

Adhäsion von UHPC an Stahl und Glas

**Ein Beitrag zu Adhäsion und Haftfestigkeit
von Hochleistungs- und Ultra-Hochleistungs-Feinkornbeton
an Stahl und Glas unterschiedlicher Rauheit**

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der technischen Wissenschaften

an der

Fakultät für Bauingenieurwissenschaften,

Technische Universität Graz

Juni 2011

Dipl.-Ing. Joachim Juhart

Begutachter:

Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Lutz Sparowitz, TU Graz

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Schmidt, Universität Kassel

Danksagung

Allen danke ich herzlich, die es mit ermöglicht haben, diese Dissertation zu verfassen:

meinem Betreuer, Förderer und „Doktorvater“, em.Univ.-Prof. Dr.techn. DI Lutz Sparowitz am Institut für Betonbau der TU Graz, für seine Anregungen, seine Offenheit für Menschen und Ideen und uneigennützig Unterstützung;

meinem Betreuer und freundschaftlich verbundenen Kollegen Dr.techn. DI Bernhard Freytag, dem Leiter des Labors für konstruktiven Ingenieurbau der TU Graz und Projektleiter des Forschungsprojektes „AdBond UHPC“, in dessen Rahmen diese Arbeit entstanden ist, dafür, dass er die Thematik aufgeworfen hat; dafür, dass er mit kreativen Ideen, genialen Einfällen, vollem Einsatz und kritischem Geist diese Arbeit gefördert hat;

meinem Betreuer und Professor an der Fachhochschule Kärnten, FH-Prof. Dr. Erwin Baumgartner, für seine Unterstützung meines wissenschaftlichen Zugangs, seine freundschaftliche Verbundenheit und den Freiraum, ohne den diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Auch dem Studienbereichsleiter FH-Prof. DI Walter Schneider sei für seine Unterstützung der wissenschaftlichen Aufbauarbeit des Baulabors an der FH Kärnten und den Freiraum, den er mir gewährt hat, gedankt.

Allen Mitarbeitern, Kollegen und Freunden an der Fachhochschule Kärnten, speziell meinem Labormitarbeiter Peter Druml, und auch den Kollegen am Labor für konstruktiven Ingenieurbau der TU Graz, DI Josef Linder, DI Gerhard Santner, DI Günter Heinzle und den Labormitarbeitern, sei für Ihren Einsatz und ihre Unterstützung gedankt.

Herrn Ao.Univ.-Prof. Dr. Josef Tritthart, Professor für Bauchemie am Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie der TU Graz, sei für die anregenden Fachgespräche gedankt. Auch den am Projekt „AdBond UHPC“ beteiligten Instituten (Zentrum für Elektronenmikroskopie der TU Graz, Dr. P. Pölt, Dr. A. Reichmann, Dr. A. Zankel; Institut für Physik der Montanuni Leoben, Dr. G. Hlawacek, DI F. Schmied) ein Danke.

Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Schmidt, dem Leiter des Fachgebietes Werkstoffe des Bauwesens der Universität Kassel, danke ich für die Übernahme der zweiten Begutachtung und für seine Unterstützung der Forschungsarbeit während des Kurzaufenthaltes an seinem Institut.

Herrn DI Robert Liskounig, meiner Schwester Mag. Sabine Juhart und Hr. DI Jörg Störzel ein Danke für die Übernahme des Lektorates.

Meinen Eltern sei gedankt, speziell für die Zeit, in der sie mich während des Schreibens an der Arbeit versorgt und entlastet haben, und meinem geistigen Förderer, Architekt DI F. J. Brunner, für den Ansporn, den er gegeben hat.

Last but not least danke ich meiner Lebensgefährtin DI Kathrin Sander, die in der Zeit unserer „Mehrfach-Belastung“ – wie es so unschön heißt, wenn zwei kleine Kinder und

Beruf und Dissertation unter einen Hut zu bringen sind – für ihren wirklich unermüdlichen Einsatz, ihre Diskussionsbeiträge und Hilfe.

Villach, im Mai 2011

Joachim Ernst Juhart

Vorwort

Bei der Abfassung der vorliegenden Dissertation wurde die Richtlinie des Rektorats der TU Graz zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis und insbesondere die darin gegebenen „Empfehlungen zum korrekten Zitieren“ eingehalten, vgl. [TU Graz 2011]. Die Literaturquellen werden durch Nennung des Nachnamens des Autors/der Autorin und des Erscheinungsjahres, in eckiger Klammer gesetzt, direkt im Fließtext angegeben. Um der Lesbarkeit willen wird bei dieser Quellenangabe im Fließtext immer nur der Erstautor bzw. erste Herausgeber genannt, die Mitautoren finden sich in den vollständigen bibliographischen Informationen im Literaturverzeichnis.

An manchen Stellen werden zwei oder drei zusammengehörige Abbildungen nebeneinander gesetzt und mit einer gemeinsamen Bildunterschrift bezeichnet. Dabei wird immer die linke Abbildung mit a), die rechts daneben liegende mit b) und gegebenenfalls die ganz rechts liegende mit c) bezeichnet.

In dieser Arbeit werden unterschiedliche feinkörnige Betone bzw. Mörtel verwendet, die sich in Ihrer Festigkeit geringfügig unterscheiden und in die Klassen Hochfester und Ultrahochfester Beton fallen. Die verwendeten Betone werden zusammenfassend mit UHPC (von engl. ultra high performance concrete, also „Ultra-Hochleistungsbeton“) bezeichnet.

Kurzfassung

Die Haftfähigkeit von Ultra-Hochleistungs-Beton (UHPC von engl. ultra high performance concrete) an anderen Konstruktionswerkstoffen wie Stahl und Glas ist sehr groß und sorgt für eine hohe Verbundfestigkeit. Dieses Potential eröffnet neue Möglichkeiten im Ingenieurbau und in der Architektur. Die Haftverbundfestigkeit konnte aber wegen der vielfältigen chemischen, physikalischen und geometrischen Einflüsse und ihres komplexen Zusammenwirkens bisher nicht vorausberechnet werden.

Diese Arbeit geht aus einem interdisziplinären Forschungsprojekt hervor, in dem die Adhäsion von Hochleistungs- und Ultra-Hochleistungs-Feinkornbeton (unter der Bezeichnung UHPC zusammengefasst) an Stahl und Glas mit dem Ziel erforscht wurde, die maßgebenden Einflussfaktoren zu identifizieren und ihr Zusammenwirken zu beschreiben.

In einem umfangreichen Untersuchungsprogramm werden die Oberflächenenergien von frischem und erhärtetem UHPC sowie von Stahl und Glas, Parameter der 3D-Topografie rauer Oberflächen, Materialeigenschaften des UHPC (wie beispielsweise sein Schwindverhalten) und die Haftzug- und Haftschubfestigkeiten von Verbundproben bestimmt. Beobachtungen an Bruchflächen und Berechnungen mit der finite element method liefern Erkenntnisse über Zwangsspannungen und die Rissbildung aufgrund behinderter Schwindverformungen in UHPC-Schichten. Licht- und elektronenmikroskopische Untersuchungen sorgen für die erforderliche Information über den chemischen und strukturellen Aufbau der Grenzflächenzone.

An glatt poliertem Stahl ist die Haftfähigkeit prinzipiell so hoch, dass unter Zugbelastung der UHPC vor der Verbundfuge versagt. Wenn das durch den Verbund behinderte Schwinden zu groß wird, entstehen Risse. Da sich an jedem Riss Zwangsspannungen in der Verbundfuge aufbauen, wird die aufnehmbare Haftzugspannung vermindert.

Folgende Parameter werden in der vorliegenden Arbeit als maßgebend für die Adhäsion erkannt:

- die theoretische spezifische Adhäsion, in einem thermodynamischen Ansatz ermittelt
- die technisch erzielbare spezifische Adhäsion unter Schub- und Zugbeanspruchung
- das Verhältnis der spezifischen Adhäsionsfestigkeiten unter Schub- und Zugbeanspruchung zueinander, bezeichnet als Mikro-Reibbeiwert
- Zwangsspannungen durch behindertes Schwinden (Kriechen und Relaxation sind zu berücksichtigen)
- die Rissabstände und die Zugfestigkeit des UHPC zum Risszeitpunkt.

Mit den genannten Faktoren und einem neu eingeführten Versagenskriterium kann die Haftfestigkeit einer glatten Verbundfuge berechnet werden. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen lässt sich die Wirksamkeit von aufgerauten Oberflächen für den Verbund aus physikalischer und geometrischer Sicht erklären.

Stichworte: Verbund, Hochleistungs- und Ultrahochleistungsbeton, UHPC, Stahl, Glas, spezifische und mechanische Adhäsion, Haftzugfestigkeit, Haftschiebfestigkeit, Oberflächenspannung, Oberflächenenergie, Oberflächenrauheit, Modellparameter

Abstract

The bonding capacity of ultra high performance concrete with construction materials like steel and glass is exceptional and provides high adhesive bond strength. This potential offers new opportunities for the design of composite structures in structural engineering and architecture. Due to the numerous chemical, physical and geometrical influences on the bond and their complex interaction, the adhesive strength has been hard to predict until now.

This thesis arises from a multi-disciplinary research project carried out with the aim to identify the decisive factors in the adhesion of fine grained high performance and ultra high performance concrete – subsequently referred to as UHPC – with steel and glass and to describe their interaction.

In an extensive research program the surface energies of fresh and hardened UHPC as well as steel and glass, 3D-topographical parameters of rough surfaces, the material properties of UHPC (for example its shrinkage behavior), as well as tensile and shear adhesion strengths are investigated. Studying the fracture surfaces and additional finite element calculations leads to findings about enforcements and crack formation due to hindered shrinkage of UHPC-layers. Analyses by light- and electron microscopy provide the necessary information about the chemical and structural constitution of the interface.

The adhesion to smoothly polished steel is principally so strong that tensile loading leads to fracture of UHPC but not of the interface. If the shrinkage that is hindered by the bond becomes too strong, cracks occur. As each crack is an origin for stresses in the interface, the reachable tensile adhesion strength is reduced.

The following parameters were found out in this research to be decisive:

- the theoretical value of specific adhesion, determined by a thermo-dynamical approach
- the technical specific adhesion under shear- and tensile loading
- the ratio of specific shear- to tensile- adhesion, referred to as micro-friction coefficient
- enforcements (restraint stresses) in the interface due to restrained shrinkage (creep and relaxation have to be considered)
- the crack spacing and the tensile strength of UHPC at the critical time of cracking.

With these parameters and a newly introduced failure criterion, the bond strength of a smooth joint of UHPC and steel or glass can be calculated. Based on these findings the effectiveness of rough surfaces for the bond can be explained from a physical and geometrical point of view.

key words: bond, UHPC, steel, glass, specific and mechanical adhesion, tensile bond strength, shear bond strength, surface tension, surface energy, surface roughness

Inhalt

Danksagung	III
Vorwort	IV
Kurzfassung	V
Abstract	VII
Inhalt	IX
Abkürzungsverzeichnis	XV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Problemstellung und Zielsetzung	2
1.3 Inhalt und Abgrenzung der Untersuchungen	3
1.4 Aufbau der Arbeit	5
2 Theoretische Grundlagen und Stand des Wissens	6
2.1 Haftphänomene und Haftmechanismen	6
2.2 Adhäsion	9
2.3 Intermolekulare Wechselwirkungen	16
2.4 Benetzung und thermodynamische Adhäsionstheorie	18
2.4.1 Benetzung glatter und rauher Oberflächen	18
2.4.2 Berechnung der spezifischen Adhäsionsfestigkeit mit der thermodynamischen Adhäsionstheorie	20
2.5 Oberflächentopografie bzw. Oberflächenrauheit	22
2.5.1 Messung der Oberflächentopografie	22
2.5.2 Oberflächenkenngrößen	24
2.6 Haftverbund im Hinblick auf Beton bzw. UHPC	27
2.6.1 Die Rolle der Haftung im Baustoff Beton (ITZ)	27
2.6.2 Verbund von Beton bzw. UHPC mit Klebern	31
2.6.3 Beton-Beton Verbund, zementgebundene Beschichtungen	32
2.6.4 Haftung von Stahl und Beton	37
2.6.5 Haftung von Beton und Glas	38
2.7 Schwinden, Zwangsspannungen und Rissbildung	38
	IX

2.7.1	Allgemeines zum Schwinden von Beton und UHPC	38
2.7.2	Autogene Verformungen	40
2.7.3	Zwangsspannungen und behinderte Verformungen von UHPC	42
2.7.4	Rissmuster	45
3	Hypothesen	48
3.1	Hypothesen zur Adhäsion von UHPC	48
3.2	Annahmen für ein Haftmodell	49
4	Materialparameter der Verbundpartner	52
4.1	UHPC als Adhäsiv	52
4.1.1	Allgemeines über UHPC	52
4.1.2	Einordnung der untersuchten Betone und Voruntersuchungen	53
4.1.3	Voruntersuchungen zum UHPC EM	55
4.1.4	Mischungszusammensetzung und Herstellung	56
4.1.5	Frisch- und Festbetoneigenschaften	59
4.1.6	Verformungsverhalten während der Erhärtung	69
4.1.7	Frischbetonhaftung und Kohäsion des frischen UHPC	78
4.1.8	Benetzung, Oberflächenspannung und Oberflächenenergie	79
4.2	Stahl und Glas als Adhärenten	85
4.2.1	Oberflächenbehandlung von Glas- und Stahlproben	85
4.2.2	Bestimmung von topografischen Oberflächenkenngrößen	90
4.2.3	Oberflächenenergie	98
5	Makroebene: Untersuchungen des Haftverbundes	102
5.1	Haftzugversuche	102
5.1.1	Probekörperherstellung und Versuchsanordnung	104
5.1.2	Ergebnisse der einzelnen Haftzugversuchsserien	111
5.2	Phänomen der Ablösung nach austrocknender Lagerung	130
5.2.1	Beobachtungen und begleitende Versuche zur Ablösung bei den verschiedenen Werkstoffkombinationen	131
5.2.2	Verformungsmessungen an austrocknenden UHPC-Schichten	135
5.2.3	Schlussfolgerungen zum Phänomen der Ablösung nach einseitiger, oberflächlicher Austrocknung	137

5.3	Bruchbild- und Rissbildanalyse der Haftzugversuche	138
5.3.1	Methode	138
5.3.2	Bruchformen und Zonierung	140
5.3.3	Glatte Oberflächen, Proben mit Verdunstungsschutz (MVS)	143
5.3.4	Raue Oberflächen, Proben mit Verdunstungsschutz (MVS)	146
5.3.5	Glatte Oberflächen, Proben ohne Verdunstungsschutz (OVS)	149
5.3.6	Raue Oberflächen, Proben ohne Verdunstungsschutz (OVS)	157
5.3.7	Vergleich der ursprünglich und nachträglich abgelösten Bruchflächen	159
5.3.8	Bruch- und Rissbildanalyse der Vorserien	161
5.3.9	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen der Bruch- und Rissbildanalyse	163
5.4	Analyse der Eigenspannungen im Probekörper und in Rissfeldern	166
5.4.1	Berechnungsgrundlagen	166
5.4.2	Eigenspannungen in UHPC-Schichten mit beidseitig behindertem Schwinden	169
5.4.3	Spannungen in einseitig schwindbehinderten UHPC-Schichten	176
5.5	Haftschubversuche	178
5.5.1	Probekörperherstellung und Versuchsanordnung	178
5.5.2	Ergebnisse	180
5.6	Bruchbildanalyse der Haftschubversuche	181
5.6.1	Bruchbilder der Proben mit glatter Werkstoffoberfläche	182
5.6.2	Bruchbilder der Proben mit rauer Werkstoffoberfläche	186
5.7	Vergleich von Haftzug- und Haftschub	187
6	Mikroebene: Untersuchungen der Grenzflächenschicht	189
6.1	Methoden	189
6.1.1	Lichtmikroskopische Untersuchungen	189
6.1.2	Elektronenmikroskopische Untersuchungen	190
6.1.3	Sondertechniken	191
6.2	Struktur- und Riss-Entwicklung in der Grenzfläche	192
6.2.1	Probekörperherstellung	192
6.2.2	Versuchsdurchführung	193

6.2.3	Ergebnisse	193
6.2.4	Schlussfolgerungen	197
6.3	Untersuchungen an Bruchflächen der glatten Proben	197
6.3.1	Proben	198
6.3.2	Ergebnisse der Untersuchungen an einzelnen Werkstoffkombinationen im Lichtmikroskop	198
6.3.3	Ergebnisse der Untersuchungen mit dem Elektronenmikroskop und mittels Sondertechniken	205
6.3.4	Schlussfolgerungen	211
6.4	Untersuchungen von Bruchflächen der rauen Proben	212
6.5	Untersuchungen von Verbundproben im Querschnitt	214
6.5.1	Probekörperherstellung	215
6.6	Ergebnisse	217
6.6.1	Schlussfolgerungen	219
6.7	Zusammenfassung der Untersuchungen der Grenzflächenschicht	220
7	Maßgebende Einflussfaktoren auf die Adhäsion und deren Zusammenwirken	222
7.1	Zusammenhänge zwischen untersuchten Größen	222
7.1.1	Korrelationen zwischen Haftzugfestigkeit und Risslänge sowie Zonierung in der Bruchfläche	222
7.1.2	Korrelationen zwischen Haftzugfestigkeit und Kennwerten der rauen Oberflächen	227
7.2	Zwangsspannungen und Rissbildung	230
7.2.1	Entwicklung von Zwangsspannungen und Festigkeit	230
7.2.2	Dehnungsanteile, Dehnungsbilanz und Spannungen	233
7.2.3	Eingeprägter Spannungszustand in einer UHPC-Schicht und Rissbildung	235
7.2.4	Rissabstände und deren Berechnung	239
7.3	Verhältnis von Haftzug-zu Haftschubfestigkeit - Versagenskriterium der Adhäsion	244
7.3.1	Einführung eines Versagenskriteriums	244
7.4	Parameter eines Adhäsionsmodells für glatte Flächen	246
7.4.1	Modell	246

7.4.2	Schwindmaß	249
7.4.3	Qualität des Schubverbundes zum Risszeitpunkt	249
7.4.4	Zugfestigkeit	250
7.4.5	Beiwert der technisch erzielbaren spezifischen Adhäsion	251
7.4.6	Theoretische spezifische Adhäsion in thermodynamischer Betrachtungsweise	253
7.4.7	Schlussfolgerungen	257
7.5	Anwendung des Versagenskriteriums an rauen Flächen	257
8	Zusammenfassung der Ergebnisse	261
8.1	Benetzung, wirksame Fläche und Grenzflächenschicht	261
8.2	Verformungsverhalten und Zwangsspannungsentwicklung während der Erhärtung des UHPC	263
8.3	Rissbildung und Rissmuster	264
8.4	Bruchflächen und deren Mikro-Struktur	266
8.5	Prüfung der Haftzug- und Haftschubfestigkeit	268
8.6	Beständigkeit der Verbindung und Haftungsentwicklung	269
8.7	Die Rolle von physikalisch gebundenem Wasser in der Grenzfläche und maßgebender Haftmechanismus	270
8.8	Adhäsion an glatten Flächen: Mathematische Beschreibung und Modellparameter	271
8.9	Adhäsion an rauen Flächen: generelle Betrachtungen	273
9	Weiterführende Fragen und Forschungsbedarf	276
9.1	Allgemeines	276
9.2	Mögliche Erweiterung des Modells und seiner Parameter	276
9.2.1	Modellparameter für glatte Flächen	276
9.2.2	Modell für raue Flächen	277
9.2.3	Einfluss der Mischungszusammensetzung	278
9.3	UHPC-UHPC- und UHPC-Normalbeton-Verbund	279
9.4	Beständigkeit des Verbundes	280
9.5	Potentielle Anwendungen	280
	Literaturverzeichnis	282

A	Anhang (elektronisch auf CD-ROM)	294
A.1	Materialparameter	294
A.1.1	Technische Daten der UHPC Mischungsbestandteile	294
A.1.2	Daten der Oberflächentopografie von Stahl und Glas	294
A.1.3	Kontaktwinkelmessungen, Bestimmung der Oberflächenenergie	294
A.2	Makroebene: Untersuchungen des Haftverbundes	294
A.2.1	Haftzugprüfungen	294
A.2.2	FEM-Berechnungen - Analyse der Eigenspannungen etc.	294
A.2.3	Haftschubprüfungen	294
A.2.4	Protokoll der Aufschüsselungs-Messungen und Begleituntersuchungen	295
A.2.5	Dokumentation der Bruch- und Rissbilder	295
A.3	Mikroebene: Licht- und Elektronenmikroskopie	295
A.3.1	Rissentwicklung in der Grenzfläche	295
A.3.2	Bruchflächen-Untersuchungen	295
A.3.3	Elektronenmikroskopie von Verbundproben im Querprofil	295
A.4	Zusammenwirken der Einflussfaktoren	295
A.4.1	Korrelationen zwischen den untersuchten Größen	295
A.4.2	Beispielrechnung zu den Rissabständen	295

Abkürzungsverzeichnis

AFM	Ausbreitfließmaß
CFK	CarbonFaserKunststoff
CH	Calciumhydroxid (in kristalliner Form Portlandit)
CSH	Calciumsilikathydrat-Phasen
d	day, Tag
DM	D-Mischung
EM	E-Mischung
EDX	Energy Dispersive X-ray Analysis
ESEM	Environmental Scanning Electron Microscope
ESG	Einscheibensicherheitsglas
FE(M)	Finite Element (Method)
FWF	Fonds wissenschaftlicher Forschung
G	Glas
GFK	GlasFaserKunststoff
h	hours, Stunden
IR	Infrarot-Raman (Spektroskopie)
MA	mechanische Adhäsion
MVS	mit Verdunstungsschutz
MS	Mikrosilka
OFE	Oberflächenenergie
OFS	Oberflächenspannung
OVS	ohne Verdunstungsschutz
REM	Raster Elektronen Mikroskop
RF	relative Feuchte
R0	Rauheit 0, glatte Oberfläche
RX	Rauheit X, raue Oberfläche
S	Stahl
SEM	Scanning Electron Microscope
UHPC	Ultra High Performance Concrete, Ultra-Hochleistungsbeton
UHPRFC	Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete, Ultra-Hochleistungs-Faserbeton
VSG	Verbundsicherheitsglas
W/B-Wert	Wasser/Bindemittelwert
W/Z-Wert	Wasser/Zementwert

1 Einleitung

1.1 Motivation

Ultra-Hochleistungsbeton, im Folgenden als UHPC (ultra high performance concrete) bezeichnet, hat neben seiner hohen Festigkeit und Dauerhaftigkeit eine weitere hervorragende Eigenschaft: es lässt sich ein guter Verbund mit weiteren Konstruktionswerkstoffen herstellen. Die freie Formbarkeit im Verarbeitungszustand, der hohe Gehalt an großteils hydraulisch wirksamen Feinanteilen, der sehr niedrige W/B-Wert und die Wirkung der zugegebenen Fließmittel erweisen sich als vorteilhaft zur Herstellung eines guten Haftverbundes mit weiteren Konstruktionswerkstoffen. Vgl. [Freitag 2004a].

Beispielsweise lassen sich Verbundlängen von Bewehrungsstahl in faserverstärktem UHPC (UHPFRC) gegenüber Normalbeton auf ein Zehntel reduzieren, vgl. [Jungwirth 2005]. Auch flächenhafte Verbindungen mit einer feinrauen Oberfläche werden möglich. So konnte die Idee der Glas-Beton Verbundbauweise bereits realisiert werden, vgl. [Freitag 2004b].

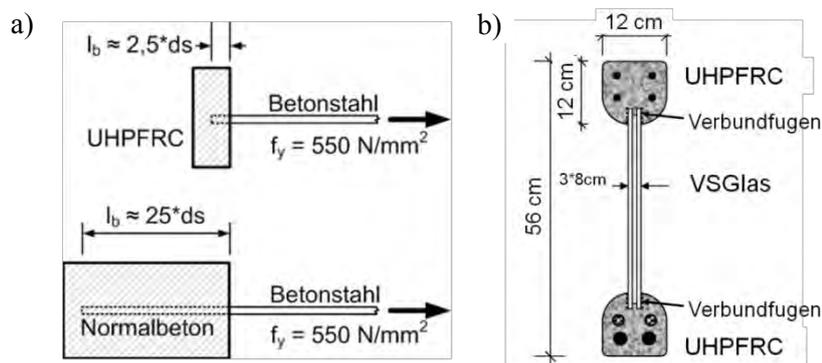


Abbildung 1.1: UHPC im Verbund vgl. a) [Jungwirth 2005], b) [Freitag 2004b]

Obwohl auch bei Normalbetonen in vielen Fällen eine gute Haftung an Werkstoffoberflächen beobachtet werden kann, wird der Haftverbund bzw. der Traganteil der Adhäsion in aktuellen Normen des Betonbaus zum Beispiel für die Bemessung von Schubfugen (Verbund Alt-Neubeton) als sehr gering eingeschätzt bzw. unterschätzt und für eine Zugbelastung überhaupt vernachlässigt. Vgl. [Zilch 2009], [Müller 2009], [Jähning 2005].

Die Berechnung der Adhäsionsfestigkeit von Beton-Verbindungen, speziell von UHPC mit weiteren Konstruktionswerkstoffen, ist noch nicht möglich. Auch die experimentelle Bestimmung der Adhäsionsfestigkeit gelingt nur für spezielle Bedingungen und spezielle Verbindungen, ohne die Ergebnisse auf den allgemeinen Fall übertragen zu können. Es fehlt offensichtlich noch ausreichendes Wissen, die maßgeblichen Einflussfaktoren zu identifizieren und ihr komplexes Zusammenwirken zu verstehen.

Mit der Motivation, die Adhäsion von UHPC mit weiteren Konstruktionswerkstoffen zu ergründen und in der Folge die Haftverbundfestigkeit planmäßig nutzbar zu machen, entstand die Idee, die vorliegende Forschungsarbeit durchzuführen.

1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Die vielfältigen Einflussgrößen auf die Adhäsion von UHPC an weiteren Konstruktionswerkstoffen sind in Abbildung 1.2 genannt.

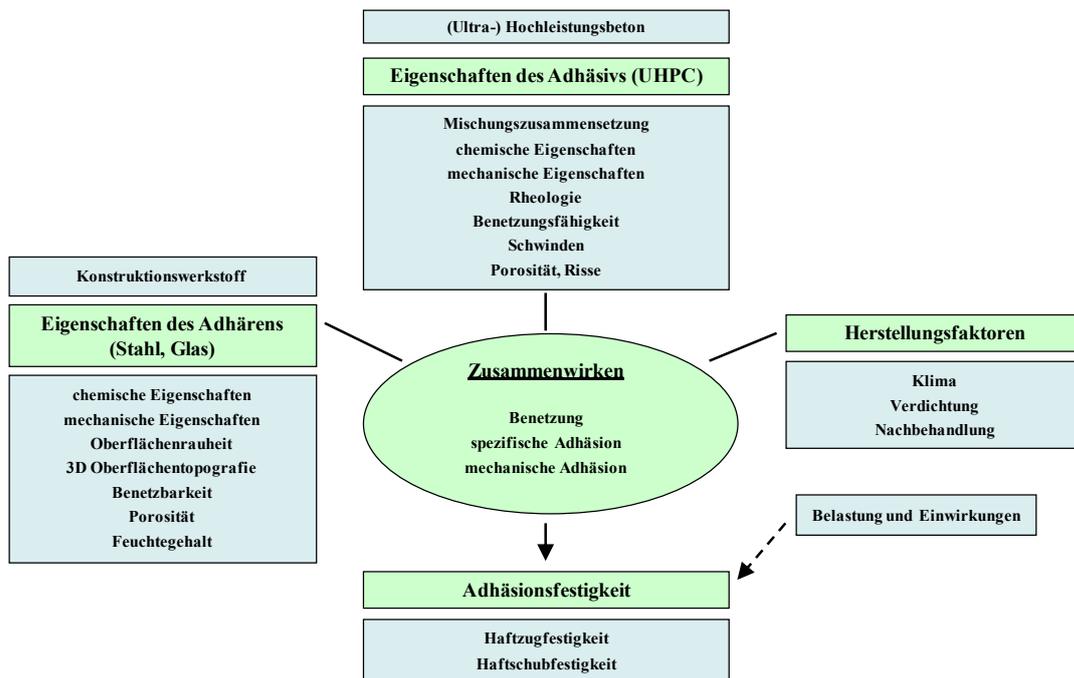


Abbildung 1.2: Vielfalt der Einflussfaktoren auf die Adhäsion von UHPC. Definitionen siehe Kapitel 1.3 bzw. Kapitel 2.2

Die Adhäsion wird in der vorliegenden Arbeit abweichend von der bisher im Bauingenieurwesen üblichen rein empirischen Vorgangsweise in einem multidisziplinären Zugang systematisch untersucht. Zur Veranschaulichung des Untersuchungsgebietes dient Abbildung 1.3.

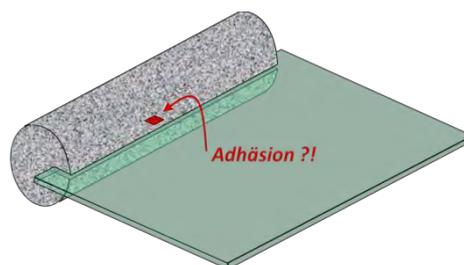


Abbildung 1.3: Beispiel einer Verbindung mit dem „Untersuchungsgebiet“ der Arbeit

Fragestellungen der Arbeit:

1. Wie wirkt die Adhäsion zwischen UHPC und Stahl bzw. Glas?
2. Welche Einflussfaktoren sind für die Adhäsionsfestigkeit maßgebend und wie wirken sie zusammen?
3. Mit welchem theoretischen Ansatz lässt sich die Adhäsionsfestigkeit beschreiben?

Ziele der Arbeit:

1. Die maßgeblichen chemischen, physikalischen und geometrischen Einflussgrößen auf die Adhäsion von UHPC mit Stahl und Glas identifizieren und die Größenordnung dieser Parameter angeben
2. Geeignete Methoden finden, um die Parameter zu bestimmen
3. Das Zusammenwirken der Parameter so beschreiben, dass die Haftfestigkeit vorhergesagt werden kann, also die Basis für ein Berechnungsmodell schaffen

Die Arbeit wurde im Rahmen und als Ergebnis des Forschungsprojektes „AdBond-UHPC“ (L412-N14) erstellt, das vom österreichischen Wissenschaftsfonds („FWF“) gefördert und in einer Kooperation der Technischen Universität Graz mit der Fachhochschule Kärnten durchgeführt wurde, vgl. [Freitag 2011].

1.3 Inhalt und Abgrenzung der Untersuchungen

Um die Adhäsionsphänomene vergleichend studieren zu können, wird der Haftverbund von UHPC mit zwei chemisch verschiedenen Werkstoffen (Stahl und Glas) mit jeweils unterschiedlich rauen Oberflächen studiert. Die untersuchten Parameter umfassen Materialeigenschaften des Adhäsivs (UHPC) und des Adhärens (Stahl und Glas als Untergrund), Rauheitskenngrößen der Oberflächen (Oberflächentopografie) sowie Eigenschaften, die den Verbund der Materialien betreffen.

Da das Schwinden, vor allem wenn es durch den Verbund in der Grenzfläche behindert wird, die Adhäsion stark beeinflussen kann, werden Messungen der Verformung im Zuge der Erhärtung durchgeführt und Beobachtungen zur Rissbildung angeschlossen. Außerdem wird untersucht, wie die Entwicklung des Haftverbundes im Zuge der Betonerhärtung mit dem Schwinden wechselwirkt. Das Untersuchungsprogramm ist in Tabelle 1.1 dargestellt.

Eine weitere Fragestellung ist, welche Oberflächenrauheit für einen bestmöglichen Verbund zwischen UHPC und Stahl bzw. Glas sorgt. Dabei beschränken sich die Untersuchungen im Wesentlichen auf mit Sandstrahlen hergestellte Oberflächen.

Tabelle 1.1: Übersicht der durchgeführten Untersuchungen

		Material- und Oberflächen-Charakterisierung	Verbund-versuche	Mikroebene		
Kapitel		4	5	6		
		Oberflächentopografie und Betoneigenschaften	Benetzung, Oberflächenenergien, Rheologie	Haftzug- und Torsionsschub	Licht- und Elektronenmikroskopie, Sondertechniken	
Adhärenz (1)	Glas, Stahl	Vorversuche zur Herstellung geeigneter Rauheiten	Kontaktwinkelmessungen (Oberflächenenergien R0-RX, Wenzel Quotienten)	Bruchflächen-Analyse	Oberflächen	
		Rauheitsmessungen mit Tastschnittgerät				
		3D-Analyse mittels Fokusvariation am Lichtmikroskop				
Adhäsiv (2)	Frischbeton	Ausbreitfließmaß, Luftgehalt, Dichte (ca. 100 Mischungen)	Kapillarsteigversuche (Oberflächenspannung)			
	Erhärtungsprozess	Schwindmessungen (9 Stk.)			Rissentwicklung	
	Festbeton	Druck- und Biegezugfestigkeit (18 Serien+Vorversuche)	Kontaktwinkelmessungen (Oberflächenenergien EM, DM)	Wassergehalt Bruchstücke	Bruch- und Rissmuster-Analyse	
						zentrische Zugfestigkeit (2 Serien)
						E-Modul (1 Serie)
						Torsionsschubfestigkeit (1 Serie)
Wassergehalt (6 Stk.)						
Verbund (3)	UHPC-Glas/UHPC-Stahl	Ausbreitfließmaße auf Stahl und Glas R0-RX (40 Versuche)	Haftzugversuche (204)	Bruchflächen-Analyse, Rissbreitenmessung		
			Torsionsschubversuche (20)		Querschnitte Verbundproben	

(1) glatte Glas-, polierte Stahloberflächen R0 und Rauheiten RX durch Sandstrahlen und Behauen (3xGlas, 4xStahl)
(2) UHPC der Mischung „EM“ mit 2 Konsistenzen und UHPC premix („DM“), Voruntersuchungen (~10 Varianten)
(3) UHPC-Glas und UHPC-Stahl Verbundproben

Als Abgrenzungen der Untersuchungen sind zu nennen: Die Oberflächen werden nach der Vorbehandlung gereinigt. Die Auswirkung von Verschmutzungen bzw. Kontaminationen durch Umwelteinflüsse werden im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht. Folgende Randbedingungen werden konstant gehalten, da ihr Einfluss nicht weiter behandelt wird: Temperatur, Umgebungfeuchte und Verdichtungsenergie. Rauheiten kleiner $0,1 \mu\text{m}$ (mittlerer \emptyset des Mikrosilika-Korns) werden nicht in die Betrachtungen eingeschlossen, da sie geringer sind als der kleinste Bestandteil im UHPC. Stoffe bzw. Schichten, die als Verbundvermittler fungieren, sind nicht Inhalt der Arbeit.

Die Optimierung der Mischungszusammensetzung in Hinblick auf Verbundeigenschaften ist nicht Ziel der Arbeit. Vielmehr soll von einer gegebenen Zusammensetzung des

UHPC ausgegangen und das chemisch-physikalische Zusammenwirken mit dem Untergrund untersucht werden. Daraus kann gegebenenfalls eine optimierte Oberflächenvorbereitung abgeleitet werden. Im ursprünglichen Konzept der Untersuchungen sollte das mit nur einem Typ von UHPC realisiert werden¹. Unter anderem um den Einfluss von unterschiedlichem Schwindverhalten vergleichend testen zu können, wurde ein zweiter UHPC, ein kommerziell erhältlicher UHPC-premix mit anderer Mischungszusammensetzung in die Untersuchungen einbezogen. Außerdem wurden aus demselben Grund zwei unterschiedliche Nachbehandlungsmethoden, die Lagerung mit und ohne Verdunstungsschutz, angewendet.

Poröse Untergründe wie Beton als Untergrund werden nicht betrachtet, sie sollten wie auch Langzeituntersuchungen zur Dauerhaftigkeit der Adhäsion in einer aufbauenden Arbeit behandelt werden.

1.4 Aufbau der Arbeit

Nach einer Beschreibung der theoretischen Grundlagen und des aktuellen Forschungsstandes im Kontext der Fragestellung (Kapitel 2) werden im Kapitel 3 die Hypothesen zur Adhäsion von UHPC und eine Modellvorstellung für die Haftverbundfestigkeit beschrieben. Anschließend werden alle Materialparameter des Adhäsivs und der Adhärenten, die für die Adhäsion maßgeblich erscheinen, untersucht (Kapitel 4). Dazu gehören insbesondere Materialeigenschaften des UHPC und Oberflächeneigenschaften der Verbundpartner. Die Kapitel 5 und 6 widmen sich der Beschreibung der ausgeführten Versuche auf Makro- und Mikroebene.

Im Kapitel 7 werden aufbauend auf die in den ersten Teilen der Arbeit dargestellten Untersuchungen maßgebende Einflussfaktoren auf die Adhäsion und deren Zusammenwirken diskutiert. Es wird gezeigt, wie mittels der Parameter und eines neu eingeführten Versagenskriteriums die Haftfestigkeit einer glatten Verbundfuge berechnet werden kann. Im Kapitel 8 werden die Ergebnisse zusammengefasst. Im Kapitel 9 werden weiterführende Fragen und Forschungsbedarf formuliert. Der Anhang mit Untersuchungs-Protokollen, Messdaten, Bildern u.a. befindet sich auf einer beigelegten CD-ROM.

¹ Zur Einordnung der verwendeten Betone siehe auch Kapitel 4.1.2.

2 Theoretische Grundlagen und Stand des Wissens

Im folgenden Kapitel werden theoretische Grundlagen und der Forschungsstand zur Adhäsion im Hinblick auf die untersuchten Materialien beschrieben. Theoretische Grundlagen, der Literatur entnommene Daten sowie eigene Untersuchungen zu den Materialeigenschaften von UHPC sowie Stahl und Glas sind im Kapitel 4 ab Seite 52 abgehandelt.

2.1 Haftphänomene und Haftmechanismen

Wieso haftet ein Klebstoff bzw. Kleber eigentlich? Die Antwort ist so vielfältig, dass sie ganze Bücher füllt. Als Bindungskräfte werden die *Adhäsions- oder Haftkräfte* angegeben, deren Natur auf den verschiedenen Arten der chemischen Bindungen (Valenzbindungen) aber vor allem auf zwischenmolekularen Kräften (intermolekularen Wechselwirkungen, Nebenvalenzbindungen) beruht. Vgl. [Habenicht 1997].

Eine Übersicht über beobachtbare Haftmechanismen, wenn von Verbindungen durch Formschluss abgesehen wird, gibt Tabelle 2.1, zusammengestellt nach [Burbaum 2009] bzw. [Rumpf 1958], [Rumpf 1974] und [Mollet 2000].

Tabelle 2.1: Übersicht über beobachtbare Haftmechanismen und Bindungsarten

Haftung über...	Erscheinungsform	Haftkraft/ Bindungsart	Relevanz für UHPC-Stahl/Glas
frei bewegliche Flüssigkeitsbrücke (Grenzflächenkräfte)	Flüssigkeitsbrücken zwischen Partikeln, in Zwischenräumen und Kapillarporen (Kapillarkräfte > Randkräfte)	Kapillarkräfte (kapillarer Unterdruck, Gesetz von <i>Laplace</i>) Randkräfte (Zug der Oberflächenspannung an Berührungslinie fest-flüssig)	bei Frischbeton und jungem Beton hoch, bei Festbeton wegen geringem Poren- und Wasseranteil gering
nicht frei bewegliche Flüssigkeits- bzw. Bindemittelbrücke (vorwiegend intermolekulare Anziehung)	zähflüssige, erhärtende Bindemittel und Klebstoffe (in Tropfenform) Adsorptionsschichten genügender Dicke (aber < 3nm)	geringe Benetzung bzw. Grenzflächenkräfte, dafür intermolekulare Anziehung wenige Molekül-Schichten von Wasser, intermolekulare Anziehung	gering im frischen, kaum im erhärteten Zustand (evtl adsorbierte Wasserschichten < 3nm)
Festkörperbrücke oder direkter Festkörperkontakt (diverse chem. Bindungen und intermolekulare Anziehung)	Sinterung, Schmelzhaftung	Diffusion, Sinterbrücken	keine
	Kristallisation	Ausfallen aus Lösung, Kristallisation bei Austrocknung	gering, evtl. Portlandkristallite
	erhärtete Bindemittel, Klebstoffe, Festkörper	Hauptvalenzbindungen, intermolekulare Kräfte (van der Waals-Kräfte bei Abstand 0,3 - max. 10 nm) elektrostatische Kräfte (bei zB glatten Kugeln $\varnothing < 100\mu\text{m}$, gegenüber van der Waals' vernachlässigbar)	Hauptvalenzen: gering, intermolekulare Kräfte: hoch gering (i.d. Regel keine Aufladung)

Die Einschätzung der Verfassers für die Relevanz der verschiedenen Haftmechanismen für den Verbund von UHPC mit Stahl bzw. Glas ist in der letzten Spalte der Tabelle 2.1

angeführt. Wasser als Flüssigkeitsbrücke zwischen Partikeln und in Poren kann relativ hohe Haftkräfte und Festigkeiten verursachen [Krenkler 1980]². Die Festigkeit geht allerdings bei vollständiger Trocknung verloren, wie z.B. bekannt vom Baustoff Lehm³. Zur Rolle des Wassers im Baustoff Beton siehe Kapitel 2.6.1 und 2.7.

Die Adhäsionskraft aufgrund einer kapillaren Flüssigkeitsbrücke aus Wasser zwischen zwei polierten Stahloberflächen zweier Stahlzylinder (Krümmungsradius $r_1 = 0,031$ m) in sehr engem Kontakt bestimmte *Burbaum* experimentell und rechnerisch. Maximal wurde eine Zugspannung von $0,005$ N/mm² (5 kN/m²) erreicht, die Schichtdicke des kapillaren Spaltes betrug $2 \times 14,9E-6$ m ($=2 \times$ Krümmungsradius r_2 des Flüssigkeitsmeniskus). Rechnerisch ergibt sich mit dem Ansatz der Laplace Gleichung (vgl. z.B. [Butt 2006]) für den kapillaren Unterdruck und bei Vernachlässigung der Randkraft aus der Oberflächenspannung an der Berührungslinie des Wassers am Umfang des Zylinders etwa der gleiche Wert. Vgl. [Burbaum 2009], p.21 und Abbildung 2.1.

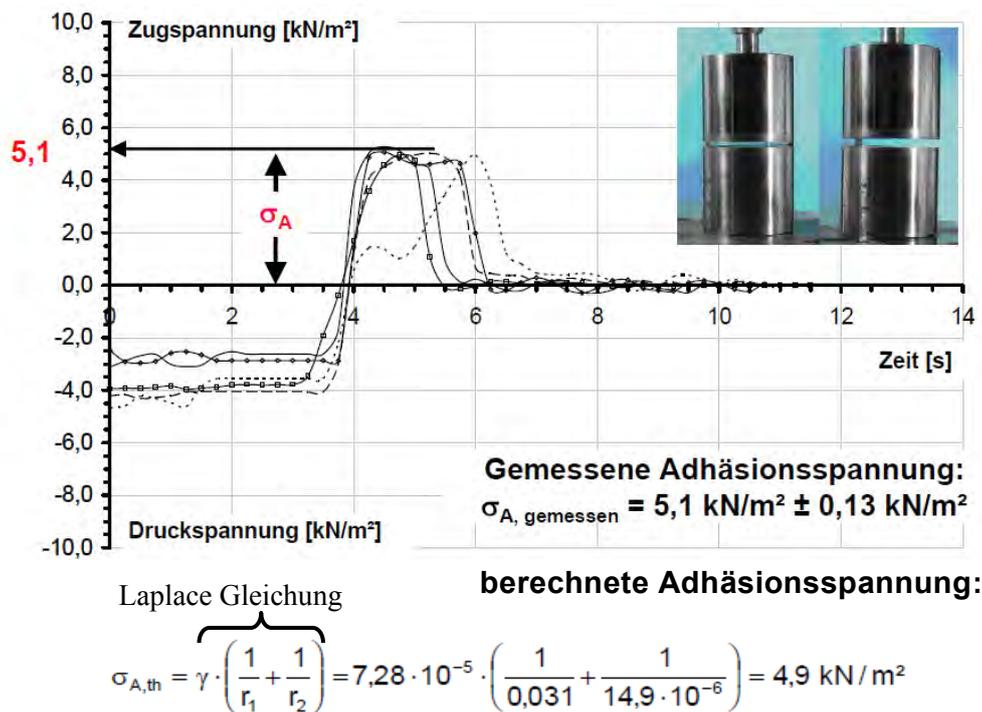


Abbildung 2.1: Ergebnisse der Versuche mit Adhäsionstestzylinder aus [Burbaum 2009]

² In *Krenkler* wird L'Hermite zitiert, der an gepressten Formlingen aus windgesichtetem Basaltpulver (Partikelgröße 1-10 μm) mit 8% Wasser Festigkeiten bis zu 45 N/mm² erreicht. Das wird auf die Wirkung des „Wassers als Bindemittel“, das ist die Wirkung von Flüssigkeitsbrücken zwischen den Partikeln [Anm. d. Verfassers], zurückgeführt. Vgl. [Krenkler 1980].

³ In [Schroeder 2010] wird für die "trockene Zugfestigkeit" von fettem Lehm ein Wert von $>0,9$ N/mm² angegeben.

Dass sich überhaupt ein kontinuierlicher spaltförmiger Zwischenraum mit einer kapillaren Wasserbrücke als Haftmechanismus beim UHPC-Glas/Stahl Verbund im Zuge der UHPC-Erhärtung ausbildet, ist unrealistisch, wie aus folgender Überlegung hervorgeht. Das Wasser wird im UHPC vollständig zur Hydratation verbraucht und es bleiben nur wenige Kapillarporen sowie Gel-Poren bestehen. Wegen des geringen Kapillarporen- und damit Wasseranteils im erhärteten Ultra-Hochleistungs-Beton (~2-8 Vol.-%, vgl. [Schmidt 2003], [Herold 2006]) wird die mögliche Wirkung von Kapillarkräften in flüssigkeitsgefüllten Poren (Grenzflächenkräfte) als gering eingeschätzt. Adsorptionsschichten mit wenigen Molekül-Schichten von Wasser (Wasser als nicht frei bewegliche Flüssigkeitsbrücke) könnten aufgrund intermolekularer Anziehung eine größere Rolle spielen.

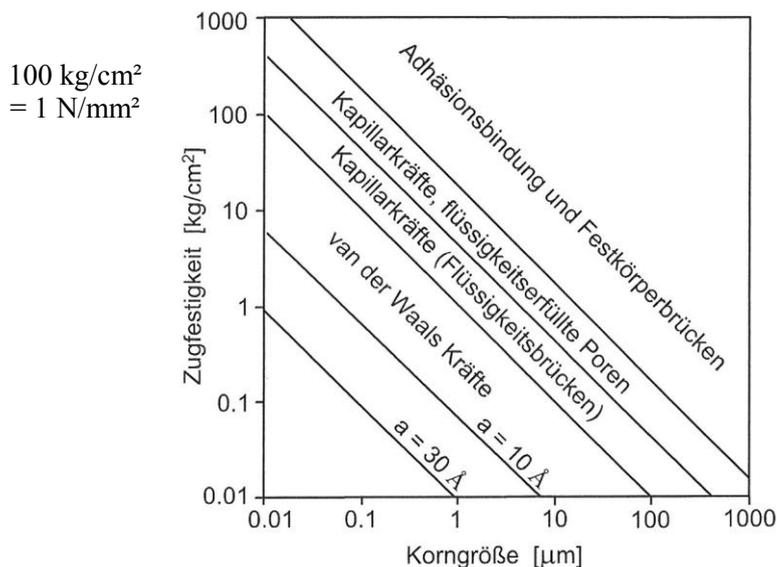


Abbildung 2.2: Beiträge zur verschiedenen Bindungsarten kolloidaler Teilchen zur Agglomeratfestigkeit aus [Mollet 2000]

Für kleine Teilchen (kolloidale Teilchen mit $\varnothing < 100 \mu\text{m}$) spielen Haftkräfte eine besondere Rolle. Die Oberflächenkräfte zwischen ihnen sind gegenüber den Volumenkräften nicht mehr zu vernachlässigen und es bilden sich Agglomerate⁴. Die maximal übertragbaren Zugspannungen in Abhängigkeit der Teilchengröße in Agglomeraten sind in Abbildung 7.11 dargestellt. Wie Mollet angibt, gelten nur die Bereiche der van der Waals- und der Kapillarkräfte als gesichert. Die größten Haftkräfte werden bei „Adhäsionsbindung und Festkörperbrücken“, dazu zählen auch erhärtende Bindemittel wie Kalk- und Zementmörtel, erreicht. Die Adhäsionsbindung in Festkörperbrücken zwischen Partikeln umfasst wie-

⁴ Agglomerat (lat.: agglomerare - zusammenballen, anhäufen) bezeichnet in der Technik eine Zusammenballung einzelner Körner.

derum spezifische (vorwiegend intermolekulare van der Waals Kräfte) und mechanische Adhäsionsmechanismen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben werden. Dabei tritt der Einfluss der Partikelgröße in den Hintergrund. Vgl. [Rumpf 1958] und [Rumpf 1974] zitiert in [Mollet 2000].

Für die weiteren Untersuchungen in dieser Arbeit lässt sich aus der Literaturauswertung ableiten, dass der Verbund von erhärtetem UHPC mit Stahl oder Glas als „Festkörperbrücke“ (erhärtetes Bindemittel) einzuordnen ist. Es treten in diesem Fall Adhäsionskräfte in Form von intermolekularen Wechselwirkungen auf, siehe dazu Kapitel 2.3. Wasser als frei bewegliche Flüssigkeitsbrücke ist aus Gründen, die in Kapitel 0 diskutiert werden, mit großer Wahrscheinlichkeit als maßgeblicher Haftmechanismus auszuschließen. Siehe dazu auch die Ergebnisse dieser Arbeit in Kapitel 8.7.

Im Vergleich zur von *Burbaum* wie oben beschreiben gemessenen Adhäsionskraft von $0,005 \text{ N/mm}^2$ zwischen Stahlzylindern mit einer kapillaren Flüssigkeitsbrücke aus Wasser wurde in den im Kapitel 5.1.2 gezeigten Untersuchungen eine Haftzugspannung von $2,5 \text{ N/mm}^2$ an Glas-UHPC Proben und 7 N/mm^2 an Stahl-UHPC Proben gemessen. Wäre eine kapillare Wasserbrücke für diese Adhäsionsspannung verantwortlich, dürfte der Schichtabstand nur $0,057 \mu\text{m}$ (57 nm , Glas) bzw. nur 21 nm (Stahl) betragen, wenn man von vollständiger Benetzung ausgeht und wie *Burbaum* [Burbaum 2009] bei der Berechnung vorgeht.

2.2 Adhäsion

„Adhäsion ist der Zustand, in welchem zwei Oberflächen durch Valenzkräfte, durch mechanische Verklammerung oder durch beides zusammengehalten werden“, so definiert die American Society for Testing and Materials die Adhäsion (übersetzt nach [Poggel 2001]). Der Begriff Adhäsion leitet sich aus dem lateinischen Wort *adhaerere*, was anhaften bzw. zurückhängen bedeutet.

„Als *Adhäsion* wird im physikalischen Sinne die Anziehung zwischen den Molekülen zweier verschiedener Stoffe bezeichnet. Im Gegensatz dazu wird als *Kohäsion* die Zusammenhangskraft zwischen gleichartigen Molekülen (oder Atomen) bzw. Stoffen definiert“, vgl. [Hering 2007] zitiert nach [Burbaum 2009].

Die Adhäsion ist gemäß *Bischof* „der Zustand einer sich zwischen zwei in Kontakt tretenden kondensierten Phasen ausbildenden *Grenzflächenschicht*“. Er „resultiert aus einem Komplex sich überlappender mechanischer, physikalischer und chemischer Wirkungen“. Vgl. [Bischof 1983].

Der Begriff Adhäsion wird in der Fachliteratur recht unterschiedlich angewendet. In ihrer Arbeit über „Oberflächenkräfte und ihren Beitrag zur Adhäsion und Haftung in glasfaserverstärkten Thermoplasten“ gibt *Dutschk* eine gute Begrifflichkeit zur Adhäsion, die im Folgenden wiedergegeben wird, vgl. [Dutschk 2000].

Adhäsion, Haftung und Adhäsionsarbeit

Bringt man zwei glatte feste Körper genügend nahe aneinander, beginnen sie sich gegenseitig anzuziehen. Diese Anziehung nimmt mit weiterer Annäherung stark zu und man spricht von *Adhäsion* zwischen den Körpern. Als Ursache wird die Wirkung von Oberflächenkräften angegeben. Gemäß [Dutschk 2000], p.19, „gehören dazu u.a. die molekularen Wechselwirkungskräfte, die zwischen den Festkörperoberflächen sowohl in Form von Tangentialkräften als auch in Form von Normalkräften in Bezug auf die Berührungsflächen auftreten. Die Normalkräfte sind für die Anziehung der Körper [...] verantwortlich.“

Das Wirken der Oberflächenkräfte hängt von der chemischen Natur der Haftpartner und von deren Abstand D ab. Nach der Berührung der Körper treten entgegenwirkende Abstoßungskräfte auf. Zwischen Anziehungs- und Abstoßungskräften stellt sich ein Gleichgewicht ein. Man spricht von *Haftung* der beiden Körper aneinander. Vgl. [Dutschk 2000].

Für die zur Haftung führenden Vorgänge zwischen flüssigen und festen bzw. zwischen festen Phasen wird gemäß *Bischof* der Begriff Adhäsion eingeführt. Dabei versteht man unter *Adhärens* den in der Regel festen Stoff, das Substrat oder den Untergrund, auf den das *Adhäisiv*, häufig ein Klebstoff oder auch Mörtel, im Allgemeinen in flüssiger Form aufgebracht wird. Vgl. [Bischof 1983].

Um die Körper oder Phasen voneinander zu trennen, ist eine mechanische Kraft erforderlich, die oft als *Adhäsionskraft* oder *Haftkraft* bezeichnet wird. Bei der Trennung verrichtet diese Kraft eine Arbeit, die im reversiblen Grenzfall als thermodynamisch reversible *Adhäsionsarbeit* W_a bezeichnet wird. Es entstehen zwei „neue“ Oberflächen und die Grenzfläche verschwindet (siehe Abbildung 2.3). Die Adhäsionsarbeit wird durch die Gleichung von *Dupré* beschrieben ([Bischof 1983] und [Berg 1993]):

$$W_a = \sigma_1 + \sigma_2 - \gamma_{12} \quad (2.1)$$

Darin bezeichnen σ_1 und σ_2 die Oberflächenenergien der beiden neu gebildeten Oberflächen und γ_{12} die spezifische Grenzflächenenergie, eine Wechselwirkungsenergie zwischen zwei kondensierten Phasen unterschiedlicher Materialien im Verbund. Interagieren zwei Oberflächen desselben Materials miteinander, spricht man von der Kohäsionsarbeit W_c und die Gleichung reduziert sich auf ([Bischof 1983] und [Berg 1993]):

$$W_c = 2 \cdot \sigma_1 \quad (2.2)$$

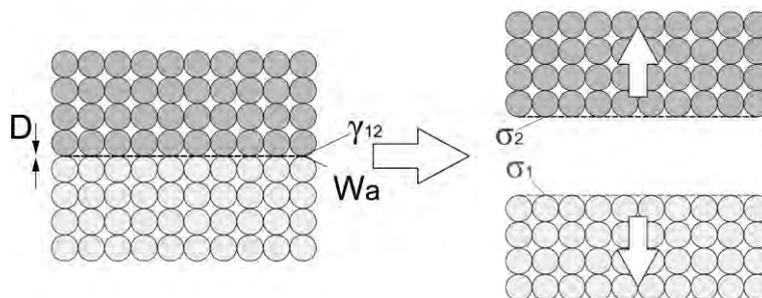


Abbildung 2.3: Definition der thermodynamischen Adhäsionsarbeit aus [Santner 2011]

Adhäsionsfestigkeit oder Haftfestigkeit

Die Bildung eines adhäsiven Kontakts und seine Zerstörung sind zwei grundsätzlich verschiedene Vorgänge. Im ersten Fall ist der *Prozess der Kontaktbildung* von Bedeutung – unter anderem unterscheidet man zwischen der Kontaktbildung aus einer Lösung und aus einer Schmelze – und im zweiten Fall ist das quantitative Maß der erreichten Haftung wichtig, welches wiederum vom Verlauf der Kontaktbildung abhängt. Vgl. [Dutschk 2000].

Gemäß *Dutschk* „ist die Festigkeit einer adhäsiven Verbindung aber eine komplexe Größe, welche nicht nur den Charakter der Wechselwirkungen zwischen den Haftpartnern, sondern auch ihre Deformationseigenschaften wiedergibt“ ([Dutschk 2000], p.22).

Bei der Messung der Festigkeit wird grundsätzlich die globale oder effektive Festigkeit bestimmt. Diese lässt nur bedingt Rückschlüsse auf die für die Haftung verantwortlichen molekularen Wechselwirkungen zu. Weder die Anzahl der Kontaktstellen bzw. adhäsiven Bindungen pro Flächeneinheit noch die Art der Anziehungskräfte kann damit bestimmt werden. Außerdem bleibt der Beitrag der von den mechanischen Eigenschaften des Stoffsystems (E-Moduli, Bruchzähigkeit etc.) abhängigen „Deformationskomponente“ (vgl. [Dutschk 2000]) zu dieser globalen Größe unbestimmt. Die „Deformationskomponente“ umfasst auch den Einfluss des Versagensmechanismus, bei spröden Werkstoffen zum Beispiel gemäß dem Bruchkriterium nach *Griffith*. Die Festigkeit einer adhäsiven Verbindung, also die *Adhäsionsfestigkeit oder Haftfestigkeit*, wird als *Grenzwert von experimentell ermittelten Verbundfestigkeiten* charakterisiert. Vgl. [Dutschk 2000].

Bischof weist auf den Widerspruch zwischen den theoretisch errechenbaren maximalen Adhäsionskräften aus molekularen Wechselwirkungen und den experimentell gemessenen Verbundfestigkeiten hin. Die theoretischen Werte liegen immer bedeutend höher als die gemessenen ([Bischof 1983], p.23f). Auch bei der Kohäsion treten erhebliche Differenzen zwischen berechneten und experimentell ermittelten Reißfestigkeiten auf. Die Unterschiede lassen sich zum Teil mit Hilfe der Schwachstellenhypothese nach *Smekal* (vgl. [Smekal 1936], zitiert nach [Bischof 1983]) oder – wie *Privalko* zitiert nach [Dutschk 2000] schreibt – „[...] über die fundamentale Rolle von Mikrorissen bei der mechanischen Festigkeit von Materialien“ erklären.

In dieser Arbeit werden Haftfestigkeit und Adhäsionsfestigkeit synonym verwendet.

Spezifische Adhäsion und Mechanische Adhäsion

Wie schon in der oben gegebenen Definition der Adhäsion von *Bischof* zum Ausdruck kommt, überlagern sich chemische, physikalische und mechanische Wirkungen. Man unterscheidet zwischen *spezifischer* und *mechanischer Adhäsion* je nachdem, ob die Haftkräfte durch chemische Bindungen bzw. intermolekulare (=spezifische) Wechselwirkungen oder aber mechanische Wirkung zustande kommen (siehe Abbildung 2.4). Vgl. [Poggel 2001].

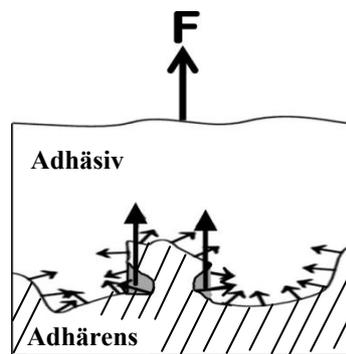


Abbildung 2.4: Wirkung der spezifischen (kurze Pfeile) und mechanischen Adhäsion (lange Pfeile) unter Zugbelastung nach [Poggel 2001]

Während echte chemische Bindungen nur unter bestimmten Voraussetzungen⁵ zwischen zwei Stoffen zustande kommen, die beim Verbund UHPC-Stahl bzw. Glas unter Normalbedingungen nicht gegeben sind, treten intermolekulare Wechselwirkungen in Form der *van der Waals*-Anziehung gemäß [Mollet 2000], p.18, zwischen Atomen, Molekülen, kolloiden Partikeln und makroskopischen Teilchen immer auf. Entscheidend für die Wirkung dieser Kräfte zwischen zwei Materialien ist ein enger Kontakt der Grenzflächen mit einem Molekülabstand von etwa 0,5 nm ($5 \cdot 10^{-10}$ m), siehe dazu Kapitel 2.3 weiter unten bzw. [Dutschk 2000], [Nardin 1996].

Laut *Poggel* erscheint die *mechanische Adhäsion* (MA) in der Literatur unter verschiedenartigen Begriffen: Verklammerung, mechanische Verklammerung, mechanische Verankerung, physikalische Adhäsion, Nagelung, Dübelung, Penetration. Diese Bezeichnungen

⁵ Echte chemische Bindungen sind Ionenbindung, kovalente Bindung und metallische Bindung, so genannte Hauptvalenzbindungen. Voraussetzungen für ihre Ausbildung sind ausreichende Affinität und Beweglichkeit der Moleküle, ein sehr naher Kontakt der Atome – die Reichweite der Bindungskräfte beträgt gemäß [Bischof 1983] nur 0,1 bis 0,3 nm – und die nötige Aktivierungsenergie. Da diese Voraussetzungen bei Raumtemperatur nicht gegeben sind, ist die Bildung echter chemischer Bindungen nach der Einschätzung des Verfassers zwischen den CSH-Phasen (Calcium-Silikat-Hydrat-Phasen) im UHPC und Stahl- oder Glasoberflächen sehr unwahrscheinlich und wird deshalb hier nicht weiter berücksichtigt.

umschreiben einen Verbundzusammenhalt infolge geometrischer Struktur, formschlüssiger und reibschlüssiger Verzahnung. Vgl. [Poggel 2001], p.12ff.

Die MA resultiert aus der geometrischen Struktur sowie der Kohäsion der beteiligten Partner. Geometrische Struktureigenschaften alleine führen zur so genannten mechanischen Verklammerung. Die Verbundfestigkeit lässt sich mit ihr alleine nicht erklären, da sie z.B. für starre Körper bei der geringsten Hinterschneidung immer größer als die Kohäsion wäre. Die MA umfasst also mechanische Verklammerung und beinhaltet zusätzlich eine stoffspezifische Komponente. Vgl. [Poggel 2001], p.14.

Der Formschluss auf mikroskopischer Ebene wird als mikromechanische Verzahnung oder MA im engeren Sinne bezeichnet. Laut *Jähring* beschreibt die mikromechanische Verzahnung die Verhakungskräfte, die auch ohne Auflast (Normalkraft) zustande kommen. Er zählt sie zum Traganteil der Haftung im Gegensatz zur Reibung. Vgl. [Jähring 2005].

Reibung

Die (Haft- sowie Gleit-)Reibung wird erst nach einer (zumindest minimalen) Relativverschiebung der Fugenufer⁶ unter einer Normalkrafteinwirkung aktiviert. Auch *Reinecke* beschreibt die Rissverzahnung und Rissreibung als erst wirksam, wenn der Haftverbund überwunden ist, vgl. [Reinecke 2004]. Ähnlich verhält es sich beim Verbund von gerippter Bewehrung mit dem Beton: Nach Überwindung des steifen Haftverbundes wird bei zunehmendem Schlupf die Reibung wirksam. Vgl. [Rehm 1961] und Abbildung 2.20, Seite 37.

Der makroskopische Reibungsverbund zwischen UHPC und Stahl oder Glas ist nicht Gegenstand der Arbeit. Interessant ist der Zusammenhang mit der Adhäsion aufgrund der Erklärung für sein Zustandekommen gemäß [Tipler 2009], p.106, dennoch: „Die Reibung [...] hat ihren Ursprung darin, dass die Moleküle einer Oberfläche die Moleküle einer nahe gelegenen weiteren Oberfläche anziehen. Diese Anziehung ist [...] elektrischer Natur.“ Die für die Reibung erforderliche Normalkraft wird genau genommen nur auf die Spitzen von mikroskopischen Oberflächenunebenheiten ausgeübt, wo das Verhältnis von Kraft zu Flächeneinheit besonders hoch ist, sodass die Spitzen abgeflacht werden. Mit stärkerer Pressung nimmt die Abflachung bzw. die mikroskopische Kontaktfläche proportional zur Normalkraft zu und zusätzliche Moleküle kommen sich nahe genug, damit Anziehungskräfte zwischen ihnen wirksam werden können. Der Proportionalitätsfaktor dabei ist der Reibungskoeffizient μ .

Adhäsionsmodelle und Adhäsionstheorien

Gemäß [Bischof 1983] und auch [Fiebrich 1994] existieren mehrere Adhäsionstheorien und Modelle zur Interpretation der Adhäsion, wovon keines der Modelle allein zur vollständigen Erklärung der Adhäsion geeignet ist. Neben der mechanischen Adhäsion erlauben die spezifischen Adhäsionsmodelle die Interpretation von Grenzflächenwirkungen mit

⁶ Fugenufer sind die in einer Fuge gegenüberliegenden Oberflächen.

Hilfe von chemischen Bindungen, mit molekularphysikalischen Mechanismen oder thermodynamischen Mechanismen. Die spezifischen Adhäsionstheorien werden auch unterteilt in die elektrostatische, Diffusions- und thermodynamische (oder Adsorptions- oder Benetzung-) Theorie. Vgl. [Packham 1992], zitiert nach [Crimmann 2003] und Abbildung 2.5. An anderer Stelle werden weitere Adhäsionsmodelle favorisiert, vgl. [Crimmann 2003]. Für den UHPC-Stahl- und UHPC-Glas-Verbund erscheinen aber nur die mechanische Adhäsion und der thermodynamische Ansatz relevant, in dem intermolekulare Wechselwirkungen für Haftung sorgen. Weder elektrostatische Aufladung, noch Diffusion, noch echte chemische Bindungen spielen aufgrund der untersuchten Stoffe für die weiteren Betrachtungen eine Rolle.

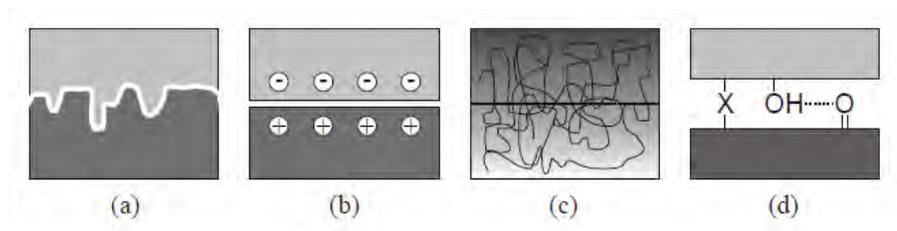


Abbildung 2.5: Adhäsionstheorien: a) mechanische Adhäsion, b) elektrostatische-, c) Diffusions-, d) thermodynamische Theorie nach [Crimmann 2003]

Messung von Adhäsionskräften bzw. Verbundfestigkeiten

Es werden in Anlehnung an Prüfverfahren für Klebungen zusammenfassend drei wesentliche Trennprinzipien für die experimentelle Ermittlung der Verbundfestigkeiten unterschieden, vgl. [Burbaum 2009] und Abbildung 2.6:

- das schälende Trennprinzip
- das scherende Trennprinzip
- das ziehende Trennprinzip



Abbildung 2.6: Trennprinzipien zum Prüfen der Adhäsionskraft von Klebungen aus [Burbaum 2009]

Bei einer schälenden Trennung sind Zug- und Scherkräfte am Trennvorgang beteiligt, sodass eine isolierte Betrachtung von Adhäsionskräften nicht möglich ist. Beim scherenden Trennprinzip werden die Stoffe durch Kräfte getrennt, die parallel zur Oberfläche wirken.

Die Trennkraft wird in der Literatur auch als *tangentiale Adhäsion*⁷ bezeichnet, vgl. [Burbaum 2009], p.6. Die isolierte Messung einer tangentialen Adhäsion ist schwierig, da Adhäsionskräfte durch adhäsionsunabhängige Reibungskräfte überlagert werden. Bei einem ziehenden Trennprinzip werden die Stoffe durch Kräfte getrennt, die normal zur haftenden Oberfläche wirken. Dies wird als *normale Adhäsion* bezeichnet. Die in der Grenzfläche auftretenden Adhäsionskräfte können theoretisch direkt interpretiert werden, wenn beim Bruch wirklich eine scharfe Trennung der Phasen in der Kontaktfläche erfolgt. Haften an der Oberfläche noch Reste des abgezogenen Stoffes an, so sind die Adhäsionskräfte größer als die Kohäsionskräfte bzw. die Zugfestigkeit des abgezogenen Stoffes⁸. Vgl. [Burbaum 2009].

Die experimentellen Verfahren zur Prüfung von Adhäsions- oder Verbundfestigkeiten sind mannigfaltig. [Bischof 1983] gibt einen Überblick der angewendeten Prinzipien vom Stirnabreißversuch bis zum Impulsverfahren. Noch vielfältiger sind die verwendeten Versuchsaufbauten, insbesondere für Haftzug- und Haftschiebversuche (siehe Abbildung 2.7).

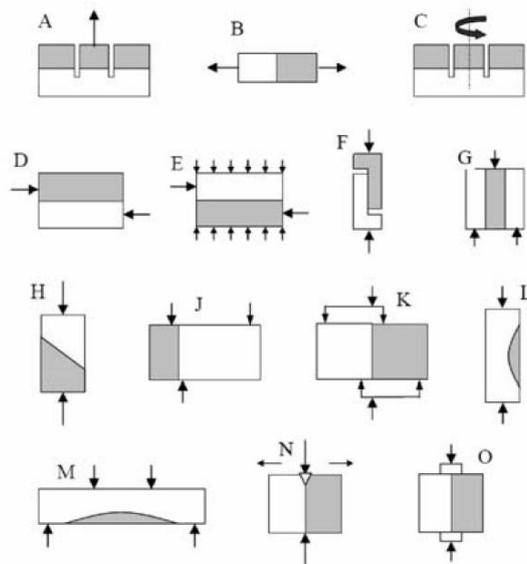


Abbildung 2.7: Versuchsaufbauten für Haftzug- und Haftschiebversuche aus [López 2006]

⁷ Burbaum führt für den Fall der Adhäsion durch eine Flüssigkeitsbrücke aus Wasser zwischen zwei Stahloberflächen aus, dass eine tangentielle Adhäsionskraft nur von Scherkräften in der Flüssigkeit zwischen den Festkörpern abgeleitet werden kann. Diese sind allerdings klein, so dass keine besonders hohen Scherkräfte aufgenommen werden können. Vgl.[Burbaum 2009].

⁸ Dutschk erläutert, dass nach der rheologischen Theorie von Bickermann die Wahrscheinlichkeit eines adhäsiven Bruchs sehr gering ist (1:59000). Sehr oft hat der Bruch einer adhäsiven Verbindung kohäsiven Charakter. Vgl. [Dutschk 2000], p.26.

2.3 Intermolekulare Wechselwirkungen

Zwischen den Oberflächen zweier Phasen (fest-fest oder fest-flüssig) treten Oberflächenkräfte auf, die vor allem vom Abstand der beiden Oberflächen und von der Art der nicht abgesättigten Valenzen einzelner Moleküle abhängen. Wegen der mit ca. 0,1 – 0,3 nm extrem geringen Reichweite von Bindungskräften zwischen Atomen in Molekülen ist das Zustandekommen chemischer Bindungen zwischen den Phasen nur begrenzt möglich und für den Fall des UHPC-Glas/Stahl Verbundes höchst unwahrscheinlich (vgl. Fußnote 5, Seite 12). Es treten vor allem intermolekulare Wechselwirkungen elektrostatischer Natur zwischen Dipolen auf, die unter dem Sammelbegriff *van der Waals Kräfte* zusammengefasst werden. Sie werden entweder durch einen permanenten Dipol bei polarer Atombindung oder durch einen induzierten Dipol im Falle unpolarer Moleküle hervorgerufen. Je nach Art der Polarisierung der Moleküle gibt es demnach 3 unterschiedliche Kombinationsmöglichkeiten (*Keesom, Debye, London*), die in Tabelle 2.2 angegeben werden. Vgl. [Bischof 1983], [Habenicht 1997] und [Dutschk 2000].

Tabelle 2.2: Arten von intermolekularen Wechselwirkungen (*Van der Waals Kräfte*), deren Bindungsenergien und theoretische berechneten Adhäsionsfestigkeiten

Nebervalenzbindungen (<i>Van der Waals Kräfte</i>)	Bindungs- energie	Reichweite	Theoretische Adhäsions- festigkeit	Technische Adhäsions- festigkeit
	[kJ/mol]	[nm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
KEESOM Kräfte zwischen zwei permanenten Dipolen	≤ 20		200	
DEBYE Kräfte zwischen einem permanenten und einem induzierten Dipol	≤ 2	0,3 - 10	35 – 300	5-25
LONDON Kräfte zwischen zwei induzierten Dipolen (auch „Dispersionskräfte“)	bis 40		60 – 360	
Wasserstoffbrücken - Bindungen	17 – 63	0,3-0,5	500	

Wasserstoffbrücken sind ein Sonderfall der *Keesom*-Wechselwirkungen und werden aufgrund ihrer hohen Bindungsenergie in Tabelle 2.2 gemäß [Jeffrey 1997] gesondert angeführt. Sie ergeben besonders hohe intermolekulare Kräfte.

Van der Waals Kräfte wirken sich in der Welt der Kolloide und Partikel besonders stark aus. Während die Haftkräfte annähernd linear mit der Teilchengröße wie auch mit dem Abstand abnehmen, nimmt das Gewicht mit der dritten Potenz der Teilchengröße ab. Bei kolloidalen Teilchen ($\varnothing < 100 \mu\text{m}$) werden also solche Haftkräfte wesentlich größer als die Schwerkraft. Vgl. [Mollet 2000].

Quantenmechanische Berechnungen liefern Ergebnisse für das anziehende Potential zwischen den Phasen aus Wechselwirkungen von Einzelmolekülen. Die Übertragung solcher einzelner Wechselwirkungen auf die auftretenden Kräfte zwischen zwei makroskopischen Oberflächen ist in einigen theoretischen Konzepten erarbeitet worden (molekularphysikalische Adhäsionstheorien, vgl. [Bischof 1983]). Die Komplexität der untersuchten Systeme UHPC-Stahl und UHPC-Glas – bedingt durch die Hydratationsprodukte von UHPC, die aus einer Vielzahl von Molekülgruppen in unterschiedlicher Anordnung bestehen – lässt eine Anwendung solcher Konzepte im Rahmen der Arbeit nicht zu.

In den thermodynamischen Adhäsionstheorien werden intermolekulare Wechselwirkungen in unspezifische oder dispersive und spezifische oder polare Anteile unterteilt und durch Messungen erfasst. Während dispersive Anteile hauptsächlich von *London-Kräften* (Dispersionskräften) stammen, werden unter den polaren Anteilen alle nicht den Dispersionskräften zuordenbaren Anteile zusammengefasst. Vgl. [Berg 1993].

Damit sich gute Haftung ausbilden kann, müssen die Materialien ähnlich große Anteile von dispersiven und polaren Oberflächenkräften aufweisen. Aus dem Bereich des Kunststoffklebens ist zum Beispiel bekannt, dass die Adhäsionsfestigkeit ein Maximum erreicht, wenn das Verhältnis der polaren Oberflächenenergien der Verbundpartner einen Wert um 1 erreicht, vgl. [Fiebrich 1994].

An der Stahloberfläche bildet sich im alkalischen Milieu des Porenwassers des Betons mit seinem pH-Wert von etwa 12,5 eine nur sehr dünne, aber äußerst dichte Schicht von Eisenhydroxid aus. Durch ihre Dichtigkeit wird der Wasserzutritt zum Grundmaterial unterbunden und die Korrosion verhindert. Die Schicht wird auch als Passivierungsschicht bezeichnet und sorgt für die Korrosionsbeständigkeit des Stahls im Beton [Tritthart 1989].

Neben elektrostatischen Kräften gibt es auch intermolekulare Wechselwirkungen durch Bildung einer elektrischen Doppelschicht (Donor-Akzeptor Wechselwirkungen). Zum Beispiel können Wasserstoffbrückenbindungen als Säure-Basen Bindungen im Sinne von Protonendonator und Protonenakzeptor aufgefasst werden⁹, vgl. [Habenicht 1997], p. 329. Da diese Art der Wechselwirkung vor allem im Zusammenhang mit organischen Polymeren beobachtet wurde, vgl. [Dutschk 2000], wird diese Betrachtungsweise in der gegenständlichen Arbeit nicht angewendet.

⁹ Donor-Akzeptor-Bindungen: Broenstedt-Säure-Base-Wechselwirkungen (Protonen-Donator/Säure und -akzeptor/Base) und Lewis Säure-Base-Wechselwirkungen (Elektronen-Donator (Base) und Elektronen-Akzeptor (Säure))

Tabelle 2.3: theoretische van-der-Waals-Kraft pro Flächeneinheit in N/mm² für mehrere Abstände von Glas im engen Kontakt mit Glas nach [Swiridenok 1990] in [Dutschk 2000]

<i>Glas-Glas</i>	Abstand zwischen Oberflächen D in [nm]				
	0,5	1	5	10	100
spezif. Kraft [N/mm ²]	5,4	0,67	5,4·10 ⁻³	6,7·10 ⁻⁴	6,7·10 ⁻⁷

Die starke Abhängigkeit der intermolekularen Kräfte vom Abstand der Phasen wurde bereits erwähnt. Der typische Gleichgewichtsabstand wird in der Literatur oft mit 0,5 nm angegeben, vgl. [Nardin 1996]. Für den Kontakt von zwei Glasflächen miteinander wird in [Dutschk 2000], p.33, die Van-der-Waals-Kraft pro Flächeneinheit für mehrere Abstände angegeben, siehe Tabelle 2.3.

An der UHPC Oberfläche als Adhäsiv sind sowohl polare als auch disperse Nebenvalenzanteile zu erwarten, die hauptsächlich von den Calciumsilikathydratphasen (CSH-Phasen) aus der Zementhärtung gebildet werden. Am Adhärens Glas werden aufgrund der amorphen Struktur aus den Hauptbestandteilen SiO₂, CaO und N₂O hohe polare Wechselwirkungen erwartet. Stahl zeigt in den eigens durchgeführten Messungen der Oberflächenenergie fast ausschließlich disperse Wechselwirkungen (siehe Kapitel 4.2.3), die auf die Gitterstruktur der Metallionen zurückzuführen sind. Dennoch sind im Kontakt mit UHPC auch polare Wechselwirkungen mit der Stahl Oberfläche, die durch die stark alkalische Beton-Porenlösung modifiziert wird, zu erwarten.

2.4 Benetzung und thermodynamische Adhäsionstheorie

Im Falle von Flüssigkeiten bzw. fließfähigen Stoffen werden die Adhäsionspartner durch einen Benetzungsprozess in Kontakt gebracht. Handelt es sich um Kleber oder aber auch um UHPC, entwickeln bzw. verändern sich die Haftkräfte während der Erhärtung. Sowohl die Benetzung als auch die spezifischen Haftkräfte lassen sich mit der thermodynamischen Adhäsionstheorie theoretisch beschreiben.

2.4.1 Benetzung glatter und rauer Oberflächen

Eine gute Benetzung wird im Allgemeinen als notwendige aber nicht hinreichende Bedingung für die Ausbildung von Adhäsionskräften gesehen. Sie sorgt für ausreichende Nähe zwischen den Grenzflächen einer flüssigen Phase und einer festen Phase, so dass sich auch zwischenmolekulare Anziehungskräfte ausbilden können. Für die Qualität des Benetzungsvorganges sind Benetzungseigenschaften des Adhäsivs sowie Oberflächeneigenschaften des Adhärens, die Benetzbarkeit, verantwortlich. Kenngrößen dafür lassen sich aus der Oberflächenenergie (OFE) des Festkörpers und der Oberflächenspannung (OFS) der Flüssigkeit ermitteln. Beide Größen geben die Energie pro Flächeneinheit (mJ/m²) bzw. Kraft pro Längeneinheit (mN/m) an, die aufgewendet werden muss, um eine zusätzliche Oberflä-

che zu bilden bzw. um Moleküle aus dem Inneren an die Oberfläche zu bringen. An der Oberfläche haben die Moleküle eine größere potentielle Energie als im Inneren bzw. besitzen sie freie Valenzen.

Meist werden Benetzungseigenschaften eines Flüssigkeit-Feststoff Systems mittels Kontaktwinkelmessung an einem liegenden Tropfen bestimmt. Die *Young'sche* Gleichung gibt den Zusammenhang zwischen Kontaktwinkel θ , OFE des Festkörpers σ_S (solid) und OFS der Flüssigkeit σ_L (liquid) sowie der Grenzflächenenergie γ_{SL} an, siehe auch Abbildung 2.8 und u.a. [Bischof 1983]¹⁰:

$$\sigma_S = \gamma_{SL} + \sigma_L \cdot \cos \theta \quad (2.3)$$

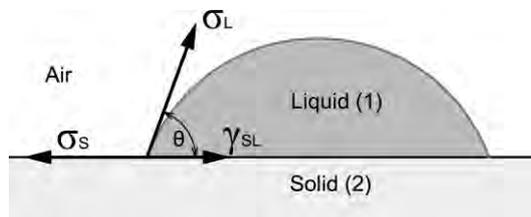


Abbildung 2.8: Bezeichnungen gemäß Young'scher Gleichung am liegenden Tropfen aus [Santner 2011]

Der Kontaktwinkel oder auch Randwinkel geht als Gleichgewichtswinkel beim niedrigsten Energiezustand in die Gleichung ein. Ein kleiner Randwinkel bedeutet gute Benetzung, ein großer hingegen schlechte. Ist die OFE des Festkörpers größer als die Grenzflächenenergie zwischen Flüssigkeit und Festkörper ($\sigma_S > \gamma_{SL}$) – und weil σ_L immer positiv ist –, muss $\cos \theta$ auch positiv sein und der Randwinkel ist kleiner als 90° . Dies wird als teilweise Benetzung der Oberfläche bezeichnet. Bei einem theoretischen Kontaktwinkel von 0° spricht man von vollständiger Benetzung oder Spreitung. Ist die Grenzfläche Festkörper-Flüssigkeit energetisch weniger vorteilhaft als die blanke Festkörperoberfläche ($\sigma_S < \gamma_{SL}$), wird der Kontaktwinkel größer 90° . Die Differenz $\sigma_S - \gamma_{SL}$ wird *Benetzungsspannung oder Haftspannung* genannt und meist anhand der experimentellen Werte für θ und σ_L bestimmt. Vgl. [Dutschk 2000], p.47.

Gemäß den Untersuchungen von *Wenzel* beeinflusst die Oberflächenrauheit die Benetzung. Der sogenannte *Wenzel Quotient* beschreibt den Oberflächenvergrößerungsfaktor r_w , also das Verhältnis der wahren Fläche A_w einer rauen Oberfläche zur geometrischen Bezugsfläche A_g . Siehe auch Abbildung 2.11 auf Seite 23 bzw. [Wenzel 1936]. Er kann aus dem Randwinkel gemessen auf glatter (θ_G) und auf rauer Oberfläche (θ_R) bestimmt wer-

¹⁰ In Abbildung 2.3 wurden die Oberflächenenergien unterschiedlicher Materialien mit σ_1 und σ_2 und die spezifische Grenzflächenenergie zwischen ihnen mit γ_{12} bezeichnet. Praktisch gleich bedeutend sind die Bezeichnungen σ_S , σ_L und γ_{SL} , die vom unterschiedlichen Phasenzustand der verschiedenen Materialien hergeleitet sind.

den. Es gilt Gleichung (2.4). Allerdings wird er dabei unter anderem von dem Verhältnis der Rauheit zur Tropfengröße beeinflusst und ist nur eingeschränkt gültig, vgl. [Butt 2006], [Palzer 2001].

$$\cos \theta_R = r_w \cdot \cos \theta_G = \frac{A_w}{A_g} \cdot \cos \theta_G \quad (2.4)$$

Im Falle viskoser Flüssigkeiten und Suspensionen wie UHPC wird der Benetzungsvorgang neben der OFS auch von rheologischen Eigenschaften wie Fließgrenze und Viskosität beeinflusst. Im Allgemeinen verursacht eine hohe Viskosität eine nicht vollständige Benetzung. Hochviskose (=zähe) Klebstoffe dringen zum Beispiel nicht in feine Vertiefungen einer (mikro-) rauen Oberfläche ein, vgl. [Habenicht 1997], p.347. Auch die Korngröße der Bestandteile (im Fall von Feinkorn-UHPC 0,1 μm - 500 μm) spielt eine Rolle. Außerdem wirken sich die Temperatur und äußerere Kräfte wie zum Beispiel die Verdichtung auf die Benetzung aus, man spricht von erzwungener Benetzung im Gegensatz zu spontaner Benetzung (forced and spontaneous wetting, vgl. [Butt 2006], p.141).

Einflüsse des Adhärens kommen von der Form und vom Fließwiderstand, der von der Rauheit der Oberfläche abhängt. Poröse Oberflächen oder solche mit engen Spalten und Kanälen (0,01-100 μm) können kapillar saugende Aktivität entfalten. Adsorbierte Raumluftbestandteile, „Verunreinigungen“ oder Reaktionsschichten wie z.B. die Oxidschichten auf Metallen ändern die Benetzungseigenschaften.

2.4.2 Berechnung der spezifischen Adhäsionsfestigkeit mit der thermodynamischen Adhäsionstheorie

Die potentielle Energie der (*van der Waals*-) Wechselwirkung $W_{(D)}$ als Funktion des Abstands D folgt aus quantenmechanischen Berechnungen und ist von der Geometrie der beteiligten Phasen bzw. Körper abhängig, vgl. [Israelachvili 2011]. Für zwei einzelne Moleküle beträgt sie

$$W_{(D)} = -\frac{C_{12}}{D^6} \quad (2.5)$$

C_{12} summiert die Beiträge der intermolekularen Wechselwirkungen. Der Fall des Kontakts von UHPC mit einer glatten Stahl- oder Glasoberfläche entspricht am besten der Anordnung der Moleküle in zwei unendlich ausgedehnten ebenen Oberflächen gemäß Abbildung 2.9.

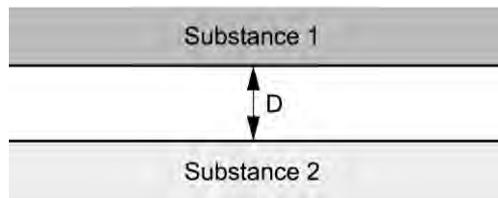


Abbildung 2.9: Intermolekularer Abstand D zwischen zwei Oberflächen aus [Santner 2011]

Unter der Voraussetzung paarweiser Additivität ergibt sich für $W_{(D)}$:

$$W_{(D)} = -\frac{\pi\rho_1\rho_2C_{12}}{12D^6} = -\frac{A_{12}}{12\pi D^2} \quad (2.6)$$

Darin sind ρ_1 und ρ_2 die Teilchendichten (Anzahl von Atomen pro Volumeneinheit) der zwei Materialien (C_{12} wie oben). Diese Faktoren bilden die so genannte *Hamaker-Konstante* A_{12} , die als $A_{12} = \pi^2\rho_1\rho_2C_{12}$ bei Interaktion von zwei Materialien oder als $A_{11} = \pi^2\rho_1^2C_{11}$ für ein einzelnes Material definiert ist. Die *Hamaker-Konstante* für zwei Materialien kann auch durch das geometrische Mittel ausgedrückt werden. Vgl. [Berg 1993].

$$A_{12} = \sqrt{A_{11} \cdot A_{22}} \quad (2.7)$$

Die zwischen zwei Materialien wirkende Kraft $F_{(D)}$ kann berechnet werden, indem die potentielle Energie gemäß Gleichung (2.6) nach deren Abstand abgeleitet wird, vgl. [Israelachvili 2011], [Butt 2006]:

$$F_{(D)} = \frac{dW_{(D)}}{dD} = \frac{A_{12}}{6\pi D^3} \quad (2.8)$$

Durch Kombination von Gleichung (2.6) und (2.8) ergibt sich die wirkende Kraft in Abhängigkeit des intermolekularen Abstandes:

$$F_{(D)} = \frac{2 \cdot W_{(D)}}{D} \quad (2.9)$$

In der thermodynamischen Betrachtungsweise wird nun die Kohäsionsarbeit, die mit $W_c = 2 \cdot \sigma_1$ laut Gleichung (2.2) auf Seite 10 bereits definiert wurde, als die potentielle Energie der Wechselwirkung $W_{(D)}$ betrachtet und es ergibt sich analog zu Gleichung (2.6):

$$\sigma_1 = \frac{A_{11}}{24\pi D^2} \quad (2.10)$$

Werden Gleichungen (2.6),(2.7) und (2.10) zusammengeführt ergibt sich folgende Formulierung für die Adhäsionsarbeit W_a abhängig von den Oberflächenenergien (OFE) bzw. Oberflächenspannungen (OFS) σ_i der Verbundpartner, vgl. [Berg 1993]:

$$W_a = W_{(D)} = 2 \cdot \sqrt{\sigma_1 \cdot \sigma_2} \quad (2.11)$$

Das bedeutet, dass mit den OFE der beteiligten Materialien, in unserem Fall UHPC, Glas und Stahl, die Adhäsionsarbeit und daraus bei bekanntem intermolekularem Abstand die Adhäsionskraft theoretisch errechnet werden kann.

Die OFE oder OFS eines Materials kann in einzelne Anteile für spezifische und unspezifische Wechselwirkungen zum Beispiel nach der etablierten OWRK-Methode (*Owens, Wendt, Rabl und Kälble*) in die dispersiven (σ^D) und polaren (σ^P) Anteile¹¹ aufgespalten werden, vgl. [Berg 1993], [Krüss 2011] und es ergibt sich:

$$W_a = 2 \cdot \sqrt{\sigma_1^D \cdot \sigma_2^D} + 2 \cdot \sqrt{\sigma_1^P \cdot \sigma_2^P} \quad (2.12)$$

2.5 Oberflächentopografie bzw. Oberflächenrauheit

Durch Aufrauen einer Oberfläche wird diese nicht nur vergrößert, sondern es entsteht auch die Möglichkeit von geometrischen bzw. mechanischen Verbindungen durch eine Verklammerung in hinterschnittenen Formen, vgl. Abbildung 2.4 auf Seite 12. Im folgenden Abschnitt wird auf die Gestalt und Charakteristik von rauen Oberflächen sowie deren Bestimmung eingegangen.

2.5.1 Messung der Oberflächentopografie

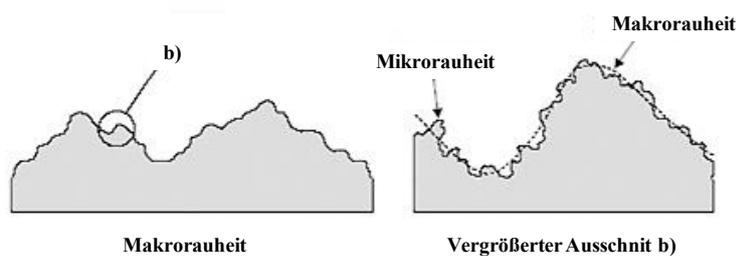


Abbildung 2.10: Abhängigkeit der beobachteten Rauheit vom Betrachtungsmaßstab aus [Reinecke 2004]

¹¹ Häufig werden die Formelzeichen γ_1^P und γ_i^D verwendet. Während der disperse Anteil die Dispersionskräfte (London-Wechselwirkungen) beinhaltet, gehen in den polaren Anteil alle Nichtdispersionskräfte, wie z.B. die Keesom- und Debye-Wechselwirkungen oder auch die Lewis-Säure-Base-Wechselwirkungen ein, vgl. [Nardin 1994] zitiert nach [Crimmann 2003].

Die Abhängigkeit der beobachteten Rauheit vom Betrachtungsmaßstab und der Auflösung sowie der Charakter eines zum Beispiel durch Sandstrahlen aufgerauten Oberflächenprofils sind in Abbildung 2.10 schematisch dargestellt.

Die Form der Oberfläche beeinflusst in Abhängigkeit der Benetzungseigenschaften des Adhäsivs die Ausbildung des Kontakts. Einfache Parameter wie die arithmetische Mittentiefenrauhigkeit R_a oder die im Betonbau verwendete Rautiefe nach Kaufmann [Kaufmann 1971] beschreiben die für die Adhäsion relevanten Merkmale nicht ausreichend, vielmehr spielen Faktoren wie die wahre Oberfläche in Abhängigkeit der gewählten Auflösung bzw. die wirksame Kontaktfläche und weitere Formfaktoren eine Rolle, vgl. [Zilch 2003], [Schäfer 1996]. Die Begriffe geometrische Oberfläche A_g (Bezugsfläche), wahre Oberfläche A_w und wirksame bzw. benetzte Oberfläche oder Kontaktfläche A_{eff} sind in Abbildung 2.11 veranschaulicht.

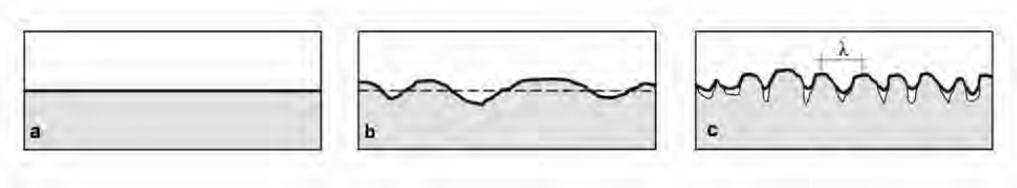


Abbildung 2.11: a) geometrische Oberfläche A_g (Bezugsfläche), b) wahre Oberfläche A_w c) benetzte Oberfläche oder Kontaktfläche, $A_{benetzt}$

Während im Betonbau zur Oberflächenmessung ein relativ grober Maßstab (übliche Auflösung $\sim 0,1$ mm) angelegt wird, werden im Werkzeug- und Maschinenbau mit den üblichen Tastschnittverfahren Rautiefen im Mikrometerbereich und zum Beispiel in der Halbleiterindustrie mit „atomic force microscopy (AFM)“ im Nanometerbereich bestimmt¹². In Tabelle 2.4 sind gebräuchliche Messverfahren und ihre Auflösung angegeben. Die Charakterisierung der Oberflächentopografie von Werkstoffen ist mittlerweile ein umfangreiches Wissensgebiet, vgl. [Stout 2000]. Eine Herausforderung ist die Bestimmung von Oberflächenkenngrößen, die die adhäsions-relevanten Eigenschaften hinreichend beschreiben. In Kapitel 4.2.2 wird näher darauf eingegangen.

¹² Die Definition „rau“ für Betonoberflächen von Schubfugen ist je nach Norm unterschiedlich. Laut Erläuterungen zur DIN 1045-1 [DAfStb 2003a] bedeutet „rau“ zum Beispiel eine maximale Profilkuppenhöhe größer 0,7 mm bzw. Rautiefe nach Kaufmann $> 0,9$ mm, geringere Werte bedeuten „glatt“.

Tabelle 2.4: Beispiele von Messverfahren der Oberflächentopografie-Messung

Methode	System (Beispiel)/ [Quelle]	Auflösung vertikal/lateral des Beispiel-Systems	Messfeld/ Probengröße	Ergebnis/ Bemerkung
Sandvolumen-methode	[Kaufmann 1971]	~0,5 mm	"Sand- fleck", ~100mm	nur Rautiefe Rt, "qualitativ"
Kontakt-Profilometrie (Tastschnittverfahren)	„surftest SJ 210“ [Mitutoyo 2011]	bis zu 10 nm (vertikal), realistisch ist lateral 1 µm wegen Tastspitzenradius	beliebig, Messstreckenlänge definiert in [DIN ISO 4288] je nach Auflösung	Profile mit Ra, Rz
Laser-Profilometrie mit Triangulations-sensor	[Müller 2009]	30 µm	30*30 mm ²	3D Koordinatenraster
mikroskopisches Laser- Scanning	Zeiss LSM 5 Pascal [KEM 2011]	Nanometerbereich	kleine Messbereiche	Eher in Biologie und Medizin
Laser-Interferometrie oder Interferometrie mit chromatischem Sensor	div. Hersteller, z.B. [FRT 2011]	3 nm/ 2 µm oder 300 nm/20 µm	je nach Auflösung (Messkopf)	3D Koordinatenraster, funktioniert schlecht auf absorbierenden Oberflächen
Fokus-Variation am Lichtmikroskop	“Infinite Fokus” [Alicona 2009]	Je nach Objektiv bis 10 nm vertikal, 0,2 µm lateral	Je nach Objektiv 0,1 mm ² bis 5 mm ²	3D Koordinatenraster, Reflexionen problematisch
div. optische Verfahren mit Weißlichtsensoren, digitale Streifenprojektion	„Mikro-CAD“ [GFM 2011]	Bis zu 0,1 nm je nach Probengröße/System. z.B.: 0,1 µm/0,4 µm bis 4 µm/17 µm	nur kleine Ausschnitte, z.B.: „1x0,8 mm bis 45x33 mm	3D-Koordinaten/ transparente und adsorbierende Materialien problematisch
Weißlicht Interferometrie	[TU Ilmenau 2011]	1 µm/30 µm aber auch bis nm-Bereich	z.B: Ø18mm	3D-Koordinaten/ transparente und adsorbierende Materialien problematisch
Rasterkraft- Elektronenmikroskopie (AFM)	[FELMI 2011]	0,1 nm – 10 nm	sehr kleine Messbereiche	

2.5.2 Oberflächenkenngrößen

In den meisten Verfahren werden 2- oder 3- dimensional x/y/z-Koordinaten in einem Raster von Punkten der Oberfläche erfasst. Daraus können computerunterstützt verschiedene Kenngrößen der Oberflächenrauheit (oder allgemeiner: Oberflächentopografie) ermittelt werden. Die im Rahmen der Arbeit bestimmten Größen sind in Tabelle 2.5 angeführt, darunter ist auch ein neuer, eigens entwickelter Kennwert, r_H , siehe Kapitel 4.2.2.

Tabelle 2.5: Ermittelte Oberflächenkenngrößen, siehe auch Kapitel 4.2.2

Abk.	Bezeichnung	Beschreibung	gemäß
Ra	arithmetischer Mittenrauwert des Profils	arithmetischer Mittelwert der Absolutbeträge der Abstände des Ist-Profils vom mittleren Profil.	[DIN ISO 4287] [ASME 2002]
Rz	maximale Profilhöhe	Mittelwert der Absolutwerte der Höhen der 5 höchsten Profilkuppen plus der Absolutwerte der Tiefen der 5 tiefsten Profiltäler in der Bezugsstrecke	[DIN ISO 4287] [ASME 2002]
Sa	arithmetischer Mittenrauwert der Fläche	arithmetischer Mittelwert der Höhenordinaten einer Fläche	[ASME 2002]
Sz (S10z)	maximale Höhe der Fläche (und Zehnpunkthöhe)	Mittelwert der Absolutwerte der Höhen der 5 höchsten Kuppen plus der Absolutwerte der Tiefen der 5 tiefsten Täler in der Bezugsfläche	[DIN ISO 4287] [Stout 2000]
r_w	Wenzel Quotient	Verhältnis von wahrer Oberfläche zu geometrischer Bezugsfläche, Oberflächenvergrößerungsfaktor	[Wenzel 1936] zitiert nach [Schäfer 1996]
D	Fraktale Dimension	Dimension der Selbstähnlichkeit. $D = \log(n)/\log(m)$ mit Anzahl n von verkleinerten Kopien seiner selbst, Verkleinerungsfaktor m	[ASME 2002]
r_H	Hinterschneidungsquotient	Verhältnis der Fläche von vertikalen Flanken zur geometrischen Bezugsfläche, Anteil an Hinterschneidungen/Bezugsfläche	Eigendefinition, siehe Kapitel 4.2.2

arithmetischer Mittenrauwert Ra/Sa und maximale Höhen Rz/Sz

In Abbildung 2.12 werden der Ra-Wert und Rz-Wert für ein Profil gezeigt, für die Fläche (Sa/Sz) gilt Analoges.

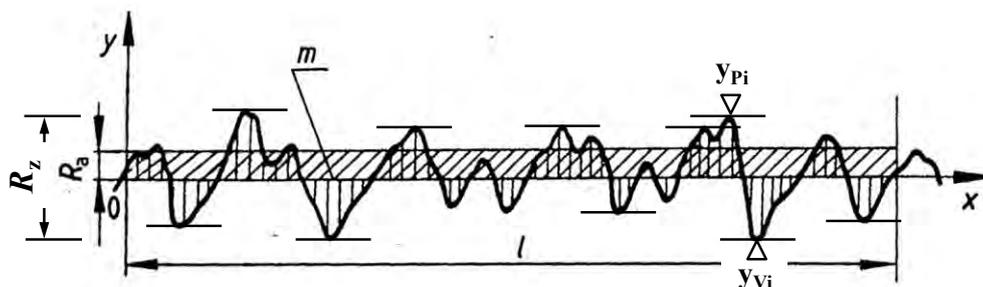


Abbildung 2.12: Ra-/Rz-Werte gemäß [DIN ISO 4287]

Wenzel-Quotient, wahre Oberfläche

Zur Veranschaulichung des in Abschnitt 2.4.1 erwähnten Wenzel-Quotienten und seiner Bestimmung an Oberflächen dient Abbildung 2.13. Er kann aus einem Profilschnitt ermittelt werden, in dem die Länge des Ist-Profils („wahre Profillänge“) ins Verhältnis zur Messstreckenlänge gemäß Gleichung (2.13) gesetzt wird:

$$r_{w(x)} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n \sqrt{(\Delta x_i)^2 + (\Delta z_i)^2} \quad (2.13)$$

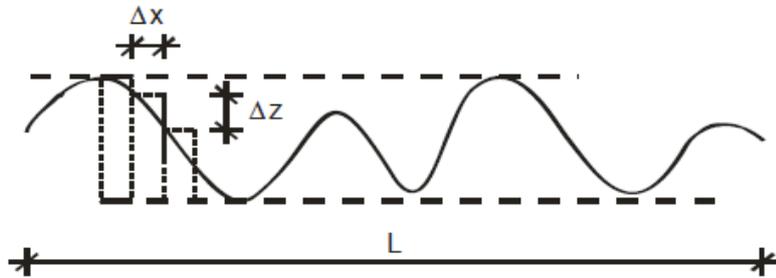


Abbildung 2.13: Skizze zur Berechnung des Wenzel Quotienten aus [Müller 2009]

Für flächenhafte Messungen kann der Wenzel Quotient analog angegeben werden. Die „wahre“ Oberfläche wird z.B. in dem in dieser Arbeit angewendeten System (Infinite Fokus) aus den 3-D Koordinaten durch Summation aller Dreiecksflächen, die von benachbarten Messpunkten aufgespannt werden, ermittelt (Triangulierung), siehe Kapitel 4.2.2.

Fraktale Dimension

Fraktal ist ein von Benoît Mandelbrot geprägter Begriff (lat. fractus ‚gebrochen,‘), der natürliche oder künstliche Gebilde oder geometrische Muster bezeichnet, die einen hohen Grad an Selbstähnlichkeit aufweisen. Das ist beispielsweise der Fall, wenn ein Objekt aus mehreren verkleinerten Kopien seiner selbst besteht¹³. Besteht ein Fraktal aus einer bestimmten Anzahl n von Kopien seiner selbst, und ist der Verkleinerungsfaktor m für alle Kopien derselbe, so kann die Ähnlichkeitsdimension $D = \log n / \log m$ angegeben werden. In gewissem Sinn ist sie ein Maß für die "Rauheit". Sie liegt für flächenhafte Gebilde zwischen 2 und 3. Natürliche selbstähnliche Gebilde weisen im Gegensatz zu geometrischen Gebilden (Dimensionen: 1, 2, 3) eine nicht ganzzahlige Dimension auf. Vgl. [Froehner 1997], [Poggel 2001].

Zwischen fraktaler Dimension D , wahrer Oberfläche A_w , geometrischer Oberfläche A_g und η , dem Kehrwert der Auflösung bzw. des verwendeten Maßstabes besteht folgender Zusammenhang, vgl. [Poggel 2001]:

$$A_{w(\eta)} = A_g \cdot \eta^{1-D} \quad (2.14)$$

¹³ *L. Richardson* untersuchte 1961 eine Reihe von Ergebnissen der Küstenlinien-Vermessung unterschiedlicher Länder. Man nimmt einen Maßstab der festen Länge η und misst in Schritten der Länge η , addiert alle Teile und erhält die Gesamtlänge $L(\eta)$, d.h. diese hängt vom Maßstab ab. Weil ein kürzerer Maßstab kleinere Buchten und Einschnitte erkennt, muss $L(\eta)$ größer werden, wenn η sich verkleinert. *Richardson* fand auf experimentellem Weg, dass es eine Zahl D gibt, die fraktale Dimension, mit der sich die Länge $L(\eta)$ angeben lässt. Vgl. [Froehner 1997].

Für die in der Technik häufig vorkommenden semi-fraktalen Oberflächen gilt, dass sie nur zwischen gewissen Grenzen einen fraktalen Charakter aufweisen.

Neben diesen Größen gibt es noch eine Reihe von weiteren genormten und nicht genormten Kenngrößen der Oberflächen, die hier nicht weiter behandelt werden, aber in den in der Tabelle 2.5 angeführten Normen oder z.B. in der Benutzerhilfe des verwendeten Messprogramms (Infinite Focus IFM 2.1, [Alicona 2009]) nachgelesen werden können. Zu unterscheiden sind zum Beispiel Amplitudenparameter (wie S_{dq} , quadratischer Mittelwert der Profilsteigung der Fläche), räumliche Parameter, Hybridparameter (wie Δa , durchschnittliche absolute Neigung des Rauheitsprofils) und funktionale Parameter (Die Traglastkurve=Integral der Amplituden-Verteilungsfunktion).

2.6 Haftverbund im Hinblick auf Beton bzw. UHPC

Adhäsion spielt für zementgebundene Baustoffe auf vielen Gebieten eine manchmal entscheidende Rolle: Verbundmörtel und -anker, polymer-modifizierte bzw. zementgebundene Beschichtungen, Spritzbeton, Aufbeton, Stahl-Verbundkonstruktionen, Stahl im Beton, Fasern im Beton usw. Aspekte, die im Zusammenhang mit der Fragestellung des flächenhaften Haftverbundes interessant erscheinen, seien im Folgenden aus dem umfangreichen Wissenstand herausgegriffen.

2.6.1 Die Rolle der Haftung im Baustoff Beton (ITZ)

Maßgeblich für die Festigkeit zementgebundener Korngemenge ist einerseits die Festigkeit des Bindemittelsteins (Matrix) zwischen den Körnern sowie die Haftung der Matrix an den Kornoberflächen, vgl. [Geymayer 1994]. Auf der Suche nach dem „Ursprung der Festigkeit“ im Beton („The Origin of Strength in Concrete“, [Phileo 1966]), findet *Phileo*, dass für den Zusammenhalt der Zementmatrix vereinzelt chemische Bindungen und überwiegend intermolekulare Wechselwirkungen bzw. Adhäsionskräfte sorgen. Außerdem beeinflussen Mikrorisse und Mikro-Defekte aufgrund von lokalen Spannungskonzentrationen das Bruchverhalten und reduzieren die theoretische Festigkeit. Im Allgemeinen gilt, dass die Festigkeit vom W/B- Wert und vom möglichst geringen Gesamtporenvolumen abhängig ist und sich durch die Hydratation mit der Zeit entwickelt. Vgl. u.a. [Locher 1976] und [Dehn 2001] in [König 2001].

Hydratation

Unmittelbar nach dem Abmischen sind die Zementpartikel vom Anmachwasser umgeben und beginnen mit diesem oberflächlich zu reagieren. Es wachsen von der Oberfläche der Zementkörner blättrige und stabförmige Gebilde, sogenannte CSH-Phasen, in den wassergefüllten Kapillarraum ein (siehe Abbildung 2.14a).

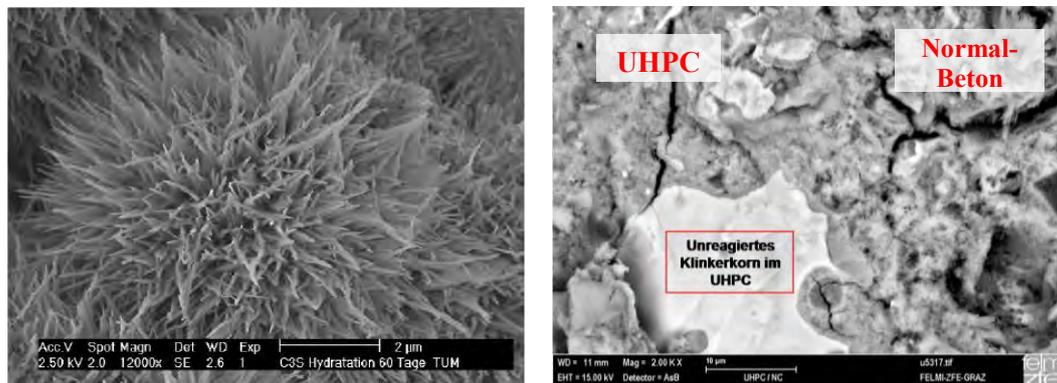


Abbildung 2.14: Elektronenmikroskopie von a) nadeligen CSH-Strukturen mit Nadel-Enden-Durchmesser ~ 30 nm (reines C_3S mit Wasser nach 2 Monaten, aus [Müller 2009]), b) Bruchfläche UHPC / Normalbeton, Betonalter 1 Jahr ([FELMI 2011], TU Graz)

Die CSH-Phasen neigen zur Bildung lamellenartiger oder eingerollter Folien¹⁴. Die spezifische Oberfläche wächst gewaltig an, von etwa $0,3-0,5$ m^2/g bei losem Zement auf etwa $200-300$ m^2/g (nach BET¹⁵) im vollhydratisierten Zementstein. Die Oberflächenzunahme und das Ausfüllen der Kapillarrohräume zwischen Körnern führen zum Erstarren und anschließend zum Erhärten des Zements. Man bezeichnet das Ergebnis manchmal auch als starres Gel (Xerogel, vgl. [Geymayer 1994]), in dem etwa 25% der Zementmasse an Wasser chemisch und ca. 15% physikalisch gebunden sind. Das Gel besteht aus Hydratationsprodukten, welche das chemisch gebundene Wasser enthalten und den Gelporen. Diese Poren sind spaltförmige Zwischenräume zwischen den lamellenartigen Hydratationsprodukten und enthalten das physikalisch gebundene Wasser mit einer Wasserfilmstärke von etwa 3 Wassermolekülen ($0,7$ nm), auf die starke Adsorptionskräfte (Van der Waals Bindungen) wirken.

¹⁴ Zementkörner bestehen aus Klinkermineralen – C_3S (Tricalciumsilikat, $3CaO \cdot SiO_2$), C_2S , C_3A , C_4AF – Freikalk CaO und Nebenbestandteilen. In der „keramischen Schreibweise“ wird CaO zu C, SiO_2 zu S, Al_2O_3 zu A und Fe_2O_3 zu F sowie Calciumhydroxid $Ca(OH)_2$ zu CH und Calciumsilika-hydrat $(n \cdot CaO) \cdot (m \cdot SiO_2) \cdot (k \cdot H_2O)$ zu CSH verkürzt. Mit Wasser entstehen aus den Klinkermineralen CSH variabler Zusammensetzung und CH als Portlanditkristalle. CH geht zum Teil in Lösung (Löslichkeit nur $1,7$ g/l bei 20 °C) und ist Mit-Ursache für die hohe Alkalizität der Porenlösung mit $pH=12-13$. $C_3S_2H_4$ gilt als durchschnittliche Zusammensetzung der CSH Phasen bei Normalerhärtung, vgl. [Stark 2000]

¹⁵ Bei der BET-Messung wird die (innere) Oberfläche von porösen Festkörpern mittels Gasadsorption (häufig mit Stickstoff) bestimmt. „BET“ steht dabei für die Nachnamen der Entwickler des BET-Modells, S. Brunauer, P. H. Emmett und E. Teller.

Beim Normalbeton befinden sich im Zementstein Reste von unhydratisierten Zementkörnern und größere Kristallite des entstandenen Kalziumhydroxids CH (Portlandit¹⁶ von etwa 50 µm Größe oder mehr). Das Gel wird von Kapillarporen durchzogen (10 nm bis 100 µm Durchmesser)¹⁷. Tatsächlich handelt es sich bei den CSH-Phasen nicht um ein Gel wie in der Kolloidchemie, sondern um nanokristalline Phasen, die stark fehlgeordnet sind, vgl. [Stark 2000]. Der zeitliche Verlauf der Hydratation ist in Abbildung 2.15 dargestellt.

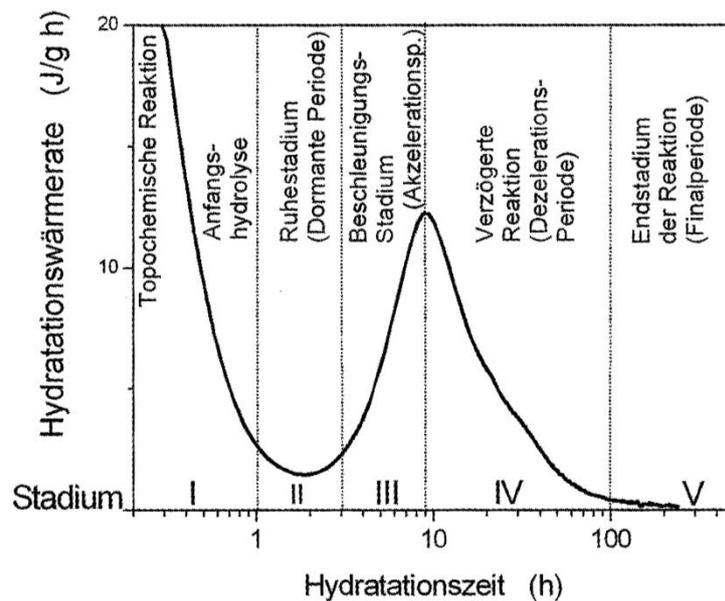


Abbildung 2.15: Reaktionsstadien der Hydratation von C_3S aus [Röhling 2009]

Die Zugabe von Mikrosilika (MS) sorgt für eine Änderung der Mikrostruktur von HPC und UHPC gegenüber Normalbeton. Dies kann auf zwei Effekte zurückgeführt werden, erstens die Füllung der Poren bzw. Zwickel zwischen der nächst größeren Kornklasse (i.a. Zement), zweitens die Bildung von zusätzlichen CSH-Phasen durch sekundäre puzzolanische Reaktion der reaktiven Kieselsäure (SiO_2 der MS) mit dem bei der Hydratation des Zements gebildeten Calciumhydroxid (CH) zu CSH. Die puzzolanische Reaktion wird durch eine Wärmebehandlung verstärkt bzw. beschleunigt und führt zu einer Verdichtung der Übergangszone zwischen Bindemittelmatrix und Gesteinskörnungen. Deshalb unterscheidet sich das Gefüge von UHPC vom Normalbeton, wie in Abbildung 2.14b auf Seite 28 sichtbar. Die Betonbestandteile (CSH-Phasen, Sandkörner, unreaktierte Klinkerbestandteile) sind in der Matrix sehr homogen verteilt, die Matrix ist extrem dicht und weist einen

¹⁶ Portlandit: hexagonale, tafelige Kristalle. chemisch $Ca(OH)_2$, Calciumhydroxid.

¹⁷ Die Porendurchmesser im Beton erstrecken sich über mehrere Größenordnungen, das sind 0,5 - 10 nm für sogenannte Gelporen, bis ~100 µm für Kapillarporen und ~1 µm bis 1 mm für Luftporen (vgl. [Stark 2000], p.260).

sehr dichten Verbund zwischen Matrix und Quarzkörnern auf, die Kontaktzone zwischen Sand und Matrix, wie vom Normalbeton bekannt, ist kaum feststellbar. Vgl. [Dugat 1996] zitiert nach [König 2001], und [Möser 2008].

Interfacial Transition Zone ITZ

Die Übergangszone zwischen Gesteinskorn und Zementstein, die so genannte *interfacial transition zone* (ITZ), stellt für Normalbeton eine Schwächezone bzw. eine Zone lokaler geringerer Dichte mit größerer Durchlässigkeit dar. Hier dringen Schadstoffe (Salze in wässriger Lösung) bevorzugt ein¹⁸.

An der Oberfläche von Gesteinskörnern aber auch von Fasern im Beton entwickelt sich im Zementstein eine andere Struktur als in seinem ungestörten Inneren. Die Zementkörner können sich an einer Grenzfläche nicht so dicht aneinander lagern wie im Inneren der Matrix („wall effect“). Wasser tendiert dazu, sich an der Kornoberfläche anzusammeln. Es ergibt sich lokal ein höherer W/Z-Wert (bzw. W/B-Wert). Auch die Hydratation selbst wird von der Grenzfläche beeinflusst. Vgl. [Maso 1996].

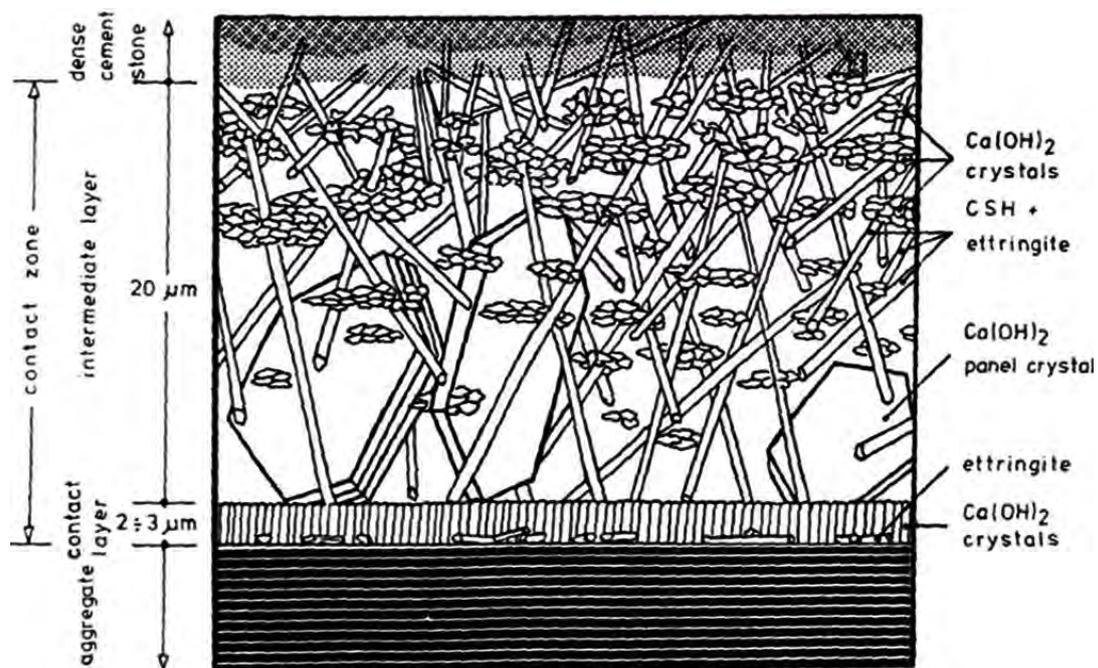


Abbildung 2.16: Aufbau der Interfacial Transition Zone im Normalbeton nach [Zimbelmann 1996] aus [Maso 1996]

Die ITZ hat eine geringere Dichte als der Zementstein und einen mehrschichtigen Aufbau. Am Gesteinskorn lagert sich subkristallines CH (ca 2-3 µm „Duplex Schicht“) an. CH

¹⁸ laut Prof. J.Tritthart, TU-Graz, Gesprächsnotiz vom 9.11.2007

scheidet sich offensichtlich aus einer übersättigten Lösung an der Kornoberfläche ab und kristallisiert bevorzugt dort aus. Eine weitere 10-50 µm dicke poröse Schicht, die „intermediate layer“ der Kontaktzone, mit großen, gerichteten CH-Kristallen folgt, sie enthält Etringit-Spuren und CSH-Phasen. Die ITZ geht kontinuierlich in die dichtere Zementmatrix über (siehe Abbildung 2.16). An Stahlfasern wird ein ähnlicher Aufbau der ITZ beobachtet. Vgl. [Maso 1996].

Beim HPC und UHPC ist die Übergangszone wesentlich dichter als bei Normalbeton, was neben der allgemein verringerten Porosität vornehmlich auf die hydraulische Wirkung und Füllerwirkung von Mikrosilika zurückgeführt wird. Mikrosilika kann als Fraktion mit dem kleinsten mittleren Korndurchmesser Kornzwischenräume größerer Körner des Ausgangsgemisches auffüllen und lokale Wasseranreicherungen verhindern. Während der Hydratation entfaltet es seine latent hydraulische Wirkung. Ein Schichtaufbau der ITZ ist bei UHPC im REM nicht mehr sichtbar. Vgl. [Maso 1996], [Möser 2008].

2.6.2 Verbund von Beton bzw. UHPC mit Klebern

Aufgeklebte CFK-, GFK- und Stahllamellen und chemische Anker

Die Verbundmodelle und Bemessungsregeln für Verstärkungen von Stahlbeton mit CFK-, GFK- und Stahllamellen, die mit auf Epoxidharz basierenden Klebern aufgeklebt werden, sind an die Bemessung des Verbundes von Stahl im Beton angelehnt. Eine Vielzahl von (analytischen) Berechnungsregeln bzw. Herangehensweisen bei der Bemessung der aufnehmbaren Festigkeiten ist in [fib 2000] aufgelistet. Es existieren auch normative Regeln in Japan, Kanada und USA sowie Einzelzulassungen in vielen anderen Ländern. Die Regelungen basieren auf Parametern, die experimentell bestimmt werden müssen, meist die ganze Verbindung oder das System beschreiben und oft produktbezogen sind. Adhäsionsmechanismen und deren chemisch-physikalische Wirkung werden meist nicht eigens betrachtet oder ausgewiesen.

Bei sogenannten chemischen Verbundankern im Beton – es handelt sich um Stahldübel in Bohrlöchern im Verbund mit Klebern, meist auf Epoxidharz-Basis – werden Zug- und Schubkräfte durch eine Kombination von (mikro-)mechanischer Verklammerung und Adhäsion übertragen, vgl. [Eligehausen 2006].

Kleben von UHPC

Untersuchungen zum „Fügen von Bauteilen aus UHPC durch Verkleben“ wurden an der Uni Kassel durchgeführt. Gemäß [Schmidt 2007] kann der Verbund von Beton und Klebstoff prinzipiell auf vier Mechanismen beruhen: mechanische Adhäsion durch das Eindringen des Klebstoffs in größere Poren des Substrates, die Autoadhäsion als eine mechanische Verzahnung auf molekularer Ebene durch in beide Richtungen diffundierende Moleküle und physikalische Bindungen (elektrostatische Wechselwirkungen polarer Gruppen bzw. van-der-Waals-, Dipol- und Induktionskräfte sowie gegebenenfalls Wasserstoff-

brückenbindungen). Außerdem besitzen Betonoberflächen eine große Zahl reaktiver Endgruppen (silikatische OH-Gruppen), die auch für eine chemische Bindung mit dem Klebstoff infrage kommen. Übliche Epoxidharze können jedoch nicht mit diesen funktionellen Gruppen reagieren.

Das Ergebnis der experimentellen Untersuchungen an geklebten UHPC-UHPC Verbindungen war, dass die Festigkeit der Klebverbindungen annähernd der Zugfestigkeit der UHPC-Matrix entsprach ($6-7 \text{ N/mm}^2$), vgl. [Krelaus 2008]. Die Prüfkörper versagten überwiegend durch einen Kohäsionsbruch im fugennahen Beton. *Freisinger* dokumentiert, dass UHPC für das Kleben gut geeignet ist und der Verbund verbessert wird, wenn die geschalte Oberfläche durch Sandstrahlen vorbehandelt wird, vgl. [Freisinger 2008].

UHPC als Kleber

Von *Mühlbauer* wird das Kleben von UHPC mit einem Epoxidharzkleber und einem speziellen, besonders feinen RPC¹⁹ als Kleber („high-strength mineral adhesive“) vergleichend untersucht. Die Verbundfestigkeit unter kombinierter Belastung aus Normal- und Schubkraft wird an Verbundproben mit unter verschiedenen Winkeln geneigten Fugen geprüft. Außerdem werden einige Haftzugversuche (Abreißfestigkeit) durchgeführt. Verschiedene Einflüsse, wie die Oberflächenvorbehandlung (Sandstrahlen), unterschiedliche Lagerungsbedingungen und Langzeit- sowie dynamische Belastungen und unterschiedliche Typen des UHPC werden berücksichtigt. Die experimentellen Ergebnisse zeigen in der noch nicht abgeschlossenen Forschungsarbeit die prinzipielle Eignung von RPC als Kleber für UHPC. Auf chemische, physikalische und geometrische Adhäsionsmechanismen wird nicht eingegangen. Vgl. [Mühlbauer 2010], [Mühlbauer 2008].

2.6.3 Beton-Beton Verbund, zementgebundene Beschichtungen

Zwangs-Spannungen zufolge klimatischer Einwirkungen und behindertem Schwinden

Die Arbeit von *Haardt* [Haardt 1991] ist grundlegend für das Verständnis der Zwangs-Spannungen in zementgebundenen und kunststoffvergüteten Beschichtungen auf Normalbeton, die bei Kurz- und Langzeitbeanspruchungen der Verbundfuge entstehen. In einer Reihe von FEM-Rechnungen mit linear-elastischem und nichtlinearem Materialverhalten und Variation der Parameter (Steifigkeitsverhältnisse, Materialparameter, Belastungen) werden Spannungsverläufe ermittelt und die Bedingungen für die Ablösung von Reparaturschichten vorhergesagt. Ergänzend werden Materialparameter und das Verbundverhalten experimentell untersucht.

Deutlich wird unter anderem, wie stark Zwängungsspannungen durch behindertes Schwinden die Beschichtungen beanspruchen. Horizontale Zugspannungen, die zu vertikalen

¹⁹ RPC, reaktive powder concrete ist der von den französischen Entwicklern geprägte Begriff für einen feinkörnigen UHPC mit Größtkorn bis 0,6 mm Durchmesser

len Rissen in der Beschichtung führen können, werden in einer Verbundzone einer definierten Länge l_e ausgehend von den freien Rändern über Schubspannungen eingeleitet. In dieser Zone treten neben Schubspannungen auch Komponenten senkrecht zur Fuge auf, die die Beschichtungen vom Rand her ablösen wollen. Die Größe dieser Spannungen wird in Abhängigkeit von den wichtigsten Eingabeparametern ermittelt. Siehe auch Abbildung 2.17 und Abbildung 2.18.

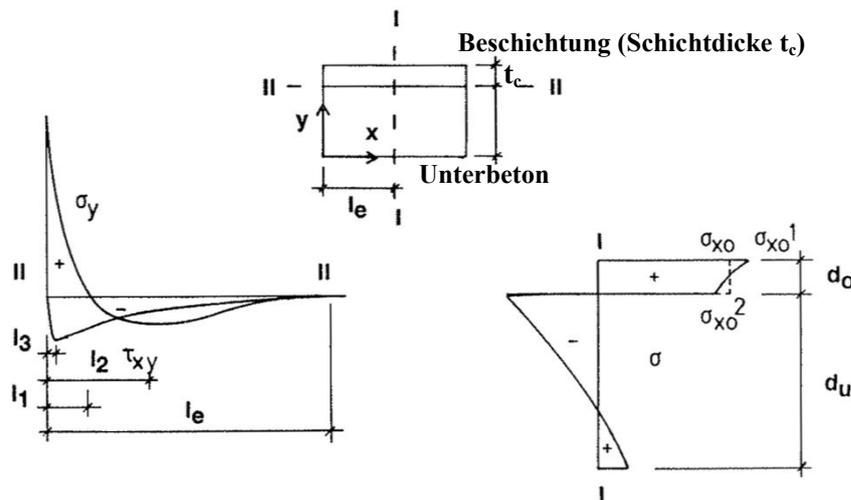


Abbildung 2.17: Spannungsverlauf in Beschichtung, Unterbeton und Verbundfuge bei Zwangsbeanspruchung; $l_e \approx 4 \cdot t_c$, $l_1 = 0,8 \div 1,2 \cdot t_c$, $l_2 \approx 2 \cdot t_c$, $l_3 \approx 0,1 \cdot t_c$ aus [Haardt 1991]

Rissbildung und Ablösung, Verhalten der grenzflächennahen Zone von zementgebundenen Beschichtungen

Ein Ansatz zur korrekten Bemessung von Beschichtungssystemen auf Stahlbetonbauwerken wird von *Martinola* vorgeschlagen, vgl. [Martinola 2000]. Mit Hilfe eines numerischen Modells werden die Spannungszustände aus Zwangs- und Eigenspannungen aufgrund hygrischer (endogenes- und Trocknungsschwinden, Kriechen) und thermischer Gradienten sowie mechanischer Belastungen in beschichteten Betonkonstruktionen mit der FEM berechnet. Es werden zeit- und feuchtigkeitsabhängige, temperaturabhängige Werkstoffmodelle der nichtlinearen Diffusionstheorie angewandt. Die Rissbildung und Rissausbreitung wird mit diskreten und verschmierten Rissmodellen der nichtlinearen Bruchmechanik berechnet. Werkstoffeigenschaften werden experimentell direkt oder indirekt für unterschiedliche Beschichtungswerkstoffe und den Betonuntergrund bestimmt. Die relevanten Werkstoffparameter, die die schwindinduzierte Rissbildung beeinflussen, wurden mit einer Parameterstudie identifiziert.

Die nötigen Parameter zur Beschreibung des mechanischen Verhaltens der Grenzfläche (Delaminationsprozess) im numerischen Modell sind in den zwei Phasen der Rissbildung (Dekohäsionsphase und Propagationsphase, vgl. [Martinola 2000], p.67):

- Anfangssteifigkeit in Normal- und Tangentialrichtung
- Adhäsionsfestigkeit
- Bruchenergie der Grenzfläche
- Entfestigungsfunktion
- Schubwiderstandsfaktor
- Druckfestigkeit der Beschichtung
- maximale Rautiefe der Grenzfläche (für „aggregate interlock“-Modell in Rissausdehnungsphase)

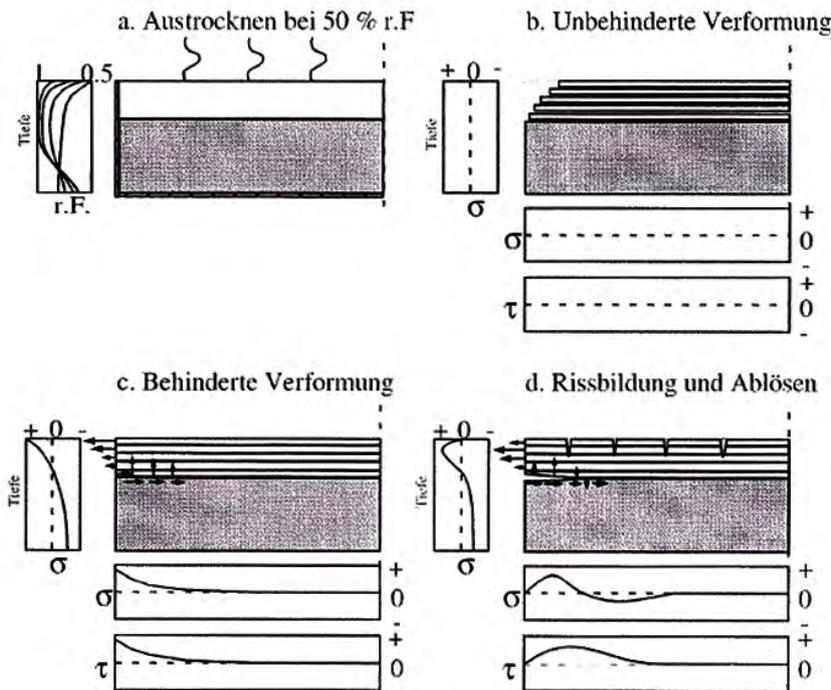


Abbildung 2.18: Spannungsverteilung und Rissbildung in einem austrocknenden Verbundsystem von Beschichtung und Untergrundbeton aus [Tausch 2000]

Die aus einer Parameterstudie resultierenden, bezüglich Rissneigung empfindlichsten Werkstoffparameter sind der hygrische Ausdehnungskoeffizient (respektive der thermische Ausdehnungskoeffizient), die Bruchenergie und der E-Modul, vgl. [Martinola 2000].

In einer Arbeit zum ähnlichen Thema mit dem Titel „Verhalten der grenzflächennahen Zone von Instandsetzungs- und Schutzsystemen für Stahlbeton“ am selben Institut wird mit

demselben numerischen Modell die Mechanik der grenzflächennahen Zone weiter untersucht. Für einige praxisrelevante Belastungsfälle werden verschiedene Einflüsse (Untergrundrauigkeit, Vornässen, materialtechnologische Einflüsse) evaluiert. Ein Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der experimentellen Bestimmung von Werkstoff- bzw. Verbundkenngrößen für einige Varianten von zementgebundenen Beschichtungen auf Beton. Insbesondere werden hygrische Kenngrößen, bruchmechanische Kenngrößen, Haftzugfestigkeiten (asymmetrischer Keilspaltversuch) und Haftschubfestigkeiten („Doppel-L-förmiger Probekörper“) bestimmt. Vgl. [Trausch 2000] und Abbildung 2.18.

Haftverbund in Betonschubfugen - Adhäsionstragfähigkeit

Zum Beton-Beton Verbund existiert eine große Zahl von Forschungsarbeiten, die meist empirischen Charakter haben. In den Normen schlagen sich vereinfachende Bemessungsansätze für Schubfugen nieder, vgl. [ÖNORM EN 1992]. Zwei einzelne Parameter (c /Kohäsion, f_{ctd} /Zugfestigkeit des schwächeren der beteiligten Betone) genügen aber nicht, um die Potentiale des Adhäsionstraganteils sicher zu bestimmen und auszunutzen, vgl. [Zilch 2009]. Wie *Zilch* ausführt, ist der Beton-Beton-Verbund von vielfältigen Faktoren und deren Zusammenwirken abhängig. Aktuelle Forschungstätigkeiten an der TU München zielen deshalb darauf ab, die maßgebenden Aspekte des Beton-Beton-Verbundes zu identifizieren und aufzuklären. Als wichtigste Parameter nennt er die Rauheit, den Feuchtegradienten, die Wechselwirkung des Fließmittels mit dem Bindemittel und weist auf die in der Verbundfuge wirkenden Zwängungen hin, die als zusätzliche Einwirkungen beachtet werden müssen. Vgl. auch [Lenz 2010].

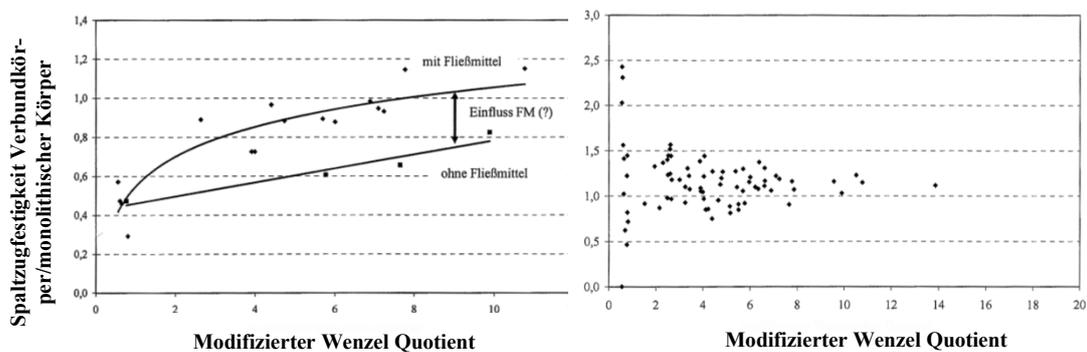


Abbildung 2.19: a) Einfluss der Oberflächenrauheit (Wenzel-Quotient=wahre Oberfläche) und der Fließmitteldosierung im Neubeton auf die Verbundfestigkeit zum Altbeton, b) Korrelation der Verbundfestigkeit (aus Spaltzugprüfung an Verbundkörpern) mit dem Wenzel Quotienten, aus [Müller 2008]

Die Oberflächentopografie wird mit der Rautiefe alleine nicht hinreichend beschrieben, zumindest der Wenzel-Quotient und weitere Formfaktoren sind zu berücksichtigen (vgl. [Zilch 2003], [Reinecke 2004]).

Müller fand heraus, dass nicht die kleinere der beiden Beton(zug-)festigkeiten den Haftverbund maßgeblich bestimmt, sondern die Kombination der beiden (hochfester Altbeton - normalfester Ergänzungsbeton und umgekehrt, inkl. UHPC; mit vornehmlich durch Hochdruckwasserstrahlen aufgerauten Oberflächen), was unter anderem auf die Struktur der Grenzflächenzone zurückgeführt werden kann. Er weist außerdem auf die Bedeutung der Fließmittelzugabe hin und findet heraus, dass fließfähige (SCC-) Betone bei gleicher Festigkeit höhere Verbundfestigkeiten ergeben, Abbildung 2.28a. Das wird darauf zurückgeführt, dass die fließfähigeren Betone besser benetzen und die wirksame Oberfläche größer ist. In erster Näherung korrespondiert die wirksame Oberfläche (= Kontaktfläche) mit dem Wenzel Quotienten bzw. der wahren Oberfläche, Abbildung 2.28b. Die große Streuung der Spaltzugfestigkeiten bei geringen (gemessenen) Wenzel Quotienten kann unter anderem auf die zu geringe Auflösung und auf große Zwangsspannungen zurückgeführt werden. *Müller* weist auf die Problematik hin, dass die ermittelte „wahre Oberfläche“ von der Auflösung des Messverfahrens abhängt. Da durch Strahlverfahren aufgeraute Oberflächen ähnlich wie natürliche Oberflächen einen fraktalen Charakter haben, steigt die gemessene Fläche mit der Auflösung des angewendeten Messverfahrens. Vgl. [Müller 2009], [Müller 2008].

konstruktive Elemente mit UHPFRC-Schichten, UHPC-Aufbeton

Experimentelle, numerische und analytische Untersuchungen wurden unter anderem von *Habel* und *Brühwiler* an Beton-Bauteilen durchgeführt, die mit einer Schicht von grobkörnigem UHPFRC verstärkt wurden, vgl. [Habel 2005], [Habel 2004]. Es wurden auch bereits prototypische Anwendungen in Instandsetzungsprojekten umgesetzt. Zum Langzeitverhalten und Bruchverhalten von solchen Bauteilen wird unter anderem gesagt, dass

- UHPFRC unter Gebrauchslasten oft im linear elastischen Bereich bleibt oder verteilte und aufgrund der Fasern sehr feine Haarrisse ($< 50 \mu\text{m}$) ausbildet
- keine Ablösung in der Grenzschicht infolge zeitabhängigen Verhaltens stattfindet [unter den untersuchten bzw. simulierten Bedingungen, Anm. d.V.]
- autogenes Schwinden des UHPFRC (vorwiegend aufgrund von „Selbstaustrocknung“) hauptverantwortlich für zeitabhängige Verformungen ist. Erst bei einem simulierten Wert von $1000 \mu\text{m/m}$ werden Ablösungen bzw. die Entstehung von Haarrissen errechnet.
- die Viskoelastizität entscheidend dazu beiträgt, Eigenspannungen abzubauen
- die mechanischen Kennwerte des UHPFRC nach 90 Tagen konstant bleiben (Hydrationsreaktion stoppt infolge Wassermangel)
- Ablösungen erst entstehen, wenn die Maximallast erreicht ist und lokalisierte Risse die Grenzschicht erreichen.

UHPC mit Fasern vergrößert die Steifigkeit in den betrachteten Bauteilen und verzögert die Bildung lokalisierter Risse aufgrund eines verfestigenden Verhaltens unter Zug.

Im Ausblick ihrer Arbeit weist *Habel* darauf hin, dass die Grenzflächenzone „der kritische Bereich“ von UHPFRC-Beton Bauteilen ist. „Ein Modell sollte entwickelt werden, um das Risiko einer Ablösung sowohl ohne lokalisierte Makro-Risse wie auch mit Makro-Rissen, die die Schicht durchdringen und die Grenzfläche erreichen, vorhersagen zu können.“, [Habel 2004], p.157.

Auf das große Anwendungspotential von UHPC als Aufbeton wird in der Literatur mehrfach hingewiesen, vgl. u.a. [Schmidt 2010a], [Brühwiler 2008], [Freytag 2004a].

2.6.4 Haftung von Stahl und Beton

Der Anteil des Adhäsions-Verbundes am Tragvermögen von Bewehrungsstahl mit Beton wird als gering eingeschätzt. Weil die Dauerhaftigkeit dieses Anteils nicht sicher scheint, wird er gar nicht berücksichtigt. Glatte Stähle haben demnach kein nennenswertes Haftvermögen im Normalbeton. Vgl. [Leonhardt 1984].

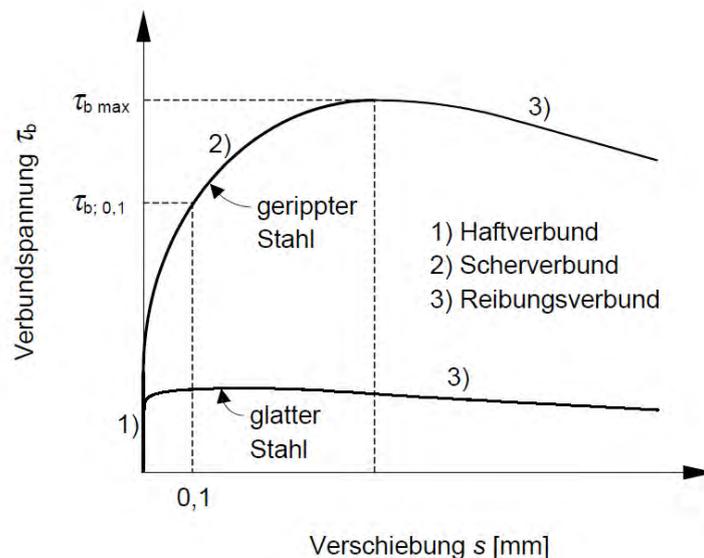


Abbildung 2.20: Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung für Stahlbeton nach [Rehm 1961] aus [Leutbecher 2008]

Für die das Verbundmodell von geripptem Bewehrungsstahl mit Beton existiert umfangreiche Literatur. Für UHPFRC wurde es von [Leutbecher 2007] und [Jungwirth 2006] beschrieben.

In klassischen Verbundkonstruktionen wird der Adhäsionsanteil ebenso vernachlässigt und der Verbund durch Verbundmittel (Kopfbolzendübel etc.) gewährleistet. Neue Ansätze beruhen darauf, den Haftverbund zwischen Stahl und Beton-Fertigteilen, auch aus UHPFRC, durch raue Oberflächen und einen hochfesten Mörtel als Verbundvermittler zu gewährleisten und zu nutzen, vgl. [Thomann 2007], [Thomann 2008].

Beton gefüllte Stahlrohre oder -pfähle nutzen den Schubverbund aufgrund von Adhäsion und vor allem mechanischer Verklammerung, vgl. [König 2003], [Lohaus 2006].

Für den Scherverbund glatter Stahlfasern im UHPC werden experimentell große Verbundfestigkeiten gefunden (Ausziehversuche an Einzelfasern mit $\eta_{\max}=14$ N/mm² gemäß [Schmidt 2008]). In [Chan 2004] wird ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Mikrosilikagehalt und der Haftung gefunden. Ein MS-Gehalt von etwa 20-30 Masse-%²⁰ bezogen auf den Zement stellte sich für die Haftung von glatten Stahlfasern im UHPC als optimal heraus.

2.6.5 Haftung von Beton und Glas

Zur Verbundwirkung von Glas und Beton finden sich Ausführungen in [Freitag 2002]. Bei Glasbausteinen bzw. Betongläsern wird Glas in frischen Beton oder bei zur Oberflächenveredelung eingelegtem Glas in polymermodifizierten Mörtel eingesetzt. Da die dabei erzielte (geringe) Haftfestigkeit für statisch beanspruchte Bauteile nach den existierenden Normen nicht genutzt werden kann, wird der Haftverbund vernachlässigt.

In der von Freitag entwickelten Glas-Beton-Verbundbauweise ([Freitag 2002], Abbildung 1.1b, Seite 1) wird der optimale (Schub-)Verbund durch UHPC mit einer Email-Schicht, in die Quarzsand eingearbeitet ist, erreicht (mittlere Schubverbundfestigkeit rund 8 N/mm²). Festigkeitswerte abhängig von Betongüte und Oberflächenvorbehandlung, die in einem Glas-Beton-Verbundversuch ermittelt wurden, werden angegeben. Auf Haftmechanismen und -parameter ging *Freitag* nicht ein. Sie wurden deshalb zum zentralen Thema der vorliegenden Arbeit.

2.7 Schwinden, Zwangsspannungen und Rissbildung

Wegen des großen Einflusses des Schwindens und der Rissbildung auf die Adhäsionsfestigkeit von UHPC wird auf dieses Thema hier näher eingegangen.

2.7.1 Allgemeines zum Schwinden von Beton und UHPC

Als „Schwinden“ und „Quellen“ werden gemäß *Grube* Volumenänderungen des porösen Baustoffs Beton bezeichnet, die ohne den Einfluss äußerer Last durch Veränderung des Wasserhaushalts stattfinden, vgl. [Grube 1991], p.9. Die Volumenänderungen können rein physikalischer Natur sein (reversible Adsorption und Desorption von Wasser (siehe Abbildung 2.21)). Sie können aber auch chemischer Natur sein und irreversibel. Während der Hydratation verändern sich die Porenstruktur, die Bindungskräfte zwischen den Hydraten und der Wasserhaushalt, da Wasser chemisch an die Zementbestandteile gebunden wird.

²⁰ Das entspricht 20 bis 30 Vol.% Mikrosilika bezogen auf den Stoffraum von Zement+Quarzmehl

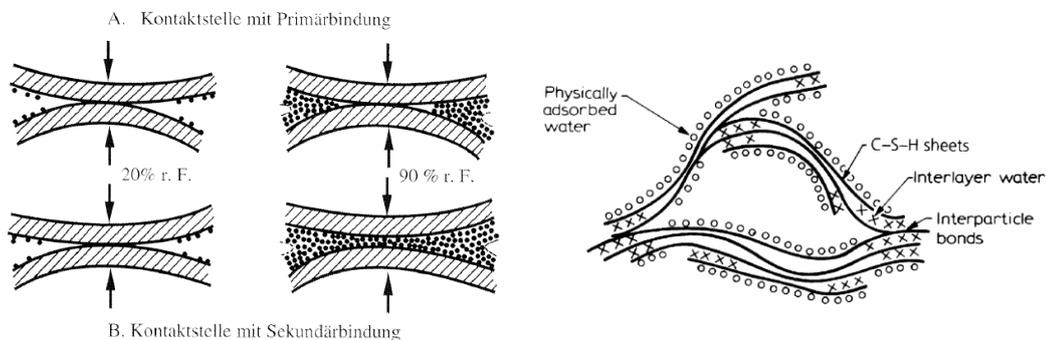


Abbildung 2.21: a) schematische Darstellung zweier Kontaktstellen zwischen Gelteilchen mit unterschiedlichen Bindungskräften im Beton abhängig und Einfluss der Umgebungsfeuchte aus [Tausch 2000] nach [Wittmann 1977], b) Vereinfachtes Zementsteinmodell aus [Habel 2004] nach [Feldmann 1968]

Das Schwinden wird meist durch das eindimensionale, lineare Schwindmaß $\varepsilon_s(t)$ angegeben. Die Schwindverformungen sind zeitlich veränderlich und streben bei konstanten Umgebungsbedingungen einem Endschwindmaß $\varepsilon_{s,\infty}$ zu. Man unterscheidet vier verschiedene Arten des Schwindens, vgl. [Grube 1991], p.10 ff:

1. **Schwinden durch Kapillarkräfte** im frischen, noch verarbeitbaren Beton. Bezeichnet als „Kapillarschwinden“, „Frühschwinden“, „plastisches Schwinden“ (oder auch „Erstarrungsschwinden“ [Fontana 2007], p.24). Es kann zu Rissen im Frischbeton in den ersten Stunden führen²¹.
2. Schwinden des erhärtenden Betons in Verbindung mit dem „chemischen Schrumpfen“ bei der Hydratation. Das **chemische Schwinden**²² und die thermische Volumenänderung werden in der angelsächsischen Literatur auch als „autogeneous shrinkage“ bezeichnet. König setzt in [König 2001], p.42, chemisches Schwinden und **autogenes Schwinden** gleich. Schachinger spricht in [Schachinger 2002] von autogenen Verformungen als der Summe von autogenem und chemischem Schwinden. In diesem Zusammenhang wird auch der Begriff „Selbstaustrocknung“ verwendet, vgl. [Fontana 2007], p.23ff. siehe unten.
3. **Schwinden durch Austrocknung**, „Trocknungsschwinden“ des Festbetons. Es hängt stark von den Umgebungsbedingungen und dem Anteil an austrocknender Oberfläche zum Gesamtvolumen ab. Bei Normalbeton unter Standard-

²¹ In der Betonbaupraxis kommt das Frühschwinden durch mangelnde Nachbehandlung zustande, die zu rascher oberflächlicher Austrocknung führt. Netzartige Schwindrisse können Rissbreiten > 1 mm haben, vgl. [VDZ 2006].

²² Wenn 100 g Portlandzement voll hydratisieren verliert die Zementpaste rund 6 cm^3 Volumen. (10-12 Vol %) Auch die puzzolanische Reaktion von MS verursacht eine Volumenverringerng, etwa um $20 \text{ cm}^3/100\text{g}$ reagierter Miskrosilika (15 Vol. %), vgl. [Fontana 2007], p.24.

Klimabedingungen (80% r.F. bzw. 50% r.F.) nähert sich das Schwindmaß asymptotisch dem Endschwindmaß an, das messbare Schwinden kommt praktisch erst nach 1000 Tagen zum Stillstand.

4. Schwinden durch Carbonatisierung des Festbetons

Unterschiedliche Lagerungsbedingungen (Umgebungsfeuchte) haben nach [Stark 2000], p.267, eine starke Wirkung auf das Schwindmaß. Je später die Austrocknung beginnt, desto geringer ist das gesamte Schwindmaß (beispielsweise 1,1 mm/m nach 1000 Tagen bei sofortiger Austrocknung, 0,5 mm/m bei 400 Tagen unter Wasser und anschließender Luftlagerung für 600 Tage).

Abbildung 2.22 zeigt schematisch, wann es durch behindertes Schwinden aufgrund von Zwangs- und zusätzlichen Lastspannungen im Allgemeinen zu Rissen kommen kann. Bei hochfesten und ultrahochfesten Betonen gewinnt das Autogene Schwinden AS gegenüber dem Trocknungsschwinden des Festbetons an Bedeutung. Erstens nimmt das autogene Schwinden mit zunehmendem Zement- und Mikrosilikagehalt und geringerem W/B Wert zu. Zweitens wird davon ausgegangen, dass bei (U)HPC eine geeignete Nachbehandlung des Betons in den ersten Stunden, speziell bei Fertigteilanwendungen, durchgeführt wird. Die Carbonatisierung geht bei UHPC extrem langsam voran, betrifft nur oberflächliche Randzonen und kann betreffend die Fragestellung dieser Arbeit vernachlässigt werden.

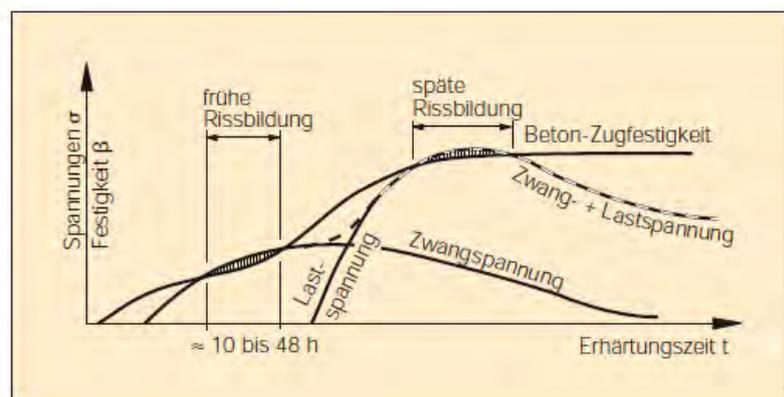


Abbildung 2.22: Entwicklung der Betonzugfestigkeit sowie Entstehen von Zwangs- und Lastspannungen in Bauteilen aus jungem Beton aus [VDZ 2006]

2.7.2 Autogene Verformungen

Das *Japanese Committee on autogeneous shrinkage* definiert AS als makroskopische Volumenverringerng von zementösen Materialien während der Zementhydratation ab dem „initial setting“ (Erstarrungsbeginn). AS kann als die Kombination von chemischem Schwinden und Selbstaustrocknung unter konservierenden (dicht abgeschlossene) und isothermen Bedingungen aufgefasst werden, vgl. [Ma 2003b].

„Selbstaustrocknung ist die Reduktion der inneren relativen Feuchte eines abgeschlossenen Systems, wenn durch Wasserverbrauch Porenräume entstehen“, übersetzt nach [Bentur 2003]. Während vor der Erstarrung die innere Volumenverringerung in der Regel in eine äußere Verformung des Systems umgesetzt wird, ist die äußere Verformung des „festen“ Körpers nach der Erstarrung nicht mehr möglich und das chemische Schwinden erzeugt innere gasgefüllte Hohlräume. Die Bildung dieser Hohlräume wird als Selbstaustrocknung bezeichnet, da freies Kapillarwasser verbraucht wird. Mit der Selbstaustrocknung sinkt auch die relative Feuchtigkeit (RF) im Porenraum. In zementgebundenen Systemen sinkt die RF bei versiegelter Lagerung nicht unter rd. 75%. Die Selbstaustrocknung kann als Abnahme des Sättigungsgrades der Poren im Zementstein dargestellt werden. Vgl. [Fontana 2007], p.24-25.

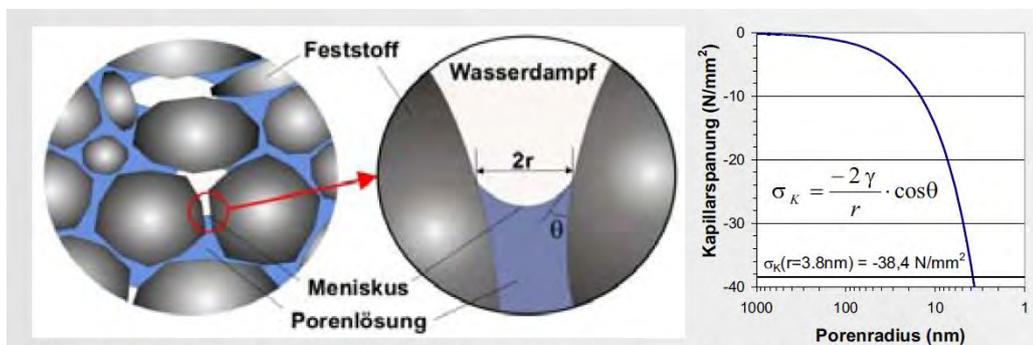


Abbildung 2.23: Schematische Darstellung des Meniskus in einer teilgesättigten Pore und der kapillaren Zugspannungen (Kapillardruck) in Abhängigkeit vom Porenradius r , der Oberflächenspannung γ und dem Benetzungswinkel θ , aus [Fontana 2007].

Durch die Selbstaustrocknung bilden sich Flüssigkeit-Gas-Menisken in den teilgesättigten Poren und es entstehen Zugspannungen in der Porenflüssigkeit bzw. ein messbarer Unterdruck. Wie groß die kapillaren Zugsspannungen im Verlauf der Hydratation werden, hängt von der Porenstruktur und vom Sättigungsgrad der Poren ab. Sie können unter der vereinfachenden Annahme zylindrischer Poren mit Hilfe der Gesetze von Laplace und Kelvin als Funktion des Porenradius bzw. der relativen Feuchtigkeit im gasgefüllten Porenraum über dem Meniskus abgeschätzt werden (siehe Abbildung 7.11). Die kapillaren Zugspannungen werden über die Porenwände auf den Feststoff übertragen und komprimieren diesen.

Der Porenraum ist zunächst nach Herstellung und Einbringen des Betons wassergesättigt. Bei der Austrocknung werden von den größten Poren ausgehend immer kleinere Poren geleert. Die Gelporen ($\text{\O} 10 \text{ nm}$) bleiben unter normalen Hydratationsbedingungen stets wassergefüllt. In Poren mit einem Durchmesser größer als 50 nm ist die Kapillarspannung zu klein, um Verformungen des Festkörpergerüsts hervorzurufen, während sich in Poren mit einem Durchmesser kleiner als $2,5 \text{ nm}$ kein Meniskus mehr formen kann. Abhängig von der relativen Feuchtigkeit im Porenraum existiert ein größter Radius der noch wasser-

gesättigten Pore. Bei 75%RF werden Poren mit einem Radius über 3,8 nm geleert. Dabei entsteht theoretisch eine kapillare Zugspannung von bis zu $38,4 \text{ N/mm}^2$ (siehe Abbildung 7.11). In den Ergebnissen seiner Arbeit zeigt *Fontana*, dass das autogene Schwindverhalten nach dem für Bindemittelleime mit niedrigen w/b-Werten typischen starken Anfangsschwinden mit der Selbstaustrocknung und den dadurch zu erwartenden Kapillarspannungen korreliert. Die errechneten Kapillarspannungen in erhärtenden Bindemittelleimen mit Mikrosilika (W/B=0,27) zum Beispiel betragen 7 Tage nach der Wasserzugabe rund 8 N/mm^2 , vgl. [Fontana 2007].

Laut *Fontana* werden in der überwiegenden Zahl der Veröffentlichungen zu autogenen Verformungen von Hochleistungsbetonen in den letzten Jahren kapillare Zugspannungen als der Hauptmechanismus bei der frühen Rissbildung genannt.

Es soll erwähnt werden, dass im sogenannten Münchner Modell [Wittmann 1977] der „Spaltdruck“ für die hygri-schen Verformungen des Zementsteins oberhalb von etwa 40%relativer Feuchtigkeit verantwortlich gemacht wird, vgl. Abbildung 2.21a. Ist der Abstand zwischen zwei Feststoffoberflächen kleiner als die Dicke zweier frei adsorbierter Wasserschichten (das sind ca. 4 Moleküldurchmesser $\approx 1 \text{ nm}$), wird die Adsorption behindert und es entsteht ein Spaltdruck (disjoining pressure). Gemäß [Stark 2000], p.266, kriecht das Wasser unter die Berührungsflächen der Gelpartikel und der Spaltdruck ist größer als die van der Waal'sche Kräfte, die zwischen diesen Gelpartikeln wirken. Das Volumen nimmt infolge Quellung zu. Das sei die Ursache dafür, dass wassergelagerte Betonproben nur etwa 90% der Druckfestigkeit von luftgelagerten Proben erreichen.

Gemäß neueren Forschungen ist der „disjoining pressure“ hauptverantwortlich für das Schwinden und die hygri-sche Ausdehnung in zementgebundenen Materialien auch bei RF größer als 50%. Die Porenlösung kann in den Gelporen von wenigen Nanometern Durchmesser nämlich keine kapillaren Menisken ausbilden. Vgl. [Beltzung 2005]

2.7.3 Zwangsspannungen und behinderte Verformungen von UHPC

Die Verkürzung infolge von Schwindverformungen oder Abfließen der Hydratationswärme kann durch einen steifen Untergrund ganz oder teilweise behindert werden. Die Größe der resultierenden Zwangsspannungen hängt von der Verformung, dem Behinderungsgrad und dem statischen E-Modul zum jeweiligen Zeitpunkt ab. Der Verlauf der Zwangsspannungsentwicklung entspricht qualitativ dem Verlauf der gemessenen Schwindverformungen, vgl. Abbildung 2.24. Untersuchungen von *Schachinger* zeigen, dass die große anfängliche Schwindverformung verschiedener UHFB mit Portlandzement (CEM I 42,5 R-HS) nach 12 Stunden trotz des noch geringen E-Moduls zu einem Ansteigen der Zwangsspannungen (zentrischer Zug) auf den hohen Wert von $1,3 \text{ N/mm}^2$ führt. Die Auswertung ergab, dass bei den UHFB mit Portlandzement die Reißneigung in den ersten 9 bis

13 Stunden sehr hoch war²³. Bei Einsatz eines FM mit sehr geringer Verzögerung, also einem frühen Zeitpunkt der Erstarrung, kam es zur Bildung von Trennrissen. Vgl. [Schachinger 2002], [Schachinger 2007].

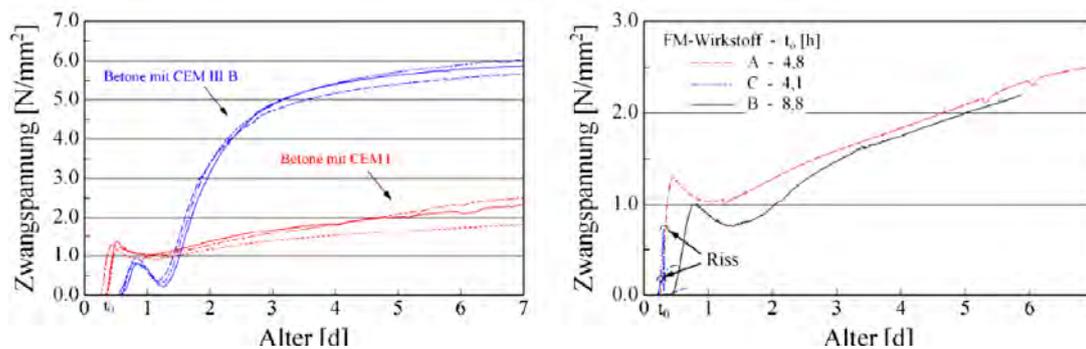


Abbildung 2.24: Entwicklung von Zwangsspannungen von UHPC im starren Reißrahmen abhängig von der Zementart und dem Erstarrungszeitpunkt aus [Schachinger 2002]

Gemäß [Röhling 2009], p.157 führen in jener Periode der Erhärtung, in der die Zugbruchdehnung ein Minimum erreicht, schon geringe Dehnungen zu Rissen. Mit dem Beginn der Erstarrung und Verfestigung nimmt die Zugbruchdehnung zunächst kontinuierlich und schnell ab und erreicht ein Minimum nach 8 bis 12 Stunden Erhärtungszeit. Kennzeichnend ist dabei ein ungünstiges Verhältnis zwischen dem sich rasch überproportional entwickelnden E-Modul und der noch niedrigen Zugfestigkeit, das auch als „Sprödigkeit“ bezeichnet wird. Mit der weiteren Erhärtung bzw. Festigkeits- und E-Modulentwicklung steigt die Zugbruchdehnung wieder.

Da es sich bei der Zwangsbeanspruchung um eine kontinuierlich wachsende und länger andauernde Beanspruchung handelt, spielt das Relaxations- und Kriechverhalten sowie die Dauerstandfestigkeit bei der Beurteilung der Reißneigung eine wesentliche Rolle. Gemäß Schachinger [Schachinger 2007], p.129, bauen sich innerhalb des ersten Tages bei UHFB mit Portlandzement rund 90% der Zwangsspannungen durch Relaxation und Kriechen ab²⁴.

²³ Der von Schachinger [Schachinger 2007] verwendete UHPC mit Portlandzement CEM I 42,5 R HS ähnelt in der Variante mit dem geringsten Mikrosilika-Gehalt der eigenen Mischung EM. Er wird mit demselben Zement, feinkörnig und ohne Fasern hergestellt.

²⁴ Kriechen und Relaxation sind Phänomene des viskoelastischen Verhaltens von Beton und werden durch Veränderungen der Mikrostruktur des Zementsteins hervorgerufen. Sie werden von der Umlagerung von Wasser im Bindemittelstein und auch durch Gleitvorgänge zwischen den Gelpartikeln und Mikrorissbildung verursacht. Sie wirken sich stärker bei Zug- als bei Druckbeanspruchung aus und sind bei Beanspruchungen im jungen Alter besonders stark. Das Kriechen kann durch eine Kriechzahl Φ bzw. einen rechnerischen „effektiven E-Modul“ berücksichtigt werden. Vgl. [Röhling 2009]p. 162

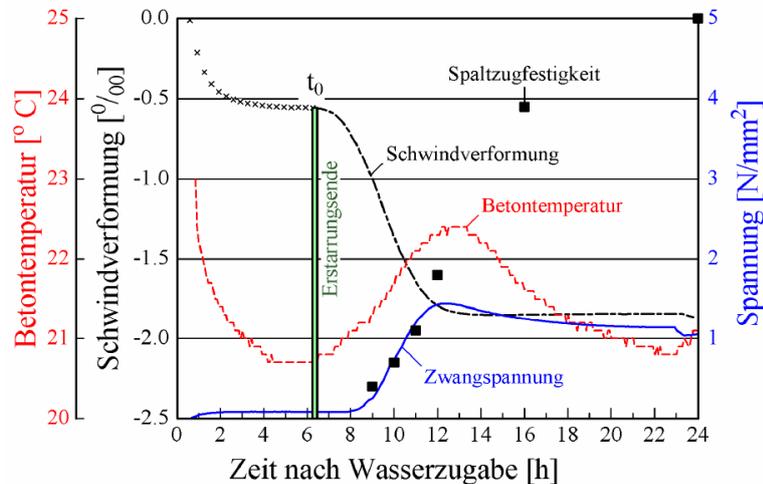


Abbildung 2.25: Zusammenhang zwischen Erstarrungsende t_0 , Betontemperatur, der autogenen Schwindverformung, der Zwangsspannung sowie der Spaltzugfestigkeit von UHPC im jungen Alter nach [Schachinger 2002]

Schachinger gibt einen Zusammenhang zwischen Erstarrungsende t_0 , gemessen mit dem VICAT Gerät, und der Entwicklung der Betontemperatur, der autogenen Schwindverformung, der Zwangsspannung sowie der Spaltzugfestigkeit von UHPC im jungen Alter (konservierende Lagerung) an, siehe Abbildung 2.25. Der Beginn und das Ende des Erstarrens erfolgten in seinen Untersuchungen beinahe gleichzeitig rund 2 Stunden nach dem Abklingen einer frühen Verkürzung. Die frühe Verkürzung, Messbeginn war 0,5 h nach Wasserzugabe, ging mit der Abkühlung des Frischbetons um beinahe 10°C auf Raumtemperatur einher.

Fontana stellt die Analyse der Verformungsgeschwindigkeit zur Bestimmung des Endes der Erstarrung alternativ zu den „willkürlich“ festgelegten Erstarrungszeiten, gemessen mit dem VICAT-Gerät, vor (siehe Abbildung 2.26). Die Verformungsgeschwindigkeit wird aus dem gemessenen Schwindmaß pro Zeiteinheit berechnet, z.B. in $\mu\text{m}/\text{h}$. Für die Beurteilung spannungsinduzierender Verformungen ist gemäß *Weiss*, zitiert nach [Fontana 2007] jener Zeitpunkt t_0 maßgebend, ab dem sich ein durchgehender Festkörper ausbildet und Zugspannungen in der Matrix übertragen werden können. Der Zeitpunkt t_0 wird als der Punkt mit der maximalen Verformungsgeschwindigkeit bestimmt und liegt in der Regel später als das mit dem VICAT Gerät bestimmte Erstarrungsende. Vgl. [Fontana 2007], p. 56.

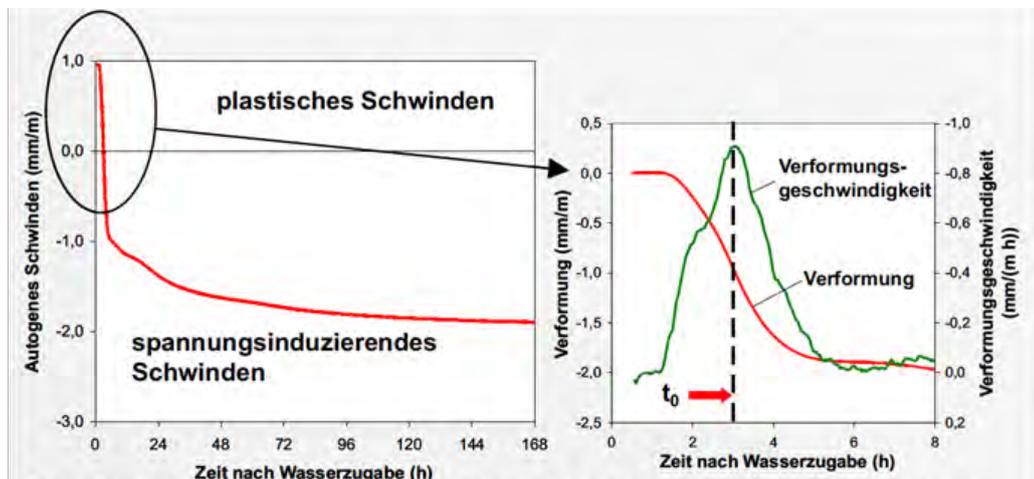


Abbildung 2.26: Analyse der Verformungsgeschwindigkeit zur Bestimmung des Endes der Erstarrung aus [Fontana 2007]

Schachinger weist in diesem Zusammenhang darauf hin, dass die Entwicklung der Schwindverformung vielfach auch für UHPC wie in den Normen für Normalbeton erst ab dem Zeitpunkt des Ausschalens im Alter von über einem Tag dargestellt wird. Ein Großteil der autogenen Schwindverformungen hat aber zu diesem Zeitpunkt bereits stattgefunden.

Habel charakterisiert in Ihrer Arbeit unter anderem die autogenen Verformungen, die Selbstaustrocknung und Zwangsspannungen für einen grobkörnigen UHPFRC. Die Untersuchungen zeigen, dass beim UHPFRC die autogenen Verformungen gleichzeitig mit dem Abfall der relativen Feuchte in den Poren durch Selbstaustrocknung und mit der Entwicklung der mechanischen Eigenschaften beginnen. Sie stellt bei ihren Untersuchungen in der Spannungs-Prüfmaschine eine Relaxation (bzw. Rückgang der Zwangsspannungen durch Kriechen) um 60% bei einem grobkörnigen UHPFRC fest. Vgl. [Habel 2004].

2.7.4 Rissmuster

Risse, die auf behindertes Schwinden und oberflächliche Austrocknung zurückzuführen sind, können in zementgebundenen Materialien und auch im Lehmboden oder ähnlichem Material beobachtet werden (siehe Abbildung 2.27).

In der Natur ist eine Vielfalt von Rissmustern zu finden, die sich nach der Rissform, den Rissabständen und Rissbreiten unterscheiden. *Péron* gibt in seiner Arbeit „Dessicatin Cracking of Soils“ [Péron 2008] einen Überblick über den Stand des Wissens zur Rissbildung in Böden und führt umfangreiche Untersuchungen – unter anderem auch zur Rissbildung durch behindertes Trocknungsschwinden – durch. Seine Bodenproben sind ursprünglich wassergesättigte Platten (30*30*0,4 bzw. 1,2 cm) aus tonhaltigem Schluff, die an der Grundfläche verformungsbehindert aufliegen. Sie werden kontrolliert ausgetrocknet und die entstehenden Rissmuster beobachtet. Es wird festgestellt, dass Risse generell mit Win-

keln von 90° bis 150° aufeinander treffen. Gruppen von Winkeln mit 120° treten gleichzeitig, meist am Beginn der Rissbildung, auf, während Winkel mit 90° entstehen, wenn im Zuge von fortschreitendem Schwinden neue Risse auf bereits bestehende Risse treffen. Es sind zwei Grenzfälle von Rissmustern zu beobachten: mit in Winkeln von 90° zueinander orientierten und zweitens mit 120° zueinander orientierten Risse (siehe Abbildung 2.28).



Abbildung 2.27: Risse im ausgetrockneten Lehmboden (TrioPetra auf Kreta)

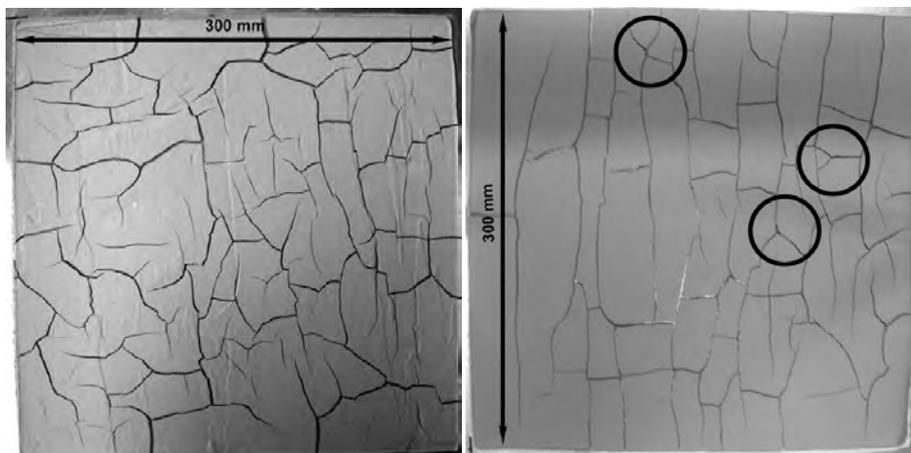


Abbildung 2.28: Rissmuster in tonhäftigem Schluff nach vollständiger oberflächlicher Austrocknung. Risse unter 120° (eingekreist) traten zu Beginn gleichzeitig auf. [Péron 2008]

Das Rissmuster und der Rissfortschritt resultieren aus der Energieumlagerung in der Probe nach dem Auslösen der Rissbildung durch Überschreiten der Zugfestigkeit. Péron zeigt für den 2-D Fall auch, wie die Rissabstände und die Rissorientierung auf Basis eines Energiegleichgewichtes, betrachtet mit Kennwerten der Bruchmechanik, abgeschätzt werden können. Vgl. [Péron 2008].

Risse mit einer Orientierung von 90° entstehen immer nacheinander. Ist das Material einmal durch einen Riss an einer Stelle geteilt und damit entspannt, so können in der Umgebung des Risses nur mehr Zugspannungen parallel zur Rissrichtung im Material auftreten. Ein weiterer Riss neigt nun dazu, sich normal zur lokal vorherrschenden Hauptzugspannungsrichtung, also normal zum bestehenden Riss, auszubilden. Vgl. [Péron 2008].

Ein Rissmuster mit 120° Winkeln ist die Folge des Strebens nach einem Energieminimum im Zuge der Rissbildung in einem 2 dimensional isotropen Spannungsfeld. Die Rissbildung ist ein Energie verbrauchender Prozess. Nimmt die Spannung in einem isotropen Spannungsfeld und in einem homogenen Material unter kontinuierlicher Lagerung solange zu, bis die Zugfestigkeit erreicht ist, stellen sich theoretisch gleichzeitig Risse im ganzen Feld ein. Ein Rissmuster mit lauter hexagonalen Rissfeldern ergibt sich, weil in diesem Fall die Forderung nach geringster Oberfläche (Umfang des Rissfeldes \times Risstiefe) im Verhältnis zum eingeschlossenen Volumen erfüllt wird (ein Minimum an neuer Oberfläche pro Volumeneinheit gebildet wird). *Bazant und Cedolin* zeigen das am Beispiel von Rissfeldern in Betonflächen. Sie berechnen Rissabstände an Betonflächen, die oberflächlich austrocknen, nach dem Prinzip der Energieerhaltung und des Energieminimums bei der Rissbildung. Vgl. [Bazant 1992], p.806ff und siehe Kapitel 7.2.4.

3 Hypothesen

Die folgenden Hypothesen und Annahmen zu einem Haftmodell sind Ausgangspunkt der weiteren Untersuchungen (Kapitel 4 bis 6). Sie werden im Kapitel 7 bzw. 8 verifiziert und sind die Basis der gewonnenen Erkenntnissen und Schlussfolgerungen.

3.1 Hypothesen zur Adhäsion von UHPC

Für die Ausbildung der Adhäsion ist neben der intermolekularen Nähe zwischen den Phasen die wirksame Kontaktfläche entscheidend. Untersuchungen von Müller [Müller 2009] zeigen, dass die Güte der Korrelation zwischen gemessener wahrer Oberfläche und Haftfestigkeit von der gewählten Auflösung des Rauheitsmessgeräts abhängt, vgl. auch Kapitel 2.6.3. Nicht die größtmögliche Auflösung führt zur besten Übereinstimmung, sondern eine optimale Auflösung kristallisiert sich heraus. Aus dieser Tatsache wird die 1. Hypothese abgeleitet:

Es existiert ein bestimmter Grad der Rauheit einer Oberfläche, der von UHPC als Adhäsiv gerade noch benetzt werden kann. Diese Grenzrauheit hängt von den Benetzungseigenschaften und den rheologischen Eigenschaften des UHPC sowie der Benetzbarkeit des Untergrundes (Adhärens) ab.

Als Grenzwert für die maximale Benetzbarkeit einer Oberfläche wird hier eine charakteristische Wellenlänge λ_{\min} eingeführt. Bei Erreichen dieses Wertes kann das Adhäsiv eine Vertiefung der Oberfläche nicht mehr benetzen (siehe Abbildung 2.11 auf Seite 23).

Die 2. Hypothese bezieht sich auf die übertragbaren Kräfte in den Kontaktstellen: *Die charakteristische maximal übertragbare Haftkraft einer Kontaktstelle besteht aus einem Größenanteil aufgrund zwischenmolekularer Wechselwirkungen (spezifische Adhäsion) und einem Größenanteil aufgrund mikromechanischer Verklammerung (mechanische Adhäsion).*

Die 3. Hypothese lautet: *Wenn die Rauheitsabstufung der Oberfläche mit der Korngrößenverteilung des UHPC korrespondiert, wird optimale Haftung erzielt. (Optimale Packungsdichte in der Kontaktfläche)*

Die Packungsdichte²⁵ der Körner des UHPC kann an Grenzschichten nicht wie im Inneren des Volumens optimal sein (siehe Abbildung 3.1). Der Effekt ist vergleichbar mit dem

²⁵ Der Begriff „Packungsdichte“ wird in der Arbeit qualitativ im Sinne einer dichten, hohlraumarmen Packung bzw. dichten Lagerung der Bestandteile eines (Korn-)Gemisches verwendet. Die Packungsdichte – der Volumensanteil des Feststoffs am Gesamtvolumen des Gemisches – wird hier nicht gemessen oder berechnet. Der Begriff wird auch in einem weiteren Sinn für die Gefügedichte des UHPC nach der Reaktion der hydraulisch aktiven Bestandteile mit Wasser verbunden mit der Festigkeitsentwicklung gebraucht. Im engeren Sinn kann von der Packungsdichte eines Korngemisches vor der Reaktion und von der Gefügedichte eines UHPC nach der Reaktion gesprochen werden.

bei Normalbeton beobachteten „wall effect“, vgl. Kapitel 2.6.1. An Grenzflächen kommt es zu einer weniger dichten Lagerung der Zementkörner. Diese Zone weist auch einen lokal höheren W/B-Wert auf. Während der Hydratation kommt es in diesem Bereich zu einseitigem Kristallwachstum. Resultat ist eine Übergangszone („interfacial transition zone“) die durch eine gegenüber dem Zementstein höhere Porosität und geringere Festigkeit gekennzeichnet ist. Vgl. [Maso 1996].

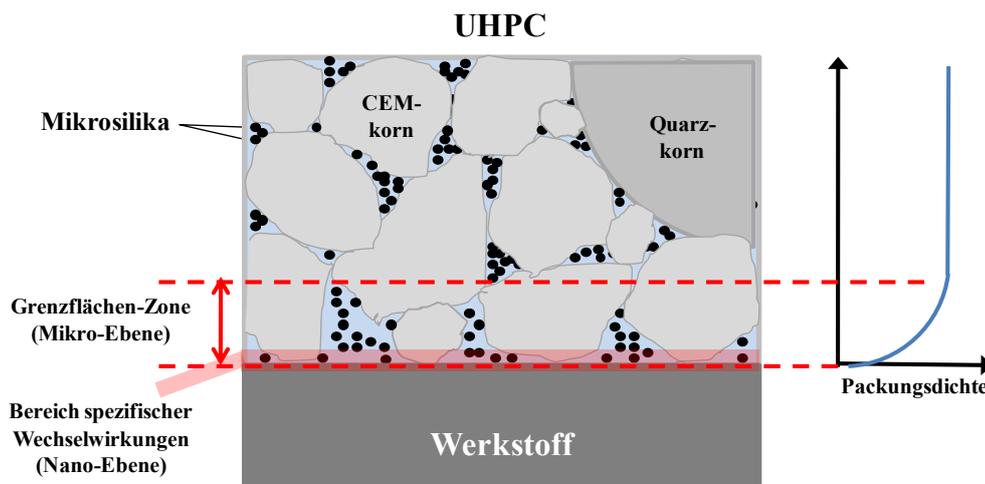


Abbildung 3.1: Störung der Packungsdichte an ebenen, glatten Grenzflächen

3.2 Annahmen für ein Haftmodell

Es wird angenommen, dass die spezifische Adhäsion zwischen UHPC und glattem Stahl bzw. Glas in ungestörten Verbundbereichen sehr hoch ist und deshalb auf jeden Fall Berücksichtigung finden muss. Dies gelingt aber nur, wenn das Ausmaß „ungestörter Zonen“ gut abgeschätzt werden kann.

Für die Ausbildung spezifischer Wechselwirkungen durch intermolekulare Anziehung ist es notwendig, dass sich Adhäsiv und Adhärens sehr nahe kommen. Ihr Abstand sollte gemäß de Bruyne [de Bruyne 1939], zitiert nach [DAfStb 1994] in einer Größenordnung von 0,5 nm liegen. Solange das Adhäsiv noch im frischen, fließfähigen Zustand ist, als Flüssigkeit bzw. Suspension, benetzt es die Oberfläche und haftet an ihr, es entsteht also ein enger Kontakt, wird von Verunreinigungen an der Oberfläche abgesehen. Verschiebungen bzw. plastische Verformungen aufgrund des Schwindens erfolgen dann im Inneren der viskosen Flüssigkeit und stören zwar den Kontakt nicht unmittelbar, aber möglicherweise das Gefüge. Das Verhältnis von Oberflächenspannung (OFS) des frischen Adhäsivs zur Oberflächenenergie (OFE) des Adhärens sollte den Grad der Frischbetonhaftung bestimmen, wenn von der Verdichtungsenergie und dem Gewichtseinfluss abgesehen wird.

Es ist anzunehmen, dass die für die spezifische Adhäsion erforderliche Nähe der Moleküle nach der Erstarrung und dem Beginn der Festigkeitsentwicklung in erster Linie durch

schwindinduzierte Relativverschiebungen des erhärtenden UHPC in der Kontaktfläche gestört wird. Je glatter die Oberfläche des Adhärens ist, desto weniger Widerstand durch geometrische Verklammerung wird dem Schrumpfen des Adhärens entgegengesetzt. Verfolgt man diese Überlegung weiter, ergibt sich bei ideal glatten Oberflächen ein einziger zufälliger Verschiebungsnulldpunkt, während bei rauen Flächen in Abhängigkeit der Rauheit entsprechend viele Verschiebungsnulldpunkte zwischen Rissen entstehen (vgl. Abbildung 3.2a). Der obere Grenzfall dieser Modellvorstellung wäre der starre Verbund zu jedem Zeitpunkt der Erhärtung, wobei der Rissabstand gegen Null geht, was einer entsprechenden Dehnung des UHPC entspräche. Allerdings setzt die Haftung an einer glatten Oberfläche auch ohne die geometrische Verklammerung den schwindinduzierten Relativverschiebungen einen (Scher-)Widerstand entgegen. Die Bereiche ohne Relativverschiebungen sind dann ausgedehnt und nicht punktförmig.

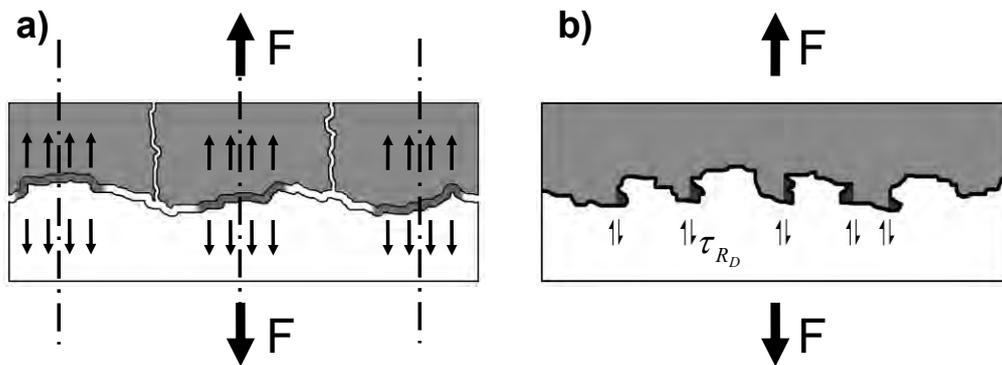


Abbildung 3.2: a) spezifische Adhäsion wirkt im Bereich der Verschiebungsnulldpunkte zwischen Rissen im UHPC und b) mechanische Adhäsion bildet sich in hinterschnittene Profilformen aufgrund des Scherwiderstandes aus

Für ein Modell bedeutet dies, dass die Berechnung jener Fläche, in der die spezifische Adhäsion (f_{spez}) wirkt, in Abhängigkeit der Haftung – ausgehend vom frischen Zustand, gekennzeichnet durch OFS und OFE –, der Oberflächenrauheit (OR) und des Schwindmaßes (ϵ_s) erfolgen muss. In wie weit unterschiedliche zeitliche Verläufe des Schwindens und der Erhärtung von verschiedenen UHPC-Typen eine Rolle spielen, ist noch zu klären. Weiters muss ein Modell für den oben angesprochenen Verschiebewiderstand aus der Oberflächenrauheit gefunden werden, um einen geeigneten Parameter der Oberflächentopografie festlegen zu können. Wichtige Eingangsparameter in die Berechnung der effektiven Adhäsionsfläche (A_{eff}) sind auch rheologische Eigenschaften (Fließgrenze und Viskosität) des UHPC. Sie sorgen einerseits dafür, dass die wahre Oberfläche gar nicht vollständig benetzt wird und andererseits beeinflussen sie die Vorgänge während des frühen Schwindens.

$$f_{spez} = \frac{A_{eff}}{A_g} * f_{spez,0} \quad (3.1)$$

- $A_{eff} = A_{benetzt} - A_{gestört}$ wirksame Fläche der spezifischen Adhäsion
- $A_{benetzt} = f_{(B,OR)}$ wirksame Kontaktfläche, bestimmt durch den Benetzungsvorgang B , der von rheologischen Eigenschaften und der Rauheit OR abhängt
- $A_{gestört} = f(\varepsilon_s, OR, OFS/OFE)$ Fläche ohne ausreichend nahen Kontakt, gestört durch schwindinduzierte Relativverschiebungen
- $f_{spez,0}$ Grundwert der spezifischen Adhäsion, charakterisiert durch das Verhältnis der polaren und dispersen Oberflächenspannungs bzw. –energieanteile von UHPC und Stahl oder Glas bzw. aus theoretischen Berechnungen der intermolekularen Kräfte. Begrenzt von der Zugfestigkeit des schwächeren Materials, hier UHPC

A_g geometrische Oberfläche

Betreffend raue Oberflächen wirkt neben einer Oberflächenvergrößerung die mechanische Adhäsion. Es liegt nahe, die in Abbildung 3.2b dargestellten Anteile an Hinterschnittungsflächen in Beanspruchungsrichtung zu ermitteln und über ein einfaches Schubbruchmodell in die Berechnung einzuführen. Eine dafür entwickelte Methode zur Ermittlung der bezogenen Hinterschnittungsfläche wird in Kapitel 4.2.2 beschrieben.

$$f_{mech} = \tau_R * r_H \quad (3.2)$$

τ_R Scherfestigkeit UHPC

r_H Verhältnis der Hinterschnittungsfläche zur geometrischen Fläche

Die Untersuchungen in der Arbeit werden zeigen, ob mit diesem Modell die Realität einigermaßen genau beschrieben werden kann, oder ob die mechanische Adhäsion auf weiteren Einflüssen wie der inneren Reibung an den Talflanken basiert, weil möglicherweise der UHPC durch das Schwinden (vorausgesetzt es treten keine Risse auf) die Kuppen ein-klemmt.

Es ist anzunehmen, dass die mechanische Adhäsionsfestigkeit und die spezifische nicht in voller Größe zugleich wirken können, aber nur dann dürfen die beiden Anteile im Rechenmodell addiert werden. Nach dem bisher Gesagten, muss wohl eher davon ausgegangen werden, dass die für die spezifische Adhäsion erforderliche Nähe durch die für die Aktivierung der mechanischen Adhäsion notwendige Verformung (Verschiebung) zum größten Teil verloren geht.

4 Materialparameter der Verbundpartner

Im folgenden Kapitel wird auf die adhäsionsrelevanten Eigenschaften von UHPC, dem Adhäsiv, und von Stahl bzw. Glas, dem Adhärens, eingegangen.

4.1 UHPC als Adhäsiv

4.1.1 Allgemeines über UHPC

Gemäß [Schmidt 2008] ist ultrahochfester Beton (UHFB) oder englisch Ultra High Performance Concrete (UHPC, dt. Ultra-Hochleistungsbeton) ein sehr gefügedichter, fein (GK 1 mm) oder grobkörniger (GK ~8 mm) Beton mit einer charakteristischen Druckfestigkeit über der in DIN bzw. ÖNORM EN 206-1 definierten höchsten Druckfestigkeitsklasse für Hochfesten (Normal-)Beton C 100/115²⁶. Je nach Zusammensetzung werden in der Regel Druckfestigkeiten zwischen 150 und 230 N/mm² erreicht.

Als besondere Eigenschaften von UHPC sind die hohe Druckfestigkeit und die sehr gute Beständigkeit gegenüber aggressiven Umwelteinwirkungen zu nennen. Diese Eigenschaften hängen ursächlich mit der hohen Packungsdichte seiner Bestandteile – also dem geringen Hohlraumgehalt des Gemisches der Ausgangsstoffe und seinem dadurch geringen Wasseranspruch²⁷ – und der mit ihr verbundenen sehr geringen Durchlässigkeit zusammen. Sie wird durch eine optimale Kornabstufung, in die auch die Feinanteile mit einbezogen werden, den großen Gehalt an Feinanteilen, die zum Großteil (Mikrosilika, Zement) hydraulisch wirksam sind, und den sehr niedrigen Wasser/Bindemittelwert (<0,25) erreicht. Hochwirksame Fließmittel (PCE) bewirken selbstverdichtende Eigenschaften im Verarbeitungszustand. Die Zugabe von Stahlfasern (meist 2-2,5 Vol.%,) sorgt für ein duktileres Mate-

²⁶ Für die Festigkeitsklasse C 100/115 nach ÖNORM B 4710-1:2007 – sie entspricht dem nationalen Anwendungsdokument von EN 206-1 – wird eine mittlere Würfeldruckfestigkeit von mindestens $f_{cm}=131$ N/mm² – geprüft an unter „Raumluftbedingungen“ gemäß ONR 23303 gelagerten Würfeln – gefordert. Mit einem abgeschätzten Faktor für die Schrittweite zur nächsthöheren, nicht mehr in der Norm enthaltenen Festigkeitsklasse von 1,09 (=Verhältnis wie C 115/ C 105) bedeutet das, dass ein UHPC mindestens $f_{cm}=143$ N/mm² im Alter von 28 Tagen aufweisen sollte (auch mit Wärmebehandlung)

²⁷ Zum Einfluss der Granulometrie auf die Rheologie, Festigkeit und Gefügedichte von Beton, speziell UHPC, siehe [Geisenhanslücke 2008], [Teichmann 2007] und [Reschke 2001].

rialverhalten und dafür, dass Risse mikroskopisch klein und mit engen Rissabständen verteilt auftreten. Sie sorgen auch für eine ausgeprägte Zugfestigkeit im gerissenen Zustand.

Die freie Formbarkeit im Verarbeitungszustand und die Wirkung der zugegebenen Fließmittel, die die Oberflächenspannung reduzieren, erweisen sich als vorteilhafte Eigenschaften, wenn mit UHPC ein Verbund mit weiteren Werkstoffen hergestellt werden soll. Es werden mikroskopisch kleine Vertiefungen einer rauen Oberfläche ausgefüllt bzw. ihre Erhebungen umschlossen. Nach der Erhärtung kann aufgrund der hohen Packungsdichte der Matrix ein enger und kontinuierlicher Kontakt des UHPC mit einer Oberfläche erreicht werden. Insbesondere entsteht eine wirkungsvolle Verzahnung mit einer rauen Oberfläche.

Der Stand der Technik hinsichtlich Herstellung, Eigenschaften und Anwendung von UHPC ist in [Schmidt 2008] dokumentiert. Es existieren Richtlinien in Frankreich [AFGC 2002], Japan [JSCE 2006] und Australien. Über aktuelle Entwicklungen und den Stand der Wissenschaft existiert ein umfangreiches Schrifttum, insbesondere sei hier auf [Schmidt 2010b], [Fehling 2008], [Schmidt 2004], [IRB 2004], [Dehn 2001], [Richard 1995] und [Bache 1988] verwiesen.

4.1.2 Einordnung der untersuchten Betone und Voruntersuchungen

In den hier vorgestellten Untersuchungen werden feinkörnige Betone bzw. Mörtel verwendet, die sich in Ihrer Festigkeit geringfügig unterscheiden und in die Klassen Hochfester und Ultrahochfester Beton fallen²⁸. Die verwendeten Betone werden zusammenfassend mit UHPC (von engl. ultra high performance concrete, also „Ultra-Hochleistungsbeton“) bezeichnet. Die Betone werden ohne Fasern verwendet, um die Adhäsion zu Stahl und Glas zu studieren. Es wird eine selbst entwickelte Mischungszusammensetzung – bezeichnet mit Mischung UHPC EM – und ein kommerziell erhältlicher premix für einen „reactive powder concrete“ – bezeichnet mit Mischung UHPC DM – eingesetzt. Die Betone haben ein Größtkorn von 0,5 mm (EM) bzw. 0,6 mm (DM) und könnten deshalb auch als Mörtel bezeichnet werden.

Im Gegensatz zu üblichem UHPC werden keine Fasern und keine Wärmebehandlung zur Festigkeitssteigerung eingesetzt, um mögliche zusätzliche Einflussgrößen auf die Adhäsion vorerst zu vermeiden. Es kann allerdings davon ausgegangen werden, dass Stahlfasern die Adhäsionswirkung nicht unmittelbar beeinflussen würden, da sie von UHPC umhüllt nicht direkt an der Grenzfläche zu liegen kommen.

²⁸ Wie später gezeigt wird, weisen die Prüfwerte der Druckfestigkeiten der eingesetzten Mischungen UHPC EM und UHPC DM zum Großteil charakteristische Druckfestigkeiten auf, die an der Grenze der in EN 206-1 definierten höchsten Druckfestigkeitsklasse für Hochfesten (Normal-)Beton C100/115 liegen. Bei der Mischung UHPC EM handelt es sich somit im engeren Sinn um einen feinkörnigen hochfesten Beton. Der premix UHPC DM fällt laut Herstellerangaben in die Klasse der ultrahochfesten bzw. Ultrahochleistungs-Betone, seine Zusammensetzung ist geheim zu halten.

Tabelle 4.1: Druckfestigkeiten unterschiedlicher UHPC EM und DM

UHPC	aus Serie	Fasern	Behandlung	Druckfestigkeit f _{cm,cube_100,28d} [N/mm ²]	Anzahl n Pro- bekörper
DM	SD1	oF	NL	128,4	4
	Mischv	mF	NL	158,1	2
	Mischv	mF	W90°	184,0	2
EM	SK2W	oF	NL	136,6	5
		oF	W90°	160,9	3
	Vorversuche	mF	NL	163,5	2
oF	ohne Fasern				
mF	mit 2Vol.-% Stahlfasern, 0,2/13mm				
NL	Normlagerung: ÖNORM B 3303, Würfel bis 7.Tag unter Wasser, dann an Raumluft				
W	Wärmebehandlung: Ausschalen nach 24h, Einwickeln in feuchtes Tuch + Frischhalte- folie; 1 Tag aufheizen ($\Delta T=10^{\circ}\text{C/h}$), 2 Tage T=90°C konst., 1 Tag abkühlen ($\Delta T=10^{\circ}\text{C/h}$), anschließend bis 28 Tage an Raumluft (22°C)				

Die Mischungen EM und DM wurden, um sie besser einordnen zu können, auch vergleichsweise mit Fasern (mF) und mit Wärmebehandlung (W90°) hergestellt. Die Ergebnisse von Druckfestigkeitsprüfungen an Würfeln mit 100 mm Kantenlänge im Alter von 28 Tagen zeigt Tabelle 4.1 bzw. Abbildung 4.1. Es wird sichtbar, dass die Druckfestigkeiten sowohl des UHPC EM als auch des UHPC DM in den Varianten ohne Fasern und ohne Wärmebehandlung deutlich geringer ausfallen als in den Varianten mit.

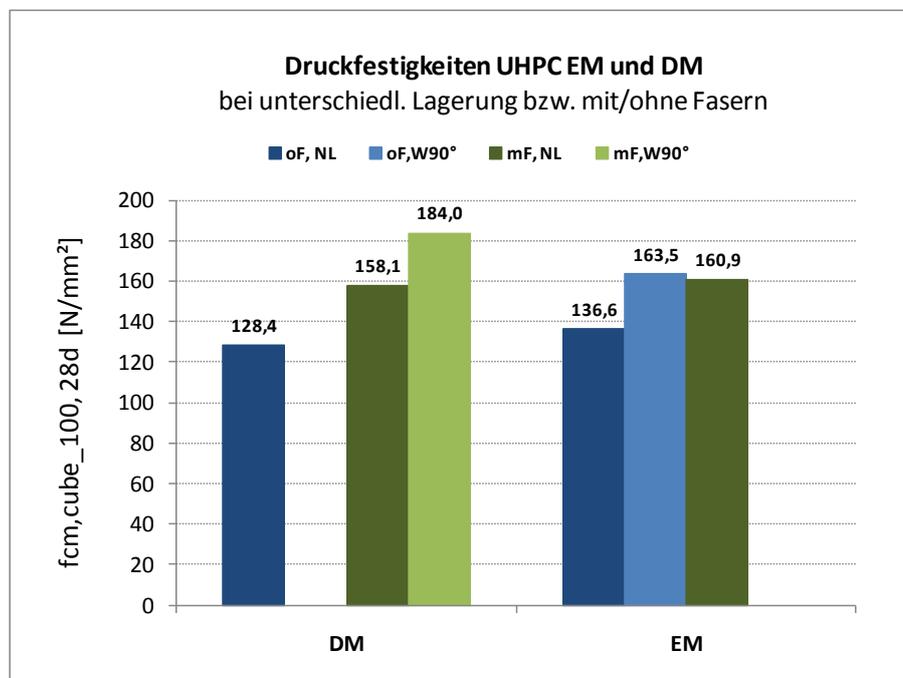


Abbildung 4.1: Druckfestigkeiten bei unterschiedlicher Lagerung mit/ohne Fasern

Alle Mischungen wurden aus später ausgeführten Gründen wenig fließfähig eingestellt und weisen dadurch auch einen hohen Luftporengehalt (rund 4%, vgl. Tabelle 4.4, Seite 60) auf. Deshalb sind die Prüfwerte der Druckfestigkeiten wie schon beschrieben zum Teil zu niedrig für die Einstufung als ultrahochfester Beton.. Dieselben Betone weisen aber, wenn sie etwas fließfähiger und selbstentlüftend eingestellt werden bzw. mit Fasern oder Wärmebehandlung versehen sind, die angegebenen höheren Festigkeiten auf und werden deshalb weiter in dieser Arbeit als UHPC bezeichnet²⁹.

4.1.3 Voruntersuchungen zum UHPC EM

In Vorversuchen wurde UHPC EM auf Basis der von der Universität Kassel publizierten Rezepturen [Fehling 2005] M1 und M2Q mit in Österreich verfügbaren lokalen Ausgangsstoffen entwickelt, siehe [Ladinig 2005]. In der ersten Projektphase wurden davon zwei hoch- bis ultrahochfeste Feinkornbetonmischungen EMK1 und EMK2 abgeleitet, in denen zur Vereinfachung das in UHPC sonst übliche Quarzmehl durch zusätzlichen Zement ersetzt wurde³⁰, vgl. Tabelle 4.2.

Ziel der ersten Projektphase war es, unterschiedlich fließfähige selbstverdichtende Betone herzustellen, um der Hypothese 1 laut Kapitel 3.1 nachgehen zu können. Es sollte festgestellt werden, ob Betone mit unterschiedlicher Konsistenz Oberflächen einer bestimmten Rauheit unterschiedlich gut benetzen bzw. ihre Vertiefungen unterschiedlich gut ausfüllen. Es stellte sich dabei heraus, dass nur durch Variation des W/B-Wertes in Kombination mit Änderungen der Fließmittelzugabe deutliche Konsistenzunterschiede erzielt werden können³¹. Ein weiterer Faktor, der die Fließmittelwirkung unmittelbar beeinflusst, ist die eingebrachte Mischenergie. Die Vorversuche und Vorserien im Projekt wurden mit einem Mischer (Zyklus ZK 30 E) mit geringerem Mischenergie-Eintrag verarbeitet als die Hauptserien (Eirich RV02-10l) der Haftzug- und Haftschiebversuche. Bei dem leistungsfähigeren Mischer wurden das Mischwerkzeug und die Übersetzung außerdem nach etwa der

²⁹ Die mit demselben premix DM in einem parallel laufenden Projekt an der TU Graz erzielte mittlere Druckfestigkeit beträgt bei etwas fließfähigerer Konsistenz und damit verbundener besserer Entlüftung sowie bei 2 Vol.-% Stahlfasergehalt rund 180 N/mm², geprüft am Würfel 100 mm nach 28 Tagen, auch ohne Wärmebehandlung. Das entspricht auch den Herstellerangaben.

³⁰ Die umfangreichen Versuche zur UHPC-Mischungszusammensetzung in der ersten Projektphase sind nicht Gegenstand dieser Arbeit. Hier sei nur angemerkt, dass mit unterschiedlichen Fließmitteln, Mikrosilika-Produkten und demselben Zement in zwei unterschiedlichen Mahlfineinheiten experimentiert wurde. Es zeigte sich unter anderem, dass der Zement, der in einem Silo über einen Zeitraum von 1,5 Jahren gelagert wurde, mit der Lagerungszeit immer geringere 28 Tages-Festigkeiten aufwies und dadurch die UHPC-Festigkeiten über diesen Zeitraum abnahmen.

³¹ Eine Erhöhung/Verringerung der Fließmittelzugabe bei konstantem W/B-Wert führte bei diesen Betonen nicht zu einer signifikanten Änderung der Konsistenz. Umgekehrt beeinflusste eine geringe Variation des W/B-Wertes, die für eine andere Konsistenz ausreicht, die erzielte Festigkeit kaum.

Hälfte der Versuche der Hauptserien geändert³², sodass sein Leistungseintrag nochmal anstieg. Nur durch diese Faktoren erhöhte sich die verflüssigende Wirkung des Fließmittels stark, der Umschlag erfolgte früher und mit der gleichen Dosierung wurden fließfähigere Konsistenzen erreicht. Die Druckfestigkeiten blieben dadurch unbeeinflusst.

In der Projekt-Hauptphase wurden Konsistenzen nicht mehr gezielt variiert, da sich in den Vorserien keine Abhängigkeit der Haftzugfestigkeit und der Benetzung rauer Oberflächen von den unterschiedlichen Konsistenzen gezeigt hatte. Nunmehr wurde die Mischung EM mit annähernd gleichbleibender Konsistenz – abgesehen von Schwankungen durch die Änderung der Mischerleistung – verwendet. Zusätzlich wurde der premix DM in den Hauptserien eingesetzt. Es wurde darauf abgezielt, den UHPC DM mit derselben Konsistenz wie die Mischung EM einzustellen, um diesen Einflussfaktor annähernd konstant zu halten. Das bedeutete, dass die Mischung DM mit etwas geringerem W/B-Wert als vom Hersteller empfohlen gemischt werden musste und damit etwas weniger fließfähig zubereitet wurde.

Leider fielen die Druckfestigkeiten der Mischung EM im Laufe des Projektes trotz gleicher Mischungszusammensetzung ab. Dieselben Mischungen weisen in den Voruntersuchungen höhere Festigkeiten auf als in den Vor- und Hauptserien der Haftzugprüfungen. Als Ursache dafür wird eine Umstellung der Zementproduktion (anderes Klinker-Rohmaterial) trotz nominell gleicher Zementsorte vermutet.

4.1.4 Mischungszusammensetzung und Herstellung

Mischungszusammensetzungen

In Tabelle 4.2 wird die Zusammensetzung der Mischungen angegeben. Während die Ausgangsstoffe der Mischung EM bekannt sind und ihre technischen Daten laut Herstellerangaben im Anhang A.1.1 aufgeführt sind, unterliegt die Zusammensetzung des aus einem premix hergestellten UHPC DM der Geheimhaltung. Der UHPC DM wird als „typischer Feinkorn-UHPC (RPC)“ verwendet und hinsichtlich seiner Eigenschaften in der Anwendung charakterisiert.

³² Statt eines Sternwirlers wurde ein Stiftenwirlber eingesetzt und eine Übersetzung mit noch größerem Leistungseintrag gewählt.

Tabelle 4.2: Mischungszusammensetzungen der verwendeten Betone

Bestandteile [kg/m ³]	verwendete Produkte (EM)	Mischungen			
		EMK1	EMK2	EM	DM
		Haftzug-Vorserien		Hauptserien	
		sehr fließfähig	wenig fließfähig	=EMK2g	
Zement	W&PCEMI42,5RHSWT33,C ₃ A-frei	1052,8	1063,7	1071,7	
Mikrosilika	Elkem Grade 971u	131,8	133,2	134,2	premix(1): 2260,4
Quarzsand	Quarzwerke Melk ME31+ME33	950,9	960,8	968,1	
Wasser-Zugabe		165,1	158,6	161,1	113,9
Fließmittel (2)	Sika ViscoCrete 1030	44,8	38,4	30,0	31,2
W/B - Wert		0,166	0,155	0,151	rd. 0,15
(1)	trockener premix enthält Quarzsand, Zement, Quarzmehl und Mikrosilika				
(2)	Wasseranteil 70%; 3-4%FM bezogen auf den Zementgehalt!				

Die Korngrößenverteilung der Mischung der Partikel (CEM+MS+Quarzsand) ist der Abbildung 4.2 zu entnehmen. Die Korngrößenverteilungen der Bestandteile wurden mittels Lasergranulometrie extern bestimmt³³ und sind wie auch die weiteren Produktspezifikationen der Ausgangsstoffe dem Anhang A.1.1 zu entnehmen.

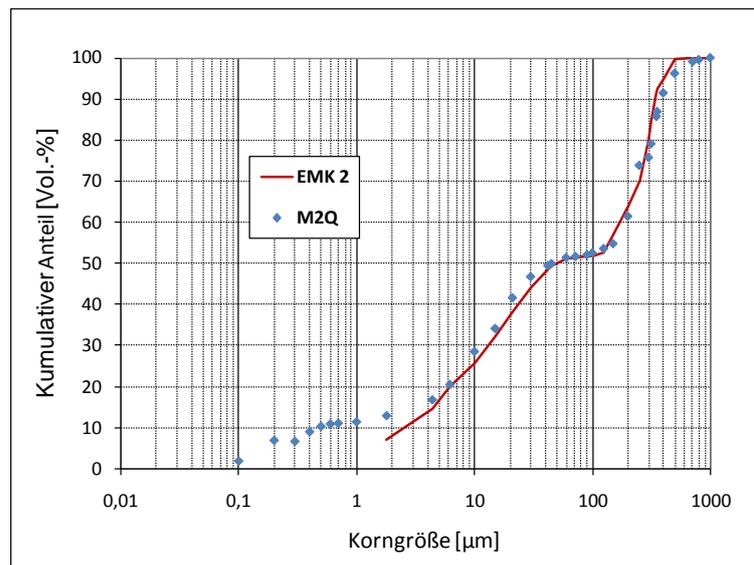


Abbildung 4.2: Korngrößenverteilung der Mischungen EMK2g (eigene Messung) und M2Q (laut [Fehling 2005])

In Abbildung 4.2 ist zum Vergleich auch die Korngrößenverteilung der Vergleichsmischung M2Q der Universität Kassel eingetragen. Es wird sichtbar, dass der Feinst-

³³ Die Messungen wurden vom Labor der Firma W&P Zementwerke in Wietersdorf durchgeführt. Dank an Hr. Klausner und Hr. DI Steinwender.

Anteilsbereich ($<2 \mu\text{m}$, vor allem mit Mikrosilika, mittlerer Durchmesser theoretisch $0,2 \mu\text{m}$) bei der Mischung EM nicht ausgeprägt ist. Das verwendete Lasergranulometer war auf die Messung einer Mindestkorngröße von $1,8 \mu\text{m}$ beschränkt. Außerdem wurde beim verwendeten Mikrosilika-Staub eine starke Agglomeration festgestellt. Die praktisch messbaren Korndurchmesser der Agglomerate sind wesentlich größer als die einer gut dispergierten Mikrosilika. Der mittlere Durchmesser des Zementes beträgt $12 \mu\text{m}$. Die Kornbandbreite des feuergetrockneten Quarzsandes $0,125 - 0,5 \mu\text{m}$.

Herstellung

Die Herstellung aller Betonmischungen und Versuchskörper erfolgte im Labor der Fachhochschule Kärnten.

Tabelle 4.3: Mischfolge für UHPC EM im Intensivmischer

Zeitpunkt [min]	Dauer [min]	Vorgang	Wirbler [U/min]	Trommel 42 [U/min]
0	6	Vormischen QS+MS+CEM (1)	500	ccw/cw
6	2	Zugabe Wasser+1/2 FM	500	cw
8	2	Zugabe 1/2 FM	500	cw
10	2	max. Leistungsaufnahme erreicht	230	cw
12		AFM Bestimmung	STOP	
12	30 sec	Aufmischen	230	cw
Σ	12'30"	Versuchskörperherstellung	STOP	
cw	clockwise = Gleichstrom			
ccw	counter-cw = Gegenstrom			
(1)	bei einigen Versuchen Vormischen mit QS+MS+ 1/3 Wasser			

In der ersten Projektphase, also für alle Voruntersuchungen und für die Vorserien der Haftzugprüfungen, wurden im Labor-Gleichlauf-Zwangsmischer³⁴ (Zyklus ZK 30 E) in der Regel 10 l UHPC je Versuch gemischt. Bis zur vollen Entfaltung der Fließmittelwirkung betragen die Mischzeiten rund 30 Minuten. Für alle in den Haftzug- und Haftschubversuchen hergestellten Prüfkörper wurde in der zweiten Projektphase ein Intensivmischer mit schrägem Mischbehälter³⁵ (Eirich RV02-10l) eingesetzt. Mit einer speziellen Leistungs-

³⁴ Der Gleichlauf-Zwangsmischer hat ein exzentrisch angeordnetes Rührkreuz und einen Wandabstreifer, der zusätzlich eine vertikale Umschichtung des Mischgutes bewirkt. Die langsame Rotation des Rührkreuzes bewirkt eine Tangentialgeschwindigkeit der Mischschaufeln von etwa $1,3 \text{ m/sec}$.

³⁵ Mischer mit schräg stehendem, rotierendem Behälter, der im Gegenstrom oder Gleichstrom im Vergleich zum Mischwerkzeug angetrieben werden kann. Ein stationäres Kombiwerkzeug arbeitet als Strömungsumlenker und Boden-Wandabstreifer. Für UHPC EM stellte sich die Gleichstrom-Richtung (Trommel mit 42 U/min) als effektiv heraus. Das Mischwerkzeug (Wirbler) kann mit Werkzeuggeschwindigkeiten zwischen 1 m/s bis 40 m/s laufen. Anfangs eine schnelle Geschwindigkeit von $500-900 \text{ U/min}$, nach Eintritt der Fließmittelwirkung aber Verlangsamung auf 230 U/min ($= 1 \text{ m/s}$) haben sich als vorteilhaft erwiesen.

übersetzung konnten Volumina von 4-6 l gemischt werden. Der Mischprozess wurde in begleitenden Versuchen variiert. Letztlich ergab sich die in Tabelle 4.3 angeführte Mischfolge als die zielführendste. Die gesamte Mischzeit betrug in der Regel rund 12 Minuten. Wie für UHPC bekannt beeinflusst der Mischprozess im Zusammenwirken mit den Bestandteilen die Eigenschaften des Frischbetons. Es konnte auch in dieser Arbeit ein Einfluss der unterschiedlichen Mischvorgänge auf das Fließvermögen der Mischungen festgestellt werden. Die Druckfestigkeiten wurden nicht signifikant beeinflusst.

Im Mischvorgang zeigt sich deutlich, wie das anfänglich auch nach der Wasserzugabe noch trocken oder „erdfeucht“ erscheinende Gemisch aus den feinen Bestandteilen nur durch das hochwirksame Fließmittel, das die Oberflächenspannung des Wassers herabsetzt, in ein zähflüssig fließendes Gemisch verwandelt wird. Ein höherer Leistungseintrag beim Mischen in der Anfangsphase führt dazu, dass die Fließmittelwirkung früher einsetzt. Nach der Reaktion des Fließmittels muss der Leistungseintrag bzw. die Geschwindigkeit des Mischwerkzeuges reduziert werden, damit es nicht zur „Übermischung“ kommt und der Frischbeton wieder zäher wird.

Bei allen Mischungen des UHPC EM zeigten sich kleine Mikrosilika-Agglomerate im Festbeton, offensichtlich konnten sie in dieser Mischungszusammensetzung und dem Mischvorgang nicht vollständig aufgeschlossen werden und verringern somit die theoretisch erzielbare Festigkeit. Hier wurden aber keine weiteren Optimierungsversuche angestellt.

4.1.5 Frisch- und Festbetoneigenschaften

Begleitend zu jeder im Projekt hergestellten Mischung, in Summe waren es rund 180 Mischungen, wurden Frisch- und Festbetoneigenschaften geprüft. Die Mischungen der Voruntersuchungen werden hier nicht weiter erwähnt. In Tabelle 4.4 werden die Mittelwerte der Betoneigenschaften des UHPC, der für die Hauptserien der Haftzug- und Haftschubversuche verwendet wurde, angegeben. In Tabelle 4.5 jene von ausgewählten Vorserien.

4 Materialparameter der Verbundpartner

Tabelle 4.4: Frisch- und Festbetoneigenschaften des UHPC der Hauptserien

UHPC	Herstelldatum_Serie_Mischungsbezeichnung	max. AFM	Fließzeit	Luftgehalt	Druckfestigkeit f _{cm,c100,28d}	n	Biegezugfestigkeit f _{ct,fl_40,28d}	n
		[mm]	[sec]	[%]	[N/mm ²]		[N/mm ²]	
EM EMK2g	2009-10-15/16_SNS1_EMK2g (*)	232	17	4,0	118,3	4	21,9	4
	2009-11-19_GNS1_EMK2g	209	22	3,9	126,6	2	22,2	3
	2010-05-04_HE_EMK2g_M1	282	5	n.v.	128,6	2	23,2	2
	2010-05-04_EV_EMK2g_M2	260	7	n.v.	144,7	1	22,2	3
	2010-05-25_TORG_EMK2g	240	11	3,5	136,1	2	n.v.	
<i>Mittelwerte für EM:</i>		235	14	3,8	127,3	11	22,2	12
DM	2010-01-21/22_SD1_DM5 (*)	246	26	5,3	128,3	4	24,4	6

(*) Mittelwert von 2 Mischungen
 alle Angaben für jeweils 1 Mischung, außer bei (*)
 n.v. nicht vorhanden bzw. gestrichen, weil Glasplatte feucht, Werte zu hoch

Tabelle 4.5: Frisch- und Festbetoneigenschaften des UHPC der Vorserien

UHPC	Herstelldatum_Serie_Mischungsbezeichnung	max. AFM	Fließzeit	Luftgehalt	Druckfestigkeit f _{cm,c100,28d}	n	zentr. Zugfestigkeit f _{ctm,BK50,28d}	n	E-Modul
		[mm]	[sec]	[%]	[N/mm ²]		[N/mm ²]	n	[N/mm ²]
EMK1 sehr fließfähig	2008-09-09_HZVGL2_EMK1	272	4	4,5	154,1	2			
	2008-12-17_SR0R2_EMK1f	250	6	4,4	126,4	2			
	2009-05-07_GDAS1_EMK1f	253	13	3,9	137,6	2	4,3	7	
	2009-05-06_AFM_EMK1h	268	5		114,3	2			
	2009-08-06_GDAS2_EMK1f	264	9		119,0	2			
<i>Mittelwerte für EMK1:</i>		261	7	4,3	130,3	10			47802(2)
EMK2 wenig fließfähig	2009-03-03_SK2_EMK2c	205	16	5,8	142,5	2			
	2009-03-10_MIKBHK2_EMK2c	182	n.m.	4,8	119,1	2	4,7	6	49316(1)
	2009-05-07_GDAS1_EMK2c	202	45	5,1	137,6	2			
	2009-01-20_AFM_EMK2_V8	203	35	5,2	147,0	2			
	2009-08-06_GDAS2_EMK2e	211	25		126,8	2			
<i>Mittelwerte für EMK2:</i>		201	35	5,2	134,6	10			48322(2)
EMoMS	2009-03-10_MIKBHK2_EMoMS	211	16	6,2	110,9	1	<i>Mischung ohne Mikrosilika</i>		

(1) aus Zugprüfungs-Arbeitslinie als Sekante von 0-0,6 f_{ctm} abgelesen
 (2) aus Glg.5.1-21, MC 2010, 1st complete draft, p.118
 n.m. nicht messbar

Prüfung von Ausbreitfließmaß, Fließzeit und Luftporengehalt - Normenbezug

Die Konsistenz oder besser gesagt das Fließverhalten der quasi selbstverdichtenden Betone bzw. Mörtel wird durch die Bestimmung des Ausbreitfließmaßes (AFM) und einer zugehörigen Fließzeit charakterisiert. Das AFM ist ein qualitatives Maß für die rheologi-

sche Eigenschaft „Fließgrenze“ und die Fließzeit korreliert mit der rheologischen Kenngröße „Viskosität“. vgl. [Kordts 2002] und [DAfStb 2003b]³⁶.

Die Bestimmung des AFM erfolgte in der Forschungsarbeit durch den Ausbreitversuch mit dem Mörtel Konus gemäß EN 1015-3³⁷ auf trockener Glasplatte³⁸ aber ohne Verdichtungsschläge, vgl. [ÖNORM EN 1015-3]. Das angegebene Ausbreitfließmaß ist der mittlere Durchmesser von mindestens 2 Messungen des Ausbreitkuchens. Die Durchmesser wurden in der Regel 2 min nach dem Hochziehen des Konus bestimmt. Bei diesem Vorgang wurde auch die Fließzeit (t_{200}) vom Zeitpunkt des Hochziehens an bis zum Erreichen eines Ausbreitdurchmessers von 200 mm an wenigstens zwei Stellen des Kuchens gemessen. Das Fließen des UHPC EM kam spätestens 2 Minuten nach dem Hochziehen des Konus zum Stillstand. Der UHPC DM bewegte sich auch nach 2 Minuten noch äußerst langsam weiter. Hier wurde zusätzlich das AFM nach 4 Minuten, also nach Stillstand, bestimmt. Neben dem nach dem Mischende auftretenden AFM interessiert fallweise auch das AFM zu einem bestimmten Zeitpunkt des Mischens oder nach einer gewissen Ruhezeit nach dem Mischen. Zum Beispiel wurde nach rund 30 Minuten nach Mischende festgestellt, dass das AFM des UHPC EM deutlich abnimmt, während es bei dem UHPC DM beinahe gleich groß bleibt. Beides gilt nur unter der Voraussetzung, dass der zum Prüfen verwendete UHPC unter Luftabschluss gehalten wird. An trockener Raumluft bildete sich bei beiden UHPC sofort eine „Elefantenhaut“ aus. Der UHPC DM scheint in diesem Fall sogar oberflächlich schneller auszutrocknen als der UHPC EM.

An drei Mischungen wurde das Ausbreitfließmaß parallel auch gemäß der ÖVBB-Richtlinie für selbstverdichtenden Beton, also mit dem wesentlich größeren „Betonkonus“, bestimmt [ÖVBB 2002]. Es ergab sich Abbildung 4.3, in der der Zusammenhang zwischen dem AFM mit dem Mörtel- und Betonkonus für die Mischung EM ganz grob abgeschätzt werden kann. Demnach entspricht das AFM von rund 235 mm mit dem Mörtelkonus einem Fließmaß von rund 55 cm mit dem Betonkonus und muss als sehr zähflüssig eingestuft werden.

Darüber hinaus wurde die Selbstentlüftung beobachtet. Der Luftgehalt des Frischbetons wurde mit dem 1-l Luftporentopf gemäß EN 1015-2 geprüft. Ebenso die Frischbetonroh-

³⁶ Alternativ zur Trichterauslaufzeit, die mit der dynamischen Viskosität korreliert, kann laut Richtlinie SVB bei bekannter Korrelation zur TAZ auch die Fließzeit T_{500} verwendet werden. Das ist die Zeitspanne, die der sich ausbreitende Beton benötigt, um vom Anheben des Kegelstumpfes einen mittleren Ausbreitdurchmesser von 500 mm zu erreichen.

³⁷ Konus mit dem Maßen $D1=100$ mm, $D2=70$ mm, $H=60$ mm

³⁸ in den Voruntersuchungen und Vorserien wurde das AFM auf einer leicht angefeuchteten Stahlblechunterlage bestimmt. Die damit bestimmten Werte entsprechen im Mittel etwa jenen auf der trockenen Glasplatte, wie an einigen Stichproben parallel überprüft wurde, allerdings mit größerer Streuung.

dichte. Die relativ wenig fließfähigen Mischungen weisen hohe Luftgehalte bzw. eine geringe Selbstentlüftung auf.

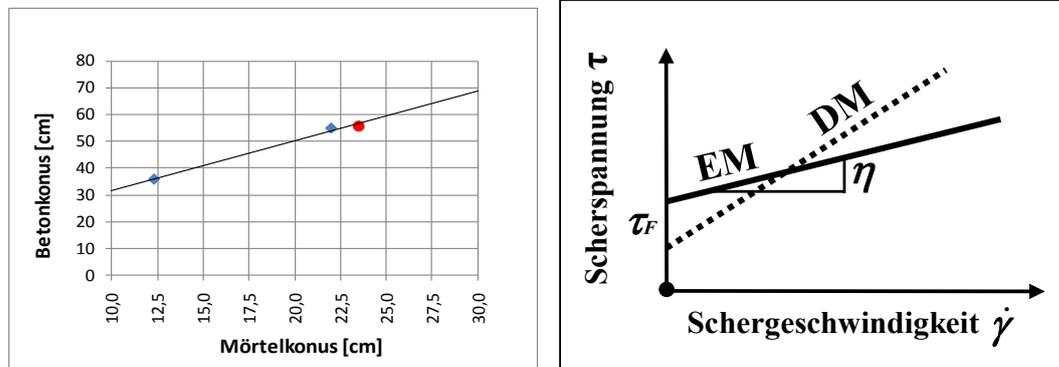


Abbildung 4.3: a) Abgeschätzter Zusammenhang von AFM mit Mörtel- bzw. Betonkonus.
b) qualitative Angaben zu den rheologischen Größen von UHPC DM und EM

Rheologische Kennwerte

Wie gut die Vertiefungen einer rauen Oberfläche von UHPC ausgefüllt werden, hängt – wie sich im Zuge der Arbeiten herauskristallisierte – von der Fließgrenze von UHPC ab und wird zudem durch die Korngrößen (hier $0,1 \mu\text{m}$ bis max. $600 \mu\text{m}$) sowie theoretisch durch die Wellenlängen der Oberflächenrauheit und deren zugehörige Rautiefen bestimmt.

Aus Ausbreitfließversuchen mit dem Mörtelkonus auf Glas kann über das Modell von Rousell et al. [Roussel 2005a], [Roussel 2005b] die Fließgrenze des Mörtels ermittelt werden. Im Rahmen des Projektes wurde von DI Gerhard Santner für UHPC EMK1 eine Fließgrenze von 9 – 23 Pa, für den UHPC EMK2 von 37-74 Pa ermittelt.

Ohne die rheologischen Kennwerte exakt zu messen, kann wie oben beschrieben aus dem AFM und der zugehörigen Fließzeit ein qualitativer Vergleich der verwendeten Mischungen hinsichtlich ihrer Rheologie gemacht werden. Das AFM und die Fließzeit unterschiedlicher Mischversuche schwanken aber beim gleichen Betontyp so stark, dass die Unterschiede der Betone EM und DM kaum signifikant sind. Qualitativ ergibt sich das in Abbildung 4.3b dargestellte Bild für die Viskosität η und Fließgrenze τ_F der Betone EM und DM.

Prüfung der Festbetoneigenschaften und Normenbezug

Druck- und Biegezugfestigkeitsprüfungen wurden gemäß der in ÖNORM B 3303 [ÖNORM B 3303] bzw. EN 12390-3 [ÖNORM EN 12390-3] für Normalbeton beschriebenen Prüfabläufen durchgeführt. Da es sich beim verwendeten UHPC gemäß dem Größtkorn von $0,5$ bzw. $0,6 \text{ mm}$ praktisch um einen hochfesten, selbstverdichtenden Mörtel handelt,

wurde auch die Norm EN 196-1 [ÖNORM EN 196-1] für die Biegezugfestigkeitsprüfung an Zementmörteln herangezogen.

Die Druckfestigkeiten wurden an Würfeln mit 100 mm Kantenlänge in der Regel im Alter von 28 Tagen geprüft, die wie in der ÖNORM vorgesehen gelagert wurden. Das bedeutet, dass das Ausschalen nach 24 bis 48 h erfolgte und die Proben bis zum 7. Tag nach der Herstellung im Wasserbecken (20°C) und anschließend bis zum Tag der Prüfung an Raumluft (22°C) gelagert wurden. Druckfestigkeiten wurden auch an Prismenreststücken nach den Biegezugprüfungen ausgeführt. Die halbierten Prismen (2*~80/40/40 mm) wurden dabei mit einer Stempelaufgabe von 40*40 mm auf Druck belastet.

Um die Würfeldruckfestigkeiten bei 100 mm Kantenlänge auf Würfeldruckfestigkeiten bei 150 mm Kantenlänge umzurechnen, schlägt die ÖNORM eine Multiplikation mit einem Faktor von 0,97 vor. Um weiter auf Zylinderdruckfestigkeiten des Normzylinders 150/300 mm zu schließen, wird ein Faktor von 0,87 eingesetzt (=100/115). Für die untersuchten Betone ergibt sich mit den in Tabelle 4.4 und Tabelle 4.5 angegebenen mittleren Würfeldruckfestigkeiten von rund 130 N/mm², dass sie als hochfeste Betone der Klasse C100/115 eingeordnet werden müssten³⁹. Wie oben schon beschrieben wird hier trotzdem der Begriff „Ultrahochleistungsbeton (UHPC)“ verwendet, da dieselben Mischungen bei Wärmebehandlung oder Verwendung von Fasern wesentlich höhere Festigkeiten erreichen und als solcher klassifiziert werden.

Zug- und Druckfestigkeit und deren zeitliche Entwicklung

Die Zugfestigkeit wurde im Rahmen des Projektes auf drei Arten geprüft. Erstens wurde die zentrische Zugfestigkeit des UHPC EMK1 und EMK2 an Bohrkernen mit 50 mm Durchmesser und 120 mm Höhe, die aus Prismen mit den Abmessungen 120/120/360 mm gewonnen wurden, nach einem in [Juhart 2007] beschriebenen Prüfablauf bestimmt. Dabei wurde auch die Spannungs-Dehnungslinie im elastischen Verformungsbereich aufgenommen und der E-Modul als ihre Sekante zwischen 0,0 und $0,6 \times f_{ctm}$ abgelesen (siehe Tabelle 4.5).

Zweitens wurden die Biegezugfestigkeiten im 3-Punkt-Biegeversuch an Mörtelprismen mit den Dimensionen 160/40/40 mm gemäß ÖNORM 196-1 ermittelt. Nachdem in den Voruntersuchungen und Vorserien dieselbe Lagerung wie für Würfel angewandt worden war, wurden die Prismen für Biegezugprüfungen im Zuge der Hauptserien durchgehend vom Ausschalen bis zum Tag der Prüfung, in der Regel im Alter von 28 Tagen, unter Wasser (20°C) gelagert⁴⁰. Nach dem Model Code 2010 [fib 2010] lässt sich die zentrische Zug-

³⁹ In ÖNORM B 4710-1 (ident EN 206-1) zum Beispiel ist die höchste angegebene Festigkeitsklasse C 100/115 mit einem Zielwert für die mittlere Druckfestigkeit von $\beta_{WN150mm} \geq 127 \text{ N/mm}^2$

⁴⁰ Es wurde festgestellt, dass die Lagerungsart bei Biegezugprismen einen wesentlichen Einfluss auf das Prüfergebnis hat. Unter Wasser gelagerte Prismen weisen im Prüfalter von 28 Tagen eine etwa um 25 % höhere Biegezugfestigkeit auf als im Prüfalter von 7 Tagen. Werden die Prismen aber bis

festigkeit f_{ctm} aus der mittleren Biegezugfestigkeit $f_{ct,fl}$ gemäß folgender Formel berechnen:

$$f_{ctm} = A_{fl} \cdot f_{ct,fl} \quad (4.1)$$

Der Beiwert A_{fl} berechnet sich mit der Balkenhöhe h_b von 40 mm und dem Koeffizient α_{fl} , der eigentlich für Normalbeton mit 0,06 vorgeschlagen wurde und für hochfesten Beton etwas geringer ausfallen würde, nach der Formel:

$$A_{fl} = \frac{\alpha_{fl} \cdot h_b^{0,7}}{1 + \alpha_{fl} \cdot h_b^{0,7}} \quad (4.2)$$

Mit den Werten der Biegezugfestigkeiten aus Tabelle 4.4 ergibt sich für die mittlere zentrische Zugfestigkeit f_{ctm} im Prüfalter von 28 Tagen des UHPC EM ein Wert von $9,8 \text{ N/mm}^2$ und für den UHPC DM von $10,8 \text{ N/mm}^2$. Wie gesagt, wird die Zugfestigkeiten laut [fib 2010] damit überschätzt.

Die dritte Weise, in der Zugfestigkeiten in der Arbeit ermittelt wurde, sind die in Kapitel 5.1 beschriebenen Haftzugversuche. In den Fällen, in denen die 2,5 mm dicke UHPC-Schicht zwischen den Stahladaptoren im Beton bricht, entspricht der Prüfwert der zentrischen Zugfestigkeit. Es wurden im Alter von 28 Tagen Werte für f_{ctm} von $9,6 \text{ N/mm}^2$ des UHPC EM und von $9,7 \text{ N/mm}^2$ des UHPC DM ermittelt.

Die hohen Zugfestigkeiten der UHPC-Schichten der Haftzugversuche überraschen im Vergleich zu den an Bohrkernen ermittelten Werten und auch im Vergleich zu den aus Druckfestigkeiten abgeleiteten Werten⁴¹. Erklärbar ist das aus dem Umstand, dass sich die theoretische Zugfestigkeit durch den Einfluss von Rissen und Mikrorissen im Gefüge reduziert. Der Einfluss von Defekten wie z.B. von Rissen steigt mit steigendem Volumen des Werkstoffes wie aus der Bruchmechanik spröder Werkstoffe bekannt, vgl. [Bürgel 2005], p. 164ff⁴². In unserem Fall steigt die Zugfestigkeit mit sinkender Schichtdicke.

Die zeitliche Entwicklung der Biegezug- und Druckfestigkeiten wurde begleitend zur Haftzugversuchsserie HE an Prismen bzw. Prismenreststücken für den UHPC EM bestimmt. Siehe auch Kapitel 5.1.2. In Abbildung 4.4 sind die Mittelwerte von je 2 Prüfkörpern der Biegezug- und 3 Proben der Druckfestigkeit dargestellt.

zum 7.Tag unter Wasser, anschließend bis zum 28.Tag an trockener Raumluft wie Würfel gelagert, fällt die Festigkeit vom 7. zum 28.Tag um 30 bis 40 % ab.

⁴¹ Gemäß Gleichung 5.1-3b in MC 2010 [fib 2010] ergibt sich bei der Würfeldruckfestigkeit von 130 N/mm^2 ein Wert f_{ckm} von 110 N/mm^2 und daraus eine zentrische Zugfestigkeit f_{ctm} von $5,3 \text{ N/mm}^2$.

⁴² „Die Festigkeit wird bestimmt durch die Fehlergröße in einer Probe oder einem Bauteil, und mit dem Volumen steigt die Wahrscheinlichkeit, dass größere Fehler vorhanden sind.“, [Bürgel 2005] p.167

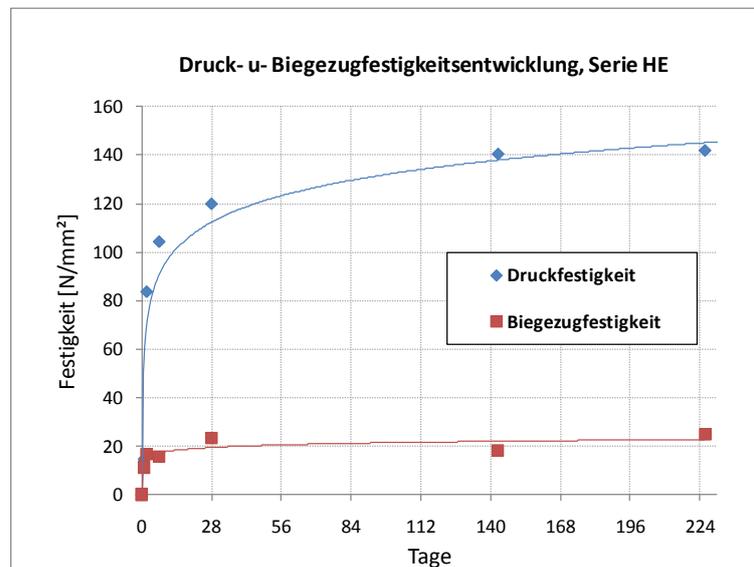


Abbildung 4.4: Entwicklung von Druck- und Biegezugfestigkeit des UHPC EM

Die Biegezugfestigkeit steigt in den ersten Tagen wesentlich schneller als die Druckfestigkeit an. Sie erreicht nach nur 1 Tag 45% des Maximalwertes, während die Druckfestigkeit erst 10% des Wertes, der nach 226 Tagen geprüft wurde, erreicht.

E-Modul, dessen zeitl. Entwicklung und Querdehnzahl

Die Entwicklung der Festigkeit und des E-Moduls mit der Zeit kann nach [fib 2010] abgeschätzt werden. Der statische E-Modul entwickelt sich demgemäß in den ersten Tagen schneller als die Festigkeit des Betons. Zum selben Ergebnis kommt *Schachinger* in seinen Untersuchungen an UHPC mit verschiedenen Zementen, vgl. [Schachinger 2007]. Aus seinen Untersuchungen geht wie auch in den eigenen Untersuchungen auch festgestellt außerdem hervor, dass sich die Zugfestigkeit etwas schneller entwickelt als die Druckfestigkeit (siehe Abbildung 4.5).

Gemäß *Schachinger* ist die Festigkeitsentwicklung bei 20°C-Lagerung durch einen sehr steilen Anstieg im jungen Alter und eine langsame aber ausgeprägte Nacherhärtung im hohen Alter charakterisiert. Mittels Si-MAS-Festkörper-NMR wurde an einer Modellmischung mit Eigenschaften des verwendeten UHPC, der der eigenen Mischung ähnelt, der Hydratationsverlauf der Silikatphasen von Zement und Silikastaub gemessen. Die Hydratationsreaktion des Zementes war nach spätestens 7 Tagen weitgehend abgeschlossen, während der Anteil von reagiertem Silikastaub noch lange weiter anstieg. Die puzzolanische Reaktion der Mikrosilika trägt erst nach der Zementhydratation (bzw. ca. ab dem 5.Tag) wesentlich zur Gefügeverdichtung und Nacherhärtung bei.

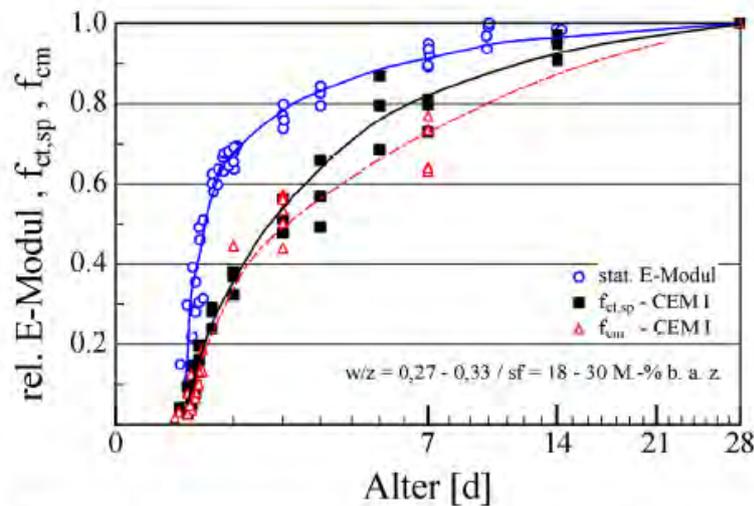


Abbildung 4.5: Entwicklung von E-Modul (blau), Spaltzugfestigkeit (schwarz) und Druckfestigkeit (rot) von UHPC mit Portlandzement aus [Schachinger 2007]

Der E-Modul wurde wie bereits erwähnt im Zuge der zentrischen Zugfestigkeitsprüfung an Bohrkernen für den UHPC EMK2 ermittelt. Darüber hinaus wird er mit der im Model Code 2010 [fib 2010] angegebenen Beziehung unter Verwendung des Beiwertes $E_{c0} \cdot \alpha_E$ ($=21500$) für quarzitische Gesteinskörnungen berechnet. Die mittlere Zylinderdruckfestigkeit f_{cm} wird wiederum durch Multiplikation der an 100 mm Würfeln geprüften Druckfestigkeit mit den Faktoren 0,97 und 0,87 ermittelt.

$$E_{ci,28d} = E_{c0} \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{1/3} \quad (4.3)$$

Die Ergebnisse für den E-Modul $E_{ci,28d}$ für ein Alter von 28 Tagen der Betone UHPC EMK1 und EMK2 siehe Tabelle 4.5⁴³. Für die Betone der Hauptserien errechnet sich der E-Modul zu 47367 N/mm² des UHPC EM und zu 47497 N/mm² für UHPC DM. Dieser Wert des UHPC DM stimmt gut mit dem am selben Beton mit Fasern ermittelten Prüfwert überein. Mit der im Sachstandsbericht UHPC [Schmidt 2008] angegebenen Beziehung für feinkörnigen UHPC ergäben sich etwas geringere Werte um 43000 N/mm².

Für die **Querdehnzahl** von UHPC werden in [Schmidt 2008] Untersuchungen von [Tue 2004] zitiert: Sie beträgt demgemäß für Feinkorn-UHPC 0,18 bis 0,19 und für grobkörnigen UHPC mit Basalt (5-8 mm) 0,21. Für fließfähigen UHPC liegt die Querdehnzahl

⁴³ Der mit der gemäß MC 2010 berechnete E-Modul stimmt besser mit dem unter Zug geprüften Wert überein als der mit der im Sachstandsbericht UHPC [Schmidt 2008] angegebenen Beziehung für feinkörnigen UHPC, $E=8800 \cdot f_c^{1/3}$. Mit dieser Beziehung wird für UHPC EMK1 42152 N/mm² und für UHPC EMK2 44643 N/mm² berechnet.

wie für eine Flüssigkeit bei annähernd 0,5. Sie entwickelt sich also im Zuge der Erhärtung zu einem Wert um 0,2.

Scher- oder Schubfestigkeit von Beton und UHPC

Die Scher- bzw. Schubfestigkeit ist als Materialkennwert für Beton nicht von Bedeutung, da für das Versagen die jeweilige Hauptzugspannung maßgebend ist. Die aufnehmbare Hauptzugspannung ist abhängig vom Verhältnis Zug- zu Druckspannung. Bei reiner Schub- bzw. Torsionsbeanspruchung liegen gleich große Hauptzug- wie Hauptdruckspannungen vor. Dann liegt die aufnehmbare Hauptzugspannung, die als „Schubfestigkeit“ bezeichnet werden kann, in der Größe der zentrischen Zugfestigkeit. Vgl. [Grübl 2001].

Bruchenergie UHPC

Das Bruchverhalten des Betons unter Zugbeanspruchung erlaubt es, bruchmechanische Konzepte mit Energiebetrachtungen anzuwenden. Die Bruchenergie G_f ist dabei ein wesentlicher Kennwert. Sie kann durch die Fläche unter der Arbeitslinie des zentrischen Zugversuches bestimmt werden. Für die Bruchenergie G_f von UHPC ohne Fasern finden sich in der Literatur die in Abbildung 4.6. dargestellten Angaben.

Tabelle 6.4: Bruchmechanische Kenngrößen von Fein- und Grobkorn-UHPC ohne Fasern nach [Ma03]

Probenart	Mörtel 1	Mörtel 2	Mörtel 3	Feinkorn UHPC 1	Feinkorn UHPC 2	Grobkorn UHPC
Zylinderdruckfestigkeit f_c [N/mm ²]	40,0	81,2	106,6	149,1	196,3	145,0
Bruchenergie G_f [N/m]	53,7	65,1	66,5	62,8	54,7	95,0
Zugfestigkeit f_{ct} [N/mm ²]	3,2	6,1	8,0	9,4	11,9	8,3
Charakteristische Länge l_{ch} [mm]	133,5	61,3	44,7	32,6	20,1	80,6

Abbildung 4.6: Bruchmechanische Kenngrößen aus [Nöldgen 2009] cit. nach [Ma 2003a]

Gemäß MC 2010 [fib 2010] lässt sich G_f für Normalbeton aus der Zylinderdruckfestigkeit f_{cm} mit folgender Gleichung abschätzen:

$$G_f = 73 \cdot f_{cm}^{0,18} \quad (4.4)$$

Mit der mittleren Würfeldruckfestigkeiten W100 von rund 130 N/mm² und der daraus berechneten Zylinderdruckfestigkeit f_{cm} von rund 110 N/mm² ergibt sich eine Bruchenergie von 170 N/m. Für weitere Untersuchungen wird davon ausgegangen, dass der in [Ma

2003a] für Feinkorn UHPC ermittelte Wert von rund 62,8 N/m am besten den in der vorliegenden Arbeit verwendeten UHPC Mischungen entspricht.

Wassergehalt und Wasseraufnahme

Stichprobenartig wurde der Wassergehalt und die Wasseraufnahme von UHPC EM und DM bestimmt. Die Fragestellung ergab sich aus der Beobachtung, dass sich UHPC-Schichten nach einigen Tagen trockener Lagerung vom Untergrund ablösen lassen. Siehe dazu auch die ausführliche Beschreibung in Kapitel 0.

Der Wassergehalt bzw. Feuchtegehalt von UHPC-Schichten der Haftzug- und Haftschubprobekörper (siehe auch Abbildung 5.21 auf Seite 130) sowie von Prismenreststücken wurde mit der Darr-Methode bestimmt: Die Proben werden im Ofen bei 105°C bis zur Massekonstanz⁴⁴ getrocknet und vor und nach der Trocknung gewogen. Aus der Differenz der Massen ergibt sich der auf die trockene Masse bezogene Feuchtegehalt. Er kann durch Multiplikation mit der ermittelten Trockenrohddichte des UHPC auch als Volumenbezogener Feuchtegehalt angegeben werden ($\delta_{DM} = 2357 \text{ kg/m}^3$; $\delta_{EM} = 2300 \text{ kg/m}^3$).

Die Wasseraufnahme wurde bestimmt, in dem die vorher vollständig ausgetrockneten Proben solange unter Wasser gelagert wurden, bis sie bei zwei aufeinanderfolgenden Wägungen eine konstante Masse aufweisen⁴⁴.

Speziell wurden UHPC-Schichten, die von den Untergründen nach den Haftfestigkeitsprüfungen abgelöst wurden, mit 100 mm Durchmesser und 2,5 mm Schichtdicke untersucht. Eine davon, aus der Serie TORG, wurde unmittelbar nach der Haftschubprüfung mit 30d untersucht. Die meisten Proben, an welchen der Feuchtegehalt bestimmt wurde, lagereten allerdings schon einige Wochen zuvor an trockener Raumluft (rund 22 °C und 35% r.F.). Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.6 aufgelistet.

Tabelle 4.6: Feuchtegehalt von UHPC-Proben

UHPC	aus Verbundprobe	Lagerung vor Messung	Trockenzeit [d]	Feuchte M%
<i>UHPC-Schichten Ø/Dicke= 100/2,5 mm:</i>				
EM	AB_2010-05-13_TORG_GR05_6	30d MVS	63	4
EM	AB_2010-10-14_SNS1_ROO8	266d RL	53	2,5
DM	AB_2010-01-21_SD1_ROO1	168d RL	53	1,9
<i>Prismenreststücke 40x40x35 mm:</i>				
EM	AB_2010-05-04_HE_EMK2g	156d RL	63	3,2
DM	AB_2010-01-21_SD1_DM 5	159d RL	63	0,7
MVS	mit Verdunstungsschutz = luftdicht abgeschlossen			
RL	Lagerung an Raumluft (22°±5°C, 35±10% r.F.)			

⁴⁴ Die Vorgangsweise entspricht der Verfahrensbeschreibung nach RILEM TC14-CPC, „Absorption of water by concrete by immersion“. Massekonstanz gilt als erreicht, wenn die Differenz zweier Wägungen <0,1 M-% ist, vgl. [RILEM 1982].

Es zeigt sich, dass die bis zur Haftzugprüfung konservierte, also mit Verdunstungsschutz gelagerte Probe aus UHPC EM, einen relativ hohen Feuchtegehalt von 4 M% aufweist. Auch UHPC EM-Schichten, die einige Wochen an trockener Raumluft gelagert waren, weisen noch einen erheblichen (Ausgleichs-)Feuchtegehalt von rund 2,5 M% auf. Der Feuchtegehalt der Probe aus UHPC DM ist niedriger, er beträgt nach trockener Lagerung 1,9 M%. Daraus wird geschlossen, dass die Porositäten für UHPC relativ hoch sind und bei UHPC EM größer als bei UHPC DM. Außerdem ist der Feuchtegehalt, der nach einer Lagerung mit Verdunstungsschutz noch in den Proben vorhanden ist, größer als der Ausgleichsfeuchtegehalt an trockener Raumluft. Demgemäß führt eine weitere Austrocknung der UHPC-Schichten auch zu entsprechenden weiteren Schwindverformungen. Auch bereits an Raumluft ausgetrocknete Schichten können – verbunden mit Schwindverformungen – noch weiter ausgetrocknet werden. Siehe dazu auch die Messungen der Schwindverformungen im Kapitel 4.1.6 und die Prüfungen an zusätzlich getrockneten Proben der Serie HE im Kapitel 5. Die an Prismenreststücken bestimmten Feuchtegehalte und die geprüften Wasseraufnahmen bestätigen die bei der Darr-Wägung der UHPC-Schichten erkannten Unterschiede der Betone EM und DM.

4.1.6 Verformungsverhalten während der Erhärtung

Durch die chemische und physikalische Wirkung des Wassers ändert sich das Volumen des UHPC schon von Beginn der Verarbeitung an im Zuge seiner Erhärtung. Die Ursachen sind Austrocknung, Abfließen der Hydratationswärme und autogenes Schwinden wie auch im Kapitel 2.7 beschrieben. Die Behinderung von Formänderungen führt zu Zwangsspannungen und kann zur Rissbildung in jungem Alter führen.

Methode der Schwindmessungen:

Messungen des Schwindverlaufes werden mittels Schwindrinnen der Fa. Schleibinger durchgeführt. Dabei werden verschiedene Betonmischungen, Konsistenzen und Lagerungsbedingungen miteinander verglichen (siehe Tabelle 4.7). Mit dem linearen Messsystem können die Verformungsmessungen bereits vor der Erstarrung zu einem sehr frühen Zeitpunkt nach der Frischbetonherstellung begonnen werden. Sie beinhalten daher das plastische Schwinden bzw. kapillare Frühschwinden und das bei feinkörnigem UHPC starke autogene Schwinden (AS) innerhalb der ersten 24 Stunden.

Tabelle 4.7: Schwindmessungen

	Messbeginn	Dauer [d]	UHPC	Lagerung	Beschreibung
1	19.02.2009	89	EMK1 und EMK2, Vorversuche	MVS	Vergleich der Konsistenz K1 und K2
2	20.05.2009	49	EMK1 und EMK2	MVS	Vergleich K1 und K2, Messung von Betonkern- und Randtemperatur
3	16.12.2009	82	DM4	MVS	DM Mischung mit Verzögerer
4	31.03.2010	35	DM5="DM"	MVS /OVS	Vergleich MVS bzw. OVS DM
5	05.05.2010	27	EMK2="EM"	MVS /OVS	Vergleich MVS bzw. OVS EM

Das autogene Schwinden wird unter konservierenden (dicht abgeschlossenen) und isothermalen Bedingungen erfasst. Der Beton wird dafür unmittelbar nach dem Befüllen rundum in eine dicke PE Folie eingewickelt bzw. eingeschlagen und mit Klebeband verschlossen. Dem gegenüber stehen das kapillare Frühschwinden und das nach der Erstarrung einsetzende Trocknungsschwinden, das bei nicht vor oberflächlicher Austrocknung geschützter Lagerung gemessen wird. Es ist von den Umgebungsbedingungen wie der relativen Luftfeuchte und vom Verhältnis von austrocknender Oberfläche zum Volumen des Betonkörpers abhängig.



Abbildung 4.7: Schwindrinnenbefüllung und Lagerung

Die beiden Lagerungsarten 8 (siehe Abbildung 4.7) entsprechen den Bedingungen „mit Verdunstungsschutz“ MVS und „ohne Verdunstungsschutz“ OVS der Haftzugprobekörper wie sie im Kapitel 5.1.1 beschrieben sind. Die „unorthodoxe“ Verwendung der Schwindrinnen ohne konservierende Lagerung soll es ermöglichen, die Wirkung einer frühen Austrocknung auf das Schwindverhalten der Verbundproben zu ergründen. Das Trocknungsschwinden ist allerdings bei den Messungen in der Schwindrinne und bei den Haftzugpro-

bekörpern wegen des unterschiedlichen Oberfläche/Volumen-Verhältnisses nicht gleich groß.

Das Messprinzip der Schwindrinne wird im Handbuch der Firma Schleibinger im Wesentlichen wie folgt beschrieben, vgl. [Schleibinger 2011]: In eine ein Meter lange Rinne aus Edelstahl mit einem Querschnitt von 6x10 cm wird Frischmörtel eingefüllt. Ein beweglich gelagerter Stempel auf der einen Seite der Rinne überträgt die Längenänderung auf einen Messaufnehmer (induktiver 5 mm Geber mit einer Auflösung von 0,3 μm und einer Genauigkeit besser 1 μm). Am anderen Ende der Rinne befindet sich ein Widerhaken der die Probe an der Rinnenwand festhält. Ein ebensolcher Haken befindet sich am Aufnehmerstempel. Die Rinne ist mit einem Neoprenfließ ausgelegt, um zu verhindern, dass die Wandreibung oder mechanisches Klemmen die Bewegung der Probe in der Rinne behindert. Die Rinnen mit dem Fassungsvermögen von 6l werden in unserem Fall mit 5l fließfähigem Frischbeton unmittelbar nach dem Mischen befüllt (siehe Abbildung 4.7). Etwa zum Zeitpunkt des Erstarrungsbeginnes der Mischungen wird der Messaufnehmer freigegeben, sodass anfänglich geringe positive Verformungen durch eine „Setzung“ des plastischen Betons erfolgen und dann die negativen Schwinddehnungen einsetzen. Die erhöhte Frischbetontemperatur hat sich zu diesem Zeitpunkt auf Raumtemperatur abgekühlt.

Die Rinnen werden in einem Raum mit definierten Raumklimabedingungen aufgestellt. Bei den Versuchen wird in der Regel die Betonkerntemperatur durch einen mittig einbetonierten PT 1000 Fühler aufgezeichnet. Mittels kombinierten Messfühlers wird auch die Temperatur und relative Luftfeuchte im Raum gemessen. Die Raumtemperatur schwankt um $\pm 2^\circ\text{C}$ in 28 Tagen und beträgt für die verschiedenen Messungen im Mittel 24 (EMK1 und EMK2 Vgl) und 25°C (EM und DM). Die relativen Feuchten liegen zwischen 25 und 45%(45 bei EMK1 und EMK2 VGL). In den ersten 24 Stunden der jeweiligen Messungen ist die Temperatur und Feuchte praktisch konstant. Der Temperatureinfluss wird bei den Auswertungen nicht berücksichtigt (rd $\pm 10 \mu\text{m}/^\circ\text{K}$).

Begleitende Messungen der Erstarrungszeit

Begleitend zu den Schwindmessungen werden der Erstarrungsbeginn und das Erstarrungsende mit dem VICAT Gerät gemäß EN 196-1 [ÖNORM EN 196-1] bestimmt. Es wird die Nadeleindringung an einer Probe, die an trockener Raumluft steht, und an einer Probe unter Wasserlagerung vom Zeitpunkt der Wasserzugabe an gemessen. Überraschend ist dabei, dass sich an trockener Raumluft (rd. 35% r.F.) in der ersten Stunde bei den verwendeten UHPC Mischungen nicht nur die bekannte „Elefantenhaut“, sondern eine steife Schicht von einigen Millimetern Dicke bildet. Sie „schwimmt“ auf dem zähflüssig bleibenden Beton darunter auf. Bei Betonproben der Mischung EM ist das Phänomen weniger stark ausgeprägt als bei Mischungen DM. Bei den Proben EM lässt sich die Nadeleindringung mit dem VICAT Gerät auch an den oberflächlich trockenen Proben einigermaßen prüfen. Bei der Mischung DM bleibt die Nadel nach etwa einer halben Stunde stecken bzw. drückt sie die angesteifte oberflächliche Betonschicht von 5 mm Dicke einseitig ein, sodass diese auf kippt (siehe Abbildung 4.8). Eine Bestimmung der Erstarrungszeit ist so nicht

möglich. Es zeigt aber, dass der oberflächlich steife Beton als eine Art Austrocknungsschutz für die darunter liegende Masse wirkt.

Bei der VICAT-Prüfung unter Wasserlagerung der Proben ist auch keine eindeutige normgemäße Bestimmung der Erstarrungszeit möglich. Ab einer gewissen Erhärtungszeit verlangsamt sich die Nadeleindringung durch die kontinuierlich zunehmende Zähigkeit der Mischung. Die Nadel braucht einige Minuten, um „in Zeitlupe“ dann ganz in den Mörtelkuchen einzudringen. Hier wird der „Erstarrungsbeginn“ als der Zeitpunkt der Prüfung angegeben, zu dem die Nadel in unbegrenzter Zeit die normenmäßig geforderte Eindringtiefe erreicht (=6 mm ± 3 mm über der Bodenplatte).



Abbildung 4.8: links: Messung der Nadeleindringung bei wassergelagerter Oberfläche; rechts: Aufschwimmen der angesteiften obersten Schicht bei Lagerung an Luft.

Alternativ zur Prüfung mit dem VICAT Gerät wird ein in [Fontana 2007], p.56 vorgeschlagenes Verfahren angewandt, siehe auch Kapitel 2.7.3. Für die Beurteilung spannungsinduzierender Verformungen ist jener Zeitpunkt t_0 maßgebend, ab dem sich ein durchgehender Festkörper ausbildet und Zugspannungen in der Matrix übertragen werden können. Dieser Zeitpunkt t_0 wird als der Punkt mit der maximalen Verformungsgeschwindigkeit v (z.B. in $\mu\text{m}/\text{h}$) beim Schwinden bestimmt. Das spannungsinduzierende Schwinden wird als jener Anteil an der gemessenen Verformung ermittelt, der ab dem Zeitpunkt t_0 auftritt.

Nach Weiss – zitiert in [Fontana 2007] – korrespondieren Erstarrungsbeginn und -ende, nach VICAT nicht direkt mit dem Zeitpunkt t_0 . Für hochfeste Mörtel treten die Maxima der Verformungsgeschwindigkeiten in der Regel später als das VICAT-Erstarrungsende auf, vgl. [Fontana 2007]. Der mit dem VICAT Gerät bestimmte Erstarrungsbeginn bezieht sich eher auf die Verarbeitbarkeitsgrenze. Das Erstarrungsende ist wegen der Abhängigkeit vom Nadelgewicht ein relativ willkürlich gewählter Zeitpunkt während des Übergangs vom plastisch verformbaren Zustand zum Festkörper. Tabelle 4.8 gibt die ab Wasserzugabe mit den beiden Methoden bestimmten Erstarrungszeiten an.

Tabelle 4.8: Erstarrungszeiten

Erstarrungszeiten ab Wasserzugabe	EM(K2)	EM(K2)	DM	DM	EMK1	DM4
	OVS	MVS	OVS	MVS	OVS	MVS
	[hh:mm]					
$t_0 \text{ max } v$	06:52	12:38	06:28	08:16		
Erstarrungsbeginn VICAT	05:30	k.A.	(*)	05:00	05:30	05:00
Erstarrungsende geschätzt	06:30	k.A.	(*)	~08:00		08:00
t_0 (*)	Zeitpunkt der maximalen Verformungsgeschwindigkeit v nicht möglich, da oberflächlich zu steif					

Tabelle 4.8 zeigt, dass die Erstarrung bei den OVS gelagerten Proben wesentlich früher einsetzt, als bei den MVS gelagerten Proben. Die oberflächlich ausgetrocknete, steife Schicht der Proben OVS ist nicht mehr plastisch verformbar. Es kann daraus geschlossen werden, dass sich auch bei den Haftzugprobekörpern ein erstarrter steiferer Betonring von der Oberfläche ausgehend bis in einige Millimeter Tiefe ausbildet, während das Innere noch plastisch verformbar ist. Für OVS gelagerte Proben fällt der Erstarrungsbeginn und das Erstarrungsende nahe zusammen, wie es auch *Schachinger* in seinen Untersuchungen an UHPC mit Fasern feststellt, vgl. [Schachinger 2002]. *Schachinger* gibt außerdem für UHPC mit Portlandzement und 18 M% Mikrosilika (sf), das Erstarrungsende mit 7,2 h nach Wasserzugabe und den Beginn der E-Modulentwicklung nach 7,7 h an. Vgl. [Schachinger 2007], p.112.

Ergebnisse der Schwindmessungen

Die Verformungen werden ab dem Zeitpunkt der Wasserzugabe in $\mu\text{m}/\text{m}$ angegeben. 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ entspricht der Dehnung 1‰. Es wird die gesamte gemessene Verformung dargestellt, also auch die Verformung infolge der Betontemperaturänderung. Der Anteil aus dieser Verformung beträgt 120 $\mu\text{m}/\text{m}$ bei der maximal gemessenen Temperaturdifferenz von 10°C im Zuge der chemischen Reaktion des Zementes innerhalb von 24 h mit der vereinfachten Annahme eines konstanten Wärmeausdehnungskoeffizienten von $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$, also bis zu $\pm 0,12\%$.

In Abbildung 4.9/Abbildung 7.11 sind die Ergebnisse der Schwindverformungsmessungen an den UHPC Mischungen EM und DM, die für die Verbundfestigkeitsprüfungen in den Hauptserien eingesetzt werden, dargestellt. Es sind die beiden Varianten der Lagerungsbedingungen, OVS und MVS, gezeigt. Für alle vier Versuche ist der Zeitpunkt der Wasserzugabe rund 4 Stunden vor dem Messbeginn (vgl. Tabelle 4.9) annähernd der Gleiche. So können die Verläufe direkt verglichen werden. Für die Mischung EM wird auch der Temperaturverlauf in den ersten 24 h der Betonerhärtung angegeben. Für beide Mischungen wird der Verlauf der Verformungsgeschwindigkeit v gezeigt, aus dem der Zeitpunkt t_0 wie oben beschrieben und damit das spannungsinduzierende Schwinden ablesbar ist.

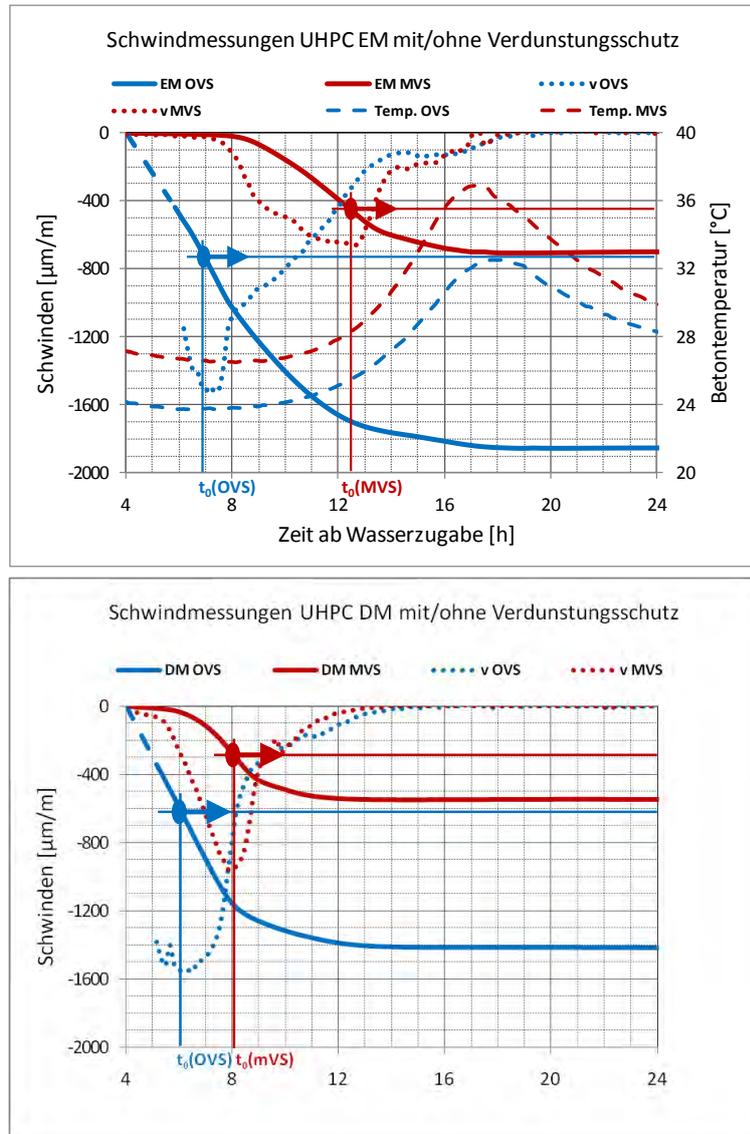


Abbildung 4.9: Schwindverlauf der beiden verwendeten UHPC-Mischungen EM und DM in den ersten 24 h ab Wasserzugabe. Die Verformungsgeschwindigkeit v , der Erstarrungszeitpunkt t_0 , der Anteil des spannungsinduzierenden Schwindens ab t_0 und auch die Betonkerntemperatur beim UHPC EM sind angegeben.

Bei Proben, die OVS gelagert werden, setzt das Schwinden zum Start der Messung bereits ein und steigt rasch an. Leider gingen die ersten Messwerte verloren und müssen linear interpoliert angegeben werden (strichlierter Anfangsbereich der blauen Linie). Bei Proben MVS gibt es eine frühe „Ruhephase“ und die Verkürzung beginnt erst nach rund fünf (DM MVS) bzw. acht (EM MVS) Stunden. In den folgenden Stunden schwinden beide Proben rasch, bis zu einem Knick im Kurvenverlauf, der gleichzeitig spätestens mit dem Maximum der Betontemperatur auftritt. Bei Proben der DM etwa nach 13 Stunden, bei der EM etwa nach 17 Stunden. Im weiteren Verlauf flachen die Kurven auf dem jeweils erreichten Ni-

veau stark ab und gehen praktisch parallel mit wesentlich langsamer zunehmender Verformung weiter⁴⁵. Proben OVS erreichen insgesamt ein wesentlich höheres Schwindmaß, dafür sind vor allem die ersten Stunden bis zum Erreichen des Betontemperaturmaximums ausschlaggebend. Im betrachteten Zeitraum von 28 Tagen nähern sich weder die Proben MVS noch OVS schon ihrem Endschwindmaß. Der stetige und parallele Anstieg der Schwindkurven, wie in Abbildung 4.10a zu sehen ist, zeigt, dass das Schwinden auch nach 28 Tagen noch nicht ganz abgeschlossen ist (vgl. auch Festigkeitsentwicklung). Bei den Messungen der Vorserien wurde beobachtet, dass sich die Kurven des Schwindverlaufs erst nach etwa 3 Monaten merkbar der Horizontalen asymptotisch annähern, also dem Endschwindmaß nahe kommen.

Das Maximum der Betontemperatur und damit auch der Höhepunkt der chemischen Reaktion des Zementes wird bei Proben MVS und OVS zum selben Zeitpunkt erreicht. Das größere Anfangsschwinden der Proben OVS ist demnach nicht auf das chemische Schwinden, sondern auf die frühe oberflächliche Austrocknung bzw. das kapillare Schwinden im zunächst noch plastischen Beton zurückzuführen. Dieses kapillare Schwinden findet in einer Phase statt, in der die chemische Reaktion des Zementes mit dem Anmachwasser in der sogenannten „dormanten Phase“ ruht. Das ist auch an der Betontemperatur ablesbar, die in dieser Phase der Umgebungstemperatur entspricht. Das bedeutet, dass noch keine echte Festigkeitsentwicklung stattfindet, der Beton allerdings von der Oberfläche ausgehend schon ansteift. Man könnte sagen, dass sich eine ausgeprägte „Grünstandfestigkeit“⁴⁶ ausbildet und der Beton zunehmend seine Plastizität verliert. Die Zugbruchdehnung ist in dieser Phase minimal. Durch Dehnungsbehinderung treten sehr bald Risse auf, die wie die Literatur [VDZ 2006] angibt, sehr breit (>1 mm) werden können. Proben OVS erstarren also „vorzeitig“ in dem Sinne, dass die Austrocknung zu einer relativ hohen Steifigkeit führt.

Die Maxima der Verformungsgeschwindigkeiten treten bei der Lagerungsbedingung OVS deutlich früher auf als bei MVS. Geht man nun davon aus, dass ab dem Zeitpunkt ihres Auftretens t_0 („Erstarrungszeitpunkt“) die Verformungen auch Spannungen induzieren können, so wird noch deutlicher, dass bei Proben OVS größere Zwängungsbeanspruchungen existieren müssen. Dieser Anteil an spannungsinduzierenden Verformungen, die Differenz der Dehnungen nach 28 Tagen und zum Zeitpunkt t_0 , ist in Tabelle 4.9 angegeben. Die Mischung DM-OVS schwindet in der Anfangsphase schneller als die Mischung EM-OVS, die Mischung EM erreicht aber insgesamt höhere Schwindmaße.

⁴⁵ Die minimale negative Steigung wurde erst bei einem längeren Zeitabschnitt von einigen Tagen, der in Abbildung 4.9 nicht dargestellt ist, erkennbar.

⁴⁶ Die Festigkeits- und Verformungseigenschaften von „grünem Beton“ werden im wesentlichen durch Adhäsionskräfte zwischen dem Wasser und den festen Bestandteilen sowie durch die innere Reibung und die Kornverzahnung der Gesteinskörnungen bestimmt. Größenordnung 0,1 bis 0,5 N/mm² gemäß [Wesche 1993].

Tabelle 4.9: Schwindmaße von t_0 bis zum Alter von 28d

UHPC	Zeit	gesamte Dehnungen			spannungsinduzierend	
	Wasserzugabe- Messebeginn	nach t_0	nach 21h	nach 28d	Differenz 21h- t_0	Differenz 28d- t_0
	[hh:min]	[*]				
		[$\mu\text{m}/\text{m}$]				
EM MVS	04:08	-457	-703	-830	-246	-373
EM OVS	03:32	-844	-1857	-1950	-1013	-1106
DM MVS	04:10	-309	-550	-680	-241	-371
DM OVS	04:10	-690	-1415	-1560	-725	-870
(*)	nach abgeschlossener Rissbildung, vgl. Kapitel 6.2					

Die Schwindmessungen der Serie EMK1 im Vergleich zu EMK2 wurden ausgeführt, um festzustellen inwieweit die Mischungen EM mit unterschiedlicher Konsistenz ein unterschiedliches Schwindverhalten zeigen. Das ist wie in Abbildung 4.10b zu sehen kaum der Fall. Die Mischung EMK1 mit der etwas weicheren Konsistenz bzw. etwas mehr Wasser und Fließmittelgehalt scheint verzögert gegenüber der weniger fließfähigen EMK2 mit dem Schwinden zu beginnen. Nach 28 Tagen erreichen beide Mischungen einen Wert von rund $-950 \mu\text{m}/\text{m}$.

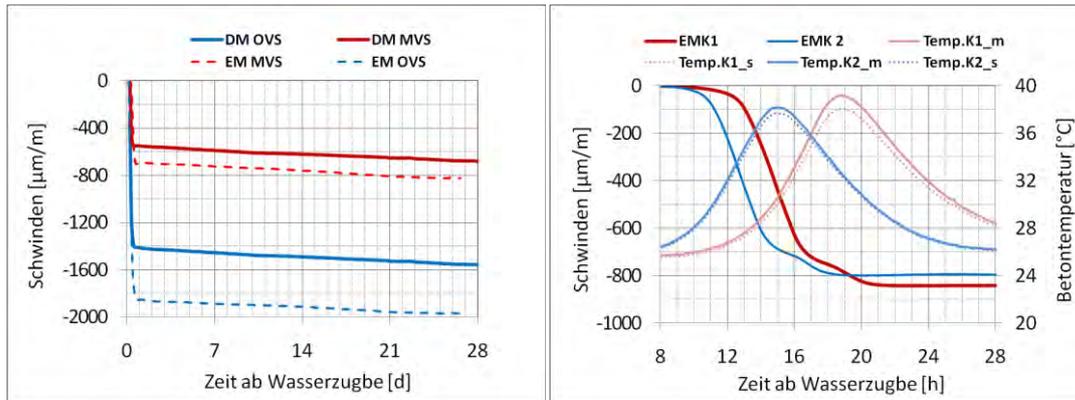


Abbildung 4.10: a) Ergebnisse der Schwindmessungen für EM und DM 28d im Vergleich, b) Ergebnisse der Schwindmessungen für EMK1 und EMK2 (Vorserien) .

Im Zuge der Schwindmessungen EMK1/EMK2 wurden zusätzlich zu den Temperaturen im Betoninneren die Temperaturen am Rand, also nahe der Oberfläche des Betons mittels einbetoniertem Messfühler PT 1000 gemessen. Es soll festgestellt werden, wie stark das Temperaturgefälle über die Distanz von 50 mm von der Prismen-Mitte zur Prismen-Seitenfläche ist. Außen kann die Temperatur über die Metallrinne gut abfließen, lediglich die 3 mm dicke Neopreneinlage sorgt für eine gewisse „Dämmung“ der Wärmeabgabe an die Umgebung. Die Temperaturunterschiede zwischen Prismenmitte und Randfläche betragen am Temperaturmaximum 0,5 bzw. 1,2 °C, sind also gering. Daraus wird geschlossen,

dass auch die Temperaturunterschiede in den Verbundprobekörpern aus Stahl oder Glas und UHPC zwischen Kern und Oberfläche gering sind ($<1^{\circ}\text{C}$) und nicht für nennenswerte Zwängungsspannungen sorgen können.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen der Schwindmessungen

Die Schwindmessungen zeigen, dass sich das Schwindmaß enorm erhöht, wenn der UHPC ohne Verdunstungsschutz (OVS) gelagert wird. Zum Beispiel beträgt es bei beiden untersuchten Mischungen EM und DM nach 28 Tagen das 2,3-fache dessen einer Lagerung mit Verdunstungsschutz (MVS). Das Schwinden bzw. die Verformungszunahme ist wie für die feinkörnige UHPC Mischung zu erwarten war, in den ersten Stunden hoch, um nach Erreichen des Betontemperaturmaximums abrupt langsamer zu werden.

Durch die Bestimmung der maximalen Verformungsgeschwindigkeit kann ein Zeitpunkt t_0 angegeben werden, ab dem der Beton sein plastisches Verformungsvermögen verliert und ab dem das behindertes Schwinden Zwangsspannungen verursacht. Dieser Zeitpunkt der Erstarrung t_0 tritt bei Proben OVS wesentlich früher ein als bei Proben MVS. Die Lagerung OVS bewirkt auch, dass das Schwinden früher beginnt und eine schnellere Verformungsgeschwindigkeit auftritt.

Die Mischung EM schwindet um mehr als 20% stärker als die Mischung DM (nach 28d), was mit dem höheren Zementgehalt erklärt werden kann. Das Verhältnis stellt sich nahezu unabhängig von der Lagerungsbedingung ein. An den Mischungen EM mit unterschiedlicher Konsistenz K1 und K2 konnte kein signifikant verschiedenes Schwindverhalten festgestellt werden.

Für die Ausbildung der Adhäsion bedeutet dies erstens, dass bei Lagerung OVS wesentlich höhere Verformungen, die zu Relativverschiebungen in der Kontaktfuge führen können oder Zwangsspannungen hervorrufen, auftreten werden. Zweitens treten die starken Verformungen in der für die das Entstehen von intermolekularen Kräften möglicherweise kritischen Phase der frühen Festigkeitsentwicklung auf. Drittens führt das frühe Erstarren des Betons bei Austrocknung dazu, dass sich ein steiferer oberflächennaher Anteil bildet, der sich nicht mehr plastisch verformt.

Werden Verformungen während der Erhärtung des Betons behindert, ist das in der Regel für Bauteile dann kritisch, wenn der Behinderungsgrad groß genug, die Zugfestigkeit des schon erstarrten Betons aber so gering ist, dass Risse im Beton entstehen. Diese Risse bedeuten oftmals eine Verminderung der Gebrauchstauglichkeit oder Tragfähigkeit. Der spannungsinduzierende Anteil der Verformungen nach der Erstarrung bzw. der Zeitpunkt des Auftretens der Behinderung ist dann entscheidend.

Für die Störung der Ausbildung von spezifischer Adhäsion muss man davon ausgehen, dass Verformungen während der Erhärtung in der Kontaktfuge zu Relativverschiebungen führen. Deshalb kann auch schon das anfänglich plastische, an sich keine inneren Betonspannungen hervorrufende Schwinden, Einfluss auf die Haftung bzw. Festigkeit nehmen. Denkbar ist folgender „Versagensmechanismus“: Der viskose, fließfähige UHPC Frischbe-

ton benetzt und haftet gut auf einer Oberfläche. In der Kontaktfläche finden spezifische Wechselwirkungen statt, die zu dieser Anhaftung der „Flüssigkeit“ führen. Das plastische Schwinden will das Gemisch in sich zusammenziehen, was an der Kontaktfläche durch Grenzflächenkräfte behindert wird. So kommt es beim Überschreiten der inneren Scherfestigkeit (Fließgrenze) zur Abscherung in der Grenzflächenzone und damit zur Störung des Gefüges während der frühen Festigkeitsentwicklung.



Abbildung 4.11: a) Ausbreitkuchen 1 h nach Betonherstellung, b) Risse im Zentrum von a), c) Unterseite Ausbreitkuchen im Alter von rund 4 Wochen

An UHPC-Proben, deren Oberfläche der trockenen Raumluft ausgesetzt war, zeigen sich sehr früh Schwindrisse, wie zum Beispiel an den Ausbreitkuchen nach der Fließmaßbestimmung zu sehen. In Abbildung 4.11 ist eine Probe etwa 1 Stunde nach der Messung des Ausbreitfließmaßes und die Unterseite der ausgehärteten Probe im Alter von rund 4 Wochen gezeigt, nachdem sie von einer Glasoberfläche abgelöst wurde. Die Oberseite dieser Probe wurde vor dem Umdrehen mit Wasser besprüht, das durch die Risse hindurch drang. Die Bilder zeigen, dass ohne Verdunstungsschutz gelagerte Proben schon in der Phase des Früschwindens reißen können und sehr breite Risse aufweisen. So eine Rissbildung wird an Betonbauteilen durch eine geeignete Nachbehandlung verhindert. In unserem Fall werden Haftzugproben, wie sie in Kapitel 5.1.1 beschrieben sind, bewusst OVS an der seitlichen Umfangsfläche gelagert, um ein hohes Schwindmaß zu provozieren.

4.1.7 Frischbetonhaftung und Kohäsion des frischen UHPC

Einfache Haftzugversuche von frischem UHPC zwischen Stahlplatten bestätigen die Vermutung, dass die Anhaftung an der Kontaktfläche stärker ist als der Zusammenhalt im Inneren: Nach dem Abziehen des noch weichen Betons vom Untergrund bleibt eine „klebrige“, benetzende Schicht von Zementleim anhaften. Die Kohäsion des frischen Betons ist offensichtlich geringer als die Adhäsion am Untergrund, vgl. Abbildung 2.28.⁴⁷

⁴⁷ Ziel einer nicht abgeschlossenen Diplomarbeit an der FH Kärnten war es, nach einem geeigneten Versuchsaufbau zu suchen, mit dem die Haftung (Adhäsion) von frischem, fließfähigem ultrahoch-

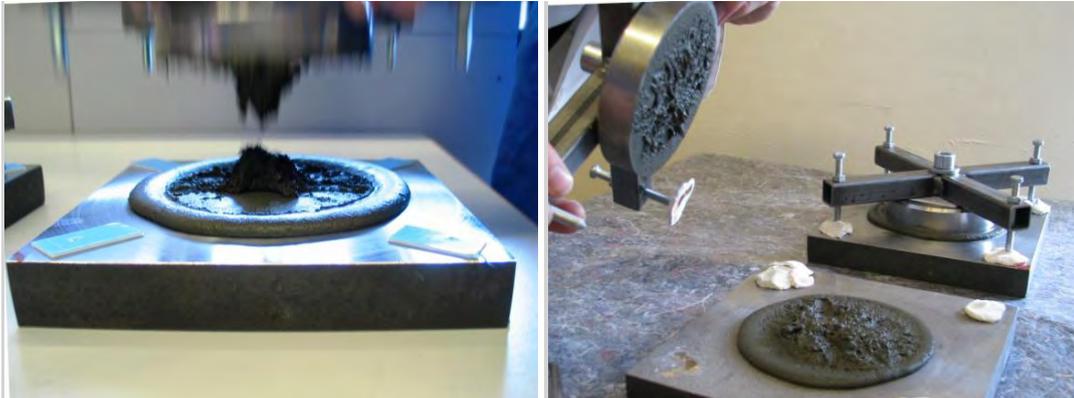


Abbildung 4.12: „Frischbetonhaftung“ demonstriert beim Abziehen des oberen Prüfstem-
pels etwa 30 min nach dem Betonieren. Adhäsion > Kohäsion. 2 Versuche.

4.1.8 Benetzung, Oberflächenspannung und Oberflächenenergie

Oberflächenspannung von frischem UHPC

Die Oberflächenspannung OFS oder auch Oberflächenenergie OFE von frischem UHPC bestimmt das Benetzungsverhalten unmittelbar nachdem der Frischbeton mit den Oberflächen der Adhärenten in Kontakt kommt. Im weiteren Sinne beeinflussen auch die rheologischen Eigenschaften, ausgedrückt durch Fließgrenze und Viskosität, sowie der Druck nach dem Aufbringen die „Benetzung“⁴⁸, also wie gut sich der frische UHPC auf der Oberfläche ausbreitet bzw. wie gut er in ihre Vertiefungen eindringt.

Die OFS von UHPC ist mit den üblichen Verfahren für Flüssigkeiten – der Kontaktwinkelmethode, der Tensiometrie (Wilhelmy-Platte oder du Noüy-Ring) oder der Blasen-
druckmethode – nicht zu bestimmen, da seine Viskosität zu groß ist bzw. die Methoden für Suspensionen mit Kornanteilen nicht geeignet sind. Experimente zeigten, dass es unmög-

festen Beton (UHPC) auf Oberflächen mit verschiedener Rauheit geprüft werden kann. Ein Versuchsaufbau basierend auf dem Prinzip des sogenannten Impulsverfahrens schien zunächst viel versprechend, vgl. [Bischof 1983]. Unter der Ausnutzung der Trägheitskraft einer beschleunigten Probe kann auf eine homogene, zusammenhängende Masse mit diesem Verfahren theoretisch eine ausreichend hohe Kraft ausgeübt werden, um die Probe vom Trägermaterial abzulösen. Die Voraussetzung der Homogenität ist aber für UHPC in der Regel nicht gegeben, da das Material aus Massepartikeln unterschiedlicher Dichte und Größe - im frischen Zustand mit geringer Kohäsion - besteht. Es musste festgestellt werden, dass die Haftfestigkeit von fließfähigem Material mit geringer Kohäsion, wie z.B. UHPC, auf einem rauen Untergrund nicht direkt zu ermitteln ist.

⁴⁸ Die Viskosität und die Fließgrenze bestimmen wie stark der frische UHPC in Vertiefungen einer rauen Oberfläche eindringt - im engeren Sinn überlagern sie den Einfluss der „Benetzung“. Mit Benetzung wird die Eigenschaft einer Flüssigkeit beschrieben, einen Randwinkel zwischen 0 (vollständige Benetzung) und 90° mit einer Oberfläche auszubilden. Siehe auch Kapitel 2.4.

lich ist, winzige Tropfen gezielt zu formen oder auch Flüssigkeitslamellen aus der UHPC-Oberfläche herauszuziehen. Die Voraussetzungen für die Kontaktwinkelmessungen am Tropfen oder mittels Tensiometer sind also nicht gegeben. Auch Methoden, bei welchen eine Kapillare verwendet wird, funktionieren für die UHPC-Mischung nicht, da die Größtkörner mit 0,5 mm Durchmesser die üblichen Kapillaren verlegen würde.

Ideen wie die OFS von Beton bestimmt werden kann, sind in [Müller 2009], [Courard 2011], [Hillermeier 2006] zu finden. Es werden Messungen der Oberflächenspannung der „Porenlösung des Betons“, die durch Zentrifugieren und Abfiltrieren des frischen Zementleimes gewonnen wird, mittels Tensiometrie durchgeführt. Beide Autoren verwenden ein Gemisch aus Wasser, Zement und Fließmittel. *Courard* stellt eine OFS von 45-50 mJ/m² fest und *Müller* von 42-57 mJ/m².

Im Rahmen der Arbeit wurden verschiedene Methoden ausprobiert, um zumindest qualitative Aussagen über die Benetzungseigenschaften und Oberflächenspannung von UHPC machen zu können. Darauf mit der Porenlösung zu arbeiten, wurde verzichtet, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass sie dieselben Eigenschaften aufweist wie der Beton mit allen, größtenteils sehr feinen, Komponenten. Außerdem ist es beim UHPC mit seinem geringen W/B-Wert wesentlich schwieriger sie zu gewinnen.

Mit der Hypothese, aus dem Ausbreitversuch auf die Benetzungseigenschaften schließen zu können, wenn der Einfluss der Masse und Viskosität im theoretischen Ansatz mit berücksichtigt wird, wurden Ausbreitfließversuche mit unterschiedlich großen UHPC-Volumina, Konsistenzen und auf verschiedenen Werkstoffoberflächen durchgeführt. Die Geometrie des Ausbreitkuchens wurde in der Draufsicht und in der Frontalansicht wie bei der Kontaktwinkelmethode am liegenden Tropfen vermessen, vgl. Abbildung 4.13. Eine direkte Korrelation der Benetzungseigenschaften mit dem beobachteten Randwinkel am Ausbreitkuchen konnte erwartungsgemäß nicht festgestellt werden. Mithilfe von Ausbreitfließversuchen (mit dem Mörtelkonus) auf verschiedenen Untergründen konnte der Einfluss der Oberflächenenergien trotzdem beobachtet werden.

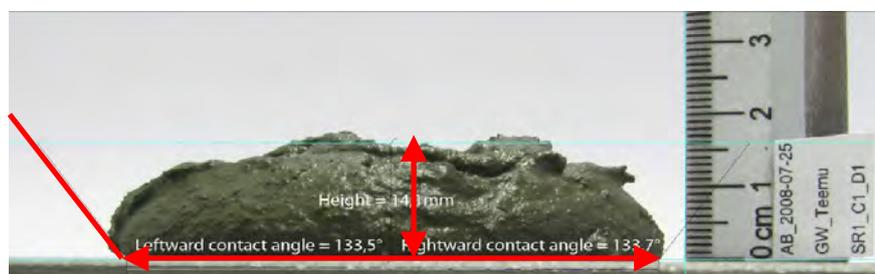


Abbildung 4.13: Ausbreitkuchen, der hinsichtlich seines Randwinkels vermessen wurde

Roussel et al. [Roussel 2005a], [Roussel 2005b] führten Ausbreitfließversuche an Mörteln durch, um rheologische Parameter und zwar insbesondere die Fließgrenze zu bestimmen. Sie stellten eine Verringerung des Ausbreitfließmaßes abhängig vom Material des

Untergrundes, auf dem die Tests durchgeführt wurden, fest, die durch die Wirkung der Oberflächenspannung zustande kommt.

Analog dazu wurden die eigenen Ausbreitfließversuche mit demselben UHPC auf verschiedenen, glatten Untergründen dahingehend ausgewertet, dass der unterschiedliche Einfluss der Oberflächenenergien festzustellen war. Aus rheologischer Sicht sollten Ausbreitversuche mit einem bestimmten viskosen Material alle denselben Ausbreitdurchmesser zeigen. Gibt es auf verschiedenen gleichermaßen glatten Oberflächen einen signifikanten Unterschied im Durchmesser, so müsste er auf den Einfluss der Oberflächenenergien zurückzuführen sein: Kleinere Ausbreitdurchmesser bedeuten dabei eine schlechtere Benetzung.



Abbildung 4.14: Ausbreitfließversuch auf glatten Untergründen aus Stahl und Glas

Versuche wurden mit UHPC auf Glas und poliertem Stahl durchgeführt. UHPC Mischungen vom Typ EM mit verschiedenen Konsistenzen wurden verwendet. Um gleiche Bedingungen – Temperatur, Feuchte und Alter der Mischung – für jedes Ausbreitmaß zu gewährleisten, wurden je vier Tests, zwei auf Glas und zwei auf Stahl, gleichzeitig durchgeführt. So konnte sichergestellt werden, dass weder der Erstarrungsprozess noch Mischungsunterschiede das Ausbreitmaß beeinflussen.

Abbildung 4.14 zeigt das simultane Hochheben der Mörtelkoni und den Ausbreitkuchen, der entsteht und 2 Minuten später vermessen wurde. Das Ausbreitfließmaß ist auf Glas größer als auf Stahl wie die in Abbildung 4.15 dargestellten Ergebnisse der Versuchsreihe zeigen. Das bedeutet, UHPC benetzt Glas besser als Stahl⁴⁹.

⁴⁹ Eine Bestimmung der OFS von frischem UHPC ist aus Ausbreitfließversuchen an zumindest 2 verschiedenen Materialien theoretisch möglich, wenn die von Roussel [Roussel 2005] vorgestellten Gleichungen mit jenen der OWRK-Methode kombiniert werden. Dies wurde von Gerhard Santner im Rahmen des Projektes AdBond UHPC herausgefunden und durchgeführt. Siehe auch Endbericht des FWF Projektes [Freitag 2011] und [Santner 2011]. Allerdings zeigt sich in der Auswertung eine Diskrepanz zwischen Versuchsergebnissen und Theorie. Eine plausible Erklärung dafür ist, dass sich Wasser in der Grenzfläche ansammelt und daher die OFS des UHPC gegenüber Luft anders ist als gegenüber einer Materialoberfläche. Außerdem dürfte Reibung zwischen UHPC und Untergrund beim Ausbreitversuch ein weiterer unbestimmter Parameter sein. Eine Möglichkeit die Reibung bei

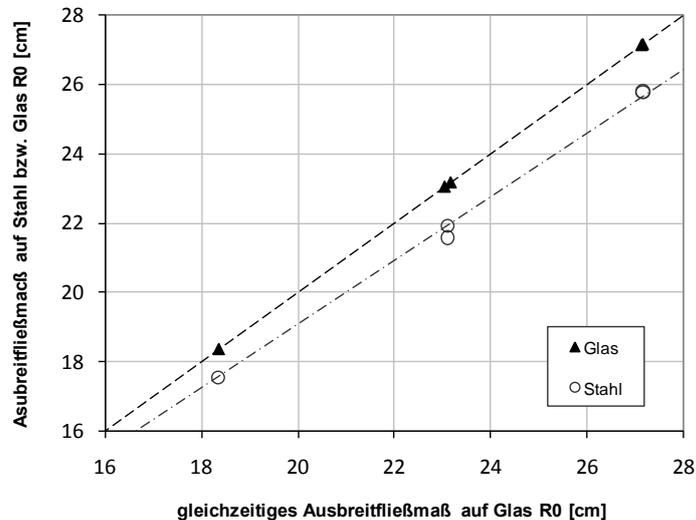


Abbildung 4.15: Ergebnisse der Ausbreitfließversuche auf glattem Stahl und Glas aus [Santner 2011]

Weitere Kenntnisse über die Oberflächenspannung von UHPC konnten gewonnen werden, indem der Kapillareffekt genutzt wurde. Die kapillare Steighöhe für Flüssigkeiten ist gegeben durch die Formel

$$h = \frac{2 \cdot \sigma_l \cdot \cos \theta}{r_c \cdot \rho \cdot g} \quad (4.5)$$

und hängt direkt von der OFS σ_l , dem Kontaktwinkel θ zwischen Flüssigkeit und Kapillarwandmaterial und dem Gewicht ($\rho \cdot g$, Dichte mal Erdbeschleunigung) der hochgewanderten Flüssigkeit ab. Versuche zur kapillaren Steighöhe wurden an Glaskapillaren mit 1 und 5 mm Durchmesser ($2r_c$) durchgeführt. Zum Vergleich wurden destilliertes Wasser, eine Mischung von Wasser mit Fließmittel, eine Suspension des Bindemittels („slurry“) und frischer UHPC der Mischung EMK1 verwendet. Slurry wurde aus den Komponenten des UHPC ohne den Quarzkornanteil im selben Mischungsverhältnis wie im UHPC abgemischt. Wie erwartet zeigt sich kein Kapillarrückzug mit UHPC, weil der Saugdruck nicht mehr ausreicht, um die hohe Fließgrenze zu überwinden. Beim Wasser, Wasser mit Fließmittel und beim slurry ist der Kapillarrückzug aber gut zu beobachten (siehe Abbildung 4.16).

Die Versuche mit Wasser verifizieren die Methode. Eine kapillare Steighöhe von 15,1 mm in der 1 mm Glaskapillare bzw. 3,1 mm im 5 mm Glasröhrchen (Mittelwert von 2 Messungen) wurde festgestellt. Die Oberflächenspannung von Wasser bei 20°C beträgt

einem solchen Versuch auszuschalten, wäre es, Rüttelenergie einzusetzen und sie durch Vibration aufzuheben.

72,8 mJ/m². Aus Formel (4.5) wird der Kontaktwinkel mit 58° berechnet. Das stimmt gut mit den beobachteten 55° überein.

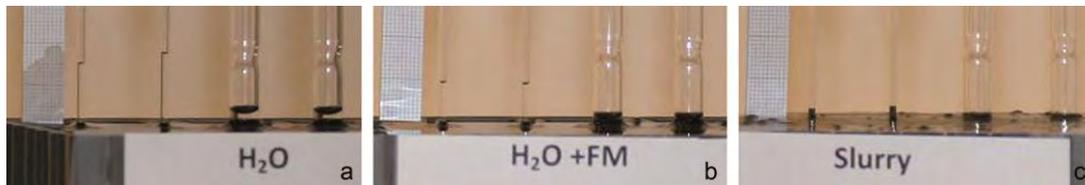


Abbildung 4.16: Versuche zur kapillaren Steighöhe mit verschiedenen Flüssigkeiten

Für Wasser mit Fließmittel sowie slurry kann analog vorgegangen werden. Ein Kontaktwinkel von etwa 40° und eine kapillare Steighöhe in der 1 mm Kapillare von 10,3 mm wird beim Wasser-Fließmittelgemisch gemessen. Daraus ergibt sich eine OFS von ungefähr 35 mJ/m². Der Kontaktwinkel von Glas mit slurry kann auf der Außenseite der Glasröhrchen abgelesen werden und beträgt etwa 50°. Mit der gemessenen kapillaren Steighöhe von 2 mm errechnet sich eine OFS von nur 16 mJ/m². Da der viskose slurry keine vernachlässigbare Fließgrenze hat, die die kapillare Steighöhe verringert, muss der errechnete Wert als zu niedrig aufgefasst werden. Berücksichtigt man die oben schon erwähnten Ergebnisse von Müller [Müller 2009] und Courard [Courard 2011], lässt sich der Wert der Oberflächenspannung von frischem UHPC mit 50 mJ/m² abschätzen, dies wird in [Santner 2011] etwas detaillierter ausgeführt. Die OFS von frischem UHPC im Vergleich zu den OFE von Stahl und Glas sind in Abbildung 7.9 auf Seite 254 eingetragen.

Oberflächenenergie von erhärtetem UHPC

Für die Anwendung der thermodynamischen Betrachtungsweise zur Berechnung der theoretischen Adhäsionsfestigkeit sind die OFE des erhärteten Betons und seiner Verbundpartner maßgebend. Ein bewährtes Verfahren zur Bestimmung der OFE ist die Kontaktwinkelmessung am ruhenden Tropfen (sessile drop method) und die Auswertung nach der OWRK-Methode [Krüss 2011], [Butt 2006]. Siehe auch Kapitel Stand des Wissens 2.4.2.

Tabelle 4.10: Oberflächenspannungen der Messflüssigkeiten

Flüssigkeit	Oberflächenspannung [mJ/m ²]		
	dispersiv	polar	gesamt
	ζ_L^D	ζ_L^P	ζ_L
Destilliertes Wasser	21,8	51,0	72,8
Ethylenglykol (EG)	30,9	16,8	47,7
Methyleniodid (MI)	50,8	0,0	50,8
α -Bromnaphthalen (BN)	44,6	0,0	44,6

Alle Kontaktwinkelmessungen, die in diese Arbeit eingehen, wurden mit der genannten Methode im Rahmen des Projektes AdBond-UHPC am Institut für Physik der Montanuni-

versität Leoben durchgeführt. Die Versuchsberichte finden sich im Anhang A.1.3. Bis zu vier Mess-Flüssigkeiten wurden eingesetzt, siehe Tabelle 4.10.

Um Betonoberflächen und Bedingungen wie im Endzustand des Verbundes zu erhalten, wurden glatte Glas und polierte Stahlflächen als Schalung in derselben Weise eingesetzt wie bei der Probenherstellung für die Haftzug- und Haftschubversuche. Die gereinigten Oberflächen wurden dabei ohne jegliches Trennmittel mit dem UHPC in Kontakt gebracht. Nach dem Ablösen der Glas- bzw. Stahlteile durch Abspalten wurden die Messungen an den lokal glattesten und augenscheinlich nicht porösen Stellen durchgeführt. In folgenden Varianten wurden gemessen:

- zwei verschiedene UHPC-Mischungen, EM und DM
- Messungen an mit Glasschalung hergestellten Oberflächen
- Messungen an mit Stahlschalung hergestellten Oberflächen
- Messungen, die unmittelbar nach dem Abtrennen von der Schalung erfolgten
- Messungen, die nachdem die Oberflächen mindestens 1 Woche an Raumluft (23°C, 30-40%r.F.) gelagert waren, durchgeführt wurden.

Tabelle 4.11 zeigt die Ergebnisse der Messungen. Es zeigt sich, dass UHPC sowohl dispersive als auch polare Anteile der Oberflächenenergie aufweist. Die Unterschiede zwischen den Varianten der dispersiven Anteile sind gering und liegen innerhalb der Messgenauigkeit. Die polaren Anteile unterscheiden sich etwas mehr, aber nicht signifikant.

Tabelle 4.11: Oberflächenenergie von erhärtetem UHPC

UHPC	Schalung/ Variante	Oberflächenenergie [mJ/m ²]		
		dispersiv ζ_L^D	polar ζ_L^P	gesamt ζ_L
1	EM Glas	33,1	32,1	65,2
2	EM Glas / an Raumluft gelagert	35,7	31,8	67,5
3	EM Stahl / an Raumluft gelagert	35,8	28,3	64,1
4	DM Glas	35,9	27,2	63,1
5	DM Glas / an Raumluft gelagert	34,3	31,9	66,2
MW				65,2±2,2

4.2 Stahl und Glas als Adhärenzen

Für die Untersuchungen wird erstens Baustahl S 355 eingesetzt. Als Baustahl werden metallische Legierungen bezeichnet, deren Hauptbestandteil Eisen ist und deren Kohlenstoffgehalt zwischen 0% und 0,6% liegt.

Zweitens wird Float Glas wie es zur Herstellung von ESG, VSG oder Isolierverglasungen erzeugt wird verwendet. Das Alkali-Kalk-Hartglas setzt sich aus dem Glasbildner Kieselsäure (~72% aus Sand), dem Flußmittel Soda⁵⁰ (~14%), dem Stabilisierungsmittel Kalk (~10% Kalkstein) und gegebenenfalls verschiedenen Oxiden wie Aluminium- und Magnesiumoxid in geringem Anteil zusammen [Saint-Gobain 2006].

In den theoretischen Modellen zur spezifischen Adhäsion wird davon ausgegangen, dass die Oberflächen des Festkörpers ideal eben sind, was praktisch nie zu realisieren ist. In der Arbeit werden deshalb *möglichst* glatte Flächen verwendet, um die spezifische Adhäsion zu studieren.

4.2.1 Oberflächenbehandlung von Glas- und Stahlproben

Glatte Oberflächen

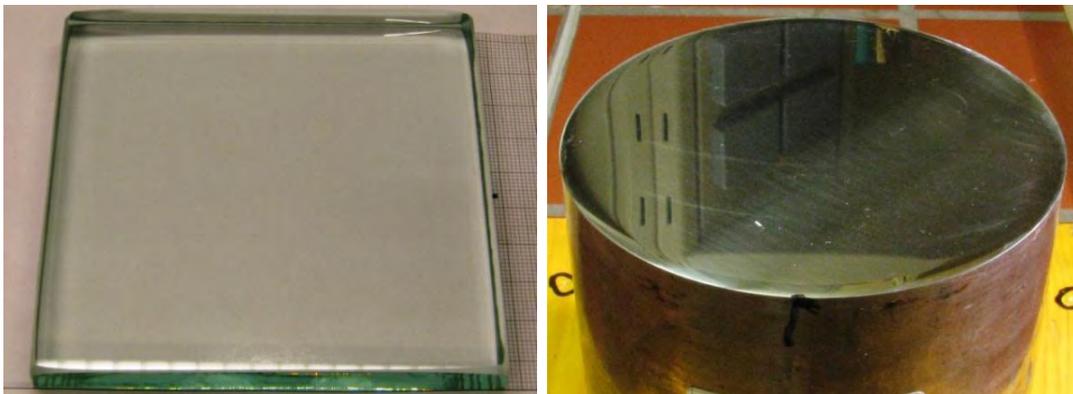


Abbildung 4.17: glatte Float-Glas- und glatt polierte Stahl- Oberfläche, Ø100 mm

Um ähnlich glatte Stahlproben herzustellen, wurde plangeschliffener Baustahl der Güte S 355 in vier Arbeitsgängen mit immer feiner werdenden Schleifscheiben (100-30-15-9 micron) poliert und zum Abschluss mit Alkohol gereinigt (siehe Abbildung 4.17b). Mit dem Tastschnittgerät wurden arithmetische Mittenrautiefen $< 0,05 \mu\text{m}$ gemessen. In elekt-

⁵⁰ Soda ist ein Salz-Mineral aus der Mineralklasse der „Carbonate (und Verwandte)“. Es kristallisiert im monoklinen Kristallsystem mit der chemischen Zusammensetzung $\text{Na}_2[\text{CO}_3] \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. [Strunz 2001]

ronenmikroskopischen Aufnahmen von glatten Stahlroben bzw. Querschnitten von UHPC-Stahl-Verbundproben sind vereinzelt Polierriefen bzw. Vertiefungen zu sehen, vgl. Kapitel 6.6, Abbildung 6.32, Seite 219.

Herstellung rauer Oberflächen

Um die Einflüsse der Rauheit auf die Adhäsion studieren zu können, werden möglichst unterschiedliche Rauheiten angestrebt. Sie sollten dem UHPC als benetzenden Verbundpartner eine möglichst gut angepasste „Angriffsfläche“ bieten. Analog zu einer guten Korngrößenverteilung beim UHPC wird für „passende“ Oberflächen eine Rauheit angestrebt, die gleichzeitig lange und kurze Wellenlängen bzw. grobe und feine Vertiefungen aufweist. Darüber hinaus sind hinterschnittene Formen erwünscht.

Probenuntergründe aus Stahl S 355 und Float-Glas mit rauen Oberflächen wurden durch Sandstrahlen sowie Behauen hergestellt. In Vorversuchen wurden geeignete Verfahren dafür erprobt. Es stellte sich heraus, dass die maximal möglichen Rauheiten vor allem durch die Korngröße des Strahlmittels begrenzt werden. Mit den größten beim Sandstrahlen einsetzbaren und marktüblichen Strahlmitteln werden, wie Recherchen bei Herstellern ergaben, maximal Mittenrautiefen von rund 25 μm erzielt. Größere Rautiefen können nur mit alternativen Verfahren erreicht werden. Es wurden Verfahren wie Ätzen, Funkenerosion, Behauen und Einpressen von Hartkorn untersucht. Mechanische Bearbeitungen wie das Fräsen und Schleifen sind aufgrund der Regelmäßigkeit der Oberfläche nicht geeignet. Das Behauen der Oberflächen mit einem eigens angefertigten Spitzhammer – vgl. Abbildung 4.19c – war zielführend, um maximale Rautiefen von rund 0,5 mm bzw. eine mittlerer Rautiefe von etwa 0,25 mm zu erzielen. Diese Rautiefe wird davon abgeleitet, dass das Größtkorn im UHPC von 0,5 mm zumindest noch teilweise in die Vertiefungen „hineinpassen“ soll. Die weniger tiefen und in ihrer Wellenlänge abgestuften Oberflächenrauheiten wurden durch (zusätzliches) Sandstrahlen realisiert.

Die erzielte Rauheit hängt beim Sandstrahlen von mehreren Einflüssen ab:

- Eigenschaften des Strahlgutes (Härte, Korngröße, Kornform, Kornverteilung)
- Düsendurchmesser der Strahlanlage
- Strahldruck
- Aufprallwinkel des Strahlgutes
- Dauer / Anzahl der Strahlvorgänge

Tabelle 4.12: SSt*-Verfahren zur Erzeugung unterschiedlicher Oberflächenrauheiten

Werkstoff	Rauheit	verwendet in Serie	Rautiefe Ra [μm] (*)	Verfahren	Korngröße-Strahlmittel
Stahl S 355	SR1	Vorserien	14	Sandstrahlen mit Titan-legiertem Gusseisen, 7 bar	0,6-1,0 mm
		SNS1/SD1	19		
	SR2	Vorserien	23	(4)	1,7-2,3 mm
		SNS1/SD1	32		
	SR3	n.v.	17-26		0,6-1,0+1,7-2,3
	SR4	SD1	~200 (1)	Behauen mit gespitztem Hammer	0,6-1,0 mm
SR5	SD1	~200 (1)	Behauen + Überstrahlen 3,5 bar		
Float-Glas	GR3	Vorserien	11-16 (2)	Schmelzkammerschlacke Aluminium-Silikat	0,1-0,5 mm
		GNS1	20 (3)		
	GR5	Vorserien	23-28 (2)	Korund	1,0-2,0 mm
	GR7	GNS1	8 (3)	Glasperlen	0,1-0,2 mm
GR1/2/4/6: verschiedene Strahlmittel, die keine deutlich neue Rauheit gebracht haben					
SSt*	Sandstrahlverfahren mit Düsenabstand 50 cm, Strahlwinkel 90° und Düsendurchmesser 12 mm, Druck 7 bar außer bei SR5, 3,5 bar				
(*)	gemessen mit Tastschnittgerät				
(1)	nicht mit Tastschnittgerät messbar				
(2)	ungereinigt				
(3)	gereinigt				
(4)	Mischung des Strahlgutes SR1+SR2 in diverserem Verhältnis und Abfolgen von Strahlgängen				
n.v.	ergibt ein zufriedenstellendes Ergebnis = „SR3“ (abgestufte Rauheit) für Mischungsverhältnis 2:1 von SR1:SR2 in einem Strahlgang, trotzdem nicht weiter verwendet				

Durch die unterschiedlichen Materialeigenschaften von Glas und Stahl (vor allem Härte und Sprödigkeit) sind für gleichwertige Oberflächen unterschiedliche Strahlmittel erforderlich. Weiters erwies sich die Verwendung von kantigem Strahlgut als erforderlich. Schließlich wurde ein einheitliches Strahlverfahren und für die verschiedenen Rauheiten entsprechende Strahlmittel ausgewählt, siehe. Tabelle 4.12.

Beispiele für das Aussehen der Oberflächen sind in den folgenden Abbildungen zu sehen (Abbildung 4.18 – makroskopisch – bis Abbildung 4.23 – lichtmikroskopisch).

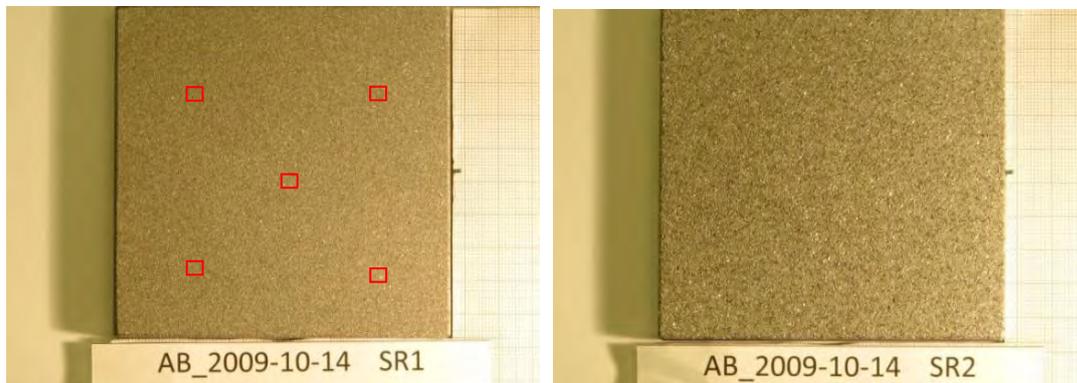


Abbildung 4.18: Stahlproben mit den Rauheiten SR1 und SR2, links: Messfelder der Oberflächenvermessung maßstäblich eingezeichnet



Abbildung 4.19: Stahlproben der Haftzugprüfungen mit den Rauheiten a) SR2, b) SR; c) Hammer-Spitzen zum Erzeugen der groben Rauheiten, Flankenneigung rd. 60°

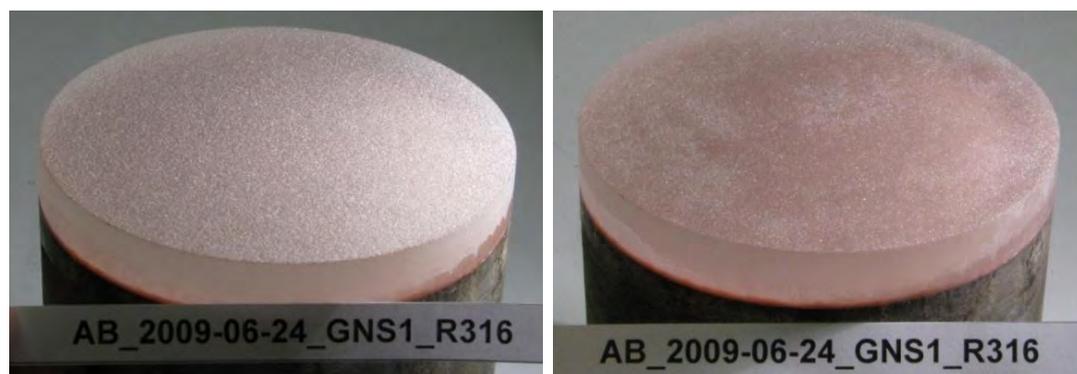


Abbildung 4.20: Glas-Probekörper mit der Rauheit GR3 vor und nach der Reinigung, bei der Glasstaub vom Sandstrahlen aus den Vertiefungen mittels Ultraschall entfernt wurde.

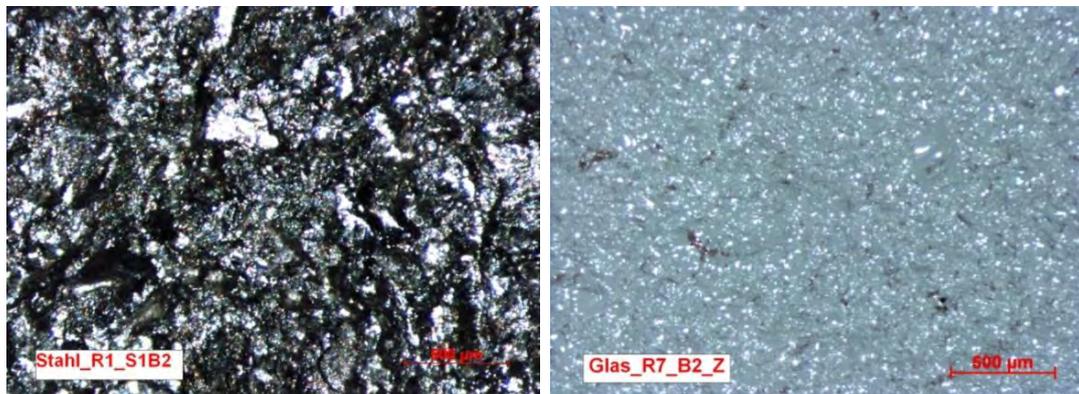


Abbildung 4.21: Lichtmikroskopie von Stahl R1 und Glas R7 (fein rau)

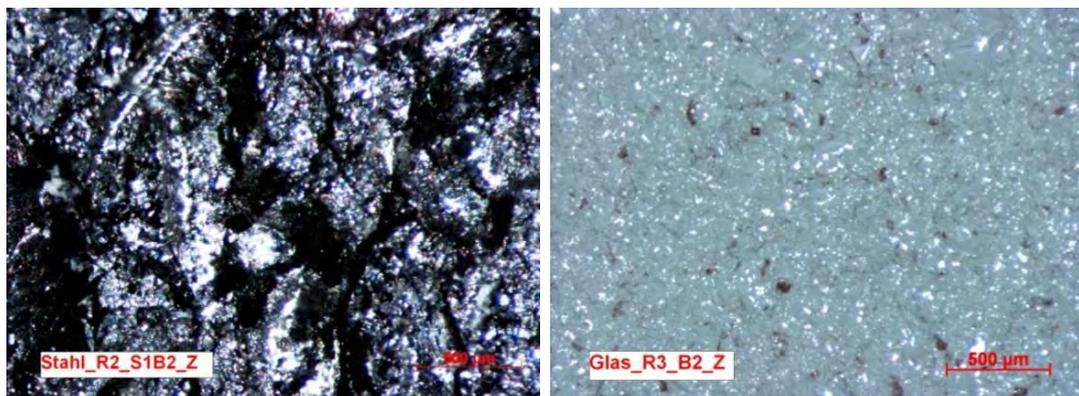


Abbildung 4.22: Lichtmikroskopie von Stahl R2 und Glas R3 (mittlere Rauheit)

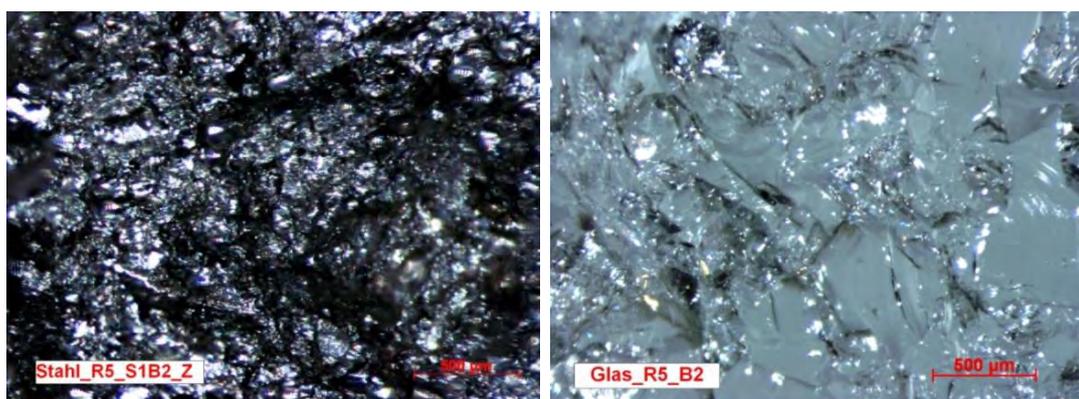


Abbildung 4.23: Lichtmikroskopie von Stahl R5 und Glas R5 (jeweils gröbste Rauheiten)

4.2.2 Bestimmung von topografischen Oberflächenkenngrößen

Einfluss der Oberflächenrauheit auf den Verbund mit UHPC

Welche Information über die Oberflächentopografie des Adhärens ist erforderlich, um die Adhäsionskapazität zum UHPC zu charakterisieren?

Für die Ausbildung der spezifischen Adhäsion ist entscheidend, wie groß die wahre Oberfläche ist und der Anteil davon, der wirksam in engen Kontakt mit dem Adhäsiv tritt. Man unterscheidet also zwischen geometrischer Oberfläche, wahrer Oberfläche und wirksamer Oberfläche. Vgl. auch [Bischof 1983] und Abbildung 2.11. Es ist klar, dass die Größe der messbaren Oberfläche stark von der Auflösung des Messgerätes abhängt [Müller 2009]. Die gemessene „wahre“ Oberfläche wird üblicherweise in Form des Verhältnisses von wahrer zu geometrischer Oberfläche angegeben, dem sogenannten Wenzel Quotienten. Die gemessene wahre Oberfläche steigt mit der Auflösung des Messgerätes wegen des „fraktalen Charakters“ von natürlichen Oberflächen.

Darüber hinaus beeinflusst die Form der Oberflächenrauheit die Adhäsion, zum Beispiel dadurch, dass Spitzen und scharfe Kanten Bereiche einer Oberfläche sind, mit denen das Adhäsiv engen Kontakt findet. Außerdem finden sich dort bevorzugt freie Bindungsplätze oder Valenzelektronen. Vgl. z.B. [Brinker 1990].

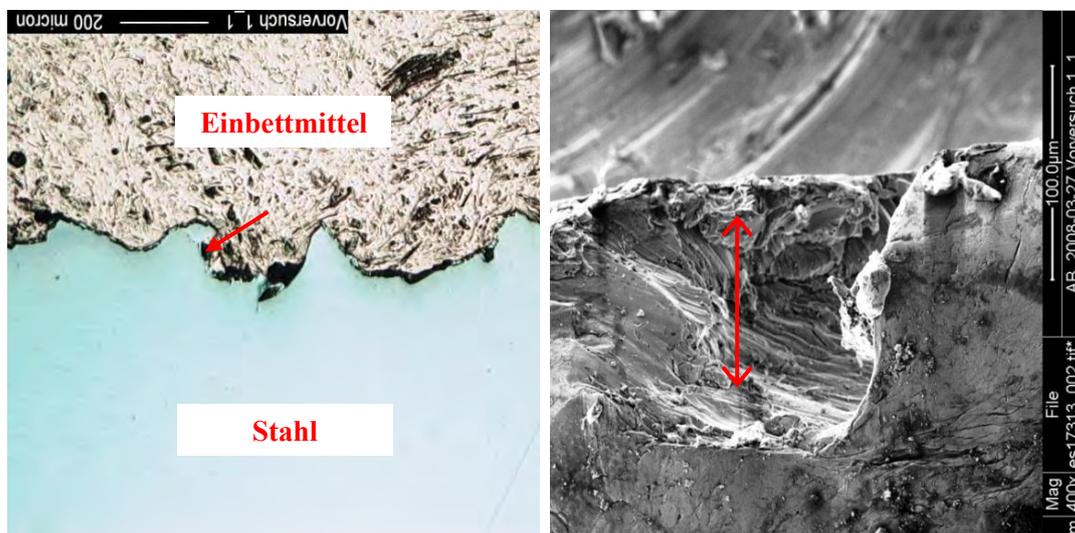


Abbildung 4.24: a) polierter Schnitt durch sandgestrahlte Stahlprobe SR2 und b) Blick in eine Vertiefung der Oberfläche von SR2, rote Pfeile: *hinterschnittener Bereich*

Für die mechanische Adhäsion ist die Verzahnung des UHPC mit der Oberfläche maßgebend. Eine den Verbund beanspruchende Last kann abhängig von ihrer Wirkungsrichtung durch Formschluss in der Grenzfläche aufgenommen werden. Das bedeutet, sie wird durch Druckkontakt oder auch Reibung an den Flanken oder, was eine Zugbelastung be-

trifft, durch den Scherwiderstand von UHPC aufgenommen. Dieser wird in vertikalen Schnittflächen unter Hinterschneidungen der Oberflächenrauheit auftreten (vgl. Abbildung 2.4 auf Seite 12 und Abbildung 3.2 auf Seite 50).

Im Vorfeld wurden die aufgerauten Stahloberflächen auch elektronenmikroskopisch untersucht, um einen Eindruck von der Rauheitscharakteristik zu bekommen (siehe Abbildung 4.24). Die sandgestrahlten Stahlproben zeigen Vertiefungen unterschiedlicher Größenordnung und auch hinterschnittene Bereiche.

Die Form der Vertiefungen wird von den auftreffenden Körnern so ausgebildet, dass schuppige Bereiche – Flächen mit Riefen und wenigen Rissen – entstehen, die in großer Vergrößerung glatt erscheinen. Die Oberflächen zeigen kaum Vertiefungen $< 0,5 \mu\text{m}$. Sie weisen also keinen fraktalen, sondern einen semi-fraktalen Charakter im Bereich von $0,5 \mu\text{m}$ bis zur maximalen Rautiefe (im Beispiel $25 \mu\text{m}$) auf (vgl. Abbildung 4.25).

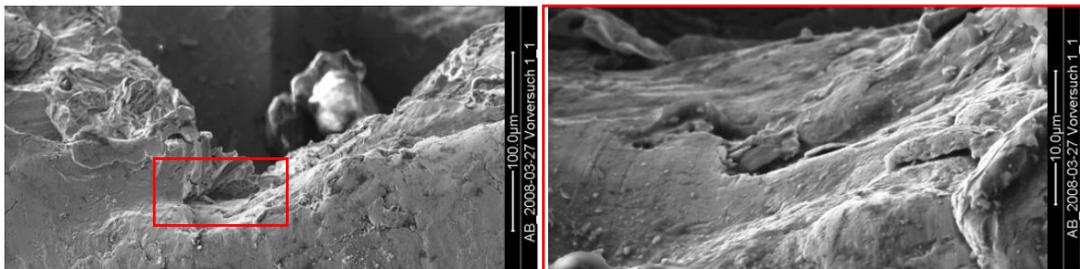


Abbildung 4.25: a) Blick von schräg vorne auf die raue Stahloberfläche (SR2); b) die detailliertere Vergrößerung zeigt, dass die Oberfläche in der Vertiefung relativ glatt ist

Messung der Oberflächenrauheit - Methodik

Die Oberflächen wurden zunächst nach der Herstellung mit der Kontakt-Profilometrie mittels mechanischen Tastschnittgeräts⁵¹ vermessen, um sie mit dem Kennwert der arithmetischen Mittenrautiefe R_a grob klassifizieren zu können, vgl. Tabelle 2.5. Um 3D-Daten einer Oberfläche generieren zu können, stehen einige Verfahren zur Verfügung. Während im Betonbau zur Oberflächenmessung ein relativ grober Maßstab (übliche Auflösung $\sim 0,1 \text{ mm}$) angelegt wird, werden im Werkzeug- und Maschinenbau mit den üblichen Tastschnittverfahren Rautiefen im Mikrometerbereich und zum Beispiel in der Halbleiterindustrie mit „atomic force microscopy (AFM)“ im Nanometerbereich bestimmt. In Tabelle 2.4 auf Seite 24 sind gebräuchliche Messverfahren und ihre Auflösung angegeben. Die Charakterisierung der Oberflächentopografie von Werkstoffen ist mittlerweile ein umfangreiches

⁵¹ Tragbares Oberflächenprüfgerät Mitutoyo SJ 201P, vgl. [Mitutoyo 2011]. Die laterale Auflösung ist bei dem Tastschnittgerät durch den Radius der Tastspitze von etwa $2 \mu\text{m}$ beschränkt und es können in den Messprofilen nur zweidimensionale Informationen gewonnen werden. Außerdem ist der vertikale Messbereich beim verwendeten Gerät mit $0,01$ bis $100 \mu\text{m}$ limitiert. Das heißt, sehr große Rautiefen können nicht erfasst werden

Wissensgebiet, vgl. [Stout 2000]. Eine Herausforderung ist die Bestimmung von Oberflächenkenngrößen, die die adhäsions-relevanten Eigenschaften hinreichend beschreiben. In Kapitel 4.2.2 wird näher darauf eingegangen.

Die Kriterien für eine Auswahl einer geeigneten Methode sind:

- eine Auflösung von 0,1 μm , die vom mittleren Durchmesser des kleinsten Partikels im UHPC (\emptyset Mikrosilika 0,1 μm) abgeleitet wird
- ein möglichst großer Messbereich von 0,1-500 μm
- möglichst große, repräsentative Messfelder
- Eignung für die stark streuenden Stahl- und die sowohl streuenden als auch teilweise transparenten Glasoberflächen
- Messdaten, die hinsichtlich mehrerer Oberflächenkenngrößen ausgewertet werden können.

Als geeignete Messfeldgröße⁵² wurde eine Länge und Breite vom zumindest Zehnfachen der maximalen Rautiefe festgelegt. Realisiert werden konnte letztlich das Hundertfache.

Die in Frage kommenden Methoden wurden in einigen Voruntersuchungen verglichen und ausprobiert. Die Auswahl fiel auf das „Infinite-Fokus“ Messsystem der Fima Alicona Imaging [Alicona 2009], bei der die Vermessung in Auftrag gegeben wurde. Das Gerät generiert Messdaten der Oberfläche mit der Methode der Fokus Variation am Lichtmikroskop und anschließender digitaler Bildauswertung⁵³. Ein 3-dimensionales, vergrößertes Topografie-Bild der Oberfläche kann gewonnen werden (vgl. Abbildung 4.26 und Abbildung 4.27). Oberflächendaten und -darstellungen befinden sich auch im Anhang A.1.2.

⁵² Die Rauheitskennwerte werden aus Profilen über Messstrecken nach [DIN ISO 4288] ausgewertet, die den geforderten Längen für Tastschnittgeräte entsprechen. Dafür werden zum Teil Zick-Zack-Linien in einem Messfeld abgefahren

⁵³ Die Probe wird auf einen Probenhalter gelegt und mit moduliertem Weißlicht koaxial beleuchtet. Das Licht wird von der Probe reflektiert, und das Bild über die Optik auf einen digitalen Sensor projiziert. Je nach gewähltem Objektiv können unterschiedliche Auflösungen lateral sowie vertikal realisiert werden. Das resultierende Bild hat in der Form Ähnlichkeiten zur konventionellen Lichtmikroskopie, es weist eine nur geringe Schärfentiefe auf. Nun wird die Distanz zwischen Probe und Objektiv verändert, wobei kontinuierlich Bilder aufgenommen werden. Für jede Tiefenposition werden unterschiedliche Bereiche der Probe scharf oder unscharf abgebildet, je nach 3D Struktur der Probe. Für jede Position am Objekt wird anschließend die abgebildete Schärfe berechnet. Die Variation der Schärfewerte wird nun verwendet, um die Tiefe (Höhenkoordinate) zu berechnen. So wird eine dichte 3D Repräsentation der Oberfläche erzeugt. Koordinaten x/y/z für jeden Punkt der Oberfläche im Rasterabstand der Auflösungsgrenze werden angegeben. Die Fokus-Variation ist eine Technik, die im aktuellen Entwurf zur neuen ISO Norm 25178 zur Standardisierung von optischen Messgeräten aufgenommen ist. Diese neue Norm umfasst neben taktilen erstmals auch optische Verfahren sowie die Definition von Oberflächenparametern zur flächenhaften Charakterisierung von Oberflächen. [Alicona 2009]

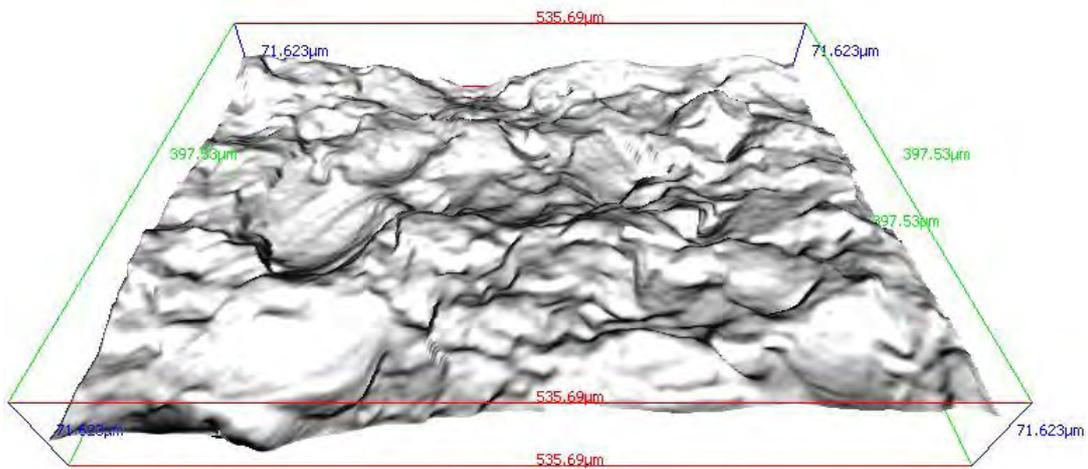


Abbildung 4.26: mit 3-D Oberflächenmessdaten erzeugte Visualisierung einer sandgestrahlten Glasoberfläche GR7 (Ausschnitt 536x398x72 μm, Vergrößerung 50x)

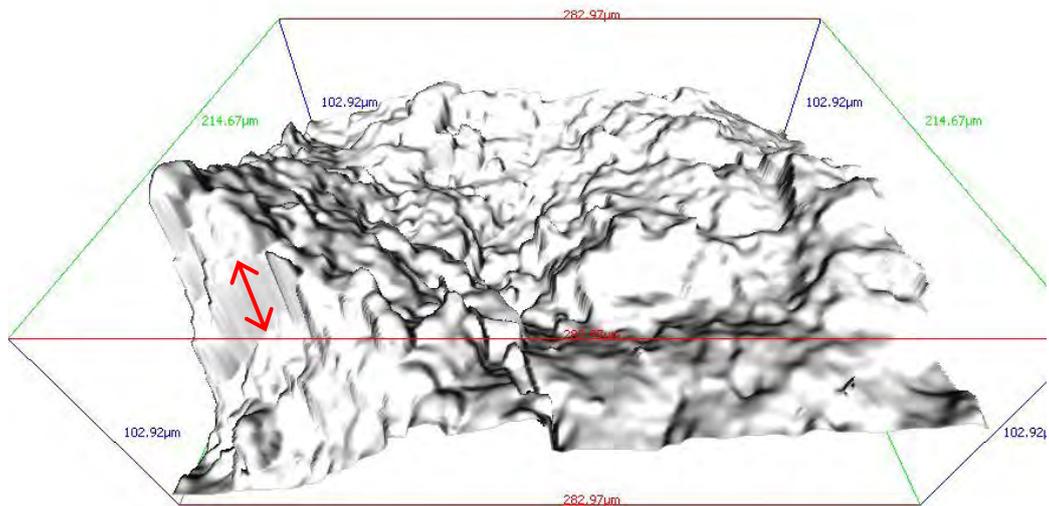


Abbildung 4.27: 3-D Visualisierung einer sandgestrahlten Stahloberfläche SR1 (Ausschnitt 283x215x103 μm, Vergrößerung 50x), roter Pfeil an Hinterschneidungsfläche

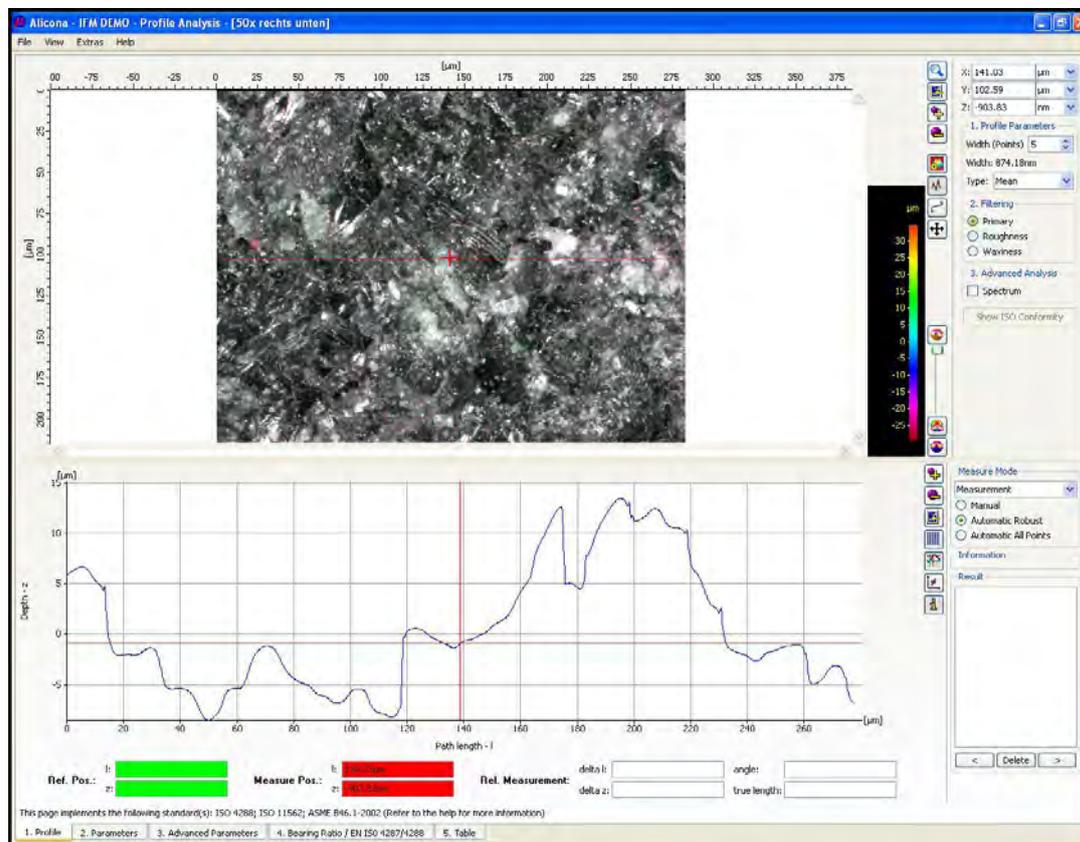


Abbildung 4.28: Screen-shot der Auswertung der Oberflächentopografie- hinsichtlich Profil- und Flächenparametern, Stahlprobe SR1, Messfeld in 50x-Vergrößerung.

Aus den Messungen wurden sowohl Profil- wie auch Flächendaten und Kennwerte entsprechend internationaler Normen extrahiert (vgl. Abbildung 4.28). Da die Koordinaten x/y/z-für jeden Punkt in einem Rasterabstand zur Verfügung standen, konnten weiterführende Analysen durchgeführt werden. Tabelle 2.5 auf Seite 25 listet die ermittelten Oberflächenkenngrößen auf⁵⁴. Zu den Definitionen und der verwendeten Analyse-Software siehe auch das Handbuch bzw. die Demo-Software, vgl. [Alicona2009].

Um den gesamten Rauheitsbereich der Oberflächen zu erfassen, wurde jede Probe mit 2 Vergrößerungen, 5x und 50x, vermessen. Die Messfeldgrößen betragen 21 mm² (5,357x3,981 mm) bzw. 0,06 mm² (284x215 µm) bei einer Auflösung von 1,76 µm bzw. 0,177 µm. Die Auflösung ist also von der gewählten Vergrößerung des Mikroskops abhängig. Von jeder der verwendeten Werkstoffrauheiten wurden an zumindest je einer Probe 5 Messfelder vermessen und die Mittelwerte der Oberflächenkenngrößen gebildet. Die Lage der Messfelder ist in Abbildung 4.18 auf Seite 88 eingetragen.

⁵⁴ Die Oberflächenanalysen wurden im Rahmen des Projektes AdBond UHPC größtenteils von DI (FH) Wolfgang Gallent MSc, MA ausgeführt.

Die sandgestrahlten Stahloberflächen wurden nach der Herstellung unter Luftabschluss trocken gelagert und vor der Vermessung mit Hilfe von Klebepads und Druckluft gereinigt. Sie konnten direkt vermessen werden. Bei den Proben SR5 wurden zusätzliche Messfeldern mit 5x- Vergrößerung vermessen und aneinandergehängt, um bei großer Rautiefe repräsentative längere Felder zu erhalten.

Bei den sandgestrahlten Glasoberflächen ergaben sich Schwierigkeiten bei der Messung wegen der Transparenz der Oberflächen. Außerdem stellte sich heraus, dass der Glasstaub, der vom Sandstrahlen in den Vertiefungen haftete, nur sehr schwer zu entfernen war. Deshalb wurden Replikas abgeformt, an denen die Glasoberflächen indirekt gemessen wurden. Leider zeigten sich an den Replikas Lufteinschlüsse und auch Glassplitter, die die Messergebnisse zweifellos etwas verfälschen (siehe auch Abbildung 4.29).

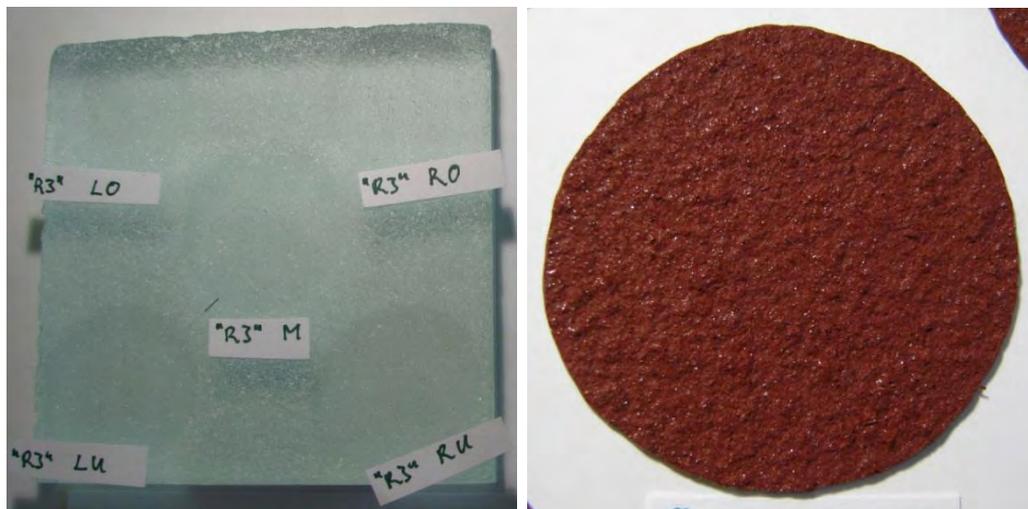


Abbildung 4.29: Glasprobe GR3 mit den 5 Messstellen, an denen Replikas abgeformt wurden und 1 Replika, das vermessen wurde, Glassplitter erkennbar.

Auswertung der 3-D Oberflächendaten - Hinterschneidungen

Da kein Verfahren gefunden werden konnte, das die untersuchten Oberflächen aus mehreren Blickwinkeln gleichzeitig erfasst und damit jede komplexe Form 3-dimensional wiedergibt, mussten eigene Verfahren entwickelt werden, um Hinterschneidungen auszuwerten.

Unter Hinterschneidungen der Oberflächenrauheit werden Bereiche verstanden, die in der Draufsicht überdeckt sind bzw. „rückspringende“, „widerhakenartige“ Ausformungen des Profils, vgl. Abbildung 4.24. Dort kann sich der UHPC mit der rauen Oberfläche verzahnen und bei entsprechender Belastungsrichtung durch Formschluss verbinden. Die Wirkung der „Zähne“ der Oberfläche für die mechanische Adhäsion hängt also von der Richtung ab, in der die Belastung erfolgt. Die Hinterschneidungsbereiche für eine Belastung normal zur geometrischen Bezugsebene, in unserem Fall ist das eine Zugbelastung, sind in

Abbildung 3.2b auf Seite 50 zu sehen. Diese Bereiche sind bei der gewählten Messmethode nicht einsehbar und werden als vertikal abfallende Flächen dargestellt, wie auch in Abbildung 4.26 zu erkennen.

Um die Gesamtfläche dieser vertikal abfallenden Flanken aus den vorliegenden diskreten numerischen Messdaten zu bestimmen, wurde ein Algorithmus in der Software Labview⁵⁵ implementiert. Die Vorgangsweise bei der Oberflächenanalyse und erste Ergebnisse sind auch in [Gallent 2009] publiziert.

Dabei wird der Gradient in jedem Punkt der Oberfläche bezogen auf die im Raster benachbarten Punkte evaluiert. Wenn die Änderung des Gradienten entlang einer Profillinie einen bestimmten Wert ($>1:3$) überschreitet, zeigt das eine (annähernd senkrechte) Steilabfalllinie an und in der Profillinie wird weiter der Endpunkt dieser Falllinie gesucht. Im Raster benachbarte Punkte mit ebenfalls annähernd vertikalen Gradienten werden gesucht und zu Gruppen zusammengefasst. In der Draufsicht erscheinen die Verbindungen dieser Punkte als Linien, die annähernd vertikale Flanken in der Oberfläche repräsentieren, Abbildung 4.30. Die Grundrisslängen werden mit den Höhendifferenzen der zugehörigen Punkte multipliziert, um so in Summe die gesamte Hinterschneidungsfläche zu erhalten. Angegeben wird letztlich die Hinterschneidungsfläche bezogen auf die geometrische Fläche des untersuchten Messfeldes, der „Hinterschneidungsquotient“.

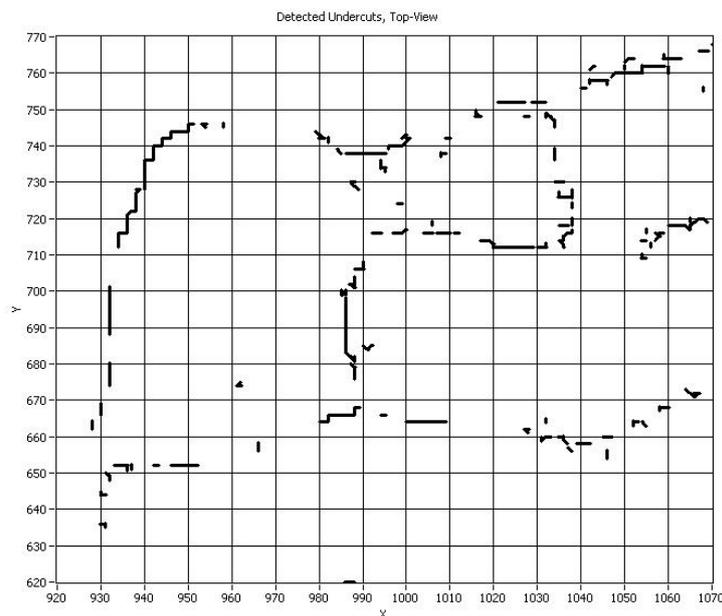


Abbildung 4.30: Auswertung der Oberflächenmessdaten nach Hinterschneidungen. In der Draufsicht sind die detektierten annähernd vertikalen Flanken eingezeichnet.

⁵⁵ Die Oberflächenauswertungen implementierte im Rahmen des Projektes AdBond UHPC DI (FH) Wolfgang Gallent MSc, MA.

Ergebnisse der Oberflächenvermessung - Oberflächenkennwerte

Tabelle 4.13 zeigt eine Übersicht der aus je fünf Messfeldern gemittelten Oberflächenkennwerte, siehe auch Tabelle 2.5 auf Seite 25. Im Anhang A.1.2 finden sich die Ergebnisse der einzelnen Messfelder.

Tabelle 4.13: Oberflächenkennwerte aus den Rauheitsmessungen

Messung	Werkstoff _Rauheit	Ra (TS)	Ra	Rz	Sa	Sz	Wenzel- Quotient	Fraktale Dim.	Hinter- scheidungs- Quotient
		[μm]	[-]	[-]	[-]				
5x	SR1	11	14,1	94,7	14,7	307,9	1,15	2,046	0,0018
	SR2	22	22,7	142,0	24,3	394,4	1,22	2,060	0,0049
	SR4	~200	181,2	1074,9	212,3	1473,8	1,71	2,042	n.v.
	SR5	~200	213,8	1131,7	260,1	1,5	1,76	2,068	0,1802
	GR3	20	14,7	105,5	16,2	157,6	1,10	2,024	0,0046
	GR5	25	55,3	258,8	65,6	686,9	1,27	2,044	n.v.
	GR7	8	11,1	79,0	12,0	121,6	1,08	2,011	0,0064
50x	SR1	11	8,6	44,7	9,9	82,1	1,52	2,086	0,1414
	SR2	22	7,7	38,7	10,3	91,8	1,45	2,069	0,1108
	SR4	~200	23,0	110,0	29,7	205,1	1,36	2,025	n.v.
	SR5	~200	20,1	107,9	22,3	154,6	1,67	2,080	0,2657
	GR3	20	8,4	49,1	9,2	66,5	1,19	2,044	0,0675
	GR5	25	4,3	24,9	5,7	63,4	1,16	2,021	0,0291
	GR7	8	5,5	34,4	6,0	53,4	1,13	2,035	0,0383

(TS) gemessen mit Tastschnittgerät

Der arithmetische Mittenrauwert Ra aus den Messfeldern der Infinite-Fokus Messung⁵² unterscheidet sich von den mit dem Tastschnittgerät generierten Werten und ist wie man erkennen kann von der verwendeten Vergrößerung bzw. Auflösung abhängig. Da bei großer Auflösung bzw. 50x-Vergrößerung nur die feinen Wellenlängen bzw. Vertiefungen der Rauheit erfasst werden, stimmen die Werte der 5x-Vergrößerung besser mit den Ra-Werten des Tastschnittgerätes überein. Bei der 5x-Vergrößerung werden also die ersten im Frequenzspektrum der Rauheit enthaltenen Schwingungen erfasst, bei der 50x-Vergrößerung weitere. Neben den auf Profile bezogenen Werten Ra und Rz werden die analogen auf Flächen bezogenen Werte Sa und Sz angegeben.

Der Wenzel Quotient und damit die gemessene wahre Oberfläche steigt wie erwartet mit der besseren Auflösung an. Der Wenzel Quotient der 50x-Messung ist also die genauere Angabe zur wahren Oberfläche. Die Wenzel-Quotienten aus den 50x-Rauheitsmessungen sind im Vergleich zu den mit der Kontaktwinkelmessung ermittelten Wenzel-Quotienten beim Glas ähnlich, beim Stahl geringer, vgl. Tabelle 4.15 und Abbildung 4.32. Ähnlich verhält es sich mit dem Hinterschneidungsquotienten. Erst bei 50x-Vergrößerung werden auch kleine Bereiche, in denen Hinterschneidungen vorkommen,

detektiert. Außerdem konnte bei den 50x-Vergrößerungen aufgrund des Datenumfanges jeweils nur ein Viertel eines Messfeldes analysiert werden. Die Hinterschneidungsanalyse gibt einen ungefähren Wert wieder, der nur grob auf Plausibilität geprüft werden konnte und vor allem als Vergleichswert für die unterschiedlichen Rauheiten verstanden werden muss.

4.2.3 Oberflächenenergie

Die Oberflächenenergie (OFE) von unterschiedlich rauen Stahl- und Glasoberflächen wurde wie für erhärteten UHPC mittels Kontaktwinkelmessung am ruhenden Tropfen und OWRK-Methode vom Institut für Physik der Montanuniversität Leoben bestimmt. Die Versuchsberichte sind im elektronischen Anhang A.1.3 zu finden. Dabei wurden sowohl glatte wie auch raue Proben mit den Messflüssigkeiten gemäß Tabelle 4.10 gemessen.

Oberflächenenergien von glattem Glas und Stahl

Um Aussagen zur spezifischen Adhäsion ableiten zu können, wurden Kontaktwinkelmessungen an glatten Glas- und spiegelglatt polierten Stahloberflächen durchgeführt. Zwei Varianten von glatt poliertem Stahl wurden getestet. In der ersten Variante wurden die polierten Stahloberflächen nach dem Polieren unter Luftabschluss gelagert und transportiert und unmittelbar danach gemessen. In der zweiten Variante wurden die polierten Stahloberflächen in einer gesättigten Lösung Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) mit einem pH-Wert von 12,5, die dem Milieu der Porenlösung von Beton entspricht, für eine Woche eingelagert. Der Zweck dieser Vorlagerung ist es, eine Oxyd-Schicht wie die der Passivierungsschicht des Stahles im alkalischen Milieu im UHPC zu erzeugen. Die Messungen wurden durchgeführt, unmittelbar nachdem die Stahlprobe aus der Lösung entnommen und kurz mit destilliertem Wasser und gleich darauf mit Aceton abgespült wurde⁵⁶. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.14 angegeben.

Die Ergebnisse zeigen, dass Stahl in der Variante 1 eine geringe OFE ohne polaren Anteil hat. Dabei wurden nur die Messflüssigkeiten EG und MI und kein Wasser verwendet, um die schnelle chemische Reaktion der Korrosion zu vermeiden, was auch nachweislich gelang. Stahl in der Variante 2 zeigt eine rund 50% höhere dispersive Komponente der OFE und auch einen deutlichen polaren Anteil.

⁵⁶ Von der Stahlprobe wurde noch in der Lösung außerdem eine Schicht von ausgeflocktem $\text{Ca}(\text{OH})_2$ mit einem Kunststofflineal vorsichtig abgeschabt. Eine Parallelprobe, von der diese Schicht nicht abgeschabt wurde ergab keine messbaren Kontaktwinkel. Die Tropfen zerflossen auf der porösen Schicht.

Tabelle 4.14: Oberflächenenergien von glattem Stahl und Glas

Variante	Oberflächenenergie [mJ/m ²]		
	dispersiv	polar	gesamt
	ζ_s^D	ζ_s^P	ζ_s
Glas	32,9	24,7	57,6
Stahl - Variante 1 (*)	25,6	0,1	25,7
Stahl - Variante 2	35,3	11,7	47
Stahl - Variante 2 (*)	37,7	1,6	39,3

(*) nur EG und MI wurden für die Messungen verwendet

Werden nur zwei Flüssigkeiten und damit kein Wasser zur Auswertung verwendet wie für die Variante 1, so ist der polare Anteil auch sehr klein⁵⁷. Die Ursache dafür liegt lediglich an der linearen Regression, wie sie in der OWRK Methode angewendet wird. Glas hat disperse und polare Oberflächenenergieanteile und eine insgesamt höhere OFE. Abbildung 4.31 zeigt die Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen, ausgewertet mit der Methode nach OWRK. Je größer die Steigung der Regressionsgeraden, desto höher der polare Anteil der OFE. Die Ungenauigkeit bei Verwendung von nur 2 Messflüssigkeiten wird deutlich sichtbar.

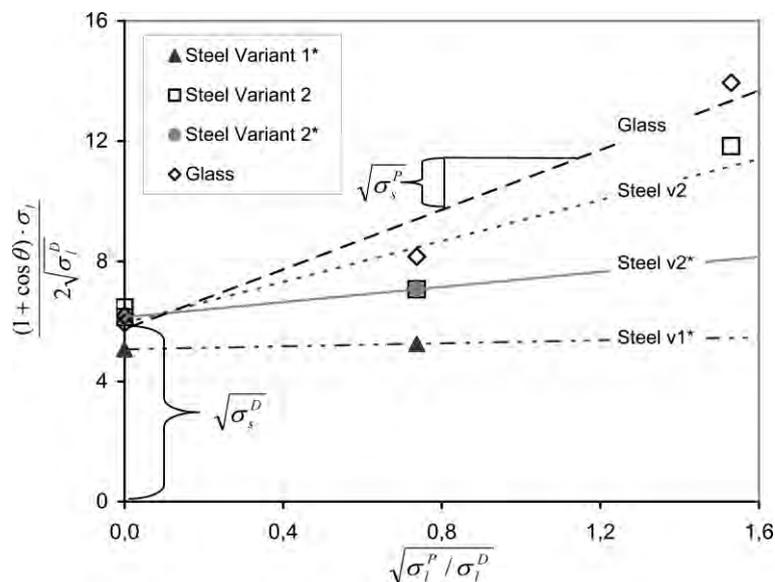


Abbildung 4.31: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen ausgewertet mit der Methode nach OWRK von G. Santner aus [Santner 2011]

⁵⁷ Bei den durchgeführten Messungen von Stahl ohne polare Messflüssigkeit mit nur 2 Flüssigkeiten wurde der polare Anteil der OFE unterschätzt. Er liegt laut Erfahrungswerten mit diversen Stahlproben vom Institut für Physik der Montanuniversität Leoben bei bei 5-10 mJ/m² bei einer gesamten OFE von 45-50 mJ/m.

Oberflächenenergien und Wenzel Quotienten von rauem Glas und Stahl

Mit den Kontaktwinkelmessungen an rauen Probenoberflächen wird das Ziel verfolgt, mit Hilfe der Wenzel-Gleichung (7.20) auf die benetzte bzw. wirksame Oberfläche und damit auf das Verhältnis von wirksamer zu geometrischer Oberfläche zu schließen. Die Messungen werden wie für glatte Oberflächen beschrieben mit zwei oder vier Messflüssigkeiten laut Tabelle 4.10 durchgeführt. Die Versuchsberichte der Montanuniversität Leoben befinden sich im Anhang A.1.3. Die Oberflächenbehandlung der Proben erfolgte wie im Kapitel 4.2.1 dargestellt. Die auf die gleiche Weise behandelten Materialien wurden auch für Haftzugprüfungen eingesetzt. Die folgenden Messungen und Auswertungen wurden vom Team des Institutes für Physik an den glatten und rauen Proben der Werkstoffkombinationen SR0, SR1, SR2 sowie GR0, GR3 und GR5 durchgeführt:

- Messung des Kontaktwinkels (10-15 Tropfen pro Flüssigkeit)
- Bestimmung der OFE nach der Methode OWRK aus zwei (Stahl und Glas) sowie vier (Glas) Messflüssigkeiten
- Berechnung der benetzten Oberfläche mittels Wenzel-scher Gleichung
- Einfluss der Gravitation (Volumenabhängigkeit)
- Zeitabhängigkeit (Verdunstungseffekte, Flüssigkeitsverbrauch durch chemische Reaktionen)

Die Tabelle 4.15 zeigt die Ergebnisse, wenn für Stahl EG sowie MI und für Glas alle 4 Messflüssigkeiten zur Auswertung herangezogen werden, siehe auch Anhang A.1.2.

Tabelle 4.15: Oberflächenenergien und Wenzel-Quotienten glatter und rauer Proben

Oberflächenenergie		Glas			Stahl		
		GR0	GR3	GR5	SR0	SR1	SR2
dispersiv	γ_s^D [mJ/m ²]	32,9	33	34,8	25,6	44,5	45
polar	γ_s^P [mJ/m ²]	24,7	30,1	30,8	0,1	1	0,1
gesamt	γ_s [mJ/m ²]	57,6	63,1	65,6	25,7	45,5	45,1
Wenzel-Quotient							
<i>MW 4(G) bzw. 2(S) Testflüssigkeiten</i>		1	1,06	1,12	1	2,67	2,42
<i>mit Testflüssigkeit Wasser</i>		1	1,16	1,21			

Für die rauen Untergründe ergeben sich geringere Kontaktwinkel und höhere Oberflächenenergien als für die glatten. Stahlproben zeigen praktisch nur dispersive Anteile der OFE. Der kleine polare Anteil bei SR1 könnte auf Strahlmittelrückstände zurückzuführen sein. Die OFE steigt mit zunehmender Rauheit, wobei die unterschiedlich rauen Proben jedes Materials keine signifikanten Unterschiede aufweisen. Auch die berechneten Wenzel-Quotienten sind im Rahmen der Messgenauigkeit für Stahl SR1 und SR2 gleich. Damit zeigt sich bei SR1 trotz kleinerer Rautiefe (12 μm) als bei SR2 (25 μm) die gleiche oder sogar etwas größere wirksame Oberfläche. Für eine Variation des Tropfenvolumens von 3 μl bis 50 μl wurde keine Abhängigkeit des Kontaktwinkels von der Gravitation festge-

stellt und in der Regel ein Volumen von 10 µl verwendet. Auch eine Zeitabhängigkeit innerhalb der 5 Minuten Messzeit trat nicht auf.

Bei den Glasproben wurde bemerkt, dass sie durch in den Vertiefungen der sandgestrahlten Oberfläche anhaftenden Glasstaub so verunreinigt waren, sodass keine Kontaktwinkelmessungen möglich waren. Erst nach mehrmaliger Reinigung mit Isopropanol und Aceton ließen sich stabile Tropfen absetzen und wurden reproduzierbare Messergebnisse erzielt. Nur durch die Verwendung von destilliertem Wasser als Messflüssigkeit lässt sich ein hoher polarer Anteil der OFE von Glas feststellen. Erst so kann der polare Charakter wiedergegeben werden. Deshalb erscheinen nur die mit Wasser berechneten Wenzel-Quotienten realistisch. Demnach unterscheiden sich die Rauheiten GR3 und GR5 in ihrer wirksamen Oberfläche nur geringfügig. Raue Glasproben weisen insgesamt die geringeren wirksamen Oberflächen als die Stahlproben auf.

Bei Stahl wird die Verwendung von 2 Messflüssigkeiten ohne das Wasser mit hohem polaren Anteil als ausreichend angesehen, da seine Wechselwirkung jedenfalls überwiegend dispersiv ist, allerdings ergibt sich das oben beschriebene Problem der Anzahl verwendeter Messflüssigkeiten in der Auswertung nach OWRK.

In Abbildung 4.32 sind die in der Oberflächenmessung mit dem Infinite Fokus System (IF-Messung) und aus der Kontaktwinkelmessung (KW-Messung) ermittelten Wenzel-Quotienten zusammengestellt.



Abbildung 4.32: Wenzel-Quotienten mit verschiedenen Bestimmungsmethoden

5 Makroebene: Untersuchungen des Haftverbundes

5.1 Haftzugversuche

Es werden Haftzugprüfungen durchgeführt, um an Verbundproben mit glatten Flächen auf die spezifische Adhäsion zu schließen. An Proben mit rauen Oberflächen soll die erzielbare Haftverbundfestigkeit hervorgerufen durch eine Kombination aus spezifischer und mechanischer Adhäsion experimentell ermittelt werden.

Durch die Kombination der Werkstoffe und verschiedenen Rauheiten ergibt sich eine Versuchsmatrix mit Gruppen von Werkstoff-Rauheitskombinationen mit meistens 8 Verbundprobekörpern. Die Tabelle 5.1 gibt eine Übersicht der untersuchten Werkstoffkombinationen, Serien und Probekörperanzahlen. In der Regel wird jeweils die Hälfte der Probekörper davon mit Verdunstungsschutz (MVS), die andere ohne Verdunstungsschutz (OVS) gelagert.

Tabelle 5.1: Versuchsmatrix und Bezeichnung der Werkstoffkombinationen

Adhärens		Adhäsiv				Anzahl der Probekörper						
	Rauheit	Oberflächen- behandlung	UHPC	Werkstoff _Rauheit	je Serie (**)							
	Ra (*) [µm]				SNS1	SD1	SD1-D	HE	EV	Vorserien		
										K1	K2	
Stahl S 355	R0	<0,05	poliert	EM	SR0EM	8			11	2	6	6
				DM	SR0DM		8					
	R1	12-15	fein sandgestrahlt, S1	EM	SR1EM	8				6	6	6
				DM	SR1DM		8	4				
	R2	25	grob sandgestrahlt, S2	EM	SR2EM	8					6	6
				DM	SR2DM		8	2				
	R4	~200	gehämmert	DM	SR4DM		8					
	R5	~200	gehämmert und fein sandgestrahlt	DM	SR5DM		8	5				
						GNS1				Vorserien		
Float Glas	R0	0	unbehandelt	EM	GR0EM	8				8	8	
	R7	8?	fein sandgestrahlt	EM	GR7EM	8						
	R3	15-20	sandgestrahlt, G1	EM	GR3EM	8				8	8	
	R5	25	sandgestrahlt, G2	EM	GR5EM					8	8	
					Summe	48	40	11	11	8	42	42

(*) bestimmt mit Tastschnittgerät, zu weiteren Oberflächenkenngrößen siehe Kapitel 4.2.2
 (**) Das Prüfalger ist in der Regel 28 Tage, ausgenommen Serie HE und STVGL (Vorserie).
 Bei den Hauptserien wurden Stahlstempel 100 mm dick, bei den Vorserien 20 mm dick verwendet

Die Tabelle 5.2 zeigt die Versuchsserien in chronologischer Auflistung und beschreibt kurz die verwendeten Werkstoffkombinationen bzw. Ziele der Untersuchungen.

Tabelle 5.2: Beschreibung Haftzugversuchsreihen

Serie	Beschreibung, Ziel	Verbundproben-aufbau	Herstellungsdatum
<i>Hauptserien</i>	<i>UHPC EM und DM, symmetrische Versuchsaufbauten mit konstanter Spannungsverteilung in Fuge</i>	<i>Stahlstempeldicke 100 mm</i>	<i>2009/2010</i>
SNS1	Stahl mit Mischung EM, Vergleich verschiedener Rauheiten, zusätzlich Vgl. mit 20 mm Stempel	UHPC zweiseitig	15.10.2009 16.10.2009
GNS1	Glas mit Mischung EM, Vergleich verschiedener Rauheiten		19.11.2009
SD1	Stahl mit Mischung DM, Vergleich verschiedener Rauheiten, zusätzlich neue grobe Rauheiten		21.01.2010 22.01.2010
SD1-D	neuerliche Prüfung der Probekörperteile aus SD1, die noch nicht abgelöst waren, raue Proben R1, R2 und R5	UHPC einschnittig, Oberteil aufgeklebt	19.03.2010
HE	Haftungsentwicklung durch Prüfung im Alter von 1d, 2d, 7d, 28d, 141d und 226d (*) an SR0EM Proben	UHPC zweiseitig	04.05.2010
EV	Stahlstempel einseitig auf unterschiedlich gelagertem UHPC mit Epoxidharz aufgeklebt, SR0EM und SR1EM Proben	UHPC einschnittig	04.05.2010
(*)	bei Proben mit 226 Tagen werden zusätzlich bei 105°C für 14 Tage vor Prüfung ausgetrocknet		
<i>Vorserien</i>	<i>Vergleich von UHPC EM mit 2 Konsistenzen, Versuchsaufbauten mit nur 20 mm Stahlteilen haben ungleichmäßige Spannungsverteilung und Störeinflüsse, thw. unsymmetrisch</i>	<i>Stahlteildicken 20 mm</i>	<i>2008/2009</i>
HZVGL	alternativen Herstellungsmethoden: Stempelmethode - Schalungsmethode, gedrehte Oberflächen	UHPC zweiseitig 2,5;4,20 mm UHPC	25.06.2008
HZVGL2	2. Vergleich von Stempelmethode und Schalungsmethode Oberflächen aus Stahl, Rauheit R1	UHPC zweiseitig 2,5 und 20 mm	09.09.2008
SR0R2	Stahl Sandwichproben (Stempelmethode) mit R0 und R2 und Beton K1 sehr fließfähig	UHPC zweiseitig 2,5 mm	17.12.2008
SK2	Stahl Sandwichproben (Stempelmethode) mit R0, R1 und R2 und Beton K2 wenig fließfähig	UHPC zweiseitig 2,5 mm	03.03.2009
SK2W	2.Serie an Stahl Sandwichproben (Stempelmethode) mit R0, R1 und R2 und Beton K2 wenig fließfähig	UHPC zweiseitig 2,5 mm	08.07.2009
GDAS1	UHPC auf Glas R0, R3, R5, Vgl. verschiedener Konsistenzen	UHPC zweiseitig 2,5 mm	26.02.2009
GDAS2	UHPC auf Glas R0, R3, R5, Versuchsaufbau mit zentrischem Zug oben und unten, Vgl. verschiedener Konsistenzen	UHPC zweiseitig 2,5 mm	06.08.2009
STVGL	Vergleich Stempel mit geringer (20 mm) und großer Dicke (50, 100 mm) bzw. Steifigkeit	UHPC zweiseitig 2,5 mm	14.07.2009

Als „Serien“ werden die zur selben Zeit hergestellten Proben bezeichnet. In jeder Serie wird jeweils ein bestimmter UHPC der Mischung EM oder DM mit einem Werkstoff, Stahl oder Glas, als Haftgrund mit verschiedenen Rauheiten kombiniert. In den Hauptserien wurden symmetrische Versuchsaufbauten mit massiven Stahlstempeln verwendet, die für eine konstante Spannungsverteilung in den Fugen sorgen. In Versuchen, die hier als „Vorserien“ bezeichnet sind, wird UHPC der Mischung EM mit zwei verschiedenen Konsistenzen K1 und K2 mit Stahl oder Glas verschiedener Rauheit getestet. Der in den Vorserien verwendete Versuchsaufbau unterscheidet sich von dem in den späteren Serien verwendeten und

weist störende Einflüsse auf die Spannungsverteilung in der Verbundfuge auf. Wenn nicht speziell darauf hingewiesen wird, werden die Haftzugfestigkeitsprüfungen im Alter der Verbundproben von 28 Tagen durchgeführt. Insgesamt sind über 200 Haftzugversuche ausgeführt worden.

5.1.1 Probekörperherstellung und Versuchsanordnung

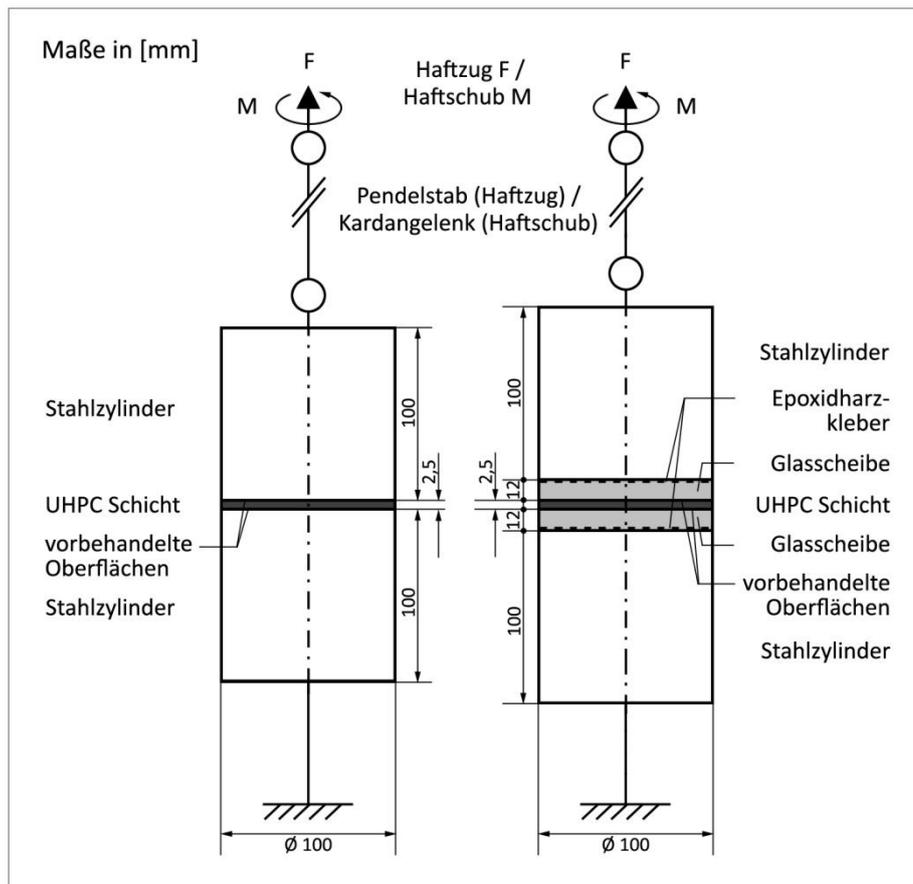


Abbildung 5.1: Probekörper für Haftzug- und Hafts Schubversuche der Hauptserien: Stahl-UHPC-Stahl und Glas-UHPC-Glas- Verbund und Schema des Haftzugversuchs.

Die Konzeption der Versuchskörper und deren Herstellung wurden dahingehend ausgelegt, dass Zwangsspannungen (Normal- und Schubspannungen) durch Schwindeinflüsse minimal werden. FEM-Berechnungen und Versuche zeigten, dass symmetrische Verbundproben mit ausreichend hohen (dicken) Teilen zur Lasteinleitung und beidseitig am Schwinden behinderten dünnen UHPC-Schichten die besten Ergebnisse liefern. Bei nur einseitig behinderter Schicht wären die auftretenden Schubspannungen und abhebenden Zugspannungen am Rand deutlich größer. Mit zunehmender Dicke der UHPC-Schicht im

Verhältnis zum Durchmesser wird der von Zwangsspannungen in der Verbundfuge beeinflusste Bereich außerdem größer. Im Zuge der Vorserien wurde die Probekörperherstellung und -geometrie entwickelt und einige Male verändert. In den Hauptserien wurden immer gleiche „Sandwich“-Probekörper entsprechend Abbildung 5.1 hergestellt.

Probekörperherstellung der Hauptserien

Die Vorbereitung der Stahl- und Glasteile wurde an der TU Graz und ihre Vorbehandlung durch Sandstrahlen bei einer Fachfirma extern ausgeführt. Die Probekörperherstellung erfolgte im Team an der FH Kärnten nach einem gleich bleibenden Ablauf:

1. Herstellen von Stahlzylindern – Ø 100 mm, Höhe 100 mm – aus Baustahl S 355. Die Zylinder werden auf einer Stirnfläche mit einem Innengewinde versehen (M12 bzw. M24 ab Serie SD1). An der zweiten Stirnfläche werden sie plangefräst und weiter vorbehandelt.
2. Oberflächenvorbehandlung einer Stirnfläche der Stahlzylinder durch Polieren, Hämmern oder Sandstrahlen (siehe Kapitel 4.2.1). Damit wird an den Stahlproben jene Oberfläche erzielt, die mit dem UHPC in Verbindung gebracht wird.
3. Die Stahlproben werden nach dem Polieren bzw. Sandstrahlen sofort in luftdichten Transportkisten mit feuchteabsorbierendem Silika-Gel trocken gelagert. So werden sie auch an die FH Kärnten transportiert. Korrosion kann bis auf wenige vereinzelte Stellen an einzelnen Proben verhindert werden.
4. Kreisrunde Glasproben – Ø 100 mm und Höhe 12 mm – werden durch Wasserstrahl-Schneiden aus glatten bzw. sandgestrahlten Float-Glas-Scheiben gewonnen. Die Glasscheiben werden mit Epoxidharzkleber auf Stahlstempel aufgeklebt, um massive Probenteile mit Gewindeansatz für die Haftzugprüfung zu erhalten. Das Schneiden mit dem Wasserstrahl ergibt einen leicht geneigten Schnitttrand, da der Strahl sich über seine Länge konisch aufweitet. Gegenüber dem Nenndurchmesser von 100 mm ergibt sich auf einer Oberfläche der Glasscheiben ein etwas kleinerer Durchmesser von 99,8 mm, was in der Auswertung vernachlässigt wird.
5. Es zeigte sich bei den Glasproben, dass nach dem Sandstrahlen Glasstaub die Oberflächen stark verunreinigt. Deshalb werden die sandgestrahlten Glasproben vor der Verbundprobenherstellung für je 6 Minuten in ein Ultraschall-Wasserbad gegeben, um Glasstaub mechanisch aus den Oberflächenvertiefungen zu entfernen⁵⁸ (siehe Abbildung 5.2).
6. In einem trockenen Raum (rund 30%Luftfeuchte, rd. 22 °C) werden Probekörperunterteil und –oberteil aufgebaut. An den Oberteilen werden Distanzkreuze angebracht, die

⁵⁸ Das Entfernen des Glasstaubes gelingt wie der Vergleich unter dem Mikroskop zeigt weitgehend, aber nicht vollständig. Sandgestrahlte Stahloberflächen dagegen sind mikroskopisch betrachtet praktisch nicht mit Strahlgut oder „Stahlabrieb“ verunreinigt. Lediglich in einem Fall wurde unter dem Elektronenmikroskop ein Strahlgut-Kügelchen aus Titan in einer feinen Vertiefung gefunden.

- es ermöglichen, den oberen Prüfkörperteil in einem Abstand von 2,5 mm parallel und zentrisch über dem unteren Prüfkörperteil zu positionieren (siehe Abbildung 5.3).
7. Die Oberflächen aus Stahl oder Glas werden unmittelbar vor der Herstellung der Verbundproben mit Ethanol abgespült und mit Druckluft gereinigt.
 8. In der Regel werden 6 l UHPC der definierten Mischungen EM oder DM nach einem festgelegten Mischablauf gemischt, vgl. auch Kapitel 4.1.4. Der Zeitpunkt der Wasserzugabe wird als „Null-Zeitpunkt“ für die weitere Zeitmessung festgehalten. Begleitende Frisch- und Festbetoneigenschaften sind in Kapitel 4.1.5 beschrieben, siehe auch Tabelle 4.4 und Tabelle 4.5.
 9. Der frische UHPC wird mit Hilfe eines „Konditor-Spritzsackes“ auf die vorbereiteten Untergründe aufgegossen. Der Sack wird verwendet, um den frischen UHPC nicht der trockenen Umgebungsluft auszusetzen, an der er sofort die charakteristische „Elefantenhaut“ ausbilden würde.
 10. Unmittelbar anschließend wird das Oberteil aufgesetzt. Es kann mit Hilfe der Distanzierung in einem Abstand von 2,5 mm parallel und zentrisch über dem Untergrund positioniert werden. Dabei wird es in den frischen UHPC leicht eingedrückt. Es fließt etwas UHPC über den Probekörperunterteil hinaus und steift oberflächlich an, sodass das Fließen gestoppt wird.
 11. In der Regel werden so 18 bis 24 Verbundproben mit 3 bis 5 verschiedenen Oberflächenrauheiten aus einer Charge in schneller Abfolge hergestellt. Es wird immer mit einem Probekörper der Rauheit R0 begonnen, gefolgt von einer Probe R1 und R2 usw., dann wiederholt sich der Vorgang mit der nächsten R0 Probe usw. Der Vorgang dauert 10 bis 15 Minuten.
 12. Danach wird der aus der Fuge über den Rand ausgelaufene UHPC mit einem Spatel entfernt, sodass eine ebene Mantelfläche des Zylinders aus Stahl/Glas – UHPC – Stahl/Glas entsteht.
 13. Bei in der Regel der Hälfte der Proben wird anschließend, also nach etwa 30 bis 45 Minuten nach der Wasserzugabe, ein synthetisches Wachs aufgesprayt, sogenanntes „Korro-Spray“. Es bildet sofort eine dickflüssige Schicht, erhärtet beim Ausdampfen des Lösungsmittels zunehmend und verhindert eine Austrocknung des noch plastisch weichen UHPC. Diese Proben werden im Folgenden als „Proben mit Verdunstungsschutz“ (MVS) bezeichnet. Hingegen trocknen die ohne Verdunstungsschutz hergestellten Proben (OVS) an der Raumluft sofort aus und steifen oberflächlich an.
 14. Nach etwa einer Stunde ab Wasserzugabe werden die Proben MVS zusätzlich mit einer transparenten Kunststofffolie (handelsübliche „Frischhaltefolie“) umwickelt, die an der angetrockneten Wachsschicht dicht anhaftet. Der Zeitpunkt der Behandlung mit Verdunstungsschutz variiert von Serie zu Serie um rund 1 Stunde.
 15. Etwa zum Zeitpunkt des mit dem VICAT Gerät parallel ermittelten Erstarrungsbeginns des UHPC, das sind 4 Stunden nach Wasserzugabe, wird die Distanzierung freigegeben und das Oberteil sitzt mit seinem Eigengewicht (rund 6 kg) auf dem UHPC während der weiteren Erhärtung auf.

16. Die Proben OVS und MVS lagern bis zum Tag der Haftzugprüfung – in der Regel der 28. Tag nach der Herstellung – in trockener Raumluft ($35 \pm 10\%$ r.F. und $22 \pm 5^\circ\text{C}$)
17. Unmittelbar vor der Haftzugprüfung wird die Folie des Verdunstungsschutzes entfernt.

(Die Abbildung 5.2 zeigt das Aufkleben der Glasteile auf Stahladapter und Abbildung 5.3 den gesamten Ablauf der Verbund-Probekörperherstellung.)



Abbildung 5.2: a) Glas auf Stahladapter kleben, b) vor Ultraschall, c) nach Ultraschall

Anmerkung zur Probekörperbezeichnung: Alle Probekörperoberteile und Unterteile werden nach dem Datum ihrer Oberflächenbehandlung verbunden mit der Angabe der Versuchsserie und der Rauheit und einer laufenden Nummer bezeichnet, z.B.: AB_2010-01-20_SD1_R101. Betonmischungen bzw. Festbetonprüfkörper werden nach dem Datum ihrer Herstellung verbunden mit der Angabe der Versuchsserie und des Rezeptes (Mischungszusammensetzung) und einer laufenden Nummer bezeichnet, z.B.: AB_2010-01-21_SD1_DM5_W1. Die Bezeichnung der Verbundproben aus UHPC und Stahl oder Glas wird aus der Probekörper-Ober- oder Unterteil-Bezeichnung und des verwendeten Betons zusammengesetzt. Dabei gilt das Datum der Verbundprobenherstellung (= Datum der Betonherstellung), z.B.: AB_2010-01-21_SD1_R101_R102_DM5.



Positionieren



In Betonier-Reihenfolge aufstellen



UHPC aufbringen



Stempel aufsetzen



Abziehen



Verdunstungsschutz (VS) aufbringen



Glas-Verbund-Probe ohne VS

Abbildung 5.3: Herstellungsablauf Verbundproben

Probekörperherstellung der Vorserien

Die Herstellung der Stahl- und Glasverbundproben der Vorserien erfolgte im Wesentlichen wie oben für die Hauptserien beschrieben, allerdings mit Stahlplatten mit nur 20 mm Dicke. In der ersten Vorserie wurden außerdem 20 mm dicke UHPC-Schichten in stehenden Schalungen hergestellt („Schalungsmethode“). Da sich bei dieser Methode Zwängungen und Behinderungen des Dickenschwindens nicht vermeiden ließen und darüber hinaus das Herstellen sehr aufwändig und das Ausschalen mit starker mechanischer Beanspruchung verbunden war, wurde die Methode verworfen. Bei der nachfolgend angewendeten „Stempelmethode“ wurden immer Sandwich Probekörper wie oben beschrieben hergestellt. Es stellte sich heraus, dass die zuerst verwendeten verhältnismäßig biegeweichen Platten keine gleichmäßige Spannungsverteilung in der Verbundfuge zuließen. Deshalb wurden in weiterer Folge nur mehr symmetrische Proben aus kreiszylindrischen Probekörperteilen verwendet, siehe auch Abbildung 5.5.

In den Vorserien wurden die Mischungen EMK1 und EMK2 eingesetzt, die sich hinsichtlich ihrer Konsistenz unterscheiden, vgl. auch Kapitel 4.1.5. Die Mischung EMK1 wird als sehr fließfähig eingestuft, während die Mischung EMK2 wenig fließfähig ist. Zu den Ergebnissen der begleitenden Frisch- und Festbetonprüfungen siehe auch Tabelle 4.5.

Die wesentlichen Vorserien, GDAS1 und GDAS2, SK2W und STVGL, ihre Herstellung, Versuchsanordnung und Haftzugprüfungen, sind in der vom Autor betreuten Diplomarbeit von Hans Peter Staudacher dokumentiert [Staudacher 2009]. In dieser Arbeit werden nur die wichtigsten Ergebnisse der Vorserien gezeigt.

Versuchsanordnung Hauptserien

Die Verbundprobekörper wurden einer zentrischen Zugprüfung bzw. Haftzugprüfung mittels Universalprüfmaschine⁵⁹ mit einer Maximallast von 250 kN unterzogen. Der untere Teil wird dabei auf eine kurze Gewindestange aufgeschraubt. Der obere Teil der Proben wird gelenkig an eine lange Zugstange, einen Pendelstab, angeschlossen. Die Kraft F , mit der am Pendelstab nach oben gezogen wird, wird mit einer Kraftmessdose gemessen (siehe Abbildung 5.4).

Der Versuchsaufbau wurde ursprünglich für eine maximale Zugkraft von 50 kN – das entspricht einer Haftzugfestigkeit von $6,4 \text{ N/mm}^2$ – konzipiert⁶⁰. Alle Versuche der Vorserien und die ersten beiden Hauptserien (SNS1 und GNS1) wurden mit diesem Aufbau aus-

⁵⁹ Universalprüfmaschine Fa. Test, T114.250. Maximallast 250 kN, Elektrischer Kraftaufnehmer für Druck- und Zugkräfte Messbereich 5-250kN: Klasse 0,5/ Messbereich 2-5 kN: Klasse 1

⁶⁰ Dafür sind Anschlussgewinde M12 und Gewindebolzen der Festigkeitsklasse 8.8 ausreichend.

geführt. Zur genauen Kraftmessung wurde dabei eine Kraftmessdose⁶¹ mit einer Maximallast von 50 kN verwendet. Es stellte sich im Zuge der ersten Serien heraus, dass höhere Maximallasten erreicht werden. Deshalb wurde mit der Kraftmessdose mit einer Maximallast von 250 kN, die in der Universalprüfmaschine integriert ist, weitergearbeitet. Da für die Serie SD1 eine noch höherer Maximallast erwartet wurde, wurden für diese und alle weiteren Serien (SD1-D, HE, EV) Gelenksanschlüsse und Gewindebolzen M24, die für eine Maximallast von 250 kN ausgelegt sind, verwendet. Der Einfluss des massiveren Aufbaues auf die Prüfergebnisse ist vernachlässigbar gering.

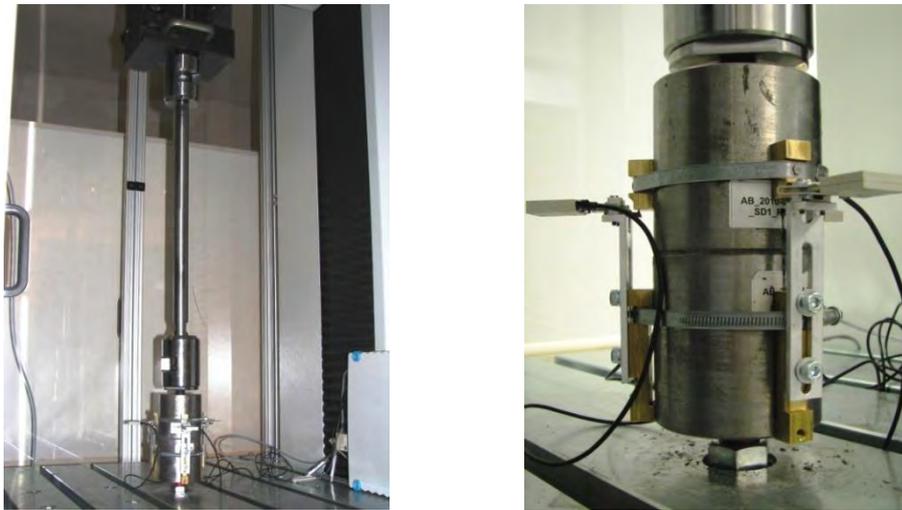


Abbildung 5.4: Universalprüfmaschine mit Versuchsaufbau der Haftzugversuche, vgl. auch Abbildung 5.1 (Aufbau mit Dehnungs-Messaufnehmern nur bei Serie SD1)

Die Versuche wurden weggeregelt mit einer Wegzunahme von in der Regel 0,2 mm/min durchgeführt. Die Messrate betrug 10 Hz. Bei einer Serie – SD1 – wurden drei Dehnungsaufnehmer DD1⁶² über die UHPC Fuge hinweg angebracht, um ungleichmäßige Dehnungen am Probekörperumfang festzustellen (siehe unten, Ergebnisse der Serie SD1).

Versuchsanordnung Vorserien

In den Vorserien wurden ebenfalls zentrische Zugprüfungen bzw. Haftzugprüfungen mittels derselben Universalprüfmaschine mit einer Maximallast von 250 kN durchgeführt.

⁶¹ Kraftmessdose U2B 50 kN der Fa. HBM, Genauigkeitsklasse 0,1 (Das bedeutet größter Einzelfehler ist 0,1% von 50 kN = 50 N), Kraftmessdose Universalprüfmaschine 250kN, kalibriert gemäß Klasse I im Bereich 2,5-250kN

⁶² Dehnungsaufnehmer mit DMS-Messsystem DD1, Genauigkeitsklasse 0,1, Nennlängenänderung $\pm 2,5$ mm (entspricht $\pm 2,5$ mV/V) zur Messung der Längenänderungen bzw. Dehnungen bezogen auf die Messbasis 50 mm. Messverstärker HBM Spider 8, Auflösung: 0,00012 mV/V, d.h. 0,12 μ m ist der kleinste Messwert, größter Einzelfehler ist 2,5 μ m

Die unterschiedlichen Versuchsaufbauten sind in Abbildung 5.5 zu sehen und in [Staudacher 2009] genauer beschrieben. Um festzustellen, welchen Einfluss die Dicke der lasteinleitenden Stahlteile auf die Prüfkraft bzw. -festigkeiten hat, wurde auch eine Serie mit Probekörpern, deren Stahlstempel eine Dicke von 20, 50 und 100 mm aufwies, durchgeführt⁶³, vgl. [Staudacher 2009], Serie „STVGL“. Als Konsequenz wurden in den Hauptserien nur mehr Verbundproben mit dicken Stahlstempeln mit einem Durchmesser zu Höhenverhältnis von 1:1 verwendet.



Abbildung 5.5: Vorserien: a) Versuchsaufbau 1, b) Detail aus a, c) Versuchsaufbau 2

5.1.2 Ergebnisse der einzelnen Haftzugversuchsserien

Als Haftzug-Prüffestigkeit σ_{HZ} wird der Quotient der ermittelten maximalen Prüfkraft F reduziert um das Eigengewicht G des oberen Prüfkörperteils (Masse rund 6 kg) und der geometrischen Fläche A_g angegeben. Diese „Prüf-Festigkeit“ wird vorerst unabhängig von der Bruchform bzw. dem Betonbruchanteil auf die geometrische Fläche A_g , berechnet mit dem Nenndurchmesser d_0 des Kreiszyinders von 100 mm, bezogen.

$$\sigma_{HZ} = \frac{F - G}{A_g} \dots \leq f_{ct} \quad (5.1)$$

Die tabellarische Darstellung der Ergebnisse der Haftzugprüfungen jeder Serie ist im Anhang A.2.1 zu finden. Dort sind auch die aufgetretenen Bruchformen, Mittelwerte und Standardabweichungen angegeben. Im Folgenden werden die Ergebnisse grafisch dargestellt.

⁶³ Nicht-lineare FEM Berechnungen von Gerhard Santner zeigten, dass erst ab einer Stempeldicke von 100 mm von einer gleichmäßigen Spannungsverteilung in der Verbundfuge gesprochen werden kann.

Es treten sehr unterschiedliche Bruchformen auf. Die Bruchflächen zeigen sowohl, dass sich UHPC in der Fuge bzw. in der Grenzflächenschicht ablöst, wie auch dass der Bruch mitten durch die dünne UHPC-Schicht gehen kann. Zum großen Teil mischen sich diese beiden Formen. Bei einigen Proben zeigt sich das Versagen als überwiegender Betonbruch in der UHPC-Schicht, es wird also die Zugfestigkeit f_{ct} des UHPC erreicht. Zur detaillierten Analyse der Bruchformen und der Bruch- und Rissbilder siehe Kapitel 5.3. Fotos der Bruchflächen jedes einzelnen Probekörperteils sind im elektronischen Anhang dokumentiert.

Serie SNS1: Stahl R0,R1,R2 mit UHPC Mischung EM

In der Serie SNS1 werden symmetrische zweischnittige Verbundproben aus Stahl mit Oberflächen der Rauheit R0 (poliert), R1 (fein sandgestrahlt) sowie R2 (grob sandgestrahlt) und UHPC der Mischung EM hergestellt. In 2 Betonagen werden je 4 Probekörper jeder Rauheit erzeugt, also insgesamt 24 Proben. Jeweils die Hälfte der Proben jeder Rauheit wird 28 Tage mit (MVS) bzw. ohne Verdunstungsschutz (OVS) gelagert. Es gibt also jeweils 4 Proben ($n=4$) gleicher Werkstoffkombination und Lagerung.

Zusätzlich zu den genannten Proben aus Stahlzylindern mit 100 mm Höhe und Durchmesser werden 3 Vergleichsproben MVS der Rauheit R0 mit Stahlzylindern mit 20 mm Höhe und 100 mm Durchmesser hergestellt. Damit soll ein Maßstabsfaktor für den Vergleich von Haftzugfestigkeiten bei 100 mm Zylinderhöhe mit den Festigkeiten bei 20 mm Zylinderhöhe gefunden werden. Siehe dazu auch die Ergebnisse der Vorserien, insbesondere der Serie STVGL am Ende des Kapitels.

Die Abbildung 5.6 zeigt die geprüften Haftzugfestigkeiten. Bei einigen Proben, insbesondere bei allen rauen Proben MVS, kommt es zu einem Bruch im Beton, der mehr als 85% der Bruchfläche ausmacht, siehe zum Beispiel Abbildung 5.34a (oben) auf Seite 147. Die Festigkeiten der Proben mit überwiegendem Betonbruchanteil sind im Diagramm *rot* eingetragen. Besonders bei den rauen Proben MVS wird damit die Zugfestigkeit f_{ctm} der dünnen UHPC-Schicht erreicht, sie beträgt im Mittel für SRXEM 9,6 N/mm². Auch bei den glatten Proben MVS tritt überwiegend Betonbruch auf, allerdings zeigen sich auch Stellen mit einem Bruch in der Grenzschicht des UHPC zum Stahl (vgl. Kapitel Bruchflächenanalyse 5.3.3). In allen diesen Fällen muss also von einem Kohäsionsversagen des UHPC gesprochen werden, die Adhäsionsfestigkeit des UHPC EM ist also größer als die Zugfestigkeit des Betons.

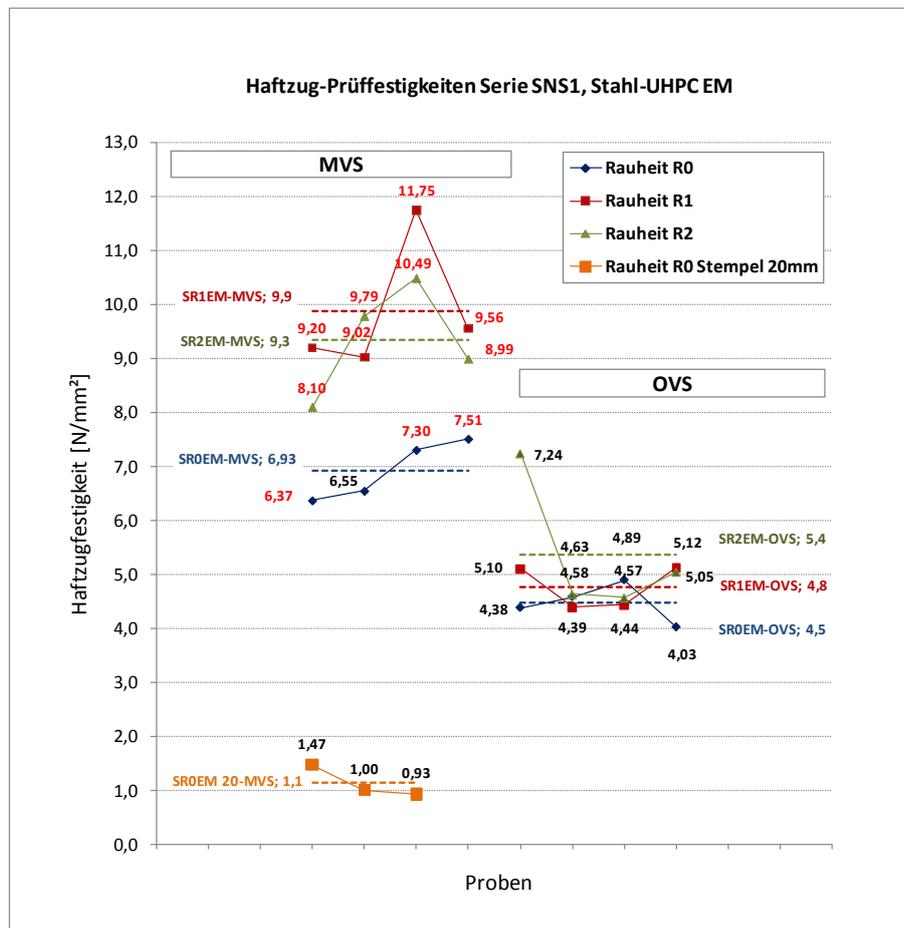


Abbildung 5.6: Haftzug-Prüffestigkeiten der Proben der Serie SNS1 mit Angabe der Mittelwerte der Proben OVS und MVS je Rauheit, rote Einzelwerte=Betonbruch

Mittels der untersuchten glatten Proben mit einer Stahlstempeldicke von 20 mm (SR0EM 20-MVS) im Vergleich zu den Proben mit 100 mm (SROEM-MVS) wurde der *Maßstabsfaktor der Prüf-Festigkeiten für 100:20 mm Stempeldicke (Zylinderhöhe) mit 6:1* bestimmt. Erst bei 100 mm Stempeldicke ist die Spannung in der Verbundfuge gleichmäßig verteilt und kann mit Gleichung (5.1) aus der Prüfkraft berechnet werden. Prüf-Festigkeiten der 20 mm Stempel sind demgemäß mit Faktor 6 zu multiplizieren, um die maximal auftretende Spannung in der Verbundfuge anzugeben.

Serie GNS1: Glas R0,R7,R3 mit UHPC Mischung EM

In der Serie GNS1 werden symmetrische zweiseitige Verbundproben aus Glas mit Oberflächen der Rauheit R0 (spiegelglatt), R7 (fein sandgestrahlt) sowie R3 (etwas gröber sandgestrahlt) und UHPC der Mischung EM hergestellt. 24 Proben werden im Zuge einer Betonage erzeugt. Jeweils die Hälfte der Proben jeder Rauheit wird 28 Tage mit (MVS)

bzw. ohne Verdunstungsschutz (OVS) gelagert. Es gibt also jeweils 4 Proben (n=4) gleicher Werkstoffkombination und Lagerung.

Erfahrungen aus den Vorserien GDAS1 und GDAS2 – vgl. [Staudacher 2009] – zeigten, dass die ursprünglich verwendete gröbere Glas-Rauheit R5 keine größeren Haftzugfestigkeiten hervorruft als die weniger grobe Rauheit R3. Außerdem scheinen die Glasproben umso mehr Risse und Vorschädigungen nahe der Glasoberfläche zu bekommen, je gröber die Rauheit wird. Diese Vorschädigungen führen zu geringeren Haftfestigkeiten. In der Bruchfläche werden Glassplitter sichtbar. Für die zusätzliche Glas-Rauheit R7 in der Hauptserie wurde deshalb eine noch feinere Sandstrahlung gewählt als für R3.

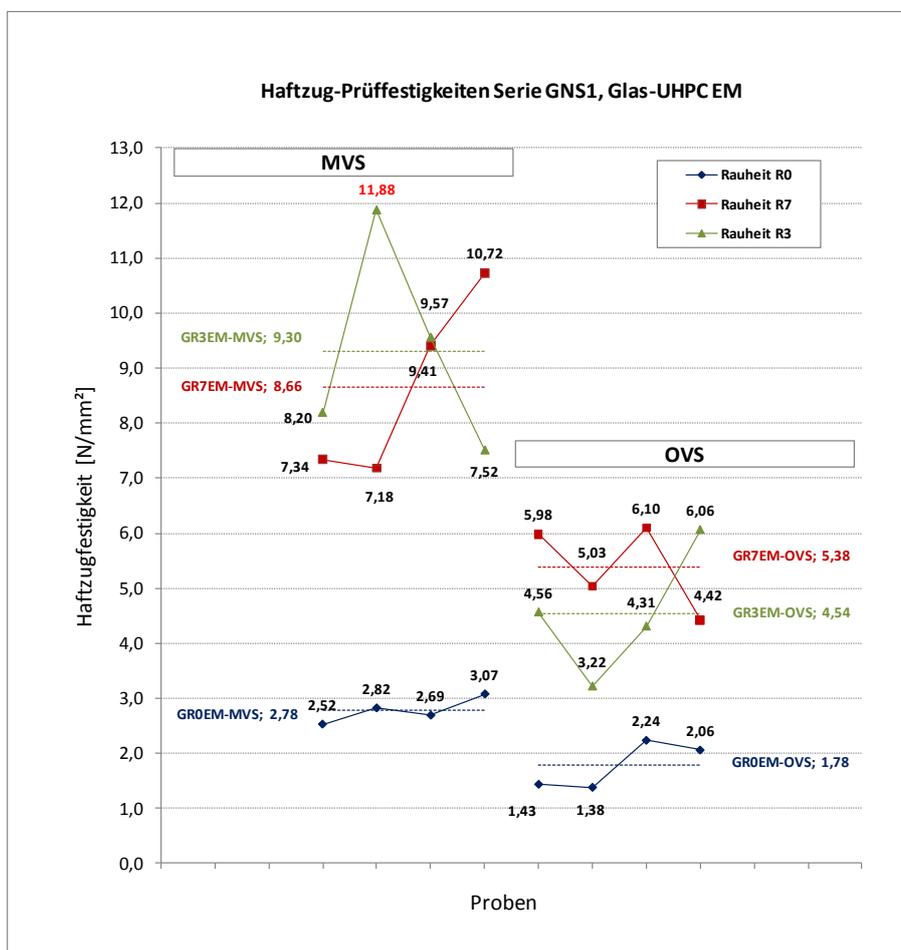


Abbildung 5.7: Haftzug-Prüffestigkeiten der Proben der Serie GNS1 mit Angabe der Mittelwerte der Proben OVS und MVS je Rauheit, roter Einzelwert=Betonbruch

Die Abbildung 5.7 zeigt die Prüf-Festigkeiten. Bei den rauen UHPC-Glasproben hat der Bruch im Gegensatz zu den Stahlproben der Serie SNS1 großteils im UHPC der Grenzflächenschicht stattgefunden, vgl. auch Kapitel 5.3. Vereinzelt sind auch Glassplitter in der abgelösten UHPC Fläche sichtbar. Bei so einem Versagen in der Grenzflächenschicht ist es

schwierig, Adhäsions- von Kohäsionsversagen zu unterscheiden. Bei einzelnen rauen Proben MVS werden hohe Festigkeiten erreicht, die der im Zuge der Serie SNS1 erhaltenen Betonzugfestigkeit des UHPC EM gleichkommen. Nur ein Ergebnis wird eindeutig als Betonbruch, im Diagramm rot eingetragen, eingeordnet.

Serie SD1: Stahl R0,R1,R2,R4,R5 mit UHPC Mischung DM

In der Serie SD1 werden symmetrische zweischnittige Verbundproben aus Stahl mit UHPC der Mischung DM hergestellt. Da UHPC DM höhere Druckfestigkeiten als UHPC EM aufweist, werden auch höhere Haftzugfestigkeitsprüfwerte erwartet. Zudem werden mit dieser Serie zwei zusätzliche Rauheiten, SR4 und SR5 eingeführt, die beide wesentlich größere Rautiefen haben als SR1 und SR2. In 2 Betonagen werden je 4 Probekörper jeder Rauheit erzeugt, also insgesamt 40 Proben. Jeweils die Hälfte der Proben jeder Rauheit wird wieder 28 Tage mit (MVS) bzw. ohne Verdunstungsschutz (OVS) gelagert. Es gibt also jeweils 4 Proben ($n=4$) gleicher Werkstoffkombination und Lagerung.

In dieser Serie wird im Unterschied zu den Serien SNS1 und GNS1 ein Prüfaufbau eingesetzt, der die erwarteten höheren Kräfte aufnehmen kann. Außerdem werden die Dehnungen der UHPC-Schicht an drei um 120° versetzten Stellen am Umfang des Probekörpers gemessen (siehe Abbildung 5.4, Seite 110). Dafür werden 3 Dehnungsaufnehmer DD1 von HBM mit einer Messbasis von 55 mm (-1,5 mm Auslenkung der DD1 in Nullstellung) am unteren Probekörper fixiert. So soll festgestellt werden, wie ungleichmäßig sich die Schicht dehnt und damit auf Imperfektionen im Probekörper rückgeschlossen werden, die zu ungleichmäßiger Zugspannungsverteilung über den Querschnitt führen. Außerdem soll ermittelt werden, ob die Spannungs- Dehnungslinien bis zum Bruch linear verlaufen.

Die Abbildung 5.8 zeigt die geprüften Haftzugfestigkeiten. Die unterschiedlichen Bruchbilder und die detaillierte Bruchflächenanalyse sind wiederum dem Kapitel 5.3 zu entnehmen. Es zeigt sich, dass ein Fugenversagen bei SD1 öfter stattfindet als bei SNS1. Die erwarteten höheren Prüffestigkeiten treten nicht auf. Es kommt bei glatten Stahlproben mit dem UHPC DM zu geringeren Prüf-Festigkeiten als bei UHPC EM und zu einer Ablösung in der Grenzflächenschicht. Bei den rauen Proben SR1 und SR2 tritt der Bruch im Gegensatz zu den rauen Stahlproben der Serie SNS1 nahe der Grenzfläche auf. Trotz Haftresten von Bindemittelstein auf der abgelösten Stahlfläche ist wohl von einem Adhäsionsversagen zu sprechen. Dieses Versagen ist bei der Werkstoffkombination SR1DM-MVS mit verblüffend hohen Haftzugfestigkeiten bis $12,6 \text{ N/mm}^2$ verbunden!

Überwiegender Betonbruch in der Bruchfläche, also ein Kohäsionsversagen, ist bei SR5DM-MVS zu beobachten. Der Mittelwert, der als mittlere Betonzugfestigkeit f_{ctm} der Mischung DM angesehen werden muss, beträgt 10 N/mm^2 . Die Bruchbilder zeigen deutlich, dass sich die große Rautiefe bei SR5 verbunden mit einer zusätzlichen feinen Rauheit der Oberfläche auf den Verbund so auswirkt, dass der Bruch im Beton und nicht in der Grenzflächenschicht auftritt. Die Prüf-Festigkeiten an der großen Rauheit SR5 sind auch an Proben OVS mit Abstand größer als an den geringeren Rauheiten SR1 und SR2.

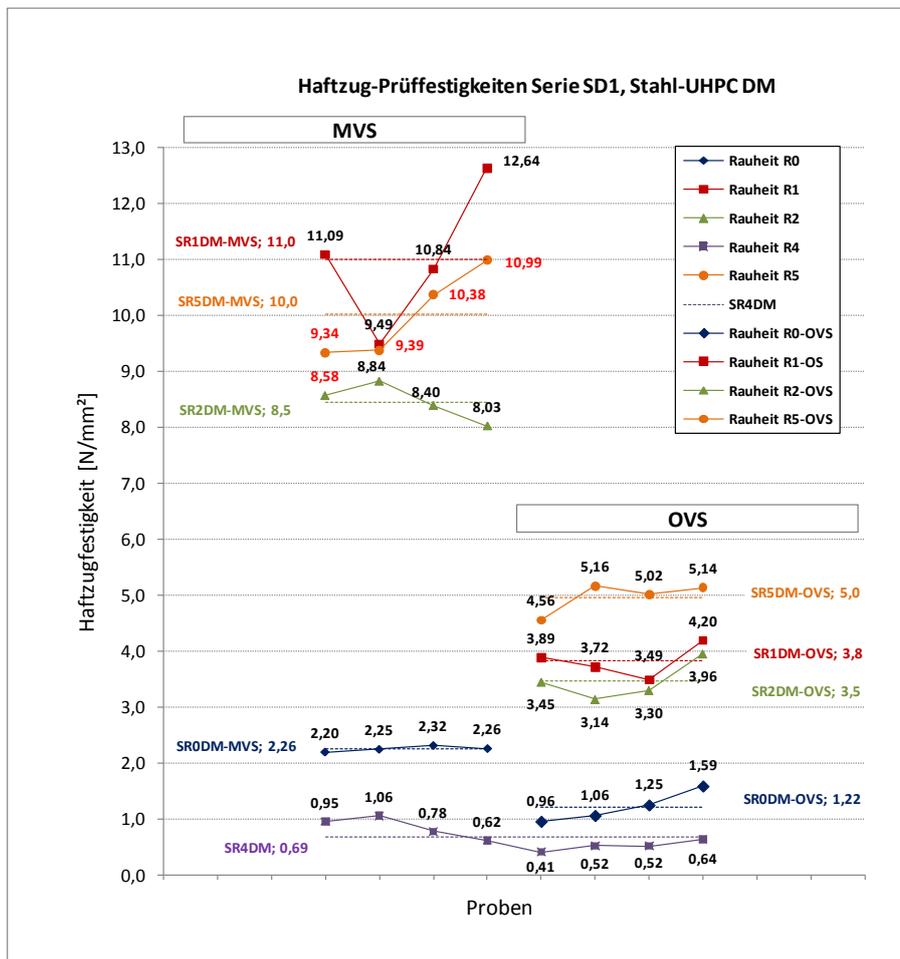


Abbildung 5.8: Haftzug-Prüffestigkeiten der Proben der Serie SD1 mit Angabe der Mittelwerte der Proben OVS und MVS je Rauheit, rote Einzelwerte=Betonbruch

Die Rauheit SR5 passt mit ihrer großen Rautiefe durch das Behauen und den mit dem Sandstrahlen zusätzlich „auf modulierten“ feinen Rauheitswellenlängen offensichtlich am besten zur gesamten Kornverteilung des UHPC. Auch die großen Quarkörner (0,125-0,6 mm) finden noch Platz in den groben Vertiefungen. Aus rein geometrischen Überlegungen muss die Störung der optimalen Packungsdichte des UHPC an rauen Oberflächen geringer ausfallen als an glatten Oberflächen. Die Prüf-Festigkeiten und der visuelle Vergleich der Bruchflächen (vgl. Kapitel 5.3) bestätigt den Eindruck.

Verwunderlich ist das Ergebnis der Proben mit Rauheit SR4. Trotz großer Rautiefe werden die geringsten Festigkeiten erzielt. Das Versagen tritt immer in der Kontaktfläche auf. Offensichtlich bringt die grobe Rauheit ohne Feinabstufungen nichts. Im Gegenteil, Luft in den Vertiefungen, die nicht entweichen kann, führt sichtbar dazu, dass UHPC die Vertiefungen nicht ausfüllt und damit sozusagen nicht benetzt. Thermische Veränderungen der Stahloberfläche durch das Behauen wurden im Lichtmikroskop beobachtet, siehe dazu

„Besonderheiten der Rauheit R4“ im Kapitel 5.3. Die Gründe für die geringen Festigkeiten sind auch in der einheitlich ungünstigen Flankenneigung der Rauheit SR4 zu finden, wie in Kapitel 8 ausgeführt.

Die Messung der Verlängerungen am Umfang zeigt, dass die Spannungs-Verlängerungs-Linien bei allen Proben, ausgenommen SR4DM, linear bis zum Bruch verlaufen (siehe Abbildung 5.9a und Prüfprotokolle der Haftzugversuche im elektronischen Anhang A.2.1). Die Verlängerungen der „Randfasern“, gemessen mit den Wegaufnehmern DD1 am Umfang und damit die Randdehnungen, können bis zu 15% stärker bzw. geringer ausfallen als die abgeschätzte axiale Dehnung. Dementsprechend – bei linearem Materialgesetz – auch die Randspannungen. Ein Zusammenhang zwischen ungleichmäßigen Dehnungen bzw. dem Biegespannungseinfluss aus Imperfektionen und dem Bruchbild bzw. der Bruchform kann nicht festgestellt werden.

Im Gegensatz zu allen anderen Rauheiten zeigt das Spannungs-Dehnungsdiagramm der Proben mit der Rauheit SR4 keinen linearen Verlauf. (Abbildung 5.9b). Die Prüf-Festigkeit erreicht außerdem wesentlich geringere Werte.

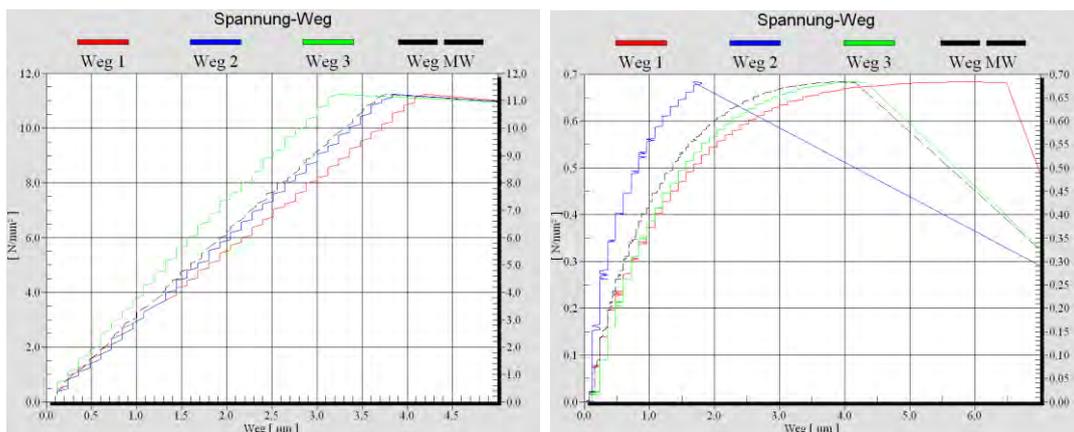


Abbildung 5.9: a) Spannungs-Verlängerungs(Weg)-Linien einer Probe **SR1** (SD1_R101_R102) und b) einer Probe **SR4** (SD1_R415_R416)

Vergleich der Ergebnisse der Serien SNS1,GNS1 und SD1

Die Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten der geprüften Haftzugfestigkeiten sind für die unterschiedlichen Werkstoff-Rauheitskombinationen vergleichend in der folgenden Tabelle 5.3 aufgeführt. Darin wird auch der jeweilige Betonbruchanteil angegeben. Ist er sehr groß, z.B. größer als 50 %, ist die Kohäsion bzw. die Zugfestigkeit des UHPC maßgeblich für das Versagen. Damit ist die eigentliche Adhäsionsfestigkeit größer als der geprüfte Festigkeitswert. Tritt bei den Verbundproben überwiegend ein Fugenbruch auf, so betrifft er die obere oder untere Verbundfuge gesamt gesehen etwa gleichermaßen häufig. Der Versuchsaufbau ermöglicht also praktisch gleiche Bedingungen für die obere und untere Fuge (vgl. dazu auch die tabellarische Darstellung der Er-

gebnisse der Haftzugprüfungen im Anhang A.2.1). Das Verbundversagen in einer Fuge zeigt auch, dass die zweite Fuge jedenfalls einen höheren Verbundfestigkeitswert⁶⁴ hat. Die Abbildung 5.10 zeigt die Ergebnisse auch grafisch. Auf die Angabe der geringen Prüffestigkeiten der rauen Proben SR4 aus der Serie SD1 wird in der Darstellung verzichtet.

Tabelle 5.3: Ergebnisse der Haftzugprüfungen der Serien SNS1, GNS1 und SD1

Werkstoff- Rauheit	Mi- schung/ Serie	OVS				MVS				Verhält- nis
		Prüf- festig- keit	Stan- dardab- weichung	Varia- tions- koeff.	Beton- brucha- nteil	Prüffes- tigkeit	Stan- dardab- weichung	Varia- tions- koeff.	Beton- brucha- nteil	
		MW n=4 [N/mm ²]	[-]	[-]	%	MW n=4 [N/mm ²]	[-]	[-]	%	MVS/ OVS
SR0EM	S-EM	4,5	0,36	0,08	3-10	6,9	0,56	0,08	50-90	1,55
SR1EM	SNS1	4,8	0,40	0,08	5-15	9,9	1,27	0,13	80-95	2,08
SR2EM		5,4	1,26	0,24	5-15	9,3	1,03	0,11	90-95	1,74
GR0EM	G-EM	1,8	0,44	0,25	0	2,8	0,23	0,08	0	1,56
GR7EM	GNS1	5,4	0,80	0,15	3-10	8,7	1,68	0,19	0-10	1,61
GR3EM		4,5	1,17	0,26	3-7	9,3	1,92	0,21	0-50	2,05
SR0DM	S-DM	1,2	0,28	0,23	0-2	2,3	0,05	0,02	0-30	1,86
SR1DM	SD1	3,8	0,30	0,08	2-5	11,0	1,29	0,12	0-60	2,88
SR2DM		3,5	0,35	0,10	2-5	8,5	0,34	0,04	0-80	2,44
SR5DM		5,0	0,28	0,06	10-35	10,0	0,80	0,08	60-95	2,02

Klar sichtbar wird, dass Proben, die mit Verdunstungsschutz MVS gelagert wurden, also ein geringeres Schwindmaß aufweisen als Proben OVS, immer höhere Haftzugfestigkeiten erreichen als Proben OVS. Bei den Werkstoffkombinationen mit rauen Oberflächen erreichen beinahe alle Proben MVS auch die Betonzugfestigkeit. Hier sind also keine Unterschiede der Adhäsionsfestigkeiten mehr feststellbar.

Sogar die glatten Proben der Kombination SR0EM-MVS zeigen einen großen Anteil von Betonbruch in der Bruchfläche. Die Bruchlinie verläuft allerdings stellenweise sehr nahe an der Grenzfläche zum Adhärens Stahl, sodass anhaftender Bindemittelstein sichtbar wird, siehe dazu auch die Kapitel Bruchflächenanalyse 5.3 und Mikroebene 6.3. Der Bruch wird deshalb als „Mischbruch“ eingestuft.

Die Proben OVS erreichen die Prüfwerte der Betonzugfestigkeit nicht. Die „Adhäsionsfestigkeit“ wird damit scheinbar maßgebend. Es werden Unterschiede abhängig vom Beton und vom Untergrund-Werkstoff sichtbar. Mit UHPC EM werden höhere Adhäsionsfestigkeiten erreicht als mit UHPC DM. Mit glattem Glas lassen sich deutlich geringere Haftfestigkeiten erzielen als mit glatt poliertem Stahl. Bei rauem Glasuntergrund gibt es diesen Unterschied zum Stahl nicht. Die Rauheit alleine scheint also beim Glas eine stärkere Haftung zu bewirken.

⁶⁴ In einer statistischen Auswertung könnten in den meisten Fällen je Probekörper zwei Ergebnisse der Verbundfestigkeit gewertet werden.

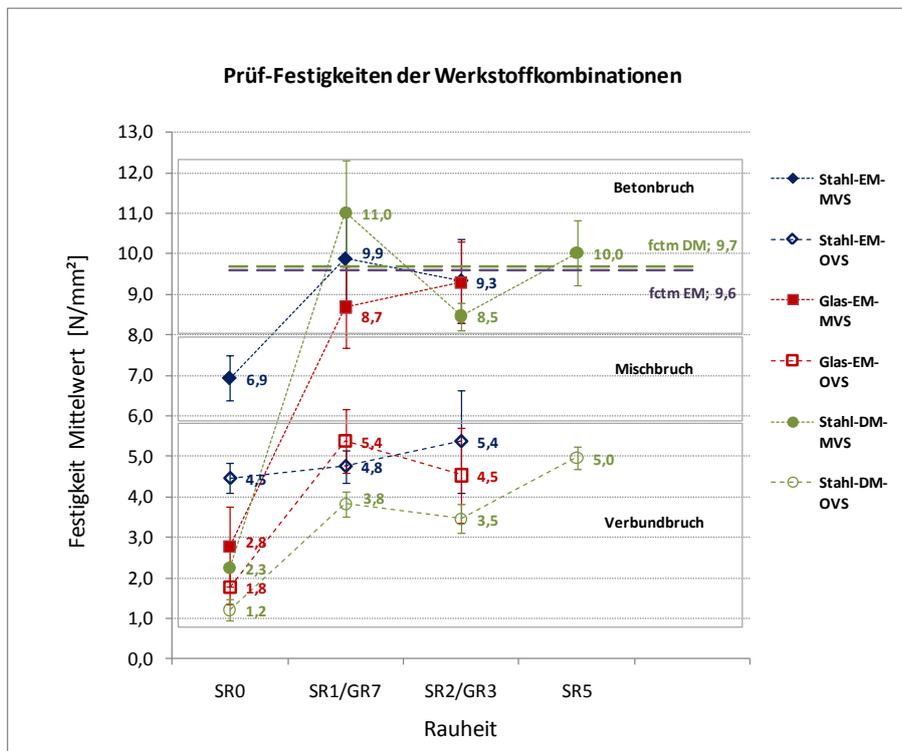


Abbildung 5.10: Prüf-Festigkeiten der Werkstoffkombinationen: **Mittelwerte** von Proben MVS und OVS verschiedener Rauheiten mit Angabe der Standardabweichungen

Deutlich sichtbar wird außerdem, dass der Unterschied der Prüf-Festigkeiten der Rauheiten SR1 und SR2 sowie GR7 und GR3 für die gleichen UHPC-Mischungen gering ist, da sich die Streubereiche überlappen. Hingegen lässt sich die Verbundfestigkeit durch die große Rauheit SR5, auf der eine feine Rauheit „auf moduliert“ ist, noch steigern.

Serie SD1-D: Stahl R1,R2,R5 mit UHPC Mischung DM - neuerlich verbunden

Die Serie SD1-D wird eingeführt, um die zweite Verbundfuge, die im Zuge der ersten Haftzugprüfung der Serie SD1 nicht versagt hat, auch zu prüfen. Deshalb werden die Probeköpernteile von *rauen Proben* der Serie SD1, an welchen die UHPC-Schicht noch vollständig ohne Ausbrüche anhaftet (siehe Abbildung 5.11a), neuerlich verwendet. Auf insgesamt 11 Proben der Rauheiten R1 (4 Stk.), R2 (2 Stk.) und R5 (5 Stk.) wird ein rauer Stahlstempel auf die UHPC-Schicht mit Epoxidharzkleber⁶⁵ aufgeklebt. So entsteht wieder ein zweiseitiger „Sandwich-Probekörper“, allerdings mit nicht gleichartigen, unsymmetrischen Verbundfugen (siehe Abbildung 5.11b). Das Aufkleben erfolgt 1 Monat nach der Haftzugprüfung der Serie SD1. In dieser Zeit lagerten die Probekörpernteile frei an trockener Raumluft (35 ±10% r.F., 22±5°C).

⁶⁵ Epoxidharzkleber SikaDur 30, ca. 2 mm dicke Klebeschicht



Abbildung 5.11: Probekörper für die Serie SD1-D: a) vor und b) nach der Klebung.

Die Ergebnisse der neuerlichen Haftzugprüfung fallen für die unterschiedlichen Rauheiten und für die im Zuge der Herstellung der Serie SD1 schon unterschiedlich gelagerten Proben – OVS bzw. MVS – sehr verschieden aus (siehe Abbildung 5.12).

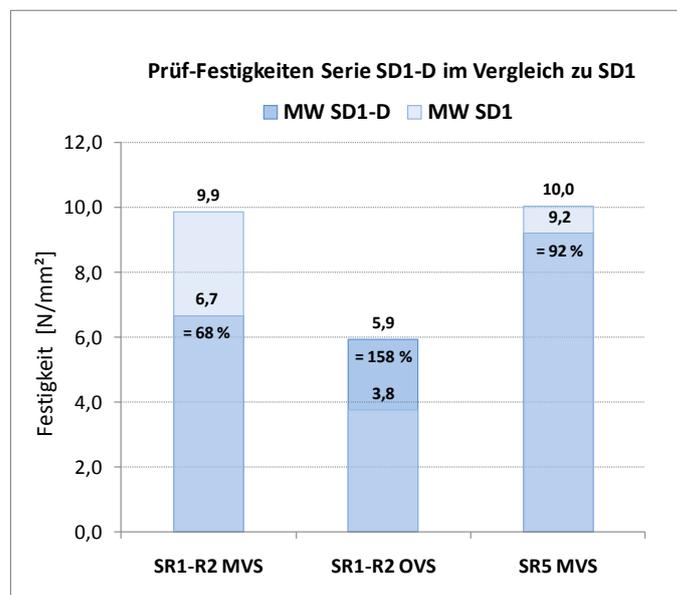


Abbildung 5.12: Mittelwerte der Prüf-Festigkeiten der Serie SD1-D im Vergleich zu den MW derselben Proben der Serie SD1

Proben MVS, die nach der Prüfung im Zuge von SD1 keine Risse in den Bruchflächen zeigten, weisen nach der einmonatigen Luftlagerung und neuerlichen Prüfung Risse in den Bruchflächen auf. Das Muster der Betonreste bzw. das Rissmuster ist in Abbildung 5.13a/b zu sehen. In den Bruchflächen mit „Ausbruchskratern“ finden sich Risse in den Vertiefungen, vgl. Abbildung 5.13c. Es fällt auf, dass an den feineren Rauheiten mehr Risse bzw.

eine stärker „zerklüftete“ Bruchfläche zu beobachten ist als an der großen Rauheit SR5. Bei SR5 tritt das Versagen außerdem zum Teil in der Klebefuge auf.

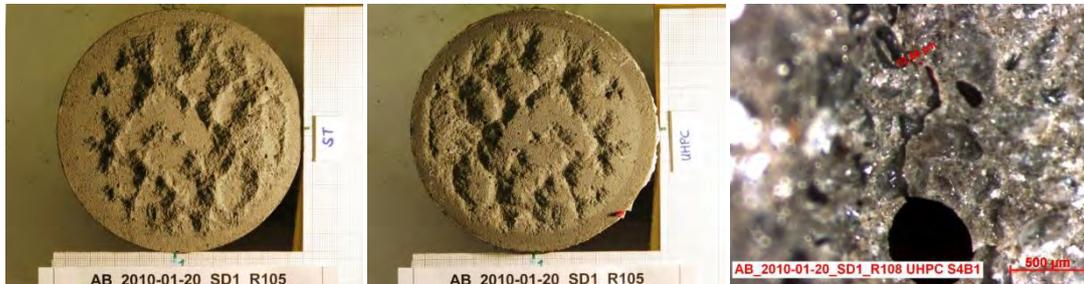


Abbildung 5.13: Bruchfugen des a) Probekörperunterteils, b) Probekörperoberteils, c) Lichtmikroskopische Aufnahme einer Vertiefung im Beton des linken Bildes mit 50 µm breitem Riss, der in einer großen Luftpore mündet, Bildbreite 2,5 mm

Fazit: Die neuerlich belastete, zweite Verbundfuge ist tragfähig. Bei den 5 Proben der Werkstoffkombination SR5DM-MVS werden 92% der Festigkeit der ersten Prüfung im Rahmen der Serie SD1 erreicht. Dabei tritt Betonbruch bzw. ein teilweiser Bruch in der Klebefuge auf. Bei den 3 Proben der Kombination SR1DM-MVS und der einen Probe SR2DM-MVS werden 68% der ursprünglichen Prüf-Festigkeiten erreicht. Hier werden deutlich Risse in den Bruchflächen sichtbar. Bei den Proben mit grober Rauheit SR5 hat also weder die Erstbelastung noch die Rissbildung während der Zeit der Zwischenlagerung für eine merkliche Reduktion der Haftung gesorgt. Bei feinerer Rauheit SR1 und SR2 reduzierte sich die Festigkeit bei Wiederbelastung bzw. nach trockener Lagerung verbunden mit einer Rissbildung.

Bei den zwei Proben der Kombination SR1DM-OVS und SR2DM-OVS sind die Haftzugfestigkeiten nach dem Kleben und der Wiederbelastung sogar deutlich höher als zuvor. Es werden etwa gleich hohe Festigkeiten wie bei den wiederbelasteten Proben MVS erreicht, die Bruchbilder ähneln jenen aus der Serie SD1. Scheinbar ist die zweite Verbundfuge der Proben OVS tragfähiger als die erste. Allerdings kann der Einfluss des Epoxidharzklebers nicht eindeutig eingeschätzt werden, da er in Risse eindringen kann und diese eventuell verklebt.

Serie HE „Haftungsentwicklung“: Stahl R0 mit UHPC Mischung EM

In der Serie HE wird die zeitliche Entwicklung der Haftung für die Werkstoffkombination SR0EM an einzelnen Stichproben geprüft. Die Ziele der Untersuchungen der Serie HE sind,

- die zeitliche Entwicklung der Haftzugfestigkeit in Relation zur zeitlichen Entwicklung der Betonfestigkeit festzustellen
- die Beständigkeit des Verbundes bei Langzeitlagerung zu prüfen

- festzustellen, ob eine zusätzliche Wärmebehandlung und damit verbundene vollständige Austrocknung des UHPC, die Haftfestigkeit verändert
- zu sehen, ob verdampfbare Wasser als Flüssigkeitsbrücke in der Grenzfläche von Stahl zu UHPC für die Adhäsion bei Normaltemperatur verantwortlich gemacht werden muss (Wirkung der „Haftspannung von Wasser“).

Es werden symmetrische zweischnittige Verbundproben aus Stahl mit polierten Kontaktflächen (R0) und UHPC der Mischung EM wie oben beschrieben hergestellt. Es werden 3 Proben MVS und 8 Proben OVS erzeugt. Im Prüfalter von x-Tagen (d) werden geprüft:

- je eine Probe MVS im Alter von 2d-7d-28d
- je eine Probe OVS im Alter von 1d(25h)-2d-7d-28d
- je zwei Proben OVS im Alter von 141d und 226d

Die 226d alten Proben werden für die letzten 14 Tage zusätzlich einer Wärmebehandlung in Form einer Trocknung im Ofen bei 105°C unterzogen, damit werden sie als „Langzeit“ gelagert angesehen, das Probenalter sei quasi unendlich.

Trotz gleicher Rezeptur wie für die Mischung EM der Serien SNS1 und GNS1 fällt der Beton in der Serie HE etwas fließfähiger aus, da ein neues Mischwerkzeug und eine leistungsfähigere Kraftübersetzung im Mischer eingesetzt wird. Zu den Frisch- und Festbetonkennwerten siehe Tabelle 4.4.

Die Ergebnisse der Serie HE sind in Abbildung 5.14a und tabellarisch im Anhang A.2.1 dargestellt. Wegen der geringen Probekörperanzahl je Prüfalter handelt es sich meist um Einzelwerte, die entsprechend vorsichtig zu interpretieren sind. In Abbildung 5.14b sind die zugehörigen Biegezug- und Druckfestigkeiten, es sind Mittelwerte von je 2 Prüfkörpern (Prismen 160/40/40 mm bzw. Prismenreststücke), dargestellt. Es wird deutlich, dass die Betonfestigkeiten mit der Zeit wie erwartet zunehmen, während die geprüften Haftzugfestigkeiten OVS in den ersten Tagen zu und nach dem 7.Tag bereits abnehmen. Bemerkenswert ist, dass die Haftzugfestigkeit bei Proben OVS bereits nach 1 Tag 70%des Maximalwertes beträgt, während die Biegezugfestigkeit nach 1 Tag nur 45% und die Druckfestigkeit nur 10% des Maximalwertes ausmacht. Die Proben MVS wurden nur bis zum Alter von 28d untersucht, sie erreichen mit diesem Tag ihren Höchstwert.

Es wird in den Bruchbildern – siehe Kapitel 5.3.3 und 5.3.5 – sichtbar, dass Risse an Proben OVS bereits im Alter von einem Tag ausgeprägt sind und dass sich der Versagentypus mit der Zeit ändert. Obwohl die Proben OVS Risse zeigen und die Proben MVS Risse frei sind, zeigt sich im jungen Alter bis zu 7 Tagen kein signifikanter Unterschied der Prüffestigkeiten. Die Annahme, dass Relativverschiebungen in der Verbundfuge im jungen Alter durch das höhere Schwinden der Proben OVS zu einer Reduktion der Adhäsion führen, wird damit widerlegt.

Besonders interessant ist das Bruch- und Rissbild der 226 Tage alten Proben, die auch Wärme behandelt wurden. Es zeigt besonders viele Risse bzw. Rissfelder mit geringem Rissabstand. Die Rissanzahl und Gesamtrisslänge hat durch die Trocknung bei 105°C ge-

genüber den „jüngeren“ Proben zugenommen, der Anteil blank abgelöster Fläche auch. Weiteres dazu siehe Kapitel 5.3.

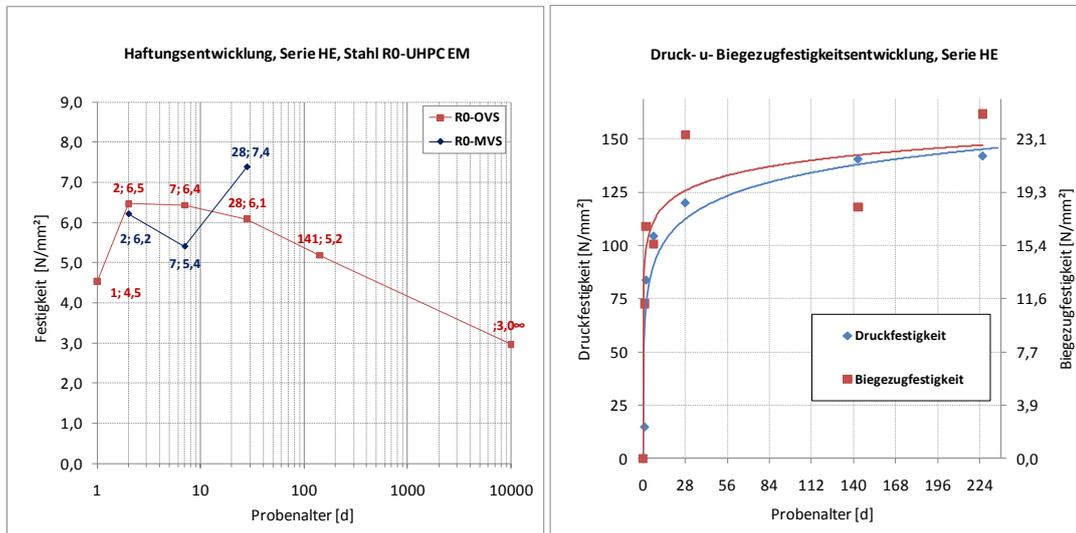


Abbildung 5.14: a) Ergebnisse der Serie HE - Haftungsentwicklung, b) Entwicklung der Biegezug- und Druckfestigkeiten desselben Betons

Mit der Untersuchung sollte auch der Frage nachgegangen werden, ob physikalisch gebundenes Wasser in der Grenzfläche von Stahl zu UHPC für die Haftung verantwortlich sein kann. Durch die Ofentrocknung bei 105°C wurde jegliches physikalisch gebundene Wasser aus dem Beton aber auch der Grenzschicht ausgetrieben⁶⁶, vgl. [Grübl 2001], p.32. Um Spannungen und Risse im Probekörper zu vermeiden, wurde wie bei der Wärmebehandlung von UHPC üblich sehr langsam aufgeheizt und abgekühlt (Temperaturgradient 5°C/Stunde). Beim UHPC kann durch die Wärmebehandlung bekanntlich eine Festigkeitssteigerung hervorgerufen werden, vgl. [Schmidt 2008] und [König 2001], p.318.

Offensichtlich ist die Haftung nicht auf physikalisch gebundenes Wasser zurückzuführen, da sie ja zu einem Teil, hier zu knapp 50%, auch nach der vollständigen Trocknung erhalten bleibt. Mit der Trocknung geht ein durch den Haftverbund behinderter Schwindvorgang einher, der zu inneren Spannungen und Rissen und damit zum teilweisen Verlust der Haftfestigkeit führt. Die Ursache für die Festigkeitsminderung ist also in dem durch den Haftverbund behinderten Trocknungs-Schwinden zu suchen. Weitere Überlegungen dazu in den folgenden Kapiteln.

⁶⁶ Beim Trocknen an Raumluft, wie es für die restlichen zum Teil langzeitgelagerten Proben OVS geschah, wird nicht alles Kapillarwasser oder Haftwasser ausgetrieben.

Serie EV, einschnittige Verbindung von UHPC EM mit Stahl R0 und R1

Die Ergebnisse und Beobachtungen der bisherigen Prüfserien werfen die Frage nach der Beständigkeit des Verbundes auf. Insbesondere das Phänomen, dass sich die UHPC-Schichten von den R0 Proben nach einigen Tagen Trockenlagerung „wie von selbst“ ablösen⁶⁷, will erklärt sein. Im Zuge der Serie EV werden Proben mit Oberflächen aus Stahl der Rauheit R0 und R1 und UHPC der Mischung EM mit folgenden Zielen eingesetzt.

- An zwei einschnittigen Verbundproben mit poliertem Stahl R0 sollen Verformungen, die durch einseitige oberflächliche Austrocknung der UHPC-Schicht ab dem 28. Tag nach der Herstellung entstehen, gemessen werden (siehe Kapitel 5.2.2). Die Proben werden nicht durch eine Haftzugprüfung vorbelastet.
- An zwei weiteren einschnittigen Verbundproben mit poliertem Stahl R0 soll die Haftzugfestigkeit als Referenz geprüft werden
- Der Einfluss der einseitigen Austrocknung der UHPC Oberfläche auf die Beständigkeit der Verbindung soll festgestellt werden. Dazu werden 6 Proben aus Stahl mit Rauheit R1 und UHPC EM einschnittig hergestellt. Drei der sechs Proben werden durchgängig mit Verdunstungsschutz der UHPC Oberflächen gelagert. Die drei weiteren Proben werden 23 Tage nach der Herstellung für 3 Tage so an trockener Raumluft gelagert, dass die vorher verdunstungsgeschützt gelagerte UHPC Oberfläche frei austrocknen kann.

In der Serie SD1-D wurde schon die „Beständigkeit“ der Verbindung bzw. der Einfluss einer austrocknenden Lagerung geprüft. Im Unterschied zur Serie EV wirkten aber Einflüsse durch die Vorbelastung und den Wechsel der Probekörpergeometrie auf die Proben. Bei der Serie EV werden im Gegensatz dazu der Einfluss der Vorbelastung und ein Wechsel des Eigenspannungszustandes vor dem Prüfen vermieden.

Die Prüfkörper für die Haftzugprüfungen werden wiederum als Sandwich hergestellt, nur dass eine Oberfläche der UHPC-Schicht bei der Herstellung ohne Verbund zum Stahlteil bleibt und erst nach etwa 28 Tagen ein Stahlteil mit Epoxidharz aufgeklebt wird. Es handelt sich also um einen einschnittigen Verbund. Der Herstellungsvorgang wird gegenüber dem oben für Proben mit zwei gleichartigen Verbundfugen beschriebenen wie folgt modifiziert, siehe dazu auch die Abbildung 5.15.

1. Nur die Stahlzylinder für einen Probekörperteil werden als Verbundfugen zum UHPC durch Polieren (R0) oder feines Sandstrahlen (R1) vorbereitet. Der zweite Stahlzylinder wird sandgestrahlt, um eine klebetaugliche Fläche zu erhalten.
2. Beim Aufbauen wird als Probekörper-Unterteil der später aufzuklebende Stahlzylinder verwendet. Auf die Kontaktfläche wird eine Trennlage aus Kunststoff gelegt, die später vom UHPC leicht wieder entfernt werden kann (Abbildung 5.15a). Bei den Proben SR0, an welchen Verformungsmessungen durchgeführt werden sollen, wird eine PTFE

⁶⁷ Siehe Kapitel 0, das dem Einfluss der austrocknenden Lagerung als mögliche Ursache für dieses Phänomen gewidmet ist.

Folie als Trennlage verwendet, sodass eine glatte Oberfläche der UHPC-Schicht entsteht. Bei den anderen Proben wird eine reliefartig strukturierte PU-Kunststoffschicht als Trennlage verwendet. Wie Voruntersuchungen gezeigt haben, haftet UHPC kaum auf der Kunststoffschicht, formt aber die reliefartige Oberflächenstruktur ab.

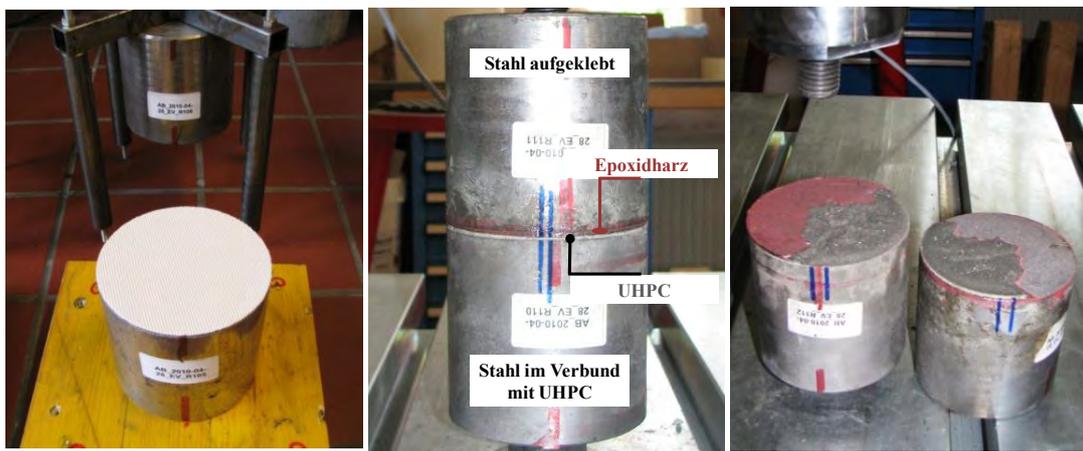


Abbildung 5.15: Probekörper der „einschnittigen“ Verbindung a) oberflächenstrukturierte Trennlage, b) Prüfkörper, c) Bruchfugen (rot=Epoxidharz-Kleber)

3. Als Probekörper-Oberteil werden die Stahlzylinder mit definierter Rauheit R0 oder R1 mit Hilfe der Distanzkreuze in einem Abstand von 2,5 mm parallel und zentrisch über dem unteren Prüfkörperteil eingerichtet.
4. Der frische UHPC wird wieder mit Hilfe eines „Spritzsackes“ auf die vorbereiteten Untergründe aufgegossen. Unmittelbar anschließend wird das Oberteil aufgesetzt. Er kann mit Hilfe der Distanzierung in dem Abstand zentrisch positioniert werden.
5. Nach dem Ansteifen des UHPC – etwa 4 Stunden nach Wasserzugabe – wird die Distanzierung freigegeben und das Oberteil sitzt mit seinem Eigengewicht (rund 6 kg) auf dem UHPC während der weiteren Erhärtung auf. So ist gewährleistet, dass der Einfluss des Eigengewichtes bei allen Serien konstant bleibt, auch wenn nur eine der Fugen einen Verbund von UHPC mit Stahl hat.
6. Alle Proben (4 Verbundproben mit Rauheit R0 und 6 Verbundproben mit Rauheit R1) werden mit Verdunstungsschutz wie schon beschrieben versehen und gelagert.
7. Die Trennlage zwischen dem Probekörper-Unterteil und der UHPC-Schicht wird nach 23 Tagen entfernt. Die Oberfläche der so freigelegten UHPC-Schicht auf dem Stahlstempel weist nun eine reliefartige Struktur auf. Sie wird nun außerdem sanft sandgestrahlt⁶⁸. Der Zweck dieser Vorbehandlung ist es, die UHPC Oberfläche zu vergrößern

⁶⁸ Das Sandstrahlen der UHPC-Oberfläche der einschnittigen Verbundprobekörper wird mit feiner Korundkörnung von einem Steinmetz (Fa. Kleber, Feitritz/Drau) so sanft wie möglich durchgeführt. Die Proben werden für möglichst kurze Zeit an trockener Luft gestrahlt, sonst in Folie eingewickelt

bzw. aufzurauen, um Stahlstempel als Adapter zur Haftzugprüfung mit Epoxidharzkleber aufkleben zu können.

8. Auf drei der sechs Proben SR1 und zwei Proben SR0 wird nach dem Sandstrahlen sofort ein Stahlstempel mit Epoxidharzkleber aufgeklebt. Somit bleibt die UHPC-Schicht vor Trocknung geschützt. Die drei weiteren SR1 Proben werden für 3 Tage so an trockener Raumluft ($35\pm 10\%$ r.F., $22\pm 5^\circ\text{C}$) gelagert, dass die bisher verdunstungsgeschützt gelagerte UHPC Oberfläche frei austrocknen kann. Anschließend werden auch sie mit einem aufgeklebten Stahlstempel versehen.

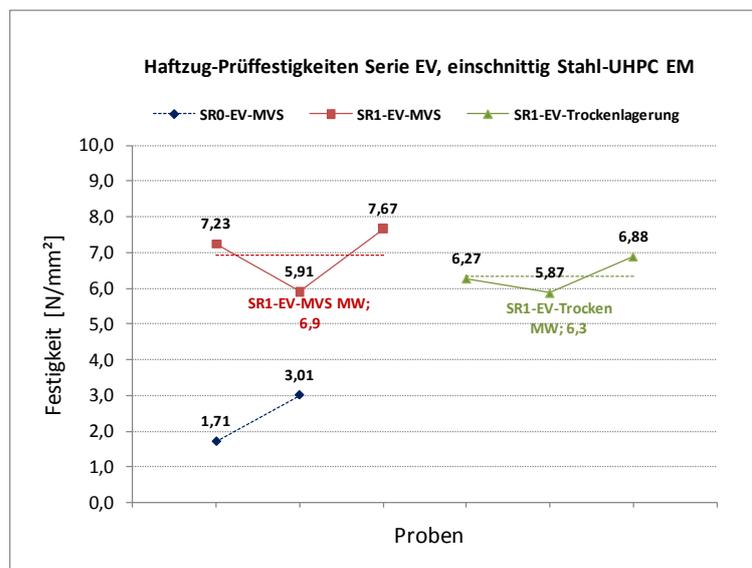


Abbildung 5.16: Haftzugfestigkeiten der Serie EV mit der Angabe der Mittelwerte bei den verschiedenen Lagerungsbedingungen

Die Ergebnisse der Serie EV sind in Abbildung 5.16 und im Anhang A.2.1 tabellarisch dargestellt. Leider kam es bei allen Proben zu einem teilweisen Bruch in der Klebefuge, was auf eine – wie sich später herausstellte – schlechte Klebung zurückzuführen war. Damit sind die Ergebnisse mit den Werten aus der Serie SNS1 für dieselben Werkstoffkombinationen SR0EM und SR1EM nicht gut vergleichbar.

Für SR1EM der Serie EV lassen sich durch den Vergleich der Proben, die durchgehend mit einem Verdunstungsschutz gelagert waren und jenen, die drei Tage an Raumluft einseitig austrocknen konnten, Schlüsse ziehen. Alle Proben zeigen einen etwa gleich großen Anteil an Klebefugenversagen. Die Haftzugfestigkeiten unterscheiden sich mit und ohne Trocknung nicht. Auffällig ist allerdings, dass nur Proben, die einseitig austrocknen konnten, Risse in den Bruchflächen aufweisen. Es entsteht ein Muster von Betonresten, das mit

transportiert. Es wird darauf geachtet, dass die Verbundfuge nicht mechanisch beansprucht wird. Das Strahlen nimmt insgesamt nur 1 Stunde in Anspruch.

dem Rissbild korrespondiert (siehe Abbildung 5.17). In den Bruchflächen mit „Ausbruchs-kratern“ finden sich wie bei den Proben der Serie SD1-D mikroskopisch feine Risse in den Vertiefungen. Die (Schub-)Verbundfestigkeit in der Fuge war offensichtlich so gut, dass durch die Rissbildung kein Schlupf auftrat, der die Haftung verminderte - siehe dazu auch die Schlussfolgerungen am Ende der Arbeit.

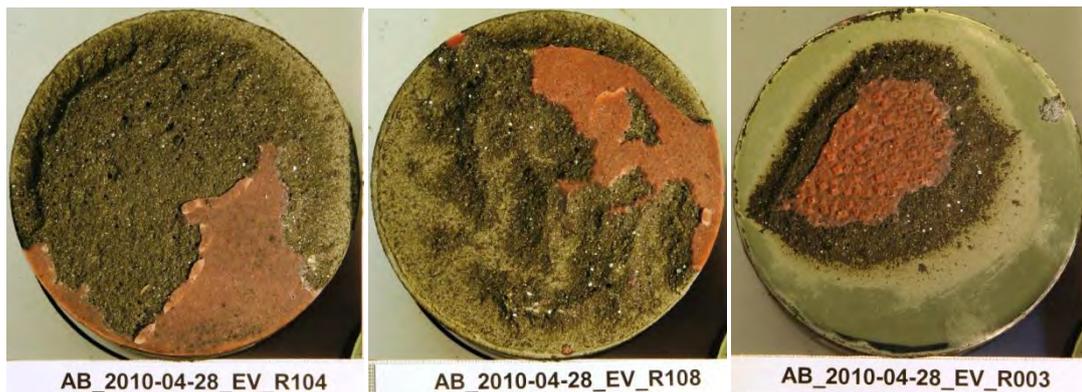


Abbildung 5.17: Bruchflächen Serie EV a) Durchgehend MVS gelagert, b) 3 Tage austrocknend gelagert, c) Kleberversagen vor dem Versagen des Verbundes SR0EM 3

Die Ergebnisse der Haftzugprüfungen der Proben SR0EM der Serie EM sind leider wegen des Kleberversagens, vgl. Abbildung 5.17c, nicht aussagekräftig. Die Prüfwerte sind deutlich geringer als jene derselben Werkstoffkombination der Serie SNS1. Allerdings zeigt sich, dass UHPC auch an den einschnittig hergestellten Verbundproben an glatten Stahloberflächen ausgezeichnet haftet, wenn er durchgehend verdunstungsgeschützt ist.

Ergebnisse der Vorserien und deren Diskussion

Die Ergebnisse der wichtigsten Vorserien sind im Detail in der Diplomarbeit [Staudacher 2009] dargestellt, ein Beispiel eines Glas-Ausbruches ist in Abbildung 5.18 zu sehen. Hier seien nur einige wesentliche Aussagen herausgegriffen.

Erstens zeigen die Vorserien sowohl bei der Kombination mit Stahl als auch mit Glas, dass – entgegen der ursprünglichen Annahme – die unterschiedlichen Konsistenzen K1 und K2 von UHPC der Mischung EM keinen Einfluss auf die Haftzugfestigkeit haben. Für die verwendeten UHPC-Mischungen trifft also die Aussage von Müller im Kontext des Beton-Beton-Verbundes, die Haftfestigkeit hänge von der der Fließmittelzugabe ab, nicht zu, vgl. [Müller 2008] und Kapitel 2.6.3. Müller bezieht sich allerdings auf sehr große Unterschiede der Konsistenz zwischen Normalbeton und SCC.



Abbildung 5.18: Kegelstumpf-förmiger Glasausbruch einer Probe aus Stahl_R1-UHPC-Glas_R5, [Staudacher 2009] vgl. Ausbruchskegel eines Dübel-Auszugversuchs

Zweitens zeigen die Vorserien den großen Einfluss des Prüfaufbaues und besonders der Prüfkörpergeometrie auf die bei den Haftzugfestigkeitsprüfungen erzielten Werte. Entscheidend ist die Dicke der Prüfstempel, durch die die Last in die Verbundfuge eingeleitet wird. Die Annahme einer gleichmäßigen, konstanten Spannung in der Verbundfuge, die die Berechnung der Haftzugfestigkeit mit $\sigma = F/A$ erlaubt, ist erst ab einem Durchmesser- zu Dicken-Verhältnis der Stahlzylinder von 1:1 richtig. Durch geringere Dicken und damit verbunden biegeeweiche Adapterplatten wird eine sehr ungleichmäßige Spannungsverteilung in der Fuge hervorgerufen.

In der Vorserie STVGL wurde der Maßstabsfaktor, der zwischen Haftzugfestigkeiten SR1EM bei 100 mm Zylinderhöhe und Festigkeiten SR1EM bei 20 mm Zylinderhöhe herrscht, mit rund 6:1 bestimmt, vgl. Abbildung 5.19. Er stimmt also mit dem in der Serie SNS1 ermittelten für glatte Proben SR0EM überein.

In den Vorserien wurden bereits erste „Tastversuche“ zur **Haftungsentwicklung** mit der Zeit durchgeführt. Unter anderem wurden zwei Sandwich-Verbundproben aus glattem Stahl in Form quadratischer Platten 100*100*20 mm und einer 2,5 mm dicken UHPC-Schicht mit der Mischung DM4 hergestellt und OVS gelagert. Die Mischung DM4 enthielt abweichend zur Mischung DM der Hauptversuchsserien einen Verzögerer (0,5 M.% bezogen auf das Bindemittel). Die Oberflächen der Stahlplatten wurden plangefräst, nicht poliert und lagerten zuvor in Raumluft. Die Haftzugprüfungen wurden einmal im Alter von 7 Stunden und zweitens mit 22 Stunden durchgeführt.

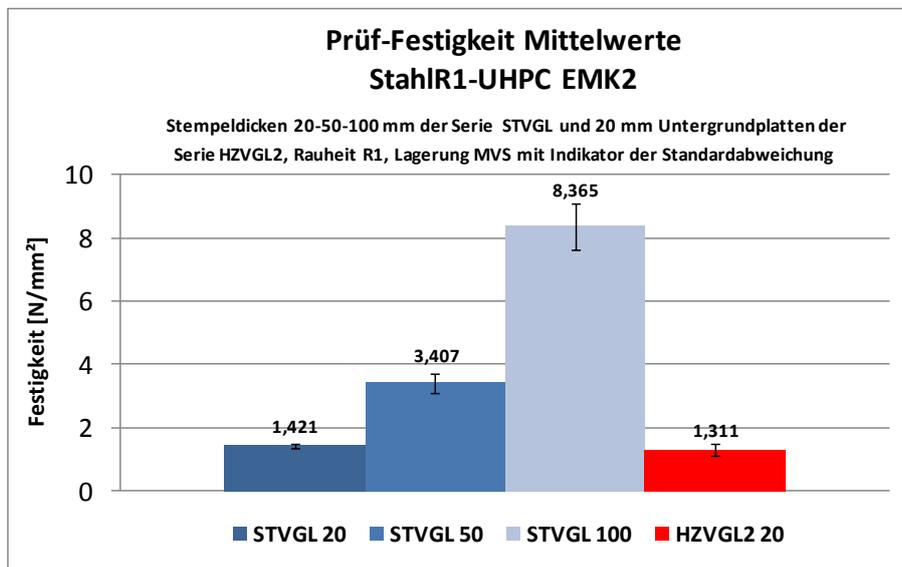


Abbildung 5.19: Vorserien zur Ermittlung des Einflusses der Prüfstempeldicke

Es zeigte sich bereits nach 7 Stunden eine nennenswerte Haftzugfestigkeit, die bis nach 22 Stunden weiter anwächst. Besonders interessant sind die Beobachtungen an den Bruchflächen (siehe Abbildung 5.20).



Abbildung 5.20: Bruchflächen der Haftzugprüfung an glatten (nicht polierten) Stahlflächen in Kombination mit UHPC DM4: a) im Alter von 7 h, b) im Alter von 22 h

Das Versagen in der Fuge ist zu den Prüfaltern unterschiedlich. Im Alter von 7 Stunden bricht der UHPC so, dass eine dicke Schicht von sehr feinteilreichem Material an der Stahloberfläche anhaftet, ein „Kohäsionsbruch in der Grenzflächenschicht“. Bei der älteren Probe löst sich die UHPC-Schicht dagegen von der Kontaktfläche so ab, dass sich weniger anhaftender Bindemittelstein und stellenweise blanker Stahl bzw. ein glatte UHPC-

Oberfläche zeigen, ein Bruch näher an der Fuge also. Das in der Bruchfläche nach 7 Stunden am Stahl anhaftende Material ist noch weich, „schmierig“ und lässt sich mit dem Finger heraus wischen. Außen ringförmig ist der UHPC härter als im Kern und bricht nicht in der Fuge, sondern weiter innen im Beton. Offensichtlich erhärtet der äußere, oberflächennahe austrocknende UHPC schon, während das Innere und besonders eine Grenzflächenschicht noch weich bleiben. Die UHPC-Schicht weist außerdem bereits nach 7 Stunden erkennbare Risse auf. Nach 20 Stunden ist keine weiche Schicht an der Grenzfläche mehr feststellbar. Die ganze UHPC-Schicht ist hart und weist deutliche, starke Risse auf. Die Grenzflächenschicht erhärtet also später als das UHPC-Innere. Der frische Beton haftet stark am Stahl an. Erst nach der Erhärtung der Grenzflächenschicht wird die Kohäsion in der ganzen UHPC-Schicht größer als die Adhäsion, entsprechend ändert sich die Bruchform.

5.2 Phänomen der Ablösung nach austrocknender Lagerung

Es ist bemerkenswert, dass zum Lösen des Haftverbundes von UHPC-Schichten mit glatt polierten Stahloberflächen Prüfkkräfte von rund 50 kN (5 t) erforderlich sind bzw. Haftzugfestigkeiten von rund 7 N/mm² erzielt werden. Erstaunlicherweise war zu beobachten, dass sich dieselben UHPC-Schichten nach 1 bis 4 Tagen an trockener Raumluft von Hand („wie von selbst“) vom Stahl ablösen lassen (siehe Abbildung 5.21). Wodurch geht also die ursprünglich gute Haftung an glatten Flächen verloren bzw. worauf gründet sie sich? Wie verhält es sich an rauen Flächen?



Abbildung 5.21: a) Probekörperunterteil aus Serie SNS1 nach Haftzugprüfung. $\zeta_{\text{HZ}} = 4,6 \text{ N/mm}^2$, b) Ablösen der UHPC-Schicht 1 Tag nach HZ-Prüfung, $\zeta_{\text{HZ}} \approx 0 \text{ N/mm}^2$.

Folgende mögliche Ursachen werden hypothetisch angenommen:

- a) **Feuchte in der Betonschicht**, die bei trockener Lagerung entweicht. Es wird davon ausgegangen, dass durch das Abziehen eines Prüfkörperteils die frei gewordene Oberfläche austrocknet. Das einseitige Austrocknen führt zum Schwinden, welches aller-

dings in der Kontaktfläche von UHPC zum Untergrund durch Haftung behindert ist. Die Schwindverformungen folgen einem Gradienten von der Oberfläche ins Innere. Spannungen entstehen und führen zu einer Ablösung des UHPC vom Haftgrund.

- b) Feuchte in der Grenzfläche des Adhäsivs UHPC zum Adhärens, die durch „**Wasser als Flüssigkeitsbrücke**“ – siehe Kapitel 2.1 – für den Verbund sorgt. Sie könnte entweder seitlich oder durch die kapillarporöse Betonschicht hindurch entweichen. Damit ginge die Haftung mit der Zeit auch abhängig von den Umgebungsbedingungen und der Dicke der Schicht verloren
- c) **Feuchte, die** aus der Raumluft in einen Spalt zwischen der UHPC-Schicht und den Untergrund **eindringt** und für ein Ablösen sorgen könnte („kapillarer Spaltdruck“).
- d) Eine **Vorschädigung**: Die gleichzeitige Belastung beider Verbundfugen im zweiseitigen „Sandwich“-Probekörper führt nicht nur in einer Fuge zum Versagen, sondern auch in der zweiten Fuge zu einer Schädigung. Deshalb kann der Verbund in der zweiten Fuge später mit geringer Kraft gelöst werden.

Es werden nun einige Beobachtungen und weiterführende Untersuchungen zur Klärung der Fragen beschrieben.

5.2.1 Beobachtungen und begleitende Versuche zur Ablösung bei den verschiedenen Werkstoffkombinationen

Die Probekörperteile, an denen die UHPC-Schichten unmittelbar nach der Haftzugprüfung oder auch nach einer Torsionsschubprüfung noch fest anhaften, wurden in der Regel an trockener Raumluft, d.h. bei 22 °C und 20-30% rel. Luftfeuchte, „stehen gelassen“, so dass die UHPC-Schichten einseitig über die abgelösten Flächen austrocknen konnten. Nach 1-4 Tagen ließen sich dann alle Proben mit glatten Werkstoffoberflächen in der Verbundfuge, außer den zusätzlich im Ofen getrockneten Proben, von Hand leicht ablösen. An den rauen Proben gelang das Ablösen nicht. Es wurden nun einige systematische Begleitversuche gemacht, um festzustellen, welche der oben genannten Ursachen für das Phänomen verantwortlich ist. Einige Proben wurden unmittelbar nach der Prüfung bei 100% Feuchte eingelagert, andere dagegen unter Luftabschluss im völlig trockenen Exsikkator. Die Beobachtungen sind in Tabelle 5.4 dokumentiert.

Tabelle 5.4: Beobachtungen zur nachträglichen Ablösung der UHPC-Schichten

Werkstoff-Rauheit	VS	Serie	Prüfalter	Ablösung von Hand möglich ...				
				gleich nach der Prüfung	nach X-Tagen (*) trocken gelagert X=...	nach 1 Tag (**) feucht gelagert	nach weiterem Tag (*) trocken gelagert	nach 1 Tag im Exsikkator (***) trocken gelagert
	mit/ ohne		[d]		[d]	[d]	[d]	
SR0EM	MVS	SNS1	28	nein	4 (****)	nein (****)	ja	-
	OVS			nein	1	nein	ja	-
	MVS/OVS	HE	1-141	nein	1-3	-	-	-
	OVS		226W	nein	nein (#)	-	-	-
GR0EM	MVS	GNS1	28	teilweise	1	-	-	-
	OVS			ja	-	-	-	-
SR0DM	MVS	SD1	28	ja	-	-	-	-
	OVS			teilweise	1	-	-	-
SR0EM	MVS/OVS	Vorserien	28	nein	1	-	-	ja
GR0EM	MVS/OVS	Vorserien	28	ja	-	-	-	-
raue Proben	MVS/OVS	alle Serien	28	nein	nein	-	-	-
VS	Verdunstungsschutz							
W	15 Tage wärmebehandelt, davon 11 Tage bei 105 °C getrocknet, wird als "unendlich" lange gelagert angesehen							
(*)	Proben mit Bruchflächen so gelagert, dass sie über die ganze Oberfläche an Raumluft (22 °C und 20-30% rel. Luftfeuchte) austrocknen können.							
(**)	Proben werden 24h bei 100% Luftfeuchte durch Einwickeln in nasse Tücher gelagert.							
(***)	Zwei Proben werden im Exsikkator unmittelbar nach der Prüfung ganz trocken unter Luftabschluss eingelagert. Sofort nach dem Entnehmen lassen sich die UHPC-Schichten ablösen.							
(****)	Zwischen UHPC-Schicht und Stahl_R0 wird spätestens nach 1 Tag ein Spalt bemerkbar. Schneidet man mit scharfem Messer ein, lässt sich die Probe bruchstückhaft abnehmen. Bei den feucht gelagerten Proben lässt sich Wasser "herauspressen".							
(#)	Ablösen auch nach mehreren Monaten, in denen die Probe an trockener Raumluft gelagert wird, von Hand (starkes Ziehen und Verdrehen) nicht möglich.							

In einer weiteren Serie (TORG) wurden Proben nach der Prüfung im Alter von 29 und 30 Tagen zuerst für einen Tag trocken und dann einige Tage bei 100% Feuchte gelagert, um zu sehen, ob der Verlust der Haftung durch Feuchtezufuhr wieder gut zu machen ist (siehe Tabelle 5.5). Das Protokoll der Untersuchungen, die von Kollegen G. Santner an der TU Graz durchgeführt wurden, ist dem Anhang A.2.4 zu entnehmen. Systematische Messungen zum Abheben bzw. Aufschüsseln wurden angeschlossen und sind in Kapitel 5.2.2 beschrieben.

Tabelle 5.5: Begleituntersuchungen zur Ablösung der UHPC-Schichten

Werkstoff _Rauheit	VS	Serie	An- zahl	Lagerung	Ergebnis
SR0EM	MVS	TORG	2	Wechselagerung trocken- feucht (*)	kein Ablösen von Hand möglich, trotzdem nur minimale Resttragfähigkeit
			2	trocken gelagert (**)	Ablösen von Hand nach > 24 h möglich
GR0EM	MVS	TORG	1	trocken (**)+ Messung (#)	Aufschüsselung erfolgt mit der Zeit (Wurzel)
			1	Wechselagerung (*)	Ablösen mit Hilfsmittel von Hand möglich
			1	Wassergehalt (***)	4 M.-% Feuchtegehalt
SR0EM (##)	MVS	EV	2	trocken (**)+ Messung (#)	Aufschüsselung erfolgt mit der Zeit (Wurzel)
VS	mit/ohne Verdunstungsschutz				
(*)	nach Prüfung ~24h trocken, dann ~120 h bei 100% Feuchte (Einwickeln in nasse Tücher und Folie)				
(**)	nach Prüfung trocken an Raumluft (25 °C, 40% r.F.) gelagert				
(***)	Bestimmung des Wassergehaltes mittels Darr-Wäge-Trocknung (im Ofen bei 105 °C bis Massekonstanz)				
(#)	siehe Aufschüsselungs-Messungen, Kapitel 5.2.2				
(##)	als einschnittige Verbundproben hergestellt, siehe Serie EV				

Ergebnisse

Es zeigt sich klar, dass die Haftung bei Feuchtlagerung erhalten bleibt und bei Trockenlagerung an Raumluft oder im Exsikkator verloren geht. Die Annahme (Hypothese c)), dass eindringende Feuchte aus der Raumluft für ein Ablösen sorgen könnte kann verworfen werden. Einschnittig hergestellte Proben der Serie EV lösen sich auch unvorbelastet nach ein paar Tagen Trockenlagerung an Raumluft ab, eine Vorschädigung (Hypothese d) ist also auch nicht Ursache für die Ablösung.

Tatsächlich müssen also die Trocknung bzw. ihre Folgen (Schwinden) für die Ablösung verantwortlich sein. Die UHPC-Schichten haben nach der Prüfung im Alter von 28 Tagen nachweislich eine gewisse Porenfeuchte (bis 4M.-% Feuchte, siehe 4.1.5 Wassergehalt und Wasseraufnahme des UHPC⁶⁹) gespeichert. Bemerkenswert ist, wie sich jene Verbundprobe verhält, die im Rahmen der Serie HE im Alter von 212 Tagen für 14 Tage im Ofen bei 105 °C ausgetrocknet wurde. Beim Trocknen konnte jegliches möglicherweise in der Grenzfläche physikalisch haftende Wasser bzw. jegliche eingeschlossene Feuchte in den UHPC-Poren nur über die 2,5 mm hohe Mantelfläche der UHPC-Schichten entweichen. Die Probe zeigt nach der Haftzugprüfung das am stärksten ausgeprägte Rissmuster (siehe auch Serie HE, Kapitel Bruchflächenanalyse 0). Die UHPC-Schicht haftet einseitig noch an. Diese Haftung bleibt trotz des weiteren Lagerns an Raumluft dauerhaft erhalten. Das kann damit erklärt werden, dass die Probe völlig ausgetrocknet war und an Luft keine Feuchteabgabe mehr (Schwinden) stattfindet. Je nach umgebender relativer Luftfeuchte

⁶⁹ Wassergehaltsbestimmung :Ablösen der einseitig noch haftenden UHPC Scheibe der Probe AB_2010-05013_TORG_GR0 5-6 (MVS) unmittelbar nach dem Haftschubversuch mittels Stanley-Messer. Probe wird sofort luftdicht verpackt und transportiert. Anschließend wird der Feuchtegehalt durch Darr-Methode bestimmt: Wägung vor und nach Ofentrocknung bei 105°C bis zur Massekonstanz

wird wieder Feuchte bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte aufgenommen. Das zeigt auch, dass die physikalische Wirkung des Wassers in der Grenzschicht nicht die entscheidende Ursache für die Haftung sein kann, da es bei den gegebenen Bedingungen bereits vollständig entwichen sein muss. Die Hypothese b) kann also im Wesentlichen ausgeschlossen werden. Die vollständige Trocknung alleine führt nicht zum totalen Verlust der Haftung.

Es wurde außerdem überprüft, welchen Einfluss es hat, wenn Proben nach der Festigkeitsprüfung zwar für einen Tag trocken, dann aber wieder einige Tage bei 100% Luftfeuchte gelagert werden. Diese Untersuchungen wurden an zwei Probekörpern aus UHPC-Stahl (SR0EM-MVS) und einer Probe aus Glas-UHPC (GR0EM-MVS) nach einer Torsionsschubprüfung durchgeführt. Die Haftung ging vorerst nicht verloren, die Proben ließen sich auch nach 5 Tagen nicht von Hand ablösen. Die UHPC-Schicht konnte von der Glas-Probe mit Hilfe eines scharfen Messers, das zwischen Schicht und Glas eingeschoben wurde, abgehoben werden. Auf die UHPC-Glas-Proben wurden Stahl-Adapterstempel aufgeklebt und die Proben sollten neuerlich auf Torsionsschub geprüft werden. Beim Versuch sie in die Prüfmaschine einzubauen, gingen die Proben aber zu Bruch. An den Bruchflächen sind deutlich Spuren von eingedrungenem Wasser der Feuchtlagerung zu sehen, obwohl die Proben zum Zeitpunkt der Prüfung oberflächlich trocken waren (siehe Abbildung 5.22). Wasser muss also kapillar in einen vorhandenen Spalt eingedrungen sein, hat aber nicht wieder für die gleiche Haftung gesorgt. Die „Haftspannung des Wassers“ in der Kontaktfläche war gerade ausreichend, um die Proben nicht von Hand abnehmen zu können. Wasser als kapillare Flüssigkeitsbrücke kann nicht für die gute Haftung von UHPC auf Stahl und Glas verantwortlich gemacht werden.



Abbildung 5.22: Bruchfläche einer wiederbefeuchteten Probe

Die Ursache gemäß Hypothese a) – einseitig austrocknende Feuchte in der Betonschicht verbunden mit behindertem Schwinden – muss also für den Verlust der Haftung verantwortlich gemacht werden. Um das zu verifizieren, wurden die im Folgenden beschriebenen Messungen durchgeführt.

5.2.2 Verformungsmessungen an austrocknenden UHPC-Schichten

Proben und Messaufbau

Das Schwinden durch einseitiges oberflächliches Austrocknen der UHPC-Schicht müsste verbunden mit den durch die Haftung in der Kontaktfläche behinderten Verformungen ein Aufschüsseln der Schicht verursachen. Dieselbe Erscheinung ist vom Ablösen zementgebundener Beschichtungen vom Betonuntergrund bekannt und in Abbildung 5.23 dargestellt.

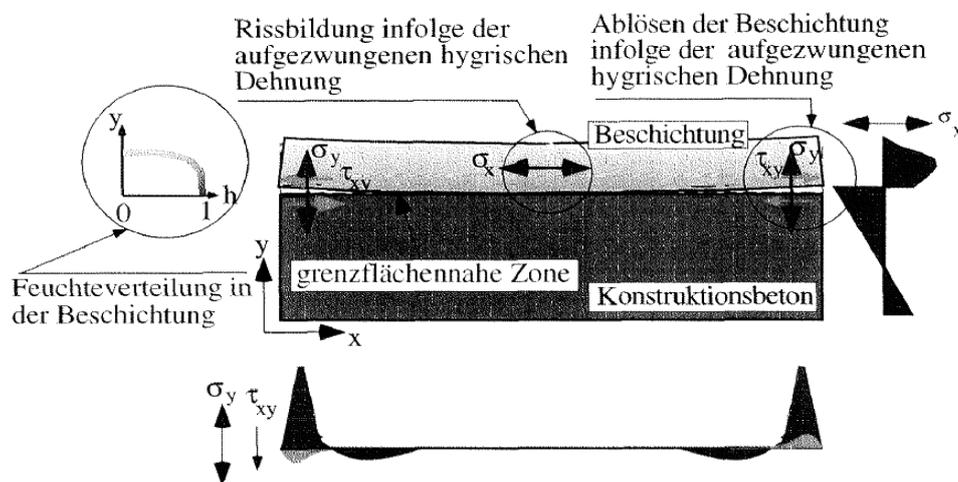


Abbildung 5.23: Ablösen zementgebundener Beschichtungen durch Austrocknen (= Aufschüsseln), zitiert nach [Haardt 1991] aus [Trausch 2000]

Um das experimentell zu bestätigen, wurden Messungen an zwei Probekörpern der Werkstoffkombination SR0EM-MVS der Serie EV durchgeführt. Das Protokoll der Messungen ist dem Anhang A.2.4 zu entnehmen. Die Oberfläche der UHPC-Schicht wurde nach 29 Tagen verdunstungsgeschützter Lagerung freigelegt und konnte an Raumluft (45% r.F., 24 °C) austrocknen. Dabei wurden die vertikalen nach oben gehenden Verformungen der UHPC-Schicht relativ zum Stahluntergrund je Probe an 3 Punkten am Umfang (Aufnehmer Nr. 1, 2, 3 bzw. 5, 6, 7) und mit einem im Kreismittelpunkt angebrachten Wegaufnehmer (Nr. 9 bzw. 10) über drei Tage gemessen (siehe Abbildung 5.24). Die drei Weg- bzw. Dehnungsaufnehmer (DD1, Messbasis 25 mm) wurden alle 120° so angeordnet, dass eine Spitze in der Betonschicht und die andere am Stahlkörper fixiert war. Zusätzlich wurde je Probekörper ein weiterer DD1 komplett am Stahlkörper fixiert um etwaige Temperaturdehnungen zu erfassen (Aufnehmer 4 und 8), und ein induktiver Wegaufnehmer W5TK von oben, mittig auf die Betonschicht aufgesetzt. Temperaturdehnungen lagen unterhalb des messbaren Bereichs. Alle Messungen unter 0,001 mm sind zu vernachlässigen, da die Messgenauigkeit der Aufnehmer unterschritten wurde.

Um die abhebenden Verformungen auch an der Werkstoffkombination UHPC-Glas bzw. an einem zweiseitig hergestellten und geprüften Probekörper zu beobachten, wurde ein Probekörperteil der Serie TORG mit einer noch zu 2/3 anhaftenden UHPC-Schicht mit demselben Messaufbau vermessen (siehe Abbildung 5.24b).

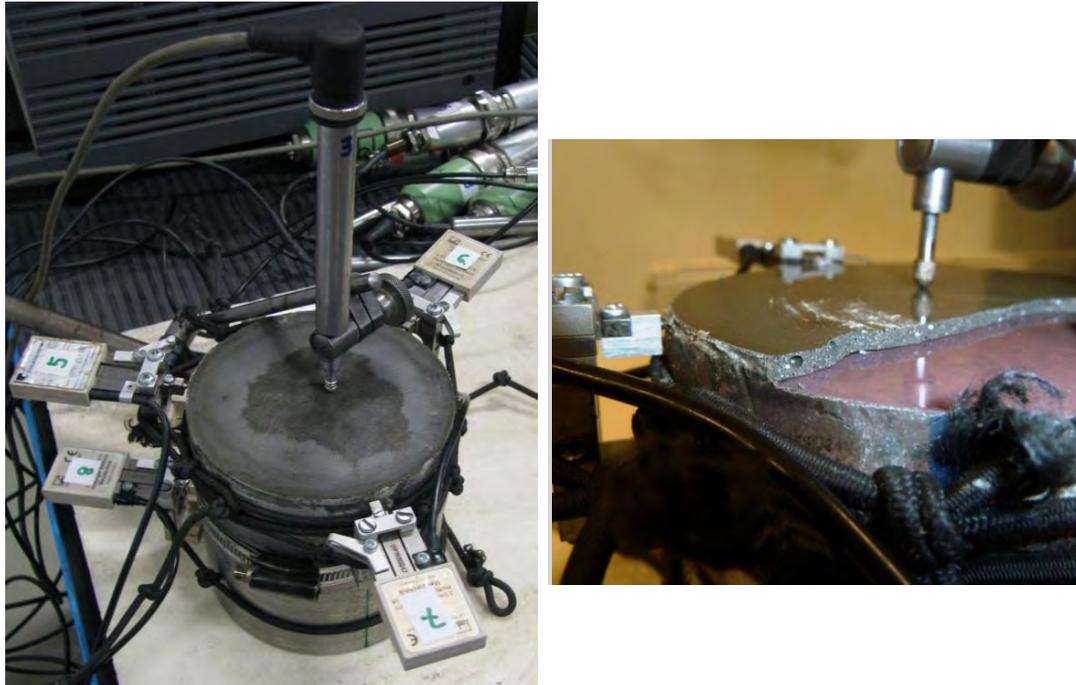


Abbildung 5.24: Messaufbau „Aufschüsseln“: a) SR0EM-EV, b) GR0EM-TORG

Ergebnisse

Es zeigt sich tatsächlich, dass sich die UHPC-Schichten mit der Zeit vertikal nach oben verformen (siehe Abbildung 5.25). Die ursprünglich fest an den Oberflächen anhaftenden UHPC-Schichten lassen sich nach der austrocknenden Lagerung erwartungsgemäß mit geringem Kraftaufwand ablösen. Trägt man die Verformungen über den Querschnitt auf, so wird sichtbar, dass zumindest eine Seite am Rand überproportional stärker nach oben geht als die Mitte in Bezug auf die gegenüberliegende Seite des Randes, die Schichten „schüsseln“ also auf (siehe Abbildung 5.26).

Je nach Probe und Bedingungen – bei den Proben EV herrschten andere Trocknungsbedingungen (45% r.F., 24 °C) als bei der Probe TORG (35% r.F., 26 °C) – traten die Verformungs-Maxima nach 3 bis 9 Stunden auf. Die Unterschiede erklären sich auch daraus, dass die Proben EV herstellungsbedingt einen etwas anderen eingepprägten Eigenspannungszustand als die Probe TORG haben müssen. Die Verformungen nehmen annähernd gemäß einer Wurzel-Funktion mit der Zeit zu. Dieser zeitliche Verlauf ist charakteristisch für einen Austrocknungsvorgang (generell für kapillare Wasseraufnahme und -abgabe). Ein

weiterer Hinweis darauf, dass das Trocknungsschwinden unmittelbar mit der Ablösung einhergeht.

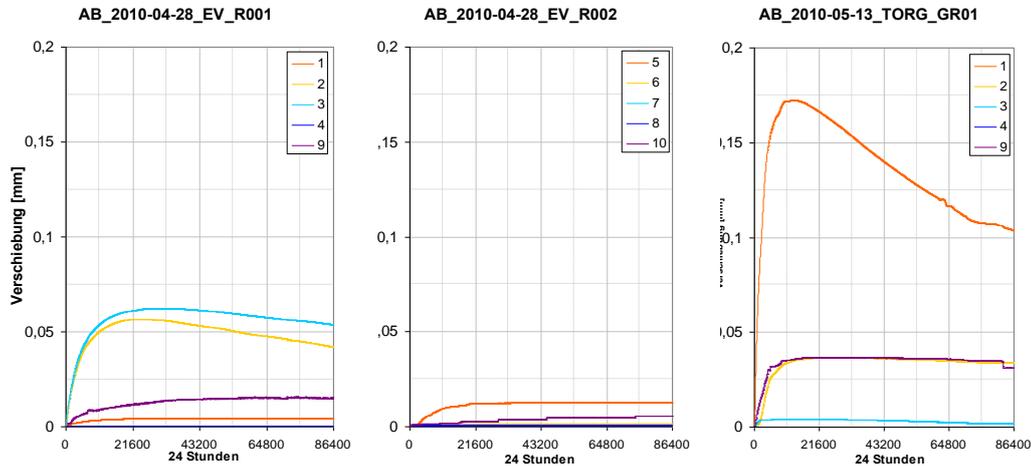


Abbildung 5.25: vertikale Verformungen der Wegaufnehmer bei den Aufschüsselungs-Messungen: Probe a) SR0EM-1, b) SR0EM-2, c) GR0EM

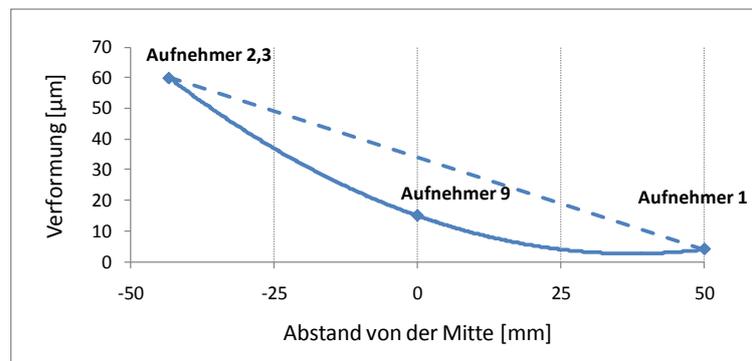


Abbildung 5.26: vertikale Verformungen der Probe EV_R001 = „Aufschüsseln“

5.2.3 Schlussfolgerungen zum Phänomen der Ablösung nach einseitiger, oberflächlicher Austrocknung

Die nach der Haftzugprüfung einseitig noch anhaftenden UHPC-Schichten schwinden durch oberflächliche Austrocknung an Raumluft. Da ihre Verformung durch den (intakten) Verbund behindert ist, treten ausgehend vom Rand Zwangsspannungen in der Fuge auf, die zum Verbundverlust führen. Die Mitte bleibt spannungsfrei. Die Ränder heben sich ab. Es kommt zum „Aufschüsseln“. Der zeitliche Verlauf der Verformungen ist charakteristisch für einen Austrocknungsvorgang (Wurzel-Zeit-Gesetz).

Weder die Vorbelastung der Verbundfuge bei zweiseitigen Probekörpern, noch Feuchte aus der Raumluft sind die Ursache für den Verlust der Haftung nach ein paar Tagen trockener Lagerung. Aus den Untersuchungen folgt auch, dass Wasser als kapillare Flüssigkeitsbrücke nicht die Ursache für die gute Haftung von glatten UHPC-Stahl- bzw. UHPC-Glas-Kontaktflächen sein kann.

Das Austreiben des physikalisch gebundenen Wassers durch Trocknung der Verbundproben bei 105 °C führte nicht zum völligen Haftverlust. Erst die Kombination aus einseitiger oberflächlicher Trocknung der UHPC-Schicht verbunden mit dem durch Haftung behinderten Schwinden erzeugt Spannungen in der Verbundfuge, die die UHPC-Schicht ablösen.

5.3 Bruchbild- und Rissbildanalyse der Haftzugversuche

Die Bruchflächen werden hinsichtlich auftretender Muster und Risse untersucht. Es soll verstanden werden, wie sich das behinderte Schwinden während des Erhärtungsvorganges auf die Adhäsion bzw. auf die Grenzflächenzone auswirkt.

Die Bruchflächen von mit Verdunstungsschutz gelagerten Proben (MVS) unterscheiden sich deutlich von jenen, die ohne Verdunstungsschutz (OVS) gelagert wurden. Im Fall OVS treten im Inneren der Betonscheiben ausgeprägte Risse auf. Dies ist ursächlich auf das stärkere Schwinden des Betons bei Austrocknung ohne Verdunstungsschutz zurückzuführen.

Die folgenden Beschreibungen beziehen sich in erster Linie auf die ursprünglich bei der Haftzugprüfung entstandene Bruchfläche. Sie wird in der Regel auch abgebildet, außer wenn ausdrücklich darauf hingewiesen wird, dass es sich um eine nachträglich freigelegte Oberfläche handelt.

5.3.1 Methode

Fotografische Dokumentation der Bruchflächen

Unmittelbar nach den Haftzugprüfungen werden die Bruchflächen der beiden Probekörperteile fotografisch dokumentiert. Es werden je Bruchfläche in der Regel vier Fotos mit einer digitalen Kamera gemacht: Zwei in einer Draufsicht von oben⁷⁰, zwei in einer schrägen Ansicht von vorne, mit der optischen Achse rund 30° zur Horizontalen geneigt. In jeder Position wird einmal mit indirekter Beleuchtung (diffuses Umgebungslicht) und einmal zusätzlich mit einem Streiflicht, das durch eine Halogen-Tischlampe oder mit einem Lichtstrahler seitlich auf die Probe fällt, fotografiert (siehe Abbildung 5.27). Die Beleuchtung und der Blickwinkel haben einen wesentlichen Einfluss darauf, wie die Oberflächen erscheinen. Durch Streiflicht und in der Schrägansicht wird ein Relief der Bruchfläche be-

⁷⁰ Die Kamera befindet sich nicht ganz vertikal über den Proben, da sich sonst störende Spiegelungen in den (glatt polierten) Oberflächen zeigen.

sonders deutlich. Anhaftende dünne Schichten (10-50 μm) von Bindemittelstein, im Folgenden als „Haftschleier“ bezeichnet, sowie blanke Stellen am Stahl oder Glas werden im Streiflicht gut sichtbar. In den Bildern in der Draufsicht ist ein Millimeterpapier als Maßstab eingelegt worden, sodass Ausmaße von Bereichen nachträglich am Foto oder am Bildschirm abgemessen werden konnten. Von ausgewählten Stellen werden zudem Makro-Aufnahmen gemacht.



Abbildung 5.27: a) Foto-Set-up für Draufsicht, b) Arbeitsplatz für das Abzeichnen der Rissbilder, c) Risse, die durch Aufspritzen von Ethanol deutlich sichtbar werden

Dokumentation der Rissbilder

Die Rissmuster einiger charakteristischer Proben jeder Serie werden mit Hilfe einer Transparentfolie, die auf die Bruchflächen gelegt wird, abgepaust. Feinste Risse, die mit freiem Auge sonst nicht mehr erkennbar wären, können mit Hilfe von aufgespraytem Ethanol, das in den Rissen langsamer verdunstet als an der Oberfläche, aufgefunden werden. Die abgelösten Betonscheiben werden einseitig besprüht und das Rissbild kann, nachdem Ethanol durch die Risse gedungen ist, auf der anderen Seite fotografiert werden (siehe Abbildung 5.27c).

So lassen sich Risse in den Betonscheiben an glatten Oberflächen sehr gut vollständig rekonstruieren. An rauen Bruchflächen ist es dagegen manchmal schwierig, Risse eindeutig ausfindig zu machen. Beide Seiten des Verbundprobekörpers, also beide zusammengehörigen Bruchhälften müssen zur Rekonstruktion des Rissbildes einer Betonschicht herangezogen werden. Die Rissbreiten werden mit Hilfe des in Kapitel 6.1.1 beschriebenen Lichtmikroskops gemessen.

Die Vermessung der Rissmuster in Originalgröße (Zonen, Rissabstände, Risslängen und Flächen innerhalb der Rissfelder) wird einerseits von Hand mittels Stahllineal mit einer 0,5 mm Teilung und zweitens an eingescannten Rissbildern, die mittels CAD Programm

nachgezeichnet werden, durchgeführt. Die Rissbreiten werden aus Bildern, die mittels Lichtmikroskop mit Digitalkamera gemacht wurden, gewonnen. Je nach Rissbreite werden Ausschnitte der Bruchflächen mit Rissen in 40- bzw. 100-facher Vergrößerung digital fotografiert und mit entsprechender Analyse-Software am Bildschirm vermessen. Je Rissabschnitt im Bild werden an zwei bis vier Stellen die Rissbreiten abgemessen und gemittelt. Je Probe werden 3 bis 5 Risse an einigen Stellen vermessen.

5.3.2 Bruchformen und Zonierung

Die in der Tabelle 5.6 angeführten Bruchformen können in den Bruchbildern der Verbundproben beobachtet werden.

Tabelle 5.6: Bruchformen, die in den Bruchbildern sichtbar werden

Bezeichnung	Kürzel	Beschreibung	Art
Betonbruch	b	Bruchlinie verläuft im Beton, also im ungestörten homogenen Inneren der UHPC-Schicht	Kohäsionsversagen
Fugenbruch I	fi	Ablösung in der Kontaktfläche, sodass blanker Stahl, Glas oder spiegelglatte UHPC-Oberfläche sichtbar wird	Adhäsionsversagen
Fugenbruch II	fii	Bruch tritt in der Grenzflächenschicht auf, sodass am Stahl- oder Glasuntergrund anhaftender Bindemittelstein (UHPC-„Haftschleier“) sichtbar wird	Kohäsionsversagen in der Grenzschicht

Diese Bruchformen treten nebeneinander in derselben Bruchfläche auf. Es kann von einer Zonierung anhand der Bruchformen in den Bruchflächen gesprochen werden. Es werden wiederkehrende Muster mit gewissen Variationen bei allen Werkstoffkombinationen beobachtet, die im Folgenden beschrieben werden. Bei den Proben ohne Verdunstungsschutz zeigen sich zudem Risse ebenfalls in wiederkehrenden Mustern, die mit der Zonierung der Bruchflächen korrespondieren.

Bei Proben MVS – sie weisen keine Risse auf – ist die Zonierung übergeordnet, d.h. die ganze Fläche betreffend. Bei Proben OVS – sie weisen immer Risse auf – ist sowohl eine übergeordnete Zonierung als auch eine Zonierung zwischen den Rissen beobachtbar.

Es zeigen sich je nach Werkstoffkombination zwei oder drei Zonen. In den Zonen herrschen bestimmte Bruchformen und gegebenenfalls Rissmuster vor. In idealisierter Vorstellung sind die Zonen konzentrische Kreisringe. Real sind manchmal nur in Teilen dieser Ringe die Bruchformen gut sichtbar ausgeprägt. Die Zonen werden im Folgenden mit A, B, und C bezeichnet. In der Abfolge von außen nach innen können beschrieben werden (siehe Abbildung 5.28):

Zone A: Ein äußerster Ring, in dem bevorzugt Fugenbruch I auftritt. In diesen Fällen löst sich UHPC von der Oberfläche vollständig ab, sodass bei den glatten Oberflächenrauheiten blanker Stahl und Glas zum Vorschein kommen. Die abgelöste UHPC-Schicht ist auch spiegelnd glatt. In der Mehrzahl der Fälle ist dieser Flächenanteil für die Haftung un-

wirksam gewesen. In einigen Fällen tritt hier Betonbruch in Form einer umlaufenden Wulst auf. Im äußersten Ring sind nie Risse festzustellen.

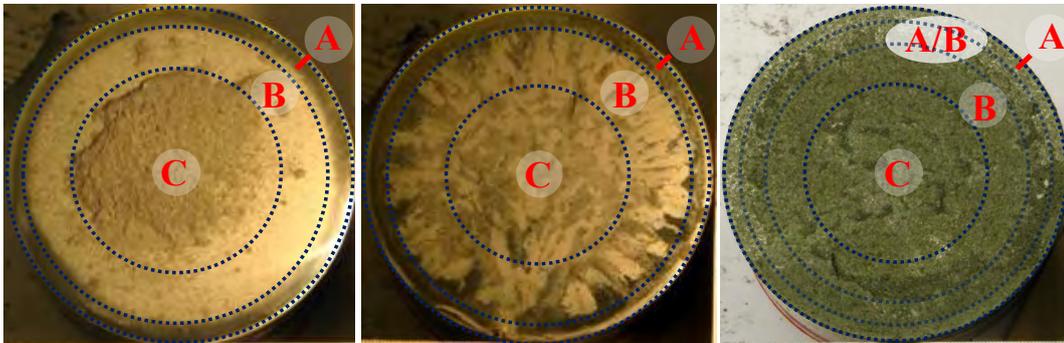


Abbildung 5.28: Beispiele von Bruchflächen mit Zonierung A, B, C

Zone B: Ein ringförmiger Bereich innerhalb des äußersten Ringes, in dem der Bruch in der Grenzflächenschicht – Fugenbruch II – auftritt. Es zeigen sich deutliche UHPC-Haftreste am Untergrund, ein dichter „Haftschleier“ aus Bindemittelstein. Diese Zone kann in einigen Werkstoffkombinationen den ganzen Bereich innerhalb der Zone A ausmachen. In der Kombinationen SEM-MVS ist sie kaum ausgeprägt, weil dort stattdessen Betonbruch vorherrscht. In den Rissbildern der Proben OVS zeigen sich Radialrisse in dieser ringförmigen Zone B.

An den rauen Proben und auch bei den wärmebehandelten Proben der Serie HE ist ein Übergangsbereich von A nach B („Zone A/B“) vorhanden, in dem eine Wulst oder ausgeprägte Stellen mit Betonbruch auftreten⁷¹.

Zone C: Ein zentrales Feld, in dem oft Betonbruch auftritt. Bei einigen Kombinationen macht Zone C den ganzen inneren Bereich innerhalb der Zone A aus. Bei manchen Werkstoffkombinationen tritt allerdings kein Betonbruch im zentralen Feld auf, sondern Fugenbruch II, dann ist also nur Zone B ausgeprägt, im zentralen Bereich ist der Haftschleier meist etwas stärker als in der Umgebung. In den Rissbildern der Proben OVS zeigt sich immer ein zentrales Feld mit charakteristischem Rissmuster.

⁷¹ In den ursprünglichen Bruchbild-Beschreibungen, die im elektronischen Anhang zu finden sind, wurde dieser Übergangsbereich als „Zone B“ bezeichnet, und die weiteren Zonen mit C und D beschrieben.

5 Makroebene: Untersuchungen des Haftverbundes

Tabelle 5.7: Ausmaße der an Bruchflächen und Rissbildern erkennbaren Zonierung

VS	Werkstoff- Rauheit	Serie	Proben- alter	Proben- anzahl	Zone A äußerster Ring			Grenzkreis A - B (*)	Zone C zentrales Feld (**)
					Breite (***)	Bruch- form	Anmer- kung	DM	DM
			[d]	[-]	[mm]		[mm]	[mm]	
OVS	SR0EM	SNS1	28	4	2,5	fI	(1)	95	55
		HE	28	1	3,5	fI	(1)	93	57
			141	1	3	fI	(1)	94	59
			226W	2	2	fI	(1)	96	55
	Mittelwerte SR0EM OVS:					3		94	56
	SR0EM	TORG ^{#)}	28	6	4	fI		~92	~56
	SR1EM	SNS1	28	4	3	b	(2)	94	62
	SR2EM		28	4	3	b	(2)	94	62
	GR0EM	GNS1	28	4	5	fI	(1)	90	46
	GR7EM		28	4	3-7	fI	(7)	86-94	57
	GR3EM		28	4	3-8	fI	(7)	84-94	58
	SR0DM	SD1	28	4	7	fI	(1)	86	55
	SR1DM		28	4	8	fI		84	56
	SR2DM		28	4	8	fI		84	54
	SR5DM		28	4	2(-8)	fI, b		84	53
	Mittelwerte SR0DM OVS					8		85	55
MVS	SR0EM	SNS1	28	4	3	fI	(1)	94	n.e.
	SR1EM		28	4	3	fI	(3)	94	n.e.
	SR2EM		28	4	3	fI	(3)	94	n.e.
	SR0EM	TORG ^{#)}	28	5	4	fI	(8)	-	keines
	GR0EM	GNS1	28	4	4	fI	(1)	92	(4)
	GR7EM		28	4	3-8	fI, (b)	(7)	84-94	n.e.
	GR3EM		28	4	5-8	fI, (b)	(7)	84-90	n.e.
	GR0EM	TORG ^{#)}	28	2	5	fI	(8)	-	keines
	SR0DM	SD1	28	4	7		(1)	86	~40 (6)
	SR1DM		28	4	8	fI, (b)	(3)	84	n.e.
	SR2DM		28	4	8	fI, (b)	(3)	84	n.e.
	SR5DM		28	4	2(-6)	b	(5)	n.e.	n.e.

(*) = Durchmesser der für die Haftung wirksamen Fläche (Zonen B und C), Bruchformen fI und b, wenn vorhanden

(**) gemessen an den Rissbildern OVS, n=2 je Werkstoffkombination, außer bei Serie HE fallweise n=1

(***) gemessen am Untergrund: an den UHPC-Schichten erscheint Zone A etwas breiter

^{#)} Serie TORG = Torsionsschubprüfungen

n.e.: nicht erkennbar

W Trocknung bei 105 °C ("Wärmebehandlung")

b Betonbruch

fI Fugenbruch Typ I: Ablösung von der Kontaktfläche

(1) Bereich mit "blanker" Ablösung: Breite schwankt, Schwankungsbreite +1,5 mm

(2) "Betonbruchwulst" vorhanden

(3) am Übergang zwischen äußerstem Ring und innerem Bereich meist Betonhaftreste (Betonbruch)

(4) Bei GR0EM-MVS ist Haftscheier zentral etwas stärker, Zonen B+C aber trotzdem nicht abgrenzbar

(5) Bei SR5DM-MVS stellenweise nur geringe "Randstörung" (2mm) sichtbar

(6) Bei 2 von vier Proben zentraler Betonausbruch mit 30-50 mm DM, bei den anderen nur fII

(7) Bereich mit blanker Ablösung erscheint stellenweise breit, dazwischen aber auch Betonhaftreste

(8) Bei den Torsionsschub-Bruchflächen MVS ist auch der innere Bereich (B, C) zu 50-66% spiegelglatt abgelöst

Die Tabelle 5.7 gibt eine Übersicht über die Ausmaße der Zonen bei den verschiedenen Werkstoffkombinationen. In den folgenden Abschnitten werden beispielhafte Bruchbilder der verschiedenen Werkstoffkombinationen gezeigt und die beobachtete Zonierung im Detail beschrieben. Weitere Fotos von Bruchflächen sind im (elektronischen) Anhang zu finden.

5.3.3 Glatte Oberflächen, Proben mit Verdunstungsschutz (MVS)

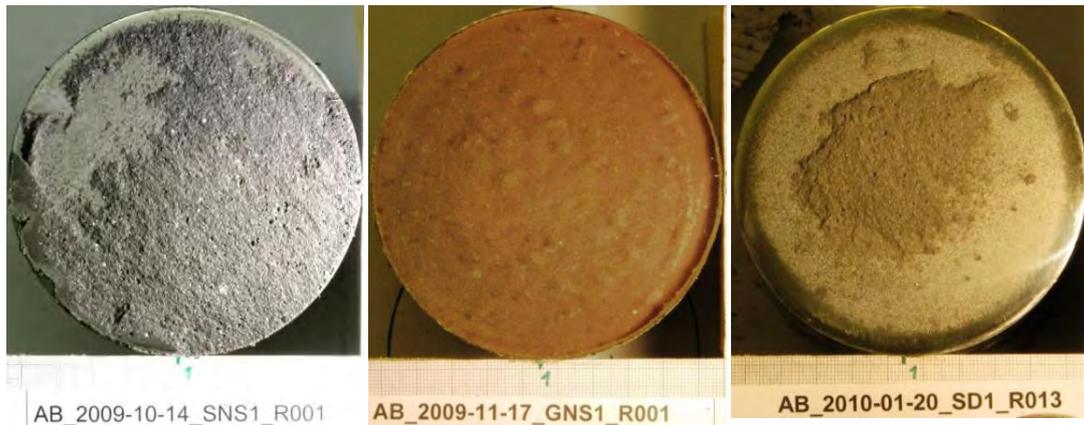


Abbildung 5.29: Beispiele Werkstoffkombinationen a) SR0EM, b) GR0EM, c) SR0DM

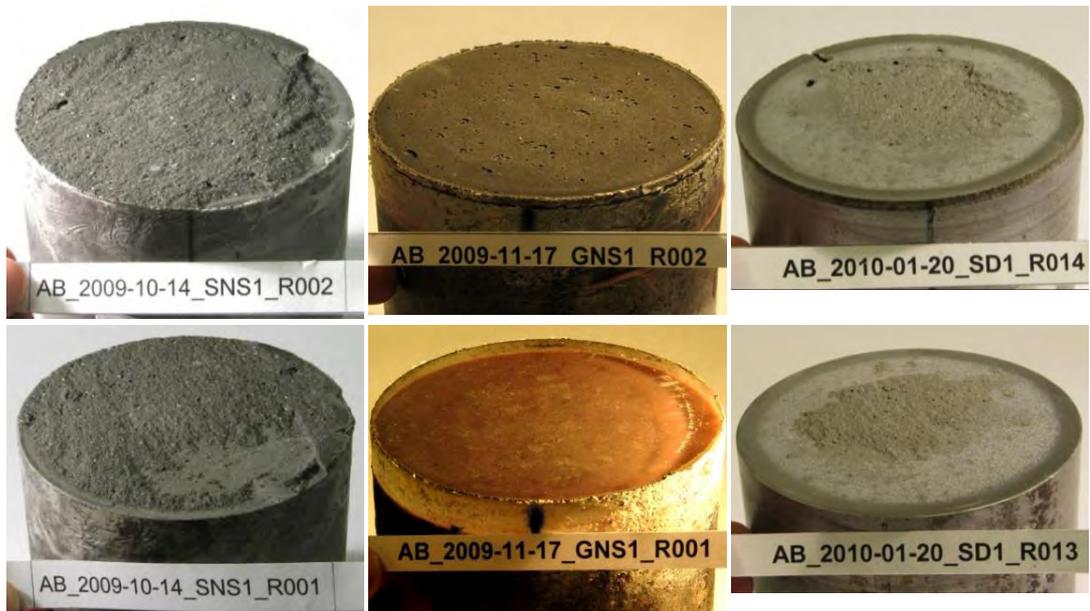


Abbildung 5.30: obere Reihe: Probekörperoberteile, untere Reihe: Probekörperunterteile, Werkstoffkombinationen a) SR0EM, b) GR0EM, c) SR0DM

Bei allen Proben zeigt sich der äußerste Ring mit blanker Ablösung (Zone A). Bei SR0EM und GR0EM Proben ist der Ring etwa 3 mm, bei SR0DM Proben etwa 7 mm breit. Zwischen der anhaftenden UHPC-Schicht und dem Stahl- oder Glasteil bildet sich wie in späteren Untersuchungen festgestellt wird, nach einigen Tagen ein kapillarer Spalt (siehe Kapitel 6.2.3 und Abbildung 6.3).

Bei Proben der Werkstoffkombination SR0EM-MVS dominiert Betonbruch („Zone C“) die ganze Fläche, ausgenommen im äußersten Ring. Stellenweise ist auch ein Fugenbruch II mit anhaftendem Bindemittelstein („Haftschleier“) zu sehen. Diese Proben zeigen, dass auch bei glatt polierten Untergründen die Haftzugfestigkeit der Betonzugfestigkeit erreicht wird! Bei Proben mit glattem Glas (GR0EM) hingegen tritt im inneren Bereich Fugenbruch II, aber mit einem sehr Kontaktflächen nahen Versagen auf. Es ist quasi nur Zone B vorhanden. Bei Proben SR0DM-MVS sind bei zwei von vier Proben alle Zonen deutlich ausgeprägt (siehe Abbildung 5.29 und Abbildung 5.30).

An Bruchflächen der Proben der Werkstoffkombination SR0DM haftet eine dichte und einige Mikrometer dicke Schicht von Bindemittelstein in Zone B an. An den Glasoberflächen ist nur eine dünne Schicht mit wenig anhaftendem Bindemittelstein sichtbar (siehe Abbildung 5.31). Weitere Untersuchungen zum anhaftenden Bindemittelstein der Grenzflächenzone sind im Kapitel 6.3 ausgeführt.

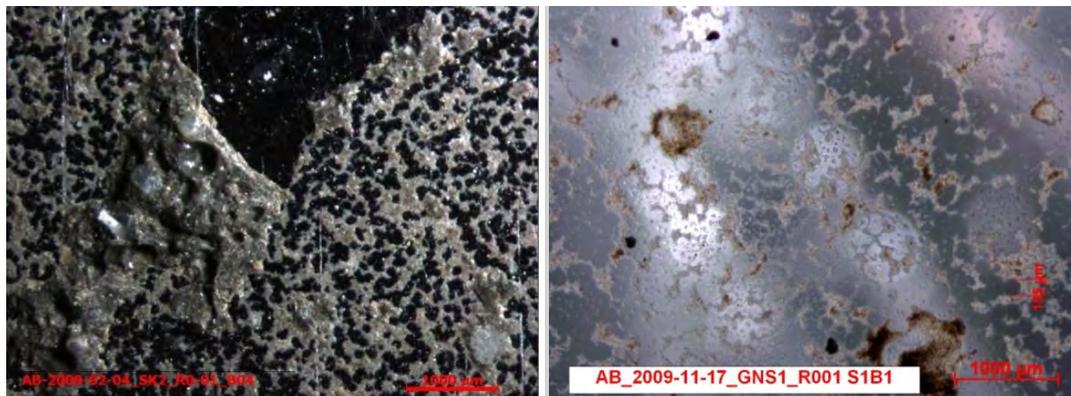


Abbildung 5.31: anhaftender Bindemittelstein im Lichtmikroskop: a) an Stahlprobe SR0EM, Stahl = schwarz, dreiecksförmige Fläche = nachträglich ausgebrochenes Betonstück, b) an Glasprobe GR0EM-MVS

Besonderheiten der Serie HE, Haftungsentwicklung

Die Bruchbilder der Serie HE, in der die zeitliche Entwicklung der Haftzugfestigkeit für die Werkstoffkombination SR0EM geprüft wurde, sind in Abbildung 5.32 für die drei Proben MVS dargestellt. Es wird sichtbar, dass die Bereiche mit Betonbruch in zunehmendem Alter vom Rand ins Zentrum der Bruchfläche wandern und größer werden. Die Bruchebene selbst verschiebt sich mit der Zeit von der Grenzflächenschicht ins Innere der UHPC-Schicht.

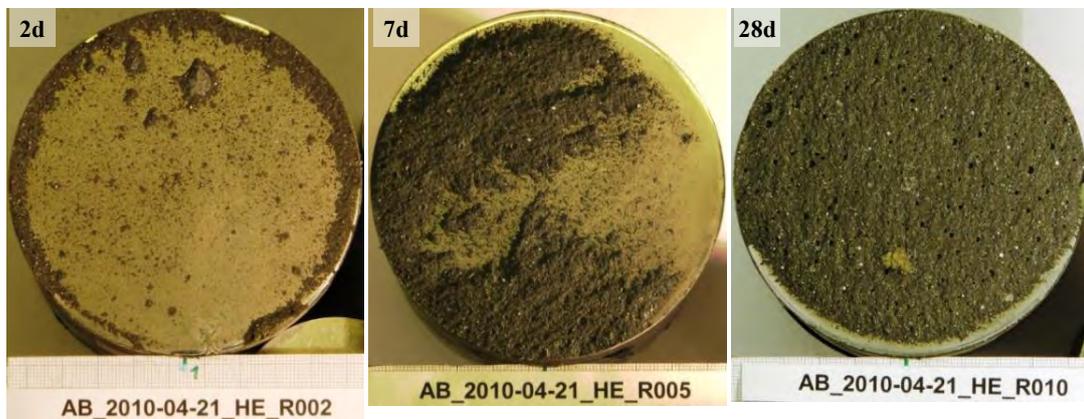


Abbildung 5.32: Serie HE-MVS mit einem Prüffalter von a) 2 d, b) 7 d, c) 28 d

In einem Probenalter von zwei Tagen scheint die Haftfestigkeit in Zone A also besser als die Betonfestigkeit zu sein, später ist die Haftfestigkeit in den Zonen B und C dann größer. Die Grenzflächenschicht scheint sich im Vergleich zum Betoninneren mit Verzögerung zu verfestigen. Dasselbe zeigen Beobachtungen an einer Vorserie, siehe Kapitel 5.1.2, Abbildung 5.20 auf Seite 129. Der Einfluss der Schwindspannungen, die sich mit den Lastspannungen überlagern, wird in den folgenden Kapiteln beleuchtet.

Rissbilder MVS

Die Proben MVS zeigen unmittelbar nach einer Haftzugprüfung keine Risse in den Betonschichten. Bei einigen Probekörpern der Werkstoffkombination GR0EM und SR0DM, die an trockener Raumluft gelagert worden sind und deren Bruchflächen oberflächlich austrocknen konnten, werden nach einigen Tagen feinste Risse (3-5 μm breit), in einer charakteristischen sternförmigen Form gefunden (siehe Abbildung 5.51 auf Seite 161 und Abbildung 5.33).

An Proben aus denselben Serien, deren UHPC-Schichten beidseitig bereits bei oder kurz nach der Haftzugprüfung manuell abgelöst wurden, sind diese Risse nicht feststellbar. Das bedeutet, die Risse entstehen durch behindertes Trocknungsschwinden bei einseitiger oberflächlicher Trocknung und entsprechendem Verbund der UHPC-Schicht mit dem Untergrund.

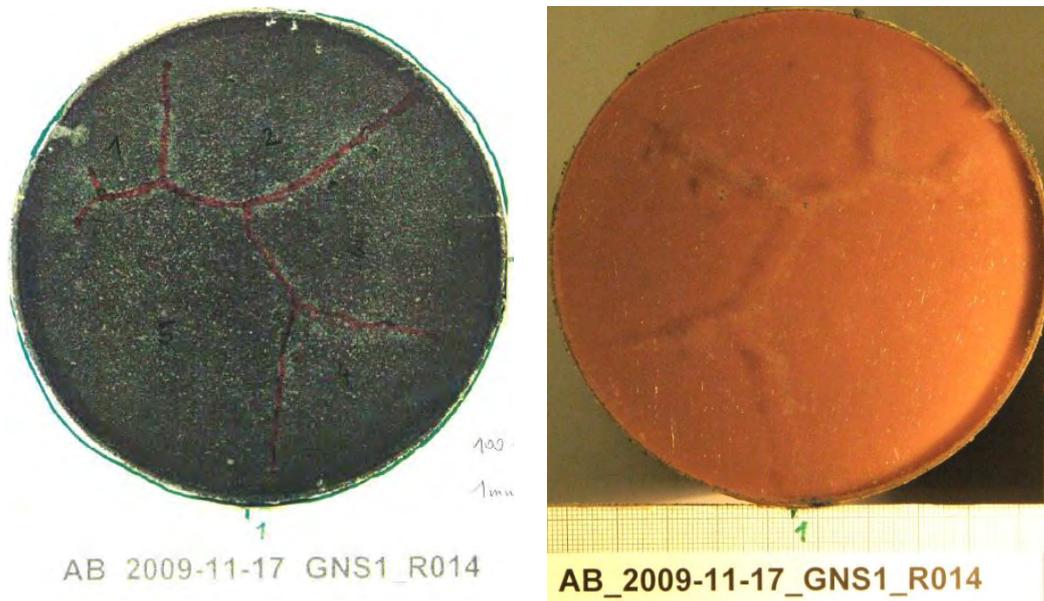


Abbildung 5.33: a) Rissmuster in UHPC-Scheibe MVS, entsteht erst durch sekundäres, oberflächlich einseitiges Trocknen, b) anhaftende Risspuren auf Glas, nach Ablösung

5.3.4 Raue Oberflächen, Proben mit Verdunstungsschutz (MVS)

Die Bruchflächen mit den Rauheiten R1 und R2 (Stahlproben) bzw. mit den Rauheiten R7 und R3 (Glasproben⁷²) unterscheiden sich im Wesentlichen nicht voneinander. Das gilt sowohl für UHPC EM wie auch für UHPC DM. An der Rauheit SR5, mit der besonders tiefen und fein strukturierten Oberfläche, haftet aber die Mischung DM besser als an der Rauheit SR1 und SR2. Im Folgenden wird für alle erwähnten Rauheiten (R1, R2, R7, R3, R5) zusammenfassend das Kürzel RX verwendet. Lediglich Proben der besonders behandelten Oberfläche der Rauheit R4 zeigen in jedem Fall eine vollständige Ablösung in der Kontaktfläche und können hier nicht mit eingeordnet werden.

Eine Zonierung der Bruchflächen kann auch bei rauen Proben erkannt werden wie die Bruchbilder in der Abbildung 5.34 und Abbildung 5.35 zeigen.

Bei allen Proben zeigt sich ein äußerster Ring, die Zone A. Bei Proben der Werkstoffkombination SRXEM und GRXEM zeigt sich großteils ein Fugenversagen und an einzelnen Stellen Betonbruch. Bei SRXDM ist in Zone A stellenweise Fugenversagen, aber auch abschnittsweise eine Wulst mit Betonbruch zu sehen. Bei SRXEM ist der Ring etwa 3 mm, bei GRXEM und SRXDM Proben bis 8 mm breit.

⁷² Bei Stahlproben bezeichnet R1 eine feinere Rauheit als R2, bei Glasproben ist R7 feiner rau als R3 (und R5). Deshalb wird R7 vor R3 genannt, vgl. Kapitel 4.2.1.

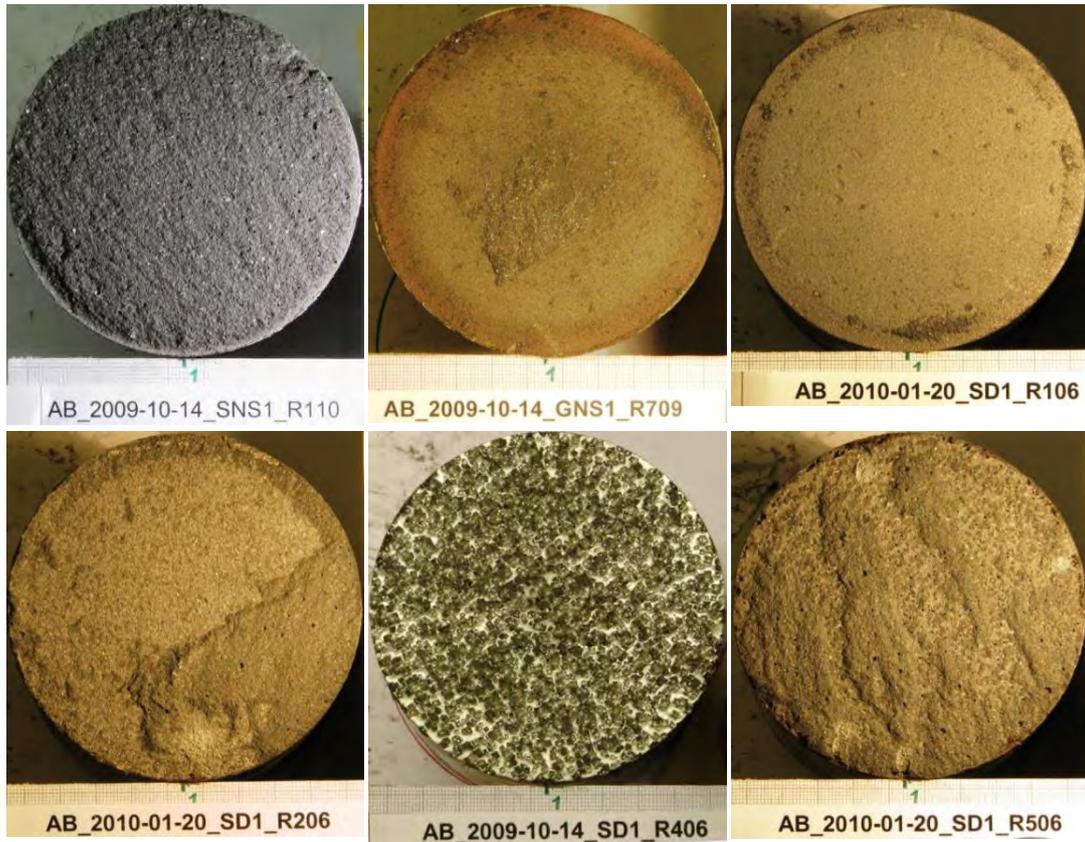


Abbildung 5.34: Beispiele raue Oberflächen, oben: a) SR1EM, b) GR7EM, c) SR1DM, unten: a) SR2DM, b) SR4DM, c) SR5DM



Abbildung 5.35: Beispiele raue Oberflächen, oben: : Probekörperoberteile, unten: Probekörperunterteile a) SR2EM, b) GR3EM, c) SR1DM

Die Zone B mit einem Fugenbruch in der Grenzflächenschicht ist bei SRXEM am wenigsten, bei GRXEM deutlicher und bei SR1DM bzw. SR2DM stark ausgeprägt. In Vertiefungen finden sich Betonreste, während die Spitzen der Rauheits-Zähne oft freiliegen.

Ein zentrales Feld bzw. Bereiche mit Betonbruch sind bei SRXEM am größten, bei GRXEM deutlich, bei SR5DM stellenweise vorhanden. Einzelne Proben erreichen außergewöhnlich hohe Prüffestigkeiten bis 12 N/mm² und die Bruchfläche verläuft mitten durch die Betonschicht. Andere Proben, in denen Fugenbruch II stark ausgeprägt ist, erreichen interessanterweise annähernd dieselben hohen Festigkeiten, auch diese entsprechen der mittleren Betonzugfestigkeit (rund 10 N/mm²).

Besonderheiten der Oberfläche R4, gehämmerte Stahlproben

Die Verbundproben mit der besonders behandelten Oberfläche der Rauheit R4 zeigen in jedem Fall ein Versagen mit vollständiger Ablösung in der Kontaktfläche. Eine Zone A mit einem äußersten Ring, der sich zumindest farblich vom inneren Feld abgrenzt, ist auf den Betonflächen der Bruchhälften erkennbar. Bei Proben MVS ist dieser Ring deutlicher ausgeprägt als bei Proben OVS. Ansonsten kann nicht von einer Zonierung gesprochen werden.

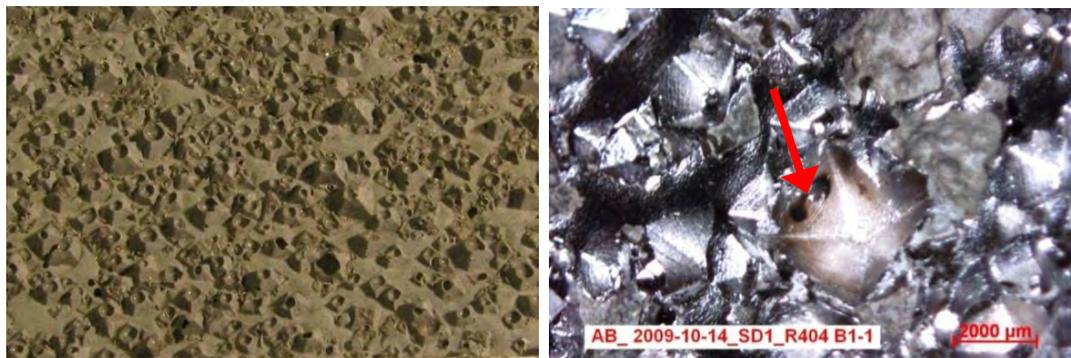


Abbildung 5.36: a) Blick von schräg vorne auf die abgelöste UHPC-Bruchfläche R4, Pyramidenstümpfe mit Luftporen erkennbar (Originalbild-Breite 5 cm), b) Lichtmikroskopie der abgelösten Stahlfläche der Oberflächenrauheit R4: In einer pyramidenförmigen Vertiefung sind Anlassfarben (rotbraun-blau, Pfeil) erkennbar. Es gibt kaum Betonhaftreste.

Trotz vergrößerter Oberfläche ist eine geringere Haftfestigkeit als auf glatten, polierten Flächen feststellbar (siehe Kapitel 5.1.2). Es sind auch keine Spuren von anhaftendem Bindemittelstein erkennbar, lediglich an den Seitenwänden der großen Vertiefungen haften Ausbruchsreste entlang einer Linie, die der Schnittlinie von Luftporen und Beton entsprechen. In jeder Vertiefung der Oberfläche bzw. auf jeder Spitze des herausgelösten Betonreliefs ist das Vorhandensein einer Luftpore erkennbar (siehe Abbildung 5.36a) Näher betrachtet zeigen die Oberflächen besonders in den pyramidenförmigen Vertiefungen der Hammereinschläge stellenweise eine Verfärbung, die den Anlassfarben von Stahl entspricht

(siehe Abbildung 5.36b). Die Oberflächen haben also neben der Verformung lokal auch eine „thermische Behandlung“ bei der Herstellung erfahren. Drei Ursachen können also zur geringsten Haftzugfestigkeit bei der Werkstoffkombination SR4EM geführt haben: erstens, der frische Beton konnte die Vertiefungen nicht ausfüllen und die Luft nicht daraus verdrängen; zweitens, die besondere thermische Veränderung der Oberfläche verringert die Adhäsion oder drittens, die gleichmäßige Flankenneigung in einem bestimmten ungünstigen Winkel führt zu der geringen Haftung. Auf die dritte Ursache wird im Zuge der Modell-Überlegungen im Kapitel 7.5 näher eingegangen.

5.3.5 Glatte Oberflächen, Proben ohne Verdunstungsschutz (OVS)

Bei allen Proben OVS wird eine übergeordnete Zonierung sichtbar, wie sie für Proben MVS schon beschrieben wurde. Zudem treten Risse auf, deren Rissmuster sich in die Zonierung einfügt. Zwischen den Rissen finden sich auch Bereiche mit Bruchformen wie in der übergeordneten Zonierung (f_i , f_{II} und b).

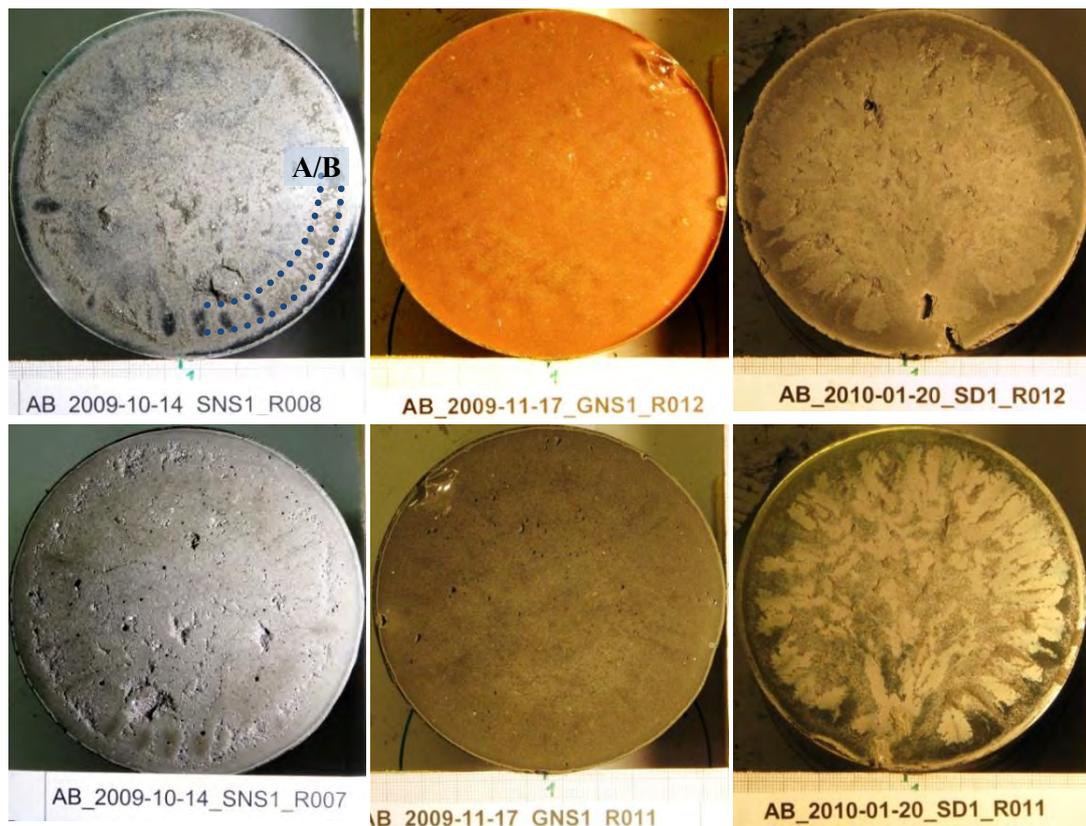


Abbildung 5.37: Proben a) SR0EM, b) GR0EM, c) SR0DM, obere Reihe: Probekörperoberteile, unten: Probekörperunterteile

Wie in Abbildung 5.37 und Abbildung 5.38 zu sehen, zeigt sich wieder ein äußerster Ring (Zone A), in dem die Oberflächen blank abgelöst sind, während im inneren Bereich (Zonen B+C) Bindemittelstein anhaftet.



Abbildung 5.38: Proben a) SR0EM, b) GR0EM, c) SR0DM in schräger Ansicht

Eine Übergangszone A/B vom äußersten Ring zum inneren Bereich, in der stellenweise Betonausbruch anhaftet, ist bei Proben SR0EM ausgeprägt. Im Ring (Zone B) rund um das zentrale Feld sind an den Spuren der radialen Risse blanke Stellen, dazwischen Haftreste, erkennbar. Der auftretende „Haftschleier“ hat unterschiedliche Qualität bei jeder Werkstoffkombination: Bei SR0EM ist er wesentlich stärker als bei GR0EM, bei SR0DM ist er dicht und stellenweise „verschmiert“ ausgeprägt, siehe dazu auch Kapitel 6.3.2.

In Zone C, einem kreisförmigen zentralen Bereich, ist der Anteil von Betonausbruch am größten und bei allen Proben anhaftender Bindemittelstein deutlich sichtbar. Hier teilen Risse den Bereich in Rissfelder mit annähernd viereckiger, manchmal fünfeckiger oder sechseckiger Form.

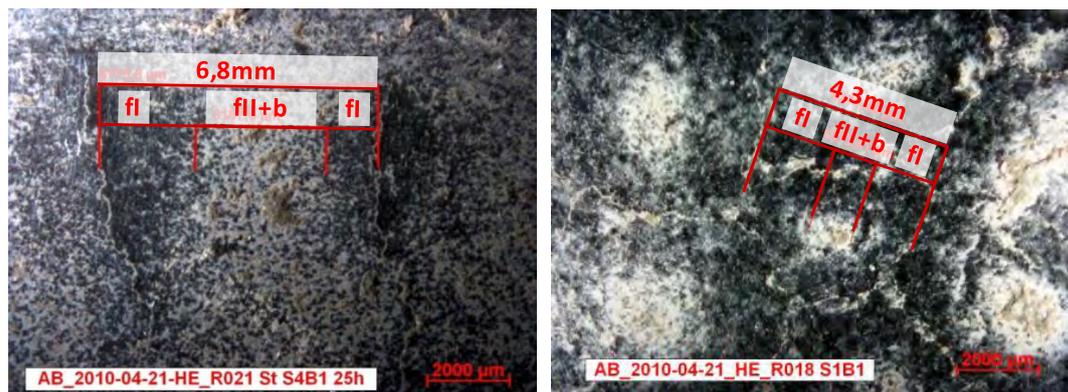


Abbildung 5.39: Lichtmikroskopie von Riss Spuren auf Stahloberflächen: a) parallele radiale Risse im Abstand von 6,8 mm einer Probe im Alter von 25 h, b) zentrale annähernd hexagonale Rissfelder der zusätzlich getrockneten, 226 Tage alten Probe

Jedes Riss-Segment weist wiederum eine Zonierung auf, in der idealisiert von Riss zu Riss die Abfolge „Riss(spur) – blanker Fugenbruch I (fl) – Fugenbruch II mit Haftschleier

(fII) – Stellen mit Betonbruch (b) - Fugenbruch II mit Haftsleier – blanker Fugenbruch I – Riss(spur)“ herrscht (siehe Abbildung 5.39). Besonders deutlich werden die Risspuren an Proben der Serie HE, Haftungsentwicklung.

Besonderheiten der Serie HE, Haftungsentwicklung

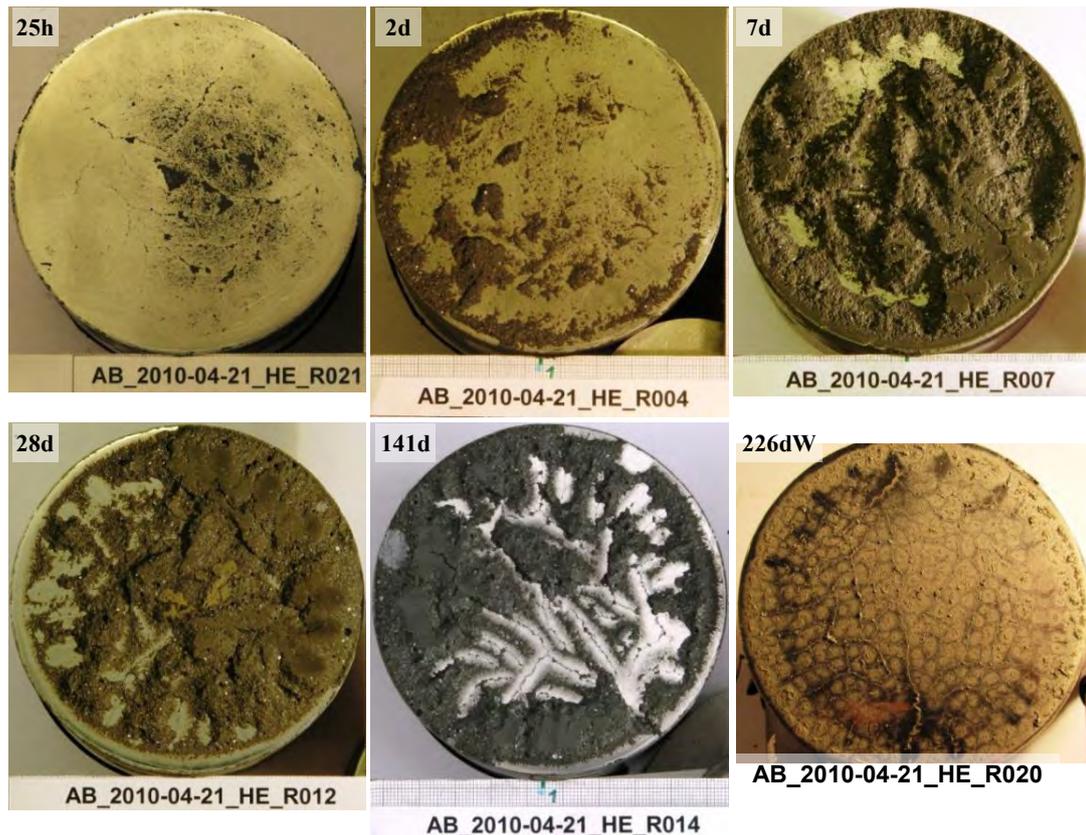


Abbildung 5.40: Probekörperteile der Serie HE-OVS

Wie schon bei den Proben MVS zu beobachten war, wird auch bei Proben OVS in Abbildung 5.40 sichtbar, dass die Bruchebene mit zunehmendem Alter von der Fuge ins Innere der UHPC-Schicht wandert und immer mehr Betonbruchanteile auftreten. Die Haftung scheint im Probenalter von 25 h nur im Zentrum (Zone C) stark ausgeprägt. Mit zunehmendem Alter nimmt die Haftfläche zu, immer mehr Bereiche mit „Betonbruch“ treten zwischen den Rissen auf.

Bereits nach 25 h zeigt sich in der Bruchfläche ein voll ausgeprägtes Rissbild. Auffällig sind dabei einige beinahe 1 mm breite Hauptrisse. Entlang der Risse im Beton sind am Stahlteil immer anhaftende „Grate“ sichtbar, daneben blank abgelöste Bereiche und zwischen den Rissen meist anhaftende Ausbruchsreste, Fugenversagen II oder Betonbruch (siehe Abbildung 5.39 und Abbildung 5.41). Bei der ältesten Probe (141 d) ohne spezielle zusätzliche Trocknung ist die Zonierung zwischen den Rissen wesentlich stärker ausgeprägt

als bei den jüngeren Proben, blanke Bereiche neben den Rissspuren nehmen an Ausmaß zu, ansonsten sind Risslänge und Rissfeldzahl etwa gleich wie bei den jüngeren Proben. Diese Beobachtungen zeigen, dass frühe Relativverschiebungen in der Grenzschicht durch die Rissbildung in den ersten 24 Stunden, von denen angenommen wurde, dass sie die Adhäsion stören, nicht ursächlich für die unterschiedlichen Prüf-Festigkeiten – siehe Ergebnisse der Haftzugprüfungen in Abbildung 5.14 – verantwortlich gemacht werden können. Das Bruchbild mit ausgeprägten blanken Bereichen und Haftschleier entsteht erst durch den Einfluss der Zwangsspannungen in Kombination mit der Prüflast, wie die weiteren Untersuchungen zeigen.

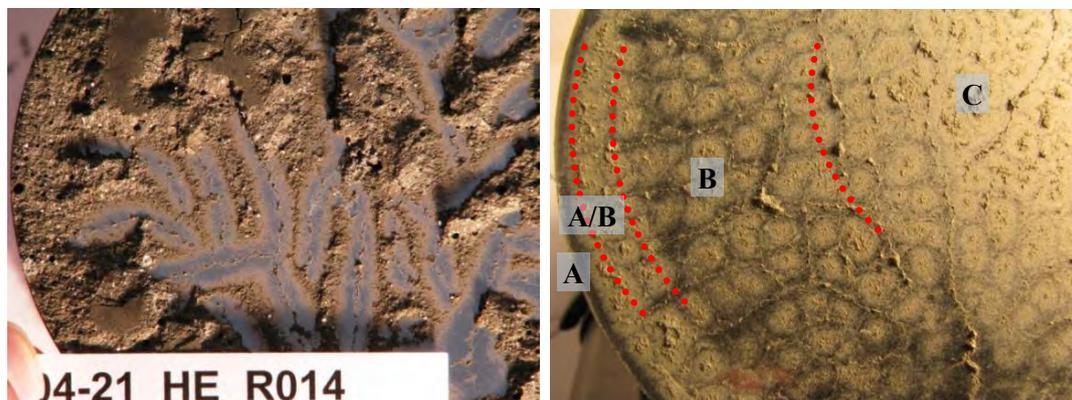


Abbildung 5.41: a) Detail einer Probe mit einem Alter von 141 d, Zonierung von Riss zu Riss ist erkennbar, b) Probe mit zusätzlicher Trocknung, Alter 226 d, mit charakteristischen, annähernd hexagonalen Rissfeldern und Bezeichnung der übergeordneten Zonierung

Interessant ist, wie sehr sich das Bruchbild durch die Langzeitlagerung verbunden mit einer Trocknung des Probekörpers ändert. Das kann an Proben der Serie HE, die im Alter von 226 Tagen geprüft wurden und 14 Tage vor der Prüfung bei 105 °C im Trockenofen eingelagert waren, beobachtet werden (siehe Abbildung 5.41b). Der Bruch bei der Haftzugprüfung erfolgt vollständig in einer Fuge, Betonbruch tritt dabei nur mehr lokal und sehr nahe der Grenzfläche auf. Die Haftreste zeigen in Kombination mit dem Rissbild ein ausgeprägtes annähernd hexagonales Muster. Die Rissfelder sind wesentlich kleiner als bei den jüngeren Proben. Die Rissfelder sind so klein, dass sich die Bruchfläche ausgehend vom Randspalt nicht mehr wie bei den jüngeren Proben ins Betoninnere entwickelt, sondern Betonbruch nahe der Grenzfläche auftritt (siehe auch Abbildung 5.42). Der Grund dafür zeigt sich in späteren Analysen, es überschneiden sich die Einleitungslängen der Zwangsspannungen.

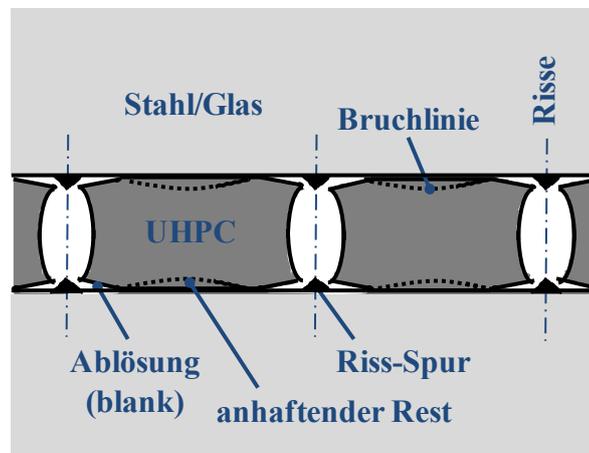


Abbildung 5.42: Schema der kleinen Rissfelder im Schnitt einer UHPC-Schicht: Geöffnete Risse, Rissspuren, abgelöste Bereiche und Bruchlinie nach der Haftzugprüfung

Einerseits sind mit freiem Auge sichtbare „Hauptrisse“ vorhanden, deren Bild dem Rissbild der jüngeren Proben gleicht. Andererseits sind zwischen den Hauptrissen deutlich feinere „Sekundärrisse“ zu finden. Sie bilden kleine, gleichartige vier- bis vieleckige, zum Teil hexagonale Rissfelder in der ganzen Fläche, außer in Zone A. Sie sind jeweils von einem Riss bzw. dessen Spur auf der Stahloberfläche – einem Grat von anhaftendem, ausgebrochenem Beton – markiert (vgl. Abbildung 5.41b und Abbildung 5.39b). Im Zentrum jedes Rissfeldes finden sich anhaftende Betonausbruchsflächen umgeben von anhaftendem Bindemittelstein („Haftschleier“) und einem beinahe blank abgelösten Ring. Entlang der Hauptrisse sind die blank abgelösten Flächen besonders stark ausgeprägt. Im Bereich von Fehlstellen im Beton – z.B. Einschlüssen von undispergierter Mikrosilika wie bei Probe HE_R017 und Luftporen – wird der UHPC blank abgelöst, auch die Hauptrisse treffen sich an diesen Stellen.

Die Sekundärrisse sind offensichtlich erst durch die zusätzliche Trocknung im Ofen entstanden. Sie sind auf neuerliches starkes behindertes Schwinden zurückzuführen. Das Rissbild ist charakteristisch für den Rissvorgang in einem zweidimensionalen homogenen Spannungsfeld, siehe Kapitel 2.7.4. Neben den breiteren Hauptrissen und im Bereich der Radialrisse (Zone B) sind die blank abgelösten Flächen größer als im Zentrum (Zone C) und entlang eines äußeren Ringes (Übergangszone A/B). Der äußerste blanke Ring (Zone A) ist nur 2-3 mm breit.

Vermessung der Rissbilder aller glatten (R0) und rauen Proben

Es werden für jede Werkstoffkombination mindestens 2 Rissbilder erfasst und vermessen. Beispielhafte Rissbilder der drei Werkstoffkombinationen mit glatten Oberflächen sind in Abbildung 5.43 gezeigt.



Abbildung 5.43: Rissbilder Werkstoffkombinationen a) SR0EM, b) GR0EM, c) SR0DM

Die Ergebnisse der Vermessung aller Rissbilder und Bruchbilder hinsichtlich der Ausdehnung der Zonen und der Rissfeldgrößen, sowie der Rissbreiten sind in Tabelle 5.7 und Tabelle 5.8 dargestellt. Vermessen wurden der Durchmesser des zentralen kreisförmigen Feldes (Zone C), das innerhalb der radial ausgerichteten Risse liegt, sowie die Ausmaße der umgrenzten Rissfelder im zentralen Bereich.

Die Rissabstände der glatten Proben sind kleiner als die der rauen Proben, jene der Mischung EM etwas größer als die der Mischung DM. Die Rissabstände auf rauem Glas geringer als auf rauem Stahl. Die Rissabstände der Proben unterschiedlicher Rauheiten unterscheiden sich nicht signifikant. In allen Fällen der Mischung EM, außer bei den Proben der Serie HE, die einer zusätzlichen Trocknung im Ofen bei 105 °C unterzogen wurden, sind die Rissfelder länglich und Risse stehen oft normal aufeinander. Bei den Proben SR0DM und den zusätzlich getrockneten Proben der Serie HE ist ein hexagonales Rissbild ausgeprägt.

Die radialen Risse sind innen breiter und verjüngen sich nach außen hin. Die Risse im zentralen Bereich sind meist unterschiedlich breit. Bei Proben mit dem UHPC EM werden einzelne, besonders breite, die Probe querende Risse (bis zu 1 mm) beobachtet. Im Allgemeinen sind breite „Hauptrisse“ (im Mittel 80 µm) und dazwischen liegende weniger breite „Nebenrisse“ (~15 µm) sichtbar. Offensichtlich entstehen Hauptrisse im Zuge der ersten Rissbildung und die weitere Unterteilung der Rissfelder erfolgt sukzessive, es bilden sich Risse normal zu den älteren Rissen. Es entstehen rechteckige, längliche Rissfelder. Einige Proben der Kombination SR0DM und die Proben mit einem Prüfalter von 226 Tagen der Serie HE dagegen weisen gleichmäßige Rissbreiten und vieleckige – annähernd gleich große, beinahe zentralsymmetrische vier- bis sechseckige – Rissfelder auf. Es handelt sich um jene Proben der Serie HE, die einer zusätzlichen Trocknung im Ofen bei 105° C unterzogen wurden.

Tabelle 5.8: Rissfelder, Rissabstände, Risslängen und Rissbreiten der Proben OVS

Werkstoff _Rauheit	Serie	Probenalter	Anzahl	Anzahl Rissfelder		Mittlerer Rissabstand zentrales Feld (Zone C)			Mittlerer Rissabstand (Zone B)	Gesamte Risslänge			Rissbreiten (*)				
				zentrales Feld	äußerer Ring	kurze Seite	lange Seite	im Mittel	Radialrisse	zentrales Feld	Radialrisse	zentral + radial	Hauptrisse maximal	Hauptrisse i.M.	Nebenrisse i.M.	Radialrisse i.M.	
		[d]	[#]	[#]	[#]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[µm]	[µm]	[µm]	[µm]	
SR0EM	SNS1	28	2	16	17	9	14	12	13	511	299	810	80	44	17		
		HE	1	1	21	32	9	13	11	7	474	482	956	456	93	28	
			2	1	21	30	6	13	9,5	7,5	541	451	992	242	77	11	~9
			7	1	29	(1)	7	12	9,5	n.g.	643	607	1250	346	232	15	
	HE	28	1	41	31	5	9	7	7,5	646	406	1052	n.g.	140	14	15	
		141	1	25	25	8	20	14	n.g.	424	351	775	150	41			
		<i>Mittelwerte SR0EM (4):</i>				26	27	7		10	540	433	973				
			226W	2	123	(2)	5	5,5	5	4	1173	1275	2447	500	110	8	
	SR1EM	SNS1	28	2	12	(3)	11	21	16		525		525		32		
	SR2EM		28	2	15	(3)	10	17	14		626		626		26		
GR0EM	GNS1	28	2	14	22	7	17	12	6	445	387	832	413	59	25		
GR7EM		28	2	18	(3)	9	16	13		580		580	47	25	15		
GR3EM		28	1	19	(3)	8	14	11		716		716	47	27	8		
SR0DM	SD1	28	2	98	35	4	6	5	8	1272	457	1729		10	(4)		
SR1DM		28	2	32	(1)	7	9	8		608	288	896		18	(4)		
SR2DM		28	2	26	(1)	7	10	8,5	~10	623	240	863		23	(4)		
SR5DM		28	1	32	(1)	6	9	7,5		709	396	1105		15	(4)		

W Trocknung bei 105 °C ("Wärmebehandlung")
 (*) Rissbreitenmessung stichprobenartig, große Schwankungsbreite
 n.g. nicht gemessen
 (1) undeutlich
 (2) radiale Hauptrisse wie bei anderen Proben der Serie HE, dazwischen Nebenrissfelder wie im zentralen Feld
 (3) Radialrisse kaum bzw. nicht erkennbar
 (4) keine Unterschiede zwischen Haupt- und Nebenrisse

Besonderheiten der Serie HE

Vergleicht man die 25 h alte Probe der Serie HE-OVS mit den älteren Proben, sieht man an einzelnen Stellen Risse in Sternform (3 Risse schließen Winkel von 120° ein), die sich noch nicht mit Nachbarrisern verbunden haben (vgl. Abbildung 5.44). Bei den zu einem späteren Zeitpunkt geprüften Proben (ab 2 Tagen) scheinen die Risse länger und zu einem Netz verbunden. Die Rissbildung beginnt bei Proben OVS zu einem sehr frühen Zeitpunkt, 4 bis 7 Stunden nach der Wasserzugabe, wie im Zuge der in Kapitel 6.2 beschriebenen Untersuchungen festgestellt wurde. Sie erfolgt vor nennenswerter Festigkeitsentwicklung – das Temperaturmaximum im Beton wird erst nach 15 Stunden gemessen.

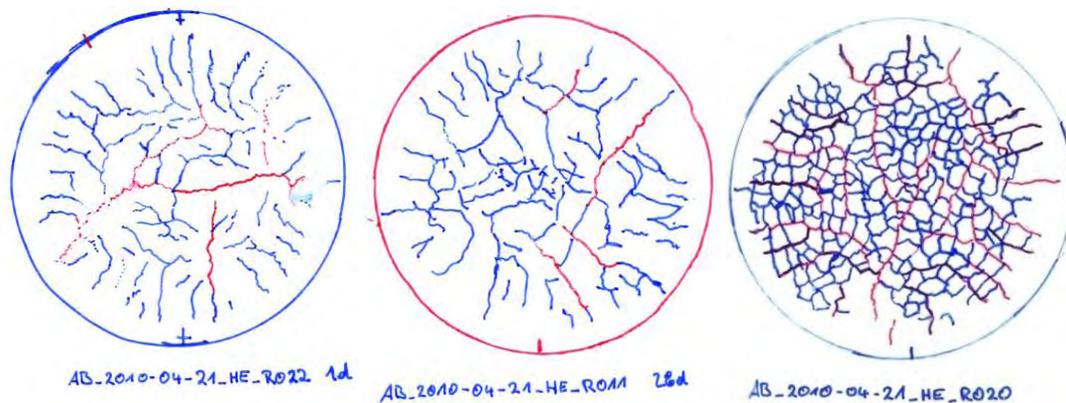


Abbildung 5.44: Rissfelder der Serie HE von Proben im Alter von a) 1 d, b) 28 d, c) 226 d (mit Wärmebehandlung); rot = breite Hauptrisse, blau = Nebenrisse

Bei der Serie HE wird auch untersucht, ob sich das Rissbild mit dem Probenalter ändert. Der Durchmesser des zentralen Feldes ist mit 55 bis 57 mm für alle Proben der Serie HE unabhängig vom Probenalter konstant. Auch die Anzahl der Rissfelder in Zone C, der mittlere Rissabstand, die mittlere Rissbreite sowie die Gesamtrisslänge ändern sich nicht signifikant bis zu einem Alter von 141 Tagen. Erst nach 226 Tagen und Trocknung nimmt die Gesamtrisslänge und Rissfeldzahl durch Teilung zwischen den „Haupttrissen“ etwa 2,5-fach zu. Die zugehörigen Haftzugfestigkeiten ändern sich mit dem Prüfalter zwischen 2 und 141 Tagen nur gering, halbieren sich aber nach der zusätzlichen Trocknung etwa, vgl. Abbildung 5.14a, Seite 123.

Flächenanteile der Zonen zwischen den Rissen

Die angesprochene Zonierung zwischen den Rissen mit blank abgelösten Flächen (Bruchform fl) und Flächen mit Haftresten (Bruchformen fII + b) ist zwischen den Radialrissen, an einigen länglichen Rissfeldern und besonders gut an den polygonalen Rissfeldern der Proben SR0DM und der zusätzlich getrockneten Proben der Serie HE sichtbar. (vgl. Abbildung 5.39 und Abbildung 5.41).

Der Anteil von anhaftendem Bindemittelstein und Betonausbruch ist an ursprünglich abgelösten Bruchflächen wesentlich größer als an nachträglich abgelösten (vgl. Abbildung 5.45).



Abbildung 5.45: a) ursprünglich abgelöste Bruchfläche einer 2 d alten Probe, Unterteil, b) zugehöriges Oberteil, c) nachträglich abgelöste Stahloberfläche von a)

Der Flächenanteil mit Haftschleier und Betonausbruchsresten (Bruchformen fII + b) am gesamten Rissfeld wird für die länglichen, von parallelen Rissen definierten Felder mit 30 bis 60% abgeschätzt. An dem Bruchbild mit polygonalen Rissfeldern der zusätzlich getrockneten Proben R020 der Serie HE wurden die Flächenanteile mit Bruchform fI bzw. (fII + b) mittels CAD an 15 Rissfeldern abgemessen (siehe Abbildung 5.46). Die zentrale Fläche jedes Rissfeldes, an der deutlich Anhaftendes (Bruchform fII + b) sichtbar wird, beträgt im Mittel 41% der Gesamttrissfeldfläche.

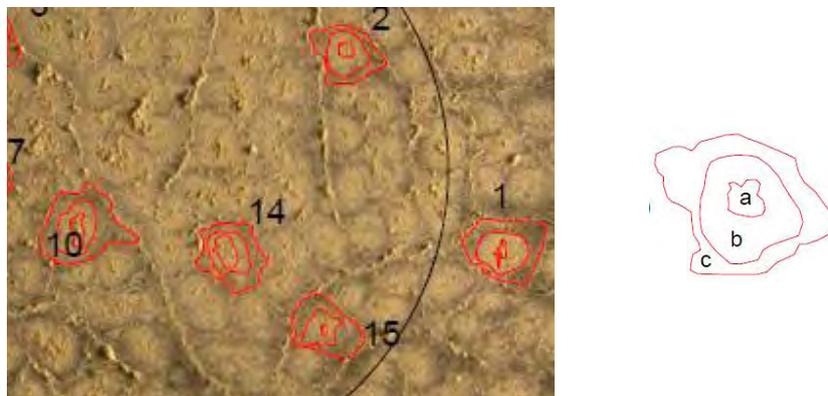


Abbildung 5.46: Vermessung der Flächenanteile mit Bruchformen fI (blank abgelöst, hier „c“) und fII + b (Anhaftendes, hier „a + b“) der polygonalen Rissfelder.

5.3.6 Raue Oberflächen, Proben ohne Verdunstungsschutz (OVS)

Bei rauen Proben OVS wird auch einerseits die übergeordnete Zonierung ähnlich der oben für Proben MVS beschriebenen sichtbar, andererseits treten Risse auf, die diese Bereiche nochmals „unterteilen“ (siehe Abbildung 5.47 und Abbildung 5.48).

Bei allen Proben zeigt sich wieder ein äußerster Ring (Zone A). Während bei Proben der Werkstoffkombination SRXEM in Zone A Betonbruch auftritt und an den Stahlteilen

sozusagen eine „Betonwulst“ entsteht, zeigt sich bei GRXEM und SRXDM vorwiegend Fugenversagen I. Hier ist der Ring breiter als bei den Proben MVS.



Abbildung 5.47: Bruchflächen der Werkstoffkombinationen a) SRXEM, b) GRXEM, c) SRXDM; obere Reihe: Probekörperoberseite, untere Reihe: Probekörperunterseite

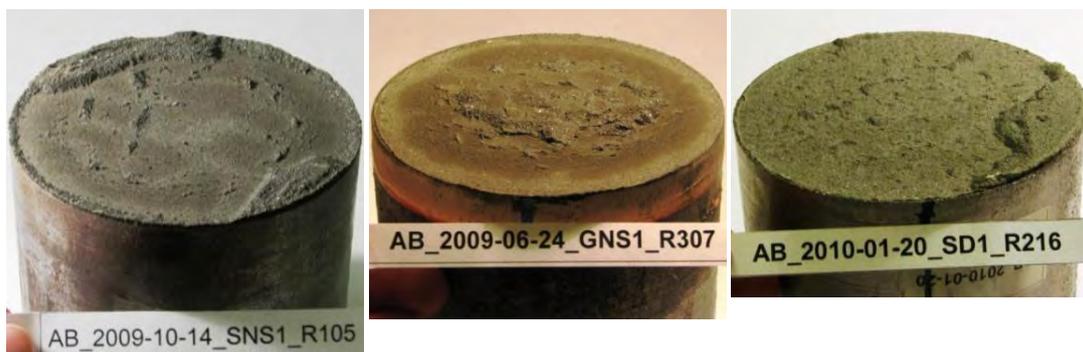


Abbildung 5.48: Bruchflächen der Werkstoffkombinationen a) SRXEM, b) GRXEM, c) SRXDM in schräger Ansicht

Meist ringförmig ist ein gleichmäßig ausgeprägter Haftscheier in Zone B um ein zentrales Feld mit Rissen angeordnet. In den Rissfeldern tritt Betonbruch mehr oder weniger stark ausgeprägt auf. Fugenversagen II überwiegt. Radialrisse sind schlecht erkennbar.

Die Risse bilden annähernd viereckige Rissfelder, manchmal auch fünfeckige oder sechseckige, meist in gedrungener Form. Die Rissbreiten sind schwer messbar, erscheinen aber gleichmäßiger als bei R0 Proben. Eine Zonierung wie bei den R0 Proben mit der Abfolge von blanken Bereichen, Haftscheier und Betonbruch ist undeutlich erkennbar. Vor allem entlang der Risse gibt es Betonausbrüche bzw. anhaftende Grate.

Rissbilder

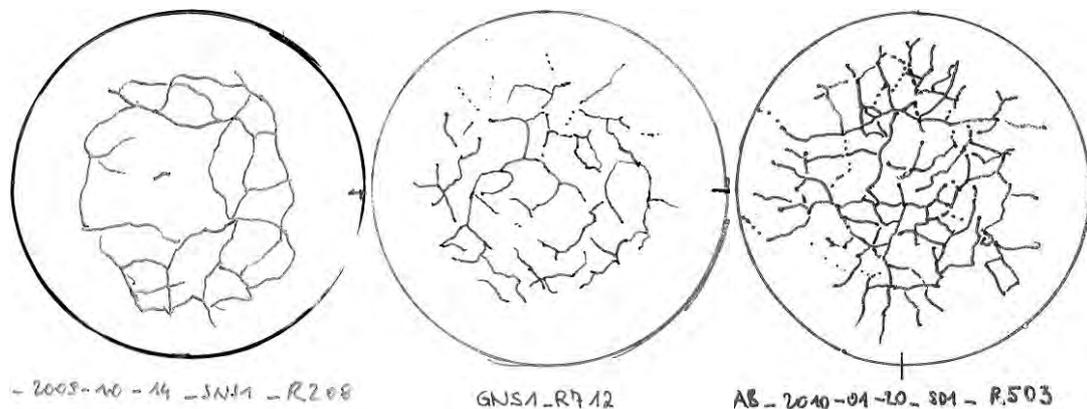


Abbildung 5.49: Rissbilder - Werkstoffkombinationen a) SRXEM, b) GRXEM, c) SRXDM

Wieder zeigt sich die an den Bruchflächen erkannte Zonierung auch an den Rissbildern (Abbildung 5.49), wenngleich die Risse in den Bruchflächen schwer erkennbar sind. Oft treten in den Bruchflächen senkrechte Bruchlinien auf, die auf die Risse zurückzuführen sind. Die Rissfelder erscheinen regelmäßiger als bei den R0 Proben und haben größere Rissabstände, siehe Tabelle 5.8.

5.3.7 Vergleich der ursprünglich und nachträglich abgelösten Bruchflächen

Bruchflächen, die im Zuge der Haftzugprüfung entstehen, zeigen immer deutlich am Untergrund anhaftenden UHPC oder Bindemittelstein. Die Flächen hingegen, die durch das nachträgliche Ablösen der UHPC-Schichten nach einigen Tagen austrocknender Lagerung frei gelegt werden, weisen einen Haftscheier auf, der weniger dick und dicht erscheint. Bei stückhaften Beton-Haftresten, die nachträglich leicht abgeschert werden können, zeigen sich darunter (ganz) blanke Stahl- oder Glasoberflächen (siehe auch die Beobachtungen an den Haftschubproben im Kapitel 5.6). Offensichtlich wirkt sich die Beanspruchungsart auf die Bruchform aus.

In Abbildung 5.50 und Abbildung 5.51 sind einige Beispiele dazu gezeigt. Im Zuge der austrocknenden Lagerung bilden sich bei diesen Proben auch sternförmig Risse in den bislang ungerissenen Schichten. Für die glatten Proben der Werkstoffkombination GR0EM-MVS wurde das ebenso beobachtet wie für den Beton-Haftrest der in Abbildung 5.51 gezeigten Probe. Die sternförmigen Risse sind äußerst fein (3-10 μm). An den glatten Proben treten nur 3 bis 5 solcher Risse in der ganzen Fläche auf, die die Betonschicht in 3 bis 5 etwa gleich große Anteile teilen (siehe dazu Abbildung 5.33 im Kapitel 5.3.3).

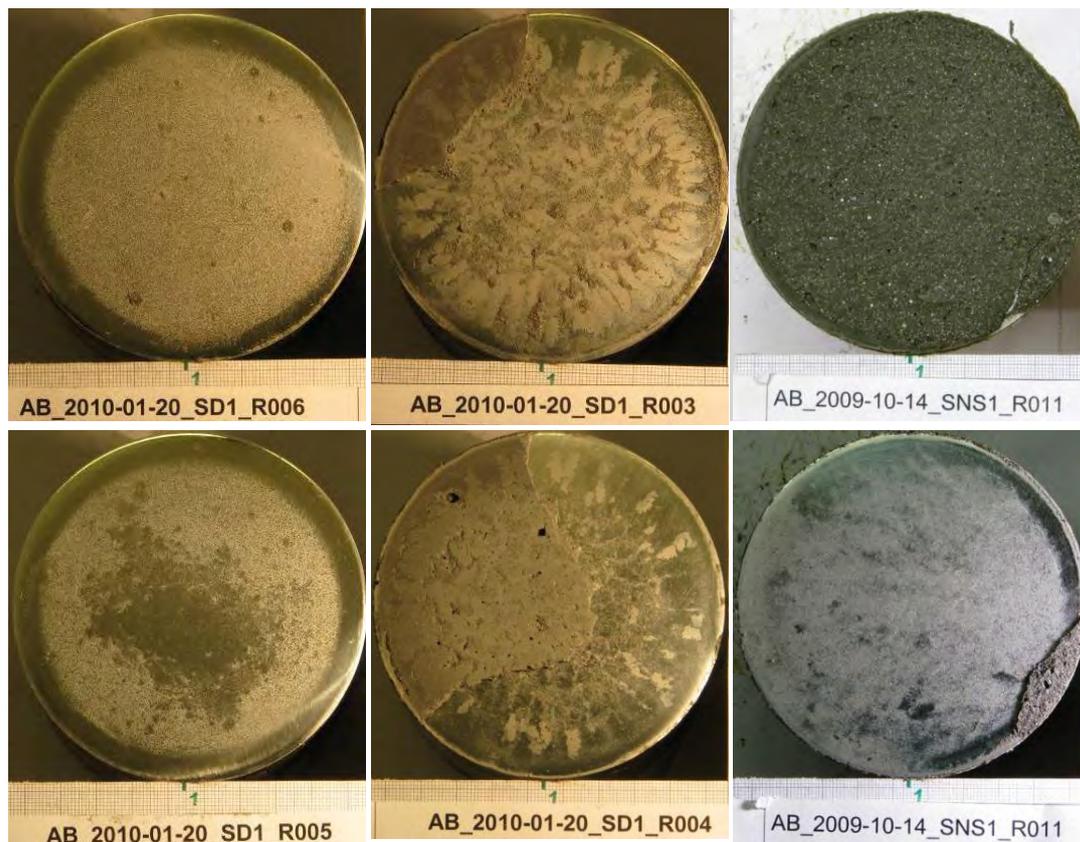


Abbildung 5.50: obere Reihe: ursprünglich abgelöste Bruchflächen, untere Reihe: nachträglich abgelöste Bruchflächen je einer Verbundprobe der Werkstoffkombinationen a) SDM-MVS, b) SDM-OVS, c) SEM-MVS

Anders zeigt es sich bei den rauen Proben MVS, die nachträglich einseitig oberflächlich austrocknen: Mehrere, kleinere Rissfelder entstehen, die Rissbreiten wurden stichprobenartig mit 16 μm (SR1-EV) und 50 μm (SR1-SD1-D) gemessen. Für diese rauen Proben wurde das Phänomen auch schon weiter oben beschrieben (vgl. Abbildung 5.17).

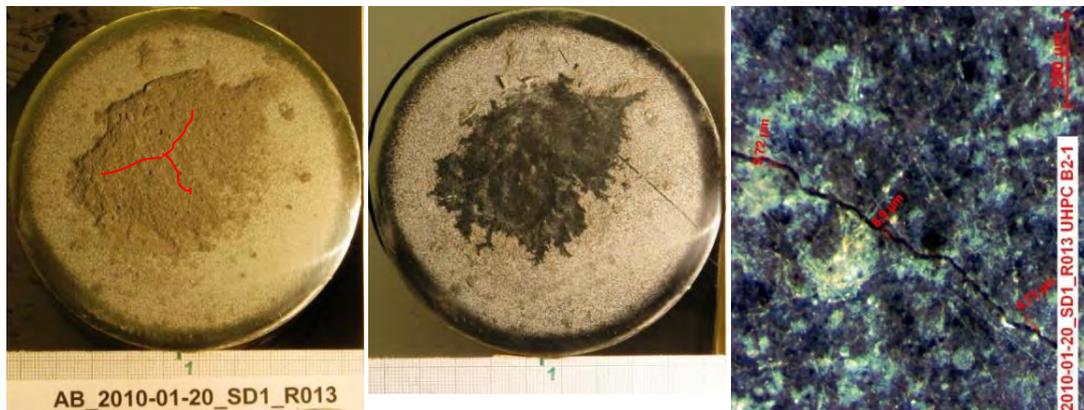


Abbildung 5.51: a) wie ursprünglich abgelöst, b) nachträglich entfernter Haftrest, c) Lichtmikroskopie eines Risses mit 9 µm Breite im Haftrest, die Risse sind in a) rot eingezeichnet

Fazit: Der Vergleich des anhaftenden Bindemittelsteins bei verschiedenen Werkstoffkombinationen, Lagerungsbedingungen und Beanspruchungsarten – siehe auch Kapitel 5.6, Bruchbildanalyse der Haftschubversuche – zeigt folgendes Ergebnis: Die Dicke und Dichte des Haftschleiers hängt vom verwendeten UHPC ($DM > EM$), vom Zeitpunkt der Ablösung und von der Beanspruchungsart ab. Wird die UHPC-Schicht unmittelbar nach der Haftzugprüfung abgelöst, was z.B. bei den Glasproben mit einem Stanley-Messer als „Keil“ zum Abspalten gelingt, so ist der Haftschleier dichter und dicker als unter den nach 1 bis 4 Tagen austrocknender Lagerung abgelösten Schichten. Zugbeanspruchungen in der Verbundfuge führen zur Ablösung in der Grenzflächenschicht mit anhaftendem Haftschleier, während Schubbeanspruchungen zu blanker Ablösung in der Kontaktfuge führen (siehe auch Kapitel 5.6).

5.3.8 Bruch- und Rissbildanalyse der Vorserien

Bruchbilder

In den Vorserien wurden Haftzugprüfungen an Glas und Stahl mit relativ biegeweichen, 20 mm dicken Stahlstempeln und Glasplatten, also in variierenden Versuchsaufbauten, durchgeführt. Der Einfluss des Versuchsaufbaues zeigt sich an den Bruchbildern. Biegeschubbrüche führen zu ungleichmäßigen, nicht deutlich wie oben beschrieben zonierten Bruchbildern. Die Bruchbilder sind wesentlich inhomogener, es zeigen sich bevorzugte Richtungen der anhaftenden Betonbruchstücke. Weniger Betonbruch und mehr Fugenbruch tritt auf (vgl. Abbildung 5.52).



Abbildung 5.52: von Biegeeffekten beeinflusste Bruchformen der Vorserien

Erst die Verwendung von massiven Stahlstempeln mit 100 mm Durchmesser und Höhe führte dazu, dass der Bruch nicht mehr von einer Verbiegung der Kontaktflächen oder von ungleichmäßiger Spannungsverteilung in der Fuge beeinflusst wird.

Rissbilder

Interessant ist in diesem Zusammenhang eine Beobachtung in der Haftzugversuchsserie GDAS1, die im Rahmen einer vom Autor betreuten Diplomarbeit durchgeführt wurde [Staudacher 2009]. Es wurden unsymmetrische Sandwich-Prüfkörper für Haftzugversuche von UHPC mit glattem Glas verwendet. Die Probekörper bestanden aus einer 2,5 mm dicken UHPC-Schicht zwischen einer glatten Glasplatte und einem aufgerauten Stahlstempel mit jeweils 20 mm Dicke analog dem Prüfkörper in Abbildung 5.18, Seite 128. Ein Teil der Proben wurde mit und ein Teil ohne Verdunstungsschutz gelagert. Planmäßig versagt die Fuge zwischen UHPC und Glas, während die abgelöste UHPC-Schicht auf dem rauen Stahlteil anhaften bleibt. Die abgelöste, spiegelglatte UHPC-Oberfläche zeigt sehr feine Risse (5 μm MVS, mind. 10 μm bei OVS mit einem dominierenden überbreiten Riss). Es sind nur bei diesen Proben radiale Risse bis zum äußeren Rand der Bruchfläche feststellbar. Bei keiner anderen Serie – alle anderen Serien waren mit symmetrischen Fugen hergestellt – sind radiale Risse im äußersten Ring (Zone A) zu beobachten gewesen.

Interpretation: Bei ausreichendem, starrem Verbund auf einer Seite der Sandwich-Probe und glatter Verbund-Kontaktfläche auf der anderen Seite, treten bis zum Rand Zwangsspannungen auf, die zum Reißen des Betons führen. Im Umkehrschluss für alle beidseitig glatten Proben ist zu sagen, dass im äußersten Ring (Zone A) wohl ein freies Verformen ohne Zwängung aufgetreten sein muss, ein Schlupf verbunden mit Relativverschiebungen zwischen UHPC und Untergrund.

5.3.9 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen der Bruch- und Rissbildanalyse

An den Bruchflächen und den Rissbildern lässt sich bei allen Werkstoffkombinationen eine Zonierung feststellen. Ein äußerster Ring, Zone A, ist rissfrei und meist in der Fuge abgelöst, er zeigt Bruchform „fI“ – glatt abgelöst. Ein weiter innen folgender Ring weist immer nur radiale Risse auf und zeigt anhaftenden Bindemittelstein (Zone B – „Haftschleier“), also einen Bruch in der Grenzflächenschicht – Bruchform „fII“. Ein zentrales Feld weist oft Betonbruch „b“ auf und zeigt ein verästeltes Riss-Netz.

Darin spiegelt sich der Spannungszustand in der UHPC-Schicht wider, vgl. auch Kapitel 5.4. Im zentralen Feld herrscht bis zur Rissbildung ein homogener, ebener Spannungszustand vor, in dem die Spannungen in alle Richtungen gleich sind. Die Schwinddehnungen sind hier vollständig behindert, es kann keine Relativverschiebungen von UHPC und Werkstoffoberfläche gegeben haben. Bei Proben OVS wird das Risskriterium erreicht, vgl. Kapitel 7.2.3. Es bilden sich im homogenen Spannungsfeld theoretisch lauter sechseckige Rissfelder aus. In Zone B sind Umfangsspannungen größer als radiale Spannungen, es bilden sich nur radial ausgerichtete Risse. Der äußerste Ring ist frei von Rissen (Zone A/B und Zone A). Hier sind die Spannungen geringer als die Zugfestigkeit des Betons. Zum Rand hin nehmen horizontale Spannungen zu Null ab, aber die Verbundspannungen in der Fuge und die Verformungen sind maximal. Bei glatten Proben treten freie (Rand-) Dehnungen auf, der UHPC löst sich in einer ringförmigen Fläche (Zone A) vom Untergrund blank ab und Relativverschiebungen finden statt.

Dass Risse entstehen, ist ein Beweis dafür, dass der Verbund – in dem Fall die Haftschubfestigkeit – bei allen Werkstoff-Untergründen ausreicht, um die Schwinddehnungen zu behindern und bei Proben OVS zu einem bestimmten Zeitpunkt Spannungen in der Größe der Betonzugfestigkeit hervorzurufen. Relativverschiebungen der UHPC-Schicht gegenüber dem Untergrund treten im Zentrum der Rissfelder also nicht auf. Ebenso wenig treten sie im zentralen Feld (Zone C) der ungerissenen Proben (MVS) auf.

In der Größe des zentralen Feldes spiegelt sich wider, wie gut der (Haftschub-) Verbund ist. Je kleiner das zentrale Feld, desto größer ist die Fläche der umliegenden Bereiche, die erforderlich ist, um die volle Dehnungsbehinderung einzuleiten. Tatsächlich ist das zentrale Feld bei der Werkstoffkombination mit glattem Glas GR0EM am kleinsten (46 mm), es folgt Stahl SR0DM (55 mm) und SR0EM (56 mm). Bei rauen Proben wird das Feld noch größer (GRXEM 57 mm, SRXEM 62 mm). Ausgenommen sind Proben der Mischung DM, unabhängig von der Rauheit ist das zentrale Feld immer etwa gleich groß (55 mm). Hier muss ein Parameter, der unabhängig von der Rauheit und dem Verbund ist, entscheidend für die Größe des Feldes sein. Dafür kommt die Scherfestigkeit des UHPC in der Grenzflächenschicht in Frage. Es kann angenommen werden, dass sich UHPC an der Grenzfläche lokal entmischt, siehe dazu spätere Überlegungen im Kapitel 6. Dass die Schicht von anhaftendem Bindemittelstein bei den Proben DM dicker und dichter ist als bei UHPC EM, untermauert diese Schlussfolgerung. Aus den Größen des zentralen Feldes lässt

sich folgern, dass die Haftverbundfestigkeit bei der Mischung EM im Allgemeinen stärker als die der Mischung DM, und auf Stahl stärker als auf Glas ausgebildet ist.

Details zur Zonierung

Der äußerste Ring („Zone A“), der bei glatten Proben ein Bereich blanker Ablösung und freier Dehnungen ist, hat bei der Mischung DM (7-8 mm⁷³) eine größere Breite als bei EM (3-4 mm), bei Glas ist er ein wenig breiter als bei Stahl. Die Breiten unterscheiden sich bei unterschiedlicher Lagerung, OVS bzw. MVS, nicht signifikant. Der Unterschied abhängig vom Beton korreliert mit dem unterschiedlichen Verformungsverlauf während der Erhärtung. DM erhärtet schneller und erstarrt etwas früher als EM, vgl. Kapitel 4.1.6.

Auf hohe Randspannungen in der Betonscheibe, die zum Verbundverlust führen können, wird im nächsten Kapitel eingegangen. In den ersten Stunden, wenn der obere Stempel noch nicht freigegeben ist, könnte in Zone A bei glatten Proben auch das behinderte Dickschwinden zur blanken Ablösung beitragen.

Bei rauen Proben findet die Ablösung in dieser Zone entweder unmittelbar in der Kontaktfläche statt oder es finden sich auch Haftreste mit Betonausbruch. Bei der Werkstoffkombination SRXEM OVS tritt im äußersten Ring interessanterweise vorwiegend eine Beton-Bruchwulst auf. Durch die frühe Austrocknung, das „Antrocknen“ des UHPC am Rand, scheint sich die spezifische Adhäsion am Probenrand zu verstärken, ein naher Kontakt entsteht. An rauen Oberflächen kann auch eine Klemmwirkung durch das Schwinden entstehen.

Auch bei der im Zuge der Serie HE nach 2 Tagen geprüften Probe der Werkstoffkombination SR0EM MVS tritt gerade in Zone A ein Betonbruch auf. In höherem Probenalter verschiebt sich der Betonbruch ins Innere der UHPC-Schicht und ins Zentrum, während außen blanke Ablösung in Zone A stattfindet. Es kann daraus geschlossen werden, dass sich der äußerste Ring der UHPC-Schicht an glatten Proben erst nach einiger Zeit, zwischen zweiten und siebentem Tag, durch (autogene) Schwindeinflüsse ablöst. Das bestätigen auch die Beobachtungen zur Rissentwicklung (vgl. Kapitel 6.2), die zeigen, dass mit der Zeit am äußersten Ring ein kapillarer Spalt auftritt.

Der effektive Durchmesser der Haftung beträgt somit bei glatten Proben nur 90-94 mm und es reduziert sich der anhaftende Flächenbereich bei den glatten Proben auf 81 bis 88%, vgl. Tabelle 5.7. Bei den rauen Glasproben GRXEM-OVS und der Werkstoffkombination SR1DM-OVS sowie SR2DM-OVS zeigt sich ein breiter, großteils in der Fuge abgelöster Bereich, der wahrscheinlich auch nicht zur Haftung beiträgt (Reduktion des effektiven Haft-Durchmessers bei GRXEM-OVS auf 84-86 mm). Bei den rauen Stahlproben SRXEM treten sowohl Fugenbruch als auch stellenweiser Betonbruch in der Zone A auf. Bei den Proben MVS ist daher ein reduzierter Durchmesser nicht eindeutig abzuschätzen und bei SRXEM-OVS ist der äußerste Ring gar nicht in der Fuge abgelöst (Betonbruchwulst).

⁷³ ausgenommen SDR5DM: Zone A nur 2 mm breit!

Rissbilder

Während im äußersten Ring (Zone A) keine Risse auftreten, finden sich im ringförmigen Bereich B nur radiale Risse und im zentralen Feld unterschiedliche Rissmuster. Bei homogenen Schwindbedingungen, homogenem Material und daraus resultierendem homogenen Spannungsfeld bilden sich nach dem Prinzip des Energieminimums theoretisch sechseckige Rissfelder mit Winkeln von 120° zwischen zusammentreffenden Rissen aus. Unter inhomogenen Bedingungen und wenn das schwindinduzierende Trocknen nach der Erstrissbildung weiter fortschreitet, bilden sich weitere Risse normal auf die ersten Risse aus, sodass orthogonale Rissfelder entstehen, vgl. Kapitel 2.7.4 und 7.2.4.

Praktisch sind gleichförmige, polygonale Rissfelder an den Proben SR0DM und den zusätzlich getrockneten Proben der Serie HE mit einem Prüfalter von 226 Tagen zu beobachten. Die Rissfelder an den meisten rauen Proben OVS sind annähernd gleichförmig. An Proben SR0EM und GR0EM und einigen rauen Proben treten dominierende, die Probe querende, breite Risse auf, die Rissfelder sind ungleichförmig und meist viereckig. Im Fall solcher Hauptrisse sind auch weniger breite Nebenrisse, die orthogonal auf die Hauptrisse stehen, zu finden. Hier war das Spannungsfeld nicht homogen oder auch das Material inhomogen und wies Störstellen auf. Tatsächlich finden sich oft große Luftblasen im Verlauf der Hauptrisse.

Aus den Rissmustern der glatten Proben kann geschlossen werden, dass die Rissbildung bei Proben der Mischung EM in mehreren Zeitschritten, bei Proben der Mischung DM zu einem Zeitpunkt stattgefunden hat. Dies ist ein wesentlicher Unterschied der Betone.

Die Rissabstände sind von der Rauheit abhängig. Glatte Proben zeigen kleinere Rissfelder als raue Proben (siehe dazu auch Kapitel 7.2.4). Die Rissbreiten können schwer repräsentativ vermessen werden. Sie schwanken, besonders bei glatten Proben, in sehr weiten Bereichen sowohl am einzelnen Riss als auch untereinander. Offenbar gibt es bei den glatten Proben breitere Hauptrisse und schmälere, später entstandene Nebenrisse.

Zwischen den Rissen ist auch eine Zonierung feststellbar. Bei den glatten Proben ist das eine Abfolge von Bereichen ohne Haftung (Bruchform fI, blank abgelöst in der Kontaktfläche, Zone A), mit anhaftendem Bindemittelstein (Bruch fII in der Grenzflächenschicht, Zone B) und mit anhaftendem Beton (Kohäsionsversagen b im Betoninneren, Zone C). Bei den rauen Proben ist diese Zonierung insofern auch erkennbar, als an den Rissen ein Grenzflächen naher Bruch mit freigelegtem Untergrund und zwischen den Rissen ein dickerer Belag aus anhaftendem Bindemittelstein und Betonbruch sichtbar wird.

Für die Haftfestigkeit verantwortliche Flächenanteile

Wie schon beschrieben trägt die Zone A ab dem 2. bis 7. Tag der Erhärtung bei glatten Proben nicht mehr zur Haftung bei, da sich ein kapillarer Randspalt auszubilden beginnt. Er wurde, wie in Kapitel 6.2 beschrieben, sowohl an Glas-UHPC-Glasproben als auch an Stahl-UHPC-Schichten beobachtet. Bei rauen Proben hingegen muss auch Zone A zumindest teilweise für die Haftung verantwortlich gemacht werden.

Ob die Zone C, das zentrale Feld, für die Haftung alleine verantwortlich sein kann und Zone B gar nicht zur Haftfestigkeit beiträgt, wird an Proben MVS mit Hilfe der Haftzugprüfwerte und Bruchflächenbetrachtung ermittelt. In der Werkstoffkombination SR0DM-MVS (siehe Serie SD1, Kapitel 5.1.2) zum Beispiel, findet sich bei zwei Proben nur Haftschleier in der Bruchfuge, bei den beiden anderen Proben Haftschleier (Zone B) und Betonausbruch (Zone C). Trotzdem weisen alle Proben annähernd gleich große Prüfwerte auf. In vielen Fällen, besonders bei SRXDM und GRXEM, wird sichtbar, dass auch bei fugennahe Bruch sehr hohe Festigkeiten, die der Zugfestigkeit des Betons entsprechen, erreicht werden. Es lässt sich damit ausschließen, dass nur Zone C alleine wirkt, vielmehr scheint Betonbruch wie in Zone C und Bruch in der Grenzflächenschicht wie in Zone B mit annähernd gleich hohen Prüffestigkeiten einher zu gehen. Auch die grenzflächennahe Zone hat also vor allem bei den rauen Proben eine gleich hohe Festigkeit wie das Beton-Innere. Bei den glatten Proben scheint die grenzflächennahe Zone zumindest stellenweise schwächer zu sein als das Beton-Innere. Die Bruchflächen SR0EM-MVS weisen darauf hin. Hier treten größere Bereiche von Fugenbruch in der Grenzfläche (fII) in den Betonbruchflächen auf.

Hypothetisch wäre es möglich, dass bei Proben OVS durch die Rissbildung ganze Zonen der Kontaktfläche nicht mehr an der Haftung mitwirken. Das kann aber nicht bestätigt werden. Zone C ist zu klein, als dass sie alleine für die geprüften Haftzugspannungen verantwortlich gemacht werden könnte. Auch bei den Proben OVS wirken also die Zonen B + C an der Haftung mit.

5.4 Analyse der Eigenspannungen im Probekörper und in Rissfeldern

Mit den im Folgenden dargestellten FE-Berechnungen werden die Eigenspannungen im Probekörper und in Rissfeldern für „Sandwich“-Proben und für einseitig oberflächlich austrocknende Proben analysiert.

5.4.1 Berechnungsgrundlagen

Die Spannungen in der UHPC-Schicht der Probekörper, die sich durch die behinderte Schwindverformung aufbauen, wurden mittels FEM Berechnung unter der Annahme eines linear elastischen Materialverhaltens und starren Verbundes mit dem Programm „Abaqus“ analysiert⁷⁴.

Wie im vorhergehenden Kapitel beschrieben, kommt es in Probekörpern, die starkem Schwinden unterliegen, zur Rissbildung in charakteristischer Form. Im idealisierten Fall eines homogenen Spannungsfeldes bilden sich lauter sechseckige Rissfelder mit gleichem

⁷⁴ Im Anhang werden auch FEM-Berechnungen des Lastfalles der Belastung beim Haftzugversuch mit dem Lastfall Schwinden überlagert. Die Ergebnisse sind allerdings für die Fragestellung der Arbeit nicht relevant.

Rissabstand bzw. Durchmesser. Die Spannungen und Verformungen in einzelnen Rissfeldern wurden für eine Berechnung wie auch die UHPC-Schichte der Probekörper selbst vereinfacht kreiszylindrisch mit entsprechend geringerem Durchmesser- (= Rissabstand) zu Dickenverhältnis $d: t_c$ modelliert.

Der 3-dimensionale kreiszylindrische Probekörper kann wegen der Rotationssymmetrie hinsichtlich Geometrie und Belastung mit geeigneten finiten Volumenelementen in einer Ebene modelliert werden. Es reicht aufgrund der mehrfachen Symmetrie aus, ein Viertel des zylindrischen Probekörpers im Schnitt zu modellieren (siehe Abbildung 5.53).

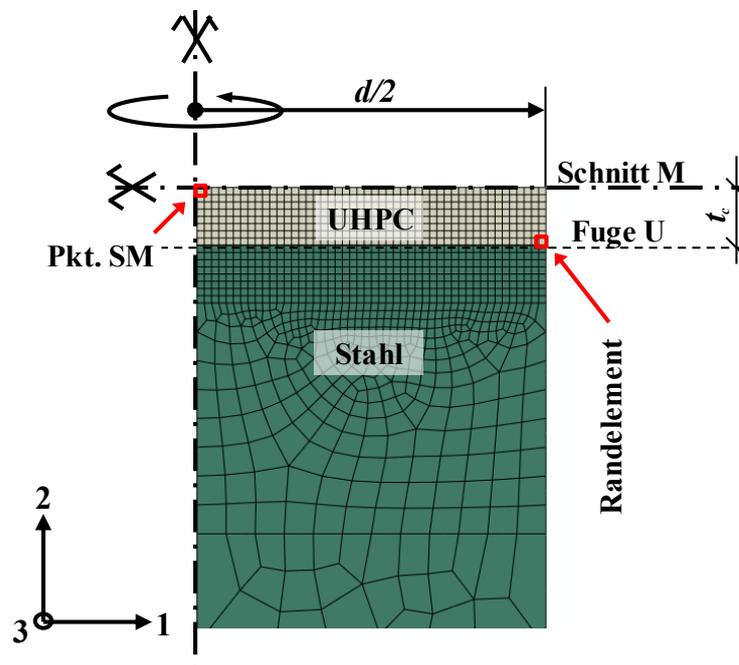


Abbildung 5.53: Schema zum FE-Modell und Lage des Schnittes SM (Schnitt M), der Verbundfuge (Fuge U) und ausgewählter Punkte: Pkt. SM und Randelement

Die Ergebnisse von Spannungen und Verformungen werden in einem Polarkoordinatensystem ermittelt, so dass Werte in radialer (1 oder r), vertikaler (2 oder z) und tangentialer (3 oder θ) Richtung der kreiszylindrischen UHPC-Scheibe zur Verfügung stehen. Für alle Berechnung wird linear elastisches Material von UHPC und Stahl mit den in Tabelle 5.9 angegebenen Kennwerten angenommen.

Die Schwindverformung wird durch eine aufgebrauchte Temperaturbelastung simuliert. Als „Einheits“-Schwindverformung werden $0,1\%$ (= $100 \mu\text{m}/\text{m}$) durch eine im ersten Fall über die Dicke gleichmäßige Temperaturbelastung von -10°K ($\alpha T=10\text{E}-5$) angesetzt. Die angegebenen Spannungen und Dehnungen sind also mit einem Multiplikationsfaktor für tatsächlich auftretendes Schwinden zu vervielfachen. In einem am Ende des Abschnitts gezeigten zweiten Fall wird ein Temperaturgradient von -10°K an der Oberfläche bis 0°K

an der Verbundfläche über die Schichtdicke angesetzt, um ein ungleichmäßiges Schwinden über die Dicke zu modellieren.

Tabelle 5.9: linear elastische Materialkennwerte für FEM-Berechnung

	E-Modul	Querkontraktionszahl	Wärmeausdehnungskoeffizient
			α_T
	N/mm ²	[-]	m/m [°] K
UHPC	45.000	0,2	10 ⁻⁵
Stahl	210.000	0,2	nicht relevant

Der angenommene Wert von 0,1‰ ist im Vergleich zu den Messergebnissen der Schwindrinnenmessungen ein geringes Schwindmaß, vgl. Kapitel 4.1.6 bzw. Tabelle 4.9. Da allerdings im Probekörper Kriechen und Relaxation auftritt, werden die spannungsinduzierenden Verformungen beträchtlich reduziert (auf 10 - 25% des Ausgangswertes, vgl. [Schachinger 2007]). Zudem kommt es für das anzusetzende Schwindmaß auf das betrachtete Zeitintervall und auf die zugehörigen zeitabhängigen Materialkennwerte an. Die angenommene Schwindverformung von 0,1‰ ist also eine reale Größenordnung.

Bei voller Dehnungsbehinderung und Vernachlässigung von Kriechen und Relaxation ergäbe sich in einer unendlich ausgedehnten UHPC-Schicht gemäß Berechnung (5.2) eine maximale horizontale Zwangs-Zugspannung $\sigma_r = \sigma_\varphi = S_{11} = S_{33}$ von

$$\sigma_r = \sigma_\varphi = \frac{E}{1 - \nu} \cdot \varepsilon_s = \frac{45000}{(1 - 0,2)} \cdot 0,0001 = 5,6 \text{ N/mm}^2 \quad (5.2)$$

Dieser Wert wäre mit einem vielfachen Schwindmaß entsprechend größer oder kleiner. Jedenfalls ist durchaus plausibel, dass die Zwangsspannungen bei voller Dehnungsbehinderung zu einem bestimmten Zeitpunkt und bei Berücksichtigung der zeitabhängigen Materialgrößen $E_{eff(t)}$ und $\varepsilon_s(t)$ die Betonzugfestigkeit erreichen und Risse entstehen, wie im Kapitel 7.2.1 dargelegt wird. Zur Einleitung dieser Zwangs-Zugspannungen im UHPC-Schicht-Inneren müssen vom Rand der Proben ausgehend entsprechende Verbundschubspannungen in der Fuge auftreten.

Zu den Ergebnisdarstellungen: Es werden Plots der Spannungen in radialer (S11), Umfangs- (S33) und vertikaler Richtung (S22) sowie der Schubspannungen (S12) dargestellt. Vom Probekörper wird unter Ausnutzung der Symmetrien nur ein Viertel berechnet und dargestellt. Bei Körpern mit großem d/t_c -Verhältnis („schlanke Schichten“) wird davon teilweise nur ein Ausschnitt vom Rand Richtung Mitte gezeigt, in dem sich Spannungen sichtbar ändern, da die Spannungen im zentralen Bereich annähernd konstant weiter laufen. Der Spannungsverlauf in der Verbundfuge (Fuge U) und im Schnitt in der horizontalen Mittelebene (Schnitt SM) wird zusätzlich dargestellt.

Im elektronischen Anhang A.2.2 sind die Berechnungsergebnisse einiger Varianten von Verbundproben mit unterschiedlichem d/t_c -Verhältnis umfangreich dargestellt. Im Folgenden werden nur die wesentlichen Ergebnisse gezeigt und diskutiert.

5.4.2 Eigenspannungen in UHPC-Schichten mit beidseitig behindertem Schwinden

Verbundprobekörper mit $d/t_c = 40:1$

Zunächst werden die Ergebnisse der Berechnungen von Verbundkörpern mit 100 mm Durchmesser und 2,5 mm Dicke der UHPC-Schicht, also der Geometrie der Probekörper der Hauptversuchsserien, gezeigt: siehe Abbildung 5.54 bis Abbildung 5.57.

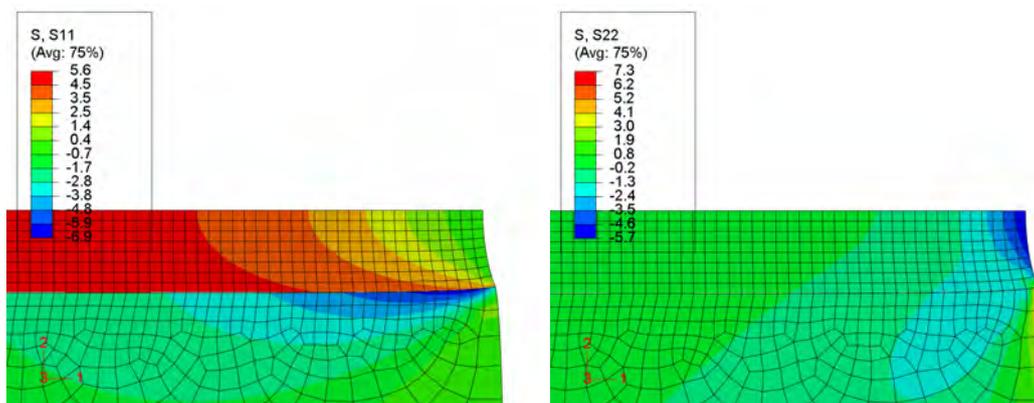


Abbildung 5.54: Spannungen in radialer (S11) und vertikaler Richtung (S22), $d/t_c=40:1$.

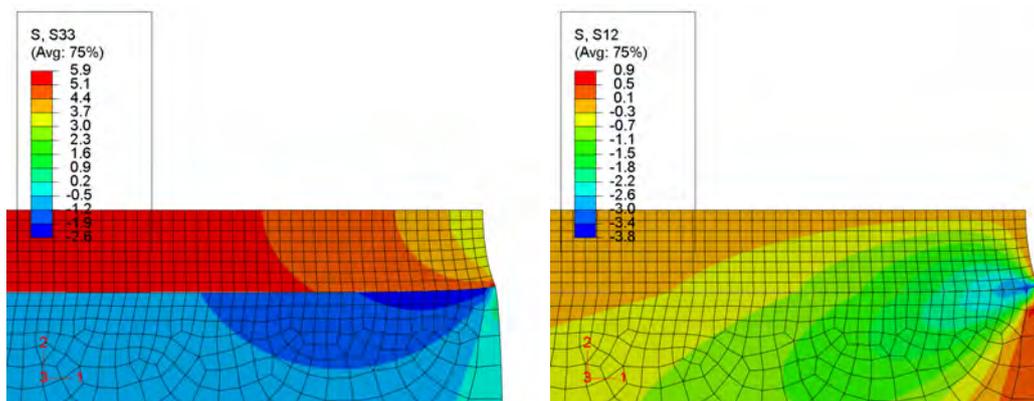


Abbildung 5.55: Spannungen in Umfangsrichtung (S33) sowie Schubspannungen (S12) an Verbundkörpern mit $d/t_c=40:1$.

Deutlich wird, dass Spannungsspitzen in der Verbundfuge am äußeren freien Rand auftreten. Schubspannungen (S12) in der Fuge sind in geringster Entfernung vom freien Rand schon maximal groß, klingen aber radial nach innen rasch ab. Es treten auch vertikale Spannungen (S22) in der Fuge auf: Am äußersten Rand zeigen sich abhebende Zugspan-

nungsmaxima, die vertikalen Spannungen schlagen zum Zentrum hin bald in Druckspannungen um und klingen ab. Die Verbundschubspannungen leiten horizontale Zwangsspannungen (S11 und S33) ein, die sich in der UHPC-Schicht vom Rand her aufbauen und im Bereich des Probekörperzentrums das maximal mögliche Niveau für eine vollständige Dehnungsbehinderung, in unserem Fall 5,6 N/mm² erreichen. Bemerkenswert ist der Verlauf der tangentialen Spannungen (S33) im Vergleich zu den radialen Spannungen (S11). S11 und S33 sind in der Mitte über die ganze Dicke und bis zu einer gewissen Entfernung zum Rand hin gleich groß. Nach außen nehmen S11 und S33 unterschiedlich stark ab. Die radialen Spannungen S11 sind außen gleich null während Ringzugspannungen S33 auch am Rand auftreten. Im Beispiel betragen die freien Dehnungen am „Äquator 0,1‰“. Der äußere Rand verformt sich konkav nach innen.

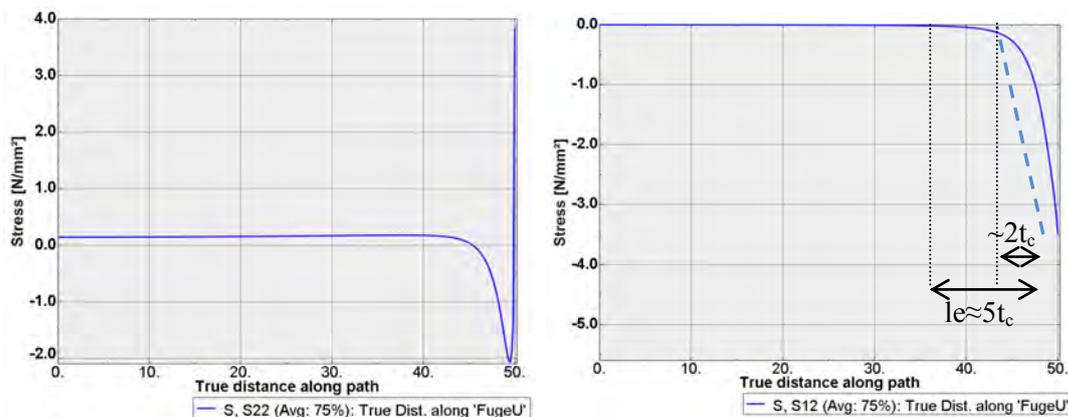


Abbildung 5.56: a) S₂₂ vertikale- und b) S₁₂ Schub-Spannungen in der Verbundfuge („Fuge U“)

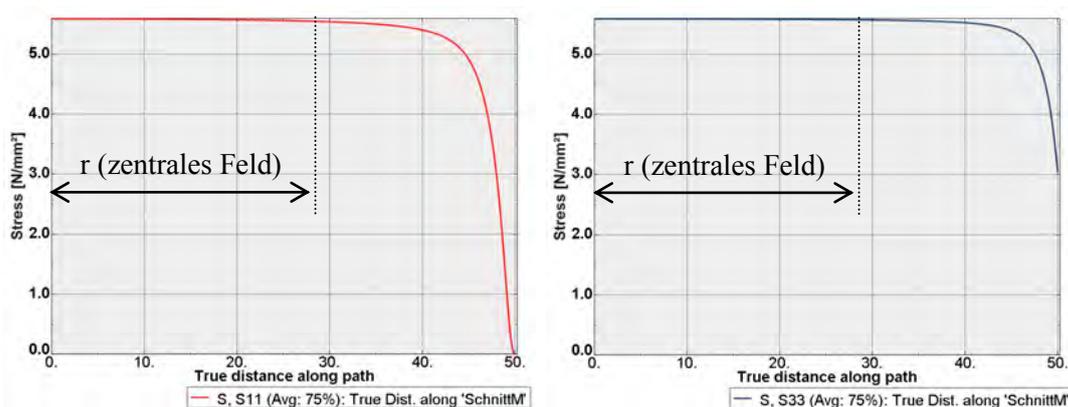


Abbildung 5.57: a) S₁₁ radiale-, b) S₃₃ Umfangs-Spannungen in horizontaler Mittelebene („Schnitt M“) der UHPC-Schicht mit $d/t_c=40:1$

In einem Bereich um das Zentrum sind also radiale und tangentiale Zwangsspannungen maximal und gleich groß, S₁₁=S₃₃. Im Grundriss betrachtet liegt ein zentrales Kreisfeld

mit homogener Spannungsverteilung vor. Für das d/t_c -Verhältnis 40:1 hat dieser Kreis einen Radius $r_{homogen}$ von 25-30 mm bzw. ist $r_{homogen} = 0,55 \times r_{probe}$. In einem ringförmigen Bereich weiter außen ist S33 immer größer S11. Das erklärt, warum in einem äußeren Ring nur radial ausgerichtete Risse zu beobachten waren.

Das zentrale Feld kann mit einer aufgespannten Membran verglichen werden, in der in allen Richtungen gleiche Spannungen auftreten. Sie wird quasi durch einen äußeren Ring der UHPC-Schicht mit bestimmter Breite durch kontinuierliche flächenhafte Lagerung aufgespannt, in dem über die Verbundwirkung in den Kontaktflächen die volle Dehnungsbehinderung eingeleitet wird. Die Ringbreite, die notwendig ist, das zentrale -Feld „aufzuspannen“ hängt vom Verbund in der Kontaktfläche und der Dicke der Schicht im Verhältnis zum Durchmesser ab.

Verbundprobekörper mit variiertem d/t_c

In weiterer Folge wird untersucht, wie das Verhältnis von Durchmesser zu Dicke die Spannungsverläufe in einer UHPC-Schicht, insbesondere einem Rissfeld, beeinflusst. Die Rissfelder haben je nach Werkstoffkombination einen Rissabstand von 5 bis 15 mm bei konstanter Dicke von 2,5 mm (siehe Tabelle 5.8 auf Seite 155). Diese Rissfelder werden näherungsweise kreisrund modelliert.

Beispielhaft sind die Ergebnisse für den Fall $d: t_c=2:1$ dargestellt (Abbildung 5.58 bis Abbildung 5.61). Das entspricht dem Fall der beobachteten Rissfeldgeometrie von rund 5 mm Rissabstand bei einer Schichtdicke von 2,5 mm⁷⁵. Weitere Berechnungen für variierende d/t_c -Verhältnisse finden sich im elektronischen Anhang A.2.2.

Es zeigt sich, dass die abhebende vertikale Randspannung S22 mit abnehmendem d/t_c -Verhältnis zunimmt, ihr Einfluss mit einem ins Negative (Druckspannung) umschlagenden Bereich der Kurve reicht weit ins Probeninnere. Der Maximalwert der Schubspannungen S12 in der Verbundfuge ist etwa gleich groß wie beim oben gezeigten Fall mit weitaus größerem d/t_c . Der Schubspannungsverlauf ändert sich aber völlig, er entspricht beinahe einer Geraden. Die Schubspannung nimmt linear über die gesamte Verbundfuge bis zur Mitte hin ab. Die Summe der Schubspannungen ist also in diesem Fall etwa zweifach größer als für den Fall der dünnen Schicht oben mit $d/t_c = 40:1$.

Es bildet sich kein zentrales Kreisfeld mit homogenem Spannungszustand mehr aus. Der Bereich mit gleichen radialen wie Umfangsspannungen (S11=S33) reduziert sich auf einen Punkt im Zentrum. Im Probekörpermittelpunkt beträgt diese Zwangsspannung 2,0 N/mm², im Mittelpunkt der Verbundfuge („Fuge U“) erreicht sie theoretisch den Wert der Spannung bei voller Dehnungsbehinderung, 5,6 N/mm².

⁷⁵ Es wurde das Verhältnis $d: t_c=2:1$ mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Schichtdicke von 50 mm modelliert, um die Fuge wie für $d: t_c=40:1$ mit einem Radius von 50 mm plotten zu können und einen direkten Vergleich zu ermöglichen (50 mm ist also wie ein Einheitsradius aufzufassen).

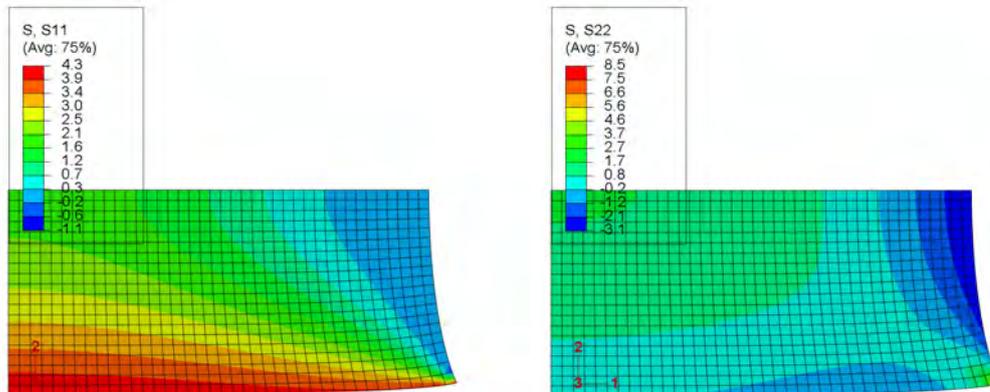


Abbildung 5.58: Spannungen in radialer (S11) und vertikaler Richtung (S22), $d/t_c=2:1$.

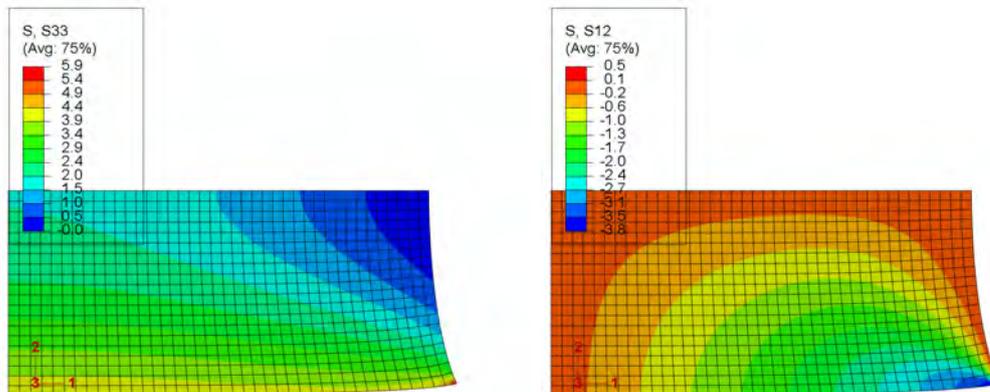


Abbildung 5.59: Spannungen in Umfangsrichtung (S33) und Schubspannungen (S12) an Verbundkörpern mit $d/t_c=2:1$.

Die Spannungen sind über die Schichtdicke t_c also nicht mehr konstant wie im zentralen Feld der Verbundkörper mit $d/t_c=40:1$. Die auftretenden Hauptzugspannungen im Zentrum des Probekörpers sind geringer als entlang der Verbundfuge. Die Schwindverformungen in der Probekörpermitte sind nicht voll behindert.

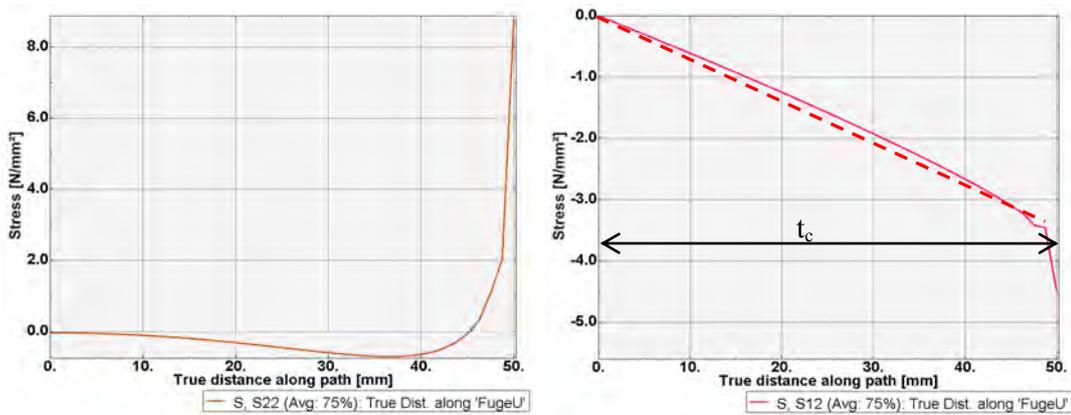


Abbildung 5.60: a) S₂₂ vertikale- und b) S₁₂ Schub- Spannungen in der Verbundfuge („Fuge U“) bei $d/t_c=2:1$

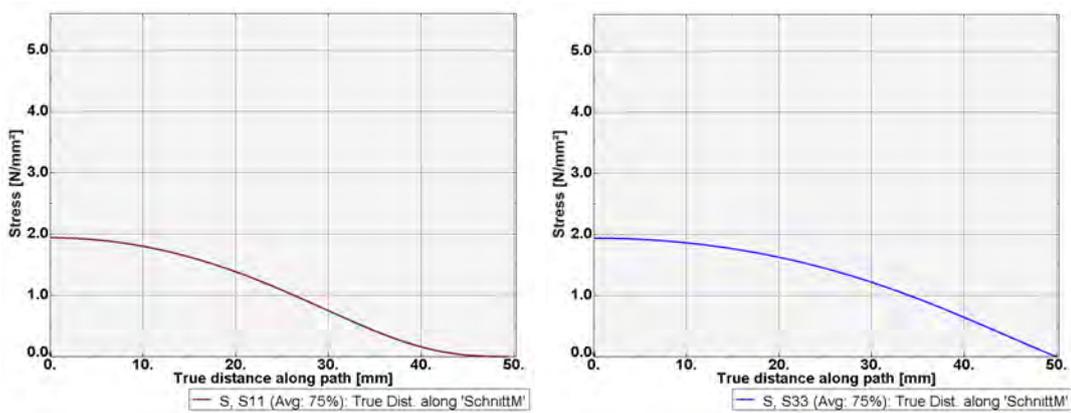


Abbildung 5.61: a) S₁₁ radiale-, b) S₃₃ Umfangs- Spannungen in horizontaler Mittelebene („Schnitt M“) der UHPC-Schichte mit $d/t_c=2:1$

Der Schubspannungsverlauf S₁₂ in der Verbundfuge, die Größe der Randzugspannung S₂₂ sowie die Ausmaße des zentralen Bereiches mit einem homogenen Spannungszustand und voller Dehnungsbehinderung in der UHPC-Schicht sind also vom Verhältnis Durchmesser zu Dicke abhängig. In Abbildung 5.62 sind die Ergebnisse für die genannten Spannungen in ausgewählten Punkten (gemäß Abbildung 5.53) in Abhängigkeit unterschiedlicher d/t_c Verhältnisse dargestellt.

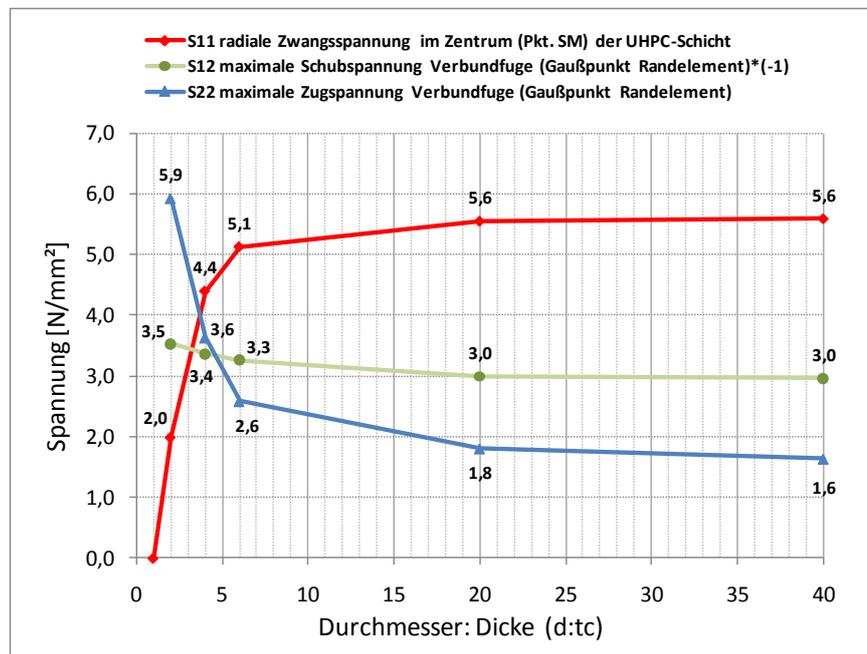


Abbildung 5.62: Spannungen bei behindertem Schwinden in ausgewählten Punkten in Abhängigkeit verschiedener d/t_c -Verhältnisse

Während die maximalen Schubspannungen S12 in der Fuge mit kleiner werdendem d/t_c -Verhältnis nur wenig größer werden, wachsen die abhebenden Randzugspannungen S22 in der Fuge stark an. Die (horizontalen) Zwangsspannungen in der UHPC-Schicht werden durch die Schubspannungen in der Verbundfuge eingeleitet. Die radiale Verbundeinleitungslänge l_e beträgt $4-6 \times t_c$ ⁷⁶ bei schlanken Schichten mit $d/t_c > 10:1$. Bei $d/t_c < 10:1$ überschneiden sich die Verbundeinleitungsbereiche. Die maximalen Zwangsspannungen bei voller Dehnungsbehinderung, in unserem Fall $5,6 \text{ N/mm}^2$, können bei schlanken Schichten vollständig eingeleitet werden, vgl. Abbildung 5.56. Mit kleiner werdendem d/t_c nehmen die Zwangsspannungen, z.B. S11, ab, das zentrale Feld mit dem homogenen Spannungszustand wird immer kleiner bis es gänzlich verschwindet. Die Verbundschubspannungen werden in gedrungenen Rissfeldern ($d/t_c < 10:1$) über die ganze Kontaktfläche aktiviert, eine volle Dehnungsbehinderung wird dabei nicht mehr aufgebaut, das zentrale Feld reduziert sich bei sehr kleinen Rissfeldern auf einen Punkt (mit $S11=S33$).

Umgekehrt weisen relativ dünne Schichten aus UHPC einen ausgedehnten zentralen Bereich auf, in dem ein homogener Spannungszustand vorherrscht und die Dehnungen voll

⁷⁶ Etwa dasselbe gibt [Haardt 1991], p.83, für den Lasteinleitungsbereich von zementgebundenen Reparaturschichten auf Beton, die einseitig verformungsbehindert sind, an: $l_e \approx 4 \times t_c$ (Schichtdicke t_c). Siehe auch Kapitel 2.6.3.

behindert sind. Die Verbundschubspannungen erstrecken sich mit $l_e = 4-6 \times t_c$ nur über einen kurzen Bereich vom Rand ins Innere in der Kontaktfläche.

Schlussfolgerungen - Spannungsverlauf und Rissbildung

Der an den Riss- und Bruchbildern der rauen Proben mit dem d/t_c -Verhältnis von 40:1 beobachtete Radius des „zentralen Feldes“ stimmt mit 31 mm mit dem rechnerischen, in Abbildung 5.57a abgelesenen Radius von rund 30 mm gut überein. Es kann daraus geschlossen werden, dass bei rauen Proben der Werkstoffkombination SRXEM und GRXEM ein voller Verbund vorliegt und die „übergeordnete Zonierung“ der Bruchbilder von den Zwangsspannungen im Probekörper abhängt. Bei den Bruchbildern der glatten Proben mit der Werkstoffkombination GR0EM bzw. SR0EM zeigt sich ein geringerer Radius des zentralen Feldes (23 bzw. 28 mm) als der rechnerische. Das weist darauf hin, dass kein voller, starrer Verbund vorliegt, sodass sich die volle Dehnungsbehinderung erst bei größerer Verbundeinleitungslänge aufbaut. Die Verbundeinleitungslänge ist verbunden mit Schlupf in der Fuge also größer als $4-6 \times t_c$.

Der Radius des zentralen, homogenen Spannungsfeldes einer Verbundprobe mit einem d/t_c Verhältnis von 20:1 kann mit den vorliegenden Daten mit $r_{homogen} = 0,4 \times r_{probe}$ abgeschätzt werden. Eine Versuchsserie an UHPC-UHPC Verbundproben mit einem r_{probe} von 25 mm, die außerhalb des Umfangs dieser Arbeit im Rahmen eines Studentenprojektes durchgeführt wurde [Marjanen 2010], bestätigt die Schlussfolgerungen und zeigt bei gutem Verbund den Radius des zentralen Feldes mit $r_{homogen} = 0,4 \times 25 = 10$ mm.

Es stellen sich also bei abgeschlossener Rissbildung neue geometrische Verhältnisse mit relativ dicken UHPC-Schichten relativ zum Rissfeld-Durchmesser ein. In diesen Schichten treten Spannungen, die die Zugfestigkeit erreichen können, bei dem theoretisch angenommenen guten, starren Verbund nur nahe den Kontaktflächen in einer Grenzflächenschicht auf. Es werden sich keine weiteren durchgehenden Risse mehr bilden. Es ist gut vorstellbar, dass in der Grenzflächenschicht mit großer Dehnungsbehinderung Mikrorisse auftreten. Im Analogieschluss zum Betonstahl mit Mikrorissen an den Rippen kann daraus gefolgert werden, dass so eine verschieblicher Verbund realisiert wird.

Die Ablösung der UHPC-Schicht entlang des an den Bruchbildern beobachteten etwa 3-7 mm breiten äußersten Ringes (Zone A), wird entsprechend den Spannungsverläufen auf vertikale abhebende Zugspannungen und hohe Schubspannungen, die die Verbundfestigkeit überschreiten, zurückgeführt. Offenbar tritt aber kein Reißverschluss-effekt auf. Das bedeutet, dass sich die Fuge nicht wie man bei kleiner werdendem d/t_c -Verhältnis erwarten könnte fortschreitend ablöst. Es bauen sich die Randspannungen wohl verbunden mit nicht-linearem, plastisch Materialverhalten und Schlupf soweit ab, dass ein stabiler Zustand erreicht wird. Siehe dazu auch [Haardt 1991] und weitere Überlegungen im Kapitel 7.2.

5.4.3 Spannungen in einseitig schwindbehinderten UHPC-Schichten

Es treten in der vorliegenden Arbeit zwei Fälle von Probekörpern mit nur einseitig schwindbehinderten UHPC-Schichten auf. Erstens wurden Probekörper in den Versuchen der Serie EV (siehe Kapitel 5.1.2) unsymmetrisch und mit nur einschnittigem Verbund (eine Seite der UHPC-Schicht im Verbund mit Stahl) hergestellt und vor Austrocknung geschützt gelagert. Es tritt über die Dicke konstantes, autogenes Schwinden auf. Zweitens entstanden nach der Haftzugprüfung in verschiedenen Serien Proben mit einschnittigem Verbund und wurden so gelagert, dass ihre freie UHPC-Oberfläche an trockener Raumluft austrocknen konnte. In diesem Fall tritt eine Schwindverformung mit einem Gradienten über die Schichtdicke auf. An der freien Oberfläche ist das Trocknungsschwinden maximal, während es an der Kontaktfläche des UHPC zum Untergrund gleich null ist.

Einseitig schwindbehinderte UHPC-Schicht mit konstantem Schwindverlauf

Es wird eine UHPC-Schicht mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Dicke von 5 mm ($d/t_c = 20:1$) wie schon oben beschrieben mit einer über die Dicke gleichmäßigen Temperaturbelastung von -10° ($\alpha T = 10E-5$) betrachtet.

Abbildung 5.61 und Abbildung 5.64 zeigen die Spannungen in der UHPC-Schicht und den Verlauf der Spannungen in der Verbundfuge.

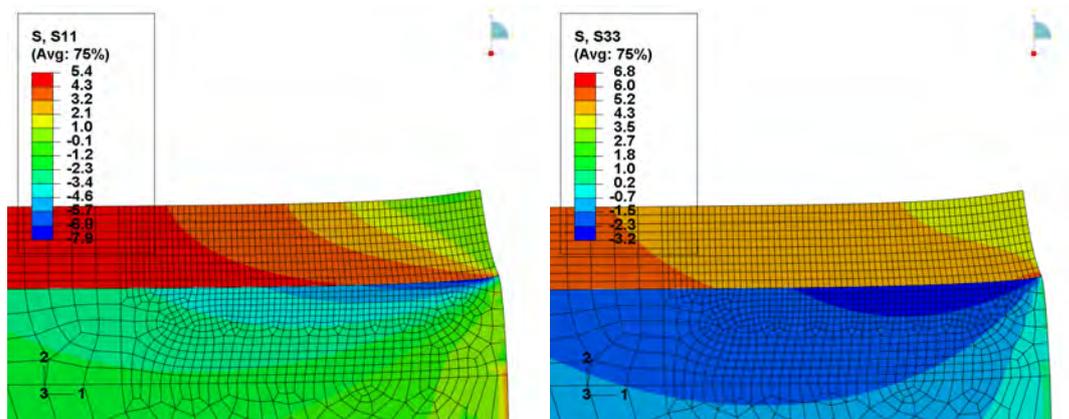


Abbildung 5.63: Spannungen in radialer (S11) und in Umfangs- (S33) Richtung bei $d/t_c=20:1$ und einseitigem Verbund mit über die Dicke konstantem Schwinden

Die Verbundeinleitungslänge ist etwas größer als bei den beidseitig dehnungsbehinderten UHPC-Schichten mit demselben d/t_c und beträgt je nach d/t_c -Verhältnis $5-7 \times t_c$. Die abhebenden Randspannungen S22 werden höher. Der Bereich des zentralen, homogenen Spannungsfeldes ist entsprechend etwas kleiner als bei den beidseitig behinderten UHPC-Schichten.

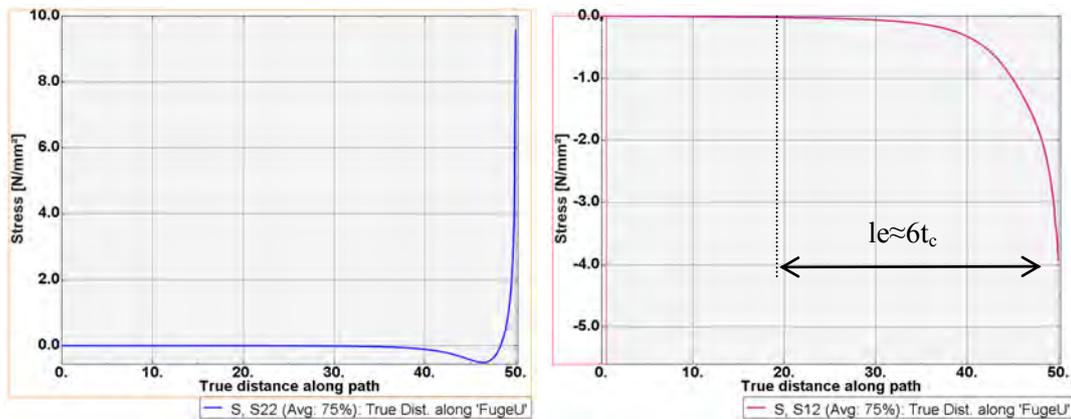


Abbildung 5.64: a) S22 vertikale-, b) S12 Schub- Spannungen in der Verbundfuge

Einseitig schwindbehinderte UHPC-Schicht mit Schwindgradienten

Die einseitig oberflächlich austrocknenden Proben mit 100 mm Durchmesser und 2,5 mm Schichtdicke ($d/t_c = 40:1$) werden mit einem linearen Temperaturgradienten über die Schichtdicke von -10°K an der Oberfläche bis 0°K an der Verbundfläche modelliert. Die damit simulierte „Einheits“-Schwinddehnung von 0,1‰ an der Oberfläche müsste mit einem Faktor vervielfacht werden, um die in der Natur auftretenden Verformungen und induzierten Spannungen zu berechnen. Sie wurden aber nicht gemessen und der Faktor ist nicht bekannt. Qualitativ zeigt sich aber ein den bisher gezeigten Fällen sehr ähnliches Bild: große abhebende Zugspannungen und Schubspannungen am freien Rand in der Verbundfuge. Die Verbundeinleitungslänge, also der Bereich, in dem die Schubspannungen auftreten, ist allerdings deutlich länger als bei den einseitig und beidseitig behinderten UHPC-Schichten mit einem über die Dicke konstanten Schwinden und beträgt etwa $15 \times t_c$, vgl. Abbildung 5.65.

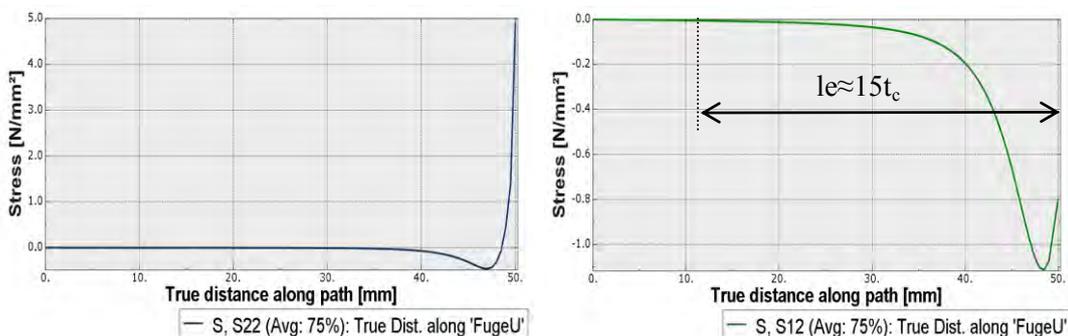


Abbildung 5.65: a) S22 vertikale-, b) S12 Schub- Spannungen in der Verbundfuge

Offensichtlich ist die Verbundfuge in diesem Fall über einen größeren Bereich mit Schubspannungen belastet als in den oben analysierten Fällen.

5.5 Haftschubversuche

An Proben der Werkstoffkombination SR0EM, GR0EM und SR5DM werden Versuche zur Prüfung der Schubfestigkeit der Verbundfuge durchgeführt.

Tabelle 5.10: Versuchsserie zur Haftschubprüfung („TORG“) und deren Bruchformen

Werkstoff_ Rauheit	VS	An- zahl	Bruchform	begleitende Versuche
SR0EM	MVS	2	100% UHPC-Scheibe haftet einseitig	Wechselagerung (*)
		2	UHPC zerbricht, ~50% haften einseitig	trocken gelagert (*)
SR0EM	OVS	3	UHPC zerbricht, ~50% haften einseitig	(-)
		1	100% UHPC-Scheibe haftet einseitig	zerbricht (**)
GR0EM	MVS	2	~75% des UHPC haftet einseitig	Aufschüsselungsmessung (*)
		1	100% UHPC-Scheibe haftet einseitig	Wassergehaltsbestimmung (*)
		1	100% UHPC-Scheibe haftet einseitig	Wechselagerung (*)
SR5EM	MVS	4	50% UHPC bleibt auf jedem der beiden Probekörperteile haften	
SR5EM	OVS	4	UHPC bleibt auf jedem der beiden Probekörperteile haften, Aufteilung 65:35%	
Summe		20		
VS	mit/ohne Verdunstungsschutz			
(*)	siehe Kapitel 5.2.1 und 5.2.2			
(**)	zerbricht beim Versuch, die Scheibe unmittelbar nach Prüfung von Hand abzulösen			

Die Schubbeanspruchung der Fuge wird durch das Aufbringen eines Torsionsmomentes realisiert. An den geprüften Proben werden anschließend begleitende Versuche durchgeführt, mit welchen die Beständigkeit der Haftung unter trockener und feuchter Lagerung untersucht wird. Eine Übersicht gibt Tabelle 5.10.

5.5.1 Probekörperherstellung und Versuchsanordnung

Herstellung

Die Probekörper der Haftschubversuche entsprechen jenen der Haftzugversuche (siehe Abbildung 5.1). Der Herstellungsablauf und die anschließende Lagerung sind identisch mit dem im Kapitel Haftzugversuche beschriebenen Vorgehen. Jeweils 4 Proben wurden mit oder ohne Verdunstungsschutz gelagert - zu den Werkstoffkombinationen mit in Summe 20 Proben siehe Tabelle 5.10. Drei Wochen nach der Herstellung und Lagerung der Proben im Baulabor der FH Kärnten wurden sie nach Graz transportiert und bis zum Tag der Prüfung im Alter von 29 bzw. 30 Tagen weiter unter Raumklima-Bedingungen (siehe Protokoll der Versuche im Anhang A.2.3) gelagert.

Versuchsanordnung

Die Prüfung wurde vom Team des Labors für Konstruktiven Ingenieurbau der TU Graz mit einer Torsionsprüfmaschine durchgeführt (Abbildung 5.66). Die zu prüfende Probe wird eingespannt, indem zwei Halbschalen die beiden Stahlteile jeder Stahl-UHPC-Stahl- (bzw. Glas-) Probe einklemmen. Drei Kardangelenke gewährleisten eine reine Torsionsbeanspruchung. Die Verdrehung wird an der festen Seite der Probe aufgebracht, der Drehmoment-Aufnehmer befindet sich hinter den Kardangelenken. Der genaue Prüfablauf ist im Protokoll der Versuche im Anhang A.2.3 beschrieben.

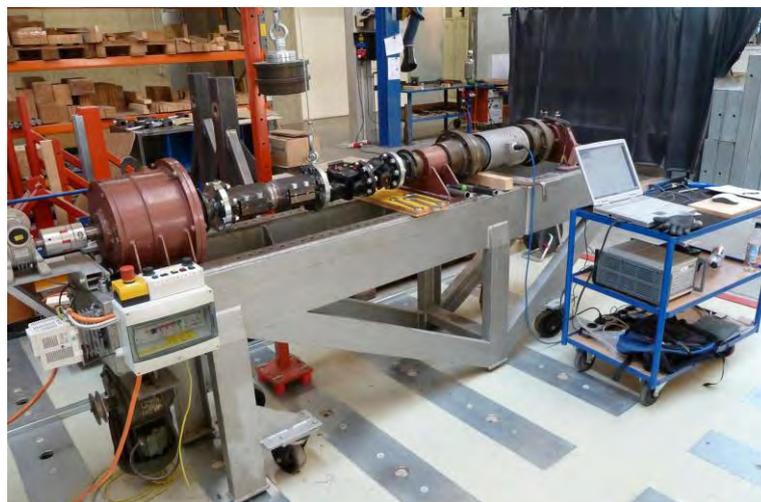


Abbildung 5.66: Torsionsprüfmaschine mit Messaufbau

Beim gesamten Einbauvorgang wurde darauf geachtet, die Fuge möglichst wenig zu belasten um eine Vorschädigung auszuschließen. Eine solche konnte auch bei keiner Probe beobachtet werden.

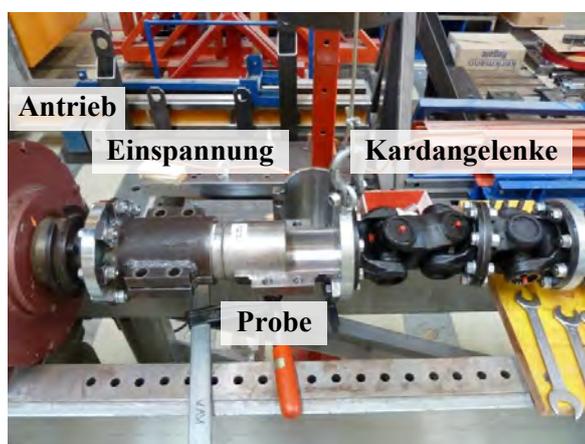


Abbildung 5.67: a) Probeneinbau in Torsionsprüfmaschine und b) freier Bereich zwischen den Einspannungen mit UHPC-Schicht nach dem Einbau

Der freie Bereich zwischen der Einspannung betrug bei Stahlproben 2-3 cm, bei Glasproben 4-5 cm, vgl. auch Abbildung 5.67. Die Probe wurde bis zum Bruch belastet. Die Drehgeschwindigkeit wurde generell konstant gehalten, außer in Phasen, in welchen kein Kraftanstieg vorhanden war (vermutlich aufgrund eines Einspielens der Gelenke o.ä.). Einzige Messgröße ist das Drehmoment, der Maximalwert wird zur Auswertung herangezogen.

5.5.2 Ergebnisse

Aus dem bei der Prüfung ermittelten Drehmoment M_T beim Bruch wird mit dem Torsionswiderstandsmoment W_T die geprüfte Haftscherfestigkeit τ_{max} berechnet:

$$\tau_{max} = \frac{M_T}{W_T} \quad (5.3)$$

Für das Torsionswiderstandsmoment W_T wird mit der vereinfachten Annahme eines linearen Spannungsverlaufes in der Fuge und einem Durchmesser $d = 100$ mm der Probe eingesetzt:

$$W_T = \frac{\pi}{16d^3} \quad (5.4)$$

Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.68 und auch im Anhang A A.2 in tabellarischer Form dargestellt.

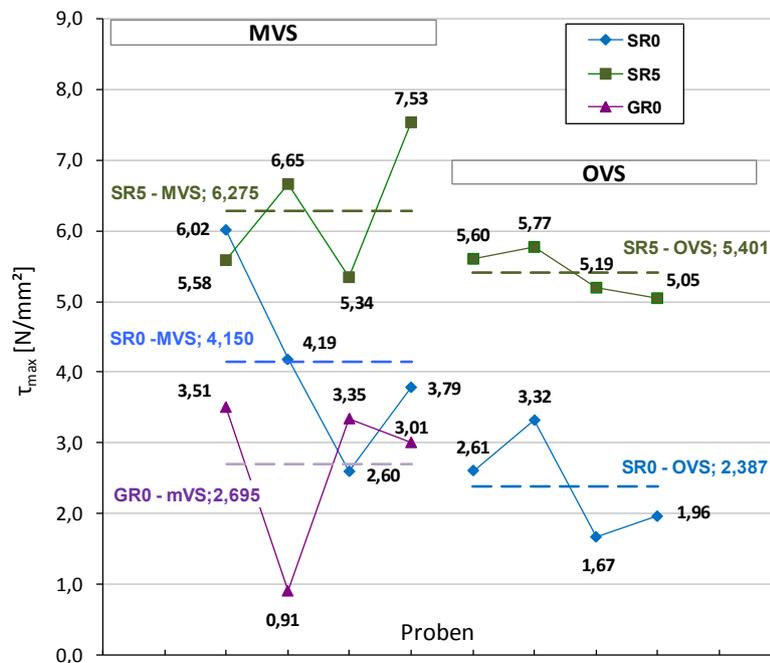


Abbildung 5.68: Prüf-Festigkeiten der Haftscherprüfungen - Einzelwerte

Die Streuungen sind hoch, trotzdem werden auch vom Mittelwert stark abweichende Einzelwerte in die Auswertung mit einbezogen.

Da sich entlang des äußersten Ringes (Zone A) der UHPC-Schicht schon vor der Prüfung ein kapillarer Spalt bildet (siehe Kapitel 6.2 und folgende), trägt diese Zone bei glatten Proben nicht mehr zur Haftfestigkeit bei. Bei rauen Proben SR5 ist ein äußerster Ring mit geringerer Breite unwirksam. Siehe dazu auch die Beobachtungen an den Bruchbildern in Kapitel 5.6 und im folgenden Kapitel. Im Folgenden wird deshalb W_T mit einem um die Breite des äußersten Ringes verminderten Durchmesser $d' = d - b_{ZoneA}$ ermittelt, sodass die „echte“ Haftscherfestigkeit $\bar{\tau}_{max}$ gegenüber der Prüf-Festigkeit τ_{max} angegeben werden kann. Sie wird in weiterer Folge mit der „echten“ Haftscherfestigkeit $\bar{\sigma}_z$, die im selben Sinne mit dem Durchmesser d' aus der Prüf-Festigkeit der Haftscherversuche bestimmt wird, verglichen (siehe Abbildung 5.69). Zur Haftscherfestigkeit $\bar{\sigma}_z$ siehe auch Kapitel 7.1.1 bzw. Tabelle 7.1.

Es fällt unter anderem auf, dass der Unterschied der Festigkeiten MVS und OVS bei der großen Rauheit SR5 geringer ausfällt (1,2:1) als bei den glatten Probenoberflächen SR0 (1,8:1). Weitere Schlussfolgerungen aus dem Vergleich von Haftzug- und Haftscherfestigkeit werden im Kapitel 5.7 gezogen.

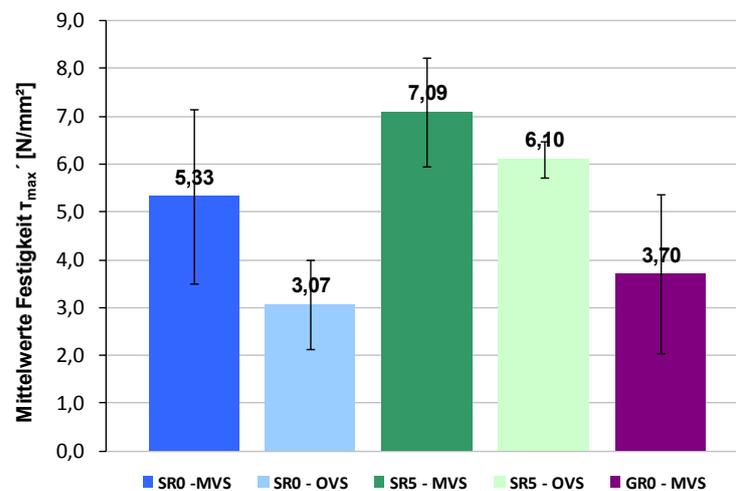


Abbildung 5.69: Haftscherfestigkeiten (berechnet mit reduziertem Durchmesser) – Mittelwerte und Standardabweichungen

5.6 Bruchbildanalyse der Haftscherversuche

Das Bruchverhalten und damit die Bruchflächen unter Torsionsschubbelastung unterscheiden sich deutlich von jenen unter Haftzugbelastung. Unter Schubbelastung kommt es immer zu einem Fugenbruch.

5.6.1 Bruchbilder der Proben mit glatter Werkstoffoberfläche

Beim Torsionsschubversuch mit den „glatten Proben“, also der Werkstoffkombinationen SR0 und GR0, zerbrechen die UHPC-Schichten in Teile. Einige Bruchstücke lösen sich beim Versuch beidseitig in der Grenzfläche vom Untergrund ab. Einige UHPC-Schichten bleiben als Ganzes erhalten und bleiben auf einem der beiden Probekörperteile am Untergrund haften. Siehe auch Aufstellung in Tabelle 5.10 auf Seite 178 und Anhang A.2.

Bleiben Teile der UHPC-Scheibe oder die ganze Scheibe beim Versuch anhaften, so lassen sie sich unmittelbar nach der Prüfung von Hand nicht ablösen. Nach mehr als einem Tag der Lagerung an trockener Raumluft sind die UHPC-Schichten dann, wie auch schon an den Haftzugversuchsproben beobachtet, leicht abzulösen. Es wurden deshalb begleitende Versuche durchgeführt, mit welchen die Beständigkeit der Haftung unter trockener und feuchter Lagerung untersucht wurde. Sie sind in Kapitel 5.2.1 beschrieben. Die Abbildung 5.70 und Abbildung 5.71 zeigen typische Bruchflächen.

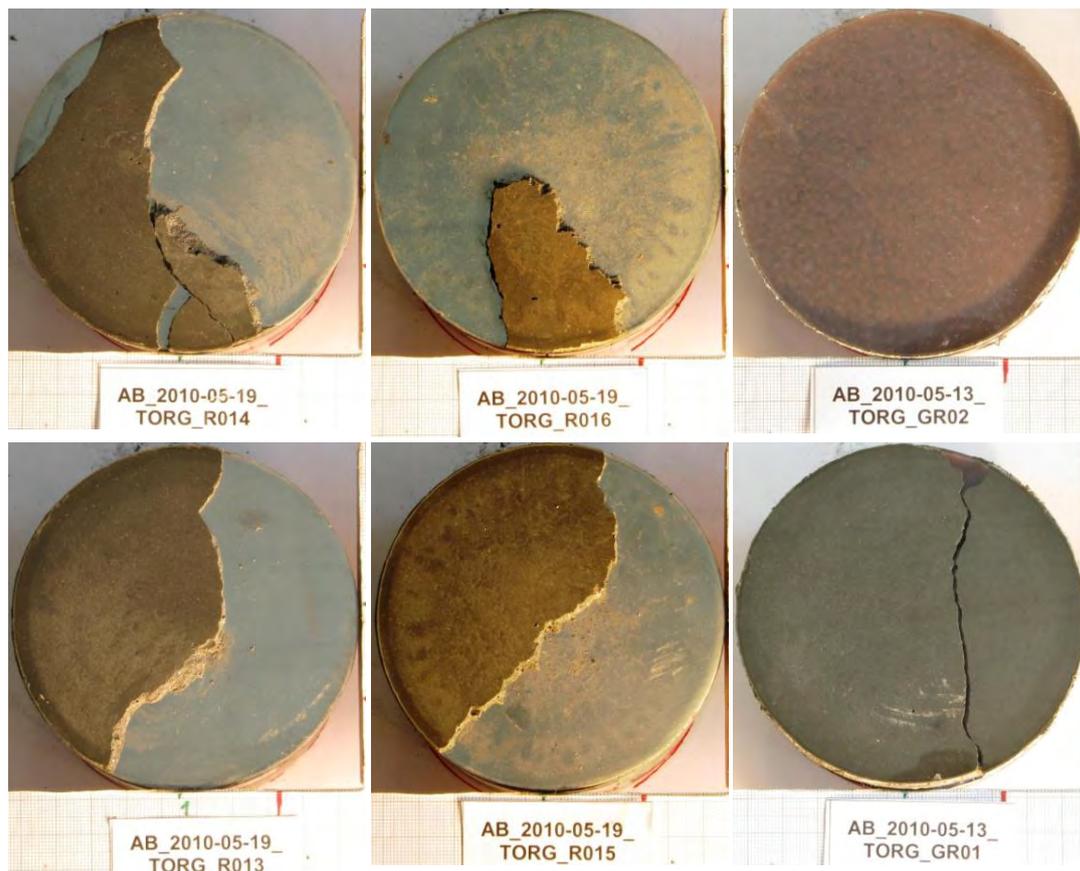


Abbildung 5.70: Beispiele von Bruchflächen der Werkstoffkombinationen a) SR0-MVS, b) SR0-OVS, c) GR0-MVS der Haftschub-Serie, untere Reihe Probekörperunterteile (bei Prüfung antriebsseitig), obere Reihe Probekörperoberteile (aufnehmerseitig)

Eine Zonierung wie bei den Haftzugproben ist nur zum Teil erkennbar. An den abgelösten UHPC-Schichten ist immer ein äußerster, dunkelgrau gefärbter und spiegelglatter Ring deutlich erkennbar, die „Zone A“. Seine Breite beträgt bei SR0-MVS und SR0-OVS etwa 4 mm, bei GR0-MVS etwa 5 mm.



Abbildung 5.71: Details zu Abbildung 5.70 a) Probe _R013, an der das anhaftende UHPC Stück nachträglich abgelöst wurde, Stellen für mikroskopische Aufnahmen umrandet, b) Probe _R014 ohne lose Bruchstücke, c) Detail aus b)

Angrenzend an den Ring der Zone A lässt sich besonders bei den Stahlproben ein weiterer etwas weniger dunkelgrauer und noch immer glatter Ring mit etwa 10 mm Breite erkennen. Diese glatte Zone ist bereichsweise noch weiter ausgedehnt. Auch bei den Glasproben ist ein Ring, der etwas weniger dunkelgrau verfärbt ist, erkennbar. Analog zu den Haftzugproben wäre das „Zone B“. Weiter innen ist dann ein kreisförmiges Feld erkennbar, das bei SR0-MVS heller grau und weniger glatt erscheint, bei SR0-OVS ein ausgeprägtes Rissmuster zeigt und bei GR0-MVS heller grau und glatter als bei SR0 ausfällt, ein zentrales Feld „Zone C“. Die Oberflächen von SR0-MVS sind zu etwa 2/3 sehr glatt und zu etwa 1/3 etwas rauer. Die Proben SR0-OVS zeigen dasselbe Rissmuster und dementsprechend dieselbe Zonierung wie die Proben der Haftzugprüfungen, siehe Kapitel 5.3.

An den zugehörigen Stahloberflächen ist die Zonierung wieder zu finden, allerdings mit einem wesentlichen Unterschied zu den Bruchflächen der Haftzugproben. Der so bezeichnete „Haftschleier“, eine einige Mikrometer dicke Schicht aus Bindemittelstein, ist nicht in der ganzen Fläche ausgeprägt, wie es auf den Haftzugproben immer der Fall war. Zudem versagten die Haftzugproben der Werkstoffkombination SR0EM-MVS ja auch überwiegend mitten im Beton während die Proben SR0EM-MVS der Schubprüfungen überwiegend glatt in der Fuge versagen (entspricht einem Fugenbruch f_l laut Tabelle 5.6, Seite 140).

Bei den Proben **SR0-MVS** zeigt etwa 1/4 bis 1/3 der Bruchfläche den Haftschleier, während die restliche Fläche spiegelglatt und blank erscheint. Bei der Torsionsschubprüfung wird demnach der UHPC zu etwa 2/3 unmittelbar in der Kontaktfläche abgeschert, es zeigen sich auch mikroskopisch kaum Haftspuren, vgl. Abbildung 5.72.

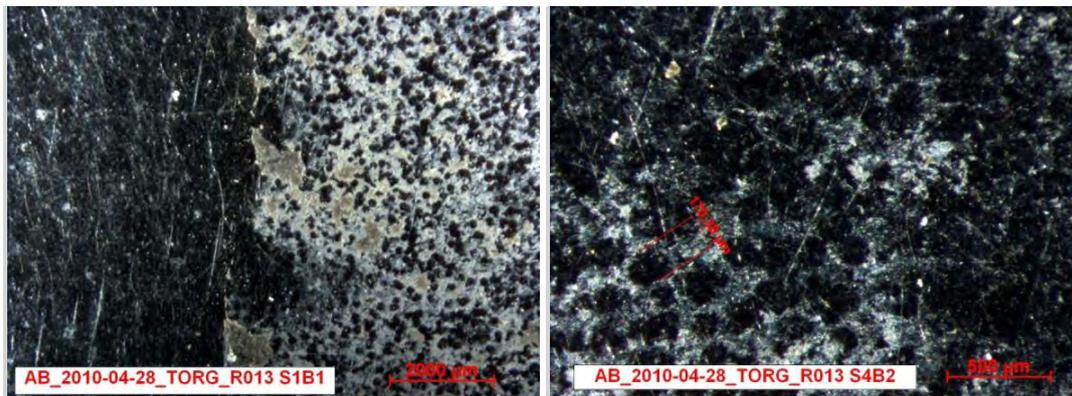


Abbildung 5.72: a) = blaues Rechteck in Abbildung 5.71a: Grenze zwischen der bei Torsionsbeanspruchung blank abgelösten Fläche und dem Haftschleier, der bei nachträglicher Ablösung vom anhaftenden Bruchstück sichtbar wird, b) Ausläufer des Haftschleiers (rotes Rechteck in Abbildung 5.71a).

Etwa 1/3 der UHPC-Scheibe bleibt einseitig anhaften und wird auf der gegenüberliegenden Seite im Haftschleier abgelöst und abgeschert (Abbildung 5.71b). Meistens zerbricht die UHPC-Scheibe durch die spiralförmig durch den Zylinder laufende Beanspruchung in 2 Hälften oder mehrere Bruchstücke. Der Haftschleier, der an der Bruchfläche sichtbar wird, zeigt spiralförmige blanke Bereiche während der Haftschleier, der durch das nachträgliche Ablösen von anhaftenden UHPC-Teilen sichtbar wird, homogen ausgeprägt ist. Unter dem Mikroskop zeigt sich im Haftschleier auf den Stahloberflächen wiederum ein „Punktmuster“ (vgl. Abbildung 5.72) wie bei den Haftzugproben beobachtet, siehe auch Kapitel 6.3 - Mikroebene. Auch auf der UHPC-Seite zeigt sich mikroskopisch das korrespondierende Bild mit durch Scherwirkung ganz glatt abgelösten Bereichen und Bereichen, in denen die Gegenseite des Haftschleiers mit erhabenen Stellen rau erscheint („Punktmuster“, Abbildung 5.73).

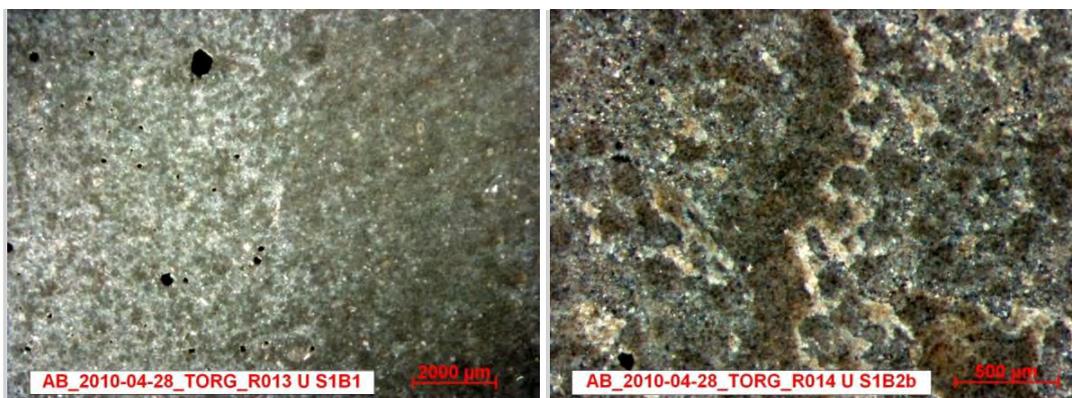


Abbildung 5.73: a)+ b) abgelöste UHPC-Oberfläche korrespondierend zum Haftschleier mit raueren und glatten Flächenanteilen

Bei den Proben **SR0-OVS** sind die Haftreste stärker ausgeprägt, offensichtlich entstehen sie im Zusammenhang mit der Rissbildung. Im „zentralen Feld“ (Zone C), wo auch die Torsionsschubbeanspruchung am geringsten ist, finden sich deutliche Haftreste. Außen liegend, am Ring der „Zone B“, sind in etwa der halben Fläche weitgehend blank abgelöste Bereiche vorzufinden, die aber immer noch Spuren des Rissmusters aufweisen, vgl. Abbildung 5.74a.

Bei den Proben **GR0-MVS** hat die Ablösung derart in der Kontaktfläche stattgefunden, dass praktisch keinerlei Haftreste auf den Glasoberflächen zurück bleiben und die Bruchflächen spiegelglatt sind, vgl. Abbildung 5.70c und Abbildung 5.74b. Das an der Glasprobe sichtbare Muster entsteht durch Luftporeneinschlüsse in der (roten) Kleberschicht zwischen Stahladapter und Glasscheibe.



Abbildung 5.74: a) Probe SR0-OVS mit Rissmuster und b) GR0-MVS nach Versuch

Schlussfolgerungen

In den auf Schub beanspruchten Bereichen löst sich UHPC weitgehend unmittelbar in der Kontaktfläche, also als Fugenbruch I ohne einen anhaftenden Bindemittelstein zu hinterlassen. Daraus wird geschlossen, dass die Bruchform unmittelbar von der Beanspruchungsart abhängt. Der Haftscheier, ein Bruch in der Grenzflächenschicht im UHPC, tritt wohl bei Zugbeanspruchung, bei Schubbeanspruchung durch Torsion oder Schwinden aber nicht auf. Bemerkenswert ist für alle Haftschieber-Proben auch, dass sich die ursprünglich von den nachträglich abgelösten Bruchflächen nicht wesentlich unterscheiden. Anders verhält es sich bei den Haftzugproben. Dort sind auf den nachträglich abgelösten Oberflächen, die ein paar Tage einseitig austrocknen und durch Schwinden beansprucht werden, kaum Haftreste zu finden.

Die Ablösung durch Schub erfolgt also unmittelbar in der Kontaktfläche, während es durch Zug zu einem Bruch im Material, oftmals in der Grenzflächenschicht, kommt.

5.6.2 Bruchbilder der Proben mit rauer Werkstoffoberfläche

Es wurden Proben mit der größten Rauheit SR5 und UHPC EM mit und ohne Verdunstungsschutz geprüft. Bei allen Proben tritt ein Bruch in der Fuge verbunden mit einem Abscheren des Betons, der in den groben Vertiefungen sitzt, auf. Das Ablösen und Abscheren erfolgt zu 50-66% in der einen und zu 34-50% in der zweiten Verbundfuge der Sandwich-Probe, der Bruch quert also die UHPC-Schicht, d.h. entsprechende Anteile der Betonschicht haften immer in ihrer ganzen Dicke auf den zwei Probekörperteilen (siehe Abbildung 5.75, zugehörige Probekörperteile dargestellt).



Abbildung 5.75: Bruchflächen der Werkstoffkombination SR5EM, links: MVS, rechts: OVS, mittig oben: Detail MVS, mittig unten: Detail in Schrägansicht OVS

Nur bei Proben MVS fällt auf, dass sternförmige, radial nach außen laufende Riefen entstanden sind, deren Flanken unter etwa 45° geneigt sind. Die Proben OVS weisen Risse auf, entlang welcher sich die Bruchlinie ausbilden. Die Brüche des UHPC in bzw. über den gut ausgefüllten groben Vertiefungen zeigen zum Teil auch schräg geneigte Bruchflächen. Während die groben Vertiefungen der rauen Oberfläche SR5 (siehe auch Kapitel 4.2.1) mit UHPC gut ausgefüllt sind, zeigt sich dazwischen die blank abgelöste Stahloberfläche mit der feineren Oberflächenrauheit. Scheinbar konnte sich UHPC aus der fein-rauen Oberflä-

chentopografie herauslösen. Vgl. dazu auch die mikroskopischen Aufnahmen Abbildung 5.76.

Es zeigt sich auch, dass ein schmaler äußerster Ring (1-2 mm, Zone A) vorliegt, in dem die Haftung „gestört“ war und am meisten blanker Stahl zum Vorschein kommt und Beton teilweise aus den Vertiefungen gelöst wurde.

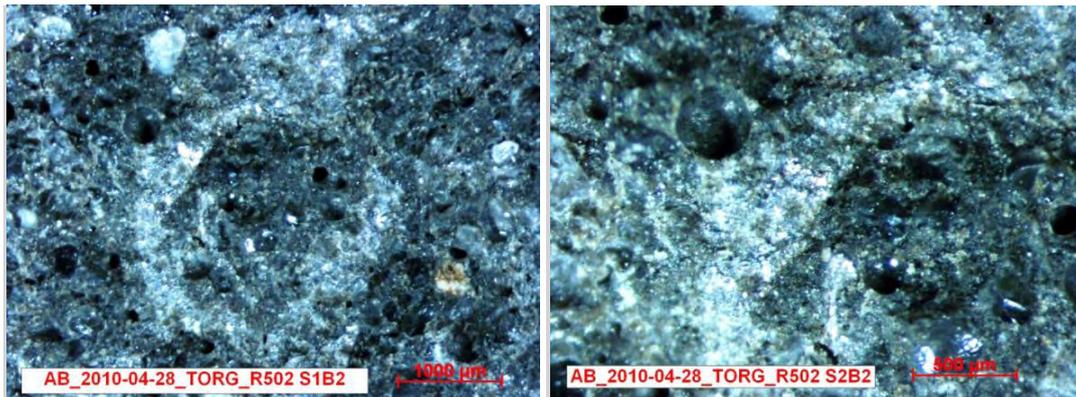


Abbildung 5.76: mikroskopische Aufnahmen der Bruchflächen SR5: hell = Stahloberfläche, dunkel = UHPC in groben Vertiefungen mit (schwarzen) Luftporen

5.7 Vergleich von Haftzug- und Hafts Schub

Proben mit glatter Werkstoffoberfläche, SR0EM und GR0EM

Für die Werkstoffkombinationen SR0EM mit und ohne Verdunstungsschutz sowie GR0EM mit Verdunstungsschutz liegen Prüfwerte der Haftzug und der Hafts chubversuche vor, aus denen unter Berücksichtigung des Flächenanteils, der sich schon vor der Festigkeitsprüfung ablöst (Zone A) die Haftzug- $\bar{\sigma}_z$ bzw. Hafts chubfestigkeit $\bar{\tau}_{max}$ errechnen lässt. Sie lassen sich unmittelbar miteinander vergleichen, siehe dazu Abbildung 5.77.

Die Hafts chubfestigkeiten der Stahl-UHPC Kombination liegen unter beiden Lagerungsbedingungen deutlich niedriger als die Haftzugfestigkeiten. Für SR0EM-OVS beträgt die Hafts chubfestigkeit 62%, für SR0EM-MVS beträgt sie 68% der Haftzugfestigkeit. Die Bruchbilder bzw. Bruchformen bei der unterschiedlichen Beanspruchungsart unterscheiden sich auch deutlich voneinander. Der Bruch erfolgt bei der Torsionsschubbeanspruchung großteils unmittelbar in der Kontaktfläche, besonders deutlich wird das an den Proben MVS. Es lässt sich Schluss folgern, dass sich die Adhäsion beim Stahl-UHPC Verbund in Zug- und Schubbeanspruchungsrichtung unterscheidet.

Bei der Werkstoffkombination Glas-UHPC EM MVS sind Haftzug- und Hafts chubfestigkeit etwa gleich groß. Die Bruchflächen, die unter den verschiedenen Beanspruchungsarten entstehen, unterscheiden sich wiederum, aber weniger stark als bei der Kombination

UHPC EM - Stahl. Nach der Torsionsschubprüfung finden sich praktisch keinerlei Haftspuren auf den Glasoberflächen, unmittelbar nach der Haftzugprüfung ist an Proben SR0EM-MVS ein dünner Haftschiefer erkennbar.

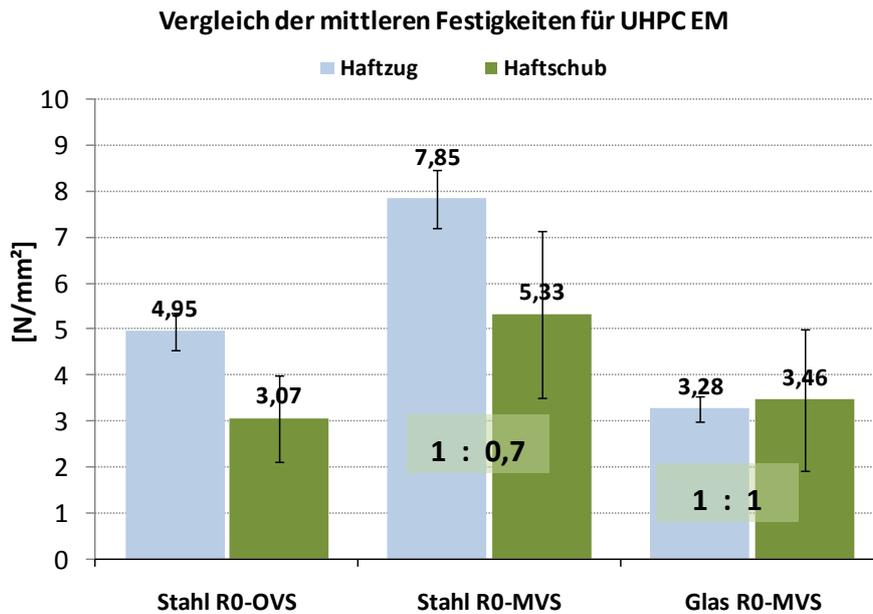


Abbildung 5.77: Vergleich der Haftzug- und Haftschiebfestigkeiten der Werkstoff-Rauheit SR0 und GR0, Mittelwerte von je 4 Proben mit Standardabweichung

Proben mit rauer Werkstoffoberfläche, SR5EM

Es wurden keine unmittelbar vergleichbaren Haftzug- und Haftschiebversuche mit Oberflächen der Rauheit SR5 durchgeführt. Haftzugfestigkeiten existieren für SR5 nur mit der Mischung DM.

Bei allen rauen Proben MVS (SRXEM, SRXDM) tritt bei der Haftzugprüfung Betonbruch bzw. Fugenbruch in der Grenzflächenschicht bei rund 10 N/mm² auf. Die Haftzug-Prüffestigkeitswerte (= Betonzugfestigkeit) sind also größer als jene für Haftschieb (10:6,3 N/mm²).

Für Proben, die OVS gelagert wurden, ist der Vergleich schwierig, da keine Haftzugprüfungen für SR5EM vorliegen. Aus den Haftzugfestigkeits-Prüfwerten von SR1DM = 3,8 N/mm² und SR5DM = 5,0 N/mm² bzw. SR1EM = 4,8 N/mm² ließe sich für „SR5EM“ 6,3 N/mm² extrapolieren. Demgemäß ist die Haftschiebfestigkeit mit 5,4 N/mm² auch bei SR5EM geringer als die Haftzugfestigkeit (85%).

6 Mikroebene: Untersuchungen der Grenzflächenschicht

Gemäß der im Kapitel 2.1 gegebenen Definition von Adhäsion ist sie der „Zustand einer Grenzflächenschicht“ zwischen den in Kontakt befindlichen Phasen. Die örtliche Ausdehnung der Grenzflächenschicht ist einerseits durch die geringe Reichweite der spezifischen Adhäsion auf einige Nanometer beschränkt. Andererseits kann die Grenzflächenschicht auch als jene Schicht verstanden werden, in der sich die Verbundmaterialien so beeinflussen, dass sich ihre Eigenschaften oder auch ihre Zusammensetzung im Vergleich zum unbeeinflussten Inneren ändern. Dann ist diese Schicht im vorliegenden Fall im UHPC einige Mikrometer dick.

Die Grenzflächenschicht im UHPC schließt die raue Stahl- bzw. Glasoberfläche mit ein. Sie hat deshalb eine Dicke von wenigen Mikrometern bis zu etwa 500 μm . Sie erstreckt sich, da das Adhärens Stahl oder Glas keine Porosität aufweist, von der Kontaktfläche nur in Richtung des UHPC-Inneren.

Im Folgenden wird gezeigt, inwiefern sich die im Kapitel 3.1 beschriebene Hypothese 3 bestätigt. In der Hypothese wurde angenommen, dass die Bestandteile von UHPC nahe einer Grenzfläche nicht in einer optimalen Packungsdichte vorliegen. In dieser „Grenzflächenschicht“ sollte seine Zusammensetzung also „gestört“ sein. Die Störung könnte auch Ursache dafür sein, dass sowohl bei glatten als auch bei rauen Haftzugproben die Bruchflächen nicht unmittelbar entlang der Phasengrenze von Adhärens und Adhäsiv verlaufen, sondern im Adhäsiv UHPC nahe der Phasengrenze.

Die Grenzfläche wird nun in dreierlei Hinsicht mikroskopisch untersucht:

1. Die Kontaktfläche von UHPC zu Glas wird durch das Glas hindurch betrachtet.
2. Die Bruchflächen mit fugenahem Bruch werden analysiert.
3. Im Schnitt durch den Verbundkörper werden die Phasengrenzen betrachtet.

6.1 Methoden

Für alle mikroskopischen Untersuchungen im Rahmen der Arbeit wurden die im Folgenden angeführten Methoden und Geräte verwendet.

6.1.1 Lichtmikroskopische Untersuchungen

Lichtmikroskopische Untersuchungen wurden mit einem Stereo-Mikroskop vom Typ Zeiss Discovery V12 durchgeführt, vgl. [Zeiss 2011]. Das Mikroskop ermöglicht die Be-

trachtung von Oberflächen im Auflicht mit einer stufenlos einstellbaren Vergrößerung vom 8- zum 100-fachen und gibt dem Betrachter beim Durchschauen mit beiden Augen einen dreidimensionalen Eindruck. Strukturen $\geq 1\mu\text{m}$ können gut erkannt werden. Bildausschnitte von ca. 1-15 mm² sind möglich. Durch Fokusvariation, also Scharfstellen in verschiedenen Ebenen, können Höhen bzw. Tiefen vermessen werden.

Die Bilder in der Arbeit wurden mittels digitaler Kamera aufgenommen. Sie geben systembedingt nur mehr einen zweidimensionalen Eindruck wieder. Eine angeschlossene Bildverarbeitungssoftware ermöglicht es unter anderem, dreidimensionale Darstellungen aus mehreren in Höhenschichten aufgenommenen Bildern zusammenzusetzen. Vermessungen von Längen und Flächen sind außerdem möglich. Die Aufnahmen der Oberflächen wurden meist mit schräger Beleuchtung gemacht, durch die Schatteneffekte entstehen. In Ausnahmefällen wurde zentral von oben mit einem Ringlicht gleichmäßig ausgeleuchtet.

6.1.2 Elektronenmikroskopische Untersuchungen

Der überwiegende Teil der elektronenmikroskopischen Untersuchungen wurde am Zentrum für Elektronenmikroskopie und Feinstrukturforschung der TU Graz durchgeführt. Dabei kamen sowohl ein Rasterelektronenmikroskop für den Betrieb mit Hochvakuum – mit REM oder auch SEM bezeichnet (Typ Zeiss Ultra 55) – als auch ein ESEM (Typ FEI Quanta 600) für den Betrieb bei hohem und niedrigerem Vakuum und mit größerer Probenkammer zur Anwendung [FELMI 2011].

Die theoretische Auflösung beträgt rund 2 nm und die theoretische Vergrößerung das 900.000-fache. Praktisch konnten im REM Strukturen der Proben ≥ 50 nm erkannt werden. Beide Geräte verfügen über die Möglichkeit, die Elementzusammensetzung kleinster Probenbereiche mittels EDX⁷⁷ – Energiedispersiver Röntgenstrahlen-Analyse – festzustellen. So können einzelne Elemente, die in einem Bereich der Probe vorhanden sind, ausgenommen Wasserstoff, detektiert und anhand der Höhe ihrer „peaks“ im Diagramm (siehe Abbildung 6.27) auch deren Verhältnis zueinander bestimmt werden. Ein Rückschluss auf vorhandene chemische Verbindungen ist möglich.

Die elektrisch nicht leitfähigen Proben (UHPC) werden zur Schaffung einer leitenden Oberfläche für die Untersuchung im REM mit einer dünnen Schicht Kohlenstoff (~20nm) bedampft. Im ESEM ist diese Bedampfung nicht erforderlich, außerdem sind im ESEM größere Probenstücke als im REM möglich (150*150*40 mm bzw. nur 50*50*30 mm).

⁷⁷ EDX ... Energy Dispersive X-ray Analysis. Dabei wird mittels Halbleiterdetektoren die charakteristische Röntgenstrahlung genutzt. Diese entsteht, wenn ein Elektron des Elektronenstrahls im Atom der Probe ein kernnahes Elektron aus seiner Position schlägt. Diese Lücke wird sofort von einem energiereicheren Elektron aus einem höheren Orbital aufgefüllt. Die Energiedifferenz wird in Form eines Röntgenquants frei. Die dadurch entstandene Röntgenstrahlung ist charakteristisch für den Übergang und das Atom, also das Element.

Mittels unterschiedlicher Detektoren werden von jeder Stelle zwei Aufnahmen mit unterschiedlichem Informationsgehalt gemacht: Ein Bild gibt einen starken Materialkontrast bzw. Phasenkontrast wieder, es wird mittels BSE⁷⁸-Detektor gewonnen. Das zweite Bild gibt einen dreidimensionalen Eindruck der Oberfläche wieder, den Topografiekontrast. Es wird mittels SE⁷⁹-Detektor gewonnen.

Einleitend seien ein paar Worte zur Interpretation der Darstellung der Materialien gesagt. Im sogenannten „Materialkontrast bzw. Phasenkontrast“ erscheinen die Elemente höherer Kernladungszahl heller als jene mit niedrigerer Kernladungszahl. Dementsprechend erscheint in unserem Fall Stahl sehr hell, gefolgt vom hellgrauen bis weißen unhydratisierten Klinker. Hydratisierter Bindemittelstein, der die sogenannte „UHPC-Matrix“ darstellt, ist etwas dunkler grau. Quarzkörner erscheinen sehr dunkel grau, Luftporen schwarz. Glas erscheint meist mittelgrau. Die Graustufen variieren von Bild zu Bild je nachdem, wie kontrastiert wurde und sind auch beim ESEM etwas anders als beim SEM.

Im sogenannten „Topografiekontrast“ wird die Probenoberfläche einheitlich aber mit Schatten abgebildet, es entsteht ein dreidimensionaler Eindruck.

Voruntersuchungen wurden mit dem Lichtmikroskop und mit dem REM an der Universität Kassel am Fachgebiet für Werkstoffe des Bauwesens und Bauchemie durchgeführt.

6.1.3 Sondertechniken

Zur weiterführenden Untersuchung der Oberfläche einer Probe wurden die **Raman-Mikroskopie** und die **Infrarot (IR-) Spektroskopie** eingesetzt ('Renishaw' Raman Spectroscopy System 2000 und 'Bruker' FT-IR Microscope, [FELMI 2011]). In der Schwingungsspektroskopie (IR- und Raman-Spektroskopie) wird die Anregung der Normalschwingungen (Eigenschwingungen) von Molekülen beobachtet. Daraus können Informationen über schwingende Gruppen im Molekül abgeleitet werden.

Mit den IR-Untersuchungen kann z.B. Hydroxid (OH⁻) nachgewiesen und auch von H₂O unterschieden werden. Mit der Raman Mikroskopie ist z.B. die Verteilung des Hydroxids in einem Bereich der Probe messbar. Damit kann Calciumhydroxid (C-H) von Calciumsilikathydrat- (C-S-H-) Verbindungen eindeutig unterschieden werden.

⁷⁸ BSE ... back scattered electron, Rückstreuelektronen. Es ist wahrscheinlicher, dass ein Elektron eines Atoms mit hoher Kernladungszahl rückgestreut wird, als an einem Atom mit geringer Kernladungszahl; z.B. erscheint Eisen heller als Silizium.

⁷⁹ SE ... Sekundärelektronen werden unmittelbar aus der Oberfläche der Probe emittiert, an spitzen Stellen mehr, an flachen weniger.

6.2 Struktur- und Riss-Entwicklung in der Grenzfläche

An Verbundproben aus Glas und UHPC kann die Kontaktfläche durch das Glas hindurch beobachtet werden. Sie eignen sich also dazu, von einem frühen Zeitpunkt an zu verfolgen, wie sich die Struktur dieser Fläche des UHPC entwickelt. Außerdem kann festgestellt werden, wann erstmals Risse auftreten.

Es zeigte sich, dass sich die Risse im UHPC schon sehr früh bilden. Außerdem konnte beobachtet werden, dass sich die Struktur des UHPC an der Kontaktfläche zum Glas im Laufe der Erhärtung ändert. Es wurden zwei Versuchsserien mit Proben aus glattem, unbehandeltem Float-Glas (GR0) und UHPC der Mischungen DM und EM nacheinander durchgeführt. Die Protokolle dieser Untersuchungen befinden sich im elektronischen Anhang A.3.1.

6.2.1 Probekörperherstellung

Tabelle 6.1: Proben der Versuchsserien zur Struktur- und Rissentwicklung

Werkstoff-Rauheit	Verdunstungsschutz	UHPC	Bezeichnung mit Herstellungsdatum	beobachtet mit	Probekörperaufbau
GR0DM	OVS	DM5, Serie SCHWID	AB_2010-03-31_Schwid-GD1	DiCam	2 Glasplatten 3 mm
			AB_2010-03-31_Schwid-GD2	LiMi	2 Glasplatten 3 mm, in 1. Stunde beschwert
GR0EM	OVS	EMK2g Serie HE	AB_2010-05-04_RE_01_02	LiMi	2 Glasplatten 12 mm, in 1. Stunde beschwert
			AB_2010-05-04_RE_05_06	DiCam	
	MVS		AB_2010-05-04_RE_03_04	LiMi	
			AB_2010-05-04_RE_07_08	DiCam	
DiCam	Digitalkamera auf Stativ				
LiMi	Stereomikroskop Zeiss Discovery V12				

Glas-UHPC-Glas-, „Sandwich“-Proben wurden hergestellt, indem ein kreisrunder Fladen von frischem UHPC mit Hilfe eines Spritzsackes unmittelbar nach dem Mischen auf eine gereinigte Glasplatte aufgebracht und sogleich anschließend eine zweite Glasplatte auf den UHPC gelegt wurde (siehe Abbildung 6.1). Die Glasplatten aus unbehandeltem Float-Glas sind quadratisch mit 100*100 mm Seitenlänge und einer Dicke von 3 oder 12 mm. Die zweite Glasplatte wurde auf den UHPC gedrückt, bis sie an Distanzierungen anstand, so dass eine Schichtdicke des Betons von 2,5 mm und eine parallele Positionierung gewährleistet waren. Die Distanzierungen wurden rund 3 Stunden nach Wasserzugabe, das entspricht etwa dem Erstarrungsbeginn, entfernt, um ein unbehindertes Dickenschwinden zu ermöglichen. Ein Teil der Proben wurde mit Verdunstungsschutz (MVS) gelagert, ein Teil ohne (OVS). Der Verdunstungsschutz wurde mittels Wachs, das bereits kurz nach der Herstellung aufgesprayt wurde, und Einwickeln in Frischhaltefolie gewährleistet. Die Proben-

herstellung entspricht damit im Prinzip jener der Proben der Haftzugprüfungen, siehe Kapitel 5.1.1. Die hergestellten Proben sind in Tabelle 6.1 aufgelistet.

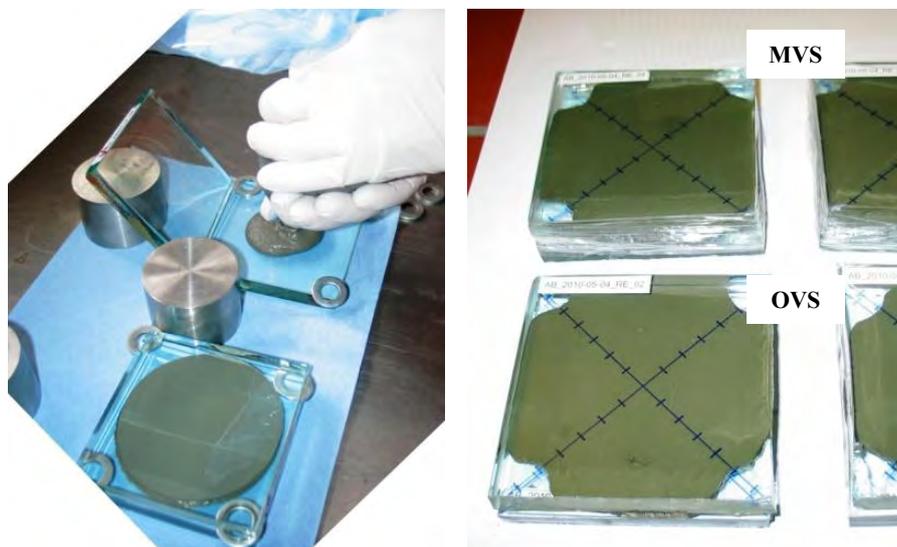


Abbildung 6.1: Herstellung der Glas-UHPC-Glas Sandwich Proben und deren Lagerung mit (MVS) bzw. ohne Verdunstungsschutz (OVS)

6.2.2 Versuchsdurchführung

Je Serie wurde eine Probe mit Hilfe einer digitalen Kamera und eine zweite unter dem Lichtmikroskop vergrößert beobachtet. Beginnend 3 Stunden nach Wasserzugabe wurden in zuerst kurzen, dann längeren Zeitabständen Aufnahmen gemacht, die anschließend verglichen werden konnten. Nach einigen Tagen oder Wochen wurden die Glasscheiben von Hand abgelöst, um die beiden zusammengehörigen Kontaktflächen am UHPC und Glas zu betrachten. Bei den Proben OVS gelang das Ablösen von Hand leicht, bei den Proben MVS nicht. Sie wurden für einige Tage OVS gelagert, dann ließ sich zumindest eine Glasscheibe vom UHPC mit Hilfe eines Keiles abspalten.

6.2.3 Ergebnisse

Makroskopische Beobachtungen

Digitale Aufnahmen der UHPC-Glas Kontaktfläche zu verschiedenen Zeitpunkten im Probenalter von 3 Stunden nach der Wasserzugabe bis zu einem Alter von 21 Tagen werden verglichen. Drei der makroskopischen Aufnahmen der Werkstoffkombination GR0EM-OVS sind in der Abbildung 6.2 zu sehen. Bis 6 Stunden nach der Wasserzugabe erscheint die Grenzfläche homogen und durchfeuchtet. Am nächsten Tag, erstmals nach 20 Stunden ab Wasserzugabe wieder untersucht, zeigen sich in der Grenzfläche der Probe kleine hell-

weißliche Stellen und Linien, die im Bereich von Rissen auftreten. Außerdem erscheint ein äußerer Rand mit einer Breite von ca. 6 mm dunkler als das Innere. Von diesem Zeitpunkt an verändert sich die Struktur der Kontaktfläche im Grunde nicht mehr, sie prägt sich nur deutlicher aus. Bei den Proben MVS treten die kleinen weißlichen Stellen erst im Alter von 25 Stunden erstmals auf und es gibt keine Linien (Risse) zu sehen.

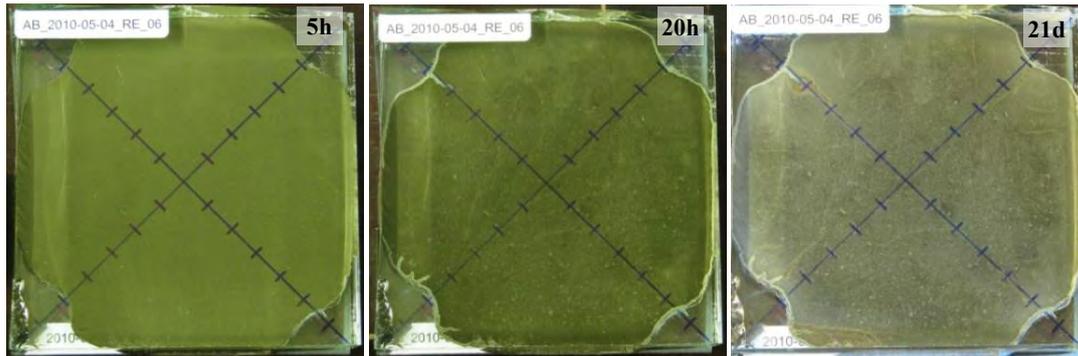


Abbildung 6.2: UHPC-Glas Kontaktfläche einer Probe GR0EM-OVS: 5h) homogen, durchfeuchtet, 20h) hell-weißliche Stellen und Linien (Riss-Spuren) sowie dunklerer Randstreifen, 21d) stärker strukturiert

Offensichtlich entstehen die weißlichen Bereiche im Zusammenhang mit dem Verbrauch des Wassers in der Grenzfläche. Bei Proben OVS kommt eine Trocknung über die Oberfläche nach außen zur „inneren Austrocknung“ des UHPC im Zuge der Hydratation noch dazu.

Bei der Werkstoffkombination GR0DM wurden nur Proben OVS untersucht. Hier zeigt sich die Textur in der Kontaktfläche erstmals ansatzweise 4,5 Stunden nach der Wasserzugabe, auch erste Risse sind zur selben Zeit unter dem Mikroskop erkennbar. Dieser Zeitpunkt entspricht etwa dem Erstarrungsbeginn (vgl. Kapitel 4.1.6, Tabelle 4.8). Die Textur ist nach 21 Stunden stärker ausgeprägt als bei der Werkstoffkombination GR0EM. Der äußere Ring ohne Textur wird wiederum deutlich erkennbar. Außerdem kann bei den Proben nach einigen Tagen beobachtet werden, dass sich die Glasscheibe vom Rand her abzulösen beginnt. Ein feiner Spalt, erkennbar an einem Beugungs- bzw. Interferenzmuster, bekannt als „Newton´ Ringe“, bildet sich entlang des äußeren Randes der Grenzfläche, vgl. Abbildung 6.3.

Sprayt man Wasser seitlich auf die Sandwich-Proben auf, wird es in den feinen Ringspalt langsam eingesaugt und die dünne Glasplatte (3 mm) löst sich mit hörbarem Knacken von der UHPC-Fläche ab. Der Versuch wurde auch mit Proben GR0DM mit 12 mm dicken Glasplatten wiederholt, die 21 Tage MVS gelagert wurden⁸⁰. Das Ergebnis war, dass sich

⁸⁰ Proben AB_2008-07-04-GW_3/4, die als zweite Proben für die Kontaktwinkelmessungen hergestellt wurden.

nach dem Aufspritzen zwischen äußerem dunkelgrauem Ring am UHPC und Glas rundum eingedrungenes Wasser befand. Der Ring mit eingedrungenem Wasser war nach 45 Minuten etwa 3 mm breit, etwa halb so breit wie der dunkelgraue Bereich am UHPC. Keine der Glasplatten wurde dadurch allerdings abgehoben. Es ist also ein kapillarer Randspalt vorhanden, etwa im Ausmaß der an den Bruchflächen beobachteten Zone A, vgl. Kapitel 5.3.

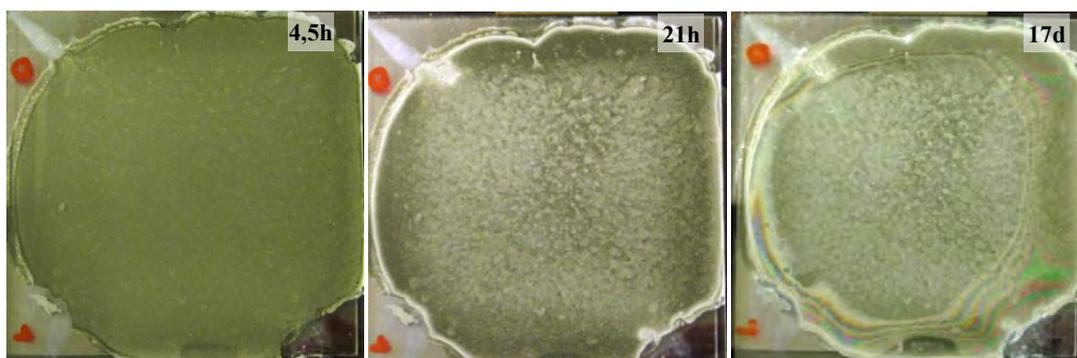


Abbildung 6.3: UHPC-Glas Kontaktfläche im Alter von 4,5h-21h-17d einer OVS gelagerten Sandwich-Probe GR0DM. Bild rechts zeigt Newton's Ringe im kapillaren Spalt

Eine weitere interessante Beobachtung lässt sich an Glas-UHPC Proben, die OVS gelagert wurden und Risse aufweisen, nach dem Ablösen von einer der beiden Glasscheiben vom UHPC machen: Spritzt man Wasser auf die freigelegte Seite der UHPC Scheibe auf, so dringt es in die Risse ein und wird nach kurzer Zeit auf der Probenunterseite sichtbar. Das bedeutet, dass die Risse die ganze Dicke der UHPC-Schicht queren.

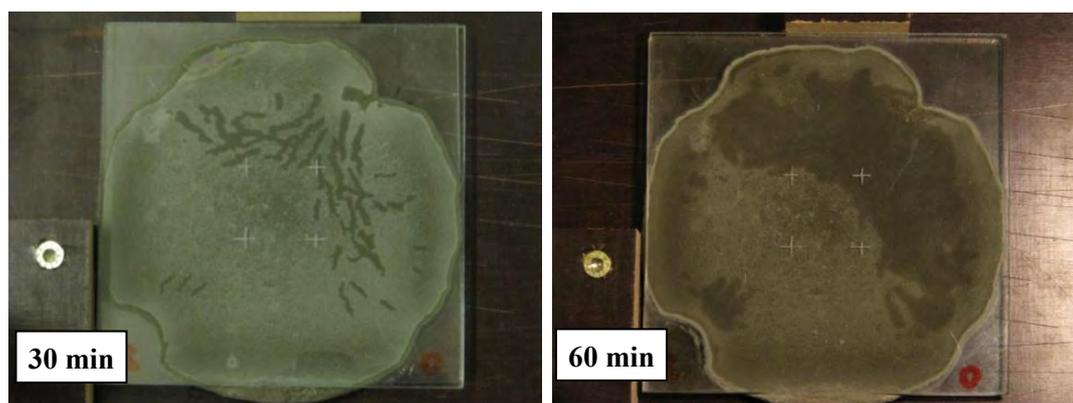


Abbildung 6.4: Wasser wandert durch Risse in einen kapillaren Spalt beidseits der Risse zwischen Glas und UHPC. Nach 1 Stunde hebt es die Glasscheibe sogar flächig ab.

Das Wasser wandert ausgehend von den Rissen in einen Spalt zwischen Glas und UHPC-Schicht ein. Nach einiger Zeit, etwa 60 min, hat es die ganze UHPC-Schicht „unterwandert“ (siehe Abbildung 6.4). Das bedeutet, dass beidseits entlang der Risse ein kapillar saugender Spalt vorhanden ist. Die Glasscheibe lässt sich anschließend leicht ablösen.

Mikroskopische Beobachtungen

Die Kontaktflächen wurden auch unter dem Lichtmikroskop betrachtet. Wieder wurden Aufnahmen im Probenalter ab 3 Stunden nach der Wasserzugabe bis zu einem Alter von einigen Tagen verglichen. Nachdem die ersten Risse entdeckt wurden, wurde ein Riss ins Zentrum genommen und weiter beobachtet.

Abbildung 6.5 zeigt einen Riss einer Probe GR0DM, der erstmals 4 Stunden nach der Wasserzugabe beobachtet worden ist und nach 5,5 Stunden als helle, weiße Linie deutlich ausgeprägt erscheint. Die Grenzfläche weist in diesem Alter eine homogene Musterung auf. Nach 21 Stunden entsteht neben dem Riss eine Textur mit weißlich erscheinenden Flächen. An der weißlichen Textur wird Licht reflektiert bzw. gestreut. Es scheint, dass dies Bereiche sind, die rauer bzw. poröser sind. Das Bild wie auch die Rissbreite ändern sich bis zum 28. Tag nicht weiter.

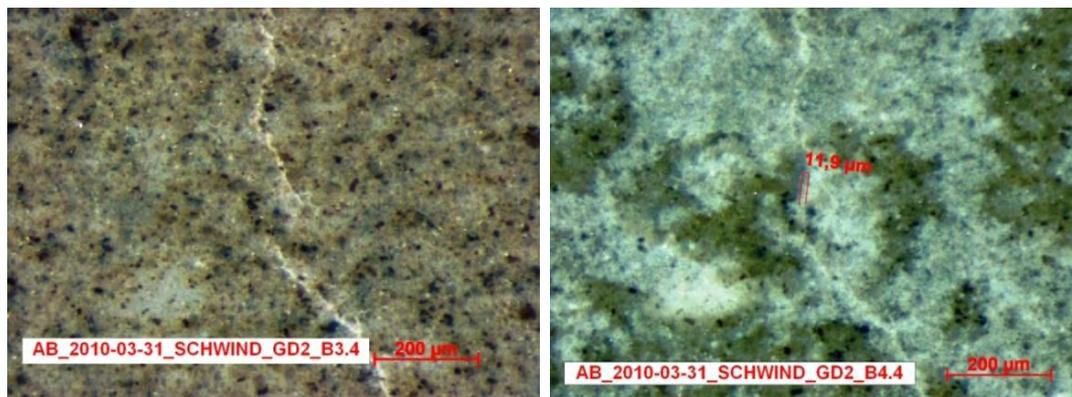


Abbildung 6.5: UHPC-Glas Kontaktfläche GR0DM mit einem Riss (11 µm breit) im Alter von 5,5 h und 21 h. Das Bild ändert sich nach 21 h nicht mehr merklich.

An Proben der Werkstoffkombination GR0EM entsteht dasselbe Bild. Risse werden erstmals nach rund 7 Stunden festgestellt, also etwas später als bei GR0DM. Die Rissbreite verändert sich vom ersten bis zum 21. Tag nicht mehr messbar! Ein „Punktmuster“ in einem „Haftschleier“ wie es an Bruchflächen zu beobachten ist – siehe Kapitel 6.3.2 – kann durch die Glasfläche hindurch an Sandwich-Proben nicht gesehen werden.

Das Wasser, das durch Risse eindringt und die Grenzfläche wie in Abbildung 6.4 zu sehen durchwandert, wird auch unter dem Mikroskop beobachtet. Die eingedrungene Feuchtigkeit breitet sich beidseits der Risse sehr langsam ($\sim 100\mu\text{m}/10\text{min}$) zwischen Glas und noch gut anhaftendem UHPC aus. Sie durchfeuchtet die im Mikroskop weißlich erscheinenden Bereiche und sorgt für ein homogenes Aussehen der Grenzfläche (Abbildung 6.6) wie es auch in den ersten Stunden beim jungen UHPC zu sehen war. Daraus wird geschlossen, dass die Grenzflächenschicht tatsächlich eine netzartig aufgebaute, porige Struktur aufweist, durchfeuchtet werden kann und deshalb poröser ist als das homogene Innere

des UHPC. Es existieren allerdings auch einzelne dunklere, nicht netzartig und weißlich erscheinende Stellen schon vor der Durchfeuchtung.

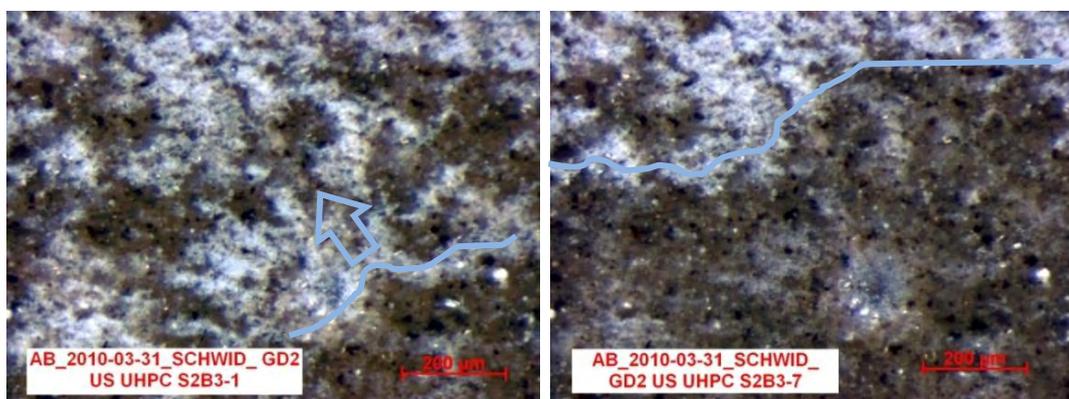


Abbildung 6.6: UHPC-Glas Kontaktfläche links bevor, rechts nachdem Feuchtigkeit von rechts unten beginnend eingewandert ist.

6.2.4 Schlussfolgerungen

Die Grenzfläche erscheint in den ersten Stunden nach der Wasserzugabe homogen und „durchfeuchtet“. Eine Textur der Grenzfläche mit einem netzwerkartigen Muster bildet sich in den ersten 4 bis 21 Stunden, also gleichzeitig mit der Akzelerationsphase der Hydratationsreaktion (Temperaturmaximum nach ~ 18 h) aus. Die Textur weist auf einen in der Grenzflächenschicht weniger dichten bzw. poröseren UHPC hin als er im ungestörten Inneren vorliegt. Sie entsteht durch einen Prozess der „inneren Trocknung“ im Zuge der Hydratation. Bei Proben MVS zeigt sich die Textur an der Grenzfläche ein paar Stunden später als bei den Proben OVS.

Deutliche Risse unterschiedlicher Breite ($10-70 \mu\text{m}$) werden in der Grenzfläche bei Proben OVS etwa gleichzeitig mit dem Erstarrungsbeginn nach 4 bis 7 Stunden nach Wasserzugabe sichtbar. Die Rissbildung ist nach spätestens einem Tag abgeschlossen, die Rissbreiten verändern sich bis zum 28. Tag nicht. Die Risse gehen durch die ganze Schichtdicke hindurch. Beidseits der Risse und entlang des äußeren Randes entsteht nach einigen Tagen ein kapillarer Spalt zwischen UHPC und Glas, in den Wasser einwandern kann.

6.3 Untersuchungen an Bruchflächen der glatten Proben

Durch die Untersuchung der Bruchflächen, die durch einen Bruch in der Grenzflächenschicht entstanden sind, also im UHPC sehr nahe an der Kontaktfläche zum Adhärens, können Erkenntnisse über die Zusammensetzung der Grenzflächenschicht gewonnen werden. Zu den Bruchformen siehe auch Kapitel 5.3. und Kapitel 5.6.

An den glatten Stahl- und in geringerem Maß auch an den Glasoberflächen der Haftzugproben haften ein Belag aus Bindemittelstein und einzelne größere Betonstücke an. Dieser Belag, der im Folgenden auch als „Haftschleier“ bezeichnet wird, hat ein charakteristisches Aussehen. Er weist ein mehr oder weniger stark ausgeprägtes „Punkt- bzw. Netzmuster“ auf und wird bei Schräglichtbeleuchtung bereits makroskopisch sichtbar, vgl. Abbildung 6.7 und Abbildung 6.9.

6.3.1 Proben

Je Verbundprobe können vier Kontaktflächen untersucht werden. Das sind die Stahl- bzw. Glasseite und die UHPC-Seite der „ursprünglich“, also bei der Haftzugprüfung gebrochenen Fuge, und die Stahl- bzw. Glas- und die UHPC-Seite der zweiten Verbundfuge, die sich erst nach ein paar Tagen der Lagerung an trockener Raumluft nachträglich von Hand ablösen ließ. Die Untersuchung erfolgte in der Regel ein paar Tage nach der Haftzugprüfung. Die Proben lagerten vom Tag der Haftzugprüfung bis zur Untersuchung an trockener Raumluft.

6.3.2 Ergebnisse der Untersuchungen an einzelnen Werkstoffkombinationen im Lichtmikroskop

Werkstoffkombination SR0DM

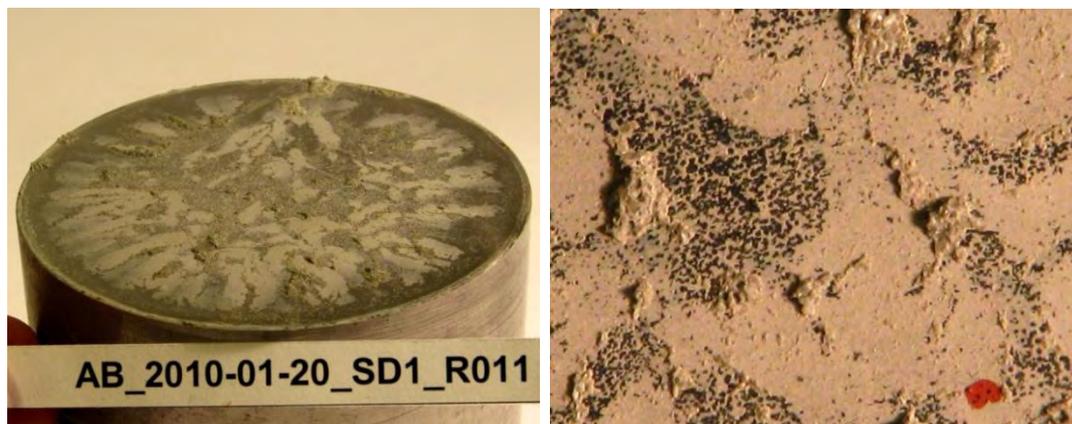


Abbildung 6.7: a) ursprünglich abgelöste Bruchfläche einer Probe SR0DM-OVS, b) Detailaufnahme im Zentrum von a) „Haftschleier“, Stahl- und Glasoberfläche erscheinen schwarz

Am deutlichsten wird der „Haftschleier“ auf den Stahlteilen der Proben, die in der Serie SD1 mit der UHPC Mischung DM hergestellt wurden, sichtbar. Auf der ursprünglich abgelösten Seite findet sich immer ein dickerer und dichter Belag von Bindemittelstein als auf der nachträglich abgelösten. Bei den Proben OVS gibt es korrespondierend mit dem Rissbild in jedem Rissfeld eine Zonierung. In ihr sind einzelne Bereiche mit einem „Punkt-

ter“ und daneben sowohl blank abgelöste Bereiche wie auch dichter Belag ohne Punkte zu sehen, vgl. Abbildung 6.7. Stellenweise zeigen sich anhaftende Betonbruchstücke, in welchen die vielen kuguligen Luftporen des UHPC und auch freiliegende Quarzkörner sichtbar werden.

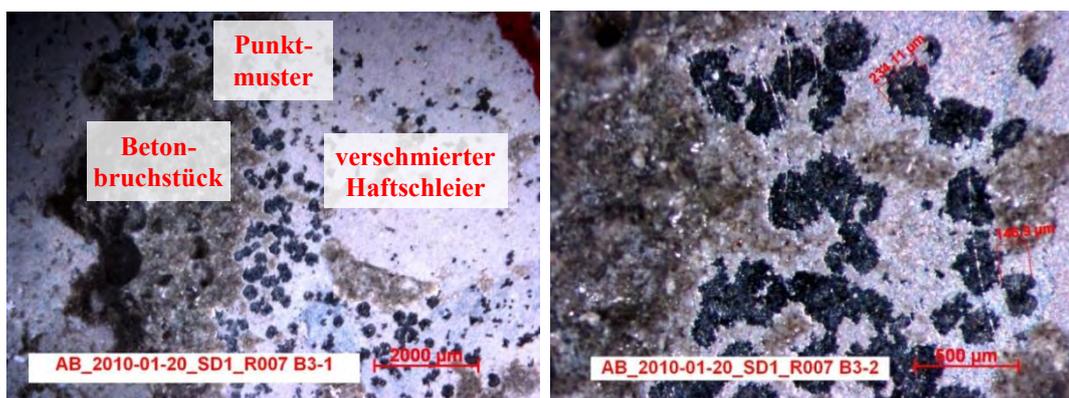


Abbildung 6.8: a) Stelle im Zentrum einer Bruchfläche SR0DM-OVS mit b) Detail

Die mikroskopischen Aufnahmen des „Haftschleiers“ einer Probe OVS in Abbildung 6.8 zeigen das Zentrum eines Rissfeldes. Neben einem Betonausbruch ist ein Streifen des Haftschleiers mit „Punktmuster“ zu sehen. Die blank abgelöste Stahloberfläche erscheint in kreisförmigen Feldern schwarz. Der umgebende Haftschleier ist homogen dicht und weist kein Muster auf, seine Dicke wurde mittels Fokusvariation im Lichtmikroskop mit etwa 5 µm bestimmt. Er schaut „verschmiert“ aus.

Bei Proben MVS erscheint der Haftschleier makroskopisch homogen, mit gleichmäßigem Muster, nicht „verschmiert“. Kleine kreisförmige schwarze Ausnehmungen, „Punkte“, befinden sich in einem hellgrau erscheinenden Belag (siehe Abbildung 6.9).

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen den anhaftenden Belag an zwei Stellen einer Probe SR0DM-MVS. Die ganze Bruchfläche dieser Probe ist in Abbildung 5.51 auf Seite 161 gezeigt. Die Abbildung 6.10a zeigt die ursprünglich abgelöste Bruchfläche mit dem „Haftschleier“ an einer Stelle, die 15 mm vom äußeren Probenrand entfernt liegt. Es zeigt sich, dass der Haftschleier aus anhaftendem Bindemittelstein durch beinahe kreisrunde Ausnehmungen, wiederum Stellen mit blank abgelöstem Stahl, unterbrochen ist. Die Ausnehmungen sind zum äußeren Probenrand hin weniger dicht, zum Zentrum hin dichter angeordnet. Der Übergang ist abrupt. Er stellt eine Grenze der in Kapitel „Bruchflächenanalyse“ beschriebenen Übergangszone A/B zur Zone B der Bruchfläche dar, die makroskopisch kaum sichtbar ist.

Die Durchmesser der Ausnehmungen sind etwa gleich groß, bei Proben mit UHPC DM 150 bis 270 µm. Teilweise überschneiden sich die kreisrunden Ausnehmungen.

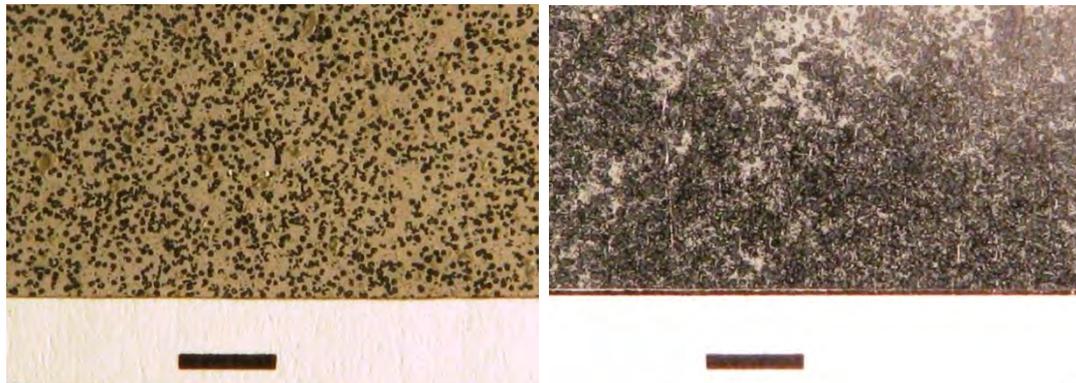


Abbildung 6.9: Makro-Aufnahmen des anhaftenden Belages aus Bindemittelstein auf einer polierten Stahlfläche, Probe SR0DM-MVS: a) Ursprünglich bei der Haftzugprüfung abgelöster Probekörperunterteil; b) nachträglich von Hand abgelöster Oberteil.

Die blanke Stahloberfläche erscheint schwarz. Balken=3,5 mm

In Abbildung 6.10b ist in starker Vergrößerung zu sehen, dass im Haftschleier neben den kreisförmigen schwarzen Bereichen auch Gefügaporen – unregelmäßigen schwarzen Flächen – vorhanden sind. In später beschriebenen Analysen wird gezeigt, dass die als anhaftender Bindemittelstein bezeichneten Flächen aus CSH (Calcium-Silikat-Hydrat) bestehen. An den erhabenen Stellen der Beton-Bruchfläche, die mit den blank abgelösten kreisförmigen Ausnehmungen korrespondieren, wird vermehrt $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Calcium-Hydroxid in fester Form) nachgewiesen.

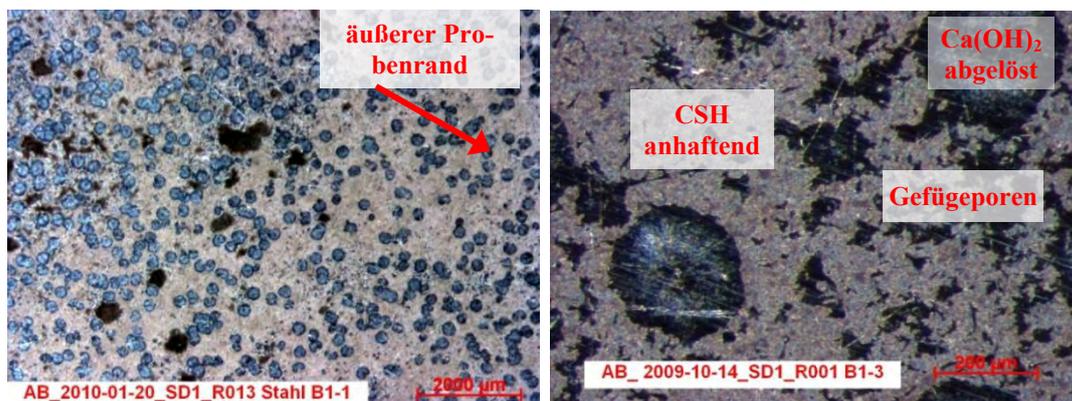


Abbildung 6.10: a) Stelle mit „Punktmuster“ im anhaftenden Bindemittelstein nahe des äußeren Randes, b) Haftschleier in starker Vergrößerung (Stahl=schwarz)

Die Stelle B2 in Abbildung 6.11 derselben Probe zeigt Details der Stahloberfläche, die zum Vorschein kommen, wenn das großflächige anhaftende Betonausbruchsstück aus dem Zentrum der Probe nachträglich abgelöst wird (siehe auch in Abbildung 5.51b, Seite 161). Der Haftschleier aus Bindemittelstein ist nicht mehr sichtbar, außer einzelne grau-bräunliche Reste davon. Man erkennt auch, dass die Ausnehmungen auf dem schwarzen

Stahluntergrund eine hell-weiße sternförmige Färbung ausgehend vom Zentrum aufweisen, vgl. Abbildung 6.11b.

Die Struktur könnte von in der Schrägbeleuchtung reflektiertem, gestreutem Licht einer leicht rauhen Oberfläche herrühren. Das deutet darauf hin, dass die Stahloberfläche hier durch den Kontakt mit UHPC chemisch verändert, angeätzt und damit aufgeraut wurde. Die hell-weiß reflektierenden Linien im Bild („Kratzer“) rühren von Polierriefen her. Diese Riefen mit etwa 1 μm Tiefe werden durch den UHPC als Erhebungen abgeformt, wie auf den zugehörigen UHPC-Flächen erkannt werden kann.

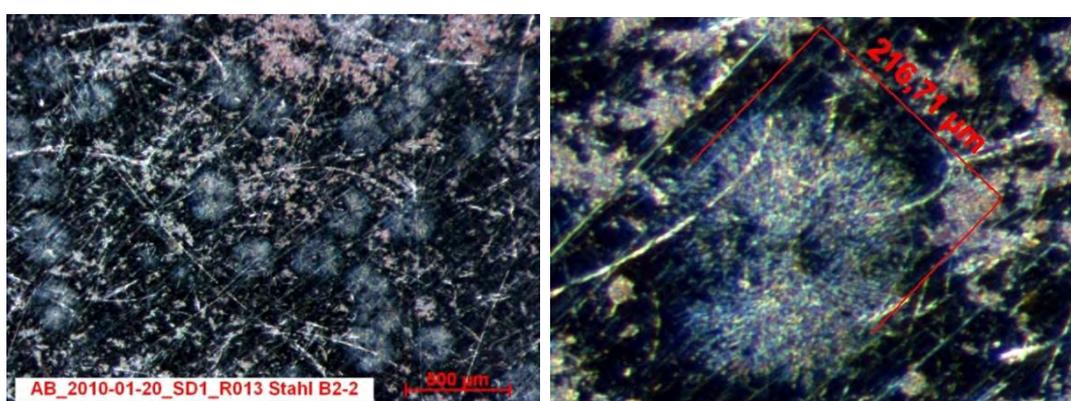


Abbildung 6.11: Stelle B2 der Probe SD1-R013. Hier wurde der anhaftende Beton nachträglich abgelöst, darunter zeigen sich Spuren des „Punktmusters“

Die zugehörige Oberfläche des nachträglich abgelösten Betonausbruchsstückes derselben Probe ist in Abbildung 5.51c, Seite 161, zu sehen. Die nachträglich abgelöste Betonoberfläche ist im Gegensatz zu einer ursprünglich abgelösten, wie sie zum Beispiel in Abbildung 6.12 zu sehen ist, wesentlich glatter. Sie weist kaum Vertiefungen aufgrund von Betonausbruch oder Ausbruch von Bindemittelstein auf. Die sternförmigen weißen Ausnehmungen des „Punktmusters“ sind auf der glatt abgelösten Betonoberfläche stellenweise auch erkennbar.

Die Abbildung 6.12a zeigt eine ursprünglich abgelöste UHPC-Seite, auch hier ist eine Musterung mit annähernd kreisrunden Flächen erkennbar. Während an den Stahl- und Glasoberflächen also anhaftender UHPC sichtbar wird, zeigt sich auf den zugehörigen UHPC-Schichten das gegenteilige Relief von UHPC-Ausbrüchen.

An einzelnen besonders glatten Stellen häufen sich die kreisrunden Flächen. Dort werden Luftporen knapp unter der korrespondierenden Seite der Betonoberfläche aufgefunden.

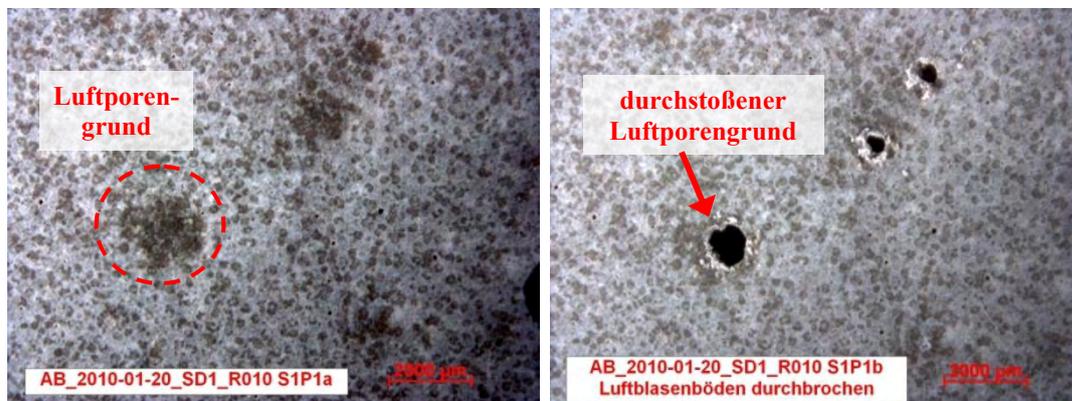


Abbildung 6.12: Proben SR0DM, abgelöste UHPC-Fläche. Anhäufung der kreisrunden dunkelgrauen Flächen („Punkte“) an Stellen mit Luftporen im UHPC mit dünnem „Boden“

Werkstoffkombination SR0EM

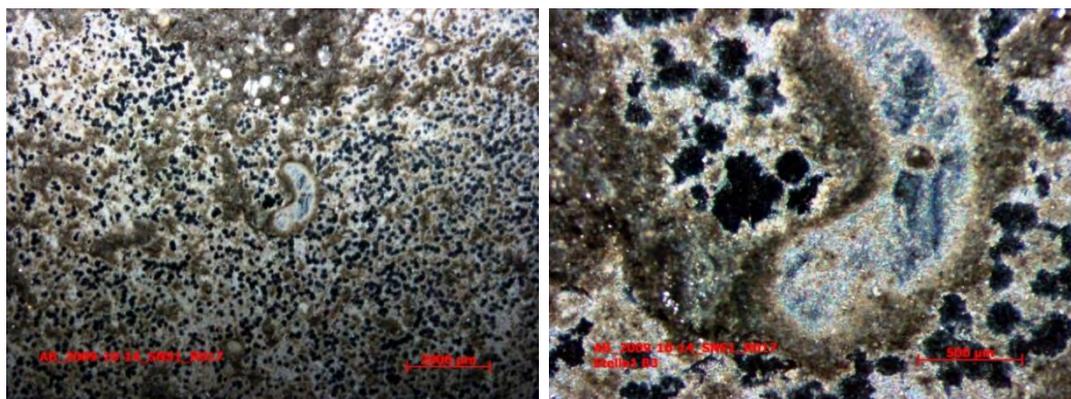


Abbildung 6.13: Stelle aus Probe SNS1-R017-MVS in 2 Vergrößerungen, der Grund einer halbmondförmigen Luftpore im Beton nahe der Stahloberfläche ist zu sehen

Bei der Werkstoffkombination SR0EM-MVS überwiegt Betonbruch. Flächenanteile mit fugenahem Bruch finden sich besonders in Zone B der Bruchfläche, vgl. Abbildung 5.29a auf Seite 143. In diesen Bereichen anhaftender Bindemittelstein – „Haftschleier“ – weist ebenso wie für die Werkstoffkombination SR0DM oben beschrieben ein „Punktmuster“ oder „Netzmuster“ auf, vgl. Abbildung 6.13. Der Anteil von kreisrunden Ausnehmungen, in denen die blanke Stahloberfläche schwarz zum Vorschein kommt, ist meist größer als der dazwischen anhaftende Bindemittelstein selbst. Der anhaftende Bindemittelstein-Belag erscheint also bei SR0EM weniger dicht als bei SR0DM. Wie Abbildung 6.13 im Vergleich zu Abbildung 6.10 zeigt, sind die schwarzen Ausnehmungen häufiger, haben aber einen kleineren Durchmesser. Außerdem sind mehr Betonausbruchs-Reste zu sehen.

Interessant ist die Gegenüberstellung von zugehörigen Bruchflächen der Stahlseite und der UHPC-Seite, die in Abbildung 6.14 zu sehen ist. Die Muster beider Seiten passen ineinander, d.h. die Erhebungen der UHPC-Seite korrespondieren mit den Vertiefungen bzw. den schwarzen Ausnehmungen im anhaftenden Bindemittelstein der Stahlseite.

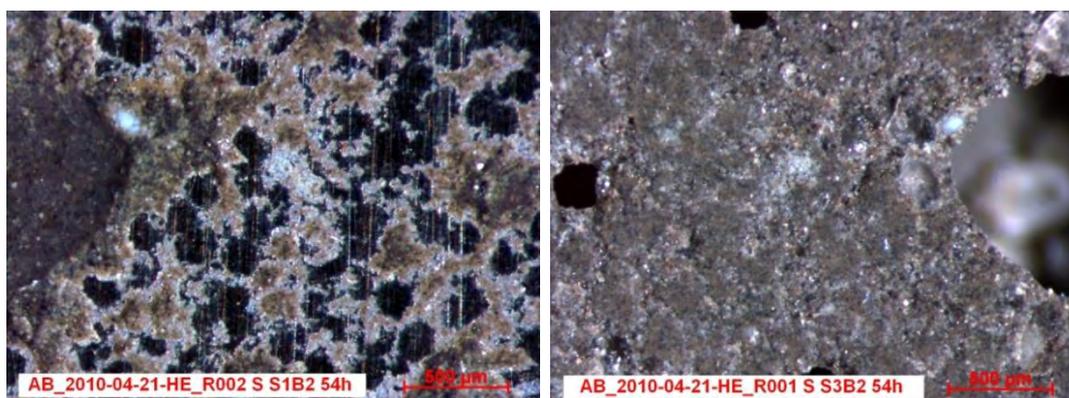


Abbildung 6.14: zugehörige Flächen der Fuge derselben Verbundprobe SR0EM-MVS.
a) Stahlgrund mit Punktmuster im Haftschiefer, b) UHPC Oberfläche mit Relief

In Abbildung 6.13 und Abbildung 6.14 ist auch jeweils der Grund einer Luftpore, die nahe der Kontaktfläche im UHPC angeschnitten wurde, zu sehen. Es fällt auf, dass Luftporen in der Regel von UHPC Bestandteilen größtenteils oder ganz umhüllt werden, vgl. Abbildung 6.15a. Der Luftporengrund an der Kontaktfläche besteht aus Bindemittelstein. Es zeigt, dass UHPC die Kontaktfläche gut oder sogar vollständig benetzt, der Randwinkel θ ist deutlich kleiner 90° . Außerdem entmischt sich der UHPC im Zuge dieser Benetzung, Quarzkörner bzw. grobe Bestandteile finden sich am Luftporengrund keine.

Die Proben der Serie HE zeigen, dass sich der Haftschiefer mit unterschiedlichem Probenalter nicht verändert. Die Durchmesser von 100 bis 180 μm der schwarzen Punkte im Haftschiefer bleiben gleich (1 Tag bis 226 Tage). Sie sind damit im Vergleich zu jenen der Proben der Serie SD1 mit der Mischung DM, die einen Durchmesser von 150 bis 270 μm zeigen, etwas kleiner. Die Dicke des anhaftenden Bindemittelsteins beträgt bei den Proben der Serie HE 5 bis 50 μm im Übergangsbereich zu anhaftenden Betonresten.

Die Zonierung zwischen Rissen ist im Kapitel 0 diskutiert. Mikroskopische Aufnahmen der Risspuren sind in Abbildung 5.39 und Abbildung 6.15 zu sehen. Abbildung 6.15 zeigt ein Beispiel für ein Rissfeld der 226 Tage alten, zusätzlich im Ofen getrockneten Probe. Auch sie zeigt anhaftende Betonstücke und Haftschiefer in den annähernd hexagonalen Rissfeldern. Neben den Risspuren häufen sich die schwarzen Ausnehmungen, also Berei-

che an denen blanker Stahl zum Vorschein kommt. Zum anhaftenden Betonrest im Zentrum des Feldes hin wird der anhaftende Bindemittelstein dichter⁸¹.

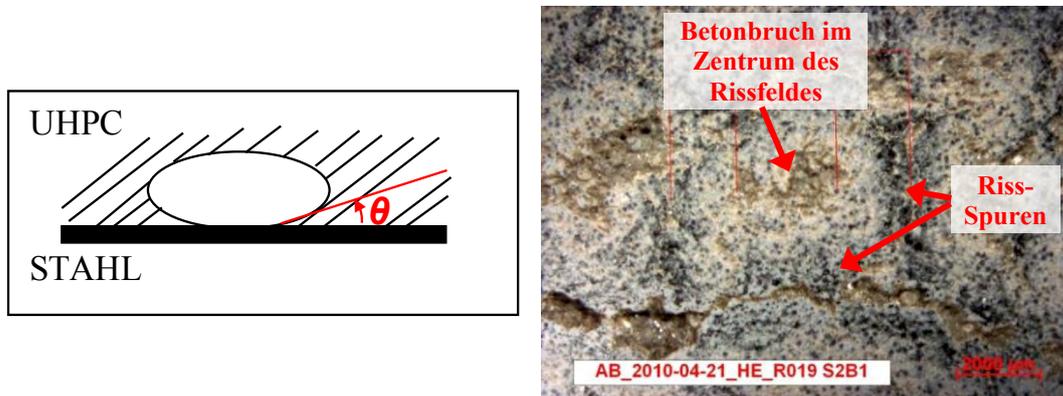


Abbildung 6.15:a) Luftpore im UHPC an der Kontaktfläche, b) Rissfeld einer der 226 Tage alten, zusätzlich wärmebehandelten Probe. Zonierung im Rissfeld ist zu sehen

Werkstoffkombination GR0EM

Auf den glatten Glasproben sind wesentlich weniger Beton-Haftreste zu finden als auf den glatten Stahlproben. Ein feiner „Haftschleier“ aus Bindemittelstein ist aber erkennbar. Auf der ursprünglich im Zugversuch abgelösten Seite ist der Belag dichter und dicker als auf der nach Tagen der trockenen Lagerung nachträglich abgelösten Seite. Bei einer Probe MVS wurde auch die zweite Verbundfuge gleich nach der Haftzugprüfung abgezogen. Der Belag ist dann auf beiden Glasoberflächen etwa gleich stark ausgeprägt. Das bedeutet, die Ausprägung des Haftschleiers hängt von der Art der Beanspruchung im Zusammenhang mit der austrocknenden Lagerung ab.

Das „Punktmuster“ oder „Netzmuster“ ist ähnlich wie bei den Proben SR0EM ausgebildet. Die Durchmesser der Ausnehmungen, an welchen die glatte Glasoberfläche zum Vorschein kommt, ist etwa gleich groß wie bei den Stahlproben mit derselben UHPC-Mischung (100 bis 180 μm). Eine Zonierung von Riss zu Riss ist bei Proben OVS, wie schon für Stahlproben beschrieben, zu erkennen. Am Riss haftet jeweils ein Grat von UHPC an („Riss-Spur“), vgl. Abbildung 6.16.

Eine Gegenüberstellung der zugehörigen Bruchflächen der Glasseite und der UHPC Seite ist in Abbildung 6.17 zu sehen. Wieder passen die Muster beider Seiten exakt ineinander.

⁸¹ Da im Rissfeld zentral Zugspannungen und am Rand Schubspannungen in der Fuge überwiegen, lässt sich folgern, dass die schwarzen Stellen-Bereiche auf Zug zur Haftfestigkeit beitragen aber unter Schubbeanspruchung nicht zur Haftschubfestigkeit.

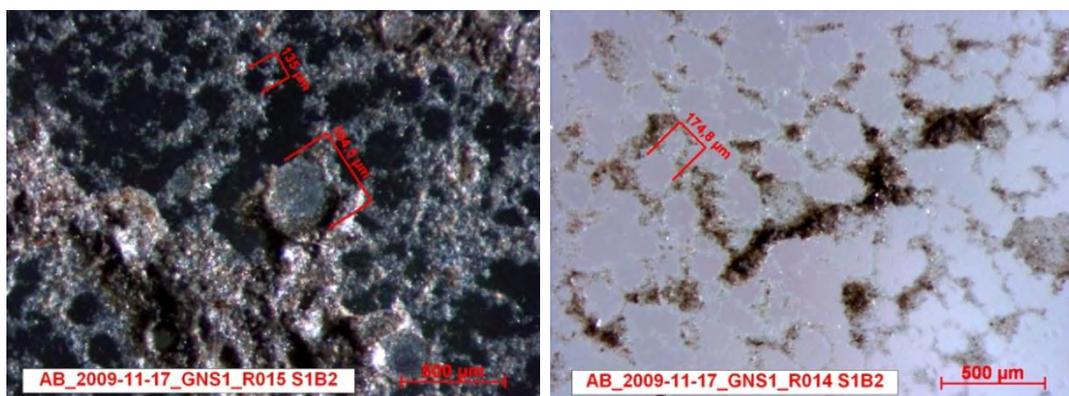


Abbildung 6.16: a) ursprünglich abgelöste Glas-Bruchfläche einer Probe OVS mit Luftpore im Zentrum, Glas=schwarz, b) nachträglich abgelöste Glas-Bruchfläche (MVS) mit Riss-Spur quer durch das Bild verlaufend. Glas=hellgrau.

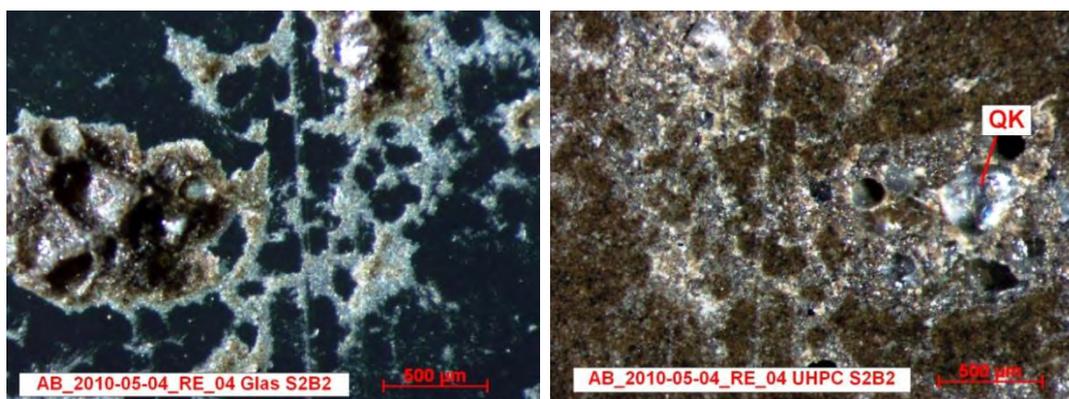


Abbildung 6.17: beide zugehörigen Seiten einer Probe Glas-UHPC. a) Glasseite mit Haftresten, b) UHPC Oberfläche, Quarzkorn (QK) erkennbar

Bruchflächen der Torsionsschubproben SR0EM und GR0EM

Lichtmikroskopische Betrachtungen von Bruchflächen der Torsionsschubproben sind im Kapitel 5.6.1 beschrieben. Es zeigt sich, dass die Ablösung durch Schub unmittelbar in der Kontaktfläche erfolgt, während es durch Zug zu einem Bruch im Material, oftmals in der Grenzflächenschicht, kommt. Ein „Haftschleier“ ist bei Schubbeanspruchung nicht ausgeprägt.

6.3.3 Ergebnisse der Untersuchungen mit dem Elektronenmikroskop und mittels Sondertechniken

Die folgende Tabelle 6.2 gibt eine Übersicht der Proben, an denen elektronenmikroskopische Untersuchungen gemacht und Sondertechniken angewendet wurden.

Tabelle 6.2: Proben für elektronenmikroskopische Untersuchungen

Werkstoff-Rauheit	Verdunstungsschutz	UHPC	Bezeichnung mit Herstellungsdatum	untersucht mit /am	Anmerkung
GR0EM	MVS	EMK2g, Serie HE	AB_2010-05-04_RE_03 Glas ... UHPC	ESEM 4.6.2010	abgelöste obere Glasplatte und zugehörige UHPC-Schicht der Probe von Serie RE
SR0EM	MVS	EMK2g, Serie HE	AB_2010-04-21_HE_R005	element mapping	HZ-Prüfung nach 7d, ursprüngl. abgelöster UHPC
	MVS		AB_2010-04-21_HE_R001	ESEM	HZ-Prüfung nach 2d, ursprüngl. abgelöster UHPC
	OVS		AB_2010-04-21_HE_R012	ESEM	HZ-Prüfung nach 28d, ursprüngl. abgelöste Stahlseite (50%b-Bruch)
SR1EM-EV	MVS	EMK2g, Serie HE=EV	AB_2010-04-28_EV_R110	ESEM	Bruchfläche raue Stahlseite

Proben im ESEM

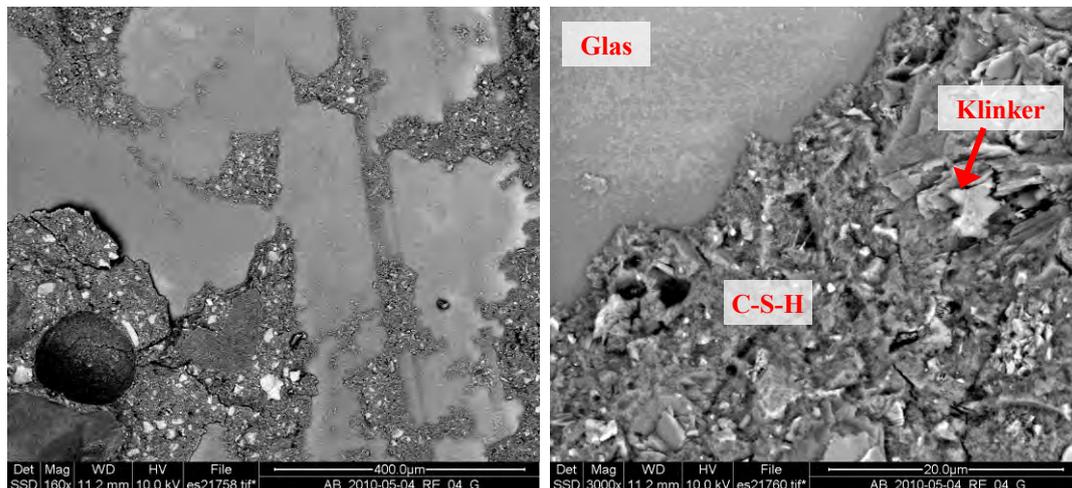


Abbildung 6.18: a) Glasfläche (milchig-grau) mit anhaftendem UHPC-Bindemittelstein. Unhydratisierte Klinkerkörner erscheinen weiß bzw. im Detail b) hellgrau

Die Glasprobe, die in Abbildung 6.17 gezeigt ist, wurde auch im ESEM betrachtet (siehe Abbildung 6.18).

Mittels EDX können die Bestandteile des „Haftschleiers“ auf der Glasoberfläche analysiert werden. Er wird von UHPC-Bindemittelstein, also CSH-Phasen (Calciumsilikathydrat), und eingeschlossenen unhydratisierten Klinkerbestandteilen gebildet. Sie erscheinen weiß in dem grauen „Geflecht“ von hydratisiertem Material. Poren sind als schwarze Stellen zu erkennen. Quarzkörner gibt es im „Haftschleier“ keine zu sehen. Die freiliegenden Glasflächen erscheinen milchig grau.

Die zugehörige Seite der abgelösten UHPC-Schicht passt wie das Positiv zum Negativ, vgl. Abbildung 6.19a - Topografiekontrast. Im Materialkontrast (Abbildung 6.19b) sind erhabene glatte Flächen mit hellgrauen Schlieren auf dunkler grauem Hintergrund zu er-

kennen, ein Hinweis auf verschiedene Materialanteile in den erhabenen Flächen. Zwischen ihnen liegen ausgebrochene Stellen mit im Materialkontrast erkennbaren weißen Klinkerkörnern. Die EDX Analysen zeigen, dass das Material der UHPC Oberfläche der typischen Zusammensetzung des Bindemittelsteins entspricht. Es werden die Bestandteile der CSH-Phasen, die Elemente Ca, Si und O angezeigt. An der Oberfläche, die die Kontaktfläche zum Glas und Stahl darstellt, befinden sich weder Quarzkörner, noch unhydratisierte Klinkerkörner, noch Luftporen.

Nahe der Grenzfläche war lokal so viel Wasser im Verhältnis zum Zement vorhanden, dass der Zement vollständig hydratisieren konnte. Im Gegensatz dazu bleiben im UHPC-Inneren aufgrund des niedrigeren W/B-Wertes unhydratisierte Klinkerkörner bestehen. An der Kontaktfläche muss also ein feinstteilreiches Gemisch aus Wasser, Fließmittel, Zement und Mikrosilika vorliegen. Der UHPC ist in der Grenzflächenschicht „entmischt“, beinhaltet also keine groben Bestandteile, Quarz- und Klinkerkörner. Erst in den etwas tiefer liegenden Schichten, sichtbar in den ausgebrochenen Bereichen, kommen kleine unhydratisierte Klinkerkörner und noch tiefer Quarzkörner zum Vorschein.

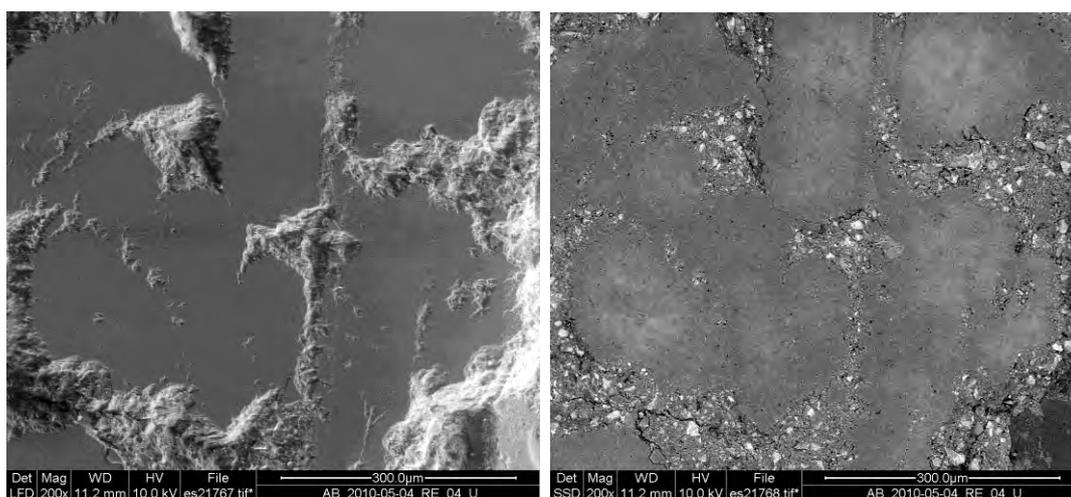


Abbildung 6.19: UHPC Oberfläche: a) im Topografie-, b) im Materialkontrast.

Nach den UHPC-Glas-Proben sollen auch einige Bilder der UHPC-Stahl-Proben, die mit dem ESEM aufgenommen wurden, zum Vergleich beschrieben werden. Abbildung 6.20a zeigt eine Stelle eines Risses einer nach 28 Tagen geprüften Verbundprobe der Werkstoffkombination SR0EM-OVS. Entlang des Risses haftet UHPC als Grat auf der Stahloberfläche an. Daneben erscheint blank freigelegter Stahl im Materialkontrast weiß und zeigt das „Punktmuster“ wieder. Unmittelbar neben dem Riss sind einige beinahe blanke Bereiche mit einem besonders feinen Haftscheier bedeckt, der sich im Detailbild als Ansammlung von kugelförmigen Körnern mit „Füßchen“ zeigt. Zwischen ihnen befinden sich noch kleinere Bestandteile, vereinzelte schwarze Punkte (Abbildung 6.20b). Die EDX zeigt, dass die im Materialkontrast hellgrauen Körner an Calcium reich und die zwischen

den Füßchen liegenden schwarzen Punkte Silizium-haltig sind. Offensichtlich sind hier hydratisierende Zementkörner (Calcium) und dazwischen liegende Bereiche mit Mikrosilika (SiO_2) zu sehen. Nahe am Riss scheint die frühe Trocknung lokal zu einem Mangel an Wasser geführt zu haben, der die Hydratation nur unvollständig zuließ. Die blanken Zonen neben dem Riss gehen beidseits in Zonen mit dichter werdendem anhaftenden Bindemittelstein bzw. anhaftendem UHPC über.

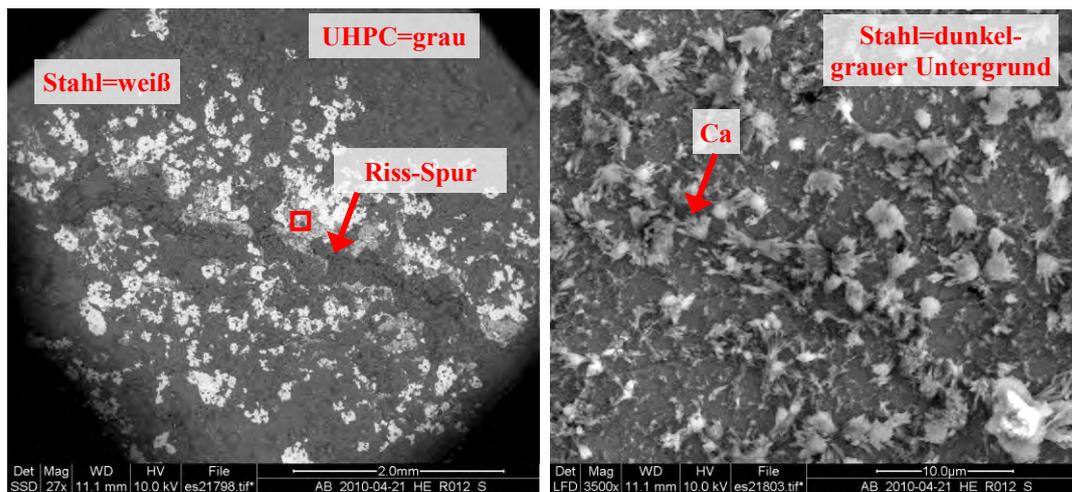


Abbildung 6.20: a) Materialkontrast, anhaftender UHPC entlang eines Risses, daneben blank abgelöster Stahl („Punktmuster“). b) Detail aus a) im Topografiekontrast.

Probe im Rasterelektronenmikroskop und Anwendung von Sondertechniken

An einer der abgelösten UHPC-Schichten aus dem Verbund-Probekörperteil AB_2010-04-21_HE_R005 wurden am Zentrum für Elektronenmikroskope der TU Graz einige weiterführende Untersuchungen durchgeführt. Es wurde insbesondere die erhabenen glatt abgelösten Flächen auf der Oberfläche analysiert. Die Untersuchungsberichte dazu sind im Anhang A.3.2 zu finden.

Die untersuchte UHPC Scheibe der Werkstoffkombination SR0EM-MVS wurde im Alter von 7 Tagen in der Haftzugprüfung abgelöst. Abbildung 6.21 zeigt den für die Untersuchung herausgeschnittenen Teil und eine REM-Aufnahme mit geringer Vergrößerung. Im Topografiekontrast sind die glatten erhabenen Flächen („Flecken“) am UHPC gut erkennbar. Wie Abbildung 6.22 zeigt, hat sich der UHPC an den erhabenen Stellen unmittelbar in der Kontaktfläche zum Stahluntergrund abgelöst. Das wird an den Spuren der Polierriefen des Stahls sichtbar, die trotz ihrer wenigen Mikrometer Tiefe im UHPC abgeformt werden. In der größten Vergrößerung zeigen sich einige wenige schwarze Punkte, die auf Poren im UHPC zurückzuführen sind und weiße Einschlüsse, die von unhydratisiertem Klinker herühren. Neben den erhabenen Flächen zeigen die Ausbrüche dagegen mehr Poren und einen größeren Klinkeranteil.

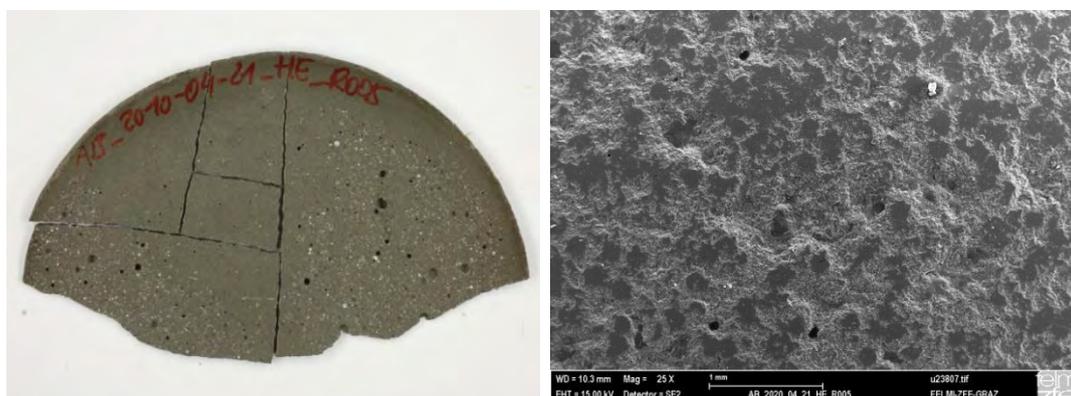


Abbildung 6.21: a) der für die Untersuchung herausgeschnittene Teil und b) die UHPC-Oberfläche im REM in geringer Vergrößerung

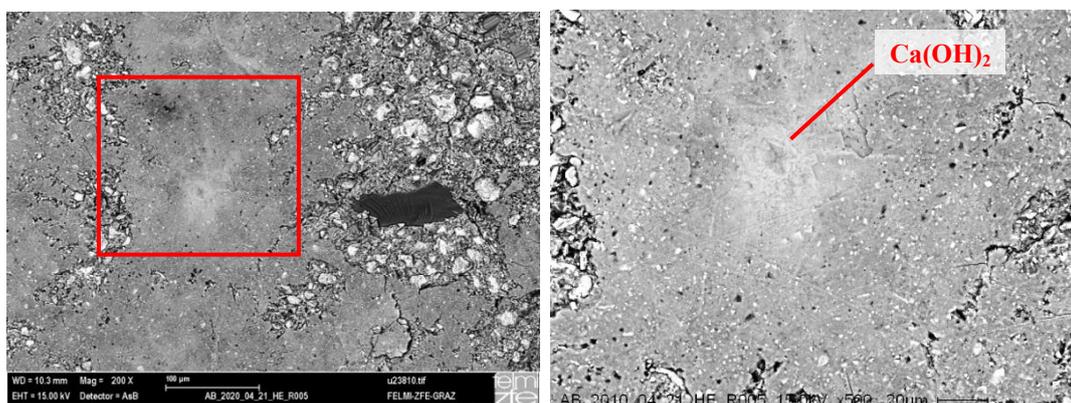


Abbildung 6.22: Detail der UHPC-Oberfläche: Erhabene glatte UHPC-Flächen mit weißlicher Färbung im Zentrum und Spuren von Polierriefen in der Stahloberfläche

Die erhabenen Flächen weisen eine weißliche Färbung (Schlieren) im Zentrum auf. Durch ein „element mapping“ kann nachgewiesen werden, dass in Bereichen der weißlichen Färbung eine erhöhte Konzentration des Elementes Calcium und gleichzeitig eine verringerte des Elementes Silizium vorhanden ist (siehe Bericht im Anhang A.3.2). Lokal ist also Calciumhydroxid Ca(OH)_2 stärker konzentriert vorhanden. In der Umgebung der weißlichen „Schlieren“ entspricht die Zusammensetzung aus CSH Phasen der UHPC-Matrix, dem hydratisierten Bindemittelstein.

Zusätzliche Untersuchungen mittels Raman-Mikroskopie und Infrarot- (IR-) Spektroskopie bestätigen die Aussagen von oben, vgl. Berichte im Anhang A.3.2. Bei den IR-Untersuchungen zeigt sich, dass die glatten, erhabenen Stellen mehr Hydroxid (OH^-) enthalten als die Umgebung, ein Hinweis auf Ca(OH)_2 , das hier in fester Form („Portlandit“) angereichert sein muss. Im Gegensatz zu den im Normalbeton auffindbaren großen Portlandit Kristallen mit rund 50 μm Durchmesser sind hier keine Kristalle sichtbar. Es ist be-

kennt, dass Portlandit im UHPC und HPC durch Mikrosilika zu Dikalziumsilikat weiter umgesetzt wird, es sind hier also wahrscheinlich nur $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Mikro-Kristallite vorhanden.

Schichtweises Abtragen der UHPC Oberfläche

Es wurde untersucht, ob das Muster von erhabenen, glatten Flächen auf der UHPC Oberfläche mit der Kornstruktur im Inneren zusammenhängt. Schrittweise wurde eine dünne Schicht von der Oberfläche mit Siliciumcarbid nass abgetragen und das Schliffbild im ESEM untersucht. Es wurden jeweils geschätzte 50 bis 100 μm abgeschliffen. Dabei fiel auf, dass sich die obersten Schichten ohne großen Kraftaufwand, die tieferen Schichten aber zunehmend schwieriger abschleifen ließen. Das spricht dafür, dass die Grenzflächenschicht ohne Quarzkörner weicher ist als das Innere.

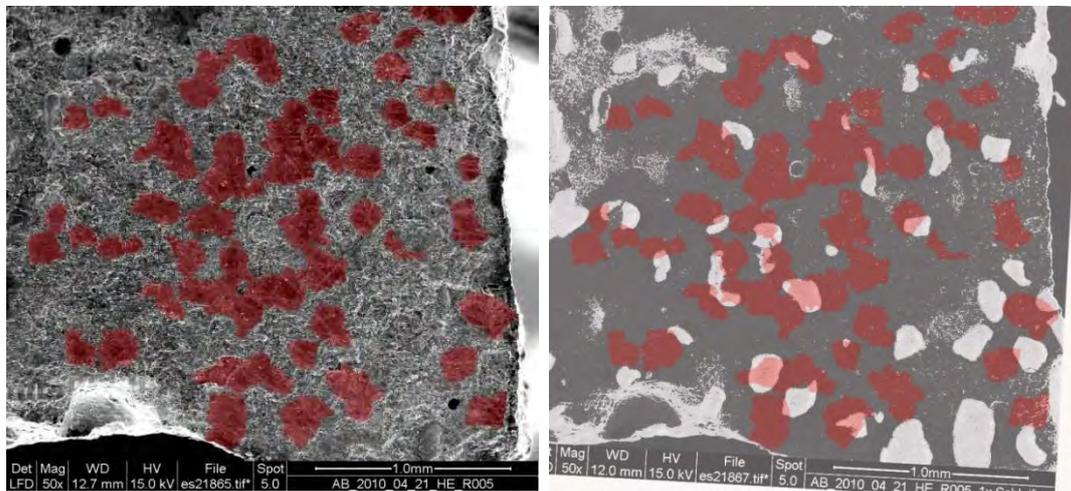


Abbildung 6.23: a) UHPC Oberfläche, die glatten erhabenen Flächen sind rot markiert; b) Überlagerung mit dem Bild einer etwa 100 μm tieferen Schicht, in der die Quarzkorn-Anschliffe weiß erscheinen.

Die digitalen Bilder der Oberfläche und einer darunter liegenden Schicht wurden mit einem Bildverarbeitungs-Programm nachbearbeitet und überlagert und sind in Abbildung 6.23 gezeigt. Es ist kein eindeutiger Zusammenhang der Lage des „Flecken“-Musters mit der Lage der Quarzkörner erkennbar. An einigen Stellen wird sichtbar, dass die glatt abgelösten Bereiche bevorzugt nahe neben Quarzkörnern bzw. zwischen nahe gelegenen Quarzkörnern vorkommen. Ein Zusammenhang mit den in den Schliffbildern auch sichtbaren, aber hier nicht dargestellten unhydratisierten Klinkerkörnern und den „Flecken“ kann nicht gefunden werden, vgl. Anhang A.3.2.

Es wird vermutet, dass lokale Dichte-Unterschiede im UHPC vorliegen, also Bereiche mit größerer und geringerer Porosität. Die erhabenen Stellen würden demgemäß beim Haftzugversagen aus dichteren Bereichen, die sie umgebenden Ausbruchsstellen aus poröseren

Bereichen entstehen. Diese dichteren Bereiche befinden sich möglicherweise bevorzugt im Zwickel zwischen Quarzkorn und Grenzfläche.

6.3.4 Schlussfolgerungen

Der anhaftende Bindemittelstein weist auf allen Stahl und Glas-Oberflächen nach der Ablösung durch Zugbeanspruchung ein Muster auf, ein „Punktmuster“. In Ausnahmungen im anhaftenden Bindemittelstein kommt der Untergrund (Stahl) blank abgelöst zum Vorschein. Mit den Ausnahmungen korrespondieren erhabene Bereiche auf den UHPC Oberflächen. Bei den nachträglich, nach mindestens einem Tag trockener Lagerung abgelösten Proben ist der Haftschiefer wenig ausgeprägt. Die UHPC-Scheiben haben größere glatt abgelöste Flächenanteile.⁸² An nach Schubbeanspruchung abgelösten Oberflächen ist kein anhaftender Belag und damit auch kein Muster sichtbar.

Der Durchmesser der Ausnahmungen im Haftschiefer ist bei Proben der Mischung EM kleiner als bei der Mischung DM, also Mischungs-abhängig. Er ist an Stahl gleich groß wie am Glas, also unabhängig vom Untergrund. Der Flächenanteil an glatt abgelösten „Ausnahmungen“ ist bei DM geringer als bei EM. Das korrespondiert mit dem um etwa 20 V.-% geringeren Bindemittelgehalt der Mischung DM.

Bei DM-Proben ist der Haftschiefer an den Bruchflächen stärker und dichter ausgeprägt. Bei EM-Proben ist meist kein Haftschiefer, sondern Betonbruch zu finden. Es wird daraus geschlossen, dass die Störung der grenzflächennahen UHPC-Schicht bei der Mischung DM stärker ausfällt als bei der Mischung EM. Die Störung der Packungsdichte oder auch die lokale Wasseranreicherung und in der Folge die Porosität in der Grenzflächenschicht sind demnach bei DM höher als bei EM.

An der Verbundfläche scheint sich im frischen UHPC eine feinstteilreiche, gut fließfähige Phase angesammelt zu haben. Dieses gut benetzende Gemisch an der Grenzfläche zu Stahl oder Glas konnte im Zuge der Erhärtung als Bindemittelstein vollständig hydratisieren und hat die Oberfläche perfekt abgeformt. Deshalb ist an den erhabenen Stellen der abgelösten UHPC-Schichten voll hydratisierter Bindemittelstein nachweisbar, während sich im UHPC Inneren eine Menge unhydratisierter Klinkerkörner befinden. Im Zentrum der erhabenen Stellen sind schlieren-artige Ca-Anreicherungen bei nachweislich geringem Si- und O-Gehalt sichtbar und es ist Hydroxid nachweisbar. Die weißen Schlieren zeigen also $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

⁸² An der im REM untersuchten UHPC Scheibe, eine 7d Probe, wird kein Unterschied der nachträglich abgelösten Seite von der ursprünglich abgelösten Seite beobachtet. Im REM sind sowohl das Punktmuster als auch die Schlieren im Zentrum der Punkte beidseits feststellbar. Allerdings sind auch unter LiMi und mit freiem Auge bei dieser Probe relativ viele Haftreste beidseits vorhanden, was atypisch erscheint.

Es kommt durch die Grenzfläche zu einer Entmischung im Frischbeton mit lokal erhöhtem W/B-Wert in der Grenzflächenschicht. Unmittelbar an der Grenzfläche sind weder unhydratisierte Klinkerkörner noch Quarzkörner aufzufinden. Das bedeutet, dass Klinkerkörner und Quarzkörner im Frischbeton auch an der Grenzfläche vollständig vom Bindemittelleim umhüllt werden. Es wird vermutet, dass lokale Unterschiede der Dichte im UHPC vorliegen, also Bereiche mit größerer und geringerer Porosität. Die erhabenen Stellen weisen demgemäß auf dichtere Bereiche, die sie umgebenden Ausbruchsstellen auf porösere Bereiche hin.

Bei Proben SR0DM OVS hat der „Haftschleier“ ein anderes Aussehen als bei SR0EM. Er weist „verschmierte“ Bereiche auf. Diese Bereiche treten in jedem Rissfeld in Zone B auf. Der „verschmierte“ Haftschleier ist dicht und zeigt kein „Punktmuster“. Außerdem sind zwischen den Rissen keine blanken Stellen sichtbar. An den nachträglich durch einseitige Trocknung der Bruchflächen abgelösten Flächen sind wesentlich weniger „verschmierte“ und dafür blank abgelöste Bereiche sichtbar.

Es wird angenommen, dass die „verschmierten“ Bereiche Gefügestörungen in der Grenzflächenschicht sind, die in einer sehr frühen Phase der Festigkeitsentwicklung noch vor dem Erstarrungsende zustande kommen. Diese Störungen entstehen durch die Wasseranreicherung und geringere Packungsdichte an einer ebenen Grenzfläche. Bei dem UHPC DM wirken sich solche lokalen Entmischungen stärker auf die Festigkeitsentwicklung aus als bei UHPC EM. „Ungestörter“ UHPC DM hat eine größere Packungsdichte als UHPC EM und weniger Zementgehalt. Er enthält außerdem Quarzmehl anstelle von Zement. Eine „gestörte“ Grenzflächenschicht mit höherem W/B-Wert entwickelt eine geringere Festigkeit als das optimal zusammengesetzte Innere und braucht etwas länger zur vollständigen Hydratation.

So kann gefolgert werden, dass der Bruch durch Zugspannungen im Fall der Werkstoffkombination SR0DM-OVS in der Grenzflächenschicht in einer Lage über dem „verschmierten Haftschleier“ zustande kommt. Bei vorwiegend Schubbeanspruchung zu einem späteren Zeitpunkt wie im Fall der nachträglichen Ablösung tritt das Versagen dagegen unmittelbar in der Kontaktfläche auf. Da keine Haftschubversuche mit dem UHPC DM durchgeführt wurden, bleibt das zu überprüfen.

6.4 Untersuchungen von Bruchflächen der rauen Proben

Lichtmikroskopische Untersuchungen von Bruchflächen der rauen Oberflächen, die einen fugennahen Bruch aufweisen, zeigen, dass UHPC die Vertiefungen gut ausfüllt und die Bruchebene über die Rauheit hinweg im UHPC verläuft (siehe Abbildung 6.24). Bemerkenswert sind die immer wieder anzutreffenden Luftporen, die zeigen, dass der Untergrund gut benetzt wurde wie auch schon an glatten Proben festgestellt (siehe Abbildung 6.15a auf Seite 204). Der Benetzungswinkel, den die Poren mit dem Untergrund einschließen, ist immer sehr flach.

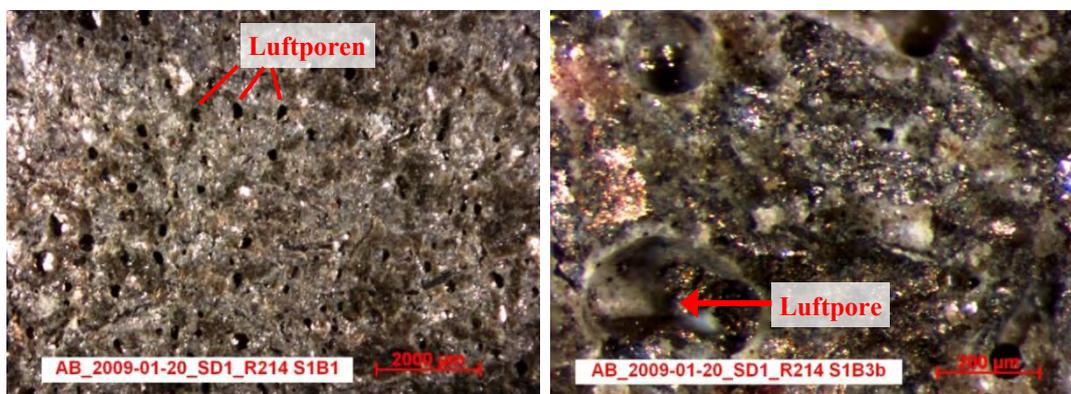


Abbildung 6.24: Stahl-Bruchfläche einer SR1DM-MVS-Probe in 2 Vergrößerungen: Es sind angeschnittene Luftporen und weißlich reflektierende Stahlteile im anhaftenden UHPC erkennbar

An in der Fuge abgelösten rauen Glasproben GR7 ist auch stellenweise die verästelte Struktur von anhaftendem Bindemittelstein, das „Punktmuster“ wie an den glatten Proben zu sehen, vgl. Abbildung 6.25.

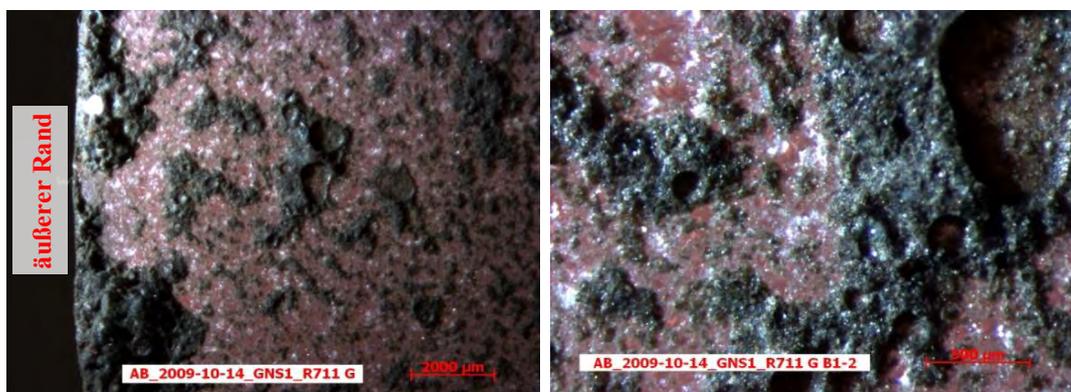


Abbildung 6.25: Glas-Bruchfläche einer GR7EM-OVS-Probe in 2 Vergrößerungen: Es sind angeschnittene Luftporen und anhaftender Bindemittelstein in verästelter Struktur (mit „Punktmuster“) erkennbar

Im ESEM wurden Bruchflächen von rauen Proben der Vorserie HZVGL2 der Werkstoffkombination SR1EM und eine Probe der Hauptserie EV der Werkstoffkombination SR1EM untersucht. Auch diese Aufnahmen zeigen, wie gut UHPC die Vertiefungen der rauen Oberfläche ausfüllt. Die Form angetroffener Luftporen des UHPC an der Stahloberfläche lassen wiederum auf eine gute Benetzung schließen, auch wenn nicht der ganze Luftporengrund mit Bindemittelstein bedeckt ist, vgl. Abbildung 6.26a. Die sichtbare Stahloberfläche erscheint stellenweise, z.B. in der Luftpore, relativ glatt und zeigt trotz Sandstrahlung wenige Riefen und keine feinen Vertiefungen mehr.

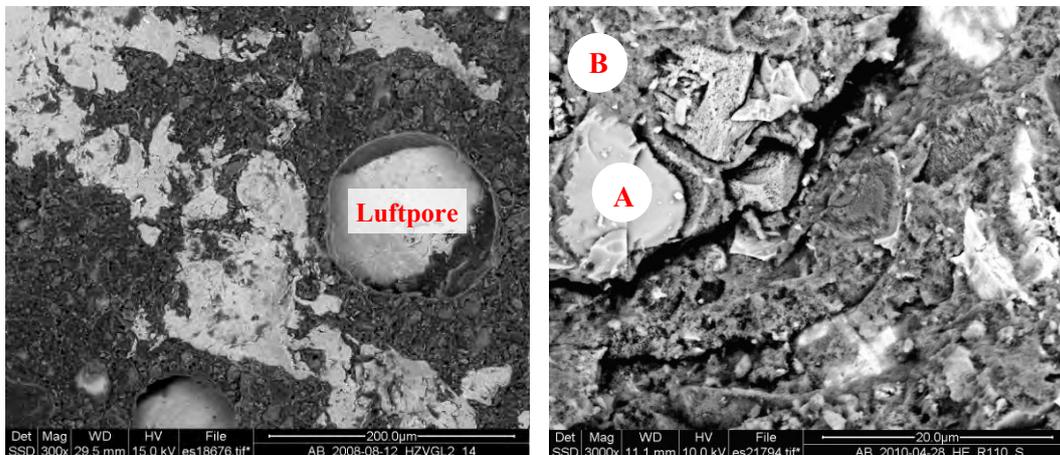


Abbildung 6.26: a) SR1EM-Bruchfläche mit angetroffener Luftpore an der Grenzfläche;
 b) UHPC-Detail mit Klinkerkörnern, EDX-A,B siehe Abbildung 6.27

Die Elementverteilungsanalysen EDX zeigen, dass die größeren hellgrauen Einschlüsse die unhydratisierten Kerne der Klinkerkörner darstellen, während die dunkler grauen, poröser erscheinenden Flächen die Zusammensetzung der UHPC-Matrix, also CSH-Phasen, aufweisen, vgl. Abbildung 6.27. Am hellsten erscheinen Stahlflächen.

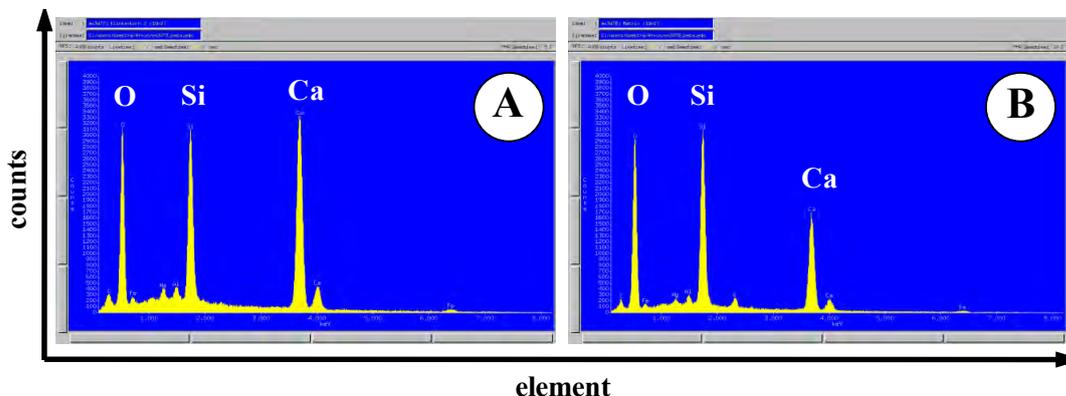


Abbildung 6.27: EDX zu Abbildung 6.26: a) Stelle (A) mit unhydratisiertem Klinkerkorn
 b) Stelle (B) mit Matrix (CSH). Die Verhältnisse der Peak-Höhen zueinander entsprechen dem Elementverhältnis in den CS(H)-Verbindungen

6.5 Untersuchungen von Verbundproben im Querschnitt

In Schnitten, die normal auf die Mittelebene der Kontaktfläche stehen (Querschnitte der Verbundproben), kann das Profil der Grenzfläche betrachtet werden. Damit soll insbesondere die Hypothese 1 in Kapitel 3.1 geklärt werden, nämlich, ob ein bestimmter Grad der Rauheit einer Oberfläche existiert, der von UHPC als Adhäsiv gerade noch benetzt und ausgefüllt wird. Außerdem sollen weitere Erkenntnisse über die Grenzflächenzone von

UHPC und Verbundpartner gewonnen werden. Unterscheidet sich UHPC in seiner Struktur (Porosität, Zusammensetzung) in der Grenzflächenschicht vom UHPC im „ungestörten“ Inneren? Wie gut ist der Kontakt zwischen UHPC und der Oberfläche des Stahls?

6.5.1 Probekörperherstellung

Um einerseits das von Randstörungen unbeeinflusste Innere einer Verbundprobe betrachten zu können und andererseits die Fuge beim Herstellen eines Querschnittes mechanisch so wenig wie möglich zu belasten, wurde eine spezielle Vorgangsweise bei der Herstellung von Stahl-UHPC Verbundproben gewählt. Vor allem konnte damit vermieden werden, die Stahl-UHPC Verbundproben zerschneiden zu müssen, was jedenfalls zu einer Zerstörung der Grenzflächenzone geführt hätte.



Abbildung 6.28: Brechen der Mikroskopie-Proben

Es wurden würfelförmige Schalungen für Verbundproben mit Seitenlängen von 50 mm gebaut, in die der vorbereitete Stahlprobenteil, der die halbe Schalung ausfüllt, senkrecht hineingestellt werden kann. Der Stahlprobenteil besteht aus zwei zusammengespannten Quadern ($2 \times 25 \times 25 \times 50 \text{ mm}^{83}$), deren gemeinsame Kontaktfläche zum UHPC mit der Rauheit R0, R1 oder R2 versehen worden ist. In die Schalungen wird frischer UHPC von oben eingegossen. Die Kontaktfläche steht dabei vertikal. Der UHPC-Probenteil wird so betoniert, dass er eine mittige Kerbe erhält (siehe Abbildung 6.28). Die Verbundproben werden etwa 28 Tage nach der Herstellung in zwei Hälften geteilt. Das gelingt, indem die Verbindung der Stahlteile gelöst und der UHPC Teil von der Kerbe ausgehend gebrochen wird. Es kann nun ein Profil der Grenzlinie betrachtet werden. Alle Proben wurden 28 Tage mit Verdunstungsschutz gelagert, danach ohne VS weiter gelagert, präpariert und im Alter von 30 bis 90 Tagen untersucht.

⁸³ Verbundproben, die im Elektronenmikroskop angeschaut werden sollten, dürfen nur eine beschränkte Größe haben.

Erstens werden die gebrochenen Proben im REM direkt untersucht. Zweitens wird ein Teil der Proben in Epoxidharz eingebettet. Die Einbettung erfolgt so, dass die Poren der Proben zuerst evakuiert werden und dann Harz eingebracht wird, das sämtliche zugänglichen Poren ausfüllt. Anschließend werden die Oberflächen geschliffen und poliert, sodass völlig ebene Querschnitte durch die Verbundproben entstehen. Die Tabelle 6.3 gibt eine Übersicht der so hergestellten und untersuchten Verbundproben.

Bei einigen Proben der Rauheit R0 löste sich der Verbund bei der Probenvorbereitung. Bei je einer Probe jeder Rauheit wurde der Verbund im Rahmen von Voruntersuchungen bewusst gelöst, um die in der Fuge abgelösten Flächen zu betrachten. Voruntersuchungen wurden mit dem Lichtmikroskop und mit dem REM an der Universität Kassel am Fachgebiet für Werkstoffe des Bauwesens und Bauchemie gemacht. Eine Vorserie von UHPC-Normalbeton und UHPC-UHPC Verbundproben wurde an der TU Graz untersucht.

Tabelle 6.3: Im REM untersuchte Verbundproben (in der Regel Querschnitte)

Werkstoff-Rauheit	UHPC-Konsistenz	Probenvorbereitung	Anzahl Proben	Untersuchung
SR0	EMK1	Bruch	2	24.11.2008
		in Harz eingebetteter Schliff	1	05.12.2008
		abgelöster Stahlteil und Betonteil	2	10/08 Kassel
	EMK2	abgelöster Stahlteil	1	20.08.2009
	EMoMS	abgelöster Stahlteil	1	20.08.2009
SR1	EMK1	Bruch	2	24.11.2008
		in Harz eingebetteter Schliff	1	05.12.2008
		abgelöster Stahlteil und Betonteil	2	10/08 Kassel
	EMK2	in Harz eingebetteter Schliff	1	20.08.2009
	EMoMS	in Harz eingebetteter Schliff	1	20.08.2009
SR2	EMK1	Bruch	3	24./28.11.2008
		in Harz eingebetteter Schliff	1	28.11.2008
		abgelöster Stahlteil und Betonteil	2	10/08 Kassel
	EMK2	in Harz eingebetteter Schliff	1	20.08.2009
	EMoMS	in Harz eingebetteter Schliff	1	20.08.2009
Vorversuche	Normalbeton-UHPC Verbund, raue Stahloberflächen		4	2007/08
EMK1	Mischung EM, Konsistenz K1, sehr fließfähig			
EMK2	Mischung EM, Konsistenz K2 wenig fließfähig			
EMoMS	Mischung auf Basis EM, aber ohne Mikrosilika			

6.6 Ergebnisse

Im Folgenden werden Aufnahmen von Verbundproben mit sehr fließfähigem UHPC K1 und Stahl mit polierten und zwei verschiedenen rauen Oberflächen präsentiert.

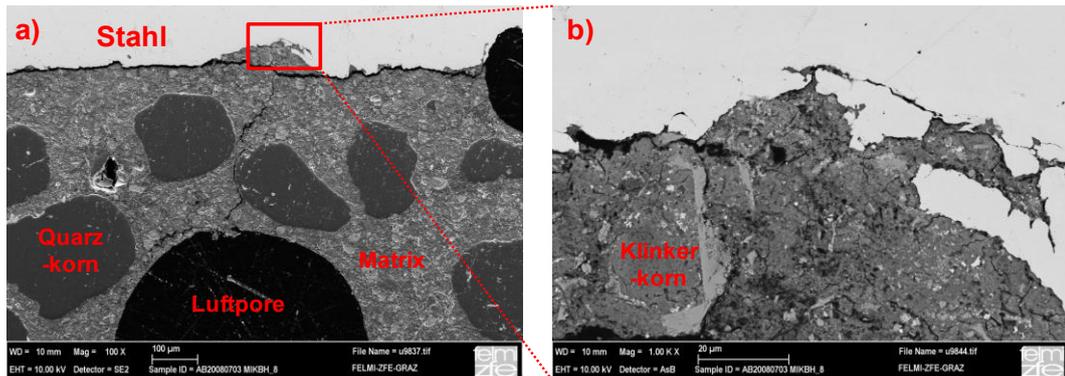


Abbildung 6.29: REM Aufnahme Stahl UHPC Verbundprobe, b) ist Detail aus a)

In der Übersichtsdarstellung (Abbildung 6.29a) zeigt sich, dass Quarzkörner (\varnothing 100 bis 500 μm) in der UHPC-Bindemittelmatrix ohne sich gegenseitig zu berühren eingebettet sind. Sie sind zu groß, um die Vertiefungen der sandgestrahlten Oberfläche ($R_a \sim 25 \mu\text{m}$) auszufüllen. In der Oberflächenvertiefung (Abbildung 6.29b) ist ein weitgehend unhydratisierter Kern eines Klinkerkorns sichtbar und es zeigen sich weitere verzweigte Vertiefungen. In einer Vertiefung mit 1 bis 2 μm Breite (Abbildung 6.30a) zeigt sich die UHPC-Matrix dicht an den Stahl angelagert, allerdings weist sie Risse und Poren (schwarz) auf. Auch noch feinere Strukturen sind ausgefüllt (Abbildung 6.30b). Hier lassen sich kugelförmige Bestandteile als Mikrosilika identifizieren, da sie aus den mit EDX nachgewiesenen Elementen Silizium und Sauerstoff bestehen (SiO_2).

Im Vergleich dazu wurde auch die Grenze zwischen einem Quarzkorn und der Bindemittelmatrix im UHPC betrachtet (Abbildung 6.31a und b). Die „Übergangszone“ scheint dicht und homogen ohne erkennbare Schwächung oder Portlandit-Kristalle, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, wie im Normalbeton. Zwischen UHPC und Stahl zeigt sich wohl ein naher Kontakt, der UHPC in den Vertiefungen der Stahloberfläche erscheint aber poröser als an der Quarzkorn-Oberfläche.

Die Untersuchungen an gebrochenen Verbundproben lassen dieselben Schlüsse zu wie an eingebetteten, polierten Schlifflinien, siehe Anhang A.3.3. Untersuchungen an Proben mit Beton der weniger fließfähigen Konsistenz EMK2 ergeben auch dasselbe Bild: Feinste Vertiefungen von etwa 1 μm der Stahloberflächen werden gut ausgefüllt. In dieser Hinsicht unterscheidet sich die Benetzung der Stahloberflächen bei verschiedener Konsistenz also nicht.

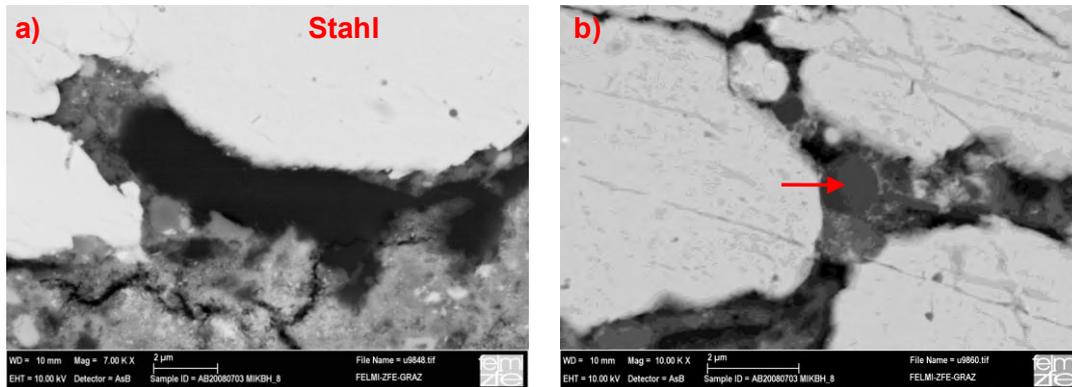


Abbildung 6.30: a) mit UHPC gefüllte Vertiefung einer Stahloberfläche und b) Detail einer Verzweigung in einer Vertiefung

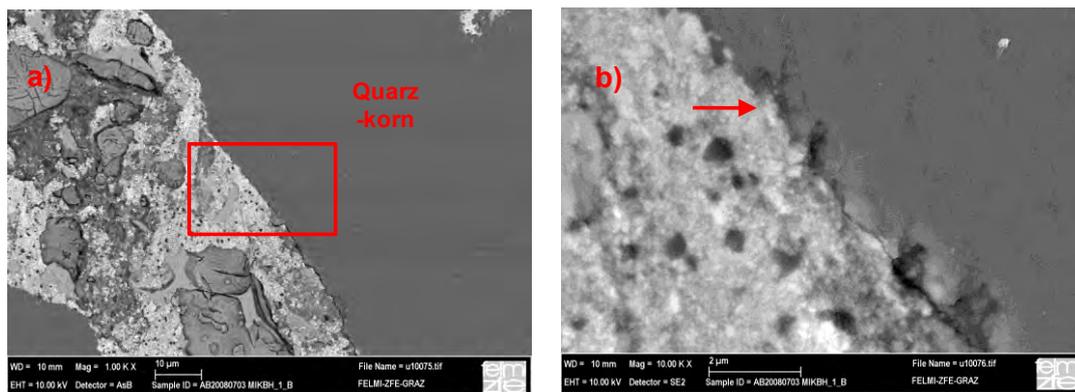


Abbildung 6.31: a) Übergangszone Quarzkorn und Matrix im UHPC, b) Detail aus a)

Auch an polierten Flächen haften Stücke von UHPC Bindemittelmatrix. Polierriefen und Luftporen in der Grenzzone sind deutlich erkennbar. Nur dort, wo Luftporen waren, erscheint die Fläche wirklich „unberührt“. An den Flächen, die mit UHPC direkt in Kontakt waren, lässt eine hellere Färbung auf eine Veränderung der Stahloberfläche schließen (siehe Abbildung 6.32).

Es wurden auch Versuche mit einer speziellen Mischung auf Basis des UHPC EMK2 gemacht, in welcher kein Mikrosilika zugegeben wurde, „EMoMS“. Bei gleichem W/B-Wert wurden ähnliche Festigkeiten erzielt. Im REM ist zu sehen, dass auch hier die Vertiefungen von 1-2 μm Breite und Tiefe in den rauen Stahloberflächen gut ausgefüllt sind. Spalten $<0,5 \mu\text{m}$, in denen bei Proben mit den Mischungen EMK1 und EMK2 noch UHPC-Matrix oder feinste Bestandteile wie Mikrosilika-Kügelchen gefunden wurden, sind von der Mischung EMoMS scheinbar nicht mehr ausgefüllt. Bei der Mischung EMoMS zeigen sich unhydratisierte kleine, kantige Klinkerkörner umgeben von hydratisierter Matrix. Der Bin-

demittelstein der Mischung EMoMS erscheint etwas weniger dicht und homogen als die Matrix der Proben mit Mikrosilika im Beton.

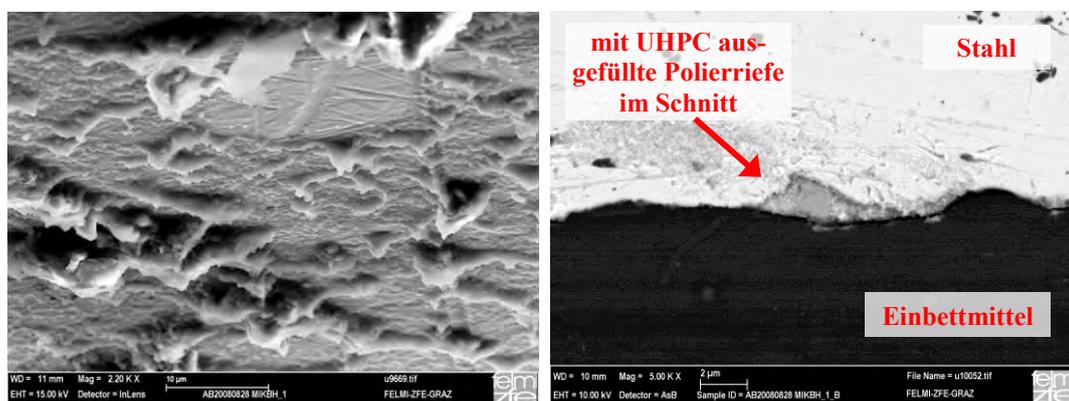


Abbildung 6.32: a) Blick von schräg vorne auf glatte Stahloberfläche mit anhaftendem Bindemittelstein, Luftporengrund mit Polierriefen. b) Querschnitt durch abgelöste glatt-polierierte Stahloberfläche im Schlibbild

An abgelösten Stahloberflächen SR0 kann bei allen Mischungen, auch EMoMS dasselbe „Punktmuster“ bzw. „Netzmuster“ wie an den Bruchflächen, die im vorigen Kapitel beschrieben sind, gefunden werden.

6.6.1 Schlussfolgerungen

Eine Grenzrauheit, die gerade noch von UHPC ausgefüllt wird, ist nicht erkennbar. UHPC-Bestandteile dringen entsprechend ihrer Größe auch in Vertiefungen von etwa 1µm der Stahloberfläche vor. Es sind keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Konsistenzen K1 und K2 festzustellen. Die Zusammensetzung des UHPC unterscheidet sich in der Grenzflächenschicht und in feinen Vertiefungen lokal von der im ungestörten Bereich. Zum Beispiel sind vermehrt Kügelchen von Mikrosilika in unreakierter Form zu finden. Die Struktur der Bindemittelmatrix scheint in der Grenzzone zum Stahl weniger dicht als zum Beispiel in der Grenzzone zu Quarzkörnern.

Auch an glatt polierten Stahlflächen sind anhaftende UHPC Anteile sichtbar. Hinterschnittene Formen sind gut ausgefüllt. Luftporen treten in der Grenzzone auf und deuten ihrer Form nach auf gute Benetzung hin.

6.7 Zusammenfassung der Untersuchungen der Grenzflächenschicht

Die mikroskopischen Untersuchungen zeigen, dass eine Grenzflächenschicht existiert, in der der UHPC nicht wie in seinem „ungestörten“ Inneren zusammengesetzt ist. Die 3. Hypothese lässt sich damit bestätigen. Es kommt durch die Grenzfläche zu einer Entmischung im Frischbeton mit lokal erhöhtem W/B-Wert in der Grenzflächenschicht. Unmittelbar an der Grenzfläche sind weder unhydratisierte Klinkerkörner noch Quarzkörner aufzufinden.

Das feinstteilreiche, gut benetzende Gemisch, das sich an der Grenzfläche ansammelt, kann vollständig zu Bindemittelstein hydratisieren. Es hat die Oberfläche an vielen Stellen perfekt abgeformt. Andererseits entsteht in der Grenzflächenschicht durch „innere Trocknung“ stellenweise eine Struktur, die im Lichtmikroskop durch die Glasfläche hindurch netzwerkartig porös erscheint. Besonders im Bereich von Rissen ist sie stark ausgeprägt.

Die Textur der Grenzfläche mit einem netzwerkartigen Muster sowie Rissen entsteht bei OVS-Proben etwa gleichzeitig mit dem Erstarrungsbeginn nach 4 bis 7 Stunden nach Wasserzugabe. Deutliche Risse unterschiedlicher Breite (10 bis 70 μm) werden in der Grenzfläche schon so früh sichtbar. Die Rissbildung ist nach spätestens einem Tag scheinbar abgeschlossen, die Rissbreiten verändern sich bis zum 28. Tag nicht. Die Risse gehen durch die ganze Schichtdicke hindurch. Bei Proben MVS zeigt sich die Textur an der Grenzfläche ein paar Stunden später als bei den Proben OVS und weist deutlich weniger Risse auf. Beidseits der Risse und entlang des äußeren Randes entsteht nach einigen Tagen ein kapillarer Spalt zwischen UHPC und Glas, in den Wasser einwandern kann.

Bei den Haftzugprüfungen tritt in vielen Fällen ein fugennaher Bruch so auf, dass ein Belag aus Bindemittelstein in großen Bereichen der Bruchflächen am Stahl oder Glas anhaften bleibt. Dieser Belag oder „Haftschleier“ erweist sich unter dem Mikroskop als inhomogen. Im anhaftenden Bindemittelstein sind glatt abgelöste Ausnehmungen, annähernd kreisrunde „Flecken“, zu finden. Sie korrespondieren mit erhabenen Stellen auf der abgelösten UHPC-Schicht. An ihnen wird zentral ein erhöhter $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Gehalt in sternförmiger, schlierenartiger Form nachgewiesen, während die umgebende Fläche aus vollständig hydratisiertem CSH besteht. Der Flächenanteil an glatt abgelösten Ausnehmungen ist bei DM geringer als bei EM. Das korrespondiert mit dem um etwa 20 V.-% geringeren Bindemittelgehalt der Mischung DM. Die Ausnehmungen haben beim UHPC EM einen geringeren Durchmesser (100 bis 180 μm) als beim UHPC DM (150- bis 270 μm). Auf Glas ist ihr Durchmesser aber etwa gleich wie auf Stahl. Es treten also Mischungs-abhängige aber Untergrund-unabhängige Unterschiede der Mikrostruktur der Grenzfläche auf. Es wird vermutet, dass diese Unterschiede auch für die unterschiedliche spezifische Adhäsion der Mischung EM im Vergleich zu DM unabhängig vom Verbundpartner verantwortlich sind. Als ausschlaggebend für die Unterschiede wird der höhere Zementgehalt der Mischung EM

gegenüber DM erachtet. EM enthält zudem etwas weniger Mikrosilika und kein Quarzmehl im Vergleich zu DM.

Die schlierenartige, sternförmige $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Struktur könnte aus einem Kristallisationsprozess resultieren⁸⁴, da lauter gleich große sich teilweise überschneidende Formen entstehen. Das im frischen Beton in Lösung befindliche $\text{Ca}(\text{OH})_2$ fällt durch den mit dem Hydrationsfortschritt abnehmenden Wasserangebot aus und kristallisiert. In Anwesenheit von Mikrosilika SiO_2 und Wasser könnte es zu Disilikat umgesetzt werden. Offensichtlich ist dafür aber stellenweise zu wenig Mikrosilika SiO_2 und Wasser vorhanden, sodass mikrokristallines $\text{Ca}(\text{OH})_2$ im Zentrum der erhobenen Stellen erhalten bleibt.

Der UHPC der Grenzfläche ist im Bereich der an den Bruchflächen erhobenen Stellen unter Zugbeanspruchung lokal dichter und damit fester als in umgebenden Bereichen. Das Gefüge des UHPC ist in der Grenzflächenschicht demnach inhomogen. Das dichte Gefüge mit hoher Festigkeit und vielen $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Zentren scheint insgesamt stärker zu haften als ein Gefüge mit weniger $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Der UHPC EM haftet ja stärker als DM. Bei DM Proben ist der Haftscheier an den Bruchflächen stärker ausgeprägt und dichter. Es wird daraus geschlossen, dass die Störung der grenzflächennahen UHPC-Schicht bei der Mischung DM stärker ausfällt als bei der Mischung EM. Die Störung der Packungsdichte oder auch die lokale Wasseranreicherung und in der Folge die Porosität in der Grenzflächenschicht sind demnach bei DM höher als bei EM.

Die nachträglich, nach mindestens einem Tag trockener Lagerung, abgelösten UHPC-Scheiben weisen größere Flächenanteile von glatt abgelösten Bereichen auf als die ursprünglich im Zuge der Haftzugprüfung abgelösten Flächen. Gegenüber Glas treten größere glatt abgelöste Bereiche als gegenüber Stahl auf. Die vom Glas abgelösten Oberflächen sind noch glatter als jene vom Stahl abgelösten und es zeigen sich noch weniger feinste Lunker. Die Benetzung am Glas ist demnach besser als am Stahl.

Es zeigt sich, dass die Ablösung durch Schub unmittelbar in der Kontaktfläche erfolgt, während es durch Zug zu einem Bruch im Material, oftmals in der Grenzflächenschicht, kommt. Ein „Haftscheier“ ist bei Schubbeanspruchung durch Torsion oder Schwinden nicht ausgeprägt. Daraus wird geschlossen, dass die Bruchform unmittelbar von der Beanspruchungsart abhängt.

Durch den Vergleich von Verbundproben im Querschnitt, die mit UHPC unterschiedlicher Konsistenz hergestellt wurden, wurde die 1. Hypothese überprüft. Es stellt sich heraus, dass die unterschiedliche Fließfähigkeit der UHPC Mischungen kein Kriterium für die Benetzung einer rauen Stahloberfläche und auch nicht für den Verbund ist. Eine Grenzwellenlänge der Rauheiten, die gerade noch von UHPC ausgefüllt wird, ist weder bei K1 noch bei K2 erkennbar. Die UHPC Mischung bzw. deren kleinste Bestandteile (Mikrosilika) dringen auch in Vertiefungen von etwa $1\mu\text{m}$ der Stahloberfläche vor. Allerdings weist die Stahloberfläche kaum kleinere Strukturen auf, ist in diesem Sinne also keine fraktale Oberfläche.

⁸⁴ „wie zum Beispiel Eisblumen auf der Windschutzscheibe im Winter“

7 Maßgebende Einflussfaktoren auf die Adhäsion und deren Zusammenwirken

Im Folgenden werden die maßgeblichen Einflussfaktoren auf die Adhäsion aus der Summe der beschriebenen Beobachtungen und Versuchsergebnisse ermittelt. Anhand der Versuchsdaten und mit Hilfe von Daten aus der Literatur wird ihre Größenordnung abgeschätzt. Um ihr Zusammenwirken zu erklären, müssen zudem einige theoretische Überlegungen angestellt und es muss ein Versagenskriterium eingeführt werden.

7.1 Zusammenhänge zwischen untersuchten Größen

Ausgehend von der ursprünglichen Modellannahme, dass nur ein Teil der geometrischen Fläche für den Verbund wirksam ist, werden zunächst Zusammenhänge zwischen der in der Bruchflächenanalyse erkannten Zonierung und der Haftzugfestigkeit gesucht. Im Zuge dessen wird auch überprüft, ob die Haftzugfestigkeit von der Risslänge abhängig ist.

Im zweiten Abschnitt des Kapitels wird ermittelt, wie die Haftzugfestigkeit mit Rauheitskennwerten zusammen hängt.

Um Zusammenhänge zu erkennen, werden Wertepaare der untersuchten Größen (Merkmale) grafisch dargestellt und der Korrelationskoeffizient⁸⁵ der Merkmale unter der Annahme eines linearen Zusammenhangs berechnet. Der Korrelationskoeffizient R gibt die Stärke des Zusammenhangs an und liegt zwischen 0 und ± 1 . Im Allgemeinen wird ab einem Betrag des Korrelationskoeffizienten größer oder gleich 0,7 von einer hohen Korrelation gesprochen. Das Quadrat des Korrelationskoeffizienten wird als Bestimmtheitsmaß R^2 bezeichnet. Vgl. [Peter 2011].

7.1.1 Korrelationen zwischen Haftzugfestigkeit und Risslänge sowie Zonierung in der Bruchfläche

An den Bruchbildern der Haftzugproben wird sichtbar, dass es Zonen und Bereiche mit starker Anhaftung des Betons am Adhärens und andere mit geringerer bzw. ohne Anhaftung gibt. Eine Zone mit starker Anhaftung ist jedenfalls das zentrale Feld, als Zone C be-

⁸⁵ Der Korrelationskoeffizient wird mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogramms EXCEL 2007 berechnet. Es wird für diese einfache Abschätzung nicht untersucht, ob die Merkmale in nicht-linearer Weise voneinander abhängen und welche statistische Signifikanz die Untersuchungsreihen aufweisen.

zeichnet. Hinsichtlich der erreichten Haftfestigkeit annähernd gleichwertig sind Bereiche mit ausgeprägtem „Haftschleier mit Punktmuster“ wie in Kapitel 5.3 und 6.3 beschrieben (Zone B) mit einem nicht fugennahen Bruch in der Grenzflächenschicht.

Dass Zone B, also der Haftschleier, jedenfalls auch maßgeblich zu Haftfestigkeit beitragen muss, wurde schon in Kapitel 5.3.9 ab Seite 163 für Proben MVS argumentiert. Auch bei einem Versagen ohne Betonbruchanteil zeigten sich hohe Haftzugfestigkeiten. Am äußersten Ring und neben den Rissen sind meist in der Fuge abgelöste, „blanke“ Bereiche ohne Haftung vorhanden (Zone A⁸⁶). Da sich in Zone A entlang des äußersten Ringes bei glatten Proben schon vor der Haftzugprüfung am 28. Tag ein kapillarer Spalt bildet, wie Untersuchungen an Glas-UHPC-Glas Proben gezeigt haben (siehe Kapitel 6.2), kann diese Zone nicht mehr zur Haftfestigkeit beitragen. Deshalb wird im Folgenden zur Ermittlung der „echten“ Haftzugfestigkeit $\bar{\sigma}_z$ gegenüber der Prüffestigkeit σ_{HZ} die Prüfkraft auf die um die Fläche der Zone A (A_{ZoneA}) des äußersten Ringes verminderte geometrische Fläche A_g bezogen ($\bar{\sigma}_z = F / (A_g - A_{ZoneA})$).

Wie durch den Vergleich der Proben MVS und OVS klar wird, vermindern Risse in der UHPC-Schicht die erzielbare Haftzugfestigkeit. Sie sind Ausdruck der Wirkung von Zwangsspannungen, die ihrerseits nur auftreten können, wenn der Verbund in der Kontaktfläche ausreichend gut ist.

Für folgende Kenngrößen der Bruchflächen wird die Korrelation zu der Haftzugfestigkeit untersucht:

- Fläche des zentralen Feldes (Zone C) als Maß eines homogenen Spannungsfeldes, in dem sich die Haftung am besten ausbilden kann, da darin vor der Rissbildung – wie bereits an anderer Stelle beschrieben – die geringsten Relativverschiebungen und keine Zwangsspannungen in der Verbundfuge auftreten.
- Risslänge
 - Gesamte Risslänge
 - Risslänge im zentralen Feld bezogen auf die Fläche des zentralen Feldes („bezogene Risslänge Zone C“)

In der Tabelle 7.1 sind Haftzugfestigkeiten, Risslängen und Ausmaße der Zonen der Hauptversuchsserien SNS1, GNS1 und SD1 zusammengestellt. Die berechneten Korrelationen für diese Merkmale je Werkstoff-Rauheitskombination sind in Tabelle 7.2 angegeben (siehe auch Anhang A.4.1).

Das Ausmaß des zentralen Feldes (Fläche Zone C mit $A = \varnothing^2 \cdot \pi/4$) zeigt bei den Proben der Mischung EM in Kombination mit Stahl und Glas eine hohe Korrelation mit der Haftzugfestigkeit. Die Größe des zentralen Feldes und die Haftzugfestigkeit ist auf glatten Flächen immer geringer als auf rauen, bei Glas geringer als bei Stahl. Proben mit den ver-

⁸⁶ Blank abgelöste Bereiche sind vorwiegend an den Bruchflächen glatter Proben entlang eines äußeren Ringes ausgehend vom Rand („äußerster Ring“) zu erkennen.

7 Maßgebende Einflussfaktoren auf die Adhäsion und deren Zusammenwirken

schiedenen Rauheiten sind nicht zu unterscheiden (vorwiegend Betonbruch). Bei den Proben der Mischung DM zeigt sich diese hohe Korrelation nicht. Hier ist die Größe des zentralen Feldes (Zone C) unabhängig von der erzielten Haftzugfestigkeit auf unterschiedlich rauhen Oberflächen gleich.

Tabelle 7.1: Prüf-Festigkeit, Haftzugfestigkeit, Risslänge und Ausmaß der Zonen A und C bei Proben OVS

Werkstoff-Rauheit	Mischung, Versuchs-serie	Breite Zone A	Ø Zone C	Prüf-festigkeit F/A_g	Haftzug-festigkeit $F/(A_g - A_{ZoneA})$	Risslänge Zone C	gesamte Risslänge (Zonen B+C)	bezogene Risslänge Zone C
		b	d _C	MW, n=4		l _{crC}	l _{cr}	l _{crC/A_C}
		[mm]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]		[mm]	[-]
SR0EM	S-EM	2,5	55	4,5	5,0	540	804	0,23
SR1EM	SNS1	3 ⁽¹⁾	62	4,8	5,4	525	550 ⁽²⁾	0,17
SR2EM		3 ⁽¹⁾	62	5,4	6,1	626	650 ⁽²⁾	0,21
GR0EM	G-EM	5	46	1,8	2,2	445	799 ⁽²⁾	0,27
GR7EM	GNS1	3-7	57	5,4	6,1	580	620 ⁽²⁾	0,23
GR3EM		3-8	58	4,5	5,1	716	750 ⁽²⁾	0,27
SR0DM	S-DM	7	55	1,2	1,6	1272	2274 ⁽²⁾	0,54
SR1DM	SD1	8	56	3,8	5,4	608	750 ⁽²⁾	0,25
SR2DM		8	54	3,5	4,9	623	670 ⁽²⁾	0,27
SR5DM		2-8 ⁽¹⁾	53	5,0	7,0	709	840 ⁽²⁾	0,32
(1)	Zone A weist in diesen Fällen einen Betonbruchanteil auf, siehe Tabelle 5.7 auf Seite 142 bzw. Erläuterungen im Kapitel 5.3							
(2)	Radialrisslänge geschätzt. Da Radialrisse eine geringe Rissbreite <10 µm haben, sind sie an rauhen Proben kaum erfassbar.							
Anmerkung:	Die Breite der ringförmigen Zone B ergibt sich aus dem Probendurchmesser 100 mm reduziert um die zweifache Breite der Zone A und den Durchmesser der Zone C. Siehe auch Kapitel 5.3.							

Tabelle 7.2: Korrelationen zwischen Haftzugfestigkeiten und Risslängen sowie der Fläche der Zone C der Werkstoffkombinationen Stahl/Glas mit UHPC EM/DM

Haftzugfestigkeit korreliert mit ...	Werkstoff-kombination	Korrelations-koeffizient R	Korrelation
... gesamter Risslänge	S-EM	-0,49	mäßig
	G-EM	-0,86	hoch
	S-DM	-0,88	hoch
	alle	-0,69	hoch
... bezogener Risslänge	S-EM	-0,25	gering
	G-EM	-0,64	mäßig-hoch
	S-DM	-0,81	hoch
	alle	-0,61	mäßig-hoch
... Fläche Zone C (homogenes Spannungsfeld)	S-EM	0,79	hoch
	G-EM	0,95	hoch
	S-DM	-0,46	mäßig

Der Zusammenhang zwischen Haftzugfestigkeit und gesamter Risslänge ist in Abbildung 7.1 dargestellt. Die gesamte Risslänge zeigt bei den beiden Werkstoffkombinationen S-DM (Stahl/UHPC DM) und G-EM (Glas/UHPC EM) eine hohe Korrelation mit der Haftzugfestigkeit und bei S-EM (Stahl/UHPC EM) eine mäßig hohe. Die zusätzlich untersuchte Korrelation der Haftzugfestigkeit mit der bezogenen Risslänge (in Zone C) ist bei den Werkstoffkombinationen S-DM und G-EM hoch, aber bei S-EM nur gering. In letzteren Fall (S-EM) zeigte sich wie im Kapitel 5.3 bereits beschrieben auch an glatten Proben ein hoher Betonbruchanteil in der Bruchfläche („Mischbruch“), während bei den anderen Werkstoffkombinationen (S-DM, G-EM) der Bruch an glatten Proben in der Fuge auftrat. Insofern „verzerrt“ die Tatsache, dass an glatten Proben S-EM die Betonzugfestigkeit die Haftzugfestigkeit begrenzt, das Bild. Der Zusammenhang zwischen erzielbarer Haftzugfestigkeit und der gesamten Risslänge ist insgesamt eindeutig gegeben.

Einen deutlichen Unterschied gibt es bei allen Werkstoffkombinationen zwischen den Risslängen von glatten und rauen Proben. Die verschieden aufgerauten Proben unterscheiden sich voneinander in dieser Hinsicht kaum.

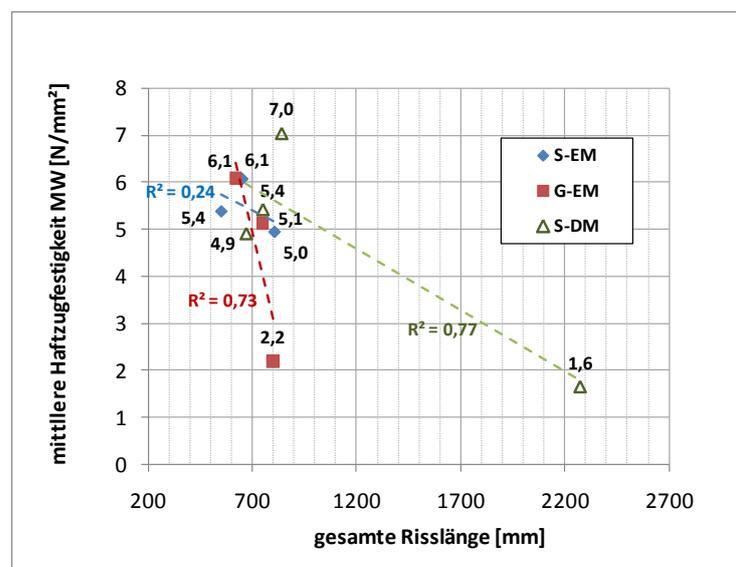


Abbildung 7.1: Abhängigkeit der Haftzugfestigkeit von der Risslänge für alle Werkstoffkombinationen OVS (Stahl-UHPC EM/DM und Glas-UHPC EM)

Die Risslängen der Werkstoffkombinationen SR0EM OVS und GR0EM OVS sind etwa gleich groß, während die Haftzugfestigkeiten sowohl OVS als auch MVS stark unterschiedlich sind. Dies führt zur Frage, ob ein Zusammenhang zwischen Haftzugfestigkeit und Risslänge hergestellt werden kann, der von der Werkstoffkombinations-bedingten Unterschiedlichkeit nicht abhängt. In Tabelle 7.3 wird als „Materialfaktor“ zunächst die mittlere Haftzugfestigkeit der Werkstoffkombination SR0EM MVS (7,8 N/mm²) im Verhältnis zu der mittleren Haftzugfestigkeit der Werkstoffkombinationen GR0EM MVS und SR0DM

MVS bestimmt. Es ist eine plausible Annahme, dass die für Proben MVS ermittelten Materialfaktoren auch für Proben OVS gelten. Mit diesem Faktor werden deshalb alle Haftzugfestigkeiten der Werkstoffkombinationen MVS (ungerissenen) und OVS (gerissenen) multipliziert und auf die Haftzugfestigkeit der Werkstoffkombination SR0EM MVS bezogen, damit also skaliert bzw. „normiert“. Es zeigt sich eine klare Abhängigkeit der normierten Haftzugfestigkeit von der der Risslänge (siehe Abbildung 7.2). Je größer die Risslänge, desto kleiner die erzielbare Haftzugfestigkeit.

Tabelle 7.3: Zusammenhang zwischen der „normierten Haftzugfestigkeit“ von glatten Proben MVS und OVS mit der Risslänge

Lage- rung	Werk- stoff- Rauheit	Prüf- festigkeit F/A _g	Breite Zone A	Fläche ohne Zone A	Haftzug- festigkeit σ_{HZ} F/A _{red}	Material- faktor f _i	normierte Haftzugfes- tigkeit R0	gesamte Risslänge
	WRi	MW, n=4	b	A _{red}	MW, n=4	$\zeta_{HZ(SR0EM)}/\zeta_{HZ(GR0EM \text{ bzw. } SR0DM)}$	$\zeta_{HZ(WRi)} * f_i / \zeta_{HZ(SR0EM-MVS)}$	l _{cr}
		[N/mm ²]	[mm]	[mm ²]	[N/mm ²]		[-]	[mm]
MVS	SR0EM	6,9	3	6940	7,8	1	1	0
	GR0EM	2,8	4	6648	3,3	2,4	1	0
	SR0DM	2,3	7	5809	3,1	2,6	1	0
OVS	SR0EM	4,5	2,5	7088	5,0		0,64	804
	GR0EM	1,8	5	6362	2,2		0,67	799
	SR0DM	1,2	7	5809	1,6		0,53	2274

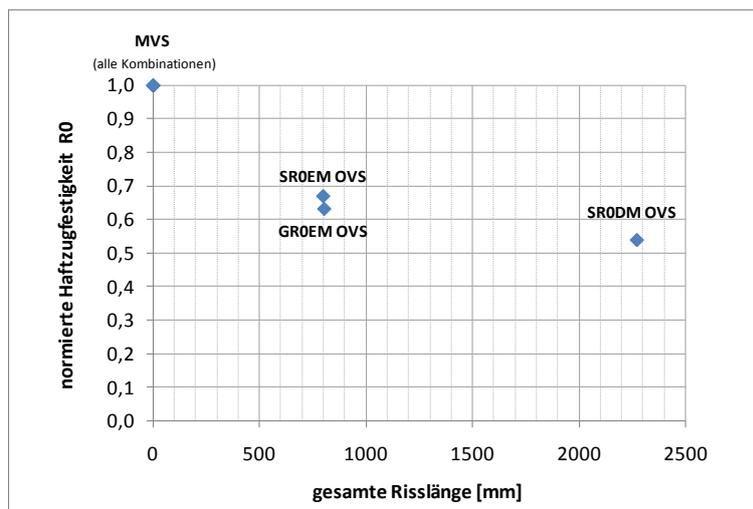


Abbildung 7.2: Abhängigkeit der normierten Haftzugfestigkeit von der Risslänge von glatten Proben

Schlussfolgerungen

Besonders an glatten Proben wird deutlich, dass die Haftzugfestigkeit $\bar{\sigma}_z$ mit der Risslänge hoch korreliert. Die gesamte Risslänge wird als Maß für die Störung bzw. Verminderung der erzielbaren Adhäsionsfestigkeit identifiziert. Erstens können im Zuge der Rissbildung Relativbewegungen, die die Adhäsion zerstören, zwischen Beton und Untergrund auftreten, wenn der Schubverbund nicht stark genug ist. Zweitens ist jeder Riss ein neuer freier Rand in der Betonschicht, der bei ausreichendem Schubverbund von Zwangsspannungen durch das behinderte Schwinden belastet wird.

Bei Proben der Mischung EM korreliert die Haftzugfestigkeit mit der Größe des zentralen Feldes, der Zone C. Bei glatten Glasproben GR0EM ist es am kleinsten (\varnothing 46 mm), bei Stahlproben SR0EM etwas größer (56 mm) und bei rauen Proben SRXEM am größten (62 mm). Daraus wird gefolgert, dass die Rauheit und das Material des Untergrundes den Verschiebewiderstand oder „Schlupf“ in Zone B rund um das zentrale Feld beeinflussen. Der Verschiebewiderstand in der Verbundfuge ist demnach im Zeitraum vor der Rissbildung für GR0 am geringsten und für SR1 am größten. Je größer der Verschiebewiderstand in Zone B, desto größer wird Zone C. Je größer der Schlupf, desto kleiner wird Zone C. Überlegungen zum Schlupf des Verbundes werden im noch folgenden Kapitel 7.2.3 im Zusammenhang mit dem Spannungszustandes in einer UHPC-Schicht weitergeführt.

Bei allen Proben der Mischung DM hingegen ist die Fläche des zentralen Feldes annähernd gleich groß (mit \varnothing 55 mm) und korreliert deshalb nicht mit der Haftzugfestigkeit. Bei Proben DM scheint die Rauheit die Größe des zentralen Feldes nicht zu beeinflussen. Verschiebungen oder Schlupf haben wahrscheinlich in der Grenzflächenschicht im Beton in einer noch plastischen Phase stattgefunden. Damit sind sie von der Frühscherfestigkeit des Betons der Grenzflächenschicht und nicht von der Verbundschubfestigkeit in der Kontaktfläche abhängig.

7.1.2 Korrelationen zwischen Haftzugfestigkeit und Kennwerten der rauen Oberflächen

Wie im vorigen Kapitel gezeigt, unterscheiden sich die verschieden aufgerauten Proben hinsichtlich der Haftzugfestigkeit und Risslänge in der Regel nur wenig voneinander. Außerdem ist zu bedenken, dass bei rauen Proben (MVS, aber auch OVS) ein gewisser Anteil von Betonbruch auftritt (siehe dazu Tabelle 5.3 auf Seite 118). Beides ist auf Einflüsse der Oberflächentopografie zurückzuführen, die sich mit den bisher diskutierten Faktoren (Risslänge, Zonierung) überlagern und die Zusammenhänge deshalb komplexer machen.

Für die in Tabelle 7.4 angegebenen Parameter rauer Oberflächen wird der Zusammenhang zur erzielten Haftzugfestigkeit der Proben OVS untersucht. Für Proben MVS kann die Korrelation zwischen Rauheitskenngrößen und Haftung nicht untersucht werden, da vorwiegend Betonbruch auftritt, also nicht die Adhäsion, sondern die Betonzugfestigkeit zur limitierenden Größe wird. Nur bei den Werkstoffkombinationen SR1DM und SR2DM

MVS tritt ein Bruch in der Grenzflächenschicht mit deutlich sichtbarem „Haftschleier“, also ein Adhäsionsversagen, auf. Auch dabei werden aber Werte in der Größe der Beton-Zugfestigkeit erreicht.

Tabelle 7.4: untersuchte Parameter rauer Oberflächen, siehe auch Kapitel 4.2.2

Abkürzung	Kennwert
5x,50x	Jeweilige Vergrößerung, bei der der Kennwert gemessen wurde
Sa	arithmetischer Mittenrauwert der Fläche
Sz	maximale Höhe der Fläche
WQ	Wenzel Quotient bzw. Verhältnis der wahren zur projizierten Oberfläche
HQ	Hinterschneidungs Quotient bzw. Hinterschneidungsfläche pro projizierte Fläche

Die Tabelle 7.5 stellt die Haftzugfestigkeit $\bar{\sigma}_z = F/(A_g - A_{ZoneA})$ den Oberflächenparametern der rauen Proben gegenüber⁸⁷. Es zeigt sich, dass alle Oberflächenkennwerte - Rautiefe, Wenzel- und Hinterschneidungsquotient - mit den Festigkeiten im selben Sinne hoch korrelieren (Die Korrelationskoeffizienten liegen für die einzelnen Werkstoffkombinationen zwischen 0,65 und 1,0, siehe Anhang A.4.1). Die Einflüsse können auf so einfache Weise nicht unterschieden werden. Die Einflüsse überlagern sich, außerdem sind die Streuungen der Einzelmesswerte sehr groß, siehe Anhang A.1.2.

Tabelle 7.5: Haftzugfestigkeit OVS und Oberflächenparameter rauer Proben

Werkstoff-Kombi.	Versuchsserie	Haftzugfestigkeit σ_{HZ} MW OVS (1) n=4	Sa 5x	Sz 5x	WQ 50x	WQ 5x	HQ 50x	HQ 5x
			[N/mm ²]	[μ m]	[μ m]	[-]	[-]	[-]
SR0EM	S-EM	5,0	~0	~0	1,01 ⁽²⁾	1,00	0,00	0,0000
SR1EM	(SNS1)	5,4	14,7	307,9	1,52	1,15	0,14	0,0018
SR2EM		6,1	24,3	394,4	1,45	1,22	0,11	0,0049
GR0EM	G-EM	2,2	0,0	0,0	1,00	1,00	0,00	0,0000
GR7EM	(GNS1)	6,1	12,0	121,6	1,13	1,08	0,04	0,0064
GR3EM		5,1	16,2	157,6	1,19	1,10	0,07	0,0046
SR0DM	S-DM	1,6	~0	~0	1,01 ⁽²⁾	1,00	0,00	0,0000
SR1DM	(SD1)	5,4	14,7	307,9	1,52	1,15	0,14	0,0018
SR2DM		4,9	24,3	394,4	1,45	1,22	0,11	0,0049
SR5DM		7,0 ⁽³⁾	260,1	1501,9	1,67	1,76	0,27	0,1802
(1)	aus Prüfkraft/reduzierte Fläche: $F/(A_g - A_{ZoneA})$							
(2)	Im Vergleich zu Glas ergibt sich eine geringe Oberflächenvergrößerung, die hier nur geschätzt ist							
(3)	Betonbruchanteil bis 35%							

⁸⁷ Herstellungstechnisch bedingte Schwankungen der Oberflächenrauheit beim händischen Sandstrahlen an unterschiedlichen Tagen sind aufgetreten.

Die Unterschiede der verschiedenen Rauheiten SR1 und SR2 sowie GR7 und GR3 sind offenbar so gering, dass sie sich kaum auf die Festigkeiten auswirken. Nur die sehr grobe Rauheit SR5, die nur mit der Mischung DM zum Einsatz kam, verursacht gegenüber SR1 und SR2 eine deutliche Festigkeitssteigerung. Der Zusammenhang zwischen Festigkeit und Wenzel Quotient dieser Werkstoffkombination ist annähernd linear und weist ein hohes Bestimmtheitsmaß auf (für S-DM ist $R^2 = 0,99$). Ähnlich deutlich ist bei ihr der Zusammenhang zwischen Hinterschneidungsquotient und Festigkeit (Abbildung 7.3). Dagegen zeigt der Zusammenhang zwischen Festigkeit und Rautiefe einen Verlauf, der am besten durch eine logarithmische Trendlinie angenähert werden kann (Abbildung 7.4), die asymptotisch einem Maximum zustrebt. Eine noch größere Rautiefe als SR5 würde demnach keine weitere Verbesserung der Haftfestigkeit mehr bringen. Erhöhungen des Wenzel-Quotienten sowie des Hinterschneidungsquotienten durch weiteres feines Aufrauen der vorhandenen „Grobrauheit“ brächten dagegen entsprechend der linearen Trendlinie (Abbildung 7.3) weitere Verbesserungen.

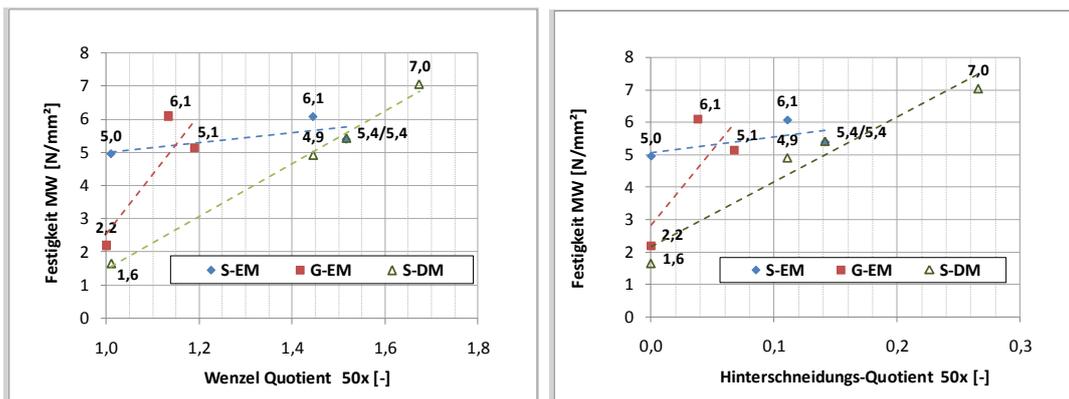


Abbildung 7.3: Zusammenhang zwischen Wenzel Quotient und Hinterschneidungsquotient mit der Haftzugfestigkeit je Werkstoffkombination der Proben OVS (gerissene Proben).

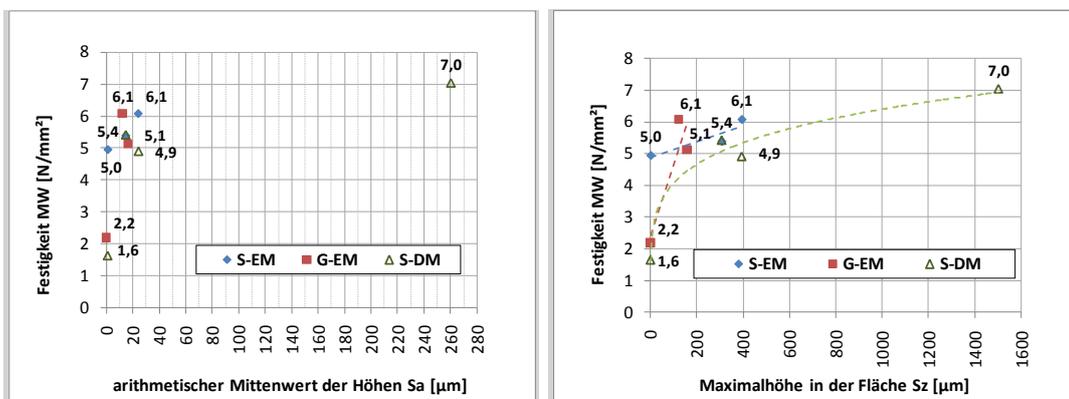


Abbildung 7.4: Zusammenhang zwischen Rautiefen Sa bzw. Sz und der Haftzugfestigkeit je Werkstoffkombination der Proben OVS (gerissene Proben).

Eine Oberflächenvergrößerung, gekennzeichnet durch den zunehmenden Wenzel-Quotienten, geht bei den verwendeten Oberflächenbehandlungsmethoden annähernd mit einer direkt proportionalen Erhöhung des Anteils an hinterschnittenen Flächen einher.

Schlussfolgerungen

Bei keiner Werkstoffkombination ergibt sich die Festigkeit der rauen Proben aus der Festigkeit der glatten Proben alleine multipliziert mit dem Wenzel Quotienten bzw. dem Hinterschneidungsquotienten. Für den Festigkeitsunterschied zwischen glatt und rau ist also nicht nur die Erhöhung der wahren Oberfläche und auch nicht ausschließlich die proportionale Erhöhung der Hinterschneidungsfläche verantwortlich. Es wirken sich auch die Risse und eingepprägten Zwänge an Proben OVS auf die Festigkeit aus und überlagern sich mit den Einflüssen der Rauheit. Dabei muss erwähnt werden, dass Zwängungen aufgrund des Schwindens auch positiv wirken können, indem der UHPC die „Zähne“ der rauen Flächen einklemmt und Reibungsverbund aktiviert wird.

Ein weiterer Aspekt ist, dass die Rauheit schon in der frühen Phase der Erhärtung für Verbund sorgt, sodass unabhängig von der Festigkeitsentwicklung innerhalb der ersten Stunden schwindinduzierte Relativverschiebungen entlang der Kontaktfläche behindert werden. Dadurch ist die erforderliche Nähe der Moleküle, die zwischenmolekulare Anziehungskräfte in der Grenzfläche ausüben können, andauernd gewährleistet.

Aus den Prüfergebnissen der Proben MVS können keine Schlüsse über den Zusammenhang zwischen Rauheitskenngrößen und Festigkeit gezogen werden, da alle Prüfergebnisse der rauen Proben die Betonzugfestigkeit erreichen und daher die Adhäsionsfestigkeit unbestimmt größer ist.

7.2 Zwangsspannungen und Rissbildung

Da sich die Zwangsspannungen in der UHPC-Schicht und in der Verbundfuge sowie die Wirkung der Risse als maßgebende Faktoren für die erzielbare Haftverbundfestigkeit herauskristallisieren, wird im Folgenden weiter darauf eingegangen.

7.2.1 Entwicklung von Zwangsspannungen und Festigkeit

Die Entwicklung der Adhäsion geht mit dem Hydratationsverlauf und der zeitlichen Entwicklung der Schwindverformungen sowie der mechanischen Eigenschaften des UHPC einher. Die Schwindverformungen im UHPC, die durch den Verbund zu den Werkstoffoberflächen behindert werden, rufen Zwangsspannungen hervor, die den UHPC vorbelasten. Beim Aufbringen einer zusätzlichen Last, wie zum Beispiel der Zugkraft beim Haftzugversuch, überlagern sich die eingepprägten Zwangsspannungen („Eigenspannungen“) mit den Spannungen infolge der Belastung.

Die Zwangsspannungen aufgrund des einwirkenden Schwindens ϵ_{cs} , das durch den

Verbund in der Grenzfläche behindert wird, hängen zu jedem Zeitpunkt vom Behinderungsgrad, dem E-Modul des Betons und der Relaxation ab. Es ist üblich, Kriechen und Relaxation gemeinsam durch einen sogenannten effektiven E-Modul $E_{eff(t)} = E(t)/(1 + \Phi(t))$ zu berücksichtigen. Im Fall einer ausgedehnten Schicht beeinflusst auch die Querdehnzahl μ die Größe dieser Spannungen. Wird eine volle Dehnungsbehinderung zu jedem Zeitpunkt vorausgesetzt, das ist der Fall wenn die Steifigkeit des Adhärens wesentlich größer als jene der UHPC-Schicht und der Verbund in der Fuge ausreichend groß ist, ergeben sich die maximalen Zwangsspannungen, vgl. [Schachinger 2007], $\sigma_e = \sigma_{Z(t)}$ zu

$$\sigma_{Z(t)} = \sum_{t=1}^n (\varepsilon_{cs(t)} - \varepsilon_{cs(t-1)}) \cdot E_{eff,t} \cdot \frac{1}{1 - \mu} \quad (7.1)$$

Die Querdehnzahl ändert sich vor allem in der ersten Zeit der Frühfestigkeitsentwicklung ($\mu = 0,5$ fließfähiger Beton) und kann für festen UHPC mit $\mu = 0,2$ angenommen werden, vgl. [Schmidt 2008].

Überschreitet die maximale Zwangsspannung zu irgendeinem Zeitpunkt die Betonzugfestigkeit, kommt es zur Rissbildung und die UHPC-Schicht teilt sich in Rissfelder. Durch die Entspannung an den Rissfeld-Flanken verringern sich die auftretenden maximalen Zwangsspannungen abhängig vom d/t_c -Verhältnis der neu gebildeten UHPC-Felder zwischen den Rissen. In gedrunenen Rissfeldern ($d/t_c \ll 10:1$) treten wesentlich geringere maximale horizontale Zwangsspannungen auf. Dafür werden vertikale Spannungen im Inneren und am Rand der Verbundfuge größer und die Schubspannungen τ_e in der Fuge, die für eine Einleitung der Zwangsspannungen sorgen, erstrecken sich über die ganze Fuge. Weitere Ausführungen dazu folgen im nächsten Abschnitt, siehe dazu auch Abbildung 7.6 auf Seite 236.

Die Abbildung 7.5 zeigt in einer Prinzip-Darstellung den zeitlichen Verlauf der (radialen und tangentialen) maximalen Zwangsspannungen⁸⁸ σ_Z in der UHPC-Schichte sowie der Betonzugfestigkeit f_{ct} und der Adhäsionsfestigkeit f_{ad} vom Zeitpunkt der Wasserzugabe in die Mischung an. In der Abbildung sind zwei Fälle für auftretende Zwangsspannungen eingetragen, die sich durch ihr Schwindverhalten unterscheiden. $\sigma_{Z(MVS)}$ ergibt sich aus dem autogenen Schwindmaß bei konservierender Lagerung mit Verdunstungsschutz (MVS). Es werden nur die spannungsinduzierenden Schwindverformungen ab dem Zeitpunkt der Erstarrung t_0 berücksichtigt (beim untersuchten UHPC EM MVS ist der Zeitpunkt der Erstarrung rund 12,5 Stunden nach Wasserzugabe, siehe auch Kapitel 4.1.6). Der Zeitpunkt der Erstarrung t_0 MVS wird auch als der Beginn der Festigkeitsentwicklung der Betonzugfestigkeit angenommen. Praktisch prüfbar werden Festigkeiten kurz danach.

⁸⁸ Die radialen bzw. tangentialen Zwangsspannungen in einer UHPC-Schicht werden in Abbildung 2.17, Seite 32 mit ζ_x , in den eigenen FEM-Berechnungen als S11 (radial) bzw. S33 (Umfangsrichtung) bezeichnet, siehe Kapitel 5.4.1. und im Folgenden auch mit ζ_r und ζ_θ bezeichnet

Größer als das autogene Schwindmaß MVS ist das Schwinden, das ohne Verdunstungsschutz OVS gemessen wurde. $\sigma_{z(OVS)}$ ergibt sich aus dem spannungsinduzierenden Schwinden ab dem Erstarrungszeitpunkt t_0 (früher als bei MVS, bei EM OVS rund 7h nach Wasserzugabe). Das frühe Schwinden verursacht Risse, obwohl es zu einer Zeit vor der eigentlichen Festigkeitsentwicklung in der dormanten Periode der Hydratation stattfindet (siehe Abbildung 2.15, Seite 29). Die Risse entstehen etwa zeitgleich mit dem Erstarrungsbeginn (bei EM OVS werden Risse in der Grenzfläche erstmals nach 7 Stunden beobachtet, vgl. Kapitel 6.2). Das kann damit erklärt werden, dass die Grünstandfestigkeit des ausgetrockneten Betons, ausgedrückt durch die Zugfestigkeit $f_{ct,0}$, für ausreichende Steifigkeit sorgt, sodass sich der Beton nicht mehr plastisch verformen kann. Seine geringe Bruchdehnung wird durch das hohe Schwindmaß überschritten. Durch die Risse fällt die Zwangsspannung wieder annähernd auf null ab.

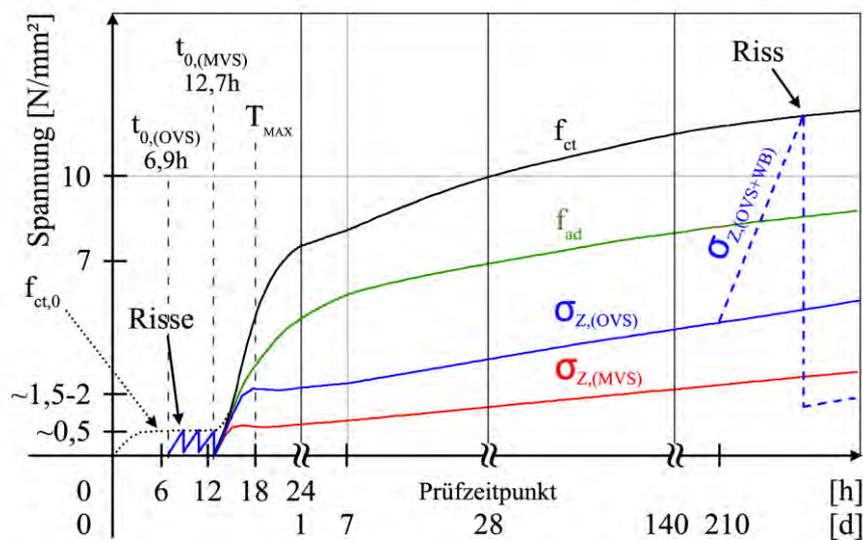


Abbildung 7.5: zeitlicher Verlauf der maximalen Zwangsspannungen σ_z in der UHPC-Schichte bei unterschiedlichem Schwindverhalten (Lagerungsbedingungen MVS und OVS bzw. OVS mit Wärmebehandlung WB) sowie zeitlicher Verlauf der Betonzugfestigkeit f_{ct} und der Adhäsionsfestigkeit f_{ad} .

Zum Unterschied des „Austrocknungsschwindens“ bei der unorthodoxen Lagerung OVS, also quasi ohne Nachbehandlung, tritt das Trocknungsschwinden erst am Festbeton, in unserem Fall nach Erstarrungsende, auf. Die „echte“ Betonfestigkeit bildet sich in der Akzelerationsperiode der Hydratation aus, in der die exotherme Reaktion des Zementes mit Wasser einen Temperaturanstieg im Beton verursacht. Das Temperaturmaximum T_{max} tritt bei der Mischung EM für die Lagerung OVS und MVS etwa 18 Stunden nach der Wasserzugabe auf wie an der Temperaturkurve in Abbildung 4.9 auf Seite 74 ersichtlich ist. Die Hydratationsreaktion ist also von der Lagerung unabhängig. Das Schwindmaß $\epsilon_{cs,OVS(t)}$

hängt vom Feuchtegradienten zwischen Beton (Frischbeton 100% r.F.) und der Umgebung (in unserem Fall rund 40% r.F.) und dem Verhältnis von austrocknender Oberfläche zum Volumen ab. Wie aus der Literatur bekannt, ist das Trocknungsschwinden von UHPC im Verhältnis zum autogenen Schwinden gering, vgl. [Habel 2004]⁸⁹. Durch den frühen Trocknungs- und Messbeginn bei den eigenen Schwindmessungen fällt der Anteil an Trocknungsschwinden sehr groß aus und der Hauptteil davon findet in den ersten Stunden nach Erstarrungsende statt. In dieser Phase ist der UHPC noch am stärksten porös und trocknet dementsprechend stark aus. Das Verhältnis von freier Oberfläche zu Volumen ist an der Schwindrinne kleiner als an den Probekörpern (1:50 gegen 1:25), die Probekörper werden also etwas stärker austrocknen als es das mit der Rinne gemessene Schwindmaß wiedergibt.

Im Zuge der eigenen Untersuchungen wurde geprüft, wie sich ein zusätzliches Austrocknen der Proben durch eine Wärmebehandlung von 105°C im Trockenofen für 14 Tage ab dem 212. Tag auswirkt. Es zeigte sich, dass die Trocknung hohes zusätzliches Schwinden und eine weitere Rissbildung zur Folge hat. Das ist als strichlierte Linie, die von der Kurve $\sigma_{z(OVS)}$ abzweigt, in Abbildung 7.5 eingetragen. Die Kurve überschreitet die Zugfestigkeit, es kommt zu Rissen im Beton-Inneren und neue kleinere Rissfelder definieren einen neuen Eigenspannungszustand in den von Rissen umgrenzten Elementen der UHPC-Schicht. Die horizontalen Zwangsspannungen sinken im neuen Rissfeld, während die vertikalen Spannungen im Rissfeld und am Rand der Verbundfugenfläche zunehmen und die Schubspannungs-Einleitungslänge zunimmt. So ein Rissereignis ist grundsätzlich immer denkbar, wenn das Schwinden durch äußere Einflüsse sehr groß wird.

Aus den Bruchbildern der Versuche zur Entwicklung der Haftfestigkeit mit der Zeit (Serie HE) lässt sich ableiten, dass die Adhäsionsfestigkeit bis zum 7. Tag langsamer, dann aber schneller wächst als die Zugfestigkeit. Die Änderung der Festigkeitsentwicklung um den 7. Tag fällt mit der einsetzenden festigkeitssteigernden Wirkung der puzzolanischen Reaktion der Mikrosilika mit dem Ca(OH)_2 aus der ersten Phase der Hydratation des Zementklinkers zusammen, vgl. [Schachinger 2007].

7.2.2 Dehnungsanteile, Dehnungsbilanz und Spannungen

Für die Dehnungsbilanz im Fall von Zwangs- und Eigenspannungen im Beton kann analog [Röhling 2009] angegeben werden:

$$\varepsilon_{\text{frei}} = \varepsilon_T + \varepsilon_{\text{cds}} + \varepsilon_{\text{cas}} = \varepsilon_{\text{unbeh}} + \varepsilon_{\text{beh}} + \varepsilon_{\psi} \quad (7.2)$$

⁸⁹ *Habel* gibt Ergebnisse für Vergleichsmessungen an zylindrischen Proben ($\varnothing=11\text{cm}/l=22\text{cm}$), die konserviert und bei 20°C und 40% r.F. gelagert wurden, bei einem Messbeginn 23 Stunden nach Erstarrungsende, an. Nach 90 Tagen beträgt das autogene Schwinden 0,36‰ und das Trocknungsschwinden 0,08‰. Der Hauptanteil des Trocknungsschwindens tritt in den ersten 20 Tagen auf. [Habel 2004], p.45.

In dieser „Bilanz“ wird ausgedrückt, dass die freien Dehnungen ($\varepsilon_{\text{frei}}$) bzw. Verformungen, die infolge Temperaturänderungen (ε_{T}), Trocknungsschwinden (ε_{cds}) und autogenem Schwinden (ε_{cas}) ohne mechanische Lasteinwirkung entstehen, im Bauteil zum Teil behindert und durch Relaxation abgebaut werden. In unserem Fall werden die freien Dehnungen mit Hilfe der Schwindrinne praktisch unbehindert erfasst und im Folgenden als ε_{cs} bezeichnet. Im Fall MVS wurden die autogenen Verformungen $\varepsilon_{\text{cs(MVS)}} = \varepsilon_{\text{T}} + \varepsilon_{\text{cas}}$, im Fall OVS wurde $\varepsilon_{\text{cs(OVS)}} = \varepsilon_{\text{T}} + \varepsilon_{\text{cds}} + \varepsilon_{\text{cas}}$ gemessen, wobei darin auch die Verformungen infolge von Frühschwinden⁹⁰ enthalten sind. Im Folgenden wird für die Schwinddehnungen $\varepsilon_{\text{cs(OVS)}}$ oder $\varepsilon_{\text{cs(MVS)}}$ nur mehr ε_{s} angeschrieben.

In einem Bauteil oder Probekörper behindert der Verbund an der Grenzfläche die Dehnungen (ε_{beh}) und es bauen sich Zwangsspannungen auf. Ein Teil der Dehnungen kann aber, ausgehend vom freien Rand ins Innere, unbehindert auftreten ($\varepsilon_{\text{unbeh}}$). Die viskoplastischen, bleibenden Formänderungen, die die Zwangsspannungen durch Relaxation mindern, werden durch ε_{p} ausgedrückt.

In dem betrachteten Fall von UHPC-Schichten zwischen dem Verbundpartner Stahl oder Glas sind die behinderten Dehnungen und daraus resultierenden Spannungen hauptsächlich vom Durchmesser zu Dicken-Verhältnis abhängig. Starrer Verbund und eine geringe Steifigkeit der UHPC-Schichten im Verhältnis zu den Stahl-/Glasteilen werden zunächst vorausgesetzt.

Im beschriebenen zentralen Feld (Zone C) der UHPC-Schichten sind die Schwinddehnungen vollständig behindert und die Spannungen $\sigma_r = \sigma_{\varphi} = \sigma_e$ sind im vorliegenden axialsymmetrischen Fall mit homogenen Verzerrungs- und Spannungszuständen vor der Rissbildung in allen Richtungen gleich. Ebenso die Dehnungen $\varepsilon_{r,\varphi}$ und daher ist $\sigma = E\varepsilon/(1 - \nu)$. Der lineare Zusammenhang zwischen den Spannungs- und Verzerrungskomponenten $\sigma_{r,\varphi}$ und $\varepsilon_{r,\varphi}$ resultiert aus dem linear - elastisch - isotropen 3D- Hooke' Materialgesetz. Es treten keine Schubspannungen im Scheiben-Inneren auf. Vor der Rissbildung ($t=0$) herrscht im homogenen Spannungsfeld überall die Zwangsspannung $\sigma_{e,0}$

$$\sigma_{e,0} = \frac{E_{\text{eff}}}{1 - \nu} \cdot \varepsilon_{c,0} = \frac{E}{(1 - \nu) \cdot (1 + \Phi)} \cdot \varepsilon_{c,0} \quad (7.3)$$

unter der Annahme von konstantem, behinderten Schwinden über die Dicke der Schicht $\varepsilon_{c,0} = \varepsilon_{\text{s}}$. Durch den effektiven E-Modul E_{eff} kann der Einfluss des Kriechens mit der Kriechzahl Φ berücksichtigt werden.

⁹⁰ Hier wurde das Frühschwinden zum Trocknungsschwinden (ε_{cds}) gezählt. Es könnte auch zwischen Frühschwinden und Trocknungsschwinden ab einem definierten Zeitpunkt unterschieden werden, z.B.: 24 h nach Wasserzugabe beim üblichen Prüfbeginn des Trocknungsschwindens nach Norm (vgl. [ÖNORM B 3303]).

Um das zentrale Feld nehmen die Spannungen σ_r nach außen hin rascher ab als σ_φ , sodass in diesem äußeren Ring (Zone B) Radialrisse entstehen. Nur am Rand der UHPC-Schicht (Zone A bzw. äußerer Bereich der Zone B in der Bruchflächenanalyse) entstehen Schubspannungen und vertikale abhebende Spannungen, die in der Verbundfuge zur Mitte hin ihr Vorzeichen wechseln und zu Druckspannungen werden, siehe auch Kapitel 5.4.2.

Das zentrale Feld mit homogenem Spannungszustand tritt nach den Berechnungen in Kapitel 5.4.2 bis zu einem d/t_c -Verhältnis von $> 10:1$ auf. Ab $10:1$ ist es auf einen Punkt reduziert. Bei noch größerer Schichtdicke im Verhältnis zum Durchmesser reicht die unbehinderte Dehnung weiter ins Körperinnere. Es treten dann dreidimensionale Spannungen bzw. auch vertikale Spannungen im UHPC Inneren auf. Ein homogenes Spannungsfeld existiert nicht mehr.

7.2.3 Eingprägter Spannungszustand in einer UHPC-Schicht und Rissbildung

aus den Spannungsanalysen abgeleitete Zusammenhänge

Die Spannungen und insbesondere die Zwangsspannungen in einer UHPC-Schicht hängen wesentlich vom Verhältnis der Dicke t_c zur Ausdehnung d der Schicht ab. Linear-elastische FEM-Berechnungen an beidseitig und einseitig schwindbehinderten, axialsymmetrische UHPC-Schichten im starren Verbund mit Stahl, an welchen das d/t_c -Verhältnis variiert wurde, sind in Kapitel 5.4 beschrieben.

Die Zwangsspannungen werden durch Schubspannungen ausgehend vom Rand mit einer bestimmten Einleitungslänge l_e in die UHPC-Schicht eingeleitet. Es treten dabei auch vertikale Spannungen mit den Maxima nahe dem äußeren freien Rand auf. Die Spannungsverläufe sind im Kapitel 5.4 zu sehen und auch in Abbildung 7.6 für zwei ausgewählte Fälle dargestellt. Der Lasteinleitungsbereich l_e beträgt bei beidseitig schwindbehinderten, schlanken Schichten ($d/t_c > 10:1$), in denen die Zwangsspannungen vollständig eingeleitet werden können, $l_e \sim 4 - 6 \cdot t_c$, wie die FEM-Berechnungen zeigen⁹¹. Bei nur einseitig behinderter Schicht dagegen ist $l_e \sim 5 - 7 \cdot t_c$, die auftretenden Schubspannungen und abhebenden Zugspannungen sind dabei deutlich größer.

Bei schlanken Schichten mit $d/t_c > 10:1$ sind die Schwinddehnungen zwischen den Lasteinleitungsbereichen vollständig behindert und es entsteht (zwischen den Lasteinleitungsbereichen) ein homogenes zweidimensionales Spannungsfeld von horizontalen Spannungen ($\sigma_r = \sigma_\varphi = \sigma_e$), welches sich im Grenzfall ($d/t_c = 10:1$, Fall a) in Abbildung 7.6) auf einen Punkt im Zentrum reduziert. Erreichen die horizontalen Zwangsspannungen die Betonzugfestigkeit muss es zu Rissen kommen, die die UHPC-Schicht teilen. Sie definieren

⁹¹ Haardt gibt für den Lasteinleitungsbereich von zementgebundenen Reparaturschichten auf Beton, die einseitig verformungsbehindert sind $l_e \approx 4 \cdot t_c$ an, [Haardt 1991], p.83. Siehe auch Kapitel 2.6.3.

das d/t_c -Verhältnis des durch sie begrenzten Elementes neu, die einzelnen UHPC-Schichten oder Rissfelder werden gedrungener (in Abbildung 7.6, Fall b) wird z.B. ein gedrungenes Rissfeld mit $d/t_c=2:1$ dargestellt). Die Rissabstände s_{cr} bestimmen den Rissfelddurchmesser d . Der Zwangspannungszustand im Inneren der Rissfelder ändert sich auch dementsprechend.

Rissfelder (UHPC-Schichten):

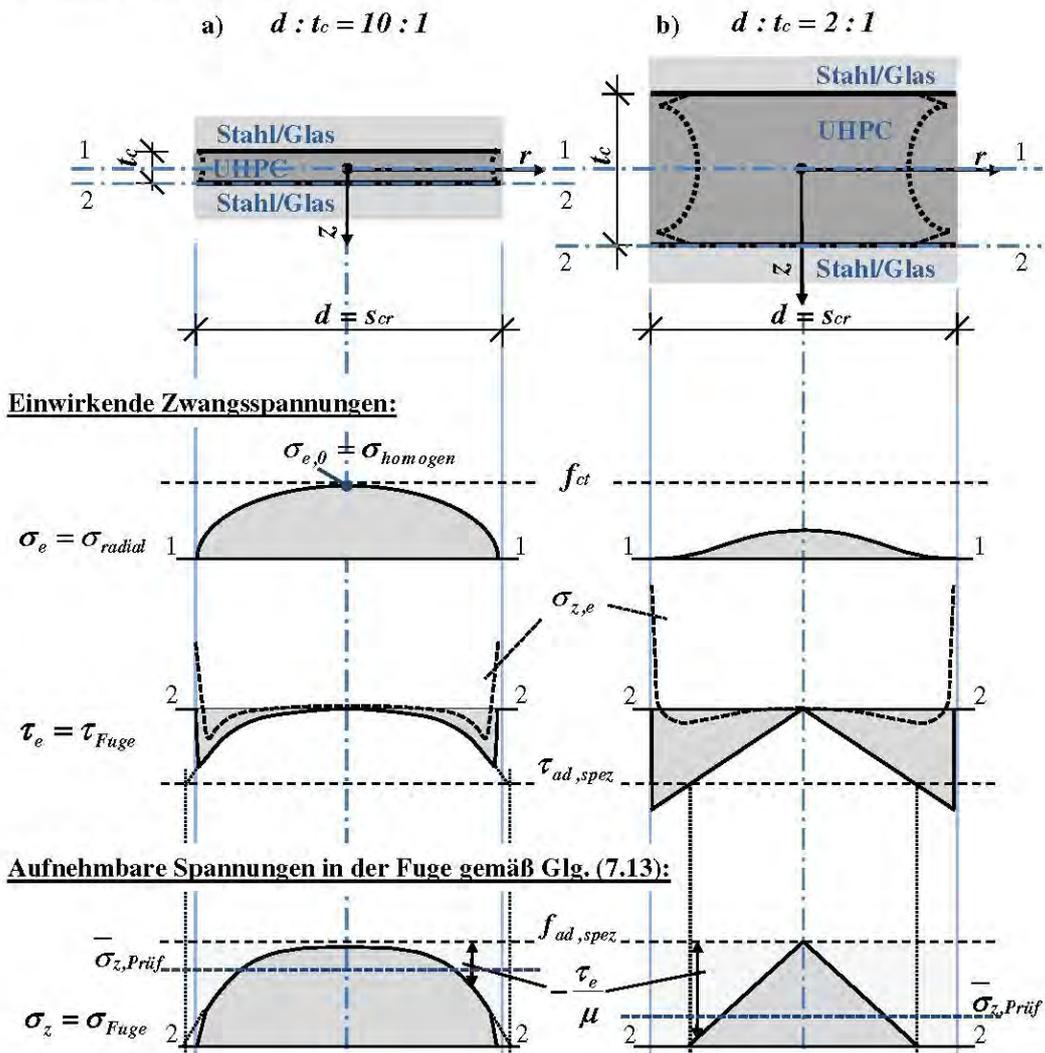


Abbildung 7.6: Spannungen im Rissfeld bzw. der Verbundfuge für a) eine (gerade noch) schlanke UHPC-Schicht und b) für ein gedrungenes Rissfeld

Bei kleiner werdendem Durchmesser im Verhältnis zur Schichtdicke ($d/t_c < 10 \cdot l_e$) überschneiden sich die Lasteinleitungsbereiche von beiden Rändern ausgehend im Zent-

rum. Die Einflusslänge der Lasteinleitung wird gleich groß wie der halbe Durchmesser und es treten nun im ganzen Feld („dicke Scheibe“) vertikale Spannungen auf, also herrscht ein dreidimensionaler Spannungszustand im ganzen Element. Die Schubspannungen erstrecken sich über die ganze Verbundfuge und verlaufen zunehmend linear, die abhebenden Zugspannungen am Rand wachsen stark an. Siehe dazu auch Abbildung 5.62 auf Seite 174. Die Schwindverformungen sind nicht mehr vollständig behindert, es bauen sich bei geringem d/t_c keine horizontalen Zwangsspannungen mehr auf, die die Zugfestigkeit überschreiten könnten. Allerdings nehmen abhebende vertikale Spannungen am Rand zu, während die maximalen Schubspannungen etwa gleich bleiben, vgl. auch Abbildung 5.62.

von den Haftzugproben abgeleitete Schlussfolgerungen

Bei Proben MVS überschreiten die Zwangsspannungen zufolge behinderter Verformungen zu keinem Zeitpunkt die Zugfestigkeit im Betoninneren. Im zentralen Feld (Zone C), in dem zwar horizontale Spannungen herrschen, aber keine Spannungen in der Verbundfuge wirken, kann sich die spezifische Adhäsion ungestört ausbilden. Auch in der umgebenden Zone B müssen Relativverschiebungen eine untergeordnete Rolle spielen, da sich Haftung ausbildet. Die Bruchflächen zeigen auch dort ausgeprägt anhaftenden Bindemittelstein. Da die Größe des zentralen Feldes abhängig vom Untergrund und des verwendeten UHPC unterschiedlich ausfällt, muss der Verbundeinleitungsbereich unterschiedlich lang sein. Daraus lässt sich schließen, dass Schlupf in der Verbundfuge in Abhängigkeit von der Untergrundrauhheit und dem Material auftritt. Nur am Rand in der ringförmigen Zone A löst sich der UHPC schon vor der Haftzugprüfung vom Untergrund, wie oben beschrieben. Hier wirken Zwangsspannungen in der Fuge und zusätzliche „Randeinflüsse“, z.B. durch oberflächliches Austrocknen und Ansteifen in den ersten Minuten.

Die an den rissefreien Proben MVS erzielte Haftzugfestigkeit $\bar{\sigma}_z = F/(A_g - A_{ZoneA})$ ist in erster Näherung – unter Vernachlässigung der Zwangsspannungen am Rand – die technisch erzielbare spezifische Adhäsionsfestigkeit $f_{ad,spez}$ an glatten Flächen oder im Fall des Betonbruchs eine untere Grenze dieser.

Bei den Proben OVS definiert die Geometrie der Rissfelder wie beschrieben den eingepprägten Spannungszustand. Wird eine äußere Last auf die UHPC-Schichten aufgebracht, wie es zum Beispiel bei der Haftzugprüfung der Fall ist, so reduzieren die in der UHPC-Schicht bzw. Verbundfuge vorhandenen Zwangsspannungen die erzielbare Prüfkraft.

Es wird aus den Beobachtungen und dargelegten Überlegungen auf folgenden zeitlichen Ablauf bei der Rissbildung geschlossen: Zunächst ist ein ausreichend guter Verbund vorhanden, im Wesentlichen ein guter Schubverbund in der Grenzfläche, sodass die Zwangsspannungen durch Schub- (und Zug-)Spannungen vom Rand der UHPC-Schicht aus in der Verbundfuge eingeleitet und ohne Verbundversagen aufgenommen werden können. Rissbildung setzt zu einem bestimmten Zeitpunkt des Erhärtungsverlaufes dann in der UHPC-Schicht ein, wenn die Zwangsspannungen die Zugfestigkeit erreichen. An den entstandenen, nunmehr gedrunghenen Rissfeldern überschreiten bei weiterem Schwinden Span-

nungen in der Verbundfuge die Haftzug- oder Haftschubfestigkeit bevor die Zugfestigkeit im Rissfeld-Inneren erreicht wird. Die auftretenden Schub- und Zugspannungen in der Verbundfuge sind im Verhältnis zu den Zwangsspannungen im Zentrum der Schicht bei gedungenen Schichten größer (ungünstiger hinsichtlich eines Verbundversagens) als bei schlanken Schichten wie in Kapitel 5.4.2 gezeigt wurde (vgl. Abbildung 5.62 auf Seite 174). Die beobachteten blanken äußeren Bereiche der Rissfelder bei Proben OVS lassen den Schluss zu, dass es vom äußeren Rand aus zu einem Schubversagen gekommen ist (wie im Kapitel 5.7 auf Seite 187 beschrieben), das auf behindertes Schwinden zurückgeführt werden muss⁹².

Nach der Ablösung in der Verbundfuge vom Rand her wandert das Maximum der Randzugspannungen und Schubspannungen nach innen und müsste theoretisch zu fortschreitendem Verbundversagen führen, das aber nicht beobachtet wurde. Es wird in Analogie zu [Haardt 1991] gefolgert, dass ein nichtlineares Materialverhalten und plastische Umlagerungen dafür sorgen, dass es zu keinem instabilen Rissfortschritt und keinem reißverschlussartigen Versagen in der Verbundfuge kommt.

Auf das Auftreten von Schlupf in der Verbundfuge der Proben mit UHPC EM, der für plastische Umlagerungen der Verbundspannungen sorgt, wurde bereits im Zusammenhang mit der Größe des zentralen Feldes geschlossen, weil es bei rauem Untergrund größer ist als auf glatten Oberflächen (siehe Kapitel 7.1.1). Aus dem bereits dort Dargelegten wird gefolgert, dass sich bei der Mischung EM die Einleitungslänge für Zwangsspannungen abhängig von der Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung ändert, die ihrerseits vom jeweiligen Untergrund (Material, Rauheit) abhängt.

Durch Schlupf und nichtlineares, plastisches Materialverhalten in der Verbundfuge würde sich bei glatten Flächen das Gleichgewicht zwischen einwirkenden Belastungen durch Zwang in der Fuge und den aufnehmbaren Kräften in der Fuge auf Kosten einer längeren Einleitungslänge als bei rauhen Proben einstellen. Die Beobachtung, dass die Zone rund um das zentrale Feld (Zone B), in der die Zwangsspannungen eingeleitet werden, bei glatten Proben mit UHPC EM breiter ist als bei rauhen und bei Glas breiter als bei Stahl bestärkt diese Folgerung. Plausibel ist, dass im Verbund mit glattem Glas die geringsten Verbundspannungen aufgenommen werden können und mit rauem Stahl die größten.

Bei der Mischung UHPC DM mit konstanter Breite der Zone B unabhängig von der Rauheit des Untergrundes scheinen gleiche plastische Umlagerungen in der Grenzflächenschicht im UHPC selbst stattgefunden zu haben, ohne dass Schlupf unmittelbar in der Verbundfuge auftrat und ohne dass der Verbund dadurch zerstört wurde. In einer frühen Phase der Erhärtung kann das bei dieser Mischung tatsächlich aufgetreten sein, da ihre Grenzflächenschicht weicher ist als das UHPC-Innere wie in den Versuchen zur Haftungsentwicklung der Vorserien beobachtet wurde (Abbildung 5.20, Seite 129). Darauf weist auch der

⁹² Der beobachtete Haftscheiter sowie der Betonausbruch auf den Bruchflächen zwischen den Rissen weist auf ein Zugversagen hin, das durch die nachträglich aufgebrachte Prüfkraft ausgelöst wurde.

deutlich ausgeprägte und nur in Zone B an Rissen „verschmierte“ Haftscheier hin (siehe Kapitel 6.3.4 auf Seite 211f).

7.2.4 Rissabstände und deren Berechnung

Für die Beurteilung der Zwangsspannungen ist es wesentlich, die Rissabstände, die das d/t_c -Verhältnis der UHPC-Schicht bzw. die Größe der Rissfelder festlegen, zu kennen. Deshalb wird im folgenden Abschnitt auf die Bestimmung der Rissabstände eingegangen.

Rissabstände und Rissmuster

Wie in Kapitel 2.7.4 auf Seite 45 beschrieben, ergibt sich in einer ausgedehnten Betonschicht theoretisch ein Muster von lauter hexagonalen Rissfeldern aus der Forderung nach einer minimalen Rissfläche bei maximalem eingeschlossenen UHPC-Volumen (siehe Abbildung 7.7a), vgl. [Bažant 1992]. Dieses Muster entsteht allerdings nur, wenn alle Risse zur selben Zeit auftreten. Sind Inhomogenitäten vorhanden, bilden sich Primär- und Sekundärrisse nacheinander. Sekundärrisse sind in der Regel normal auf Primärrisse ausgerichtet, vgl. u.a. [Péron 2008].

Für die Berechnung der Rissabstände muss neben den zeitabhängigen Materialeigenschaften auch bekannt sein, wie hoch der Grad der Behinderung der freien Dehnung durch den Verbund ist. Diese komplexen Abhängigkeiten werden im Rahmen dieser Arbeit nicht vollständig geklärt. Es wurden aber Grenzen für die Rissabstände, die auftreten können, durch zweierlei Überlegungen gefunden:

- a) Für starren Verbund liegt der Rissabstand zwischen einfacher und doppelter Einleitungslänge für horizontale Zwangsspannungen. Im Zentrum des Rissfeldes ist dann gerade die Zugfestigkeit des UHPC erreicht. Es gilt also, was für die Berechnung der Rissabstände bei abgeschlossener Rissbildung von bewehrtem Stahlbeton bekannt ist, vgl. [Leutbecher 2007]. In der vorliegenden Arbeit wurde die Einleitungslänge l_e vereinfacht für ein kreisrundes Rissfeld berechnet und beträgt etwa $5 \cdot t_c$, ist also von der Schichtdicke abhängig. Das bedeutet, die Rissfelder haben ein Verhältnis von $d/t_c > 5/1$ bis $10/1$ (mit Durchmesser $d \approx$ Rissabstand). Bei den rauen Stahlproben mit UHPC EM lassen sich entsprechende Rissabstände auch beobachten ($t_c = 2,5$ mm, $d \approx$ Rissabstand = 11-21 mm, siehe Tabelle 5.8, Seite 155), es herrscht also ein relativ starrer Verbund.
- b) Besonders an glatten Flächen und insbesondere am Glas verursacht der weniger starke Verbund auch geringere Rissabstände. Dadurch kann die Zugfestigkeit im Rissfeld-Zentrum nicht mehr erreicht werden und ist auch kein Berechnungskriterium mehr. Die untere Grenze für die zu erwartenden Rissabstände kann aber aus Energiebetrachtungen gewonnen werden, was im Folgenden erläutert wird.

Rissabstandsberechnung nach dem Prinzip der Energieerhaltung

Nach dem Prinzip der Energieerhaltung nimmt die potentielle Energie (oder *Helmholtz free energy*) des Systems bei der Rissbildung ein Minimum an, vgl. [Bažant 1992].

Die Rissabstände ergeben sich, wenn angenommen wird, dass die in der UHPC-Schicht gespeicherte elastische Verzerrungsenergie U , die auch als Formänderungsarbeit bekannt ist, vollständig in Oberflächenenergie W_{cr} neu gebildeter Risse umgewandelt wird.

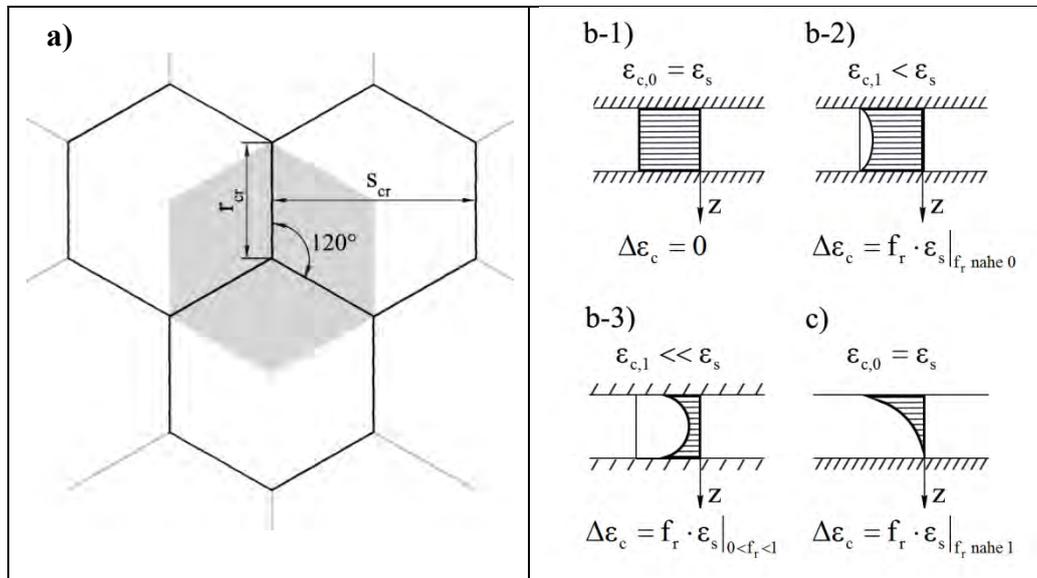


Abbildung 7.7: a) Schema Rissfelder; b,c) behinderte Dehnung ε_c und freigesetzte Verzerrung $\Delta\varepsilon$ über die Schichtdicke („Form der Risse“) für b-1) vollen, starren Verbund vor dem Riss ($t=0$), b-2) vollen, starren Verbund am Rissufer ($t=1$), b-3) nachgiebigen Verbund nach dem Riss und c) im Fall einseitiger oberflächlicher Austrocknung

Für die nachfolgende Berechnung, die analog zu [Bažant 1992]⁹³, durchgeführt wird, müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- Die Materialeigenschaften und die auftretenden Spannungen sind homogen und isotrop
- Die Rissfelder bestehen ausschließlich aus Sechsecken, vgl. Abbildung 7.7a. Diese Form genügt hinreichend der Forderung, dass die Rissfläche pro gegebener Volumeneinheit minimal ist.
- Die Risse treten alle gleichzeitig auf.
- Die Risse gehen durch die ganze Dicke der Schicht t_c (durchqueren die ganze Querschnittshöhe).
- In die Berechnung gehen die elastischen Dehnungen, die bei der Rissbildung freigesetzt werden, ein. Plastische irreversible Dehnungen werden vernachlässigt oder wie das

⁹³ Bažant berechnet die Rissabstände von Rissen, die durch Trocknungsschwinden des Betons verursacht werden. Ausgehend von einer austrocknenden freien Betonoberfläche wachsen die Risse bis zu einer gewissen Tiefe im Halbraum. [Bažant 1992], p.818ff.

Kriechen⁹⁴ und die Relaxation bei der Berechnung der wirksamen Spannungen berücksichtigt.

- In die Berechnungen gehen die vor der Rissbildung vollständig behinderten Dehnungen im UHPC $\varepsilon_{c,0}$ ein. Sie werden durch das Schwinden verursacht. Somit ist $\varepsilon_s = \varepsilon_{c,0}$ und wird bei der Rissbildung vollständig frei: $\Delta\varepsilon_c = \varepsilon_s$.

In der Realität werden nicht die gesamten Schwinddehnungen behindert und als elastische Dehnungen bei der Rissbildung wieder freigesetzt. Durch die Verbundwirkung der Grenzflächen bleiben also Anteile des behinderten Schwindens als Zwangsspannungen im Beton auch nach der Rissbildung erhalten. Zum Zeitpunkt der Rissbildung ($t=1$) wird dann nur die Betondehnung $\Delta\varepsilon_c = \varepsilon_{c,0} - \varepsilon_{c,1}$ frei. Es kann auch gesagt werden, dass nur ein Teil der Schwinddehnungen elastisch frei wird, $\Delta\varepsilon_c = f_r \cdot \varepsilon_s$ mit $0 < f_r < 1$ (siehe Abbildung 7.7b).

Die Spannungen und Dehnungen können in der beidseitig behinderten UHPC-Schicht im homogenen Feld als über die Dicke konstant angenommen werden, $\varepsilon_{s(z)} = \varepsilon_s$, Abbildung 7.7b/1. Nur im Fall von einseitig unbehinderten, austrocknenden Schichten ist das Schwinden über die Dicke veränderlich ($\varepsilon_{(z)}$) (siehe Abbildung 7.7b/3).

Wie schon oben beschrieben, sind im vorliegenden axialsymmetrischen Fall die Spannungen $\sigma_{e,0} = \sigma_r = \sigma_\varphi$ vor dem Riss ($t=0$) in allen Richtungen gleich, ebenso die Dehnungen $\varepsilon_{r,\varphi}$ und daher $\sigma = E\varepsilon/(1 - \nu)$. Vor der Rissbildung herrscht im homogenen Spannungsfeld überall die Spannung gemäß Gleichung (7.3), Seite 234, mit dem konstanten behinderten Schwinden $\varepsilon_{c,0} = \varepsilon_s$, vgl. Abbildung 7.7b. Durch den effektiven E-Modul E_{eff} kann der Einfluss des Kriechens mit der Kriechzahl Φ berücksichtigt werden.

Durch die Rissbildung werden die Spannungen stark reduziert. Könnten sich die Grenzflächen der UHPC-Scheibe unbehindert entspannen (freie Oberflächen), fielen die Spannungen auf $\{\sigma_{r,\varphi}\} = 0$ ab. Somit werden Spannungen $\Delta\sigma_{r,\varphi} = -\sigma_0$ und Dehnungen $\Delta\varepsilon_{r,\varphi} = -\sigma_0(1 - \nu)/E$ ⁹⁵ frei.

Die elastische Verzerrungsenergie U errechnet sich aus der elastischen Verzerrungsenergie pro Volumeneinheit U^* (spezifische Verzerrungsenergie) mal dem Volumen des betrachteten deformierten Körpers V .

$$U = U^* \cdot V \tag{7.4}$$

⁹⁴ Für Feinkorn UHPC ohne Wärmebehandlung wird in [AFGC 2002] für die Kriechzahl Φ der Faktor 0,8 vorgeschlagen. In unserem Fall für das Zugkriechen ab frühestem Belastungsalter von einem höheren Wert auszugehen.

⁹⁵ Im Moment der Rissbildung ($t=1$) ist dabei $E_{(t=1)}$ wirksam.

Für die Änderung der spezifischen elastischen Verzerrungsenergie ΔU^* durch die Rissbildung kann Gleichung (7.6) angeschrieben werden:

$$\Delta U^* = \frac{1}{2} \sum \{ \Delta \sigma_{r,\phi} \} \{ \Delta \varepsilon_{r,\phi} \} \quad (7.5)$$

Durch Einsetzen für $\Delta \sigma_r = \Delta \sigma_\phi = -\sigma_0$ und $\Delta \varepsilon_r = \Delta \varepsilon_\phi = -\sigma_0(1-\nu)/E$ sowie Gleichung (7.3) für σ_0 wird daraus:

$$\Delta U^* = \frac{1}{2} \sum \{ \Delta \sigma_{r,\phi} \} \{ \Delta \varepsilon_{r,\phi} \} = \frac{1}{2} 2 \left(-\sigma_0 \cdot \frac{-\sigma_0(1-\nu)}{E} \right) = \frac{E \varepsilon_{c,0}^2}{(1-\nu)(1+\phi)^2} \quad (7.6)$$

Für den E-Modul E und die Querdehnzahl ν ist auch zu berücksichtigen, dass sie zeitabhängig sind.

Das Volumen eines Rissfeldes im Fall des sechseckigen Prismas ist:

$$V = \frac{3}{2} \sqrt{3} \cdot r_{cr}^2 \cdot t_c \quad (7.7)$$

Darin ist r_{cr} die Seitenlänge des Sechsecks und t_c die Schichtdicke der UHPC-Schicht. Mit Gleichung (7.6) und (7.7) wird Gleichung (7.4) zu:

$$U = \frac{E \varepsilon_{c,0}^2}{(1-\nu)(1+\phi)^2} \cdot \frac{3}{2} \sqrt{3} \cdot r_{cr}^2 \cdot t_c \quad (7.8)$$

Die Oberflächenenergie W_{cr} neu gebildeter Risse ergibt sich aus der Rissfläche mal der Bruchenergie G_f des UHPC, vgl. [Bažant 1992]:

$$W_{cr} = N_c \cdot r_{cr} \cdot G_f \cdot t_c \quad (7.9)$$

Darin geht die Anzahl der Risse N_c ein. Die Wiederholung von 3 Rissen im Winkel von 120° zueinander ist das Grundelement des Rissmusters, vgl. auch Abbildung 7.7a. Mit $N_c = 3$ und dem Volumen des sechseckigen Prismas kann durch Einsetzen der beschriebenen Größen und durch Gleichsetzen von Gleichung (7.8) mit (7.9) die Risslänge r_{cr} bzw. daraus unmittelbar der Rissabstand $s_{cr} = r_{cr} \cdot \sqrt{3}$ berechnet werden:

$$s_{cr} = \frac{2(1-\nu)(1+\phi)^2}{E} \cdot G_f \cdot \frac{1}{(f_r \cdot \varepsilon_{c,0})^2} \quad (7.10)$$

Um zu berücksichtigen, dass nicht die gesamte elastische Verzerrungsenergie bzw. dass nicht die gesamte Betondehnung, die vor dem Riss vorhanden ist, frei wird, wird in Gleichung (7.10) ein Faktor f_r eingeführt; f_r liegt zwischen 0 und 1, für freie Oberflächen nahe 1, vgl. auch Abbildung 7.7c. Es kann angenommen werden, dass der Faktor f_r von der Oberflächenrauheit bzw. dem Verschiebewiderstand in der Grenzflächenzone abhängt und damit Risse bei glatten Oberflächen weiter aufgehen als bei rauen.

Mit der Rissbildung ist auch verbunden, dass sich die UHPC-Schichten neben den Rissen in der Grenzfläche vom Untergrund ablösen, um sich verformen und verschieben zu können. Die gespeicherte Verzerrungsenergie wird dann auch in die Bildung neuer Oberflächen durch die Trennung des Verbundes zwischen UHPC-Schicht und Werkstoffoberfläche umgewandelt und nicht nur in die Arbeit zur Bildung neuer Rissoberfläche W_{cr} . Der obere Grenzwert der Rissabstände liegt dann wie schon für den Fall a) auf Seite 239f beschrieben zwischen einfacher und doppelter Einleitungslänge für horizontale Zwangsspannungen, die die Zugfestigkeit erreichen.

Für einseitig freie, oberflächlich austrocknende Oberflächen ergeben sich mit einem Schwindprofil über die Dicke der Betonschicht t_c , also in Richtung der z-Koordinate, von $\varepsilon_s(z) = (1 - z/t_c)^2 \cdot \varepsilon_0$ (siehe Abbildung 7.7d) nach demselben Berechnungsansatz wie oben abgeleitet wesentlich größere Rissabstände. Das deckt sich auch mit den Beobachtungen der Rissbildung an einseitig austrocknenden Proben (vgl. Serien SD1-D und EV in Kapitel 5.1.2).

$$s_{cr} = \frac{20(1 - \nu)(1 + \phi)^2}{E} \cdot G_f \cdot \frac{1}{(f_r \cdot \varepsilon_0^2)} \quad (7.11)$$

Im Anhang A.4.1 wurden anhand einer Beispielrechnung die Rissabstände theoretisch abgeschätzt. Dabei werden die (zeitabhängigen) Materialparameter in plausiblen Grenzen solange variiert, bis die berechneten Rissabstände mit den gemessenen Rissabständen der untersuchten Proben übereinstimmen.

In der Beispielrechnung wird auch der Reduktionsfaktor f_r , mit dem der Anteil der freigesetzten Verzerrungsenergie abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit berücksichtigt wird, variiert. Er ist bei rauen Proben kleiner als bei glatten und real immer <1 . Die Variation der Parameter in der Beispielrechnung ergibt, dass bei gutem Verbund (raue Oberflächen) etwa 20-40% der Energie frei werden, was einem f_r von rund 0,4 bis 0,6 entspricht⁹⁶.

Die Rissmuster der Haftzugproben zeigen an rauen Proben größere Rissabstände als an glatten Proben (Tabelle 5.8 auf Seite 155). Dies lässt sich damit erklären, dass an rauen Proben weniger elastische Verzerrungsenergie frei wird als an glatten, was zu größeren Rissabständen führt.

⁹⁶ Es wurde beobachtet, dass die Größe des Reduktionsfaktors f_r auch von der Dicke der Schicht abhängt. Außerhalb des Rahmens der Arbeit wurden Tastversuchen an UHPC-UHPC Verbundproben gemacht. Die Proben mit einem doppelt so großen Dicken/Durchmesser Verhältnis wie die Sandwich-Proben der vorliegenden Arbeit zeigen im zentralen Feld engere Rissabstände. Vgl. [Marjanen 2010].

7.3 Verhältnis von Haftzug-zu Haftschiebungsfestigkeit - Versagenskriterium der Adhäsion

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass nicht nur beträchtliche Haftzugfestigkeiten sondern auch Haftschiebungsfestigkeiten an Proben mit glatten Werkstoffoberflächen übertragen werden können (vgl. Kapitel 5.7). Dies ist der Wirkung der spezifischen Adhäsion zuzuschreiben, zumal davon ausgegangen werden muss, dass eine mechanische Adhäsion an glatten Oberflächen nicht – oder, wenn von einer minimalen Mikro-Rauheit auch auf glatten Flächen ausgegangen wird, nicht in diesem hohen Maße – auftreten kann.

Die Prüfung von glatten Proben unter Torsionsbeanspruchung ergibt die spezifische Adhäsionsfestigkeit tangential zur Oberfläche. Sie wurde für UHPC-EM/Stahl mit $5,3 \text{ N/mm}^2$ und für UHPC-EM/Glas mit $3,5 \text{ N/mm}^2$ ermittelt. Das Verhältnis der Adhäsionsfestigkeit $\tau_{ad,spez}$ unter Schubbeanspruchung und $f_{ad,spez}$ unter Zugbeanspruchung beträgt für glatten Stahl somit $\mu_{mikro,Stahl} = 0,7$ und für glattes Glas $\mu_{mikro,Glas} = 1$. Dieser Zusammenhang erlaubt es, die Wirkung der tangentialen Adhäsion wie die Reibung auf einer mikroskopischen Ebene zu verstehen. Intermolekulare Wechselwirkungen (van der Waals-Kräfte elektrostatischer Natur), die als für die Adhäsion verantwortlich erkannt worden sind, wirken normal auf die Oberflächen der aneinander haftenden Phasen. Sie sorgen für eine permanent aktiv wirkende Kraft vergleichbar mit der Normalkraft der klassischen Reibung und aktivieren so in dieser Modellvorstellung die tangential aufnehmbare Adhäsionskraft. Für Stahl und UHPC stimmt der ermittelte Reibbeiwert $\mu_{mikro,Stahl}$ mit dem makroskopischen überein⁹⁷, für glattes Glas und UHPC muss der makroskopische Beiwert noch ermittelt werden.

7.3.1 Einführung eines Versagenskriteriums

Sind die Festigkeiten $f_{ad,spez}$ und $\tau_{ad,spez}$ bekannt, kann das Versagen für jede kombinierte Beanspruchung von Normalspannung σ_z ⁹⁸ und Schubspannung τ ⁹⁹ in einer Verbundfuge mit einem Versagenskriterium wie für die makroskopische Reibung vorhergesagt werden (Mohr-Coloumb-Bruchkriterium). Alle Kombinationen von Spannungen σ_z normal zur Grenzfläche in der Verbundfuge und τ tangential zur Fläche, die zu einem Bruchversagen

⁹⁷ Reibung polierter Stahl-UHPC, $\mu=0,7$, geprüft am Labor für konstruktiven Ingenieurbau, TU Graz, 2010 [ohne Versuchsbericht].

⁹⁸ Normalspannungen σ_z wirken normal auf die Verbundfugenoberfläche bzw. bei rauen unregelmäßigen Oberflächen normal auf die Tangente an die Oberfläche. Im Kapitel 5.4 in den FEM-Berechnungen wurde für σ_z S22 geschrieben.

⁹⁹ τ wirkt in Richtung der Verbundfugenoberfläche bzw. in Richtung ihrer Tangente, also im axial-symmetrischen Fall im polaren Koordinatensystem (r,θ,z) in r-Richtung. Im Kapitel 5.4 in den FEM-Berechnungen wurde für τ S12 geschrieben.

führen, liegen auf einer Geraden $\tau = \mu(f_{ad,spez} - \sigma_z)$. Darin ist $\mu = \mu_{mikro,Stahl/Glas}$ wie oben beschrieben. Die Gleichung lässt sich auch umformulieren zu

$$\sigma_z = f_{ad,spez} - \frac{\tau}{\mu} \quad (7.12)$$

Der Zusammenhang ist in Abbildung 7.8 dargestellt. Sind zum Beispiel die Schubspannungen $\tau = \tau_e$, die zur Einleitung von Zwangsspannungen aus behindertem Schwinden gebraucht werden, bekannt, kann die noch aufnehmbare Zugspannung berechnet werden.

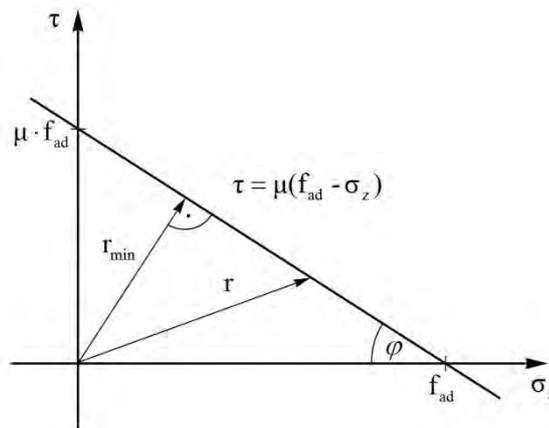


Abbildung 7.8: Versagenskriterium der Adhäsion bei zusammenwirkenden Schub- (τ) und Normalspannungen (σ_z) in der Verbundfuge glatter Oberflächen

Durch das behinderte Schwinden treten nicht nur Zwangsschubspannungen τ_e über die Verbundeinleitungslänge, sondern auch vertikale Spannungen $\sigma_{z,e}$ in der Verbundfuge auf, die am äußersten Rand eine abhebende Wirkung haben.

Unter reiner Zugbeanspruchung kann normal zur Grenzfläche in der Verbundfuge $\sigma_z = f_{ad,spez}$ aufgenommen werden, unter reiner Schubbeanspruchung tangential zur Fläche $\tau = \mu \cdot f_{ad,spez}$. In einer beliebigen Beanspruchungsrichtung kann eine entsprechende Kombination σ_z und τ aufgenommen werden, von der die Zwangsspannungen entsprechend abzuziehen sind. Diese Kombination lässt sich durch die Spannungsergebnante r im Versagenskriterium veranschaulichen.

7.4 Parameter eines Adhäsionsmodells für glatte Flächen

Mit Hilfe des eingeführten Versagenskriteriums kann die von einer Verbundfuge aufnehmbare Haftzugfestigkeit $\bar{\sigma}_z$ (in Richtung der Normale auf die Bezugsfläche A_g) mathematisch mit einigen Parametern beschrieben werden. Diese Parameter und welche Faktoren sie beeinflussen wird im Folgenden beschrieben und diskutiert.

7.4.1 Modell

Die von der Verbundfuge aufnehmbare Haftzugfestigkeit $\bar{\sigma}_z$ wird im Versuch als Prüfkraft F bezogen auf die geometrische Fläche A_g ermittelt. Sie kann unter Berücksichtigung des Verlaufs der aufnehmbaren Normalspannung σ_z in der Grenzfläche aus dem Integral $\int^{A_g} \sigma_z dA$ berechnet werden. σ_z hängt vom Verlauf der eingepprägten Zwangsspannungen $\tau_{e(t)}$ und $\sigma_{z,e(t)}$ in der Fuge zu einem bestimmten Zeitpunkt der Erhärtung ab. $\bar{\sigma}_z$ steht mit der Adhäsionsfestigkeit und den eingepprägten Zwangsspannungen in der folgenden Beziehung. Darin wird σ_z durch Gleichung (7.12) ausgedrückt und zusätzlich werden die normal zur Verbundfuge wirkenden Zwangsspannungen $\sigma_{z,e}$ berücksichtigt:

$$\bar{\sigma}_z = \frac{\int^{A_g} \sigma_z dA}{A_g} = \frac{1}{A_g} \cdot \int^{A_g} (f_{ad,spec} - \frac{\tau_e}{\mu} - \sigma_{z,e}) dA \quad (7.13)$$

Der Parameter μ steht für den oben beschriebenen „Reibungskoeffizient“ der spezifischen Adhäsion, der aus dem Verhältnis der technisch erzielbaren Haftschiebungsfestigkeit $\tau_{ad,spec}$ zur technisch erzielbaren Adhäsionsfestigkeit $f_{ad,spec}$ gewonnen wird. $f_{ad,spec}$ und $\tau_{ad,spec}$ werden in erster Näherung experimentell durch eine Haftzug -bzw. Torsionsschubprüfung an Verbundproben mit glatten Materialoberflächen bestimmt. Die Prüfkraften werden dabei auf die Probenfläche, die um die nicht mitwirkende äußerste Ringfläche (Zone A) reduziert wurde, bezogen, siehe Tabelle 7.1 auf Seite 224. Um bei dieser Bestimmung Effekte durch Zwangsspannungen in der Verbundfuge zu reduzieren, sind Proben mit möglichst großem d/t_c -Verhältnis ($d/t_c \gg 10:1$) und vollständigem Verdunstungsschutz zu verwenden. Diese Bestimmung ist eine Näherung, da die bei diesen Versuchskörpern auch auftretenden Zwangsspannungen über einen Bereich von etwa $5 \cdot t_c$ am Rand der Fuge vernachlässigt werden.

Die technisch erzielbare Adhäsionsfestigkeit entspricht dem Grundwert der spezifischen Adhäsion zweier Materialien $f_{ad,spec,0}$, abgemindert mit einem Faktor g .

$$f_{ad,spec} = \frac{f_{ad,spec,0}}{g} \quad (7.14)$$

$f_{ad,spec}$ ist als Materialeigenschaft vom Alter des UHPC abhängig.

In von Rissen umgrenzten UHPC-Feldern mit geringem d/t_c -Verhältnis (Proben OVS) wird die aufnehmbare Normalspannung σ_z wegen des hohen „Vorbelastungsanteils“ durch Zwangsspannungen τ_e und $\sigma_{z,e}$ in der Verbundfuge gering. Das ist in der Abbildung 7.6 anhand der Spannungsverläufe für zwei unterschiedlich große Rissfelder veranschaulicht, siehe Seite 236. In dieser Abbildung sind unter den Verläufen der horizontalen Zwangsspannungen σ_e in der UHPC-Schichtmitte und den Verläufen der Schub- (τ_e) sowie normalen Spannungen ($\sigma_{z,e}$) in der Verbundfuge die aufnehmbaren vertikalen Spannungen σ_z in der Verbundfuge aufgetragen. Mit der getroffenen Annahme von Axialsymmetrie können die dargestellten Flächen unter den Kurven der Spannungsverläufe im Raum als rotationssymmetrische Körper aufgefasst werden (Rotation um die z -Achse, Koordinaten: r, φ, z).

Das Integral der aufnehmbaren Normalspannung σ_z (Fläche bzw. Volumenkörper unter der Kurve in Abbildung 7.6) entspricht der Prüfkraft F einer Haftzugprüfung. Sie ist im Fall a) eines (gerade noch) schlanken Rissfeldes mit $d/t_c=10:1$ höher als im Fall b) eines gedrunenen Rissfeldes mit $d/t_c=2:1$. Somit ist die aufnehmbare Prüfkraft F bzw. die Prüffestigkeit ($\bar{\sigma}_z = F/(A_g - A_{ZoneA})$) im Fall a) höher. Entscheidend für die Berechnung ist es, den Verlauf der eingepprägten Zwangsspannungen in der Verbundfuge zu kennen ($\tau_e, \sigma_{z,e}$), deren Größe vom d/t_c -Verhältnis der Rissfelder und vom zu einem bestimmten Zeitpunkt auftretenden Schwindmaß $\varepsilon_S(t)$ unter Berücksichtigung der Relaxation durch Kriechen abhängt.

Für den Fall, dass die Rissfelder klein sind ($d/t_c < 4:1$), ergibt sich aus den FE-Rechnungen, dass τ_e über den Radius linear mit einem Maximum am Rand und einem Nulldurchgang in der Mitte verläuft (Abbildung 7.6b). Das Integral $\int^{A_g} \sigma_z dA$ stellt, wenn $\sigma_{z,e}$ vernachlässigt wird, ein Volumen eines Zylinders der Grundfläche A_g mit der Höhe $f_{ad,spez}$ mit aufgesetztem Kegel der Höhe $\frac{\tau_{e,max}}{\mu}$ dar und es wird:

$$\bar{\sigma}_z = A_g \cdot \left(f_{ad,spez} - \frac{2}{3} \cdot \frac{\tau_{e,max}}{\mu} \right) \quad (7.15)$$

Wird die in der Verbundfuge aufnehmbare Schubspannung $\tau_{ad,spez}$ durch die Zwangsspannungen überschritten, löst sich der äußere Rand des Rissfeldes ab. Es wurde ja an den Rissfeldern der glatten Oberflächen auch tatsächlich immer ein Randstreifen mit blank abgelöster Fläche beobachtet.

In dem auf Seite 236 in Abbildung 7.6b dargestellten Fall ist $\tau_{e,max} > \tau_{ad,spez}$, es kommt am Rand zum Schubversagen. Das Intergral $\int^{A_g} \sigma_z dA$ wird zu einem Kegel der Höhe $f_{ad,spez}$ mit einer reduzierten Grundfläche \hat{A}_g . Diese Grundfläche stellt die anhaftende Fläche dar, also die Fläche des Rissfeldes reduziert um den abgelösten Ring.

7 Maßgebende Einflussfaktoren auf die Adhäsion und deren Zusammenwirken

Die in der Modellannahme in Gleichung (3.1) auf Seite 51 hypothetisch eingeführte effektive Fläche A_{eff} hat, wie sich nun herausstellt, keine physikalische Bedeutung. Mit ihr lässt sich $\bar{\sigma}_z$ wie folgt ausdrücken:

$$\bar{\sigma}_z = \frac{A_{eff}}{A_g} \cdot f_{ad,spec} \quad (7.16)$$

Tabelle 7.6: Modellparameter

Parameter		ermittelbar mittels	Meßgrößen	Größenordnung
$f_{ad,spec,0}$	Grundwert der spezifischen Adhäsion	Wa/D ⁽¹⁾ :		G:330;S:800 N/mm ² ⁽²⁾
		spezif. Adh.arbeit Wa	σ_s^P, σ_s^D ⁽⁴⁾	siehe Kapitel 4
		intermolekularer Abstand D	schwer messbar	G:0,73;S:0,27 nm ⁽²⁾
g	Materialbeiwert für UHPC-Typ ⁽³⁾	Verhältnis $f_{ad,spec,0}/f_{ad,spec}$	fad,spec experimentell $\approx \zeta_{HZ}(MVS, R0)$	100 ⁽⁵⁾
ϵ_{csa}	spannungsinduzierendes autogenes Schwindmaß	Betonprüfung-Schwindmessung	autogene Verformung, Erstarrungszeitpunkt t_0	0,4‰ nach 28d (EM, DM - MVS)
ϵ_{csd}	spannungsinduzierendes hygrisches Schwindmaß	Berechnung+Messung	hydr. Koeffizient α_h ; Feuchtegradient Δh ; Oberfläche/Volumen, Erstarrungszeitpkt. t_0	aus Schwindmaß OVS zum Risszeitpunkt bzw. ab Riss bis $t_{aktuell}$ (28d EM:1,1‰, DM 0,8‰)
E_{eff}, ϕ	Kriechen & Relaxation	Betonprüfung	Kriechfunktion (t)	nach 28d: ~75-90%, abgeschätzt [Schachinger 2007]
μ	Mikro-Reibbeiwert	Verhältnis $\eta_{ad,spec}/f_{ad,spec}$		$\mu_{Stahl}=0,7, \mu_{Glas}=1$
		$\tau_{ad,spec}$ spezif. Haftschubfestigkeit	\approx Haftschubfestigkeit an glatten Flächen MVS experimentell	GR0EM: 3,5 N/mm ² SR0EM: 5,3 N/mm ²
$\tau_{cr(t)}$	Qualität des Schubverbunds zum Risszeitpunkt	(Torsions-) Schubversuch	Schubfestigkeitsentwicklung ab t=0 experimentell	abhängig von Mischungszusammensetzung, i.e. Zementgehalt
$d/t_c = s_{cr} : t_c$	\emptyset /Rissabstand : Schichtdicke	Rissabstandsberechnung	Gf(t), E(t), $\Delta \epsilon$ bzw. $E_{elast.}$	hier: 5-10 mm je nach Werkstoffkombination
$\tau_{e(t)}, \sigma_{e(t)}$	Zwangsspannungen durch behindertes Schwinden	Berechnung/ Reißbrähmenversuch o.ä.	Zwangsspannungen	Abschätzung siehe Abbildung 7.5
f_{ct}	Zugfestigkeit zum Risszeitpunkt	Betonprüfung (abhängig von Schichtdicke!)	Zugfestigkeit	10 N/mm ² für dünne Schicht 2,5 mm
⁽¹⁾	in therodynamischer Betrachtungsweise, siehe Kapitel 7.4.6.			
⁽²⁾	Abschätzung siehe Abbildung 7.10, Seite 255			
⁽³⁾	unter der Annahme, dass das Verhältnis $f_{ad,spec,0}/f_{ad,spec}$ für jede Kombination eines UHPC mit einem Werkstoff gleich bleibt			
⁽⁴⁾	σ_s^P, σ_s^D dispersive und polare Anteile der Oberflächenenergien von UHPC und Verbundpartner			
⁽⁵⁾	Siehe Kapitel 7.4.6			
Anmerk.	Alle Materialkennwerte des UHPC sind zeitabhängige Funktionen!			
	G	Glas	S	Stahl

Die Tabelle 7.6 gibt eine Übersicht über die Parameter, die in das Modell eingehen.

Im folgenden Abschnitt werden einige der in der Tabelle genannten Parameter weiterführend diskutiert.

7.4.2 Schwindmaß

Auch schon das plastische Schwinden könnte theoretisch die Adhäsion durch Relativverschiebungen in der Kontaktfläche – nur der Schichtmittelpunkt bleibt theoretisch in Ruhe – stören. Es tritt bei Proben mit UHPC OVS sehr stark auf. Es lässt sich an der Betontemperaturentwicklung allerdings beobachten, dass die Hydratationsreaktion erst nach der frühen Rissbildung bei Proben OVS einsetzt und sich dann erst die wesentliche Festigkeit entwickelt. Außerdem unterscheiden sich die geprüften Festigkeiten der Proben MVS und OVS in jungem Alter praktisch nicht. Erst nach 28 Tagen ist ein signifikanter Unterschied feststellbar. Die frühe Rissbildung, etwa zum Zeitpunkt der Erstarrung, und die damit verbundenen großen Relativverschiebungen in der Kontaktfläche bei Proben OVS haben die Festigkeit also nicht beeinflusst.

Das Schwindmaß wirkt sich wie schon ausführlich beschrieben also aus, wenn Zwangsspannungen ab dem Zeitpunkt der Erstarrung eingeleitet werden. Während das autogene Schwinden offensichtlich zu gering war, um Risse zu verursachen (Proben MVS), kann das Trocknungsschwinden ε_{csd} , wie an den einseitig austrocknenden UHPC-Schichten sichtbar wurde, zu Rissen und zum Aufschüsseln führen. In der Praxis muss es entsprechend den Umgebungs- und Bauteilbedingungen und dem hygrischen Koeffizient α_h gemäß $\varepsilon_{csd} = \alpha_h \cdot \Delta RH$ (mit dem Feuchtegradient ΔRH) bestimmt werden (siehe auch Kapitel 2.7).

7.4.3 Qualität des Schubverbundes zum Risszeitpunkt

Für den Widerstand gegen Relativverschiebungen in der Grenzflächenschicht (GFS, siehe Kapitel 6.3) ist entweder die Scherfestigkeit des Betons in der GFS oder die Haftschubfestigkeit in der Kontaktfläche maßgebend. Da das Schwinden als „treibende Kraft“ einer Verschiebung, besonders in der frühen Phase der Erhärtung groß ist und einem bekannten zeitlichen Verlauf folgt, ist auch der zeitliche Verlauf des Verschiebewiderstandes bzw. seine Größe zu einem frühen Zeitpunkt interessant, es genügt aber im Prinzip zu wissen, ob er groß genug ist, die freien Dehnungen zu behindern.

Es ist anzunehmen, dass der UHPC bis zur Erstarrung sehr schubweich ist (Querdehnzahl $\nu_{Flüssigkeit} = 0,5$). Er kann also die plastischen Schwindverkürzungen ohne Schädigung mitmachen.

Es wird aus den Beobachtungen geschlossen, dass die Qualität der Schubverbundes von der Mischungszusammensetzung des UHPC, insbesondere vom Bindemittelgehalt abhängt. Ein Zusammenhang mit dem Ausbreitmaß auf entsprechend rauher Werkstoffoberfläche wurde in Ansätzen festgestellt (siehe Kapitel 9.2.1).

Scherfestigkeit und deren zeitliche Entwicklung

Die früheste mögliche Angabe einer Scherfestigkeit des Betons ist wohl die Fließgrenze des Frischbetons, eine rheologische Kenngröße (siehe Kapitel 4.1.5, Seite 62). Für das Versagen von Beton unter Scher- bzw. Schubbeanspruchung ist die jeweilige Hauptzugspannung maßgebend. Bei reiner Schub- bzw. Torsionsbeanspruchung liegt die aufnehmbare Hauptzugspannung, die als „Schubfestigkeit“ bezeichnet werden kann, in der Größe der zentralen Zugfestigkeit. Vgl. [Grübl 2001].

Haftschubfestigkeit bzw. Frischbeton-Adhäsion in der Kontaktfläche

Die Haftschubfestigkeit in der Kontaktfläche ist immer größer als die Fließgrenze. Dies zeigt sich auch an der praktischen Beobachtung, dass sich frischer Beton von den meisten Oberflächen wie auch Stahl und Glas nicht rückstandsfrei ablösen lässt. Es bleibt immer eine feine Schicht aus Wasser und Feinstoffen anhaften.

Der zeitliche Verlauf der Haftschubfestigkeit wurde nicht geprüft. Praktisch konnte ein Wert der Torsionsschubfestigkeit an 28d alten Prüfkörpern ermittelt werden (siehe Kapitel 5.5.2, Seite 180).

Für den Unterschied der Schubverbundfestigkeit der Mischungen EM und DM kann die Mischungszusammensetzung verantwortlich gemacht werden. Es liegt der Schluss nahe, dass die Schubverbundfestigkeit mit dem Zementgehalt zusammenhängt und dieser für die höhere Haftschubfestigkeit und Haftzugfestigkeit von UHPC EM als von UHPC DM verantwortlich ist. Weiter Untersuchungen werden in Kapitel 9.2.1 angeregt.

7.4.4 Zugfestigkeit

Die Zugfestigkeit eines der am Verbund beteiligten Werkstoffe begrenzt die erzielbare Tragfähigkeit dann, wenn sie geringer ist als die Haftfestigkeit. Es kommt zu einem Kohäsions- statt Adhäsionsversagen. In unserem Fall trifft das für alle jene Proben zu, bei denen ein Betonbruch bzw. ein teilweiser Betonbruch in den Bruchbildern zu beobachten ist. In diesen Fällen lässt sich die Haftfestigkeit nicht aus den Versuchen ablesen. Sicher ist nur, dass sie höher ist, als die Zugfestigkeit des schwächeren am Verbund beteiligten Materialien, bei uns UHPC.

Umgekehrt lässt sich aus diesen Versuchen die Zugfestigkeit der Betonschicht ablesen. Sie ist mit Einzelwerten bis zu 12 N/mm² erstaunlich hoch, wesentlich höher als der Wert der Zugfestigkeit, der aus zentralen Zugfestigkeitsprüfungen an Bohrkernen hervorgeht (4,7 N/mm² für Betone der EMK2).

Die Ursache für diese große Differenz ist wohl die unterschiedliche Probengröße bzw. Schichtdicke des Betons bei den verwendeten Prüfkörpern. Während die Bohrkern bei einem Durchmesser von 50mm eine Höhe von mindestens 100 mm aufwies, hatte die UHPC-Schicht in den Verbundproben nur eine Dicke von 2,5 mm. Es ist bekannt, dass

besonders die Zugfestigkeit wegen der höheren Wahrscheinlichkeit von Fehlstellen im Gefüge in größeren Proben geringer ist als in kleineren Proben bzw. dünneren Schichten, vgl. [Leutbecher 2007].

7.4.5 Beiwert der technisch erzielbaren spezifischen Adhäsion

Es ist bekannt, dass die mit molekularphysikalischen oder thermodynamischen Modellen berechnete theoretische Kohäsions-Festigkeit und Adhäsions-Festigkeit von Materialien wesentlich höher ist, als die praktisch bzw. experimentell messbare Festigkeit. Auf Grundlage der Schwachstellenhypothese von [Smekal 1936], zitiert in [Bischof 1983], werden die niedrigen Festigkeitswerte mit geschwächten Bereichen im Volumen der Grenzflächenschicht erklärt. Insbesondere spielt bei spröden Werkstoffen wie UHPC und Glas, wie aus der Bruchmechanik bekannt, die Bildung von Mikrorissen eine entscheidende Rolle beim Versagensmechanismus, vgl. [Bürgel 2005]. Das Versagen wird an kleinen Defekten bzw. Mikrorissen im Material wie auch auf der Oberfläche, an denen Spannungsspitzen aufgrund der Kerbwirkung auftreten, ausgelöst.

Die Mittelwerte der Haftzugfestigkeiten und auch die Haftschubfestigkeiten an Proben MVS mit glatten Oberflächen, die im Rahmen der Arbeit experimentell ermittelt wurden und als technische Adhäsionsfestigkeit bezeichnet werden können, betragen nur einen Bruchteil der im folgenden Kapitel theoretisch berechneten Werte der spezifischen Adhäsionsfestigkeit. Außerdem sind die experimentellen Werte der Haftzugfestigkeiten durch die Betonzugfestigkeit begrenzt, die unter der technischen und damit weit unter der theoretischen Adhäsionsfestigkeit liegt.

Der Beiwert g , der die theoretische spezifische Adhäsion auf die technisch erzielbare spezifische Adhäsion abmindert, scheint im Wesentlichen von der Mikrostruktur des UHPC abzuhängen und berücksichtigt folgende Einflussfaktoren:

- Luftporen an der Grenzfläche bzw. in der Grenzflächenschicht verringern die wirksame Kontaktfläche und stellen vor allem Fehlstellen im Gefüge dar. In erster Näherung kann der Luftporengehalt des Festbetons in den Beiwert g eingehen. Es sollte auch der Porenradius bzw. die Porengröße bekannt sein, um die Porenzahl zu ermitteln. Der Frischbeton-Luftporengehalt ist für die verwendeten Mischungen wiederum eine erste Näherung, da nach der Verarbeitung aufgrund der hohen Viskosität und dem schnellen oberflächlichen Ansteifen praktisch keine Entlüftung mehr stattfindet.
- In der Kontaktfläche spielen die Benetzung bzw. der Randwinkel, der sich an der Grenzfläche der drei Phasen Luft, zähflüssiger UHPC und Untergrundmaterial einstellt, eine gewisse, hier wahrscheinlich zu vernachlässigende Rolle. Es wurde beobachtet, dass Luftporen in vielen Fällen nicht direkt an der Grenzfläche „anstehen“. Vielmehr sind die Poren auch an der Grenzfläche von Bindemittelleim umgeben, sodass frischer UHPC den Kontakt zum Untergrundmaterial hat.

- Mikrorisse im Gefüge als Orte von Kerbspannungsspitzen und Ausgangsstellen von Rissen wie aus der Bruchmechanik spröder Materialien bekannt.
- eine Störung der Packungsdichte in der Grenzflächenschicht, die die lokale Festigkeit dieser Schicht abmindert.

Der Beiwert muss für jeden UHPC aus dem Verhältnis $f_{ad, spez, 0} / f_{ad, spez}$ experimentell bestimmt werden. $f_{ad, spez}$ entspricht in erster Näherung der an Proben MVS mit Rauheit R0 geprüften Haftzugfestigkeit.

Die folgende Beobachtung auf der Mikroebene spricht dafür, dass der Faktor g nur von der UHPC-Zusammensetzung und nicht vom Untergrund abhängt: Die annähernd kreisrunden glatt abgelösten Flächen, das „Punktmuster“ des Haftschleiers, weisen bei UHPC EM auf Stahl und Glas den gleich großen Durchmesser auf, er ist also unabhängig vom Untergrund. Bei UHPC DM dagegen ist der Durchmesser größer.

Zur Störung der optimalen Packung in der Grenzflächenschicht:

An den Bruchflächen des Stahlteiles der Proben vom Typ SR0DM zeigt sich der anhaftende Haftschleier dichter (weniger Ausnehmungen) und dicker als auf Proben SR0EM. Generell zeigt der fugennahe Bruch, dass Bindemittelstein, aber keine Quarzkörner, auf der Stahlseite anhaften bleiben. Die optimale Packung und damit die Packungsdichte ist an einer glatten Fläche offensichtlich gestört, an rauen Flächen tritt der Bruch dagegen im Beton auf, die Grenzflächenschicht scheint nicht geschwächt.

Aus der Literatur zur Übergangszone zwischen Bindemittelstein und Gesteinskorn (ITZ, interfacial transition zone) ist bekannt, dass sich an Grenzflächen ein lokal höherer Wassergehalt bzw. W/B-Wert einstellt, Portlanditkristalle bevorzugt an Grenzflächen abscheiden und die Kornpackungsdichte gestört ist, vgl. Kapitel 2.6.1 bzw. [Maso 1996].

Bei Proben DM scheint sich die Störung wesentlich stärker auszuwirken als bei Proben EM. Es muss davon ausgegangen werden, dass der Unterschied zwischen theoretisch ermittelbarer spezifischer Adhäsion und der technisch erzielbaren Adhäsion unter Zugbeanspruchung an glatten Flächen bei der Mischung DM zu einem großen Teil dadurch bestimmt wird, dass das Zugversagen in der geschwächten Grenzflächenschicht über der Kontaktfläche wegen einer gestörten Packungsdichte zustande kommt, eigentlich ein „Kohäsionsversagen“ in der GFS.

Zusätzliche Einflüsse auf den Beiwert g

Zusätzliche Einflüsse auf den Beiwert g aus der Deformationskomponente der Festigkeit – siehe Kapitel 2.1 – können nicht ausgeschlossen werden. Der Beitrag der Deformationskomponente zu dieser globalen Größe hängt von den mechanischen Eigenschaften des Stoffsystems ab. Insbesondere spielen wie erwähnt Mikrorisse und Schwachstellen bei spröden Werkstoffen eine entscheidende Rolle beim Versagensmechanismus. Im Wesentli-

chen bleibt g trotzdem ein für den jeweiligen UHPC spezifischer und nur von ihm abhängiger Beiwert.

7.4.6 Theoretische spezifische Adhäsion in thermodynamischer Betrachtungsweise

Wie im Kapitel 2.4.2 gezeigt, ist die thermodynamische Interpretation der Adhäsion eine mögliche Betrachtungsweise, um die Größe der spezifischen Adhäsion theoretisch zu bestimmen. Grundlage dafür ist, dass die Oberflächenspannung (OFS), Oberflächenenergie (OFE) und Grenzflächenenergie der Verbundmaterialien bekannt sind. Für den verwendeten UHPC und die Stahl- sowie Glasoberflächen wurden diese Werte, wie in Kapitel 4.1.8 und 4.2.3 beschrieben, bestimmt.

Die folgenden Berechnungen („wetting envelopes“, spezifische Adhäsionskraft) wurden von DI Gerhard Santner im Rahmen des Projektes „AdBond UHPC“ durchgeführt und in einer gemeinsamen Publikation der Arbeitsgruppe ausgearbeitet, vgl. [Santner 2011].

„Wetting envelopes“ der untersuchten Materialien

Die Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen der Oberflächen (siehe Seite 98f) und die Abschätzung der Oberflächenspannung von frischem UHPC (siehe Seite 79f) können mit Hilfe des „wetting envelope“¹⁰⁰ dargestellt werden. Die Bedeutung der wetting envelopes ist, dass jede Flüssigkeit mit einer Oberflächenspannung, die innerhalb einer der Einhüllenden liegt, diese Oberfläche vollständig benetzt. Je weiter außerhalb die Flüssigkeit liegt, desto größer wird ihr Kontaktwinkel mit der Oberfläche. In Abbildung 7.9 sind die wetting envelopes für die relevanten Oberflächen – polierten und in $\text{Ca}(\text{OH})_2$ eingelagerten Stahl (Variante 2: steel-v2)¹⁰¹ und Glas – für Flüssigkeiten, die diese Oberflächen vollständig benetzen (=Kontaktwinkel von 0°) dargestellt. Zusätzlich ist der Bereich der abgeschätzten Oberflächenspannung des frischen UHPC eingezeichnet. Es wird deutlich sichtbar, dass der frische UHPC mit einer OFS von etwa 50 mJ/m^2 die Glasoberfläche vollständig benetzen muss, auch wenn der genaue Wert der OFS nicht bekannt ist. Außerdem wird sichtbar, dass die Benetzung von Stahl immer schlechter ist als jene von Glas, weil der wetting envelope von Stahl ganz von dem des Glases eingeschlossen ist. Der wetting envelope von Stahl in der Variante 1 (siehe Seite 98f), also der nicht passivierten Stahloberfläche, läge jedenfalls auch innerhalb des envelopes von Stahl in der Variante 2.

¹⁰⁰ Der „wetting envelope“ ist frei übersetzt der "Benetzbarkeitsbereich", vgl. [Krüss 2011]. Er ist eine besondere Darstellungsweise der Beziehung zwischen dem Kontaktwinkel und dem polaren und dispersiven Anteil der Oberflächenenergie eines Festkörpers. Mit Hilfe des wetting envelopes lässt sich vorhersagen, ob eine bestimmte Flüssigkeit, deren Oberflächenspannungs-Komponenten bekannt sind, den untersuchten Festkörper vollständig benetzen würde.

¹⁰¹ Durch Einlagerung der Stahloberflächen in einer $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung werden die realen Verhältnisse im alkalischen Milieu des frischen UHPC mit der Stahl-Oberfläche nachgebildet.

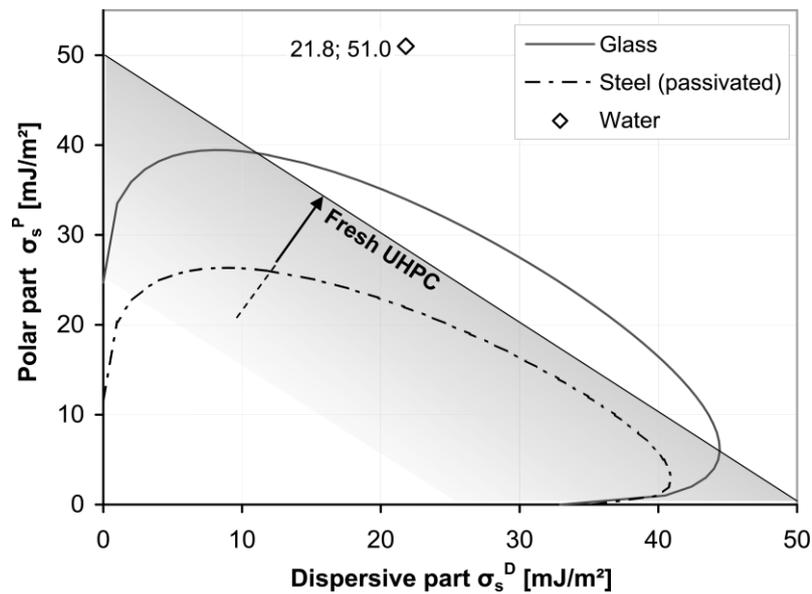


Abbildung 7.9: „wetting envelopes“ der untersuchten Oberflächen mit eingetragenen Bereich der OFS von frischem UHPC und Wasser aus [Santner 2011]

Berechnung der spezifischen Adhäsionskraft (= spezifische Adhäsionsfestigkeit)

Sind die Oberflächenenergien aller beteiligten Materialien mit ihrem polaren und dispersiven Anteil bekannt, dann können die Grenzflächenenergie γ_{12} , ein theoretischer Kontaktwinkel und die spezifische Adhäsionsarbeit W_a berechnet werden, siehe Kapitel 2.4.2. Die Ergebnisse so einer Berechnung für die untersuchten Verbundmaterialien sind in Tabelle 7.7 aufgelistet.

Tabelle 7.7: Grenzflächenenergie, theoretischer Kontaktwinkel und spezifische Adhäsionsarbeit für erhärteten UHPC auf Stahl und Glas

UHPC Variante	Stahl Variante 1			Stahl Variante 2			Glas		
	γ_{12} [mJ/m ²]	θ [°]	W_a [mJ/m ²]	γ_{12} [mJ/m ²]	θ [°]	W_a [mJ/m ²]	γ_{12} [mJ/m ²]	θ [°]	W_a [mJ/m ²]
1	29,8	93,6	61,1	5,11	50,1	107,1	0,49	28,8	122,4
2	29,9	93,5	63,3	4,96	51,5	109,5	0,5	32,1	124,6
3	26,5	90,7	63,3	3,63	47,5	107,4	0,18	26,3	121,6
4	25,5	89,8	63,3	3,23	46,1	106,8	0,12	24,1	120,6
5	29,7	93,5	62,1	4,98	50,6	108,1	0,47	30,2	123,3
MW	28,3	92,2	62,6	4,38	49,2	107,8	0,35	28,3	122,5

Die spezifische Adhäsionskraft¹⁰² bzw. der Grundwert der spezifischen Adhäsion $f_{ad, spez, 0}$, berechnet aus den Mittelwerten der angegebenen spezifischen Adhäsionsarbeit gemäß Gleichung (2.9) mit Gleichung (2.11) und (7.20) auf Seite 259, kann abhängig vom intermolekularen Abstand dargestellt werden (siehe Abbildung 7.10). Für die Werkstoffkombination UHPC-Glas ergibt sich also jedenfalls ein höherer Wert für die spezifische Adhäsion als für UHPC-Stahl in der Variante 1 (vgl. Fußnote 57 auf Seite 99). In der Kombination UHPC-Stahl-Variante 2, die die realen Bedingungen an der Stahloberfläche im Kontakt mit UHPC besser widerspiegelt, ist die berechnete spezifische Adhäsions-Kraft annähernd gleich hoch wie bei UHPC-Glas.

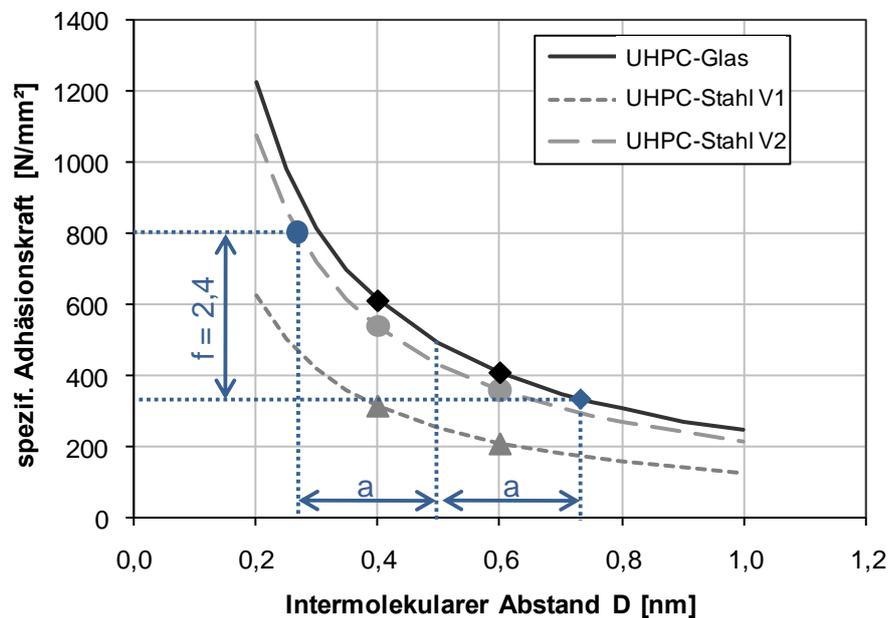


Abbildung 7.10: Grundwert der theoretischen spezifischen Adhäsions-Kraft abhängig vom intermolekularen Abstand, nach [Santner 2011]

Wäre der intermolekulare Abstand genau bekannt, könnten bestimmte Werte für die spezifische Adhäsionskraft angegeben werden. Als typischer Wert für den intermolekularen Gleichgewichtsabstand wird in der Literatur mehrfach 0,5 nm genannt, vgl. [de Bruyne 1939], [Dutschk 2000], [Nardin 1996]. Dass die Adhäsion von UHPC an Glas stärker sei als jene von UHPC an Stahl sollte daraus nicht geschlossen werden, weil nicht ohne weiteres davon ausgegangen werden kann, dass der intermolekulare Abstand für beide Materialkombinationen gleich groß ist. Weil es unmöglich scheint, genaue Werte zu bestimmen, wird in Abbildung 7.10 zunächst abgelesen, welche Werte die Adhäsionskraft annimmt,

¹⁰² Der Begriff spezifische Adhäsionskraft kommt vom in englischer Fachliteratur verwendeten Ausdruck „specific adhesion force“ für die spezifische Adhäsionsfestigkeit – eigentlich eine Spannungsgröße. (Kraft/Fläche), vgl. [Dutschk 2000].

wenn als intermolekularer Abstand 0,4 und 0,6 nm für die betrachteten Verbundpartner angenommen werden. Damit ergibt sich die berechnete spezifische Adhäsionskraft für die realistischere Kombination von UHPC mit Stahl-Variante 2 und einem Abstand von 0,4 nm zu 550 N/mm² und von Glas-UHPC mit einem Abstand von 0,6 nm zu 400 N/mm². Somit wird der Grundwert der spezifischen Adhäsion von Stahl größer als von Glas mit UHPC.

Wird vorausgesetzt, dass das Verhältnis der theoretischen spezifischen Adhäsionsfestigkeiten gleich groß ist wie das Verhältnis der technisch erzielbaren spezifischen Adhäsionsfestigkeiten kann eine Abschätzung für den intermolekularen Abstand und den Materialbeiwert g getroffen werden. Aus den Haftzugprüfungen ergibt sich das Verhältnis der technisch erzielbaren Adhäsionsfestigkeiten

$$f = \frac{f_{ad, spez, Stahl}}{f_{ad, spez, Glas}} = \frac{\bar{\sigma}_{z, SRoEM(MVS)}}{\bar{\sigma}_{z, GRoEM(MVS)}} = \frac{7,8}{3,3} = 2,4 \text{ für UHPC-Stahl und UHPC-Glas.}$$

Es lassen sich nun Werte für die spezifischen Adhäsions-Kräfte von UHPC-Stahl 2 und UHPC-Glas auf den Kurven in Abbildung 7.9 ablesen, die auf der Abszisse gleich weit vom typischen intermolekularen Gleichgewichtsabstand 0,5 nm entfernt sind und im Verhältnis von 2,4:1 zueinander stehen. Die Wertepaare für die spezifische Adhäsionskraft und den intermolekularen Gleichgewichtsabstand sind demnach rund (330 N/mm²; 0,73 nm) für UHPC-Glas und (800 N/mm²; 0,27 nm) für UHPC-Stahl-2. Für den Materialbeiwert g , dem Verhältnis der theoretischen spezifischen Adhäsionsfestigkeit zur technischen spezifischen Adhäsionsfestigkeit, ergibt sich aus 800/7,8 bzw. 330/3,3 ein Faktor von rund 100 für UHPC EM.

Der Unterschied des intermolekularen Gleichgewichtsabstandes kann mit der besseren Benetzung des Glases durch frischen UHPC erklärt werden. Es reicht aus, wenn sich dadurch einige Wassermoleküle, deren mittlerer Durchmesser etwa 0,26 nm beträgt [Wesche 1993], mehr an der Grenzfläche zum Glas anreichern als zum Stahl.

Die an Glasoberflächen vollständige Benetzung, muss wie aus der folgenden Überlegung geschlossen wird, zu einer lokalen Entmischung des UHPC in der Grenzflächenzone führen. Diese Entmischung ist an Glas stärker ist als an Stahl, da dieser weniger gut benetzt wird. In der Grenzflächenschicht sammeln sich flüssige Komponenten – also Wasser und Fließmittel sowie die darin suspendierten sehr feinen Mischungsanteile, vornehmlich Mikrosilika, an – wie in den Untersuchungen der Grenzflächenschicht, die für UHPC-Stahl durchgeführt wurden (siehe Kapitel 6), bestätigt werden konnte. Wasser und Fließmittel werden aufgrund der besseren Benetzung von der Glasoberfläche noch stärker angezogen als von der Stahloberfläche. So ist plausibel, dass auf der Glasoberfläche ein um wenige Moleküle dickerer Flüssigkeitsfilm als auf der Stahloberfläche entsteht. Damit wird auch der intermolekulare Abstand zwischen Molekülen an den im Zuge der Erhärtung wachsenden CSH-Phasen und der Oberfläche im Durchschnitt beim Glas größer sein als beim Stahl. Anders ausgedrückt ist die Kontaktzone von UHPC und Glas aufgrund ihres lokal höheren W/B-Wertes weniger dicht als die Kontaktzone von UHPC und Stahl.

7.4.7 Schlussfolgerungen

Die theoretische Berechnung der spezifischen Adhäsionsfestigkeit von UHPC auf Stahl und Glas auf Basis thermodynamischer Kennwerte ergibt sehr hohe Werte, die stark vom intermolekularen Abstand abhängen. Die berechneten Werte sind für die Kombination UHPC-Glas höher als für die Kombination UHPC-Stahl, wenn derselbe intermolekulare Abstand vorausgesetzt wird. Dieser Unterschied reduziert sich allerdings stark, wenn mit den Oberflächenenergien für im Milieu der Porenlösung eingelagertem Stahl gerechnet wird. Experimentell wurde nur ein Bruchteil der theoretischen Adhäsionsfestigkeit festgestellt. Die an Proben MVS mit glatten Oberflächen experimentell ermittelte technische Adhäsionsfestigkeit der Kombination UHPC-EM-Stahl ist deutlich höher als jene der Kombination UHPC-EM-Glas (Faktor 2,4), was darauf schließen lässt, dass der intermolekulare Abstand bei UHPC-Stahl kleiner ist als bei UHPC-Glas. Mit dem Verhältnis der technischen Adhäsionsfestigkeiten von 2,4 ergeben sich Wertepaare für die spezifische Adhäsionsfestigkeit und dem intermolekularen Gleichgewichtsabstand von (330 N/mm²/ 0,73 nm) für UHPC-Glas und (800 N/mm²/ 0,27 nm) für UHPC-Stahl-Variante 2 (in Ca(OH)₂ eingelagert). Der größere intermolekulare Abstand zwischen den Verbundpartnern in der Kontaktfläche wird mit der durch frischen UHPC besseren Benetzung von Glas als von Stahl erklärt, vgl. auch [Santner 2011].

Eine unterschiedliche Benetzung könnte auch die Erklärung für die geringere Adhäsionsfestigkeit von UHPC DM als von UHPC EM auf glattem Stahl sein. Beim UHPC DM, der eine größere Packungsdichte aufweist als UHPC EM, sollte sich eine Entmischung in der Grenzflächenschicht generell stärker auswirken als beim UHPC EM, der weniger optimiert ist und zudem einen höheren Zementgehalt aufweist. Dass in der Grenzflächenschicht Entmischungen auftreten, wurde auch in den Untersuchungen auf Mikro-Ebene am Festbeton beobachtet, vgl. Kapitel 6.5.

7.5 Anwendung des Versagenskriteriums an rauen Flächen

Das Versagenskriterium gemäß Abbildung 7.8, Seite 245, kann auf Oberflächen angewandt werden, die gegenüber der Belastungsrichtung geneigte Anteile haben, wie beispielsweise die Flanken rauer Oberflächenprofile¹⁰³. Es ergibt sich ein Wert für die normal auf die geometrische Bezugsebene (Horizontale) aufnehmbare Spannung – die Haftzugfestigkeit $\bar{\sigma}_z$ –, der vom Neigungswinkel α , vom Reibungswinkel φ ($\varphi = \arctan \mu_{\text{mikro}}$) und von der technisch erzielbaren spezifischen Adhäsion $f_{ad, \text{spez}}$ abhängt. Das wird in Abbildung 7.11 und den folgenden Erklärungen ersichtlich.

¹⁰³ In jedem Punkt einer Oberfläche kann die Neigung der Tangente an eine Profillinie lokal mit dem Neigungswinkel α gegenüber der (in der Regel horizontalen) geometrischen Bezugsebene angegeben werden.

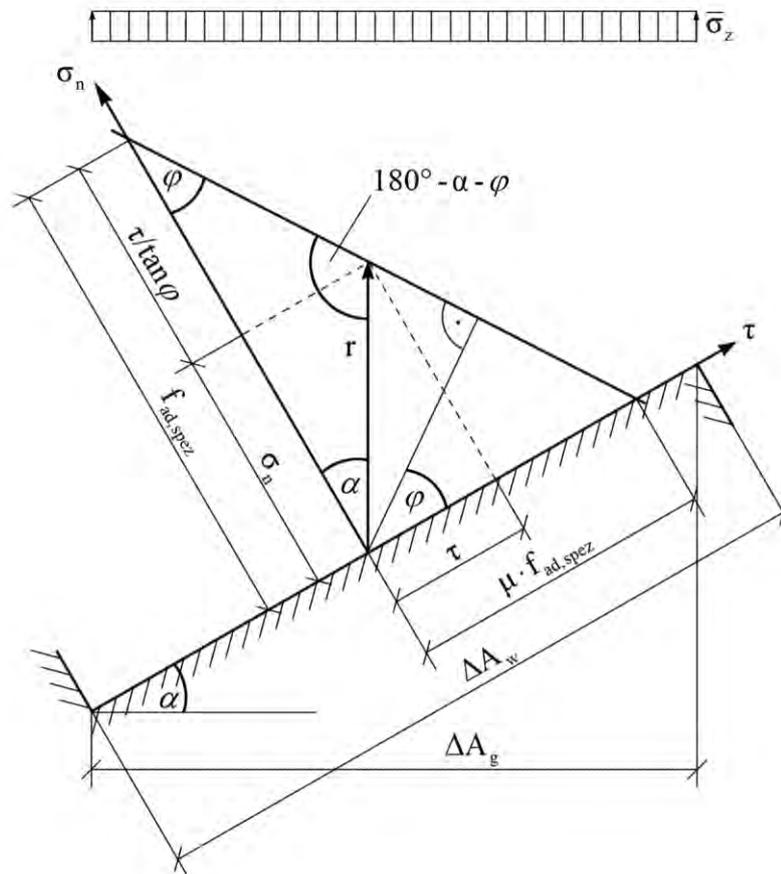


Abbildung 7.11: Versagenskriterium an einer geneigten Flanke einer rauhen Oberfläche

Um eine normal auf die geometrische Fläche wirkende Zugkraft ΔF_z aufzunehmen, muss in der Kontaktfläche ein Widerstand aktiviert werden, der durch die Spannungsergebnante r im Versagenskriterium multipliziert mit der wahren Oberfläche ΔA_w repräsentiert wird.

$$\Delta F_z = r \cdot \Delta A_w \quad (7.17)$$

Da für $\Delta F_z = \bar{\sigma}_z \cdot \Delta A_g$ und für $\Delta A_w = \Delta A_g / \cos \alpha$ eingesetzt werden kann, ergibt sich die erzielbare Haftzugfestigkeit $\bar{\sigma}_z$ zu:

$$\bar{\sigma}_z = \frac{r}{\cos \alpha} \quad (7.18)$$

Aus Abbildung 7.11 wird ersichtlich, dass r in Abhängigkeit der Größen des Versagenskriteriums mit Hilfe des Sinus-Satzes angeschrieben werden kann:

$$r = \sin \varphi \cdot \frac{f_{ad, spez}}{\sin(180 - \alpha - \varphi)} \quad (7.19)$$

Mit Gleichung (7.19) eingesetzt in (7.18) und $\sin(180 - \alpha - \varphi) = \sin(\alpha + \varphi)$ ergibt sich:

$$\bar{\sigma}_z(\alpha) = f_{ad, spez} \cdot \frac{\sin \varphi}{\cos \alpha \cdot \sin(\alpha + \varphi)} \quad (7.20)$$

Der Verlauf der aufnehmbaren Spannung $\bar{\sigma}_z$ abhängig vom Neigungswinkel α der Oberfläche ist in Abbildung 7.12 dargestellt. Die aufnehmbare Spannung nimmt bei einem Flankenneigungswinkel $\alpha = 45^\circ - \varphi/2$ den geringsten Wert an. Folgende Abschnitte des Kurvenverlaufs können unterschieden werden:

- sowohl bei $\alpha = 0^\circ$ als auch bei $\alpha = 90^\circ - \varphi$ ist $\bar{\sigma}_z = f_{ad, spez}$
- für $0 < \alpha < 90^\circ - \varphi$ ist $\bar{\sigma}_z < f_{ad, spez}$
- für $\alpha > 90^\circ - \varphi$ wird $\bar{\sigma}_z > f_{ad, spez}$ und geht für $\alpha = 90^\circ$ gegen unendlich.

Sehr steile Flanken bedeuten also theoretisch die effizienteste Aufrauung. Wird beachtet, dass sich sehr enge Vertiefungen (V-Täler) nicht gut von größeren Körnern ausfüllen lassen, ist eine Kombination aus annähernd horizontalen und vertikalen Abschnitten, sozusagen eine „Säulenstruktur“, am effizientesten.

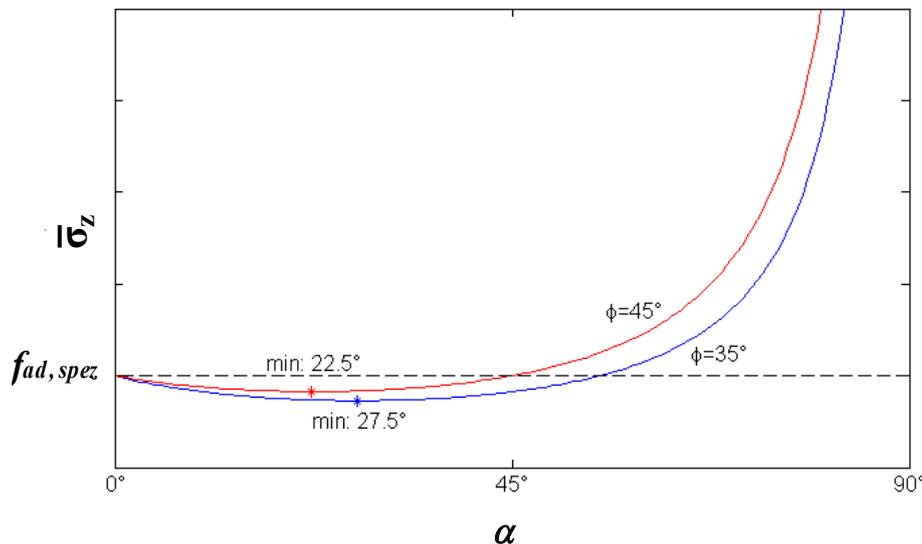


Abbildung 7.12: Aufnehmbare vertikale Spannung an einer geneigten Flanke für zwei verschiedene Reibungswinkel $\varphi = \arctan \mu_{mikro}$ (Stahl: $\varphi = 35^\circ$ /Glas: $\varphi = 45^\circ$)

Bei rauen Oberflächen mit Flanken einer „zu flachen“ Neigung im Bereich von $0^\circ < \alpha < 90^\circ - \varphi$ kompensiert die Oberflächenvergrößerung die Verringerung der aufnehmbaren Spannung gegenüber einer horizontalen Fläche ($\bar{\sigma}_z = f_{ad,spez}$) nicht.

Aufgrund des gegenüber Stahl entgegen der Erwartung größeren Verhältniswertes $\mu_{mikro,Glas} = \tan \varphi = 1$ zwischen Glas und UHPC ergibt sich bei Glas eine höhere Effizienz durch Aufrauen. Je größer μ_{mikro} und damit φ , desto kleiner wird der Bereich der ungünstigen Flankenneigung $\alpha < 90^\circ - \varphi$.

Werden eingeprägte Zwangsspannungen τ_e und $\sigma_{n,e}$ in der Fuge aus gegebenenfalls vorhandenem behinderten Schwinden, die im lokalen Koordinatensystem der geneigten Flanke wirken, berücksichtigt, kann nur mehr eine verringerte Resultante $r = \Delta F_z / \Delta A_w$ der Zugkraft normal auf die Bezugsfläche aufgenommen werden. Die aufnehmbare Haftzugspannung $\bar{\sigma}_z$ an einer Flanke (vgl. Gleichung (7.20)) wird zu:

$$\bar{\sigma}_{z(\alpha)} = (f_{ad,spez} - \frac{\tau_e}{\tan \varphi} - \sigma_{n,e}) \cdot \frac{\sin \varphi}{\cos \alpha \cdot \sin(\alpha + \varphi)} \quad (7.21)$$

Die aufnehmbare Zugkraft normal auf die Bezugsfläche einer rauen Oberfläche (und damit die Spannung), die aus einer Vielzahl von Teilflächen mit Flanken unterschiedlicher Neigungen besteht, ergibt sich durch geeignete Summierung (Integration) der an einzelnen Flanken aufnehmbaren Anteile ($\Delta F_z = r \cdot A_w$) über die Gesamtfläche. Da die Adhäsion von UHPC auf rauen Stahl- und Glasflächen von weiteren Faktoren abhängt, sei an dieser Stelle auf Kapitel 8.9 und den Ausblick 9.2.2 verwiesen.

8 Zusammenfassung der Ergebnisse

Ein umfangreiches Untersuchungsprogramm¹⁰⁴ wurde ausgeführt, um die Adhäsion von Ultra-Hochleistungs-Feinkornbeton an Stahl und Glas unterschiedlicher Rauheit systematisch zu studieren. Durch die Beobachtungen, Berechnungen und theoretischen Überlegungen konnten die für die Adhäsion maßgebenden Einflussgrößen identifiziert werden. Darüber hinaus wird ein einfaches Modell vorgeschlagen, mit dem sich die an glatten Oberflächen aufnehmbare Haftfestigkeit mit einem eingeführten Versagenskriterium und einigen Parametern berechnen lässt. Auch die Wirksamkeit von aufgerauten Oberflächen für den Verbund kann mit diesem Ansatz aus physikalischer und geometrischer Sicht erklärt werden.

Die Ergebnisse der Arbeit werden im Folgenden kurz beschrieben. Die Aspekte der Adhäsion werden dabei chronologisch vom Aufbringen des frischen UHPC auf eine Oberfläche bis zu seinem Alter von mindestens 28 Tagen aufgezählt.

8.1 Benetzung, wirksame Fläche und Grenzflächenschicht

Die Benetzung sorgt für ausreichende Nähe zwischen dem anfangs fließfähigen UHPC und der festen Phase, so dass sich zwischenmolekulare Anziehungskräfte ausbilden können. Für die Qualität des Benetzungsvorganges sind Benetzungseigenschaften des Adhäsivs (UHPC) sowie Oberflächeneigenschaften des Adhärens (Stahl, Glas) verantwortlich. Durch die Benetzung werden zwei Faktoren der Adhäsion bestimmt: Die Frischbetonhaftung und die wirksame Fläche¹⁰⁵, also die tatsächliche Kontaktfläche von UHPC und einer Oberfläche bestimmter Rauheit. Die Haftung des noch flüssigen bis plastischen UHPC hängt von seiner Oberflächenspannung ab. Wie sich zeigt, können die für Flüssigkeiten bekannten Methoden der Oberflächenspannungsmessung nicht auf die viskose Suspension UHPC angewandt werden. Eine Eingrenzung der Oberflächenspannung von frischem UHPC auf rund 50 mJ/m² gelingt mit Hilfe von Kapillarsteigversuchen und Literaturangaben.

Mittels Ausbreitfließversuchen auf verschiedenen Oberflächen wird gezeigt, dass UHPC Glas besser benetzt als Stahl. Dasselbe Ergebnis wird gefunden, wenn die aus Kontaktwinkelmessungen bestimmten „wetting envelopes“ von Stahl und Glas aufgetragen

¹⁰⁴ Das Programm ist in Tabelle 1.1 auf Seite 17 dargestellt.

¹⁰⁵ Die geometrische, wahre und wirksame Oberfläche sind in Abbildung 2.11 auf Seite 47 dargestellt.

werden. Es wird deutlich sichtbar, dass der frische UHPC die Glasoberfläche vollständig benetzt.

In einfachen Haftzugversuchen von frischem UHPC zwischen Stahlplatten zeigt sich, dass die Adhäsion größer ist als die Kohäsion. Das bedeutet in Hinblick auf Schwindverformungen, dass sie im frühen noch plastischen Zustand zu einer Relativverschiebung von UHPC-Schichten im Inneren gegenüber der an der Grenzfläche haftenden Schicht führen müssen und potentiell eine Schwächung dieser Zone bedeuten. Wie an anderer Stelle noch ausgeführt wird, konnte eine derartige Schwächung in den weiteren Beobachtungen und Versuchen nicht durchgängig bestätigt werden.

Die wirksame Fläche der Adhäsion wurde mittels Elektronenmikroskopie an speziellen Verbundproben untersucht. Wichtig erschien, von der Präparation möglichst unbeeinflusste Querschnitte durch die Verbundfläche betrachten zu können. Durch die Analysen wird eine der aufgestellten Hypothesen – *„es existiert ein bestimmter Grad der Rauheit, eine Grenzwellenlänge, die von einem bestimmten UHPC gerade noch benetzt werden kann“* – widerlegt. Die in der Arbeit verwendeten UHPC mit zwei verschiedenen Konsistenzen – sehr fließfähig und wenig fließfähig – füllen alle Vertiefungen der rauen Oberflächen vollständig aus, im weiteren Sinne der Wortbedeutung „benetzen“ sie die Oberflächen vollständig. Die benetzte Fläche entspricht also der wahren Oberfläche. Die Hypothese wurde damit allerdings nur für die untersuchten Materialien widerlegt. Sie wurde noch unter der Annahme aufgestellt, dass sandgestrahlter Stahl eine raue Oberfläche mit fraktalem Charakter aufweist, was sich im Elektronenmikroskop als nicht richtig herausstellte. Vielmehr finden sich keine feineren Vertiefungen kleiner als etwa $0,5 \mu\text{m}$ und damit keine entsprechend kleine Grenzwellenlänge.

In den mikroskopischen und elektronenmikroskopischen Untersuchungen der Verbundproben wird auch deutlich sichtbar, dass die feinen Vertiefungen rauer Oberflächen nicht von allen Bestandteilen des UHPC ausgefüllt werden können. Weder Quarzkörner noch unhydratisierte Klinkerkörner erreichen die Grenzfläche. Luftporen nahe der Grenzfläche werden meist von UHPC-Matrix umschlossen. Ein an Feinstteilen reiches, gut benetzendes Gemisch sammelt sich an der Grenzfläche an und kann vollständig zu Bindemittelstein hydratisieren. Es hat, wie sich später an den untersuchten Bruchflächen zeigt, die Oberfläche perfekt abgeformt. Es existiert also eine Grenzflächenschicht, in der der UHPC nicht wie in seinem „ungestörten“ Inneren zusammengesetzt ist. Es kommt an der Grenzfläche durch die Geometrie und die Benetzung zu einer Entmischung im Frischbeton mit lokal erhöhtem W/B-Wert und einer Zusammensetzung ohne unhydratisierte Klinkerkörner und Quarzkörner. In einigen sehr feinen Vertiefungen werden sogar unreaktierte Mikrosilika-Körner aufgefunden.

Die Bruchflächen von glatten Verbundproben, die bei Haftzug-Prüfungen durch ein Versagen in der Fuge entstehen, weisen auch darauf hin, dass eine Grenzflächenschicht vorhanden ist. Sie kommt durch die geringere Packungsdichte des Ausgangsgemisches an einer ebenen Grenzfläche – vergleichbar mit dem so genannten „wall effect“ an der Über-

gangszone zwischen Gesteinskorn und Zementstein – zustande. An Bruchfläche der Proben SR0DM-OVS¹⁰⁶ zeigt sich eine dichte und stark ausgeprägte Schicht anhaftenden Bindemittelsteins, die an Rissen zusätzlich „verschmiert“ aussieht. An Proben der Vergleichsmischung UHPC EM fällt die Schicht etwas weniger stark aus und ist auch an Rissen unscheinbar. Das führt zu dem Schluss, dass UHPC DM in der Grenzflächenschicht inhomogener, weniger dicht gepackt und weniger fest ist als UHPC EM. Bei der Mischung UHPC EM, deren Korngemisch an sich schon weniger dicht gepackt ist als das der Mischung UHPC DM, wirkt sich die Störung der optimalen Kornpackung an der Grenzfläche offensichtlich weniger stark aus. Außerdem wird angenommen, dass bei der Mischung EM die Fehlstellen in der Kornpackung an der Grenzfläche besser mit Hydratationsprodukten überbrückt werden als bei der Mischung DM, da sie einen höheren Bindemittelgehalt aufweist.

Aus rein geometrischen Überlegungen muss die Störung der optimalen Zusammensetzung bzw. der Packungsdichte des UHPC an rauen Oberflächen geringer ausfallen als an glatten Oberflächen. Der visuelle Vergleich von Bruchflächen, die bei Haftzug-Prüfungen durch ein Versagen in der Verbundfuge der Proben entstehen, bestätigt diese Annahme. An Proben der UHPC-Mischung DM im Verbund mit glatten, fein-rauen sowie grob-rauen und zusätzlich fein sandgestrahlten Stahl-Oberflächen wurde festgestellt, dass die Störung der Grenzflächenschicht bei der stärksten Rauheit SR5, deren Rauheitsabstufung am besten zur Korngrößenverteilung des UHPC passt, offensichtlich am geringsten ausfällt. Der Bruch tritt dort im Gegensatz zu den anderen Rauheiten (glatt und fein-rau) nicht mehr in der Fuge, sondern zum Großteil im Beton auf. Damit lässt sich die aufgestellte Hypothese – *„wenn die Rauheitsabstufung der Oberfläche mit der Korngrößenverteilung des UHPC korrespondiert, wird optimale Haftung erzielt“* – im Grunde bestätigen. Beim UHPC der Mischung EM löst sich der Verbund allerdings in der Regel auch bei fein rauen Proben nicht in der Fuge. Der Bruch tritt vorwiegend im Beton auf. Die in diesem Fall stärkere Adhäsionsfestigkeit wird auf die Unterschiede in der Mischungszusammensetzung zwischen UHPC EM und UHPC DM zurückgeführt.

8.2 Verformungsverhalten und Zwangsspannungsentwicklung während der Erhärtung des UHPC

Bereits wenige Stunden nach der Wasserzugabe beginnt sich der UHPC autogen und durch Austrocknung zu verformen. Deshalb wurden Schwindmessungen mit einer Schwindrinne spätestens 4 Stunden nach der Wasserzugabe begonnen. Im Zuge der Schwindmessungen wurde die Erstarrungszeit t_0 als Zeitpunkt der maximalen Verformungsgeschwindigkeit bestimmt. Außerdem kann am gemessenen Verlauf der Betontem-

¹⁰⁶ Proben SR0DM sind Stahlproben der Rauheit R0 (glatt poliert) im Verbund mit UHPC der Mischung DM, die während der Erhärtung ohne Verdunstungsschutz gelagert wurden (OVS). Die Bedeutung der Abkürzungen aller Werkstoff-Rauheitskombinationen ist in Tabelle 5.1 auf Seite 100 erläutert.

peratur auf der Höhepunkt der chemischen Reaktion des Zementes mit dem Wasser abgelesen werden. Er stellt sich bei UHPC EM rund 18 Stunden nach Wasserzugabe ein.

Das Schwinden ist, wie für die feinkörnige UHPC Mischung zu erwarten war, in den ersten Stunden hoch, um nach Erreichen des Betontemperaturmaximums abrupt langsamer zu werden. Das Schwinden ist an Proben, die von Beginn an – quasi als Untersuchungs-Grenzfall – ohne einen Verdunstungsschutz (OVS) gelagert werden, um das 2,3-fache größer als das Schwinden an Proben mit Verdunstungsschutz (MVS). Das Schwinden MVS entspricht dem autogenen Schwinden. Durch die ungewöhnliche Lagerung ohne Verdunstungsschutz trocknet der Beton von Beginn an sehr rasch oberflächlich aus, wobei ein enormes plastisches Schwinden mit der Tendenz zur Bildung von Früh-Schwindrissen auftritt. Die beiden Lagerungsarten entsprechen den Bedingungen, unter welchen die Haftzug- und Haftschiebeprobekörper gelagert wurden, um den Einfluss der Rissbildung auf die Haftfestigkeit zu studieren.

Risse wurden in parallelen mikroskopischen Untersuchungen der Glas-UHPC- Grenzfläche bereits nach 4 bis 7 Stunden nach der Wasserzugabe entdeckt. Der Zeitpunkt entspricht der Erstarrungszeit der beiden Mischungen OVS. Es zeigt, dass maßgebliche Zwangsspannungen zu einem kritischen Zeitpunkt der Festigkeitsentwicklung auftreten. Das Schwinden wird an der Grenzfläche durch den Verbund behindert und verursacht so innere Spannungen im UHPC und in der der Kontaktfläche. Auch im hohen Alter von 221 Tagen entstehen noch Risse an Haftzugproben, die einer zusätzlichen Trocknung bei 105°C ausgesetzt werden. Der Beton MVS schwindet in den ersten 6-8 Stunden nicht. Er zeigt insgesamt wesentlich geringere Schwindmaße und daher treten bis zur Prüfung am 28. Tag keine Risse auf.

8.3 Rissbildung und Rissmuster

An Haftzugproben¹⁰⁷ OVS wird ein Rissmuster beobachtet, dass sich mit den in den UHPC-Schichten auftretenden Zwangsspannungen durch behindertes Schwinden gut erklären lässt. FEM-Berechnungen¹⁰⁸ zeigen, dass Verbundschubspannungen und vertikale Spannungen in der Verbundfuge vom Rand der kreiszylindrischen Schichten ausgehend die Zwangsspannungen im Inneren einleiten. Die Spannungsverteilung hängt vom Verhältnis Durchmesser zu Dicke, d/t_c , der Schicht ab. Die Einleitungslänge hängt von der Dicke der Schicht ab und beträgt bei starrem Verbund etwa $5 \cdot t_c$. In einem zentralen Feld, dessen Ausmaß wiederum vom d/t_c -Verhältnis der UHPC-Schicht abhängig ist, entsteht bei $d/t_c > 10/1$ ein Zwangs-Spannungszustand von horizontalen Spannungen, die in allen Richtungen gleich groß sind. Die Verbundfuge selbst ist in diesem Feld spannungslos. Im um-

¹⁰⁷ In Abbildung 5.1 auf Seite 102 ist der Probekörperaufbau schematisch dargestellt. Bruch- und Rissbilder sind in Kapitel 5.3 ab Seite 137 ausführlich beschrieben.

¹⁰⁸ Die FEM -Berechnungen sind in Kapitel 5.4 beschrieben.

gebenden Ring sind die Umfangsspannungen größer als die radialen Spannungen, der äußere Rand ist von Zwangsspannungen frei („Ringzugspannungen“ wie die FEM-Berechnungen zeigen). Bei Überschreiten der Zugfestigkeit zu einem bestimmten Zeitpunkt der Erhärtung und entsprechend gutem Verbund, sodass sich die vollen Zwangsspannungen aufbauen können, kommt es im zentralen Feld zur Bildung polygonaler Rissfelder und im umgebenden Ring bilden sich radiale Risse aus. Ein äußerster Ring bleibt von Rissen frei.

Jeder Riss stellt eine Fehlstelle und Kerbstelle dar. Erstens finden, wenn der Verbund unwirksam ist, durch das Schwinden Relativbewegungen zwischen Beton und Untergrund statt. Zweitens ist jeder Riss bei wirksamem Verbund ein neuer freier Rand, von dem aus die Verbundschubspannungen und Normalspannungen in der Fuge die Zwangsspannungen in die UHPC-Schicht einleiten. Die Fuge wird dadurch zusätzlich beansprucht. Es zeigt sich eine hohe Korrelation zwischen der gesamten Risslänge und der geprüften Haftzugfestigkeit an glatten Proben. Die Risslänge ist also ein maßgeblicher Wert, der die gestörte und die durch Zwangsspannungen vorbelastete Verbundfläche kennzeichnet.

Die Risslänge hängt von den Rissabständen und der Riss-Anordnung in einer UHPC-Schicht ab. In einer homogenen Schicht in einem homogenen Spannungsfeld entsteht theoretisch ein Rissmuster aus lauter hexagonalen Feldern. Vorausgesetzt ist, dass das Schwinden in der UHPC-Schicht durch eine flächenhafte Verformungsbehinderung, quasi eine kontinuierliche Lagerung, zu Spannungen führt, die die Zugfestigkeit überschreiten. Die hexagonale Form ergibt sich aus der Forderung nach einer minimalen Rissfläche bei maximalem eingeschlossenem UHPC-Volumen. Sie entsteht, wenn alle Risse gleichzeitig auftreten, während orthogonal aufeinander ausgerichtete Risse entstehen, wenn die Bedingungen nicht homogen sind. Ob Risse gleichzeitig oder in mehreren Schritten nacheinander entstehen, hängt vom Verhalten während der frühen Phasen der Erhärtung ab, sowie von der Homogenität der Mischung und der relativen Luftfeuchte (Umgebungsbedingungen).

Die Entstehung von Rissen wird wie beschrieben bereits in der frühen Phase der Erhärtung, nach 4 bis 7 Stunden, beobachtet. Nach 21 Stunden sieht man an Glas-UHPC-Glas Sandwich-Proben bereits das vollständige Rissbild, das sich im weiteren Erhärtungsverlauf unter den standardisierten Laborbedingungen nicht mehr ändert. Ein gewisser Schlupf durch die Rissbildung in der Verbundfläche in dieser frühen Phase reduziert die Haftzugfestigkeit entgegen der ursprünglichen Annahme nicht. Das wurde an Haftzug-Proben, die mit verschiedenem Prüfalter geprüft und im Vergleich OVS und MVS gelagert wurden, festgestellt. Obwohl die Proben OVS Risse zeigen und die Proben MVS rissfrei sind, ergibt sich bis zu einem Alter von 7 Tagen kein signifikanter Unterschied der Prüffestigkeiten. Erst ab einem Prüfalter von 28 Tagen zeigen Proben MVS immer größere Haftzugfestigkeiten als OVS.

Die Rissmuster, Rissabstände und Rissbreiten wurden für die verschiedenen Werkstoff- und Rauheitskombinationen an den Bruchflächen gemessen und dokumentiert. Für die theoretische Berechnung der Rissabstände von UHPC-Schichten mit einem umfassenden Modell ist es erforderlich, zeitabhängige Materialkennwerte des UHPC und den Anteil der bei

der Rissbildung frei gesetzten elastischen Energie abhängig von den Verbundeigenschaften zu kennen. Alle diese Werte sind schwer zu bestimmen. Es wurden Hauptfaktoren für den Rissabstand identifiziert, die eine Abschätzung der Grenzen, in denen die Rissabstände liegen, theoretisch möglich machen:

- Für starren Verbund liegt der Rissabstand zwischen einfacher und doppelter Einleitungslänge für horizontale Zwangsspannungen. Im Zentrum des Rissfeldes ist dann gerade die Zugfestigkeit des UHPC erreicht. Es gilt analog, was für die Berechnung der Rissabstände bei abgeschlossener Rissbildung von bewehrtem Stahlbeton bekannt ist, vgl. [Leutbecher 2007]. Die Einleitungslänge l_e wurde vereinfacht für ein kreisrundes Rissfeld berechnet und beträgt etwa $5 \cdot t_c$, ist also von der Schichtdicke abhängig. Das bedeutet, die Rissfelder haben ein Verhältnis von $d/t_c > 5/1$ bis $10/1$ (mit Durchmesser $d \approx$ Rissabstand). Bei den rauhen Stahlproben mit UHPC EM lassen sich entsprechende Rissabstände auch beobachten ($t_c = 2,5$ mm, $d \approx$ Rissabstand = 11-21 mm), bei ihnen herrscht demzufolge annähernd ein starrer Verbund.
- Die Schubverbund-Bedingungen in der Grenzfläche an allen anderen Proben verursachen engere Rissabstände. Es herrscht kein völlig starrer Verbund. Bei Durchmessern d des Rissfeldes von weniger als $5 \cdot t_c$ überschneiden sich die gegenüber liegenden Lasteinleitungslängen und es wird nicht mehr die volle Zwangsspannung aufgebaut. Die Zugfestigkeit ist also auch kein Berechnungskriterium für die Rissabstände mehr. Mit Hilfe von Energiebetrachtungen kann aber ein unterer Grenzwert des Rissabstandes berechnet werden. Dafür muss die Voraussetzung erfüllt sein, dass sich die elastische Verzerrungsenergie, die durch die behinderte Schwindverformung gespeichert wird, vollständig in die Energie zur Bildung neuer Riss-Oberflächen umwandelt (vgl. [Bažant 1992]). Die an Proben beobachteten Rissabstände sind größer als die mit diesem Ansatz errechneten. Daraus folgt, dass dieser Fall nur für sehr schlechten (geringen) Verbund zutrifft während sich mit zunehmender Qualität des Schubverbundes der Anteil an elastischer Verzerrungsenergie, der bei Rissbildung nicht freigesetzt wird, vergrößert. Zum Beispiel haben raue Flächen jedenfalls einen größeren Scherwiderstand als glatte Flächen und weisen folglich größere Rissabstände auf als die glatten. Das kann in der Rissabstandsberechnung durch einen Reduktionsfaktor f_{red} für die elastische Verzerrungsenergie berücksichtigt werden, dessen Bestimmung – er liegt zwischen 0 und 1 – nicht abgeschlossen ist. Die Qualität des Schubverbundes bzw. die Scherfestigkeit in der Grenzflächenschicht ist im Rahmen dieser Arbeit nicht ermittelt worden. Es wurde aber beobachtet, dass die Rissabstände mit dem Ausbreitdurchmesser von UHPC auf der jeweiligen Oberfläche korrelieren.

8.4 Bruchflächen und deren Mikro-Struktur

Das Versagen bei Haftzug- und Haftschubprüfungen an Verbundproben mit glatten Oberflächen zeigt sich in drei verschiedenen Formen:

1. Unmittelbar in der Kontaktfläche abgelöste, vollkommen glatte und blanke Oberflächen entstehen, wenn Schub die Grenzfläche beansprucht. Das ist an den Bruchflächen der Torsionsschubproben zu sehen.
2. Eine dünne Schicht von Bindemittelstein haftet an der Stahl- oder Glasfläche an, wenn der Bruch aufgrund einer Zugbeanspruchung eintritt. Dies lässt sich an den Bruchflächen der Haftzugproben ablesen, an denen das Versagen in der Fuge auftritt. Der UHPC bricht sozusagen in der Grenzflächenschicht. Die Dichte und Dicke des Anhaftenden variiert abhängig vom Untergrund und der UHPC-Mischung.
3. Versagen im Beton, Betonbruch unter Zugbeanspruchung.

An rauen Proben werden in vielen Fällen Betonbruch oder Mischformen festgestellt. An Rissen sind auch die Bruchform 2 und punktweise die Form 1 zu beobachten.

Lichtmikroskopische Untersuchungen zeigen ein regelmäßiges Muster mit kreisförmigen Ausnehmungen im anhaftenden Bindemittelstein bis zum blanken Untergrund an glatten Oberflächen („Punktmuster“). Die Ausnehmungen entsprechen korrespondierenden erhabenen Bereichen auf der UHPC-Oberfläche, die unmittelbar in der Kontaktfläche abgelöst sind. Im Zentrum der Ausnehmungen zeigen sich im Elektronenmikroskop schlierenartige Materialeinschlüsse am Untergrund, die als Calciumhydroxid identifiziert werden können. Im UHPC-Inneren setzt sich die reichlich vorhandene Mikrosilika (SiO_2) mit dem Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) zu sekundärem Dicalciumsilikat (C-S-H) um. In der Grenzfläche geschieht das offensichtlich nur unvollständig¹⁰⁹.

Die Durchmesser der Ausnehmungen betragen 100 bis 180 μm bei der Mischung EM und 150 bis 270 μm bei UHPC DM, unabhängig vom Material des Untergrundes. Die genaue Ursache für das Muster konnte nicht gefunden werden. Es steht jedoch fest, dass es mischungsabhängig ist und beim Bruch durch Zugbeanspruchung entsteht. Sehr wahrscheinlich steht es mit dem Zementgehalt in Zusammenhang.

Es soll hier noch einmal besonders darauf hingewiesen werden, dass sich das Haftzugversagen und das Haftschiebversagen mikroskopisch in der Bruchfläche unterschiedlich niederschlagen. Beim Haftschiebversagen findet eine glatte Ablösung unmittelbar in der Kontaktfläche ohne im Lichtmikroskop erkennbar Anhaftendes statt (Form 1). Beim Haftzugversagen kommt es zum Kohäsionsbruch in der Grenzflächenschicht im UHPC, sodass Bindemittelstein mit charakteristischem Punktmuster anhaften bleibt (Form 2).

¹⁰⁹ Das weist darauf hin, dass lokal zu wenig SiO_2 mit dem $\text{Ca}(\text{OH})_2$, das im Zuge der Zementhydratation aus dem freigewordenen CaO (Calciumoxid) entsteht, in Kontakt kommt. Es ist also lokal zu wenig Wasser als Lösungs- und Transportmittel vorhanden. Es ist anzunehmen, dass es bei der Zementhydratation bereits verbraucht worden ist. Da $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dabei nicht in der Form großer Portlandit-Kristalle vorliegt, muss davon ausgegangen werden, dass es mikrokristallin auftritt.

8.5 Prüfung der Haftzug- und Haftschiebungsfestigkeit

Zum Vergleich der Haftzug- und Haftschiebungsfestigkeiten unterschiedlicher Werkstoff-Rauheits-Kombinationen unter unterschiedlichen Lagerungsbedingungen wurden kreiszylindrische, symmetrische Sandwich-Proben mit zwei gleichartigen Verbundfugen angefertigt¹¹⁰. Mit einem speziellen Aufbau wurden die massiven, hohen Stahl- bzw. Glasprobekörperteile mit einer dazwischen liegenden, dünnen UHPC-Schicht in horizontaler Position für einige Zeit vor dem Erstarrungsbeginn in Position gehalten. Die Fixierung des oberen Probekörperteils wurde am Beginn der Erstarrung (rund 4 Stunden nach Wasserzugabe) gelöst, sodass Schwinden in der Dickenrichtung unbehindert stattfinden konnte.

Mit den Stahlteilen, die ein Verhältnis von Höhe zu Durchmesser von 1:1 haben, kann für eine gleichmäßige Spannungsverteilung in den beiden Verbundfugen gesorgt werden. Durch die geringe Schichtdicke des UHPC wird der Einfluss der Zwangsspannungen im Fall MVS gelagerter Proben minimiert. Es stellt sich heraus, dass bei den Versuchen beide Verbundfugen etwa gleich häufig versagen, also als gleichartig angesehen werden können.

Die Haftung von UHPC auf glatten Werkstoffoberflächen unter Zugbeanspruchung im Prüfalter von 28 Tagen ist größer als erwartet, wenn die Proben mit Verdunstungsschutz gelagert werden. Zum Teil wird sogar Betonbruch erreicht. Stahl zeigt mit UHPC EM mehr als die doppelte Prüffestigkeit von Glas. Mit UHPC DM ist die Festigkeit auf glatter Stahlfläche wesentlich geringer als mit UHPC EM. Da sich die UHPC-Schicht unter dem Einfluss des Schwindens vom Rand ausgehend in einem äußeren Ring der kreisförmigen Kontaktfläche schon vor der Haftzugprüfung ablöst, wird als Fläche, in der Haftung an glatten Proben wirkt, eine um den abgelösten Ring reduzierte Fläche für die Berechnung der tatsächlichen Haftfestigkeit herangezogen. Die so ermittelten Werte entsprechen annähernd der technisch erzielbaren, spezifischen Adhäsionsfestigkeit $f_{ad, spez}$ der jeweiligen Werkstoffkombination. Sie beträgt für UHPC-EM/Stahl 7,8 N/mm², für UHPC-EM/Glas 3,3 N/mm² und für UHPC-DM/Stahl 3,1 N/mm². Wird kein Verdunstungsschutz verwendet, reduzieren die schwindinduzierten Risse wie oben beschrieben die Festigkeiten. Diese reduzierten Festigkeiten betragen dann für UHPC-EM/Stahl 5,0 N/mm², für UHPC-EM/Glas 2,2 N/mm² und für UHPC-DM/Stahl 1,6 N/mm².

Die Prüfung von glatten Proben unter Torsionsbeanspruchung ergibt die spezifische Adhäsionsfestigkeit tangential zur Oberfläche. Sie wurde für UHPC-EM/Stahl mit 5,3 N/mm² und für UHPC-EM/Glas mit 3,5 N/mm² ermittelt. Das Verhältnis der Adhäsionsfestigkeit $\tau_{ad, spez}$ unter Schubbeanspruchung und $f_{ad, spez}$ unter Zugbeanspruchung beträgt für glatten Stahl somit $\mu_{mikro, Stahl} = 0,7$ und für glattes Glas $\mu_{mikro, Glas} = 1$. Es kann wie ein Reibungsbeiwert auf mikroskopischer Ebene verstanden werden. Intermolekulare Wechselwirkungen (van der Waals-Kräfte elektrostatischer Natur), die für die Adhäsion

¹¹⁰ In Abbildung 5.1 auf Seite 102 ist der Probekörperaufbau schematisch dargestellt, Abbildung 5.3 auf Seite 106 zeigt den Herstellungsablauf der Verbundproben.

on verantwortlich sind¹¹¹, wirken normal auf die Oberflächen der aneinander haftenden Phasen und sorgen für eine permanent aktiv wirkende Kraft vergleichbar mit der Normalkraft der klassischen Reibung. Für Stahl stimmt der ermittelte Reibbeiwert $\mu_{mikro,Stahl}$ mit dem makroskopischen überein¹¹², für glattes Glas und UHPC muss der makroskopische Beiwert noch ermittelt werden. Mit dem Verhältnis μ_{mikro} zwischen spezifischer Adhäsion unter Schub- und Zugbeanspruchung kann ein Mohr-Coulomb Versagenskriterium eingeführt werden: $\tau = \mu(f_{ad,spez} - \sigma_z)$ ¹¹³. Das wird im noch folgenden Abschnitt 8.8 weiter ausgeführt.

Durch Aufrauen mittels Sandstrahlen¹¹⁴ werden die Haftfestigkeiten aller untersuchten Stahl- und Glasproben MVS so stark gesteigert, dass die Betonzugfestigkeit erreicht wird. Sie begrenzt also die Prüfwerte. Die Adhäsionsfestigkeit ist damit an den rauen Proben MVS in der Regel größer als die Zugfestigkeit des UHPC.

8.6 Beständigkeit der Verbindung und Haftungsentwicklung

Um die Beständigkeit der Verbindung zu testen, wurden orientierende Versuche an einzelnen Proben gemacht. Erstens wurden Stahl-Probekörperteile der Werkstoffkombination SRXDM (raue Stahlproben in Kombination mit UHPC DM), an welchen die UHPC-Schicht nach der ersten Haftzugprüfung an Sandwich-Proben noch vollständig anhaftete, neuerlich auf ihre Haftzugfestigkeit geprüft. Es wurden Stahlstempel auf die Bruchflächen der UHPC-Schichten geklebt, damit sie bzw. die noch intakten Verbundfugen neuerlich belastet werden konnten. In der neuerlich belasteten, zweiten Verbundfuge der Proben mit der größeren Rauheit (SR5) wird wieder annähernd die Zugfestigkeit erreicht, bei den feineren Rauheiten (SR1, SR2) sind es etwa 68% der ursprünglichen Prüffestigkeiten. Es zeigt sich, dass durch einseitig austrocknende Lagerung sekundäre Risse auftreten, die bei den feineren Rauheiten die Prüffestigkeiten durch die erhöhten Zwänge stärker reduzieren als bei der größeren Rauheit.

Darüber hinaus wurde die Haftungsentwicklung in einer Serie von Proben in mehreren Prüfaltern getestet (1d, 2d, 7d, 28d, 141d, 226d). Die Prüffestigkeit nimmt bis zum 7. bzw. 28. Tag zu, um dann an den Proben OVS bis zum Alter von 141 Tagen leicht abzunehmen. Die Ergebnisse der 226d alten Probe OVS werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

¹¹¹ Zum maßgebenden Haftmechanismus siehe auch das noch folgende Kapitel 8.7.

¹¹² Reibung polierter Stahl-UHPC, geprüft am Labor für konstruktiven Ingenieurbau, TU Graz.

¹¹³ Eine grafische Darstellung dazu findet sich in Abbildung 7.8 auf Seite 243.

¹¹⁴ Die Methoden zur Erzeugung der verschiedenen Rauheiten und die gemessenen Oberflächenkenngrößen sind in Kapitel 4.2 beschrieben.

8.7 Die Rolle von physikalisch gebundenem Wasser in der Grenzfläche und maßgebender Haftmechanismus

Aufgrund der eigenen Beobachtungen und der im Stand des Wissens dargelegten Funktion von Wasser als Flüssigkeitsbrücke, schien es erforderlich, die Rolle von physikalisch gebundenem Wasser in der Grenzfläche zu untersuchen. Die Bruchfläche verläuft nach der Haftzugprüfung bei den Proben mit glatten Oberflächen des Adhärens in der Regel in einer der beiden Fugen. Die auf dem Probekörperteil verbleibende UHPC-Schicht haftet noch fest an. Wird sie allerdings für mindestens 24 Stunden unter trockenen Klimabedingungen (22 °C, 35% r. Feuchte) gelagert, kann sie im Gegensatz zu rauen Proben (siehe oben) leicht von Hand vom Untergrund abgehoben werden. Außer der Vorbelastung durch die Haftzugprüfung und den Wechsel der Eigenspannungen durch den einseitigen Verlust der Festhaltung ändert sich nur die Luftfeuchte. Versuche an Probekörpern, die mit einseitigem Verbund hergestellt wurden, beweisen, dass die Vorbelastung die Verbundfuge nicht beeinträchtigt. Durch Messungen und FEM-Analysen wird gezeigt, dass die einseitige Austrocknung verbunden mit in der Grenzfläche behindertem Schwinden zu starken Biegespannungen in der Fuge und damit zum Aufschüsseln der UHPC-Schicht führt. Ausgehend vom Probekörpertrand löst sich die UHPC-Schicht ringförmig vom Untergrund ab. Die geringe Dicke begünstigt das Aufschüsseln.

Um nun der Frage nachzugehen, ob das Wasser als Flüssigkeitsbrücke zwischen festem UHPC und Stahl bzw. Glas für die Haftfestigkeit verantwortlich sein kann, wurden mehrere Untersuchungen unter der Annahme angestellt, dass die Haftung durch eine zusätzliche Trocknung bei 105°C, bei der jegliches physikalisch gebundene Wasser ausgetrieben wird, verloren geht. Unter anderem wurden die letzten beiden Proben der oben schon erwähnten Serie zur Haftungsentwicklung aus UHPC und glattem Stahl im Alter von 221 Tagen für 14 Tage bei 105°C getrocknet. Ein deutlicher Verlust der geprüften Haftfestigkeit ist die Folge, aber der Haftscharverbund bleibt so stark, dass durch behindertes Schwinden zusätzliche Rissfelder entstehen, die Risslänge verdoppelt sich etwa. Das bedeutet, dass der Rückgang der Adhäsionsfestigkeit auf die neu gebildeten Risse und erhöhten Zwangsspannungen in der Verbundfuge zurückzuführen ist. Damit ist klar, dass Wasser nicht als Flüssigkeitsbrücke für die Haftung verantwortlich ist¹¹⁵. Sie wäre sonst zur Gänze und ohne Rissbildung verloren gegangen. Bemerkenswert ist außerdem, dass sich die UHPC-Schicht auch nach Wochen weiterer Lagerung an Raumluft nicht von Hand ablösen lässt. Auch ohne physikalisch gebundenes Wasser bzw. eine Flüssigkeitsbrücke bleibt also die Haftung zwischen UHPC und Stahl erhalten.

An einseitig bereits abgelösten Proben aus UHPC und glattem Glas OVS wurde beobachtet, dass sich in der noch intakten zweiten Fuge beidseits der Risse zwischen UHPC und

¹¹⁵ Wasser kommt also weder als frei bewegliche noch als nicht frei bewegliche Flüssigkeitsbrücke (also mit einer Schichtdicke <3nm, siehe Tabelle 2.1Tabelle 2.1, Seite 6) als maßgeblicher Haftmechanismus in Frage. Bei 105°C verdampft auch alles Gelwasser [Tritthart 2011].

Glasoberfläche ein kapillarer Spalt befindet, in den Wasser eindringen kann. Die UHPC-Matrix haftet nicht vollflächig, sondern entlang netzwerkartiger Linien an der Kontaktfläche am Glas an. Eindringendes Wasser „umspült“ die Strukturen und füllt den kapillaren Spalt, der offensichtlich zwischen den anhaftenden Linien vorhanden ist, bis sich die dünne UHPC-Schicht abheben lässt. Eine Flüssigkeitsbrücke ist also in der Grenzschicht der ausgehärteten Proben ursprünglich nicht vorhanden gewesen, Wasser kann aber in die Grenzfläche, nachdem sich ein Spalt gebildet hat, kapillar eindringen und die Verbindung schwächen.

In den ersten Stunden der Erhärtung kann Wasser zwischen der UHPC-Matrix und der Probenoberfläche aufgrund von kapillarem Unterdruck für eine „Haftspannung“ sorgen. Da das Wasser bei der Hydratation sukzessive verbraucht wird, verringert sich die Spaltbreite, erhöht sich also der Kapillardruck zunächst, aber nur solange bis das Wasser vollständig umgesetzt ist. Dabei füllen immer mehr Hydratationsprodukte den Spaltraum, bis er verschwindet. Wegen des bekannt geringen Kapillarporen- und damit Wasseranteils im erhärteten Ultra-Hochleistungs-Beton (~2-8 Vol.-%, vgl. [Schmidt 2003], [Herold 2006]) wird die mögliche Wirkung von Kapillarkräften (Grenzflächenkräfte) in den verbleibenden flüssigkeitsgefüllten Poren an der Grenzfläche als sehr gering und damit vernachlässigbar eingeschätzt.

Aus der Summe des über Wasser als Flüssigkeitsbrücke Gesagten und weil echte chemische Bindungen bei Normaltemperaturen zwischen den beteiligten Werkstoffen höchst unwahrscheinlich und damit irrelevant sind, ergibt sich, dass intermolekulare Wechselwirkungen von UHPC mit Stahl oder Glas maßgebend für die spezifische Adhäsion an glatten Flächen sind (Haftmechanismus: „Festkörperbrücke“).

8.8 Adhäsion an glatten Flächen: Mathematische Beschreibung und Modellparameter

Als Ergebnis dieser Arbeit liegen nunmehr die maßgeblichen Einflussfaktoren auf die Adhäsion von UHPC an glatten Stahl- und Glasflächen vor. Außerdem kann ihr Zusammenwirken wie folgt beschrieben werden.

Mit dem oben genannten Versagenskriterium und den Zwangsschub- (τ_e) und Zwangsnormalspannungen ($\sigma_{z,e}$) aus behindertem Schwinden abzüglich Kriechen inklusive Relaxation kann eine glatte Verbundfuge folgende Spannung $\bar{\sigma}_z$ normal zur geometrischen Bezugsfläche A_g aufnehmen:

$$\bar{\sigma}_z = \frac{1}{A_g} \cdot \int^{A_g} (f_{ad,spez} - \frac{\tau_e}{\mu_{mikro}} - \sigma_{z,e}) dA \quad (8.1)$$

Diese Spannung kann als Adhäsionsfestigkeit zu einem bestimmten Zeitpunkt bezeichnet werden. Die maßgeblichen Einflussfaktoren auf die Adhäsionsfestigkeit¹¹⁶ sind:

- **Grundwert der theoretischen spezifischen Adhäsion** $f_{ad,spez,0} = 2 \cdot W_a / D$ und Materialbeiwert g des UHPC zur Abminderung auf die **technisch erzielbare spezifische Adhäsion** $f_{ad,spez} = g \cdot f_{ad,spez,0}$ ¹¹⁷.

$f_{ad,spez}$ ist annähernd gleich der experimentellen Haftzugfestigkeit an glatten Proben bei $d/t_c > 40/1$. Der für jeden UHPC spezifische Materialbeiwert g wurde experimentell für UHPC EM näherungsweise mit 100, für UHPC DM mit 260 ermittelt. Der intermolekulare Abstand D zwischen Adhäsiv und Adhärens wurde mit 0,25 nm (Stahl) bis 0,75 nm (Glas) abgeschätzt¹¹⁸.

- **Mikro-Reibbeiwert** $\mu_{mikro} = \tau_{ad,spez} / f_{ad,spez}$
- **Zwangsspannungen** durch behindertes Schwinden τ_e, σ_e und ihre zeitliche Entwicklung. Zur Berechnung ist erforderlich:
 - spannungsinduzierendes autogenes und hygrisches **Schwindmaß** ε_s
 - **Kriechen inklusive Relaxation**, Kriechbeiwert Φ
 - Verhältnis des Rissabstandes s_{cr} oder **Durchmessers d zur Schichtdicke t_c**
 - Qualität des **Schubverbunds** zum Risszeitpunkt τ_{cr}
 - **Zugfestigkeit** zum Risszeitpunkt $f_{ct,cr}$

Es ergibt sich unter der Annahme, D sei für beide Materialien konstant, dass der Verbund UHPC-Glas die höhere theoretische spezifische Adhäsion aufweist als der Verbund UHPC-Stahl. Die bei den Haftzugprüfungen erzielte technische spezifische Adhäsion ist aber bei UHPC-Glas wesentlich geringer als bei UHPC-Stahl. Die plausibelste Erklärung dafür ist ein größerer intermolekularer Abstand zwischen UHPC und Glas als zwischen UHPC und Stahl. Dass Glas von frischem UHPC besser benetzt wird als Stahl macht einen größeren intermolekularen Abstand der Phasen wahrscheinlich. Außerdem deutet das auf einen in der Grenzflächenschicht lokal höheren W/B-Wert hin, der wiederum auf eine lokal geringere Dichte und Festigkeit schließen lässt. Diese in der Grenzflächenschicht von UHPC-Glas geringere Festigkeit als in jener von UHPC-Stahl ist eine weitere Erklärung für die bei UHPC-Glas geringere technische spezifische Adhäsion.

¹¹⁶ In Tabelle 7.6 auf Seite 252 sind alle maßgebenden Faktoren und ihre Größenordnung angegeben und im Kapitel 7.4 ausführlich beschrieben.

¹¹⁷ W_a die spezifische Adhäsionsarbeit und D der intermolekulare Abstand der beteiligten Phasen UHPC und Stahl oder Glas. W_a lässt sich in thermodynamischer Betrachtungsweise aus dem dispersiven und polaren Anteilen der Oberflächenenergien der beteiligten Phasen berechnen.

¹¹⁸ Die Vorgangsweise zur Abschätzung des intermolekularen Abstandes ist in 7.4.6 bzw. Abbildung 7.10 auf Seite 253 dargestellt.

8.9 Adhäsion an rauen Flächen: generelle Betrachtungen

Das eingeführte Versagenskriterium kann auf raue Flächen angewandt werden, wenn die erforderlichen geometrischen Parameter bekannt sind (Flankenneigungswinkel α und Flächen ΔA_g oder ΔA_w , die den Flanken-Intervallen zugeordnet sind, „Reibungswinkel“ der Adhäsion $\varphi = \arctan \mu_{mikro}$)¹¹⁹. Das Modell der spezifischen Adhäsion für glatte Flächen gilt also im Prinzip auch für die rauen. Die normal zur Bezugsebene (Horizontale) aufnehmbare Spannung $\bar{\sigma}_z$ nimmt bei einem Flankenneigungswinkel $\alpha = 45^\circ - \varphi/2$ den geringsten Wert an. Im Bereich von $0 < \alpha < 90^\circ - \varphi$ ist $\bar{\sigma}_z < f_{ad,spez}$, für $\alpha > 90^\circ - \varphi$ wird $\bar{\sigma}_z > f_{ad,spez}$.

Sehr steile Flanken bedeuten also theoretisch die wirkungsvollste Aufrauung. Wird bedacht, dass sich sehr enge Vertiefungen (V-Täler) nicht gut von größeren Körnern ausfüllen lassen, ist eine Kombination aus annähernd horizontalen und vertikalen Abschnitten, sozusagen eine „Säulenstruktur“, am effizientesten.

Aufgrund des gegenüber Stahl entgegen der Erwartung größeren Verhältniswertes $\mu_{mikro,Glas} = \tan \varphi = 1$ zwischen Glas und UHPC ergibt sich bei Glas eine höhere Effizienz durch Aufrauen. Je größer μ_{mikro} und damit φ , desto kleiner wird der Bereich der ungünstigen Flankenneigung $\alpha < 90^\circ - \varphi$.

Werden die eingepprägten Spannungen τ_e und $\sigma_{n,e}$ aus behindertem Schwinden berücksichtigt, die im lokalen Koordinatensystem der geneigten Flanke wirken, kann folgende Spannung $\bar{\sigma}_{z(\alpha)}$ normal auf die (horizontale) geometrische Bezugsfläche aufgenommen werden:

$$\bar{\sigma}_{z(\alpha)} = (f_{ad,spez} - \frac{\tau_e}{\tan \varphi} - \sigma_{n,e}) \cdot \frac{\sin \varphi}{\cos \alpha \cdot \sin(\alpha + \varphi)} \quad (8.2)$$

Zusätzlich muss festgehalten werden, dass Zwängungen aufgrund des Schwindens auch positiv wirken können, indem der UHPC die „Zähne“ der rauen Flächen einklemmt. Außerdem kommt es zu einem Formschluss und damit einer Verhakung des UHPC in Hinterschnidungen („Widerhaken“).

In der Arbeit wurde die Methode der Fokus-Variation am Lichtmikroskop genutzt, um 3D-Daten rauer Oberflächen ausreichend fein aufgelöst ($0,17 \mu\text{m}$) zu erfassen. Neben den Standard-Rauheitsparametern wie Rautiefe, Wenzel-Quotient u.a. wurden im Rahmen des Forschungsprojektes neue Parameter entwickelt. Speziell wurde ein Algorithmus zur Bestimmung des Hinterschneidungs-Koeffizienten – dem Verhältnis von vertikalen Hinterschneidungsflächen (in der Draufsicht überdeckte Flächen) zur geometrischen Bezugsfläche – für die rauen Flächen entwickelt und ausgewertet.

¹¹⁹ Der mathematische Zusammenhang ist in Kapitel 7.5 beschrieben.

Aus baupraktischer Sicht ist es erfreulich, dass die meisten rauen Verbundproben im Beton versagten und nicht in der Fuge. Das zeigt, dass der Verbund stärker ist, als das Material UHPC selbst. In Hinblick auf die Erforschung der Adhäsion bedeutet das jedoch den Verlust der Information über die maximale Verbundfestigkeit. Deshalb konnte die Bedeutung der (neuen) Rauheitsparameter für die Adhäsion rauer Flächen vorerst nicht verifiziert werden.

Es zeigt sich aber, dass schon durch Rauheiten mit geringen Rautiefen ($R_a \approx 10 \mu\text{m}$) und sogar mit Glas eine hohe Haftverbundfestigkeit erreicht werden kann, die besser als die Zugfestigkeit ist, wenn die Proben MVS gelagert werden. Bei Proben OVS und speziell beim UHPC DM sind dafür größere Rauheiten erforderlich. Durch ein spezielles Behauen und zusätzliches Sandstrahlen kann eine Rauheit erzeugt werden, in der eine ausreichend große Rautiefe mit feinen Rauheitswellenlängen überlagert wird. Diese Rauheit SR5 passt am besten zur gesamten Kornverteilung des UHPC. Mit ihr lässt sich die Packungsdichte in der Grenzflächenzone erhöhen und die erzielbare Festigkeit steigern.

Im Ganzen betrachtet kann geschlossen werden, dass ein leichtes Aufrauen durch Strahlen von Stahl- und Glasoberflächen¹²⁰ zu einem verbesserten Haftverbund mit UHPC führt, vorausgesetzt der UHPC benetzt die raue Oberfläche auch vollständig. Die Packungsdichte der Grenzflächenzone wird verbessert, es stehen eine größere wahre Oberfläche und Hinterschneidungen zur Ausbildung mechanischer Adhäsion zur Verfügung. Die Adhäsion und Kohäsion in der Grenzflächenschicht wird verbessert und es kommt zum Bruch im Beton-Inneren.

Es geht aus den Haftzugprüfungen hervor, dass eine Mikro-Verzahnung auch die Wirkung der spezifischen Adhäsion günstig beeinflusst bzw. sicherstellt. Die große Steigerung der Haftzugfestigkeit von den glatten zu den rauen Proben der Werkstoff-Kombination von Stahl mit UHPC DM ohne dass auch die wahre Oberfläche oder der Hinterschneidungs-Anteil im selben Maße anwächst, muss so interpretiert werden. Als Ursachen kommen in Frage:

- die Relativverschiebungen in der frühen Phase der Erhärtung werden behindert
- Zwangsspannungsspitzen am Rand der UHPC-Schichten werden aufgenommen
- die Elastizität des Verbundes wird verbessert (vgl. [Poggel 2001], p.155) und
- die Ausbreitung von Mikrorissen wird durch die Rauheit des Adhärens behindert. Ein Riss muss häufiger Phasenübergänge durch- oder umlaufen und kann nicht instabil werden.

Eine gleichzeitige Wirkung bzw. ein Zusammenwirken der spezifischen und mikro-mechanischen Adhäsion wird deshalb aus den Beobachtungen abgeleitet. Die Hypothese, *„Die charakteristische maximal übertragbare Haftkraft einer Kontaktstelle besteht aus einem Größenanteil aufgrund spezifischer Adhäsion und einem Größenanteil aufgrund*

¹²⁰ Die Oberflächen müssen von Glasstaub gesäubert sein.

mechanischer Adhäsion“, wird damit prinzipiell bestätigt. Die Größe der unterschiedlichen Anteile dieser Faktoren wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht bestimmt. Die Beobachtungen zeigen aber, dass die spezifische Adhäsion auch an rauen Flächen einen maßgebenden, wenn nicht sogar den überwiegenden Anteil an der Haftfestigkeit ausmacht.

9 Weiterführende Fragen und Forschungsbedarf

9.1 Allgemeines

Die vorliegende Arbeit benennt die wesentlichen Parameter und Zusammenhänge, die die Adhäsion von UHPC an glatten Oberflächen von Stahl und Glas bestimmen. Sie wurden in umfangreichen Untersuchungen und Beobachtungen ermittelt und in Form eines einfachen Modells weiterentwickelt. Für raue Flächen liegen die Grundlagen zur Erweiterung des Modells vor.

Das folgende Kapitel dient dazu, weiterführende Fragestellungen aufzuzeigen und neue Zugänge in diesem umfangreichen Forschungsfeld möglich zu machen.

9.2 Mögliche Erweiterung des Modells und seiner Parameter

Im folgenden Abschnitt werden mögliche Erweiterungen des Modells und seiner Parameter dargestellt.

9.2.1 Modellparameter für glatte Flächen

Die in die mathematische Beschreibung der Adhäsion an glatten Flächen eingehenden Parameter und ihre zeitliche Entwicklung ist bisher nicht vollständig geklärt. Folgende Untersuchungen, die über die in der Arbeit abgehandelten hinausgehen, werden angeregt. Erstens sollte die Qualität des Schubverbundes bestimmt werden. Einerseits sind dafür Serien von Haftschubversuchen erforderlich, in welchen die Entwicklung der Schubfestigkeit in der Grenzflächenzone von einem frühen Zeitpunkt an bis zur vollständigen Erhärtung an verschiedenen Werkstoff-Rauheitskombinationen und verschiedenen UHPC-Mischungszusammensetzungen geprüft wird. Andererseits ist dafür die zeitliche Entwicklung von Zwangsspannungen abhängig von den durch den Schubverbund behinderten Verformungen zu ermitteln. Der Risszeitpunkt abhängig vom auftretenden autogenen und hygri-schen Schwinden ist zu messen. Darüber hinaus wäre es wünschenswert, die Verbund-Schlupf-Beziehung zu ermitteln.

Zweitens sollte es möglich werden, die Rissabstände genau zu berechnen¹²¹. Dazu ist die Bruchenergie und ihr zeitlicher Verlauf sowie der Anteil der elastischen Verzerrungs-

¹²¹ Da die Zwangsspannungen und die Rissbildung die Adhäsion so stark beeinflussen, hat das autogene Schwindverhalten des jeweiligen UHPC, seine Nachbehandlung und die Umgebungsbedingungen (hygrisches Schwinden) eine große praktische Bedeutung.

energie, der in neue Rissoberflächen umgewandelt wird („ f_{red} “), zu ermitteln. Die Vorgangsweise dafür ist noch offen. Parameterstudien mit Hilfe von FEM-Berechnungen bzw. eine Korrelation zum Ausbreitfleißmaß auf rauen Flächen sind ein möglicher Zugang. Mittels FEM kann die gespeicherte Verzerrungsenergie für bestimmte d/t_c -Verhältnisse einer UHPC-Schicht berechnet werden und könnte als Eingangsgröße für eine genauere Bestimmung der Rissabstände dienen.

Der intermolekulare Abstand D zwischen Adhäsiv und Adhärens wurde wie im Kapitel 7.4.6 beschrieben abgeschätzt. Der Nachweis dafür, dass und wie sehr sich die intermolekularen Abstände für verschiedene Material-Paarungen unterscheiden, muss erst erbracht werden. Eine genaue, materialspezifische Bestimmung von D muss ein weiterer Schritt sein. Eine Methode dafür ist noch zu finden.

9.2.2 Modell für raue Flächen

Basierend auf den Erkenntnissen der Arbeit kann auch ein Modell für raue Oberflächen entwickelt werden. In das Modell gehen jedenfalls zwei Anteile ein, die spezifische und die mechanische Adhäsion. Auch wenn, wie im vorigen Kapitel beschrieben, eine Mikro-Verzahnung die Wirkung der spezifischen Adhäsion günstig beeinflusst, muss wohl davon ausgegangen werden, dass die für die spezifische Adhäsion erforderliche Nähe (<1 nm) durch die für die volle Aktivierung der mechanischen Adhäsion notwendige Verformung zum (größten) Teil verloren geht. Dies gilt es durch Untersuchungen zu bestätigen.

Wie in der Arbeit beschrieben, lässt sich die Wirksamkeit der spezifischen Adhäsion an aufgerauten Oberflächen in physikalischer und geometrischer Hinsicht mit dem eingeführten Mohr-Coulomb Versagenskriterium erklären. Wie sich gezeigt hat, ist dazu jedenfalls ein Kennwert für die Flankenwinkel der „Zähne“ einer sandgestrahlten Oberfläche und die zugehörige Fläche der Abschnitte gleicher Flankenwinkel zu bestimmen.

Es ist klar, dass die übliche Angabe der Rautiefe alleine ungeeignet ist, die Haftfestigkeit in ihrer Gesamtheit vorherzusagen. Die Rautiefe spielt nur bei reiner Schubbeanspruchung und nach dem Versagen bei der Rissverzahnung eine entscheidende Rolle. Inwieweit der Wenzel-Quotient und der neu ermittelte Wert des Hinterschneidungs-Koeffizienten unabhängig voneinander mit der Haftzugfestigkeit korrelieren, muss erst geklärt werden. Versuchsreihen mit entsprechender Variation der Parameter an rauen Oberflächen sind weiterführend durchzuführen. Um Hinterschneidungen für jede beliebige Belastungsrichtung zu identifizieren, sind Rauheitsanalysemethoden erforderlich, die die hinterschnittenen Bereiche unabhängig von der Blickrichtung auf die Oberfläche erfassen. Es wird angeregt zu prüfen, ob derartige Verfahren aus anderen Forschungsdisziplinen nutzbar zu machen sind.

Ein noch unbestimmter Einfluss ergibt sich daraus, dass die spezifische Adhäsion an Spitzen und Kanten höher sein kann als an ebenen Flächen. Das ist darauf zurückzuführen, dass sich dort freie Valenz-Elektronen konzentrieren, vgl. [Brinker 1990]. Inwieweit UHPC

in Vertiefungen der rauen Oberfläche durch kapillares Saugen transportiert wird und damit in besonders engen Kontakt mit dem Adhärens tritt, kann bisher nicht gesagt werden. Im Rahmen des Forschungsprojektes „AdBond UHPC“ wurde bereits an einem Kennwert der „Kantigkeit“ bzw. „sharpness“ von rauen Oberflächen gearbeitet, vgl. [Freytag 2011]. Seine Bedeutung ist noch auszuwerten.

Der Grundwert der technischen spezifischen Adhäsion könnte an rauen Flächen mit einer Vielzahl einzelner, punktueller Haftkontakte größer sein als auf einer ausgedehnten ebenen Haftfläche. Es ist aus der Klebetechnik und der Natur (vgl. Adhäsion der Füße des „Gecko“ [Ferber 2009]) bekannt, dass bei gleicher Gesamtfläche die Haftung auf einer Summe aus vielen kleinen Flächen größer ist als auf einer durchgehend großen Fläche. Beim Abziehen eines flächenhaften Haftkontaktes, z.B. eines Klebebandes, kommt es zu Kerbspannungen, Rissbildung und zur Rissfortsetzung, die die Gesamthaftung gegenüber der Haftung vieler in Summe gleich großer Einzelflächen herabsetzen¹²². Diese Überlegungen müssen in weiterführenden Studien belegt werden.

9.2.3 Einfluss der Mischungszusammensetzung

Am erhärteten UHPC wurde kein signifikanter Unterschied der Oberflächenenergien der Mischung EM und DM festgestellt. In wie weit die Mischungszusammensetzung aber die Oberflächenspannung bzw. Oberflächenenergie des frischen UHPC beeinflusst, ist mittels Kapillarsteigversuchen oder ähnlichen Methoden noch für verschiedene Mischungen zu vergleichen.

Eine entscheidende Rolle spielt die Entmischung durch Wasseransammlung in der Grenzfläche bei guter Benetzung. Sie sollte bei Normalbeton noch stärker als bei UHPC zu einer Schwächung der Grenzflächenzone führen, vgl. [Müller 2009]. Die Grenzflächenschicht stellt durch den lokal größeren W/B-Wert immer eine Zone geringerer Festigkeit als im Inneren dar. Neben einer weniger dichten und festen Grenzflächenschicht verhindert eine „dicke“ Wasserschicht an der Grenzfläche auch, dass ein für spezifische Adhäsion erforderlicher naher Kontakt ($< 1 \text{ nm}$) zustande kommt. Demzufolge ist mit Betonen oder Mörteln mit einem relativ hohen Wassergehalt, speziell bei Betonen mit einem W/B-Wert größer als 0,4 – in ihnen ist zur Zementhydratation nicht gebrauchtes „Überschusswasser“ vorhanden – nie jene Adhäsionsfestigkeit zu erreichen, die zum Betonversagen vor dem Verbundversagen führt. Dieser plausible Ansatz des Verfassers sollte wurde experimentell noch nicht bestätigt.

Es ist nicht zu erwarten, dass durch Fasern im UHPC die spezifische Adhäsion direkt verändert wird, da die Fasern in der Regel vollständig von UHPC-Matrix umgeben sind und die Kontaktfläche des Adhärens nicht direkt berühren. Allerdings ändert sich das Material-

¹²² Diese Anmerkung wurde von Univ.-Doz. Dr. Pölt vom Zentrum für Elektronenmikroskopie und Feinstrukturforschung der TU Graz bei der Abschlussdiskussion zum Forschungsprojekt „AdBond UHPC“ am 3.8.2010 am Bautechnikzentrum in Graz eingebracht.

verhalten nach der Erstrissbildung. Rissabstände und Rissbreiten sind in Bauteilen aus UHPFRC gegenüber UHPC wesentlich verändert. Risse verteilen sich stärker – das bedeutet geringere Rissabstände – und die Rissöffnung ist geringer, vgl. [Habel 2004]. Um die Rissabstände im UHPFRC mit dem in der Arbeit vorgeschlagenen Ansatz zu berechnen, muss geklärt werden, welcher Anteil der Bruchenergie von UHPFRC elastisch frei wird und so die Rissabstände bestimmt.

9.3 UHPC-UHPC- und UHPC-Normalbeton-Verbund

Untersuchungen mit porösen Untergründen (UHPC, Normalbeton), die nicht Ziel der vorliegenden Arbeit waren, sind sehr praxisrelevant und sollten deshalb aufbauend auf Erkenntnisse dieser Arbeit durchgeführt werden. Entsprechend der „Druckknopfttheorie“ verhakt sich das Adhäsiv, das in flüssiger Form in Poren eingedrungen ist, nach der Erhärtung mit dem Adhärens und es bildet sich so eine mechanische Adhäsion aus, vgl. [Bischof 1983] und [Poggel 2001]. Der den Verbund potentiell verbessernden Wirkung der mechanischen Adhäsion von UHPC mit einem porösen Untergrund steht entgegen, dass Kapillarporen Wasser und Feinanteile des UHPC absaugen könnten und für eine lokale Entmischung des UHPC sorgen. Diese würde die Festigkeit der Grenzflächenzone vermindern.

Wegen des großen, viel versprechenden Anwendungspotenzials von UHPC-Fertigteilen im Verbund mit nachträglich aufgebrachtem UHPC oder Normalbeton – vgl. u.a. [Freitag 2004], [Sparowitz 2010] – werden weiterführende Untersuchungen empfohlen.

Umfangreiche Arbeiten, die unter anderem den UHPC-Beton Verbund umfassen, wurden und werden aktuell an der TU München durchgeführt, vgl. [Lenz 2010], [Zilch 2009], [Müller 2009], [Reinecke 2004]. Auf sie wurde im Kapitel 2.6.3 bereits hingewiesen. Ein Modell zur Berücksichtigung des Haftverbundes in Betonschubfugen wird von der Arbeitsgruppe des Lehrstuhles für Massivbau der TU München ausgearbeitet.

Haftschubversuche zum UHPC-UHPC und UHPC-Normalbeton-Verbund wurden in vom Verfasser betreuten studentischen Projektarbeiten auch an der FH Kärnten durchgeführt¹²³. Der Verbund konnte empirisch als sehr gut beurteilt werden.

In einer Studie an der FH Kärnten wurde der UHPC-UHPC-Haftverbund unter Zugbeanspruchung an glatten und durch Sandstrahlen leicht aufgerauten UHPC-Oberflächen geprüft, vgl. [Marjanen 2010]. Die Verbundprobekörper und Haftzugprüfungen wurden analog zu den in der vorliegenden Arbeit beschriebenen ausgeführt. Es zeigte sich, dass die

¹²³ Verbundkörpern wurden mit geneigter Schubfuge bei unterschiedlichem Normalspannungsanteil geprüft. UHPC wurde auf Normalbeton, SCC und UHPC mit durch Hochdruckwasserstrahlen aufgerauter Fugenoberfläche im Alter von 28 Tagen nachträglich aufgebracht. Nach weiteren 28 Tagen wurden die Versuche durchgeführt und jeweils monolithisches Tragverhalten erreicht. Gleichartige Versuche mit Fugen von Schalungs-glatten, aber porösen Oberflächen brachten für den UHPC-Normalbeton Verbund ebenfalls monolithisches Tragverhalten.

spezifische Adhäsion an glatten UHPC-Oberflächen stark von deren Porosität beeinflusst wird. Hier sind weiterführende Untersuchungen erforderlich.

Aus den Ergebnissen der Arbeit und den bereits zitierten Forschungsarbeiten lässt sich ableiten, dass wie für den UHPC-Stahl- und UHPC-Glas-Verbund auch für den UHPC-Beton- und UHPC-UHPC-Verbund hohe Haftfestigkeiten zu erwarten sind.

9.4 Beständigkeit des Verbundes

Die Beständigkeit des Verbundes und sein Verhalten unter wechselnden klimatischen Bedingungen ist nicht Gegenstand vorliegender Arbeit. Es werden aber weiterführende Untersuchungen dazu empfohlen. Dazu zählen unter anderem Prüfserien zur Langzeit-Entwicklung des Haftzug- und Haftschub-Verbundes von UHPC mit glatten und rauen Oberflächen aus Stahl, die mit Verdunstungsschutz gelagert werden sowie die Entwicklung des Haftzug- und Haftschub-Verbundes von UHPC mit Glas.

9.5 Potentielle Anwendungen

Abschließend seien in Abbildung 9.1 und Abbildung 9.2 noch einige Anwendungsideen gezeigt, die durch die großen Haftfestigkeiten von UHPC auf Stahl und Glas ermöglicht werden. Dazu zählen:

- sandgestrahlte Stahlteile als Verbundmittel
- Sandstrahlen von Bewehrungsstahl als Alternative zur oder zusätzlich zur Rippung (Verkürzung der Verbundlängen, Bewehrungsanschlüsse)
- Sandgestrahlte bzw. entsprechend aufgeraute Stahloberflächen in Verbundkonstruktionen, z.B. zur Einsparung von Kopfbolzendübeln¹²⁴
- UHPC im flächenhaften Verbund mit Glas bzw. Stahl (UHPC als Beschichtung) bzw. umgekehrt Glas und Stahl auch als Bauteiloberfläche auf UHPC
- UHPC als Verbundvermittler zwischen Stahl oder Glas und Stahl, Glas oder anderem Beton

¹²⁴ Vergleichbares wurde von [Thomann 2007] bereits für Stahl-Beton Verbundträger vorgeschlagen. In diesen Verbindungen wurde allerdings eine raue Stahloberfläche mit in Epoxidharz eingestreutem Sand erzeugt.

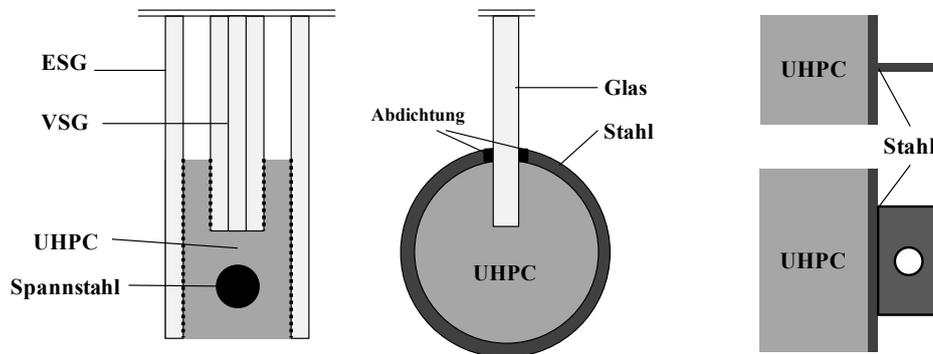


Abbildung 9.1: UHPC- a) Glas¹²⁵ als Bauteiloberfläche und strukturelles Element, vgl. [Freytag 2002], b) als Verbundvermittler, c) mit Verbundmittel

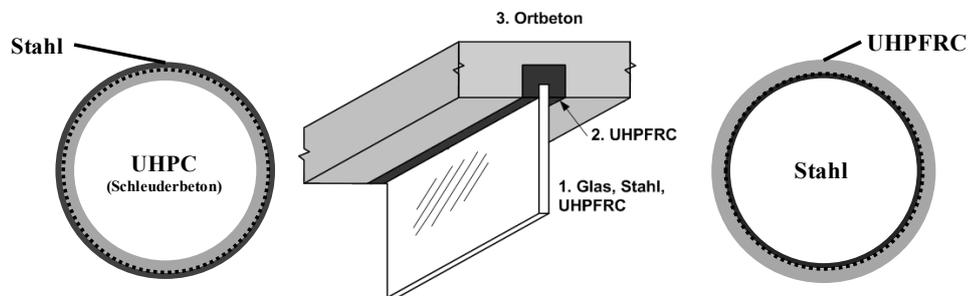


Abbildung 9.2: UHPC- a) Füllungen, b) als Verbundvermittler bzw. c) Beschichtungen

¹²⁵ Einscheibensicherheitsglas ESG und Verbundsicherheitsglas VSG

Literaturverzeichnis

- [AFGC/SETRA 2002] AFGC/SETRA- Association Francaise de Génie Civil / Service d'études techniques des routes et autoroutes 2002. *Ultra high performance fibre reinforced concrete. Interim Recommendations*. Bagneux Cedex.
- [Alicona 2009] Alicona imaging GmbH 2009. *Alicona Imaging - Fokus-Variation*. URL: <http://www.alicon.com/home/products/InfiniteFocus/Fokus-Variationen.de.php> [Zugriffsdatum: 2011-02-12].
- [ASME 2002] ASME 2002. *Surface Texture, Surface Roughness, Waviness and Lay*.
- [Bache 1988] Bache, H. 1988. *The new strong cements: their use in structures*, in: *Physics in Technology* 19 (2)
- [Bažant 1992] Bažant, Z. P., Cedolin, L. 1992. *Stability of structures: Elastic, inelastic, fracture, and damage theories*. Mineola, N.Y: Dover Publications.
- [Beltzung 2005] Beltzung, F., Wittmann, F. H. 2005. *Role of disjoining pressure in cement based materials*, in: *Cement and Concrete Research* 35, 2364–2370.
- [Bentur 2003] Bentur, A. 2003. *Early age cracking in cementitious systems: Report of RILEM Technical Committee 181-EAS 'Early Age Shrinkage Induced Stresses and Cracking in Cementitious Systems'*. Bagneux: RILEM Publ. (RILEM report, 25).
- [Berg 1993] Berg, J. C. 1993. *Wettability*. New York: Dekker. (Surfactant science series 49).
- [Bischof 1983] Bischof, C., Possart, W. 1983. *Adhäsion*. Berlin: Akademie-Verlag.
- [Brinker 1990] Brinker, C. J., Scherer, G. W. 1990. *Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing*. [Nachdr.]. Boston: Acad. Press.
- [Brühwiler 2008] Brühwiler, E., Denarié, E., *Rehabilitation of concrete structures using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete*, in: [Fehling 2008]
- [Burbaum 2009] Burbaum, U. 2009. *Adhäsion bindiger Böden an Werkstoffoberflächen von Tunnelvortriebsmaschinen*. Dissertation. Universität Darmstadt [Zugriffsdatum: 2011-04-16].
- [Bürgel 2005] Bürgel, R. 2005. *Festigkeitslehre und Werkstoffmechanik: Werkstoffe sicher beurteilen und einsetzen*. Wiesbaden: Vieweg, Studium Technik. (2).
- [Butt 2006] Butt, H.-J., Graf, K., Kappl, M. 2006. *Physics and chemistry of interfaces*. 2. ed. Weinheim: Wiley-VCH.

- [Chan 2004] Chan, Y.-W., Chu, S.-H. 2004. *Effect of Silica Fume on Steel Fiber Bond Characteristics in Reactive Powder Concrete*, in: *Cement and Concrete Research* 34(7), 1167–1172.
- [Courard 2011] Courard, L., Michel, F., Martin, M. 2011. *The evaluation of the surface free energy of liquids and solids in concrete technology*, in: *Construction and Building Materials* 25(1), 260–266.
- [Crimmann 2003] Crimmann, P. 2003. *Grenzflächenmodifizierung und –analyse im Polypropylen-Kupfer-Verbund*. Dissertation. URL: <http://sundoc.bibliothek.uni-halle.de/diss-online/03/03H056/index.htm> [Zugriffsdatum: 2011-05-05].
- [DAfStb 1994] DAfStb Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hg.) 1994. *Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen unter Verwendung von Kunststoffen: Sachstandsbericht*. Berlin: Beuth. (443).
- [DAfStb 2003a] DAfStb Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hg.) 2003. *Erläuterungen zu DIN 1045-1*. Berlin: Beuth. (525).
- [DAfStb 2003b] DAfStb Deutscher Ausschuss für Stahlbeton 2003. *Selbstverdichtender Beton; SVB-Richtlinie*. Berlin: Beuth.
- [de Bruyne 1939] de Bruyne, N. A. 1939. *Adhesion and Polarities*, in: *Flight* 28(12).
- [Dehn 2001] Dehn, F.: *Ultrahochfester Beton*, Kapitel 11.3 in: [König 2001]
- [DIN ISO 4287] DIN ISO 4287: 1998-10. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit*. Berlin: Beuth.
- [DIN ISO 4288] DIN ISO 4288: 1998-04. *Geometrische Produktspezifikation (GPS), Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren: Definition des Zusammenhangs zwischen Rauheitsparametern und Messstreckenlänge*. Berlin: Beuth.
- [Dugat 1996] Dugat, J. et al. 1996. *RPC: Microstructure Analysis*, in: Larrard, F. de, Lacroix, R. (Hg.): *Fourth international symposium on the utilization of high strength/high performance concrete: 29-31 May 1996, Paris, France : proceedings*. Paris: Presses de l'école nationale des ponts et chaussées.
- [Dutschk 2000] Dutschk, V. 2000. *Oberflächenkräfte und ihr Beitrag zur Adhäsion und Haftung in glasfaserverstärkten Thermoplasten*. Dissertation. Technische Universität Dresden. URL: http://www.ipfdd.de/fileadmin/user_upload/pg/arbeitsgebiete/Dissertation-deutsch_dutschk.pdf [Zugriffsdatum: 2011-01-27].
- [Eligehausen 2006] Eligehausen, R., Mallée, R., Silva, J. F. 2006. *Anchorage in concrete construction*. Berlin: Ernst&Sohn.
- [Fehling 2005] Fehling, E., Schmidt, M. 2005. *Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung ultrahochfester Betone (UHPC): Forschungsbericht DFG FE 497/1-1*. Kassel: Kassel Univ. Press. (Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, 1).

- [Fehling 2008] Fehling, E.; Schmidt, M.; Stürwald, S. 2008. *Ultra high performance concrete (UHPC): Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, March 05 - 07, 2008*. Kassel Univ. Press. (Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, 10).
- [Feldmann 1968] Feldmann, R. F., Sereda, P. J. 1968. *A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties*, in: *Materials and Structures* 1(6), 509–520.
- [FELMI 2011] FELMI-ZFE Graz - Austrian Centre for Electron Microscopy and Nanoanalysis 2011. *Beschreibung der Ausstattung: ... instrumentation*. URL: <http://www.felmi-zfe.tugraz.at/> [Zugriffsdatum: 2011-01-22].
- [Ferber 2009] Ferber, M. 2009. *Wie funktioniert die Adhäsion bei Geckos?* Göttingen. URL: http://www.mpibpc.mpg.de/Fragen-Portal/Antworten-Archiv/Adhaesion_bei_Geckos/index.html [Zugriffsdatum: 2011-04-27].
- [fib 2000] fib - federation international du beton 2000. *Bond of reinforcement in concrete*. (CEBFIB-Bulletin, 10).
- [fib 2010] fib - federation international du beto. 2010. *Model Code 2010 - First complete draft, Volume I*.
- [Fiebrich 1994] Fiebrich, M. 1994. *Grundlagen der Adhäsionskunde*, in DAFStb Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hg.): *Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen unter Verwendung von Kunststoffen: Sachstandsbericht*. Berlin: Beuth. (443), 75–91.
- [Fontana 2007] Fontana, P. 2007. *Einfluss der Mischungszusammensetzung auf die frühen autogenen Verformungen der Bindemittelmatrix von Hochleistungsbetonen*. TU Braunschweig [Zugriffsdatum: 2010-10-26].
- [Freisinger 2008] Freisinger, S., Wisner, G., Krelaus, R. et al. 2008. *Structural and semi structural adhesive bonding of UHPC by modifying the surface and close to surface layers*, in: Fehling, E., Schmidt, M., Stürwald, S. (Hg.): *Ultra high performance concrete (UHPC): [Fehling 2008] on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, March 05 - 07, 2008*. Kassel Univ. Press. (Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, 10), 275–284.
- [Freytag 2002] Freytag, B. 2002. *Die Glas-Beton-Verbundbauweise*. Dissertation. TU Graz.
- [Freytag 2004a] Freytag, B., Juhart, J., Sparowitz, L., Baumgartner, E. 2004. *The Use of UHPC in Composites – Ideas and Realisations*, in: [Schmidt 2004].
- [Freytag 2004b] Freytag, B. 2004. *Glass-Concrete Composite Technology*, in: *Structural Engineering International* 14(2), 111–117.

- [Freytag 2011] Freytag, B. 2011. *Adhesive Bond between UHPFRC and other Construction Materials: final report FWF project L 412-N14*. Graz.
- [Froehner 1997] Froehner, M. 1997. *Abschnitt „Fraktale Dimension“*, in: Skripte, Brandenburgische Technische Universität Cottbus. URL: <http://www.math.tu-cottbus.de/~froehner/sonstiges/skripte/node10.html> [Zugriffsdatum: 15.5.2011]
- [FRT 2011] FRT Fries Research & Technology GmbH 2011. *MicroProf Serie - Oberflächenmessgeräte*. URL: <http://www.frt-gmbh.com/de/produkte/microprof/> [Zugriffsdatum: 2011-05-03].
- [Gallent 2009] Gallent, W., Juhart, J., Freytag, B., Baumgartner, E. 2009. *Rough Surfaces with Respect to the Adhesive Bond with UHPC*, in: CEB-fib (Hg.): Proc. of the fib Congress, 5rd Central European Congress on Concrete Engineering, Baden 2009.
- [Geisenhanslücke 2008] Geisenhanslücke, C. 2008: *Einfluss der Granulometrie von Feinstoffen auf die Rheologie von Feinstoffleimen*, Dissertation, Kassel: Univ. Press. (Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 13)
- [Geymayer 1994] Geymayer, H. 1994/95. *Baustofflehre Vorlesung, Skriptum: TU Graz*. Graz.
- [GFM 2011] GFMesstechnik GmbH 2011. *MikroCAD Serie – 3D-Oberflächenmesstechnik*. URL: <http://www.gfm3d.com/> [Zugriffsdatum: 2011-05-17].
- [Grube 1991] Grube, H. 1991. *Ursachen des Schwindens von Beton und Auswirkungen auf Betonbauteile: Heft 52: Beton-Verlag GmbH, Düsseldorf*. (Schriftenreihe der Zementindustrie).
- [Grübl 2001] Grübl, P., Weigler, H., Karl, S. 2001. *Beton: Arten, Herstellung und Eigenschaften*. 2. Aufl. Berlin: Ernst & Sohn. (Handbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau).
- [Haardt 1991] Haardt, P. 1991. *Zementgebundene und kunststoffvergütete Beschichtungen auf Beton*. Heft 13, Schriftenreihe des Institutes für Massivbau und Baustofftechnologie der Universität Karlsruhe. Dissertation. Universität Karlsruhe. URL: <http://www.imb.kit.edu/bt/194.php> [Zugriffsdatum: 2011-03-09].
- [Habel 2004] Habel, K. 2004. *Structural behaviour of elements combining ultra-high performance fibre reinforced concretes (UHPFRC) and reinforced concrete*: Thesis 3036EPFL, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE. URL: <http://library.epfl.ch/en/theses/?nr=3036&lang=ger> [Zugriffsdatum: 2011-03-21].
- [Habel 2005] Habel, K., Denarié, E., Brühwiler, E. 2005. *Bauteile aus ultrahochleistungsfähigem Faserbeton (UHPFRC) und traditionellem Stahlbeton: Eine innovative Lösung zur Instandsetzung und Veränderung bestehender Betonbauten*. Beton- und Stahlbetonbau

- 100(2), 124- 131_Online im Internet: URL:
<http://dx.doi.org/10.1002/best.200590028>.
- [Habenicht 1997] Habenicht, G. 1997. *Kleben: Grundlagen, Technologie, Anwendungen ; mit 37 Tabellen*. 3., Berlin: Springer.
- [Hering 2007] Hering, E., Martin, R.,Stohrer, M. 2007. *Physik für Ingenieure..* Berlin, Heidelberg. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-71856-7>.
- [Herold 2006] Herold, G., Scheydt, J. C.; Müller, H. S. 2006. *Entwicklung und Dauerhaftigkeit ultrahochfester Betone*, in: BFT International 72 (10), 4-14
- [Hillermeier 2006] Hillermeier, B. et al. 2006. *Spezialbetone*, in Bergmeister, K.,Wörner, J. D. (Hg.): *Beton-Kalender 2006. Turmbauwerke, Industriebauten*: Ernst & Sohn. (Beton-Kalender, 1), 519–578.
- [Israelachvili 2011] Israelachvili, J. N. 2011. *Intermolecular and surface forces*. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier Acad. Press.
- [IRB 2004] IRB Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau (Hg.) 2004. *Ultrahochfester Beton: Reaktionspulverbeton ; Forschungsergebnisse, Entwicklungen, Projekte*. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag
- [Jähling 2005] Jähling, A. 2005. *Auslegung DIN 1045-1: Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit. Erläuterungen zur Fugenbemessung nach DIN 1045-1.*, in: Zilch, K. (Hg.): *Münchener Massivbau Seminar 2005. Neue Wege im 21. Jahrhundert*.
- [Jeffrey 1997] Jeffrey, G. A. 1997. *An introduction to hydrogen bonding*. New York: Oxford Univ. Press. (Topics in physical chemistry).
- [JSCE 2006] JSCE - Japan society of civil engineers 2006. *Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength fiber reinforced concrete structures (Draft)*.
- [Juhart 2007] Juhart, J., Freytag, B., Linder, J. 2007. *Experimentelle Bestimmung der Spannungs-, Dehnungslinie im Zugbereich an zylindrischen Proben aus UHPFRC (ultra high performance fibre reinforced concrete)*. Forschungsbericht. Fachhochschule Kärnten.
- [Jungwirth 2005] Jungwirth, J., Muttoni, A. 2005. *Versuche zum Tragverhalten von ultra hochfestem Beton: Versuchsbereich Zusammenfassung 00.02.R8. Projekt 00.02*. Lausanne. URL: <http://ibeton.epfl.ch/Person/Anciens/Jungwirth/Versuchsbericht%20Zusammenfassung.pdf> [Zugriffsdatum: 2011-04-30].
- [Jungwirth 2006] Jungwirth, J. 2006. *Zum Tragverhalten von zugbetanspruchten Bauteilen aus Ultra-Hochleistungs-Faserbeton*: Thesis 3429EPFL, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE. URL: <http://library.epfl.ch/en/theses/?nr=3429&lang=ger> [Zugriffsdatum: 2011-04-30].

- [Kaufmann 1971] Kaufmann, N. 1971. *Das Sandflächenverfahren*, in: Straßenbau-technik 24(3).
- [KEM 2011] Konradin Verlag R. Kohlhammer GmbH 2011. URL: http://www.kem.de/werkstoffe/-/article/12503/28875168/Laser-Mikroskop-analysiert-Oberfl%C3%A4chen/art_co_INSTANCE_0000/maximized/ [Zugriffsdatum: 2011-06-10]
- [König 2001] König, G., Tue, N. V., Zink, M. 2001. *Hochleistungsbeton*. Berlin.
- [König 2003] König et al. 2003. *Verbundkonstruktionen mit ultrahochfestem Beton für den Brücken- und Hochbau*, in: Beton- und Stahlbetonbau 98(4), 240–246.
- [Kordts 2002] Kordts, S., Grube, H. 2002. *Steuerung der Verarbeitungseigenschaften von SVB als Transportbeton*. Beton 52(4), 217–223.
- [Krelaus 2008] Krelaus, R.; Freisinger, S.; Schmidt, M. 2008. *Adhesive Bonding of UHPC Structural Members at the Gaertnerplatz bridge in Kassel*. In: [Fehling 2008], pp. 597-604.
- [Krenkler 1980] Krenkler, K. 1980. *Chemie des Bauwesens: Band 1: Anorganische Chemie*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- [Krüss 2011] Krüss GmbH 2011. *Theorie - Kontaktwinkelmessung*. Hamburg. URL: <http://www.kruss.de/de/theorie> [Zugriffsdatum: 2011-01-27].
- [Ladinig 2005] Ladinig, D. 2005. *Herstellung von feinkörnigem UHPC und Optimierung der Kornzusammensetzung*. Diplomarbeit. Fachhochschule Kärnten.
- [Lenz 2010] Lenz, P., Zilch, K. 2010. *Concrete to concrete bonds – Potentials for new structures and rehabilitation*, in fib - federation international du beton (Hg.): *3rd fib International Congress*. Washington D.C.
- [Leonhardt 1984] Leonhardt, F., Mönning, E. 1984. *Vorlesungen über Massivbau, Teil 1, Kapitel 4 Verbundbaustoff Stahlbeton*. 3. Aufl.: Springer Verlag.
- [Leutbecher 2007] Leutbecher, T. 2007. *Rissbildung und Zugtragverhalten von mit Stabstahl und Fasern bewehrtem ultrahochfesten Beton (UHPC)*. Univ., Dissertation, Kassel, 2007. Universität Kassel.
- [Locher 1976] Locher, F.W. 1976. *Die Festigkeit des Zements*, in: Beton, Heft 7 und 8
- [Lohaus 2006] Lohaus, L., Anders, S. 2006. *Static and Fatigue Behaviour of High-Performance Concrete in Grouted Joints for Hybrid Structures*, in fib - federation international du beton (Hg.): *Proceedings of the 2nd fib congress*, Neapel 2006.
- [López 2006] López Custodio, C. 2006. *Erläuterung und Beurteilung der Unterschiede bei der Bestimmung der aufnehmbaren Querkraft von*

- Fugen nach DIN 1045-1 und EN 1992-1-1*. Diplomarbeit. TU München [Zugriffsdatum: 2011-05-01].
- [Ma 2003a] Ma, J., Schneider, H., Wu, Z. 2003. *Bruchmechanische Kenngrößen von UHFB*, in König, G., Acker, P. (Hg.): *Ultrahochfester Beton: Innovationen im Bauwesen - Beiträge aus Praxis und Wissenschaft*. Berlin: Bauwerk Verl., 121–130.
- [Ma 2003b] Ma, J., Dehn, F., König, G. 2003. *Autogenes Schwinden von selbstverdichtendem UHPC*, in Yuan, Y., Shah, S. P., Lü, H. (Hg.): *Proceedings, International Conference on Advances in Concrete and Structures (ICACS)*. Xuzhou, Jiangsu/China.
- [Marjanen 2010] Marjanen, L. 2010. *Study on the adhesion of UHPC to smooth UHPC: Research Project AdBond UHPC*. Spittal/Drau.
- [Martinola 2000] Martinola, G. 2000. *Rissbildung und Ablösung zementgebundener Beschichtungen auf Beton*. Dissertation. ETH Zürich.
- [Maso 1996] Maso, J. C. 1996. *Interfacial transition zone in concrete: State-of-the-art report*. London: E & FN Spon. (RILEM report, 11).
- [Mitutoyo 2011] Mitutoyo Deutschland GmbH. 2011. URL: <http://www2.mitutoyo.de/mitutoyo-hn/produkte/online-prospekte/index.html/> surfest SJ 210 [Zugriffsdatum 2011-06-03]
- [Mollet 2000] Mollet, H., Grubenmann, A. 2000. *Formulierungstechnik: Emulsionen, Suspensionsn, Feste Formen*: Wiley-VCH.
- [Möser 2008] Möser, B., Pfeifer, C. 2008. *Microstructure and Durability of UHPC*, in: [Fehling 2008], pp. 417–424.
- [Mühlbauer 2008] Mühlbauer, C., Zilch, K. 2008. *Experimental investigation of the long-term behaviour of glued UHPC-joints*, in: [Fehling 2008], pp. 561–568.
- [Mühlbauer 2010] Mühlbauer, C., Zilch, K. 2010. *Glued Joints of UHPC structures*, in fib - federation international du beton (Hg.): 3rd fib International Congress. Washington D.C.
- [Müller 2008] Müller, A. 2008. *Zur Tragfähigkeit der Verbundfuge zwischen Alt- und Neubeton*, in Feix, J., Andreatta, A. (Hg.) , in: Innsbrucker Bautage 2008: Berichtband, 15–30.
- [Müller 2009] Müller, A. 2009. *Zum Zug- und Schubtragverhalten von Betonfugen*. Technische Universität München.
- [Nardin 1994] Nardin, M., Schultz, J. 1994. *Handbook of Adhesive Technology*. New York: Dekker.
- [Nardin 1996] Nardin, M., Schultz, J. 1996. *Relationship between Work of Adhesion and Equilibrium Interatomic Distance at the Interface*. Langmuir, 4238–4242.
- [Nöldgen 2009] Nöldgen, M. 2009. *Modellierung von ultrahochfestem Beton (UHPC) unter Impaktbelastung: Auslegung eines Hochhauskerns gegen Flugzeuganprall*. Kassel: kassel university press. (Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 14).

- [ÖNORM B 3303] ÖNORM B 3303: 2002-09-01. *Betonprüfung*. (ersetzt im Laufe der Bearbeitung der Dissertation durch ONR 23303 - Prüfverfahren Beton (PVB) - Nationale Anwendung der Prüfnormen für Beton und seiner Ausgangsstoffe, Ausgabedatum 2010-09-01)
- [ÖNORM B 4710-1] ÖNORM B 4710-1: 2007 10 01. *Beton - Teil 1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis (Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206-1 für Normal- und Schwerbeton)*
- [ÖNORM EN 196-1] ÖNORM EN 196-1: 2005 04 01. *Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit*.
- [ÖNORM EN 1015-3] ÖNORM EN 1015-3: 2007-03-01. *Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch)*.
- [ÖNORM EN 12390-3] ÖNORM EN 12390-3. 2009-05-01. *Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern*.
- [ÖNORM EN 1992] ÖNORM EN 1992-1-1: 2009-01-01. *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*.
- [ÖVBB 2002] ÖVBB - Österr. Vereinigung für Beton- und Bautechnik 2002. *Merkblatt „Selbstverdichtender Beton“ (SCC)*. Wien.
- [Packham 1992] Packham, D. E. 1992. *Handbook of Adhesion*. Harlow – Essex: Longman Scientific & Technical.
- [Palzer 2001] Palzer, S., Hiebl, C., Sommer, K. et al. 2001. *Einfluss der Rauigkeit einer Feststoffoberfläche auf den Kontaktwinkel*, in: *Chemie Ingenieur Technik* 73, 1032–1038.
- [Péron 2008] Péron, H. 2008. *Desiccation Cracking of Soils*: THÈSE 4025. Dissertation. EPFL, École Polytechnique Fédérale De Lausanne.
- [Peter 2011] Peter, W. 2011. *Korrelationskoeffizient*. Homepage Statistik Peter, Data Engineering and Statistics. URL: <http://arbeitszimmer.statistik-peter.at/2006/08/24/korrelationskoeffizient/> [Zugriffsdatum 2011-06-03]
- [Petersson 1980] Petersson, P. 1980. *Fracture energy of concrete: Practical performance and experimental results*. *Cement and Concrete Research* 10(1), 91–101_Online im Internet: URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TWG-47X8C71-KN/2/b985ab33311774d39069f7def083568d>.
- [Phileo 1966] Phileo, R. E. 1966. *The Origin of Strength in Concrete*, in *Highway Research Board (Hg.): Symposium on Structure of Portland Cement Paste and Concrete*, Washigton: Publication 138 und *Highway Research Board Special Report issue 90*, 175–185.
- [Poggel 2001] Poggel, H. 2001. *Untersuchungen zur mechanischen Haftung in Verbundsystemen*. Dissertation. Universität Siegen. URL: <http://www.technikworkshop.de/index.php/literatur/3-1?start=80> [Zugriffsdatum: 2011-02-12].

- [Rehm 1961] Rehm, G. 1961. *Über die Grundlagen des Verbundes zwischen Stahl und Beton*, in: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 138. Berlin: Beuth.
- [Reinecke 2004] Reinecke, R. 2004. *Haftverbund und Rissverzahnung in unbewehrten Betonschubfugen*. Dissertation. TU München.
- [Reschke 2001] Reschke, T. 2001. *Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton*. Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000. Düsseldorf: Verlag Bau+Technik GmbH
- [Richard 1995] Richard, P., Cheyrezy, M. 1995. *Composition of reactive powder concretes*, in: Cement and Concrete Research 25 (7), pp. 1501-1511
- [RILEM 1982] RILEM 1982. *Test methods for concrete*.
- [Röhling 2009] Röhling, S. 2009. *Zwangsspannungen infolge Hydratationswärme*. 2. Aufl., 1 Bd. Düsseldorf: Verlag Bau+Technik GmbH.
- [Roussel 2005a] Roussel, N., Stefani, C., R. Leroy, R. 2005. *From mini-cone test to Abrams cone test: measurement of cement-based materials yield stress using slump tests*, in: Cement and Concrete Research 35, 827-822.
- [Roussel 2005b] Roussel, N., Coussot, P. 2005. *"Fifty-cent rheometer" for yield stress measurements: From slump to spreading flow*. Journal of Rheology 49, 705–718.
- [Rumpf 1958] Rumpf, H. 1958. *Grundlagen und Methoden des Granulierens*, in: Chemie Ingenieur Technik 30(3), 144–158.
- [Rumpf 1974] Rumpf, H. 1974. *Die Wissenschaft des Agglomerierens*, in: Chemie Ingenieur Technik 78(1), 1–46.
- [Saint-Gobain 2006] Saint-Gobain, D. G. 2006. *Zusammensetzung und Herstellung von Float-Glas*. URL: http://www.deutsche-glas.sggs.com/SGGS_DEUTSCH/images/FCK/Zusammensetzung%20und%20Herstellung.pdf [Zugriffsdatum: 2011-02-11].
- [Santner 2011] Santner, G., Freytag, B., Juhart, J. et al. 2011, submitted. *Adhesive Power of Ultra High Performance Concrete from a thermodynamic point of view*, in: ASCE (American Society of Civil Engineers). Journal of Materials in Civil Engineering.
- [Schachinger 2002] Schachinger, I. 2002. *Rissemempfindlichkeit von ultrahochfestem Beton infolge behinderter autogener Verformung.: Workshop über Schwinden von Baustoffen*. FH Augsburg. URL: <http://www.betonxpert.de/download.html> [Zugriffsdatum: 2010-10-26].
- [Schachinger 2007] Schachinger, I. 2007. *Maßnahmen zur Herstellung von rissfreien Bauteilen aus ultrahochfestem Beton mit hoher Duktilität*. Dissertation. TU München.

- [Schäfer 1996] Schäfer, H. G., Block, K., Drell, R. 1996. *Oberflächenrauheit und Haftverbund*, in DAFStb Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hg.): *Heft 456*. Berlin: Beuth, 77–93.
- [Schleibinger 2011] Schleibinger Geräte Teubert u. Greim GmbH 2011. *Schleibinger Testing Systems - Schwindrinne*. URL: <http://www.schleibinger.com/cmsimple/?Schwinden:Schwindrinne> [Zugriffsdatum: 2011-02-14].
- [Schmidt 2003] Schmidt, M.; Fehling, E.; Bornemann, R.; Bunje, K.; Teichmann, T. 2003. *Ultra-Hochfester Beton: Perspektive für die Betonfertigteilindustrie*, in: *Beton - Fertigteil Technik*, 03/2003
- [Schmidt 2004] Schmidt, M., Fehling, E.; Geisenhanslüke, C. 2004. *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).
- [Schmidt 2007] Schmidt, M., Krelaus, R., Teichmann, T. et al. 2007. *Fügen von Bauteilen aus UHPC durch Kleben. Voruntersuchungen und Anwendung bei der Gärtnerplatzbrücke in Kassel*, in: *Beton- und Stahlbetonbau* 102(10).
- [Schmidt 2008] Schmidt, M., Bunje, K., Dehn, F. et al. 2008. *Sachstandsbericht Ultrahochfester Beton*. 1. Aufl. Berlin: Beuth. (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 561).
- [Schmidt 2010a] Schmidt, M. 2010. *Whitetopping' with ultra-thin layers of High and Ultra High Performance Concrete*. 11th International Symposium on Concrete Roads (Betonstraßenkongress) Sevilla, 13. - 14. Oktober 2010
- [Schmidt 2010b] Schmidt, M., Jerebic, D. 2010. *Nachhaltigkeit von Bauwerken aus UHPC*, in: *BWI – BetonWerk International*, Heft 3, S. 50ff.
- [Schroeder 2010] Schroeder, H. 2010. *Lehmbau: Mit Lehm ökologisch planen und bauen*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- [Schutter 1997] Schutter, G. de, Taerwe, L. 1997. *Fracture energy of concrete at early ages*, in: *Materials and Structures* 30, 67–71.
- [Smekal 1936] Smekal, A. 1936. *Die Festigkeitseigenschaften fester Körper*. Berlin: Springer-Verlag.
- [Sparowitz 2010] Sparowitz, L., Freytag, B., Reichel, M. 2010. *Nachhaltige Brücken aus faserverstärktem Ultrahochleistungsbeton (UHPFRC)*, in: Stritzke, J. (Hg.): *Dresdner Brückenbausymposium 2010*. Technische Uni Dresden
- [Stark 2000] Stark, J., Wicht, B. 2000. *Zement und Kalk: Der Baustoff als Werkstoff*. Basel: Birkhäuser. (Baupraxis).
- [Staudacher 2009] Staudacher, H. P. 2009. *Haftung von UHPC auf Glas mit unterschiedlich rauen Oberflächen*. Diplomarbeit. Fachhochschule Kärnten.

- [Stout 2000] Stout, K. J., Blunt, L., Dong, W. P. 2000. *Three-dimensional surface topography*. 2. ed. London.
- [Strunz 2001] Strunz, H., Nickel, E. H. 2001. *Strunz mineralogical tables: Chemical-structural mineral classification system*. 9. ed. Stuttgart: Schweizerbart.
- [Swiridenok 1990] Swiridenok, A., Chischik, S., Petrokowitz, M. 1990. *Mechanik eines diskreten friktionalen Kontakts (russ.)*. Minsk.
- [Teichmann 2007] Teichmann, T. 2007: *Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein*, Dissertation, Kassel: Univ. Press. (Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 12)
- [Thomann 2007] Thomann, M., Lebet, J.-P. 2007. *Design method for connections by adherence for steel–concrete composite bridges*, in: *Structural Engineering International* 16(1), 86–93.
- [Thomann 2008] Thomann, M., Lebet, J.-P. 2008. *A mechanical model for connections by adherence for steel-concrete composite beams*, in: *Engineering Structures* 30(1), 163–173.
- [Tipler 2009] Tipler, P. A., Mosca, G. 2009. *Physik: für Wissenschaftler und Ingenieure*. 6. Aufl. Heidelberg: Spektrum, akademischer Verlag.
- [Tausch 2000] Tausch, J. L. 2000. *Verhalten der grenzflächennahen Zone von Instandsetzungs- und Schutzsystemen für Stahlbeton*. Dissertation. ETH Zürich. URL: <http://e-collection.library.ethz.ch/view/eth:23395>.
- [Tretau 2008] Tretau, A. 2008. *Einfluss der Prozessführung auf den thermischen Energiebedarf von Konvektionstrocknern in der Ziegelindustrie*. Uni Magdeburg.
- [Tritthart 1989] Tritthart, J. 1989. *Zur Korrosion von Stahl in Beton*, in: *Österr. Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift*, 134.Jg, Heft 12
- [Tritthart 2011] Tritthart, J. 2011. *Gesprächsnotiz mit Ao.Univ.-Prof. Dr.phil. J. Tritthart*, Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie TU Graz
- [TU Ilmenau 2011] TU Ilmenau - Fachgebiet Graphische Datenverarbeitung 2011. *Grundlagen der Weißlichtinterferometrie*. URL: <http://www.tu-ilmenau.de/fakia/Grundlagen-der-Weiss.6302.0.html> [Zugriffsdatum: 2011-05-03].
- [TU Graz 2011] Rektorat der TU Graz 2011. *Richtlinie des Rektorates der Technischen Universität Graz zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis und zur Vermeidung von Fehlverhalten in der Wissenschaft (Commission for Scientific Integrity and Ethics)*. Version 1.1 verlautbart im Mitteilungsblatt vom 1.10.2008. URL: http://portal.tugraz.at/portal/page/portal/Files/Services/files/RL_GuteWissPraxis.pdf [Zugriffsdatum: 2011-05-03]

- [Tue 2004] Tue, N. V., Dehn, F. et al. 2004. *Das Verbundrohr als Innovationsmotor für hybrides Bauen*, Schlussbericht an Bilfinger Berger AG, nicht veröffentlicht. Bericht. Uni Leipzig.
- [VDZ 2006] VDZ-Verein Deutscher Zementwerke e.V. 2006. *Risse im Beton - Zement-Merkblatt*.
- [Wenzel 1936] Wenzel, R. N. 1936. *Resistance of Solid Surfaces to Wetting by Water*, in: *Industrial and Engineering Chemistry* 28(8), 988–994.
- [Wesche 1993] Wesche, K., Schubert, P. 1993. *Beton, Mauerwerk (Nichtmetallisch-anorganische Stoffe): Herstellung, Eigenschaften, Verwendung, Dauerhaftigkeit*. 3., völlig Neubearb. u. erw. Aufl. Wiesbaden: Bauverl. (Baustoffe für tragende Bauteile, Bd. / von Karlhans Wesche ; Bd. 2Bd).
- [Wittmann 1977] Wittmann, F. H. 1977. *Grundlagen eines Modells zur Beschreibung charakteristischer Eigenschaften des Betons*: Beuth. (290).
- [Zeiss 2011] Carl Zeiss MicroImaging GmbH 2011. *Stereomikroskop Discovery V12*. URL: <http://www.vision.zeiss.com/> [Zugriffsdatum: 2011-04-14].
- [Zilch 2003] Zilch, K., Reinecke, R., Bertelmann, S. 2003. *Oberflächenrauheit von Betonschubfuge - Erzeugung, Messung und Parameter zur Bestimmung unterschiedlicher Rauheiten*. *Bauingenieur* 78, 541–547.
- [Zilch 2009] Zilch, K., Lenz, P. 2009. *Beton-Beton-Verbund-Potenziale für Neubau und Ertüchtigung*, in: *Bauingenieur*, 466–471.
- [Zimbelmann 1996] Zimbelmann, R. 1996. *A Contribution to the Problem of Cement-Aggregate Bond*, in: *Cement and Concrete Research*, Vol. 15, 1985, pp. 801-808. In [Maso 1996]

A Anhang (elektronisch auf CD-ROM)

A.1 Materialparameter

A.1.1 Technische Daten der UHPC Mischungsbestandteile

A.1.2 Daten der Oberflächentopografie von Stahl und Glas

Oberflächenkennwerte tabellarisch

Bilder und Darstellungen der unterschiedlichen Rauheiten

A.1.3 Kontaktwinkelmessungen, Bestimmung der Oberflächenenergie

Messungen an glatten und rauen Stahl- und Glasoberflächen

Messungen an erhärtetem UHPC EM und UHPC DM

Messungen an in Ca(OH)_2 eingelagertem glattem Stahl

A.2 Makroebene: Untersuchungen des Haftverbundes

A.2.1 Haftzugprüfungen

Ergebnisse tabellarisch

Prüfprotokoll mit Wegmessung

A.2.2 FEM-Berechnungen - Analyse der Eigenspannungen etc.

Ergebnisse in Protokollen

A.2.3 Haftschubprüfungen

Ergebnisse tabellarisch

Prüfprotokoll

A.2.4 Protokoll der Aufschüsselungs-Messungen und Begleituntersuchungen

A.2.5 Dokumentation der Bruch- und Rissbilder

Bruchbilder und Zonierung

Rissbilder und Vermessung

A.3 Mikroebene: Licht- und Elektronenmikroskopie

A.3.1 Rissentwicklung in der Grenzfläche

A.3.2 Bruchflächen-Untersuchungen

Lichtmikroskopie-Aufnahmen

Aufnahmen mit dem Elektronenmikroskop und

Sondertechniken: IR-Spektroskopie, Raman

schichtweises Abschleifen, Elektronenmikroskopie

A.3.3 Elektronenmikroskopie von Verbundproben im Querprofil

A.4 Zusammenwirken der Einflussfaktoren

A.4.1 Korrelationen zwischen den untersuchten Größen

A.4.2 Beispielrechnung zu den Rissabständen