Es wurden die maximal erreichbaren Drehzahlen unter Wasser von allen sieben Scheiben in Abhängigkeit von der Druckluftzufuhr zum Fräsmotor untersucht. Es wurden verschiedene Scheiben mit unterschiedlichen Oberflächen getestet, teilweise mit erhabenen Streben und teilweise mit eingefrästen Furchen. Die Scheiben sind mit ihren zugehörigen Eigenschaften, wie Gewicht, Durchmesser, Dicke und Abmessungen eventueller Streben (in die Höhe) und Furchen (in die Tiefe) in Tabelle F.1 aufgeführt. Die Abbildung 5.25(a) (siehe Seite 137) zeigt den Versuch bei der Durchführung der Drehzahlmessung. Es wurden die in Tabelle F.2 angegebenen Abmessungen für den Versuch verwendet. Der Abstand zwischen Sensor und drehender Scheibe beträgt 1,5 cm. Alle sieben Scheiben wurden an den Motor angebracht und in 0,5 bar - Schritten wurde die Druckluftzufuhr erhöht, bis 6 bar erreicht wurde. Bei 6 bar hatte der Druckluftmotor seine Maximalleistung erreicht. Falls möglich, wurde 6,5 bar zugeführt. Die Anzahl Umdrehungen wurde für jeden 0,5 bar-Schritt festgehalten.

In Abbildung F.9 sind die Drehzahlen aller Scheiben in Abhängigkeit der Druckluftzufuhr in bar angegeben, die sich aus dieser Versuchsreihe ergaben. Die Auflösung für die Messung war eine Umdrehung pro Sekunde. Die Genauigkeit der Messung betrug $\pm$ 0,5 U/Sek bzw. $\pm$ 30 U/Min.

Das Diagramm in Abbildung F.9 zeigte, dass die verschiedenen Scheibenbeschaffenheiten sehr großen Einfluss auf die Drehzahl unter Wasser hatte. Bei gleicher Druckluftzufuhr (z. B. bei 6 bar - bei der die Maximalleistung des Motors erreicht wird) erreicht die Scheibe IV 2640 Umdrehungen pro Minute, wo hingegen die Scheibe II nur 660 Umdrehungen pro Minute erreichte. Der Verlauf für die Scheiben V und VI ist nicht ganz linear und hängt mit möglichen Messungenauigkeiten zusammen.

Tabelle F.1.: Eigenschaften der Scheiben

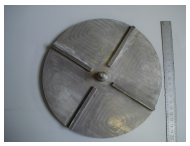
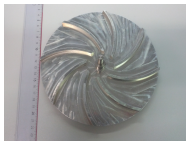
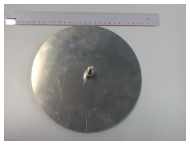
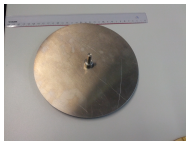
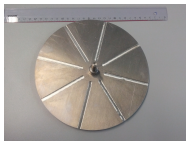
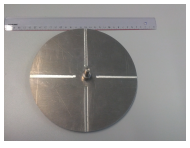
Bezeichnung der Scheibe		Durchmesser [*mm*]	Dicke [*mm*]	Gewicht [*g*]	Furchen/Streben Anzahl / Furchentiefe bzw. Strebenhöhe
I		180	6	438,35	-
II		200	2	227,83	4 / 6
III		180	2	199,41	8 / 6
IV		200	1	121,95	-
V		200	3	283,86	-
VI		200	2	190,21	8 / 1
VII		200	2	196,65	4 / 1

Tabelle F.2.: Abmessungen im Versuch

Parameter	[mm]	Beschreibung
a	340	gemessen von Bohrständer oben bis Scheibenoberkante
b	ca. 120	gemessen ab Wasserspiegelhöhe bis Scheibenoberkante
c	ca. 240 bis 250	gemessen von Scheibenoberkante bis Boden der Wanne
	360	Wassertiefe, gemessen bis zum Boden der Wanne des Versuchsaufbaus

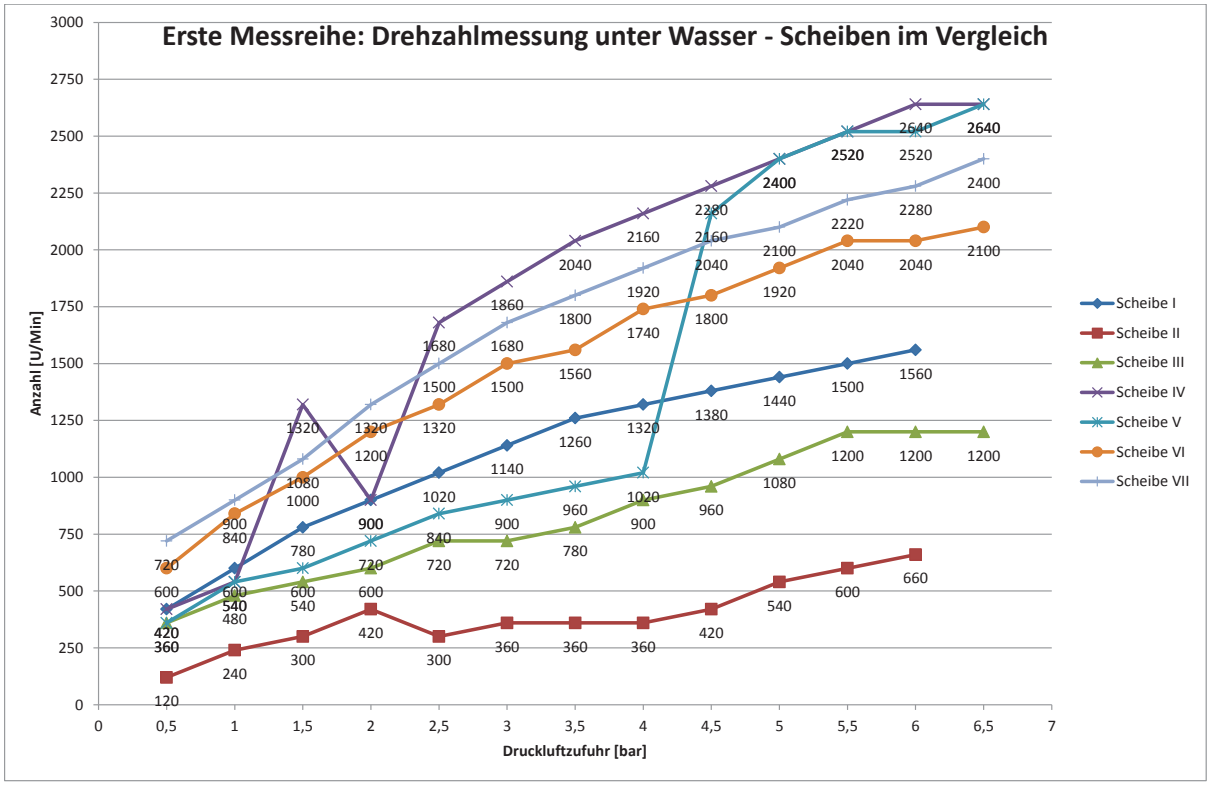


Abbildung F.9.: Messreihe - Drehzahlen unter Wasser - Scheiben im Vergleich

In Tabelle F.3 sind die Einzelwerte der Drehzahlmessung unter Wasser der verschiedenen Scheiben aufgeführt.

Wie in Abbildung 5.25(b) zu sehen, wurde das Wasser sofort trüb, nachdem ein Mörtel eingebracht wurde, indem der Mörtel auf die rotierende Scheibe fallen gelassen wurde. Man kann weder erkennen, ob der Mörtel sich sofort im Wasser auflöste, noch, ob dieser beim Aufprall auf die Scheibe zerfiel, noch, ob der Mörtel die Betonfläche überhaupt erreichte. Das Herausnehmen der Betonplatte nach den ersten Versuchen unter Wasser hatt gezeigt, dass zumindest kein Mörtel auf der Betonfläche haften blieb. Ob dieser Mörtel sich bereits auf dem Weg durch das Wasser auflöste oder durch die Turbulenzen des Wassers, die durch die rotierende Scheibe entstanden, kurz nach Aufprall auf die Betonoberfläche wieder abgerissen wurde, war unklar.

Es hatte sich gezeigt, dass mit der Scheibe VI und einem eigens hergestellten Mörtel bei 360 bis 1080 Umdrehungen pro Minute unter Wasser keine Haftung zum Beton erzielbar ist. Darüber hinaus bildete sich aufgrund der hohen Umdrehungszahl der Scheibe unter Wasser eine große Strudelbewegung, was möglicherweise auch eine abrasive Wirkung auf den evtl. aufgebrachten Mörtel zur Folge hatte.

Tabelle F.3.: Werte der Drehzahlmessung unter Wasser - Scheiben im Vergleich

Druckluft	**Scheibe Nr. [U/min]**						
[*bar*]	**I**	**II**	**III**	**IV**	**V**	**VI**	**VII**
0,5	420	120	360	420	360	600	720
1	600	240	480	540	540	840	900
1,5	780	300	540	1320	600	1000	1080
2	900	420	600	900	720	1200	1320
2,5	1020	300	720	1680	840	1320	1500
3	1140	360	720	1860	900	1500	1680
3,5	1260	360	780	2040	960	1560	1800
4	1320	360	900	2160	1020	1740	1920
4,5	1380	420	960	2280	2160	1800	2040
5	1440	540	1080	2400	2400	1920	2100
5,5	1500	600	1200	2520	2520	2040	2220
6	1560	660	1200	2640	2520	2040	2280
6,5	1620		1200	2640	2640	2100	2400

F.3. Notwendige Drehzahl und Scheibenart für eine Applikation an Luft

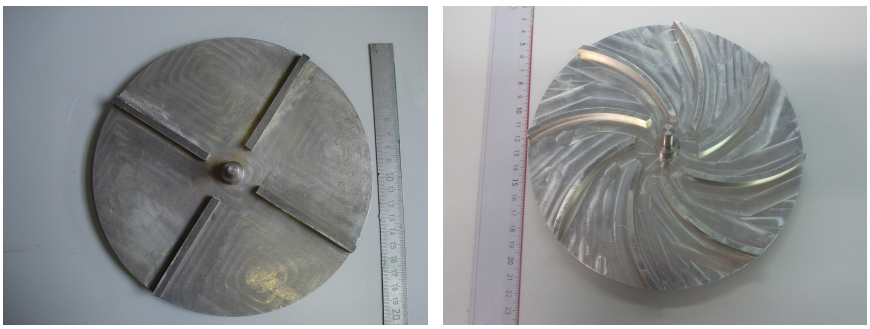
Es wurden die in Abbildung F.10 abgebildeten Scheiben (II, III, VI und VII) getestet. Ziel war es, die Scheibenart und zugehörige Drehzahl zu messen, mit der ein Mörtelauftrag mit dieser Methode an Luft möglich war.

Scheibe VI (Abbildung F.10(c)) zeigte, dass bei Umdrehungen von 2340 U/Min bis 14160 U/Min ein Mörtel der Rezeptur H (siehe Abschnitt 5.5) nicht haften blieb (siehe Abbildung F.11(a)).

Ein Mörtel der Rezeptur H blieb mit der **Scheibe II** (Abbildung F.10(a)) als beförderndes Mittel haften. Es reichten für das Haftenbleiben des Mörtels Umdrehungen von 3720 pro Minute (Druckluftzufuhr von weniger als 1 bar, siehe Abbildung F.11(a)).

Bei Verwendung der **Scheibe III** (Abbildung F.10(b)) blieb ein Mörtel der modifizierten Rezeptur H (höherer w/z-Wert als bei den vorherigen Rezepturen, im weiteren Verlauf mehr Sand hinzugefügt, da der Mörtel zu flüssig war) zumindest haften. Jedoch brauchte die Scheibe III eine höhere Umdrehungszahl, als bei Scheibe II: Es waren 9720 U/min notwendig (bei einer Druckluftzufuhr von 1,5 bar). Mit der gleichen Umdrehungszahl, wie bei Scheibe II verwendet (3720 U/min), zeigte sich kein Haftenbleiben des Mörtels an der Betonoberfläche (siehe Abbildung F.11(b)).

Die **Scheibe VII** zeigte bei Anwendung einer modifizierten Rezeptur H (wie bei Scheibe III - Endzustand, plus weitere Sandzugabe), dass der Mörtel weder bei 3720 U/min noch bei 14400 U/min (Druckluftzufuhr 1,5 *bar*) haften blieb (siehe Abbildung F.11(c)). Die Abbildung F.11



(a) Scheibe II (b) Scheibe III

(c) Scheibe VI (d) Scheibe VII

Abbildung F.10.: Die Scheiben II, III, VI und VII. Sie werden für das Spritzen über Wasser mit Drehzahlmessung getestet.



(a) Ergebnis des Spritzversuchs über Wasser mit Scheibe II (b) Ergebnis des Spritzversuchs über Wasser mit Scheibe III (c) Ergebnis des Spritzversuchs über Wasser mit Scheibe VII

Abbildung F.11.: Scheiben II, III, VII - Versuch über Wasser mit begleitender Drehzahlmessung

zeigt Ergebnisse der Applikation über Wasser mit den Scheiben II, III und VII (siehe Abbildung F.10).

Für ein Mörtelauftrag (an Luft) mit dem Versuchsaufbau aus Abschnitt 5.6.2.2 sind mindestens 62 Umdrehungen pro Sekunde bzw. 3720 Umdrehungen pro Minute notwendig. Mit den Scheiben II und III könnte ein Mörtelauftrag flächig erfolgen, indem man am Bohrständer in Höhe und Position während des Applikationsvorganges variiert. Der Mörtel blieb bei Verwendung von Scheibe II (siehe Abbildung F.10(a)) besser haften als mit der Scheibe III (siehe Abbildung F.10(b)). Der Versuch zeigte, dass glatte Scheiben oder mit eingefrästen Furchen für einen Mörtelauftrag mit der oben genannten Apparatur nicht funktionierten.

Lebenslauf

Name	Nguyen-Sauerbaum, geb. Nguyen
Vorname	Lina Phan Anh
Staatsangehörigkeit	deutsch
Geburtsdatum	24.10.1984
Geburtsort, -land	Lüneburg, Deutschland

08.1991 - 06.1995	Kath. Grundschule St. Ursula Schule in Lüneburg
08.1995 - 07.1997	Orientierungsstufe Stadtmitte in Lüneburg
08.1997 - 06.2004	Gymnasium Wilhelm-Raabe-Schule in Lüneburg
10.2004 - 09.2010	Studium an der Technischen Universität in Hamburg-Harburg Abschluss: Diplom-Ingenieur
10.2008 - 02.2009	Auslandssemester an der Leopold-Franzens-Universität (LFU) in Innsbruck, Österreich
10.2010 - 09.2016	Technische Universität Hamburg-Harburg Institut für Baustoffe, Bauphysik und Bauchemie Wissenschaftliche Mitarbeiterin
10.2016 - heute	Ramboll IMS Ingenieurgesellschaft mbH Transport & Maritime Strukturen Projektingenieurin