

# **Bruch- und Selbstheilungsverhalten von Schichtverbunden aus bituminöser Abdichtungsbahn und Betonoberfläche**

**DIPLOMARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Diplom-Ingenieur**

im Rahmen des Studiums

**Physikalische Energie- und Messtechnik**

eingereicht von

**Gerald Holzlechner**

Matrikelnummer 0625611

an der  
Fakultät für Physik der Technischen Universität Wien,  
durchgeführt im Labor für Materialwissenschaften am  
Institut für Hochbau und Technologie E206/4

Betreuer: Prof. Dipl.-Ing. Dr.tech. Elmar Tschegg

Wien, 04.08.2010

\_\_\_\_\_  
(Unterschrift Verfasser/in)

\_\_\_\_\_  
(Unterschrift Betreuer/in)



## **Kurzfassung**

### **Bruch- und Selbstheilungsverhalten von Schichtverbunden aus bituminöser Abdichtungsbahn und Betonoberfläche**

Fehlerhafte Abdichtungssysteme führen zu einer Durchfeuchtung und folglich zu einer Schädigung von Bauwerken. Das Eindringen von Wasser verursacht Schimmelbefall, verringert den Wärmeschutz und die Festigkeit der Bauwerke. Eine Schadensbehebung ist wegen der meist schwer durchführbaren Instandsetzungsmaßnahmen mit hohen Kosten verbunden.

Eine Schädigung des Abdichtungssystems wird durch einen mangelhaften Verbund zwischen den Schichten der Abdichtungsbahn und Betonoberfläche hervorgerufen. Folglich hängt die Lebensdauer und Wirksamkeit eines Abdichtungssystems wesentlich von der mechanischen Qualität des Schichtverbundes aus bituminöser Abdichtungsbahn und Betonoberfläche ab. Um diese Bauschäden zu verhindern, ist eine Charakterisierung des Beton-Bitumen Haftverbundes erforderlich. Zur Bewertung und Verbesserung des Verbundes findet in der Praxis am häufigsten der Haft-Zugversuch seine Anwendung. Mit dem Haft-Zugversuch kann jedoch nur ein maximaler Festigkeitswert des Schichtverbundes gewonnen werden.

In dieser Diplomarbeit wird zur Charakterisierung neben dem Haft-Zugversuch zusätzlich die Keilspaltmethode nach Tschegg eingesetzt. Mit der Keilspaltmethode kann die Bruchenergie, der Risswiderstand und die Kerbbiegezugfestigkeit des Schichtverbundes bestimmt werden. Anhand dieser bruchmechanischen Werte kann zwischen sprödem und zähem Bruchverhalten unterschieden werden. Der Schwerpunkt der durchgeführten Materialprüfungen liegt in der messtechnischen Erfassung von unterschiedlichen Haftverbunden, die in der Oberflächengestaltung der Betonplatten und in der Wahl der Voranstriche variieren.

Weiters wird der Selbstheilungseffekt von Rissen in bituminösen Haftverbunden überprüft. Bituminöse Abdichtungsbahnen werden, neben den Einflüssen der Feuchtigkeit, der Umwelt und mechanischen Beanspruchung am stärksten durch die Temperatur beeinflusst. Vor allem bei Flachdächern und Terrassen kann es zu Temperaturschwankungen von  $-30^{\circ}\text{C}$  bis  $+90^{\circ}\text{C}$  kommen. Zwischen diesen zyklischen Frost-Tau Beanspruchungen gibt es längere Rastperioden, in denen ein

Ausheileffekt verstärkt auftreten kann. Dieser Ausheileffekt wird für zwei Healingtemperaturen überprüft, um deren Einfluss bestimmen zu können.

Ziel der gegenständlichen Materialprüfungen stellt die Charakterisierung der mechanischen Qualität des Schichtverbundes dar, um eine Überprüfung von Abdichtungssystemen zu erreichen. Zur Optimierung der Lebensdauer wird des weiteren der Selbst- bzw. Ausheileffekt von Rissen in bituminösen Abdichtungsbahnen festgestellt.

## **Danksagung:**

An meine Eltern, Adelheid und Herbert Holzlechner, ohne deren Unterstützung mein Studium nie möglich gewesen wäre.

An Wolfgang Hubner, Institut für Flachdachbau und Bauwerksabdichtungen, für die Beratung zu den Materialprüfungen.

An Dipl.-Ing. Martin Peyerl, Vereinigung der österreichischen Zementindustrie, für die Beratung und für die Herstellung der Betonplatten.

An Wilhelm Schneidhofer, Firma Büsscher und Hoffmann, für die freundliche Unterstützung beim Flämmen der Betonplatten und für die Bereitstellung der benötigten Materialien.

An Prof. Dipl.-Ing. Dr.tech. Elmar Tschegg, Labor für Materialwissenschaften am Institut für Hochbau und Technologie, für die Ermöglichung und engagierte Betreuung dieser Diplomarbeit.

# Inhaltsverzeichnis

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>   | <b>11</b> |
| <b>2</b> | <b>Bruchmechanische Überlegungen und Rissentstehung</b>           | <b>14</b> |
| 2.1      | Rissentstehung im Haftverbund Beton und Abdichtungsbahn . . . . . | 14        |
| 2.2      | Das Bruchenergiekonzept . . . . .                                 | 19        |
| 2.3      | Weitere bruchmechanische Konzepte . . . . .                       | 21        |
| 2.3.1    | Linear elastische Bruchmechanik – LEBM . . . . .                  | 21        |
| 2.3.2    | Fliessbruchmechanik – FBM . . . . .                               | 23        |
| 2.3.3    | Crack-Opening-Displacement Konzept – COD Konzept . . . . .        | 24        |
| <b>3</b> | <b>Experimentelle Untersuchungen</b>                              | <b>26</b> |
| 3.1      | Herstellung der Betonplatten und Rauheitsmessung . . . . .        | 26        |
| 3.2      | Beschreibung der verwendeten Werkstoffe . . . . .                 | 33        |
| 3.3      | Probenpräparation . . . . .                                       | 35        |
| 3.4      | Temperaturbereiche und Healingverhalten . . . . .                 | 38        |
| <b>4</b> | <b>Prüfmethoden</b>   | <b>41</b> |
| 4.1      | Haft-Zugversuch . . . . .   | 41        |
| 4.1.1    | Vorbereitung der Probekörper . . . . .                            | 41        |
| 4.1.2    | Beschreibung der Prüfmethode . . . . .                            | 42        |
| 4.1.3    | Vor- und Nachteile des Haft-Zugversuchs . . . . .                 | 43        |
| 4.2      | Keilspaltmethode nach Tschegg . . . . .                           | 44        |
| 4.2.1    | Vorbereitung der Probekörper . . . . .                            | 44        |
| 4.2.2    | Beschreibung der Prüfmethode . . . . .                            | 44        |
| 4.2.3    | Vor- und Nachteile der Keilspaltmethode . . . . .                 | 50        |
| <b>5</b> | <b>Ergebnisse der Materialprüfungen</b>                           | <b>51</b> |
| 5.1      | Haft-Zugversuch . . . . .   | 51        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 5.1.1    | Rissverläufe . . . . .  | 51         |
| 5.1.2    | Haft-Zugfestigkeiten . . . . .  | 56         |
| 5.2      | Keilspaltversuche . . . . .   | 57         |
| 5.2.1    | Rissverläufe . . . . .  | 57         |
| 5.2.2    | Kerbbiegezugfestigkeiten und spezifische Bruchenergien . . .                                    | 60         |
| 5.3      | Healingverhalten . . . . .  | 72         |
| 5.3.1    | Allgemeines . . . . .   | 72         |
| 5.3.2    | Kerbbiegezugfestigkeiten und spezifische Bruchenergien bei<br>+23°C Healingtemperatur . . . . . | 74         |
| 5.3.3    | Kerbbiegezugfestigkeiten und spezifische Bruchenergien bei<br>+40°C Healingtemperatur . . . . . | 78         |
| 5.3.4    | Diskussion zu den Ergebnissen der Healingversuche . . . . .                                     | 81         |
| <b>6</b> | <b>Zusammenfassung</b>  | <b>85</b>  |
| <b>7</b> | <b>Projektmanagement</b>  | <b>91</b>  |
|          | <b>Literaturverzeichnis</b>   | <b>99</b>  |
|          | <b>Abbildungsverzeichnis</b>  | <b>102</b> |
|          | <b>Tabellenverzeichnis</b>  | <b>106</b> |

# 1 Einleitung

Das Abdichten von Bauwerken soll verhindern, dass Wasser einen schädigenden Einfluss auf Teile des Bauwerks ausübt. Dazu sind Schichten aus nicht durchströmbar Werkstoffen notwendig, die mit den Betonoberflächen verklebt werden und dadurch das Eindringen von Feuchtigkeit verhindern. Die jüngste Entwicklung dieser Schichten stellen die Schweißbahnen dar [Czi01]. Sie bestehen aus Bitumenbahnen mit eingebetteter Trägereinlage aus Polyesterfasern, mit der man durch Verschweißen große Flächen lückenlos wasserundurchlässig herstellen kann. Dabei wird mit offener Flamme die Oberfläche der Schweißbahn und die mit einem Bitumenvoranstrich versehene Betonoberfläche so weit verflüssigt, dass die Oberflächen durch Abrollen und Anpressen der Schweißbahn einen Schichtverbund bilden. Dieser Arbeitsablauf wird als „Flämmen“ bezeichnet.

Abdichtungsmaßnahmen erfordern eine besondere Sorgfalt in Planung und Ausführung, da die Schadensbehebung meist schwer durchführbar und mit sehr hohen Kosten verbunden ist. Laut dem „2. Österreichischen Bauschadensbericht“ machen die durch die Einwirkung von Wasser beanspruchten Bauteilgruppen fast fünfzig Prozent der Bauschäden im Hochbau aus [BHRS08]. Diese Bauschäden können zum Eindringen des Grundwassers in das Bauwerk führen, verringern aufgrund der Durchfeuchtung den Wärmeschutz sowie die Festigkeit mancher Bauteile und verursachen Schimmelbefall [Böh09]. Häufige Ursachen der entstandenen Wasserschäden sind nicht haftende, brüchige, teilweise fehlende Abdichtungen und nicht der ÖNORM B [22002] entsprechende Betonoberflächen. Folglich hängt die Lebensdauer und Wirksamkeit eines Abdichtungssystems häufig von der Haftung zwischen Abdichtungsbahn und Betonoberfläche ab. Dieser Schichtverbund muss hinsichtlich des Verformungsverhaltens, der Zugfestigkeit, Kälteflexibilität und Wärmestandfestigkeit hohen Anforderungen genügen [Czi01].

Für die Optimierung und Überprüfung von Abdichtungssystemen ist die Charakterisierung der „mechanischen Qualität“ des Verbundes zwischen den Schichten

von großer Bedeutung. Das gegenständig am häufigsten verwendete Prüfverfahren ist der Haft-Zug Versuch ÖNORM B [36397]. Durch das Ablösen der Bitumenbahn vom Untergrund bildet sich der Riss entweder im Interface Bitumenbahn-Betonoberfläche oder nur in der Bitumenbahn aus. Bei dem vorher genannten Prüfverfahren stellt die Haft-Zug-Festigkeit die einzige Messgröße dar, die jedoch keine Rückschlüsse auf die physikalische Ursache des Versagens erlaubt. So wird keine Information darüber gewonnen, ob der Bruch spröde oder zäh erfolgt, bzw. ob zur Schichttrennung wenig Energie (spröder Bruch) oder viel Energie (zäher Bruch) erforderlich ist. Mit Einführung der Bruchmechanik [GS07] entstanden neue Prüfverfahren, zum Beispiel die „Keilspaltmethode“ [Tsc86], aus denen charakteristische bruchmechanische Werte, wie die spezifische Bruchenergie beziehungsweise der Risswiderstand, abgeleitet werden können.

In dieser Diplomarbeit werden die mechanischen und bruchmechanischen Eigenschaften der Interfaces zwischen Elastomerbitumenbahn und Betonoberfläche untersucht. Dazu wurden Probekörper mit unterschiedlich behandelte Betonoberfläche und verschiedenen Voranstrichen verwendet. Es soll untersucht werden, inwiefern durch entsprechende Gestaltung der Oberfläche und Wahl eines geeigneten Voranstrichs die mechanischen und bruchmechanischen Werte des Schichtverbundes beeinflusst werden. Um die Temperaturabhängigkeit der mechanischen und bruchmechanischen Eigenschaften zu zeigen, werden die Haft-Zug Versuche bei  $0^{\circ}\text{C}$  und  $+23^{\circ}\text{C}$ , die Keilspalt-Versuche bei  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $+10^{\circ}\text{C}$  und  $+23^{\circ}\text{C}$  durchgeführt [TKT<sup>+</sup>95][TTSL96]. Zur Charakterisierung der Oberflächenbeschaffenheit werden mithilfe eines, an der TU Wien entwickelten, stereoskopischen Verfahrens [Pos09] die Rauheitswerte bestimmt.

Bituminöse Abdichtungsbahnen können als Dach- oder Terrassenabdichtung schnell verwittern, da sie ständigen Klimaänderungen ausgesetzt sind. Vor allem durch Temperaturschwankungen verliert das Bitumen an Elastizität und wird spröde. Es entstehen kleine Risse, durch die Wasser oberflächlich in die Abdichtungsbahn eindringt. In der nächsten Frostperiode gefriert das Wasser, dehnt sich aus und setzt die Oberfläche der Abdichtungsbahn unter mechanische Spannung. Diese Spannungen tragen dazu bei, dass das Interface zwischen Betonoberfläche und Abdichtungsbahn geschädigt wird, die Risse immer größer werden, das Wasser in den Untergrund eindringt und die Bausubstanz durchfeuchtet.

Um diese Bauschäden zu verringern, wird im Zuge dieser Arbeit der Ausheil- bzw. Selbstheilungseffekt von Rissen in bituminösen Haftverbunden geprüft. Unter bestimmten Voraussetzungen kann der Mechanismus des Ausheilens die Lebensdauer eines geschädigten Materialverbundes wesentlich erhöhen. Dieser Selbstheilungseffekt ist im Englischen Sprachgebrauch unter dem Begriff „Healing“ oder „Rewelding“ bekannt [JTTS01]. Als charakterisierende Messmethode wird die Keilspalteinrichtung verwendet, wobei die aus diesem Verfahren berechneten Materialkennwerte als determinierende Größen für die Beschreibung des Healing-Effektes herangezogen werden. Jede Probe muss folgenden Messzyklus bis zu zehn Mal durchlaufen: Kühlung – Bruchprüfung – Erwärmen und Schließen des Risses – Heilung des Risses – Kühlung. Die Materialprüfungen wurden bei  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$  und  $+23^{\circ}\text{C}$  durchgeführt. Die Temperatur während der Heilungsphase wurde variiert,  $+23^{\circ}\text{C}$  und  $+40^{\circ}\text{C}$ , um deren Einfluss auf den Heilungseffekt erfassen zu können.

## 2 Bruchmechanische Überlegungen und Rissentstehung

### 2.1 Rissentstehung im Haftverbund Beton und Abdichtungsbahn

In diesem Kapitel wird das Bruchverhalten von Schichtverbunden aus Beton und bituminöser Abdichtungsbahn dargestellt. Zur grundlegenden Betrachtung der Rissentstehung und Rissausbreitung in Haftverbunden bituminöser Schichten wird ein quaderförmiger Probekörper mit aufgeflämmter Bitumenbeschichtung und Betongegenstück verwendet, siehe Abbildung 2.1.

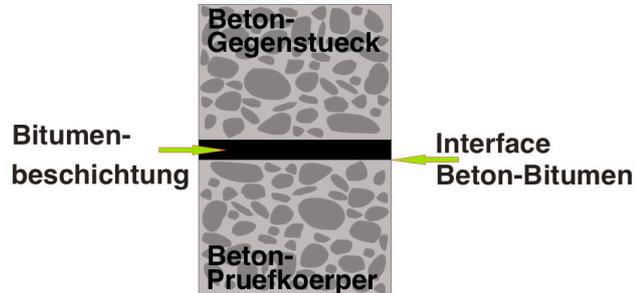


Abbildung 2.1: Schematisierter Probekörper

Der Probekörper wird auf Zug senkrecht zur Haftverbundebene beansprucht. In Abbildung 2.2 sind Querschnitte des Probekörpers während unterschiedlicher Belastungsstufen schematisch dargestellt.

Wirkt auf den Probekörper in Abbildung 2.2 eine Zugkraft  $F$ , so verlängert sich dieser um den Weg  $s$ . Durch eine messtechnische Erfassung beider Größen erhält man ein Kraft-Verschiebungsdiagramm (KVD). Durch die elastischen Eigenschaften des Werkstoffes ergibt sich in diesem Kraft-Verschiebungsdiagramm

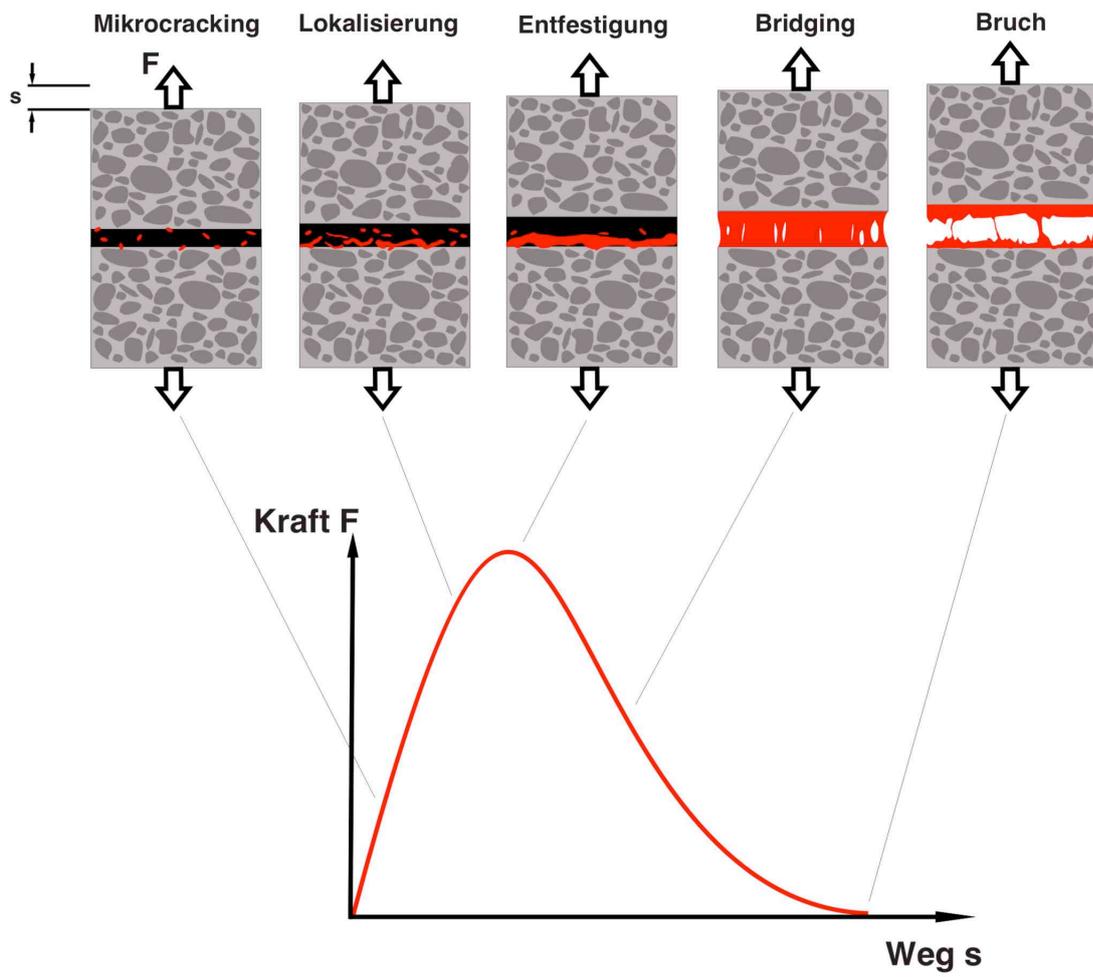


Abbildung 2.2: Mechanismus der Rissinitiierung und Rissausbreitung

ein linearer Anstieg. Mit der Erhöhung der Kraft treten bereits Schwachstellen auf, an denen es zur Mikrorissbildung, beziehungsweise zur Schädigung des Verbundes kommt. Die entstehenden Mikrorisse sind in Abbildung 2.2 schematisch mit roter Farbe gekennzeichnet. Diese Phase nennt man „Microcracking“ [TTSL96]. Mit zunehmender Zugbeanspruchung der Probe nimmt die Anzahl und Länge der Mikrorisse, bzw. der Grad der Schädigung, zu. Diese Phase nennt sich „Lokalisierung“. Die Schädigungen des Schichtverbundes bewirken ein Abweichen vom linearen Anstieg im Kraft-Verschiebungsdiagramm. Ab einem gewissen Grad konzentriert sich die Schädigung auf einen schmalen Bereich des Verbundes. Dieser Bereich ist die sogenannte Entfestigungszone, in der sich die Mikrorisse zu einem Makroriss bilden. Bei weiterer Verlängerung des Probekörpers konzentriert sich die Schädigung nur noch auf die Entfestigungszone.

Die Kraft-Weg-Kurve hat das Maximum überschritten und fällt wieder ab. Mit steigendem Wegwert  $s$  wird die Kraftübertragung der oberen zur unteren Hälfte des Probekörpers zunehmend von Bridging-Mechanismen übernommen. Unter dem Begriff „Bridging“ versteht man die Bildung von plastisch verformbaren Bitumenbrücken zwischen den Bruchflächen. Weitere Bridging-Elemente können Fasern im Bitumen sein, die den Riss überbrücken und somit auch Energie konsumieren. Durch zunehmende Verlängerung des Probekörpers erreicht man den vollständigen Bruch, in der schließlich alle „Brücken“ zwischen den Probhälften aufgetrennt sind und die Kraft-Weg-Kurve die horizontale Achse erreicht.

Der Verlauf des Kraft-Verschiebungsdiagramms ist charakteristisch für das Bruchverhalten eines Schichtverbundes, wie anhand Abbildung 2.3 besser verdeutlicht wird. In dieser Abbildung sind Kraft-Verschiebungsdiagramme eines spröden und eines „duktilen“ Beton-Bitumen Schichtverbundes dargestellt.

Bei der spröden Verbundtrennung steigt die Kurve bis zum Maximum nahezu linear an. Daraus kann man auf eine geringe plastische Verformung sowie auf wenige Mikrorissinitiierungen schließen. Nach dem Erreichen des maximalen Kraftwertes fällt die Kurve stark ab. Dies weist auf eine schwache Ausbildung von Bridging-Effekten hin. Bereits nach geringer Verlängerung der Probe kommt es zur vollständigen Trennung des Probekörpers im Interface (Weg  $s = \text{klein}$ ). Eine spröde Charakteristik im KVD erkennt man bei kalten bituminösen Schichtverbunden.

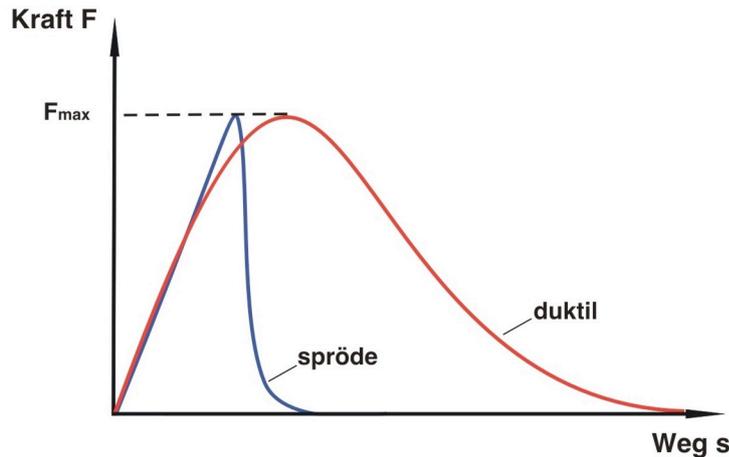


Abbildung 2.3: Kraft-Weg-Kurve einer spröden und einer „duktilen“ Verbundtrennung

Eine zähe oder „duktil“ Verbundtrennung zeigt hingegen ein nichtlineares Verhalten des Kurvenanstiegs, gefolgt von einem „abgerundeten“ Maximum und einem flachen Abfall im „Post-Peak“ Bereich, das zum Beispiel durch die Wirkung von Bridging-Effekten hervorgerufen wird. Die vollständige Trennung der beiden Probekörpern wird erst bei größeren Wegwerten erreicht (Weg  $s$  = hoch).

Die bisherige Betrachtung im Bauwesen erfolgte an glatten, ungekerbten zylindrischen Probekörpern bei reiner Zugbeanspruchung, wie dies beim Haft-Zugversuch nach ÖNORM B [36397] der Fall ist. In der Praxis tritt diese Art der Beanspruchung jedoch selten auf. Meist handelt es sich dort um bi- oder multiaxiale Beanspruchungen, die an gekerbten oder bereits mit Rissen versehenen Schichten wirken. Im Folgenden wird das oben beschriebene Modell auf einseitige Zugspannungen umgesetzt. In Abbildung 2.4a ist ein ungekerbter Probekörper mit gelblicher Entfestigungszone schematisiert und entspricht dem bisherigen Betrachtungsschema.

Ist ein gekerbter Probekörper einer einseitigen Zugbelastung ausgesetzt, wie in Abbildung 2.4b, bildet sich keine, den ganzen Probekörper durchziehende Entfestigungszone, sondern es entsteht am Kerbgrund, bzw. an der Rissspitze eine sogenannte Prozesszone. In dieser Zone laufen die Prozesse, wie Mikrocracking und plastische Verformung ab, wie dies in Abbildung 2.5 für einen Randabschnitt eines Schichtverbundes aus Beton-Bitumenbahn dargestellt wird.

Das Beton-Bitumen Interface enthält eine Starterkerbe und die Probe wird mit

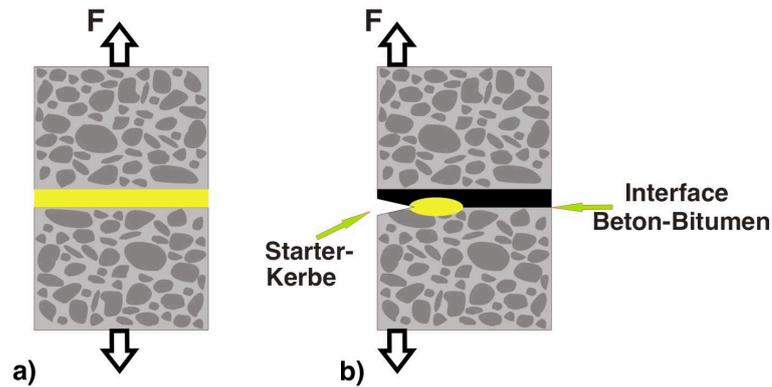


Abbildung 2.4: a) Entfestigungszone im ungekerbten Probekörper unter Zugbeanspruchung; b) Prozesszone im gekerbten Probekörper unter einseitiger Zugbeanspruchung

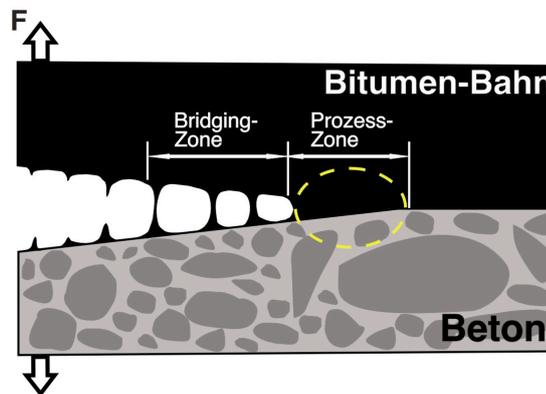


Abbildung 2.5: Rissausbreitung im Interface Beton-Bitumenbahn

einer Kraft  $F$  belastet. Mit zunehmender Beanspruchung kommt es zur Ausbildung einer Prozesszone, die entlang des Interfaces wandert und zu einer Rissverlängerung führt. Links von der Prozesszone bildet sich die „Bridgingzone“ aus. Haben die beiden Schichten unterschiedliche mechanische Eigenschaften, bilden sich Prozesszonen mit unterschiedlicher Ausdehnung in den beiden Schichten aus. Für das Bruchverhalten eines Haftverbundes ist daher die Ausbildung der Prozesszonen von wesentlicher Bedeutung. Bildet sich die Prozesszone als schmale, schlanke Linse aus, siehe Abbildung 2.4b, und hat im Schichtmaterial eine geringe Ausdehnung, dann wird der Bruchwiderstand gering sein. Ist die Prozesszone jedoch ausgedehnt, so laufen Mikrocracking- und Bridgingprozesse auch in benachbarten Bereichen der verbundenen Schichten und es kommt zu einem erhöhten Energiekonsum und

damit zu einem größeren Widerstand gegen die Rissausbreitung [TTSL96].

## 2.2 Das Bruchenergiekonzept

Zur Beurteilung der Verbundqualität von Bitumenbeschichtungen auf Betonoberflächen wird in der Baupraxis meist die Haft-Zugfestigkeit, also das Verhältnis der Maximalkraft zum Bruchquerschnitt, herangezogen. Wird aus den Kraft-Verschiebungsdiagrammen in Abbildung 2.3 der Haft-Zugwert für die spröde und duktile Verbundtrennung entnommen, so erhält man für das Bruchverhalten idente Haft-Zugfestigkeiten.

Die beiden Kurven in Abbildung 2.3 unterscheiden sich jedoch wesentlich in ihrer Form und Fläche. Dies zeigt deutlich, dass ein Spannungswert alleine das Bruchverhalten unzureichend beschreiben kann und eine Entscheidung über zähen oder spröden Bruch nicht mehr möglich ist. Man verliert wichtige Informationen über die Charakteristik des Bruches.

Konventionelle bruchmechanische Berechnungskonzepte, wie in Kapitel 2.3, erfordern die exakte Bestimmung der Risslänge. Dies stellt für einen heterogenen Werkstoff, zum Beispiel einen Beton-Bitumenverbund, ein nicht lösbares Problem dar. Die eigentliche Risspitze kann durch Rissverzweigungen und Bridgingeffekten nicht ausreichend lokalisiert werden. Durch die Bridgingeffekte verändert sich die Spannungsverteilung im Rissspitzenbereich, wie in Abbildung 2.6 gezeigt wird.

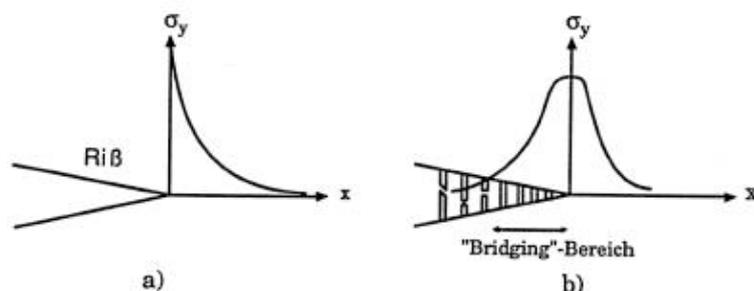


Abbildung 2.6: Spannungsverteilung im Rissspitzenbereich: a) homogenes ideal elastisches Material; b) heterogenes Material

Bei dem Bruchenergiekonzept nach Hillerborg [Hil83] geht die Risslänge nicht explizit in die Berechnung ein. Die Grundidee dieses Modells kann am besten an Hand eines dehnungsgesteuerten Zugversuches erklärt werden. Bei diesem Versuch

wird das vollständige Kraft-Verschiebungsdiagramm aufgenommen, siehe Abbildung 2.7.

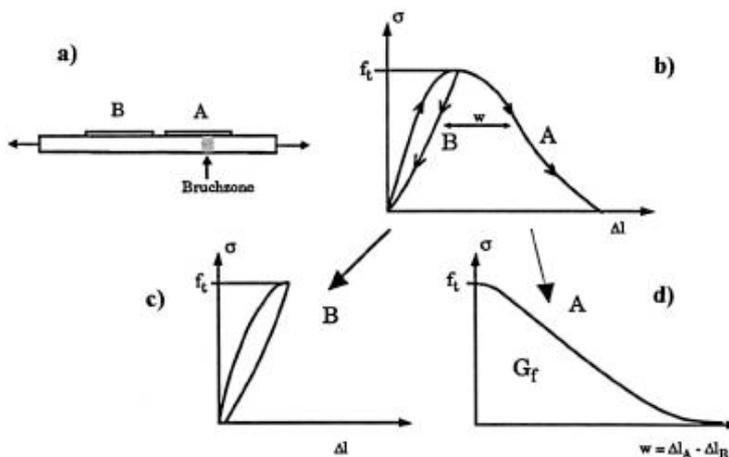


Abbildung 2.7: Bestimmung des vollständigen Kraft-Verschiebungsdiagramms (KVD) eines heterogenen Werkstoffes: a) Zugprobe; b) Vollständiges KVD; c) KVD im Bereich B; d) KVD im Bereich A

Die Verformung eines prismatischen Probekörpers wird an den Stellen A und B durch Wegaufnehmer bestimmt und das Resultat in einem KVD aufgezeichnet. Bis zum Erreichen der Maximallast stimmen die Kurven A und B überein. Bei weiterer Verformung bildet sich, angenommen im Punkt A, eine Bruchzone aus. Die weitere Verformung ist daher im Punkt A lokalisiert. Mit zunehmender Aufweitung dieser Bruchzone entfestigt sich der Werkstoff und die messbare Last nimmt ab. Die Verformung im Bereich des Aufnehmers B kann durch die Belastungs- und Entlastungskurven angegeben werden. Die Differenz der Verformung der Wegaufnehmer A und B stellt die Aufweitung  $w$  der Bruchzone dar. Mit dem Kraft-Verschiebungsdiagramm kann die Verformung der Bruchzone bis zur völligen Trennung beschrieben werden.

Die Fläche der Kraft-Wegkurve ist direkt proportional zur aufgewandten Arbeit, die notwendig war, den Bruch herbeizuführen. Die spezifische Brucharbeit oder Bruchenergie  $G_F$ , siehe Kapitel 4.2.2 Gleichung 4.6, setzt sich aus den, durch Mikrocracking, plastische Verformung und Bridging-Prozessen konsumierten Energiebeträgen zusammen und repräsentiert ein Maß für den Widerstand gegen Rissausbreitung im Schichtverbund. Weiters stellt sie einen Risswiderstand dar, der

von Größe und Form der Rissgeometrie unabhängig ist. Das Bruchenergiekonzept ist einfach und kann bei homogenen und heterogenen Werkstoffen angewendet werden.

## 2.3 Weitere bruchmechanische Konzepte

### 2.3.1 Linear elastische Bruchmechanik – LEBM

Das LEBM-Konzept (Linear elastische Bruchmechanik-Konzept) ermöglicht unter folgenden Annahmen eine quantitative Erfassung des Bruchverhaltens: Einerseits muss bis zum Bruch eine linear-elastische Verformung vorliegen und andererseits muss die Energie bei der Rissausbreitung konstant und von der Risslänge unabhängig sein. Außerdem darf die plastische Zone, bzw. die Prozesszone, nur eine vernachlässigbar kleine Ausdehnung gegenüber anderen Größen wie die Risslänge haben [TTSL96]. Die Rissbildung in heterogenen Werkstoffen, wie Beton oder Bitumen, weicht jedoch deutlich von den oben genannten Voraussetzungen ab. Zum Verständnis der nichtlinearen Phänomene sind jedoch die grundlegenden Aussagen der LEBM unverzichtbar. Diese werden nachfolgend im erforderlichen Ausmaß beschrieben.

Man unterscheidet die unterschiedlich bezeichneten Spannungsintensitätsfaktoren  $K_I$ ,  $K_{II}$  und  $K_{III}$  je nach Belastungstyp, siehe Abbildung 2.8 [Rossmannith 1999].

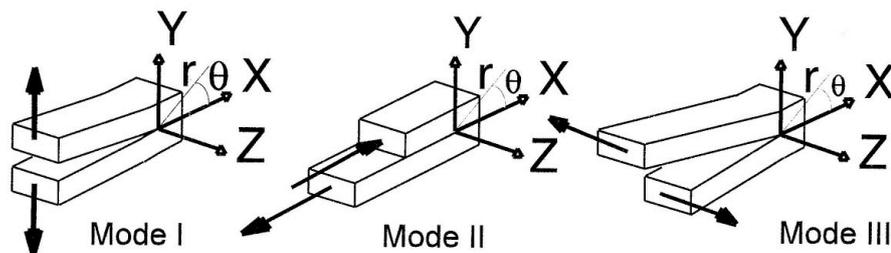


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung der Rissöffnungsarten Mode I, II und III

„Mode I“ bezeichnet eine Rissöffnung, bei der eine Zugspannung zum symmetrischen Abheben der Ränder führt. In „Mode II“ erfolgt eine Längsscherung, bei der ein ebener Schub das Abgleiten der Rissoberfläche in der Rissebene bewirkt. Unter „Mode III“ versteht man eine Querscherung, wobei hier ein nicht ebener Schub zum

Verschieben der Rissoberflächen quer zur Rissrichtung führt. Die Rissöffnungsart „Mode I“ tritt bei Rissausbreitungen häufig auf und ist im Anwendungsbereich von großer Bedeutung. Sie ist beispielsweise bei Bauteilen mit Innen- und Oberflächenrissen, die durch Zug- oder Biegebeanspruchung entstehen, wirksam. Im vorliegenden Versuchsprogramm mit der Keilspaltmethode wird daher die Ausbreitung von „Mode I“ Rissen untersucht.

Die räumliche Spannungsverteilung bei dieser Beanspruchungsart kann mit den Williams-Irwin-Gleichungen [WI57] angegeben werden, siehe anschließende Formeln.

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2.1)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2.2)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (2.3)$$

$$K_I = \sigma Y \sqrt{\pi a} \quad (2.4)$$

$$K_{Ic} = \sigma_f Y \sqrt{\pi a} \quad (2.5)$$

|                            |   |                                       |
|----------------------------|---|---------------------------------------|
| $\sigma$ .....             | Angelegte Spannung                                  | $\left[ \frac{N}{mm^2} \right]$       |
| $\sigma_f$ .....           | Bruchspannung                                       | $\left[ \frac{N}{mm^2} \right]$       |
| $\sigma_x, \sigma_y$ ..... | Angelegte Spannung in x-, bzw. in y-Richtung        | $\left[ \frac{N}{mm^2} \right]$       |
| $\tau_{xy}$ .....          | Scherspannung                                       | $\left[ \frac{N}{mm^2} \right]$       |
| $K_I$ .....                | Spannungsintensitätsfaktor                          | $\left[ \frac{N}{\sqrt{m^3}} \right]$ |
| $K_{Ic}$ .....             | Kritischer Spannungsintensitätsfaktor               | $\left[ \frac{N}{\sqrt{m^3}} \right]$ |
| $r, \theta$ .....          | Polarkoordinaten in x/y-Ebene                       |                                       |
| $Y$ .....                  | Funktion aus Geometrie der Probe und Belastungsform |                                       |
| $a$ .....                  | Risslänge   | $[m]$                                 |

Der Spannungsintensitätsfaktor  $K_I$  stellt dabei jene Größe dar, die den Einfluss der äußeren Belastung, Bauteilgeometrie, Risslänge, Rissform und Lastanordnung verknüpft. Als Bruchkriterium der LEBM wird jener kritische Spannungsintensitätswert  $K_c$  eines rissbehafteten Bauteils herangezogen, bei dem ein instabiler Rissfortschritt einsetzt. Der Minimalwert von  $K_c$  wird als Bruch- oder Risszähigkeit  $K_{Ic}$  bezeichnet. Dieser Wert ist eine Werkstoffkenngröße, die bei der bruch-

mechanischen Charakterisierung von hochfesten, metallischen Werkstoffen routinemäßig nach genormten Vorschriften bestimmt wird.

Bei Anwendung dieses Konzeptes muss die Risslänge zur Berechnung des Spannungsintensitätsfaktors mit ausreichender Genauigkeit bekannt sein. Bei bituminösen Werkstoffen ist diese Bedingung meist nicht erfüllt, außer bei tiefen Temperaturen (kleiner  $-20^{\circ}\text{C}$ ). Die LEBM scheidet daher zur Beurteilung von Riss- und Bruchproblemen in Beton-Bitumengrenzflächen einerseits aufgrund des plastisch-viskoelastischen Verhaltens des Bitumens und andererseits wegen der ungenauen Risslängenerfassung aus. Ein weiterer Grund für die Nichtanwendbarkeit dieses Konzeptes ist das Auftreten von Bridging-Effekten im Beton-Bitumenverbund. Diese Bridging-Effekte verursachen eine markante Veränderung der Spannungsverteilung an der Rissspitze, die beim LEBM-Konzept nicht akzeptiert werden.

### 2.3.2 Fließbruchmechanik – FBM

In der Fließbruchmechanik (FBM) sind größere plastische Verformungen vor der Rissspitze erlaubt. Die FBM ermöglicht die Ermittlung bruchmechanischer Werkstoffkenngrößen außerhalb der Gültigkeitsgrenzen der LEBM, bzw. ermöglicht das Aufstellen von Bruchkriterien für elastisch-plastisches Werkstoffverhalten. Mit dem J-Integral Konzept [Ric68] kann das Spannungs- und Verschiebungsfeld an der Rissspitze trotz nicht linearem Bruchverhaltens beschrieben werden, siehe Gleichung 2.6.

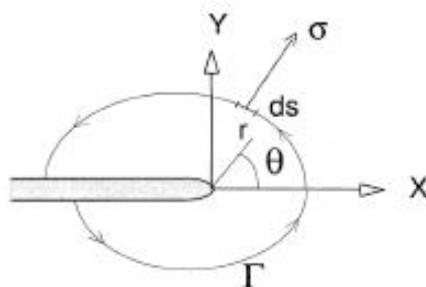


Abbildung 2.9: Definition des J-Integrals

Eine charakteristische Beschreibungsgröße ist das J-Integral in Abbildung 2.9, das im Wesentlichen die Änderung der potentiellen Energie während der Rissausbildung darstellt.

$$J = \oint_{\Gamma} W_e dy - \oint_{\Gamma} \sigma \frac{du}{dx} ds \quad (2.6)$$

|                |                            |
|----------------|----------------------------|
| $J$ .....      | J-Integral                 |
| $W_e$ .....    | Elastische Energiedichte   |
| $\sigma$ ..... | Allgemeine Spannungsvektor |
| $ds$ .....     | Wegelement                 |
| $u$ .....      | Verschiebungsvektor        |

Als Bruchkriterium wird der kritische J-Integralwert bei Rissverlängerung herangezogen. Für die Anwendung des J-Integral Konzeptes ist allerdings die Kenntnis der Risslänge von wesentlicher Bedeutung, die wie im Kapitel 2.3.1 bereits erwähnt, im Interface Beton-Bitumen nicht ausreichend gegeben ist. Das J-Integral-Konzept wird kaum angewendet.

### 2.3.3 Crack-Opening-Displacement Konzept – COD Konzept

Eine weitere Möglichkeit bietet das Crack-Opening-Displacement-Konzept, abgekürzt COD-Konzept [Wel61]. Dieses Konzept wurde für plastisch verformbare metallische Werkstoffe entwickelt. Die charakteristische Größe dieses Konzepts ist die kritische plastische Rissspitzenaufweitung, siehe Abbildung 2.10. Als Bruchkriterium wird jene Rissspitzenaufweitung angesehen, bei der eine Rissverlängerung eintritt. Für die Berechnung dieser Aufweitung ist die Kenntnis der Risslänge notwendig. Somit gestaltet sich die Anwendung des J-Integral-Konzepts und des COD-Konzepts für ein Beton-Bitumen Interface als schwierig und wird zur bruchmechanischen Charakterisierung eines bituminösen Haftverbundes kaum herangezogen.

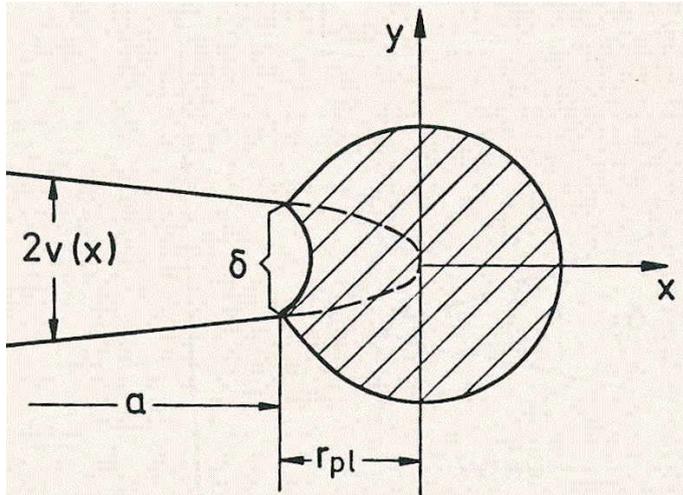


Abbildung 2.10: COD Konzept

- $\delta$  ..... Rissspitzenaufweitung
- $r_{pl}$  ..... Radius der Plastischen Zone
- $a$  ..... Risslänge
- $v(x)$  ..... Ortsabhängige Rissbreite

### 3 Experimentelle Untersuchungen

In der vorliegenden Arbeit werden Abdichtungssysteme nach der „mechanischen und bruchmechanischen Qualität“ des Schichtverbundes aus Betonoberfläche und aufgeflämmer Bitumenbahn charakterisiert. Die Zusammensetzung des Schichtverbundes variiert dabei in der Oberflächengestaltung der Betonplatten und in der Wahl zwischen bituminösen oder emulsionsartigen Voranstrichen. In den folgenden Kapiteln findet man Informationen über die Rauheit der Betonoberflächen, es werden die verwendeten Werkstoffe definiert und die Arbeitsschritte von der Betonplatte bis hin zum fertigen Probekörper erläutert.

#### 3.1 Herstellung der Betonplatten und Rauheitsmessung

Um zu untersuchen, welchen Einfluss unterschiedliche Betonoberflächen und Voranstriche auf den Schichtverbund Beton-Bitumenbahn haben, wurden von der „Vereinigung der österreichischen Zementindustrie“ mehrere Betonplatten mit drei unterschiedlich gestalteten Oberflächen hergestellt. In Tabelle 3.1 sind die detaillierten Angaben zur Betonherstellung angeführt.

| BETONSORTE C25/30/GK22/F45/B4 |                        |
|-------------------------------|------------------------|
| Frischbetonrohddichte         | 2430 kg/m <sup>3</sup> |
| Größtkorn Durchmesser         | 11 mm                  |
| Gesteinskörnung               | 1951 kg/m <sup>3</sup> |
| Zement                        | 320 kg/m <sup>3</sup>  |
| Wasser                        | 160 kg/m <sup>3</sup>  |
| Wasser/Bindemittel - Wert     | 0,5                    |
| Luftporen                     | 1,5 %                  |

Tabelle 3.1: Zusammensetzung des Betons [Pey09]

Die gelieferten Betonplatten hatten zirka die Größe von 50x40x7 cm und können, entsprechend ihrer Oberflächenbehandlung, in drei Kategorien eingeteilt werden,

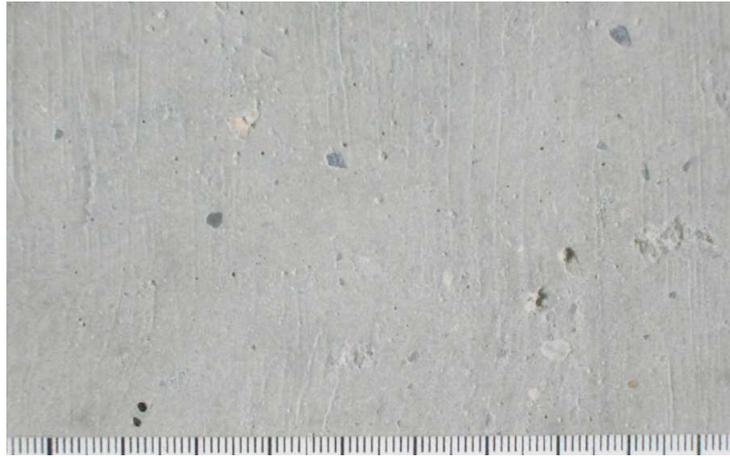
siehe Abbildung 3.1.

Die erste Kategorie beinhaltet die Betonplatten mit unbehandelter Oberfläche, betreffend das Interface zwischen Schalungsbrett und Betonoberfläche, auch „Schalungsbeton“ bezeichnet. Die Zweite beinhaltet den Beton, dessen Oberfläche mit einer Zementschlämme überzogenen ist und die letzte Kategorie die Betonplatten, deren Oberfläche wasserstrahlbehandelt wurde, wie dies in Abbildung 3.2 dargestellt wird.

Im Hinblick auf einen möglichst hochwertigen Verbund zwischen Betonoberfläche und Bitumenbahn ist es von großer Bedeutung die Rauheit zu quantifizieren. Als Methode für die Rauheitsmessung wird das „stereoskopische Verfahren“ verwendet. Das stereoskopische Verfahren ist eine Messmethode zur raumgetreuen Abbildung von Objekten. Das Prinzip beruht auf der Erstellung zweier Bilder, die bezüglich einer fixen optischen Achse um einen definierten Winkel verkippt sind. Die Kippachse muss in der Mitte des zu vermessenden Objektes sein. Die Realisierung der verkippten Bilder erfolgt mithilfe eines transportablen, schwenkbaren Stativs, auf dem die Digitalkamera befestigt wird, siehe Abbildung 3.3 [Pos09].

Die Vorteile dieses Statives liegen darin, dass einerseits Labormessungen und andererseits auch problemlos Rauheitsmessungen vor Ort durchgeführt werden können. Mithilfe einer Flächenanalyse beider aufgenommenen Halbbilder erhält man Informationen zum Rauheitsprofil der Oberfläche. Die computerisierte Auswertung erfolgt auf der Grundlage, dass ein Bildpunkt des ersten Halbbildes mit demselben Punkt des zweiten Halbbildes in Übereinstimmung gebracht wird. Der unterschiedliche Aufzeichnungswinkel lässt die Bilder zueinander verschoben erscheinen. Diese Abweichung ermöglicht nach [MH06] eine eindeutige mathematische Berechnung der Tiefeninformation eines jeden Punktes. Die mit dem stereoskopischen Verfahren gewonnenen Halbbilder, siehe Abbildung 3.4, werden mithilfe der Software „MEX v4.2“ weiterverarbeitet [Ali08]. Die Software berechnet die korrespondierenden Punkte beider Halbbilder und reproduziert die Tiefeninformation mit Helligkeits- und Kontrastunterschieden.

Durch die Berechnung der Tiefeninformation hat man mit „MEX v4.2“ die Möglichkeit, die fotografierten Oberflächen entsprechend einer Linien-, Flächen-, oder Volumenanalyse zu quantifizieren. In Abbildung 3.5 sind die grafischen Ergebnisse einer Linienanalyse dargestellt. Hier wird entlang einer beliebig zu posi-



(a)



(b)



(c)

Abbildung 3.1: Flächenausschnitte der drei unterschiedlichen Oberflächen (Maßstab in mm): a) Unbehandelter „Schalungsbeton“; b) Zementschlümme; c) Wasserstrahlbehandelt

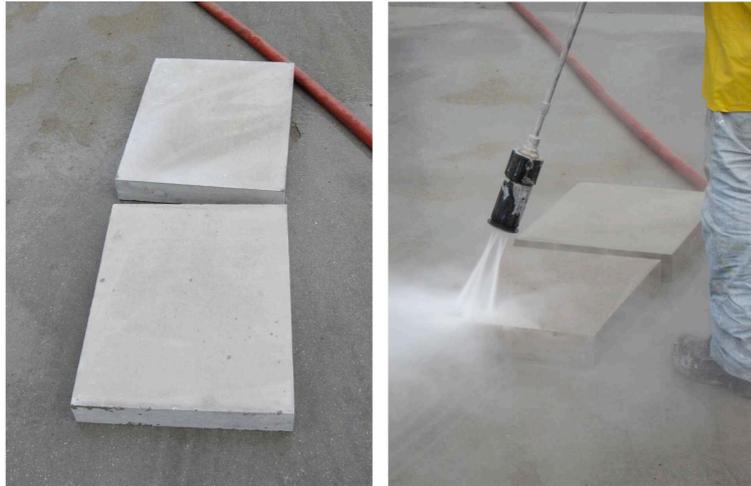


Abbildung 3.2: Wasserstrahlbehandlung der Betonoberfläche [Pey09]



Abbildung 3.3: Prüfstand zum Aufzeichnen der stereoskopischen Halbbilder mit befestigter Digitalkamera

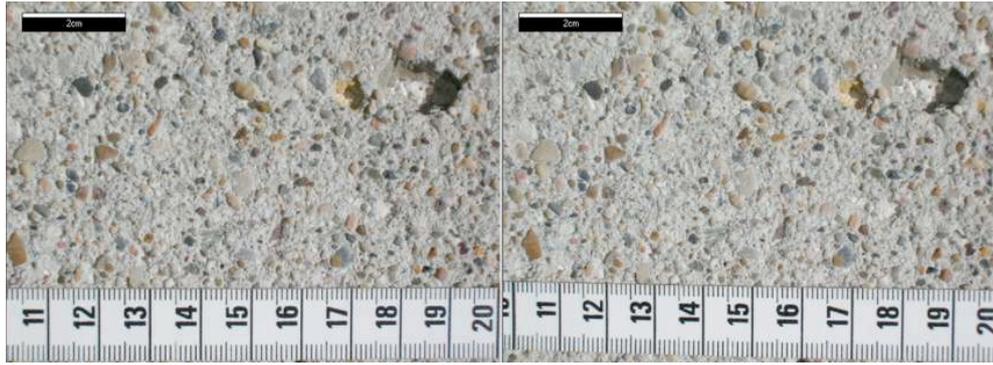


Abbildung 3.4: Halbbilder der wasserstrahlbehandelten Betonoberfläche mit Software „MEX v4.2“

tionierenden Linie eine Rauheitsanalyse erstellt. Neben der grafischen Auswertung erhält man auch eine Liste numerischer Werte der Rauheitsparameter [Pos09].

Bei der Flächenanalyse wird ein Raster aus horizontalen und vertikalen Linien über die Oberfläche gezogen. Entlang jeder Linie werden, wie bei der Linienanalyse, die Rauheitsparameter errechnet und daraus ein Durchschnittswert gebildet. Abbildung 3.6 zeigt eine Flächenanalyse des Schalungsbetons mit zugehöriger Tabelle errechneter Rauheitsparameter der drei verschiedenen Betonoberflächen.

Weiters ermöglicht die Software „MEX v4.2“ eine raumgleiche 3D-Darstellung der fotografierten Oberflächen, siehe Abbildung 3.7. Neben der Linien- und Flächenanalyse gibt es die Möglichkeit der Volumenanalyse der Oberflächen. Um ein Maß für deren Oberflächengestalt zu finden, wird mit Hilfe der Software virtuell eine Parallelebene zur Oberfläche errechnet. Diese Methode ähnelt dem Sandfleckverfahren [Kau71], bei dem ein Stempel auf Parallelebenen zur Oberfläche kreisförmig bewegt werden muss, bis der Stempel die höchsten Stellen der Betonoberfläche freigelegt hat. Beim stereoskopischen Verfahren wird dies durch die vorhin erwähnte virtuelle Ebene realisiert, die exakt senkrecht verschoben werden kann, bis erste Schnittpunkte mit den höchsten Stellen der Betonebene freigelegt sind [Buc08]. In Abbildung 3.8 sind ein 3D-Modell der wasserstrahlbehandelten Betonoberfläche und zwei dazugehörige Aufnahmen mit der virtuellen Parallelebene abgebildet.

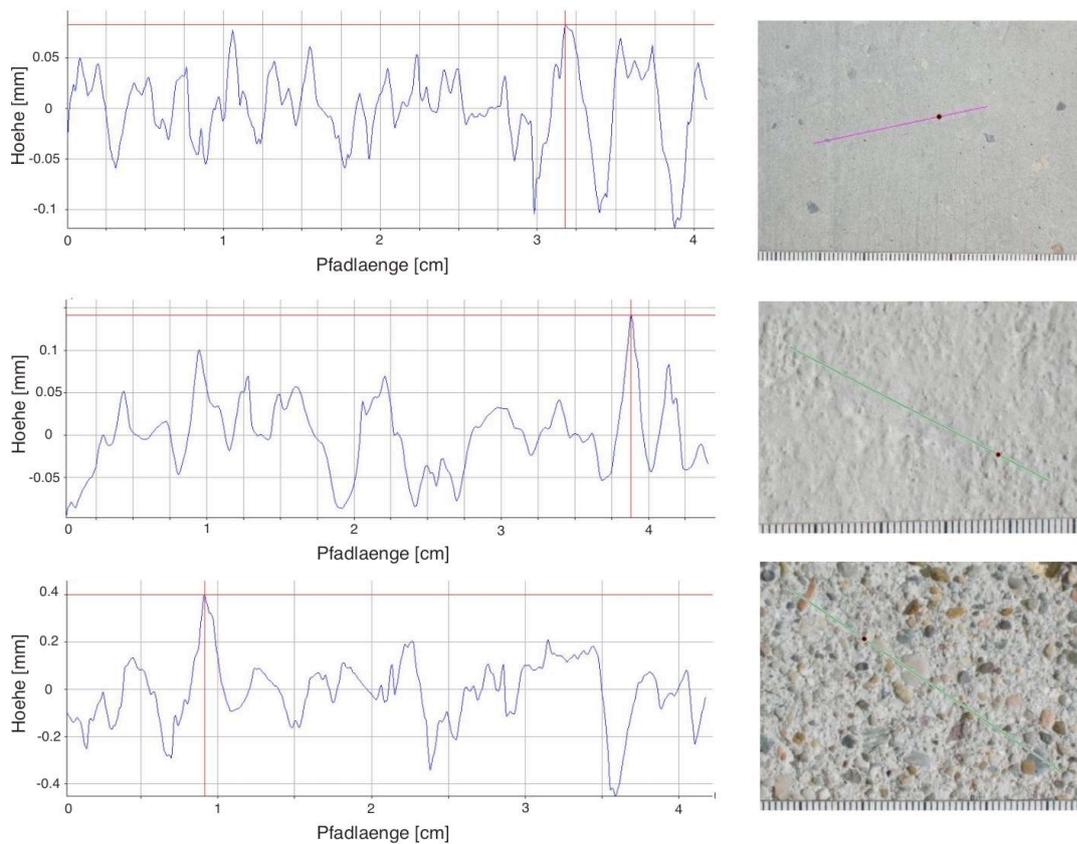
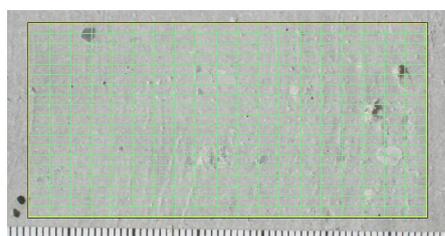


Abbildung 3.5: Bilder links: Grafische Auswertungen der Linienuhtheit (unterschiedliche Maßstäbe); Bilder rechts: Zu analysierende Oberflächen mit Linienuhtheitanalyse



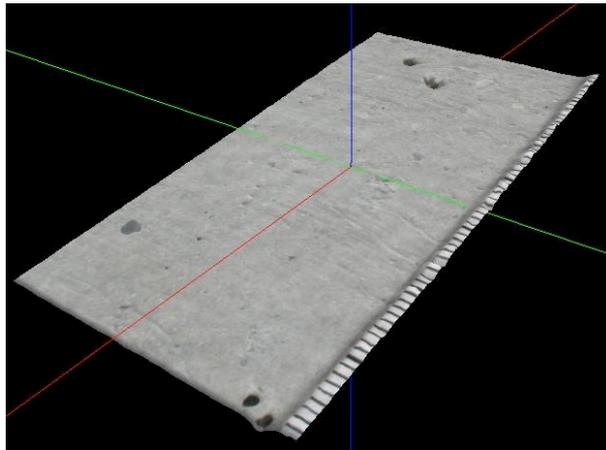
(a)

|         | BETON OBERFLÄCHE |               |                 |
|---------|------------------|---------------|-----------------|
|         | Unbehandelt      | Betonschlemme | Wassergestrahlt |
| St [mm] | 3,348            | 8,054         | 8,867           |
| Ra [mm] | 0,035            | 0,061         | 0,193           |

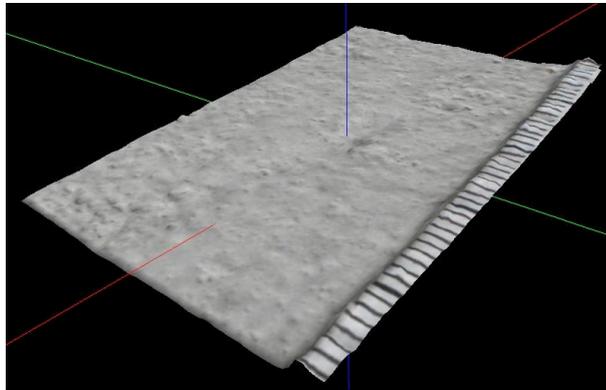
St ..... Maximale Höhe (Größte Höhe plus größte Tiefe)  
 Ra..... Durchschnittliche mittlere Rauheit der Profile [Possler 2009]

(b)

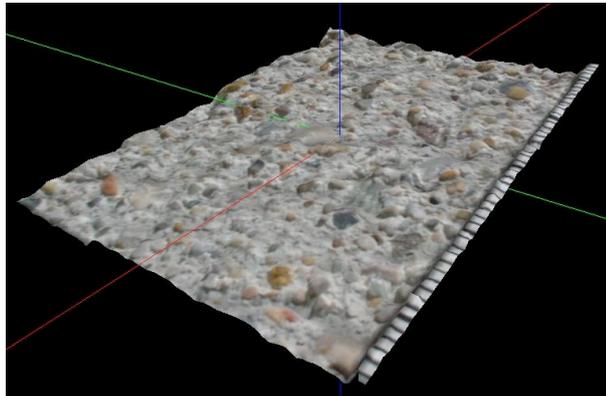
Abbildung 3.6: Flächenanalyse des Schalungsbetons: a) Linienraster für die Auswertung; b) Tabelle der wichtigsten Rauheitsparameter



(a)



(b)



(c)

Abbildung 3.7: 3D-Auswertung eines Oberflächenstücks mit Software „MEX v4.2“ (Maßstab in mm): a) Unbehandelter „Schalungsbeton“; b) Zement-schlämme; c) Wasserstrahlbehandelt

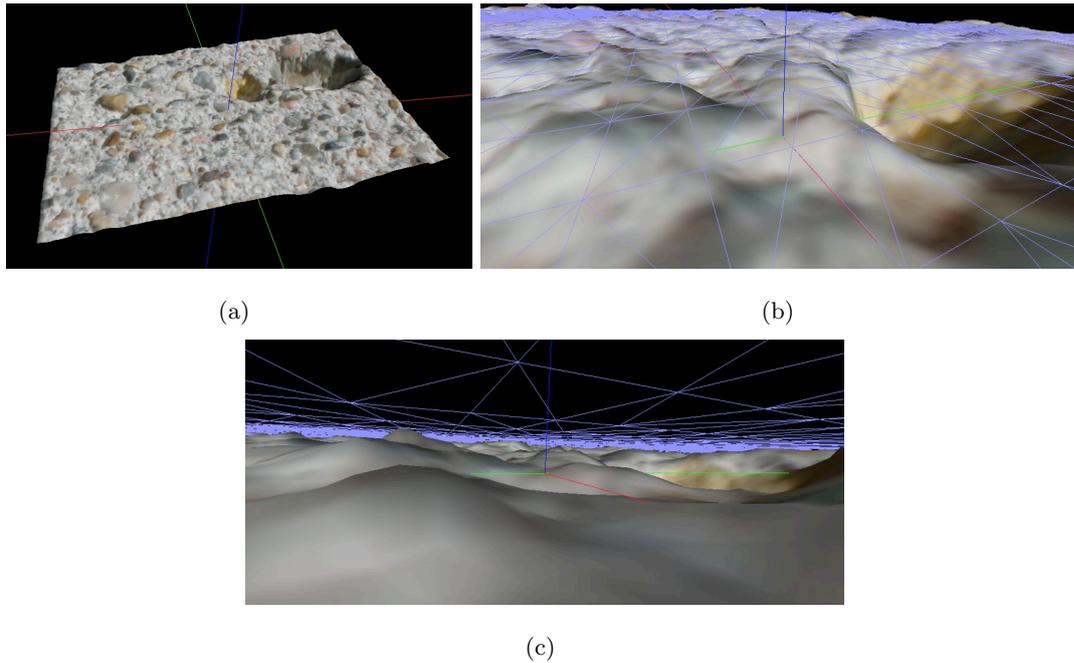


Abbildung 3.8: Volumenanalyse mit MEX v4.2: a) 3D-Modell der wasserstrahlbehandelten Betonoberfläche; b) Ansicht oberhalb der Parallelebene; c) Ansicht unterhalb der Parallelebene

### 3.2 Beschreibung der verwendeten Werkstoffe

Zur Bauwerksabdichtung sind Abdichtungsbahnen mit Schichten aus nicht durchströmbar Werkstoffen notwendig. Diese sind nur praxistauglich, wenn sie gewissen Anforderungen genügen [Czi01]:

- Es müssen große Flächen lückenlos undurchströmbar hergestellt werden können, wie im Falle des Verschweißens von Dichtungsbahnen.
- Risse und Pressfugen, wie sie in Bauwerken häufig vorhanden sind, müssen dauerhaft überbrückt werden. Diese Tatsache erfordert ein flexibles Werkstoffverhalten.
- Der zur Abdichtung verwendete Werkstoff muss gegen die, bei Bauwerken zu erwartenden, Einwirkungen chemischer, physikalischer und biologischer Art unempfindlich sein. Er soll besonders gegen Mikroorganismen, Feuchtigkeit, Betonalkalität, nutzungsbedingte Belastungen und rauen Baustellenbetrieb inert sein.

Nicht durchströmbare Werkstoffschichten erfüllen bereits mit geringer Dicke die Anforderungen im Bezug auf die Wasserdichtheit. Die Dicke der Abdichtungen wird daher durch Eigenschaften wie die Rissüberbrückungsfähigkeit oder der erforderliche Perforationswiderstand bestimmt. Wichtig ist, dass sämtliche Eigenschaften bei der höchsten sowie der tiefsten zu erwartenden Temperatur noch gegeben sind. Die verfügbaren Abdichtungswerkstoffe unterscheiden sich in vielen Eigenschaften und müssen daher entsprechend ihrem Anwendungsfall ausgewählt werden.

Für diese Arbeit wurde eine **Bitumen-Dichtungsbahn** verwendet, die unter anderem bei Flachdächern und Terrassen ihre Anwendung findet. Der Werkstoff Bitumen fällt als Rückstand bei der Destillation ausgewählter Rohöle an und besteht aus einem Gemisch verschiedener Kohlenwasserstoffe. Bitumen schmilzt nicht bei einer bestimmten Temperatur, sondern hat einen Erweichungsbereich, der meist zwischen  $-10^{\circ}\text{C}$  und  $+70^{\circ}\text{C}$  liegt. Der Erweichungsbereich vom Bitumen soll den Temperatureinsatzbereich mit einem Sicherheitszuschlag so überdecken, dass das Bitumen weder fest und hart noch weich und flüssig wird. Chemisch gesehen ist Bitumen reaktionsträge, beständig gegen Wasser, Laugen, schwache Säuren sowie Salzlösungen. Von Ölen, Fetten und Lösemitteln wird es aufgelöst und es kann zu quellen beginnen. Als erstarrte Flüssigkeit ist Bitumen nicht durchströmbar, porenfrei und für diffundierende Wassermoleküle wenig durchlässig [Czi01].

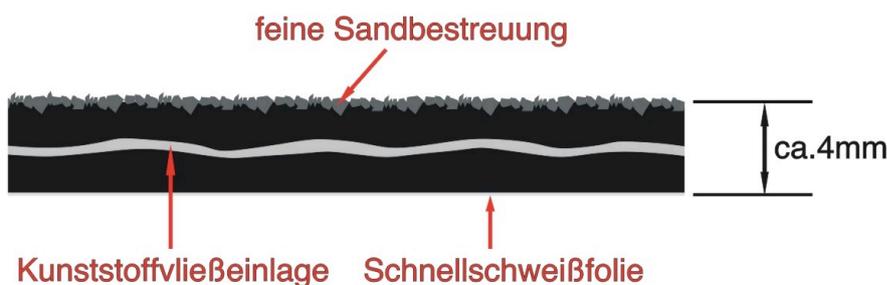


Abbildung 3.9: Schematisierte Elastomer-Bitumenbahn mit eingebetteter Kunststoffvlieseinlage

Um ein stabileres Verhalten von Bitumenbahnen an geneigten und vertikalen Bauwerksflächen zu erreichen, wurde in die Bitumenschicht eine Trägereinlage aus Polyesterfasern eingebettet, siehe Abbildung 3.9. Dieses eingebettete Kunststoffvlies ermöglicht auch eine bessere Rissüberbrückung. Die Bitumenbahn, für

die im Zuge dieser Arbeit geprüften Abdichtungssysteme, wurde von der Firma Büsscher & Hoffmann zur Verfügung gestellt und wird hauptsächlich als Dach- oder Terrassenabdichtung gegen Bodenfeuchte und Wasser eingesetzt. Die Oberfläche wurde mit einer feinen Sandbestreuung versehen und die Unterseite besteht aus einer Schnellschweißfolie. An der Art der Bezeichnung der Bitumenbahn erkennt man die Trägereinlage und deren Flächengewicht. In dieser Arbeit wurde die Elastomer-Bitumenbahn KV-E-45K verwendet [www09].

Um den Haftverbund zwischen der Betonoberfläche und der ersten Schicht der Bitumenbahn zu sichern oder zu verbessern, finden Voranstriche ihre Anwendung. Sie erfüllen ihre Aufgabe, wenn bei entsprechend starker Belastung das Versagen im Betonuntergrund oder in der Abdichtung selbst auftritt. Durch die Verwendung eines Voranstriches soll die Betonoberfläche lückenlos benetzt werden. Dazu muss der Voranstrich dünnflüssig sein, eine geringe Empfindlichkeit gegen feuchten Untergrund aufweisen und tief in Poren und feine Risse eindringen können. Von der Firma Büsscher & Hoffmann wurden zwei gebräuchliche Voranstriche zur Verfügung gestellt, einerseits der **BV Büscherit-Voranstrich** und andererseits der **HV Hydrobit-Voranstrich**. Beide haben ihre Einsatzgebiete als Haftvermittler auf Oberflächen, wie Beton, Mauerwerk, Zementputz oder Metall, für Dach- und Bauwerksabdichtungen mit Bitumen- oder Polymerbitumenbahnen. Im Wesentlichen unterscheiden sich die Anstriche dadurch, dass der Voranstrich „BV Büscherit“ eine Bitumenlösung nach „ÖNORM B 3615“ beinhaltet und mit dem „HV Hydrobit“ auf Emulsionsbasis ein umweltfreundlicher, lösemittelfreier Voranstrich angeboten wird.

Im folgendem Kapitel 3.3 werden die Schritte von der gelieferten Betonplatte bis zum fertigen Probekörper erläutert. Dabei wird auf die Anwendung der Elastomer-Bitumenbahn und der Voranstriche, sowie auf die Probenkennzeichnung eingegangen.

### **3.3 Probenpräparation**

Wie im Kapitel 3.1 beschrieben, wurden die Betonplatten mit unterschiedlich behandelten Oberflächen geliefert. Vor der Anwendung der Voranstriche mussten die Oberflächen der Schalungsbetonplatten mit einer Drahtbürste gereinigt werden. Die Betonplatten, deren Oberflächen mit Zementschlemme überzogen oder wasser-

strahlbehandelt wurden, bedurften keiner Vorbehandlung. Nach einer Trocknungszeit von zwölf Stunden waren die, mit den Voranstrichen versehenen, Betonplatten bereit zum Aufflämmen der Elastomer-Bitumenbahn.

In Abbildung 3.10 wird der grobe Ablauf des Flämmvorganges dargestellt, welcher von einem Techniker der Firma Büsscher & Hoffmann durchgeführt wurde.



Abbildung 3.10: a) Flämmen der Elastomer-Bitumenbahn; b) Betonoberfläche mit Voranstrich und Elastomer-Bitumenbahn

Während des Flämmvorganges ist zu beachten, dass der Voranstrich und das Bitumen an der Unterseite der Abdichtungsbahn gleichzeitig schmelzen, um so, nach dem Abkühlen, einen bestmöglichen Haftverbund zwischen Oberfläche und Bitumenbahn zu bilden. In Abbildung 3.11 ist es zu erkennen, wie das flüssige Gemisch aus Voranstrich und Bitumen durch das Abrollen der Bitumenbahn an der Oberfläche verteilt wird.

Nachdem die Abdichtungsbahnen auf die Betonplatten geflämmt waren, wurden die Platten mit einer großen Gesteinssäge in handliche Betonwürfel geschnitten. Diese Betonwürfel mit den Abmessungen von zirka 10x10x7 cm wurden als Probekörper für die künftigen Versuche verwendet. Abbildung 3.12 stellt die, aus sechs Betonplatten gewonnenen, Probekörper dar.

Die Kennzeichnung der sechs unterschiedlichen Probetypen fand nach folgendem Schema statt. Die Probekörper mit der Schalungsbeton-Oberfläche wurden mit der Nummer 1, die mit der Betonschlämme auf der Oberfläche mit der Nummer 2 und die Probekörper, deren Oberfläche wasserstrahlbehandelt wurden, mit der Nummer 3 gekennzeichnet. Nach der Nummer steht die Bezeichnung für den verwendeten Voranstrich, BV für Büscherit und HV für Hydrobit. Zur besseren



(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 3.11: Flämmvorgang mit Abrollen der Abdichtungsbahn und sichtbarer Schmelze aus Voranstrich und Bitumen



Abbildung 3.12: 120 Stück Probekörper, aus sechs Betonplatten angefertigt

Übersicht der Probenkennzeichnung wird diese in Tabelle 3.2 erläutert.

| Voranstrich | <b>BETON OBERFLÄCHE</b> |               |                 |
|-------------|-------------------------|---------------|-----------------|
|             | Schalungsbeton          | Betonschlemme | Wassergestrahlt |
| BV          | 1BV                     | 2BV           | 3BV             |
| HV          | 1HV                     | 2HV           | 3HV             |

Tabelle 3.2: Übersicht zur Probenkennzeichnung

### 3.4 Temperaturbereiche und Healingverhalten

Die bituminösen Abdichtungsbahnen haben ihren festen Platz, wenn es um das Abdichten von Dachkonstruktionen, Terrassen oder Kellerwänden geht. Aufgrund des sich jährlich verändernden Klimas verwittern diese Bitumenbahnen. Besonders durch ständige Temperaturschwankungen verliert das Bitumen an Elastizität und versprödet an der Oberfläche. Es werden kleine Risse initiiert, durch diese Wasser in die obere Struktur des Bitumens eindringt, siehe Abbildung 3.13. In der nächsten Frostperiode gefriert die Feuchtigkeit, dehnt sich aus und setzt die Oberfläche der Abdichtungsbahn unter Spannung. Diese Spannungen tragen dazu bei, dass das Interface zwischen Betonoberfläche und Abdichtungsbahn geschädigt wird, die Risse immer größer werden, das Wasser in den Untergrund eindringt und die Bausubstanz zerstört wird.



Abbildung 3.13: Beispielbilder für Rissbildung im Bitumen [DIM09]

Neben den Einflüssen der Feuchtigkeit, der Umwelt und der mechanischen Beanspruchungen werden die Abdichtungsmaterialien durch die Temperatur am stärksten beeinträchtigt. Vor allem bei Flachdächern und Terrassen kann es zu saisonalen Temperaturwechsel von  $-30^{\circ}\text{C}$  bis über  $+90^{\circ}\text{C}$  kommen. An Schattenkanten

oder Schneerändern entstehen hohe Temperaturdifferenzen auf engstem Raum. Diese Tatsachen motivierten dazu, die Materialprüfungen bei unterschiedlichen Temperaturen durchzuführen, um so den Haftverbund und die bruchmechanischen Werte zwischen Betonoberfläche und Abdichtungsbahn bestmöglich charakterisieren zu können.

Die Tabelle 3.3 enthält die Prüftemperaturen der angewendeten Versuche. Mit den Haft-Zugversuchen, siehe Kapitel 4.1, und dem Keilspaltverfahren, siehe Kapitel 4.2, werden die mechanischen und bruchmechanischen Eigenschaften von sechs unterschiedlich gestalteten Probetypen erfasst. Unter Berücksichtigung klimatischer Beanspruchungen werden die Keilspaltmessungen für vier Prüftemperaturen im Gesamtspektrum von  $-10^{\circ}\text{C}$  bis  $+23^{\circ}\text{C}$  durchgeführt. Die Haft-Zugmessungen hingegen werden, aufgrund der zu erwartenden geringen Aussagekraft bezüglich des Haftverbundversagens, nur bei zwei Temperaturen,  $0^{\circ}\text{C}$  und  $+23^{\circ}\text{C}$ , geprüft.

| Versuchsart        | Temperatur            |                     |                       |                       |
|--------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|
|                    | $-10^{\circ}\text{C}$ | $0^{\circ}\text{C}$ | $+10^{\circ}\text{C}$ | $+23^{\circ}\text{C}$ |
| Haft-Zug-Versuche  |                       | X                   |                       | X                     |
| Keilspalt-Versuche | X                     | X                   | X                     | X                     |
| Healing-Versuche   | X                     | X                   |                       | X                     |

Tabelle 3.3: Temperaturbereiche der Materialprüfungen

Im Zuge dieser Arbeit wird auch der Ausheileneffekt an Rissen in bituminösen Schichtverbunden gezeigt. Der Mechanismus des Ausheilens erhöht die Lebensdauer der geschädigten Haftverbunde zwischen Beton und Abdichtungsbahn. Wie oben schon erwähnt, entstehen durch einen Frost-Tau-Wechsel Spannungen in der Abdichtungsbahn, die zu einer Schädigung des Interfaces Betonoberfläche und Bitumenbahn führen. Zwischen den zyklischen Frost-Tau-Beanspruchungen gibt es längere Rastperioden, in denen der Healing-Effekt verstärkt auftritt. Der Schädigungsverlauf insgesamt muss daher als Resultat von zwei konkurrierenden Prozessen gesehen werden, nämlich den des Risswachstums und den des Ausheilens der gebildeten Risse, siehe Abbildung 3.14.

Die Healing-Versuche werden bei den Prüftemperaturen  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$  und  $+23^{\circ}\text{C}$  Raumtemperatur durchgeführt. Auf die Materialprüfungen bei der Temperatur von  $+10^{\circ}\text{C}$  wird verzichtet, da die vorhergehenden Keilspaltversuche ein vergleich-

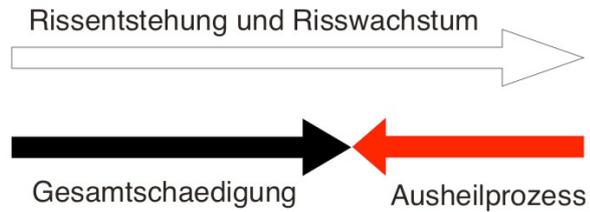


Abbildung 3.14: Überlagerte Prozesse bei Materialermüdung [JTTS01]

bares Verhalten des Schichtverbundes wie bei +23°C Raumtemperatur zeigten. Der Ausheileffekt wird für zwei Healing-Temperaturen, +23°C und +40°C, überprüft, um deren Einfluss erfassen zu können. Als Healing-Temperatur bezeichnet man die Umgebungs- und Probentemperatur während der Heilungsphase des Risses. Die Ergebnisse sämtlicher Materialprüfungen werden im Kapitel 5 aufgezeigt und analysiert.

## 4 Prüfmethoden

Es gibt verschiedene Prüfmethoden, die eine Bewertung der qualitativen und quantitativen Eigenschaften von Schichtverbunden zwischen Bitumenbahn und Betonoberfläche erlauben [Buc08]. Die aussagekräftigsten Prüfmethoden sind Verfahren, mit denen man neben den mechanischen Eigenschaften auch Informationen über die bruchmechanischen Eigenschaften, wie z.B. die spezifische Bruchenergie bestimmen kann. Die mechanischen Prüfmethoden, wie der Haft-Zug Versuch, geben keine Auskunft darüber, wann und warum Risse in Baustoffen oder Interfaces auftreten. Es kann keine qualitative Aussage getroffen werden, welche Baustoffe, Materialzusammensetzungen oder Oberflächengestaltungen geeignet sind, um den Risswiderstand zu erhöhen [TTSL96].

In den folgenden Abschnitten werden die zwei angewandten Prüfmethoden beschrieben, die Vorbereitung der Probekörper dargestellt, sowie die Vor- und Nachteile der einzelnen Prüfmethoden diskutiert.

### 4.1 Haft-Zugversuch

#### 4.1.1 Vorbereitung der Probekörper

Vor der Durchführung der Haft-Zug Prüfungen müssen die Probekörper zum Einspannen in die Prüfeinrichtung vorbereitet werden. Dies wird durch gereinigte und entfettete Aluminiumdeckel ermöglicht, die an Ober- und Unterseite des Probekörpers geklebt werden, siehe Abbildung 4.1a.

Danach wird ein Teil der präparierten Probekörper für 24 Stunden in einer Kühleinrichtung auf die Prüftemperatur von 0°C gekühlt und der Rest bei der Raumtemperatur von +23°C gelagert. Die vorbereiteten Prüfkörper werden nach der Temperierung in die Prüfmaschine eingebaut, siehe Abbildung 4.1b. Die Prüfung muss bei gekühlten Proben so schnell wie möglich durchgeführt werden, um ein Erwärmen der Proben ausschließen zu können.

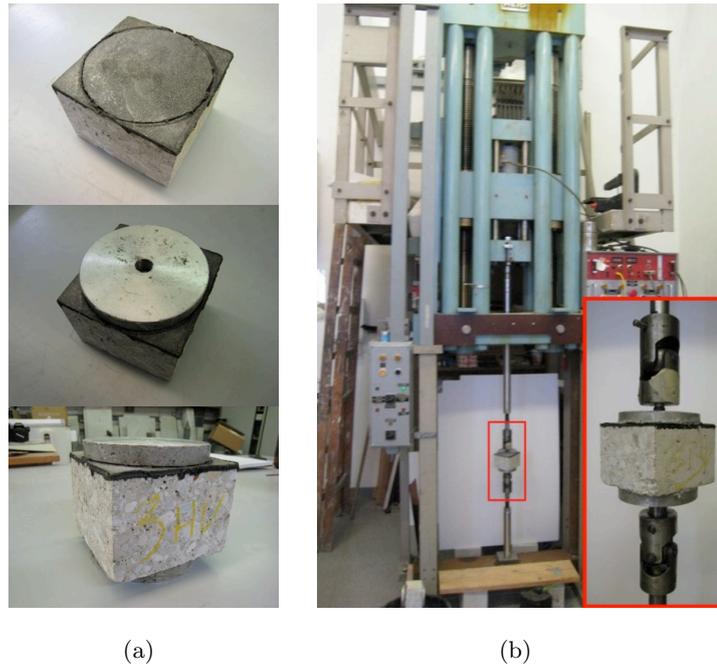


Abbildung 4.1: a) Vorbereitung der Probekörper; b) Haft-Zug Maschine mit eingespanntem Probekörper

#### 4.1.2 Beschreibung der Prüfmethode

Der Haft-Zug Versuch dient zur Bestimmung des Haftverbundes bzw. der Schichthaftung und ist ein genormtes Verfahren ÖNORM [36397]. Die Prüfung der Haftzugfestigkeit erfolgt durch zentrisches Abziehen normal zur Schichtebene mittels eines aufgeklebten Stempels mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit, siehe Abbildung 4.2. Die Haftzugfestigkeit ist definiert als die erreichte maximale Zugkraft, bezogen auf die Prüffläche. Die Prüfungen wurden im Labor bei Prüftemperaturen von 0°C und +23°C durchgeführt.

Für die Prüfung des Haftverbundes zwischen Betonoberfläche und Elastomerbitumenbahn wurde ein Zugprüfgerät mit zentrischer Krafteinleitung und einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit verwendet, wie es die oben angeführte Norm vorschreibt. Für die gegenständlichen Prüfungen wurden Aluminiumdeckel mit einem Durchmesser von 100 mm und ein lösemittelfreier 2-Komponenten-Kleber verwendet. Die entstandenen Bruchbilder werden in Kapitel 5.1.1 gezeigt. Die festgestellte Bruchkraft darf nur dann für die Berechnung der Haftzugfestigkeit herangezogen werden, wenn der Bruch in der Interfacefläche erfolgt. Die Haftzugfestigkeit ist nach folgender Formel zu berechnen ÖNORM [36397]:

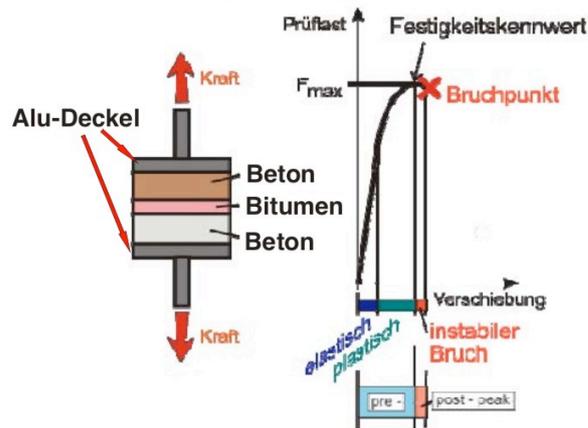


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung eines eingespannten Probekörpers und des Kraft-Verschiebungsdiagramms beim Haft-Zugversuch

$$\beta_{HZ} = \frac{F_{max}}{A_{lig}} \quad (4.1)$$

- $\beta_{HZ}$  ..... Haftzugfestigkeit  $[\frac{N}{mm^2}]$   
 $F_{max}$  ..... Maximale Zugkraft [N]  
 $A_{lig}$  ..... Prüffläche  $[mm^2]$

#### 4.1.3 Vor- und Nachteile des Haft-Zugversuchs

Ein wesentlicher Vorteil der Haftzugfestigkeitsprüfung besteht in der Einfachheit der Versuchsdurchführung. Es entsteht jedoch ein erheblicher Probenvorbereitungsaufwand. Die Probekörper müssen nach dem Herausschneiden aus den Betonplatten getrocknet und gereinigt werden. Danach wird an der Bitumenoberfläche ein Kreis mit dem Durchmesser von 100 mm freigelegt. Anschließend werden die Aluminiumdeckel mit einem Spezialkleber befestigt und bei den Prüfungstemperaturen 0°C und +23°C gelagert. Nach der Materialprüfung müssen die Aluminiumdeckel mit Hammer und Meißel von den Probekörpern entfernt und schließlich noch gereinigt werden.

Bezüglich der Auswertung der Messergebnisse in Hinblick auf bruchmechanische Eigenschaften ist bei diesem Prüfverfahren zu erwähnen, dass die Rissausbreitung instabil verläuft und die Anbringung von Wegaufnehmern schwierig ist [TTSL96]. Aus diesen Gründen können keine Last- Verschiebungsdiagramme aufgezeichnet

und damit keine Aussagen über das Entfestigungs- und Rissverhalten gemacht werden.

## 4.2 Keilspaltmethode nach Tschegg

### 4.2.1 Vorbereitung der Probekörper

Zur Durchführung der Keilspaltversuche muss an die Bitumenoberflächen der Probekörper ein Betongegenstück aufgeklebt werden, siehe Abbildung 4.3a und b. Beim Keilspaltverfahren wird im Interface eine „Starterkerbe“ eingeschnitten, siehe Abbildung 4.3c. Dabei handelt es sich um einen zirka 20 mm tiefen und 3 mm breiten Schnitt parallel zur Oberseite des Probenkörpers entlang des Interfaces.

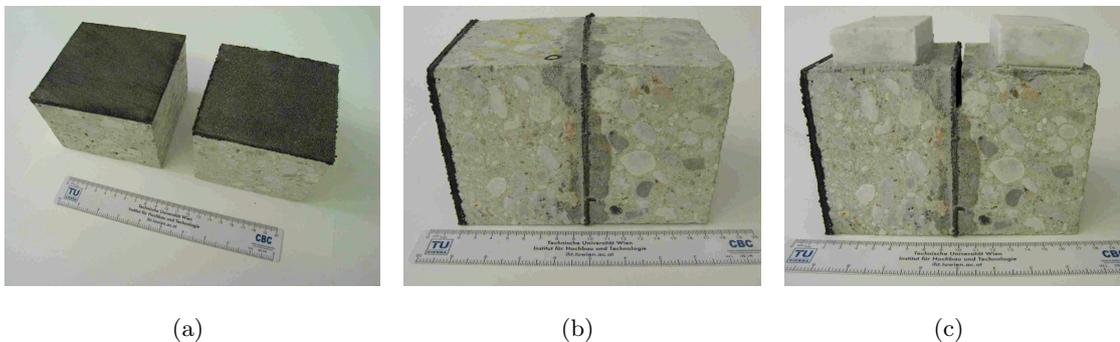


Abbildung 4.3: a) Zwei Probekörper mit Abmessung 10x10x7 cm; b) Probekörper mit aufgeklebten Gegenstück; c) Fertig präparierter Probekörper

Bei der Belastung konzentrieren sich die mechanischen Spannungen im Kerbgrund und der Riss beginnt dort zu laufen. Der Riss setzt sich im Idealfall vom Kerbgrund entlang des zu testenden Interfaces fort. Damit die Splittingkräfte in den Probekörper eingeleitet werden können, müssen wie in Abbildung 4.3c dargestellt, an der Oberfläche der Probe zwei Gesteinsblöcke symmetrisch um die Starterkerbe mit einem fest aushärtenden Baukleber, „Sikadur 31, Fa. Sika“, aufgeklebt werden. Ein fertig präparierter Probekörper, eingespannt in die Vorrichtung für die Lasteinleitung, ist in Abbildung 4.6 dargestellt.

### 4.2.2 Beschreibung der Prüfmethode

Die Keilspaltmethode nach Tschegg wurde an der Technischen Universität Wien entwickelt [Tsc86]. Mit diesem Prüfverfahren können unter anderem auch Werk-

stoffe mit spröden oder duktilen Materialeigenschaften geprüft, sowie Gewaltbruchprüfungen bei stabiler Rissausbreitung, wie Bruchmodus I und „Mixed Mode“, durchgeführt werden [TTSJ01]. Daher eignet sich dieses Verfahren bei entsprechenden Temperaturen zur Bestimmung der mechanischen und bruchmechanischen Eigenschaften an Grenzflächen zwischen Betonoberfläche und Bitumenschicht. Die Abbildung 4.4 zeigt eine schematische Darstellung der Prüfanordnung bei der Keilspaltmethode an einem rechteckigen Prüfkörper.

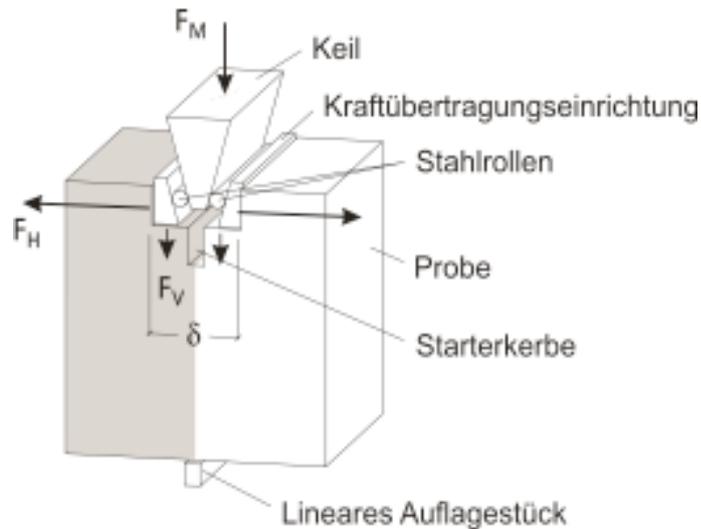


Abbildung 4.4: Schematische Darstellung der Keilspaltmethode nach Tschegg an einem Probekörper [TTSJ01]

Wie bereits im Kapitel 4.2.1 beschrieben, müssen die Probekörper mit einer Lasteinleitungseinrichtung (Marmorblöcke) versehen werden. In diese wird die Belastungseinrichtung, welche aus zwei Kraftübertragungsstücken besteht, eingelegt. Die Druckkraft von der Prüfmaschine wird über einen schlanken Keil, beispielsweise mit dem Winkel  $\alpha = 24^\circ$ , in die Probe eingeleitet. [TKT<sup>+</sup>91] Tschegg hat gezeigt, dass der Messfehler durch Reibung zwischen der Belastungseinrichtung und dem Keil bei Verwendung von Nadelwälzlager bei ca. 1% liegt.

Der schlanke Keil übersetzt die von der Prüfmaschine stammende vertikale Druckkraft  $F_M$  in eine horizontal wirkende Spaltkraft  $F_H$ , siehe Abbildung 4.5a, die den Probekörper in der gedachten Ebene zwischen Starterkerbe und dem linearen Auflagestück am Boden der Probe spaltet. Abbildung 4.5b zeigt die Kräfteverteilung am Keil selbst [Buc08].

Die horizontale Splittingkraft  $F_H$  wird mit einer einfachen geometrischen Bezie-

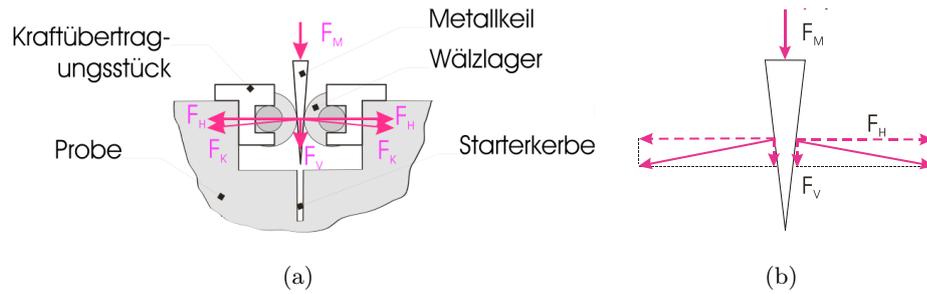


Abbildung 4.5: a) Detaildarstellung des Kraftübertragungstückes; b) Kräfte am Keil  
[Buc08]

Die horizontale Spaltkraft  $F_H$  wird aus der Maschinenkraft  $F_M$  berechnet:

$$F_H = \frac{1}{2 \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \cdot F_M \quad (4.2)$$

$F_H$  ..... Horizontale Komponente der Maschinenkraft (Splittingkraft)[N]

$F_M$  ..... Maschinenkraft [N]

$\alpha$  ..... Keilwinkel in Grad

Um das Kraft-Verschiebungsdiagramm, abgekürzt KVD, während des gesamten Versuchablaufs aufzeichnen zu können, müssen in der Höhe der Angriffslinie der Splittingkraft  $F_H$  an beiden Enden der rechteckigen Nut, elektronische Wegaufnehmer angebracht werden, wie dies in Abbildung 4.6 gezeigt wird.

Damit der Messfehler minimiert werden kann, erfassen die beiden Wegaufnehmer getrennt voneinander die Rissöffnung „CMOD“ (crack mouth opening displacement). Weichen die beiden Messwerte nicht zu weit voneinander ab, ist es zulässig, die beiden Messwerte zu mitteln. Stellt man den gemittelten CMOD-Wert (Abszisse) und die Spaltkraft  $F_H$  (Ordinate) in einem Diagramm dar, erhält man das Kraft- Verschiebungsdiagramm. Abbildung 4.7 zeigt ein typisches Kraft- Verschiebungsdiagramm für einen quasi-spröden Baustoff (z.B. Beton oder Asphalt bei den Prüftemperaturen). Es enthält auch die Beschreibung der wichtigsten mechanischen und bruchmechanischen Kenngrößen.

Der Anstieg der Last-Verschiebungskurve charakterisiert das elastische Verhalten der gekerbten Probekörper. Aus der Probenform und aus den Messgrößen kann der Elastizitätsmodul für den homogenen Werkstoff abgeschätzt werden. Bei einem Verbund zwischen zwei Schichten ist diese Abschätzung nicht möglich.

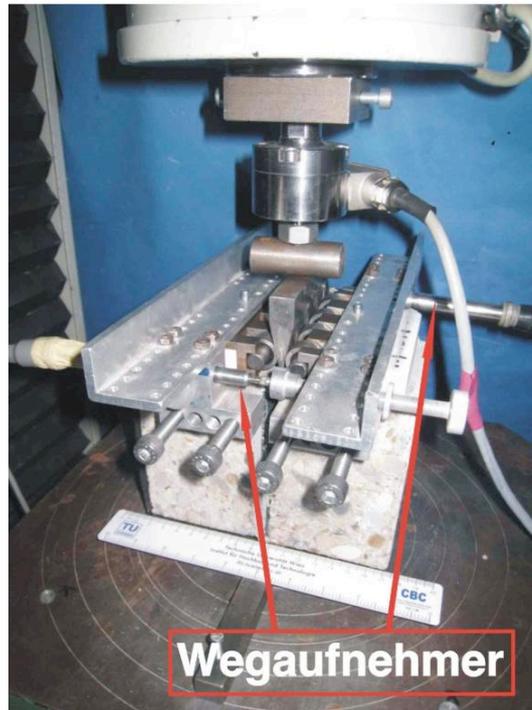


Abbildung 4.6: Einspannvorrichtung mit Probekörper und elektronischen Wegaufnehmern

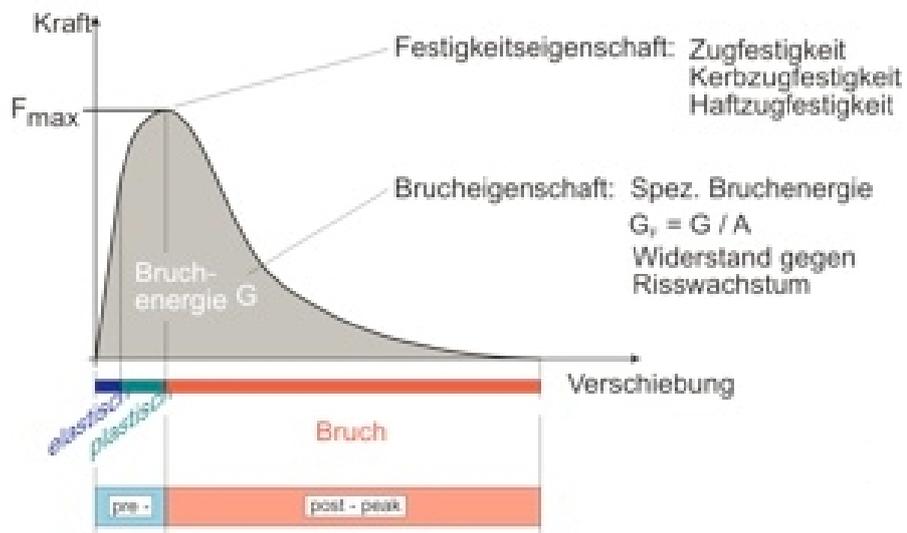


Abbildung 4.7: Schematisches Kraft-Verschiebungsdiagramm [TTSJ01]

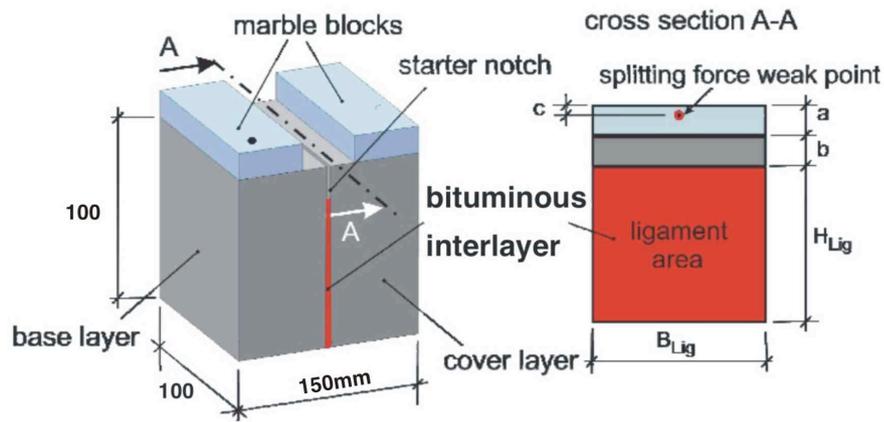


Abbildung 4.8: Abmessungen und Dimensionen des Probekörpers [JTL09]

Aus der Höchstkraft  $F_{Hmax}$  kann mit Hilfe der linearen Elastizität die Kerbbiegezugfestigkeit  $\sigma_{KBF}$  berechnet werden. Die Abmessungs- und Dimensionsvariablen sind in Abbildung 4.8 eingezeichnet.

$$\sigma_{KBF} = \frac{F_{Hmax}}{A_{lig}} + \frac{M_b}{W_y} \quad (4.3)$$

$$M_b = F_{Hmax} \left( a - c + b + \frac{H_{lig}}{2} \right) \quad (4.4)$$

$$W_y = \frac{B_{lig} \cdot H_{lig}^2}{6} \quad (4.5)$$

- $\sigma_{KBF}$  ..... Kerbbiegezugfestigkeit [ $\frac{N}{mm^2}$ ]
- $F_{Hmax}$  .... Maximalwert der horizontalen Komponente der Maschinenkraft [N]
- $A_{lig}$  ..... Ligamentfläche, Bruchfläche [ $mm^2$ ]
- $M_b$  ..... Biegemoment [ $Nmm$ ]
- $W_y$  ..... Axiales Widerstandsmoment [ $mm^3$ ]
- $a, c$  ..... Abmessungen Probekörper [mm]
- $b$  ..... Tiefe der Starterkerbe [mm]
- $B_{lig}$  ..... Breite der Ligamentfläche [mm]
- $H_{lig}$  ..... Höhe der Ligamentfläche [mm]

Die Fläche unter der Last-Verschiebungskurve entspricht der Bruchenergie oder Brucharbeit G, die mittels numerischer Integration berechnet werden kann. Wird

G durch die ebene Projektion der Bruchfläche A dividiert, so erhält man die spezifische Brucharbeit bzw. die spezifische Bruchenergie  $G_F$ . Sie ist eine bruchmechanische Kenngröße, die von Größe und Form des Probekörpers unabhängig ist, und stellt ein Maß für den Widerstand gegen Rissausbreitung dar.

$$G_F = \frac{1}{A_{lig}} \cdot \int_{CMOD} F_H ds \quad (4.6)$$

$G_F$  ..... spezifische Bruchenergie [ $\frac{N}{m}$ ]  
 $A_{lig}$  ..... Ligamentfläche, Bruchfläche [ $m^2$ ]  
 $F_H$  ..... Horizontale Komponente der Maschinenkraft [ $N$ ]  
 $CMOD$  ..... Rissöffnung, „crack mouth opening displacement“

Denkt man sich eine Gerade parallel zum elastischen Anstieg der Lastverschiebungskurve durch die Höchstkraft  $F_{max}$  gezogen, so stellt der Abschnitt zwischen dem Schnittpunkt der Parallelen durch die Höchstkraft mit der Abszisse und der Verschiebung bei Höchstlast die Rissinitiierungsenergie dar, aus der der Anteil der plastischen Verformung bestimmt werden kann.

Um Angaben über die „Empfindlichkeit“ eines spröden bzw. quasi-spröden Werkstoffes gegen Risswachstum zu erhalten, wurde die charakteristische Länge  $l_{ch}$  eingeführt [HMP76]. Wenn die spezifische Bruchenergie  $G_F$ , der E-Modul und die Kerbbiegezugfestigkeit  $\sigma_{KBF}$  bekannt sind, dann lautet die Gleichung:

$$l_{ch} = \frac{G_F \cdot E}{\sigma_{KBF}^2} \quad (4.7)$$

$l_{ch}$  ..... charakteristische Länge [ $m$ ]  
 $G_F$  ..... spezifische Bruchenergie [ $\frac{N}{m}$ ]  
 $E$  ..... Elastizitätsmodul [ $\frac{N}{m^2}$ ]  
 $\sigma_{KBF}$  ..... Kerbbiegezugfestigkeit [ $\frac{N}{m^2}$ ]

Die charakteristische Länge gilt als eine reine Materialeigenschaft. Sie besitzt die Dimension Meter und hat keine direkte physikalische Bedeutung. Ist der Wert  $l_{ch}$  klein, dann ist der Werkstoff spröde, die Entfestigung des Materials gering, und der Riss breitet sich schnell aus. Ist der Werkstoff hingegen „zäh“ und hat einen hohen Risswiderstand, so ist der  $l_{ch}$ -Wert groß und der Riss bleibt stecken. Mit

Hilfe der charakteristischen Länge lassen sich die Rissausbreitungseigenschaften bei Baustoffen bewerten [Buc08]. Eine Anwendung der charakteristischen Länge auf Beton-Bitumenverbunden ist erstmals entwickelt worden und sollte in Zukunft durch weitere Anwendungen wiederholt werden.

#### **4.2.3 Vor- und Nachteile der Keilspaltmethode**

Es wurde bereits in mehreren Forschungsarbeiten gezeigt, dass die Keilspaltmethode nach Tschegg [Tsc86] geeignet ist, die mechanischen und bruchmechanischen Eigenschaften von unterschiedlichsten Werkstoffen, aber auch von Werkstoffverbindungen zu ermitteln. Die Prüfmethode garantiert einen stabilen Rissfortschritt, weshalb mit diesem Verfahren Kennwerte ermittelt werden, die mit herkömmlichen, genormten und für verbindlich erklärten Prüfverfahren, wie zum Beispiel mit dem Haftzugversuch, nicht bestimmt werden können. Einer der wesentlichsten Vorteile der Prüfmethode ist, dass alle gängigen Probeformen (Würfel, Balken, Bohrzylinder, usw.) verwendet werden können. Die Präparation der Probekörper für den Keilspaltversuch ist im Vergleich zum Haft-Zugversuch weniger aufwendig.

# 5 Ergebnisse der Materialprüfungen

## 5.1 Haft-Zugversuch

Die folgenden Kapiteln enthalten die Ergebnisse durchgeführter Haft-Zugversuche von sechs unterschiedlichen Probetypen. Im Kapitel 5.1.1 werden die Rissverläufe und entstandenen Bruchflächen analysiert und im Kapitel 5.1.2 die gemessenen Haftzugfestigkeiten dargestellt. Die Materialprüfungen wurden jeweils an drei identen Probekörper pro Probentyp durchgeführt. Bei den Ergebnissen der Haftzugfestigkeiten handelt es sich um Mittelwerte mit Standardabweichung, gewonnen aus je drei Messungen.

### 5.1.1 Rissverläufe

Die Methode des Haft-Zugversuches zur Bestimmung der Festigkeit zwischen Beton und Abdichtungsbahn ermöglicht eine Bewertung der Haftungseigenschaften. Der Haftverbund aus Beton und aufgeflämmter Abdichtungsbahn kann auf unterschiedliche Arten versagen:

- Rissverlauf im Interface Betonoberfläche und Abdichtungsbahn (Versagenstyp A, siehe Abb. 5.1A)
- Rissverlauf im Interface Sandschicht und Abdichtungsbahn (Versagenstyp B, siehe Abb. 5.1B)
- Rissverlauf im Interface Klebeschicht und oberer Aluminiumdeckel (Versagenstyp C, siehe Abb. 5.1C)
- Rissverlauf im Interface Beton und Klebeschicht (Versagenstyp D, siehe Abb. 5.1D)
- Kombination unterschiedlicher Versagenstypen

Die Abbildung 5.1 zeigt die Versagenstypen A, B, C und D anhand schematisierter Probekörper. Das jeweils geschädigte Interface wird durch die rote Linie (Rissverlauf) gekennzeichnet.

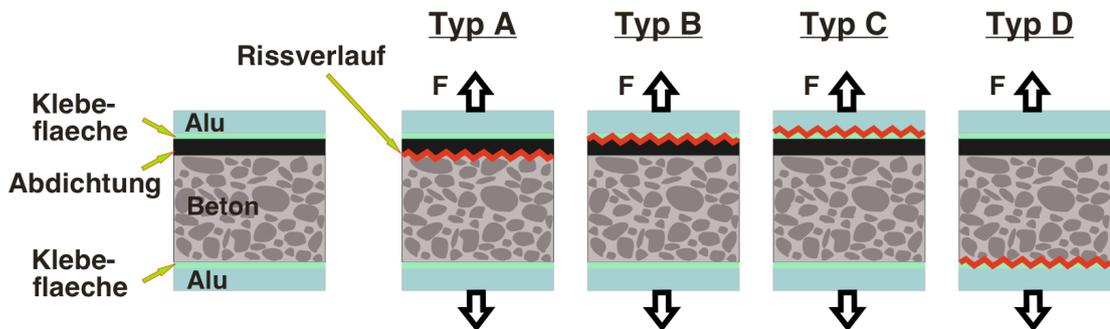


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Rissverläufe

Die Tabelle 5.1 enthält eine Statistik der Versagenstypen der durchgeführten Materialprüfungen. Bei der Prüftemperatur von +23°C erfolgte der Rissverlauf im Verbund für gute 60% der Probekörper nach Versagenstyp A und für die restlichen 40% nach Versagenstyp B. Bei den Tests mit Prüftemperatur von 0°C versagten 20% nach Versagensmuster A und die restlichen, bis auf zwei Ausnahmen, nach Typ B.

| Versagenstypen |         |   |   |   | Versagenstypen |   |   |   |   | Versagenstypen |         |   |   |   |                |                |         |   |   |  |
|----------------|---------|---|---|---|----------------|---|---|---|---|----------------|---------|---|---|---|----------------|----------------|---------|---|---|--|
|                | A       | B | C | D |                | A | B | C | D |                | A       | B | C | D |                |                |         |   |   |  |
| <b>1BV_23°</b> | Probe a |   | x |   |                |   |   |   |   | <b>2BV_23°</b> | Probe a | x |   |   | <b>3BV_23°</b> | Probe a        | x       |   |   |  |
|                | Probe b |   | x |   |                |   | x |   |   |                | Probe b |   | x |   |                |                | Probe b | x |   |  |
|                | Probe c | x |   |   |                |   |   | x |   |                | Probe c |   |   | x |                |                | Probe c | x |   |  |
| <b>1HV_23°</b> | Probe a | x |   |   |                |   |   |   |   | <b>2HV_23°</b> | Probe a | x |   |   |                | <b>3HV_23°</b> | Probe a |   | x |  |
|                | Probe b | x |   |   |                |   |   | x |   |                | Probe b | x |   |   |                |                | Probe b | x |   |  |
|                | Probe c |   | x |   |                |   |   | x |   |                | Probe c | x |   |   |                |                | Probe c |   | x |  |
| Versagenstypen |         |   |   |   | Versagenstypen |   |   |   |   | Versagenstypen |         |   |   |   |                |                |         |   |   |  |
|                | A       | B | C | D |                | A | B | C | D |                | A       | B | C | D |                |                |         |   |   |  |
| <b>1BV_0°</b>  | Probe a |   | x |   |                |   |   |   |   | <b>2BV_0°</b>  | Probe a |   | x |   |                | <b>3BV_0°</b>  | Probe a |   | x |  |
|                | Probe b |   | x |   |                |   |   | x |   |                | Probe b | x |   |   |                |                | Probe b |   | x |  |
|                | Probe c |   | x |   |                |   |   |   | x |                | Probe c |   | x |   |                |                | Probe c |   | x |  |
| <b>1HV_0°</b>  | Probe a |   | x |   |                |   |   |   |   | <b>2HV_0°</b>  | Probe a | x |   |   |                | <b>3HV_0°</b>  | Probe a |   | x |  |
|                | Probe b |   | x |   |                |   |   |   | x |                | Probe b |   | x |   |                |                | Probe b |   | x |  |
|                | Probe c | x |   |   |                |   |   |   | x |                | Probe c | x |   |   |                |                | Probe c | x | x |  |

Tabelle 5.1: Statistik zur Auftrittshäufigkeit der Versagenstypen beim Haft-Zugversuch

Die Probenkennzeichnung 1, 2 und 3 bezeichnet die Oberflächen der Betonplatten nach Schalungsbeton (1), Betonschlämme (2) und Wasserstrahlbehandelt (3). Die Voranstriche werden mit den Abkürzungen BV (Büscherit) und HV (Hydrobit) unterschieden.

Mit den eben aufgezählten Versagenstypen werden die Bruchflächen der getesteten Probekörper beschrieben. Die nachfolgenden Fotoreihen dokumentieren die am häufigsten aufgetretenen Rissverläufe, Typ A und B. Die Abbildung 5.2a zeigt den Verlauf einer Risseinleitung für +23°C. Bei Raumtemperatur besitzt das Bitumen eine hohe Duktilität. Daher bildet sich zwischen Betonoberfläche und Abdichtungsbahn eine Bridgingfläche aus, die das Ablösen des Aluminiumdeckels vom Bitumen erschwert. Befinden sich im Verbund Sandschicht/Abdichtungsbahn Schwachstellen, so versagt der Probekörper auch bei Raumtemperatur nach Typ B.



(a)



(b)

Abbildung 5.2: a) Fotoreihe Versagenstyp A bei +23°C Prüftemperatur

b) Fotoreihe Versagenstyp B bei 0°C Prüftemperatur

Die Abbildung 5.2b zeigt den Rissverlauf bei 0°C im Interface Sandschicht und Abdichtungsbahn. Bei 0°C ist das Bitumen steifer und spröder, dadurch muss mehr Kraft aufgebracht werden, um den Aluminiumdeckel abzulösen. Tritt der Versagentyp B ein, löst sich die, als UV-Schutz gedachte, Sandbeschichtung von der Oberfläche der Bitumenbahn ab.

Die Abbildung 5.3a und b zeigt den Probekörper und abgelösten Aluminiumdeckel nach Versagenstyp A und Abbildung 5.3c und d nach Versagenstyp B.

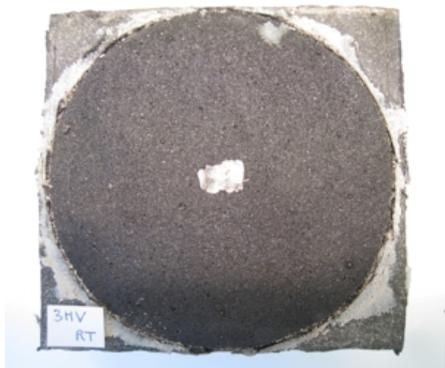
Aufgrund eines unzureichend gereinigten Aludeckels des Probekörpers 3HV (Temp.: 0°C; Probe c), versagten die Grenzflächen kombiniert nach Typ B und C. Die Abbildung 5.4 zeigt die geschädigten Interfaces nach Versagenstyp B und C. Ebenso aufgetreten ist Versagenstyp D, wie in Abbildung 5.5 mit dem Pro-



(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 5.3: Erläuterung Versagenstypen A und B:

- a) Probekörper 3BV bei 23°C Versagenstyp A
- b) Aludeckel 3BV bei 23°C Versagenstyp A
- c) Probekörper 3HV bei 23°C Versagenstyp B
- d) Aludeckel 3HV bei 23°C Versagenstyp B

Probekörper 2BV (Temp.: 0°C; Probe c) gezeigt wird. Um ein wiederholtes Auftreten des Versagenstyps D zu verhindern, wurden die nachfolgenden Probekörper an der Unterseite mit einer Drahtbürste gesäubert, entfettet und dann aufgeklebt.

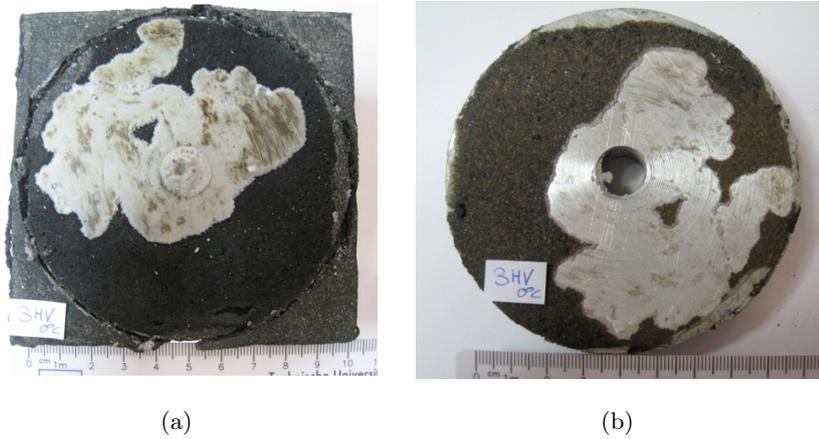


Abbildung 5.4: Probekörper 3HV (Temp.: 0°C; Probe c): Bruchfläche entstanden durch 50% Versagenstyp B und 50% Typ C

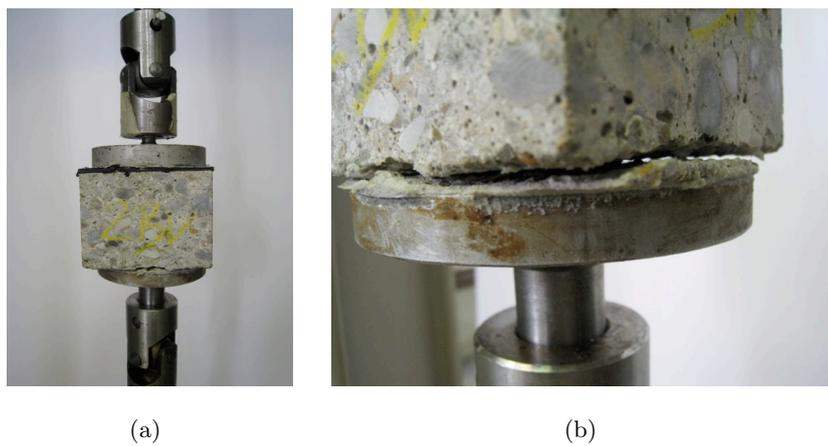


Abbildung 5.5: Erläuterung Versagenstyp D: Riss im Interface Beton und unterer Aluminiumdeckel

## 5.1.2 Haft-Zugfestigkeiten

Die Abbildung 5.6 zeigt die Auswertung der gemessenen Haftzugfestigkeiten bei  $+23^{\circ}\text{C}$  und  $0^{\circ}\text{C}$ . Bei Raumtemperatur variieren die Haftzugfestigkeiten zwischen  $0,2$  und  $0,3 \text{ N/mm}^2$ . Die Ergebnisse der Materialprüfungen bei  $0^{\circ}\text{C}$  befinden sich zwischen  $1,2$  und  $1,4 \text{ N/mm}^2$ . Durch die hohe Steifigkeit des Bitumens bei  $0^{\circ}\text{C}$ , erreicht der Haftverbund in etwa die fünffache Festigkeit gegenüber den Messungen bei  $+23^{\circ}\text{C}$ .

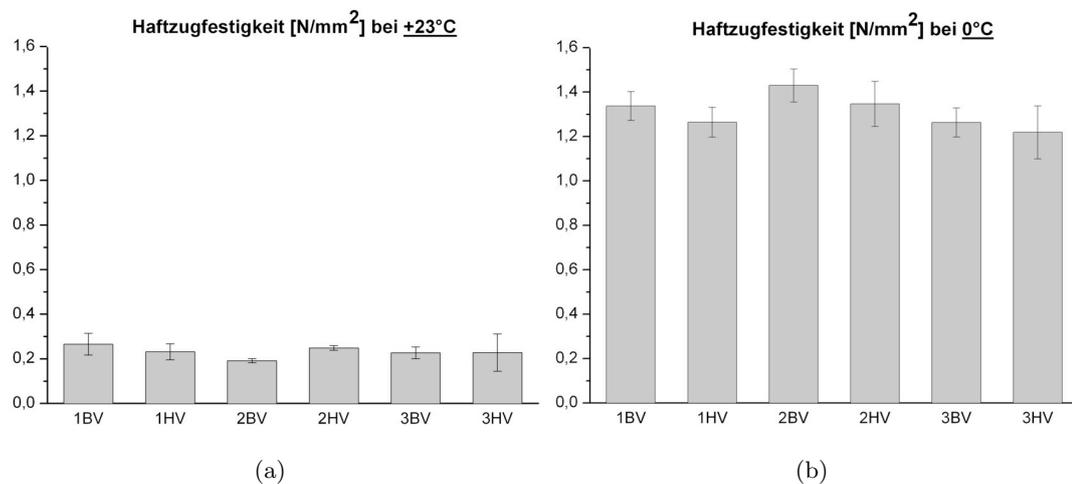


Abbildung 5.6: Haftzugfestigkeiten: a) Prüftemperatur bei  $+23^{\circ}\text{C}$ , b) Prüftemperatur bei  $0^{\circ}\text{C}$

Die Durchführung der Haft-Zugversuche war zur Charakterisierung des Haftverbundes zwischen Betonoberfläche und Bitumenbahn gedacht. Trotz unterschiedlicher Versagenstypen (siehe Tabelle 5.1) sind keine markanten Abweichungen der Haftzugfestigkeiten erkennbar. So ergeben drei Prüfungen des Probekörpers 2BV bei Raumtemperatur nur gering gestreute Haftzugwerte, obwohl Probe a nach Typ A und die Proben b,c nach Typ B versagten. Ein zielsicheres Versagen im Schichtverbund Betonoberfläche/Bitumenbahn kann nicht erreicht werden. Die Interpretation der Prüfergebnisse wird dadurch erschwert. Der Haft-Zugversuch erweist sich als ungeeignet, eine Aussage über den Einfluss unterschiedlich gestalteter Betonoberflächen auf die Qualität des Haftverbundes abzuleiten.

## 5.2 Keilspaltversuche

Nach den Haft-Zugversuchen aus Kapitel 5.1 wurden weitere Probekörper mithilfe der Keilspaltmethode geprüft. Die Messungen wurden wieder an sechs verschiedenen Probetypen zu je drei Probekörper und mit unterschiedlichen Prüftemperaturen durchgeführt. Diese Prüftemperaturen variierten bei  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $+10^{\circ}\text{C}$  bis  $+23^{\circ}\text{C}$ . Im folgenden Kapitel 5.2.1 werden die aufgetretenen Rissverläufe beschrieben. Das Kapitel 5.2.2 beinhaltet die Kerbbiegezugfestigkeiten und spezifischen Bruchenergien und am Ende eine Diskussion der Ergebnisse.

### 5.2.1 Rissverläufe

Vor allem die Prüfungen bei Temperaturen von  $+10^{\circ}\text{C}$  und  $+23^{\circ}\text{C}$  zeigten ein ausgeprägtes Bridgingverhalten, das in Kapitel 2.1 beschrieben ist. Anhand der Abbildung 5.7a lässt sich der Verlauf des Risses gut feststellen. Die ersten beiden Aufnahmen zeigen eine Bridgingzone mit Bitumenfasern zwischen den Bruchflächen. Im dritten Bild in Abbildung 5.7a breitet sich der bereits offene Riss entlang des Beton-Bitumen Interfaces aus. Dieses plastische Verhalten des Bitumens bei wärmeren Temperaturen trägt wesentlich zur Erhöhung des Risswiderstandes bei und führt zum Stoppen des Risses.

Die Abbildung 5.7b zeigt den Rissverlauf eines Probentyps bei den Prüftemperaturen  $+23^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$  und  $-10^{\circ}\text{C}$ . Von der linken Aufnahme bei  $+23^{\circ}\text{C}$  bis zur Rechten bei  $-10^{\circ}\text{C}$  verändert sich der Bridgingeffekt stark. Bei kälteren Prüftemperaturen wird der Haftverbund Beton-Bitumen steifer und spröder. Der Bridgingeffekt zwischen den Bruchflächen wird geringer und bei  $-10^{\circ}\text{C}$  ist die Wirkung nicht mehr zu beobachten.

Die Abbildung 5.8 zeigt die zur Abbildung 5.7b zugehörigen Kraft-Weg Diagramme, wobei die Ordinate die Spaltkraft in [N] und die Abszisse die Breite des Risses in [mm] anzeigt. Auf das Kraft-Weg Diagramm bei der Prüftemperatur von  $+10^{\circ}\text{C}$  wurde hier verzichtet, da dieses ähnliche Charakterzüge aufzeigt wie bei  $+23^{\circ}\text{C}$ .

Der Verlauf der Diagramme bei  $+23^{\circ}\text{C}$  und  $0^{\circ}\text{C}$  in Abbildung 5.8 entsprechen den schematisierten Kraft-Wegkurven in Kapitel 2. Das Diagramm bei  $-10^{\circ}\text{C}$  weicht stark von diesem Verlauf ab. Die Spaltkraft erhöht sich sehr schnell, ohne

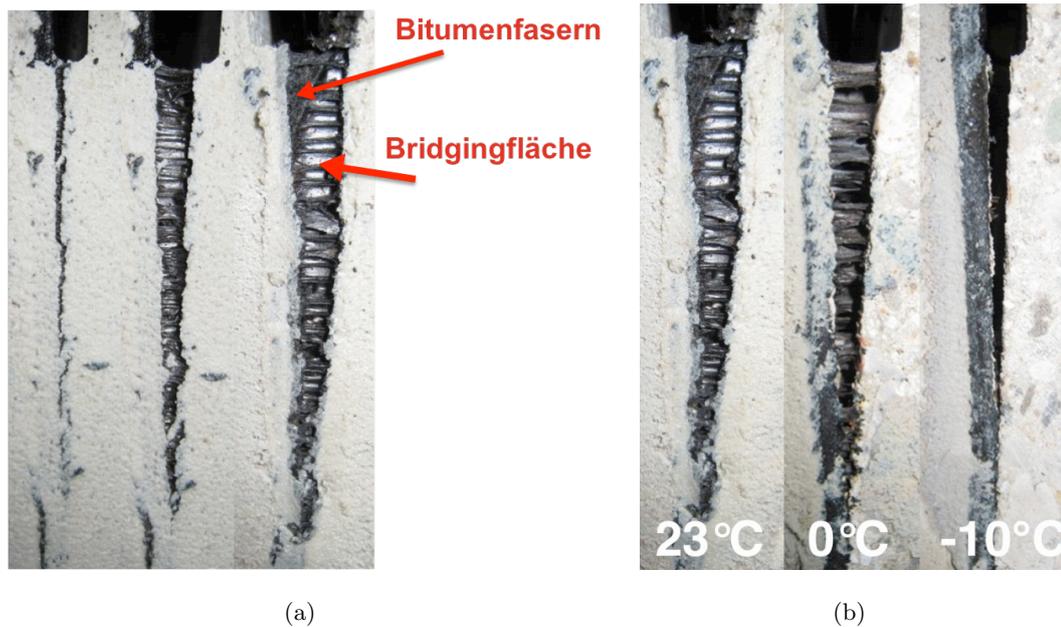


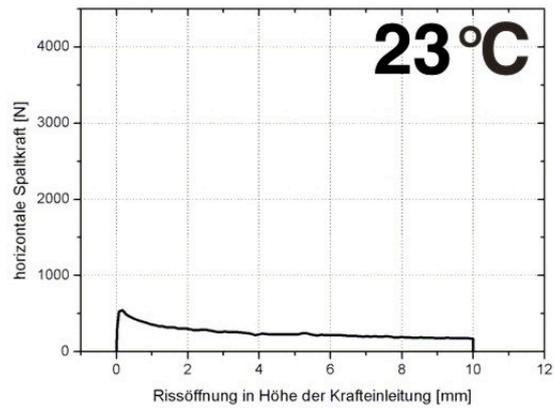
Abbildung 5.7: a) Bridgingverhalten während Rissausbreitung; b) Bridgingverhalten bei unterschiedlichen Prüftemperaturen

dass in der Starterkerbe eine Rissinitiierung einleitet wird. Die angesammelte Verformungsenergie kann durch plastisches Verformen nicht abgebaut werden. Erreicht die Spaltkraft ihren Maximalwert, wird die Rissinitiierung plötzlich eingeleitet und der Haftverbund versagt „spröde“.

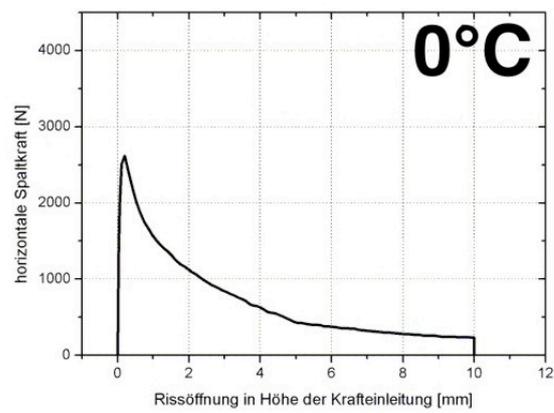
Die Stelle der Rissinitiierung wird in Abbildung 5.9 gezeigt. Nachdem die Rissinitiierung am Kerbgrund stattgefunden hat, verläuft der Riss zuerst im Beton. Findet der Riss einen geschwächten Teil im Beton-Bitumen Haftverbund, breitet er sich entlang dieses Interfaces aus. Nach der schnellen Kraftabnahme erhöht sich der Risswiderstand durch auftretende Bridgingeffekte und bremst dadurch die Rissausbreitung.

Während den Keilspaltversuchen konnte beobachtet werden, dass für alle Prüftemperaturen die Rissinitiierung nach drei unterschiedlichen Versagenstypen erfolgt:

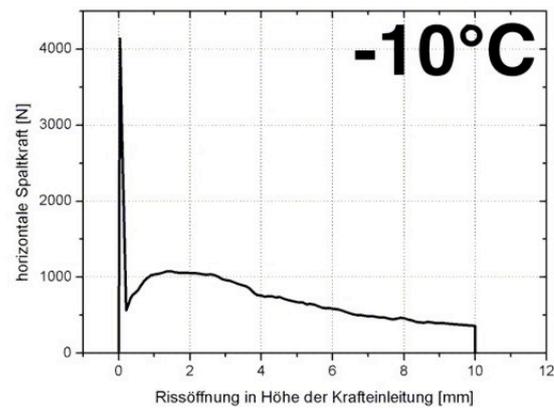
- Durchgehender Riss im Interface Betonoberfläche und Bitumenbahn (Versagenstyp A, siehe Abb 5.10A)
- Zuerst Riss im Interface Betonoberfläche und Bitumenbahn, danach Rissumleitung in die Bitumenbahn (Versagenstyp B, siehe Abb 5.10B)



(a)

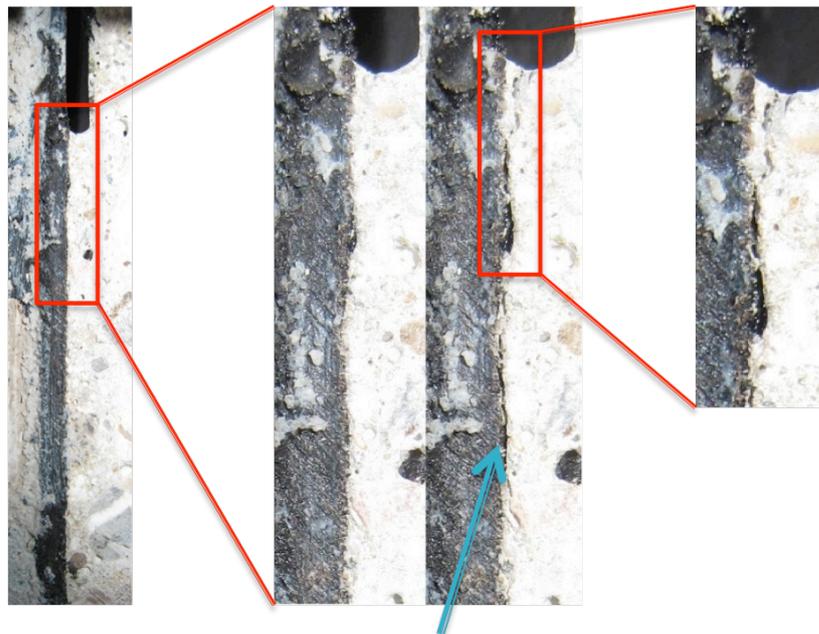


(b)



(c)

Abbildung 5.8: Kraft-Weg Diagramme bei den Temperaturen a) +23°C; b) 0°C; c) -10°C



Interface bricht auf

Abbildung 5.9: Risseinleitung einer Materialprüfung bei  $-10^{\circ}\text{C}$  Prüftemperatur

- Durchgehender Riss in der Bitumenbahn (Versagenstyp C, siehe Abb 5.10C)

Die Abbildung 5.10 zeigt eine schematische Übersicht dieser Versagenstypen. Im linken Bild wird der Versagenstyp A dargestellt, der bei Prüfungen mit  $+23^{\circ}\text{C}$  Raumtemperatur beobachtet wurde. In seltenen Fällen jedoch auch bei kalten Probekörpern, deren Betonoberflächen mit Hydrobit angestrichen wurden. Die Versagenstypen B und C treten hingegen nur bei den Prüftemperaturen  $-10^{\circ}\text{C}$  und  $0^{\circ}\text{C}$  auf. Beim Versagenstyp B, siehe mittleres Bild in Abbildung 5.10, erfolgt nach dem zuvor besprochenen Schema eine „spröde“ und sehr schnelle Rissausbreitung im Interface Betonoberfläche und Bitumenbahn. Durch weiteres Öffnen des Risses wird dieser ins Bitumen umgeleitet und weitergeführt. Bei Versagenstyp C erfolgt die Rissinitiierung direkt in der Bitumenbahn entlang der eingebetteten Trägereinlage aus Filz.

### 5.2.2 Kerbbiegezugfestigkeiten und spezifische Bruchenergien

In der Literatur findet man Untersuchungen zur Charakterisierung von bituminösen Asphaltverbunden [TTSL96]. Die Ergebnisse der Keilspaltversuche an bituminösen Werkstoffen weisen auf einen typischen Verlauf der Kerbbiegezugfestigkeiten und

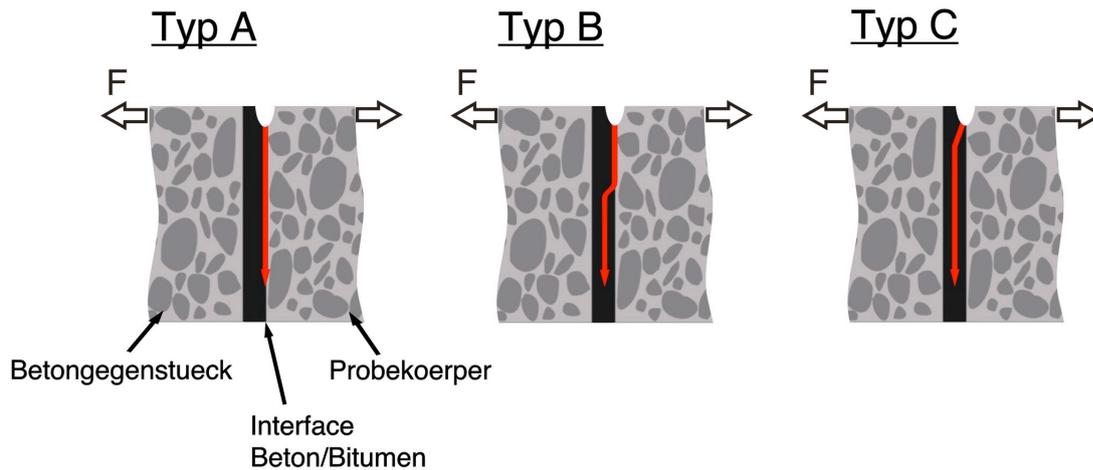


Abbildung 5.10: Schematische Darstellung der Rissverläufe während der Keilspaltversuche

der spezifischen Bruchenergien hin (Abbildung 5.11).

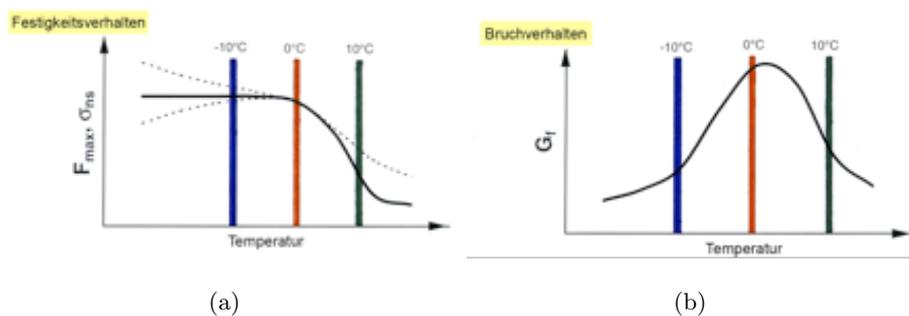
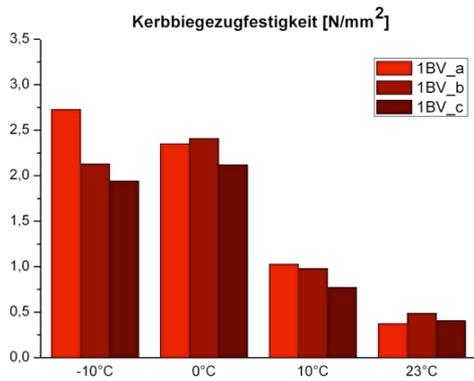


Abbildung 5.11: Schematische Darstellung der Temperaturabhängigkeit von a) Kerbbiegezugfestigkeiten und b) Spezifischen Bruchenergien [TTSL96]

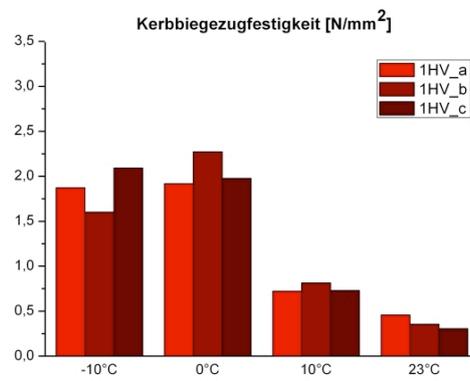
Der Verlauf der Kerbbiegezugfestigkeit im Temperaturbereich von  $-40^{\circ}\text{C}$  bis  $+40^{\circ}\text{C}$  zeigt, dass bei zirka  $0^{\circ}\text{C}$  ein starker Abfall festgestellt wird. Die Bruchenergie hingegen erreicht bei  $0^{\circ}\text{C}$  ihr Maximum. In Richtung niedriger und höherer Temperatur verringert sich der Rissausbreitungswiderstand und fällt auf niedrige Werte ab. Es ist daher sinnvoll, die Untersuchungen am Beton-Bitumen Haftverbund im Temperaturbereich von  $-10^{\circ}\text{C}$  bis  $+23^{\circ}\text{C}$  durchzuführen. Bei tieferen ( $< -10^{\circ}\text{C}$ ) und höheren ( $> +23^{\circ}\text{C}$ ) Temperaturen ändern sich die Werte nur mehr gering.

Die bruchmechanischen Kennwerte wurden durch Messungen an jeweils drei Pro-

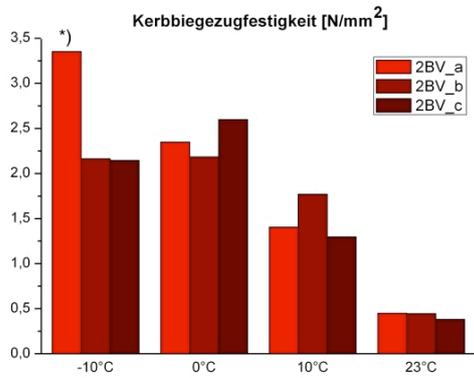
be Körper eines Typs (Probe a, b und c) gewonnen. Wie schon erwähnt, wurden die Prüfungen bei den Temperaturen von  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $+10^{\circ}\text{C}$  und  $+23^{\circ}\text{C}$  mit einer Vorschubgeschwindigkeit von  $3\text{ mm/min}$  durchgeführt [Tsc86]. Die Abbildung 5.12 beinhaltet die Kerbbiegezugfestigkeiten und die Abbildung 5.13 die zugehörigen spezifischen Bruchenergien. In den Histogrammen gibt es Balken, deren Streuung gegenüber den restlichen Balken in der Gruppe groß ist. Diese Balken wurden mit dem Zeichen „\*“ markiert und die Gründe für diese Differenzen im Anschluss erläutert.



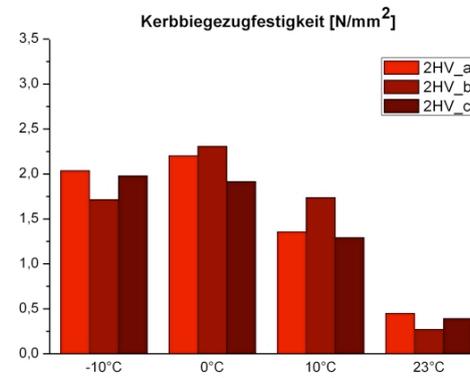
(a)



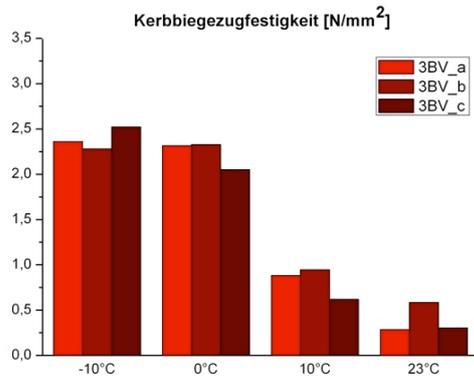
(b)



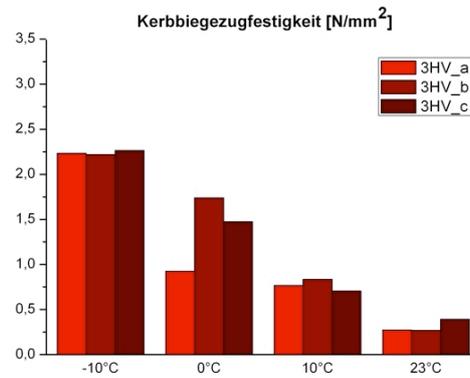
(c)



(d)

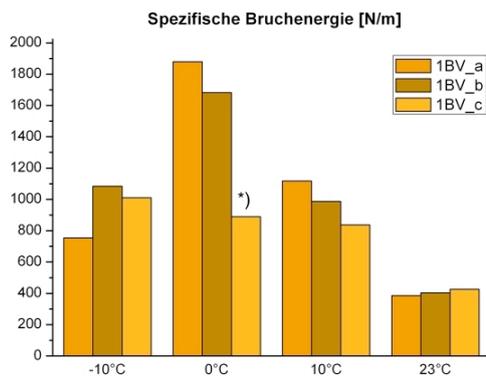


(e)

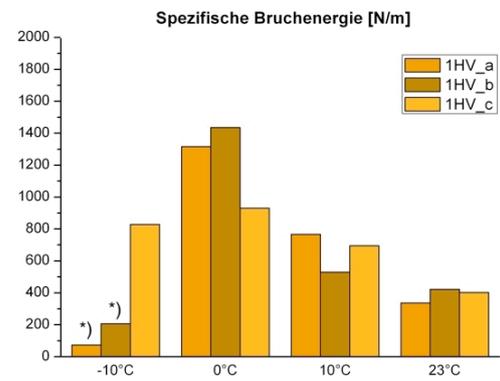


(f)

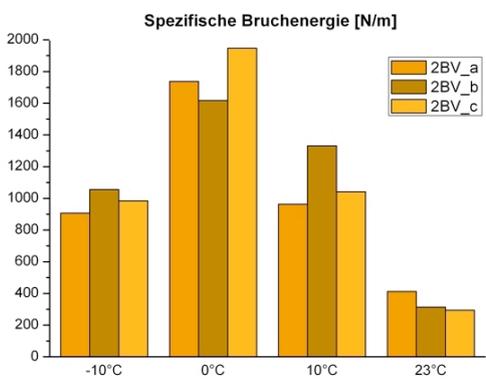
Abbildung 5.12: Kerbbiegezugfestigkeiten der Probetypen a) 1BV; b) 1HV; c) 2BV; d) 2HV; e) 3BV; f) 3HV



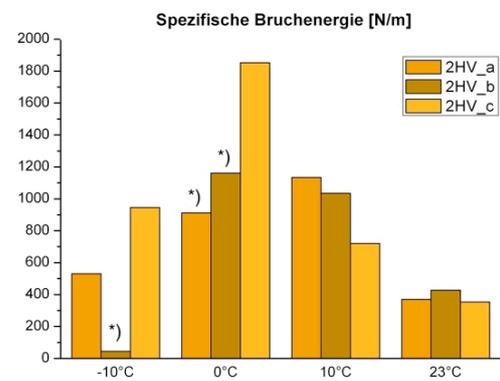
(a)



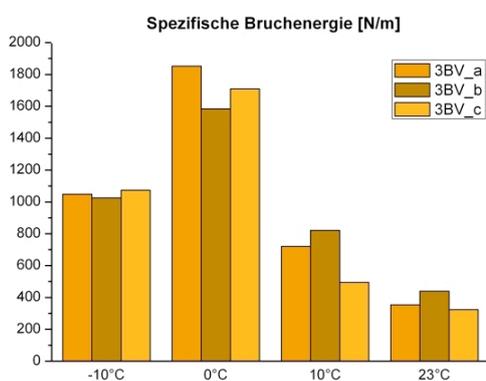
(b)



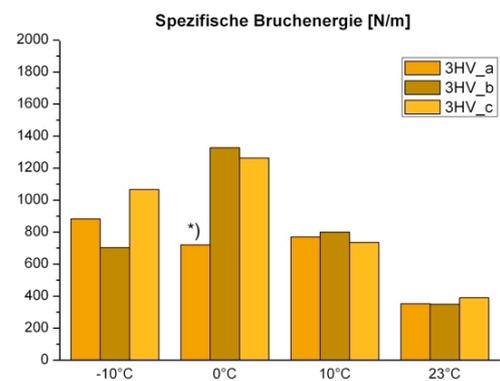
(c)



(d)



(e)



(f)

Abbildung 5.13: Spezifische Bruchenergien der Probetypen a) 1BV; b) 1HV; c) 2BV; d) 2HV; e) 3BV; f) 3HV

Im Folgenden werden die Gründe für die markierten Abweichungen „\*)“ in den Histogrammen aufgelistet und die dabei entstandenen Bruchflächen dokumentiert:

Probentyp 2BV, Kerbbiegezugfestigkeit bei -10°C: Die Kerbbiegezugfestigkeit der Probe a (Abb. 5.12c) hebt sich von den Proben b und c durch einen größeren Wert ab. Dieser hohe Wert erklärt sich durch eine Risseinleitung nach Versagenstyp B, bei der zuerst das Beton-Bitumen Interface geschädigt wird und danach der Riss in die Bitumenbahn umgeleitet wird. Bei der Probe b und c beginnt der Riss von Beginn an in der Bitumenbahn zu laufen (Versagenstyp C). Der Riss lässt sich in der Bitumenbahn leichter einleiten als in der Beton-Bitumen Grenzfläche. Eine Rissinitiierung im Interface Betonoberfläche und Bitumenbahn ist daher erstrebenswert.

Probentyp 1BV, Spezifische Bruchenergie bei 0°C: Die spezifische Bruchenergie des Probekörper 1BV Probe c (Abb. 5.13a) zeigt einen, um zirka 50% geringeren Wert im Gegensatz zu den Proben a und b auf. Abbildung 5.15a zeigt die Probe a mit einem durchgehenden Riss in der Bitumenbahn nach Versagenstyp C. Die Probe c hatte Schwachstellen im Beton-Bitumen Interface, die für den geringen Risswiderstand verantwortlich sind. Diese Schwachstellen entstanden durch kleine, lockere Betonstücke an der Betonoberfläche, siehe Abbildung 5.15b.

Probentyp 1HV, Spezifische Bruchenergie bei -10°C: Die Bruchenergien der Probekörper 1HV Probe a und b (Abb. 5.13b) weisen einen sehr kleinen Wert auf, im Gegensatz zur Probe c. Der Grund dafür ist, dass die Rissinitiierung bei Probe a und b nach Versagenstyp B erfolgte, d.h. der Riss wird nach dem Bruch des Interfaces Betonoberfläche und Bitumenbahn in die Bitumenbahn umgeleitet, siehe Abbildung 5.15c. Bei Probe c entstand der Riss nach Versagenstyp C gleich zu Beginn in der Bitumenbahn, siehe Abbildung 5.15d, und weist deswegen auch mindestens den vierfachen Risswiderstand auf. Der Rissausbreitungswiderstand ergibt in der Bitumenbahn (Versagenstyp C) einen höheren Wert als im Beton-Bitumen Interface.

Das Auftreten der Versagenstypen B und C erklären auch die Differenzen der spezifischen Bruchenergie des Probentyps 2HV bei 0°C (Abb. 5.13d) und des Probentyps 3HV bei 0°C (Abb. 5.13f), wobei jeweils Risse der Proben mit den höheren Bruchenergien nach Versagenstyp C eingeleitet wurden. Der Hydrobit-Voranstrich trägt bei den kalten Prüftemperaturen (-10°C und 0°C) stark zur Ver-

sprödung des Beton-Bitumen Interface bei. Deswegen erreichen die kalten Hydrobit-Proben bei einem Rissverlauf im Beton-Bitumen Interface einen geringen Rissausbreitungswiderstand, wie bei einer Rissausbreitung in der Bitumenbahn.

Probentyp 2HV, Spezifische Bruchenergie bei  $-10^{\circ}\text{C}$ : Die spezifische Bruchenergie der Probe b (Abb. 5.13d) ist sehr klein gegenüber Probe a und c. In Abbildung 5.14a wird die Probe a dargestellt, deren Interface nach Versagenstyp B aufbrach und deswegen, wie auch Probe c, einen hohen Risswiderstand aufweist. Die Probe b versagte nach Typ A, siehe Abbildung 5.14b, also in diesem Fall eine Rissausbreitung im Interface Betonoberfläche und Bitumenbahn mit äußerst geringem Widerstand. Der Grund für dieses Versagen ist die Versprödung des Beton-Bitumen Interfaces durch den Hydrobit-Voranstrich bei kalten Temperaturen.

In der Abbildung 5.16 sind die Ergebnisse der Keilspaltversuche zusammengefasst.

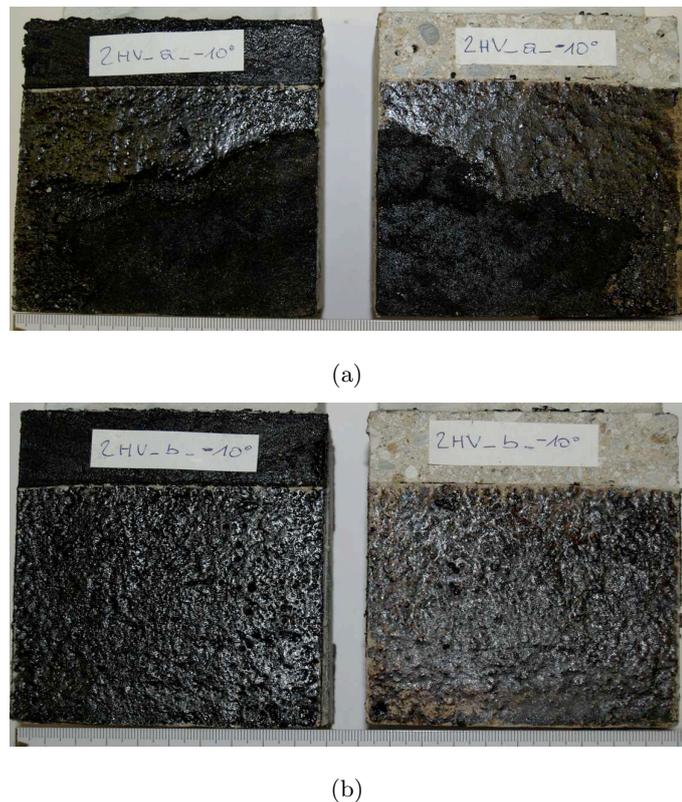


Abbildung 5.14: Bruchfläche Typ 2HV, Prüftemperatur  $-10^{\circ}\text{C}$ : a) Probe a; b) Probe b



(a)



(b)

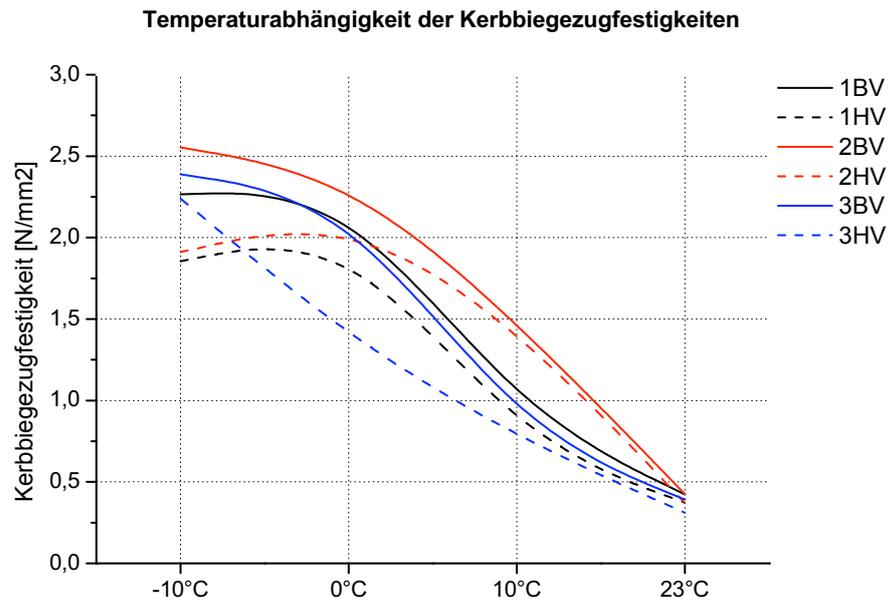


(c)

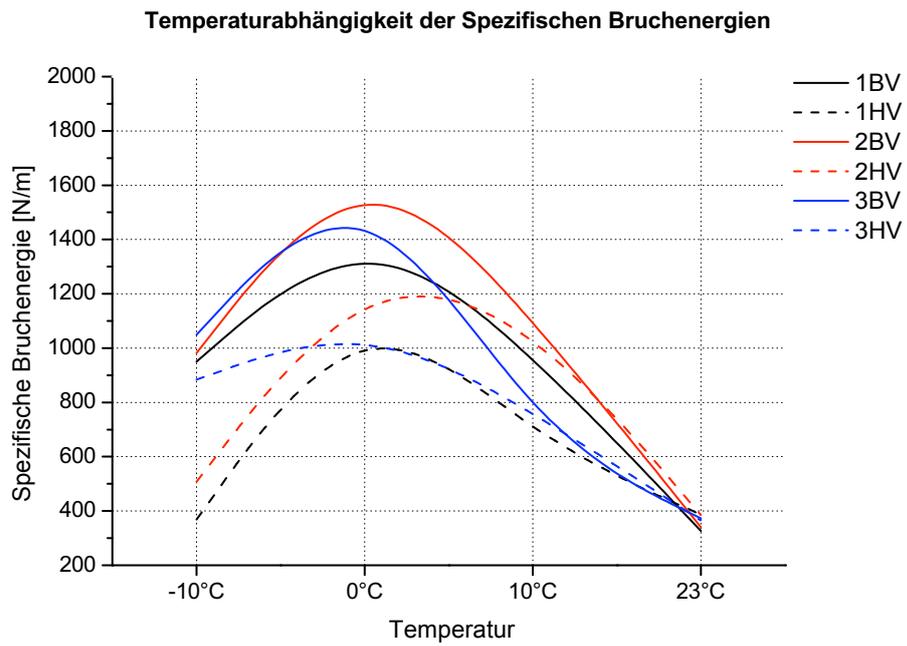


(d)

Abbildung 5.15: Bruchfläche Typ 1BV, Prüftemperatur 0°C: a) Probe a; b) Probe c  
 Bruchfläche Typ 1HV, Prüftemperatur -10°C: c) Probe b; d) Probe c



(a)



(b)

Abbildung 5.16: Übersicht der Einzelmessungen anhand der sechs unterschiedlichen Probetypen

Die bruchmechanischen Kennwerte der Probekörper mit Büscherit-Voranstrich (BV, durchgezogene Linien) liegen im Allgemeinen über den Kennwerten der Proben mit Hydrobit-Voranstrich (HV, strichlierte Linien). Vor allem bei Temperaturen unter 0°C führt der Hydrobit-Voranstrich zu einer „Versprödung“ des Beton-Bitumen Interfaces und verschlechtert die Qualität der bruchmechanischen Werte. Bei -10°C erreicht der Probekörper 1HV (Schalungsbeton mit Hydrobit-Voranstrich) nur 40% der Bruchenergie der Probe 1BV (Schalungsbeton mit Büscherit-Voranstrich).

Die Kerbbiegezugfestigkeiten liegen bei niedrigen Prüftemperaturen im Bereich zwischen 1,5 und 2,5  $N/mm^2$  und bei Raumtemperatur um die 0,5  $N/mm^2$ . Der Probetyp 2BV (Betonschlämme, Hydrobit-Voranstrich) erreicht bei allen Prüftemperaturen die höchste Kerbbiegezugfestigkeit. Der Probekörper 3HV (wasserstrahlbehandelt, Hydrobit) erreicht durchwegs die niedrigste Festigkeit.

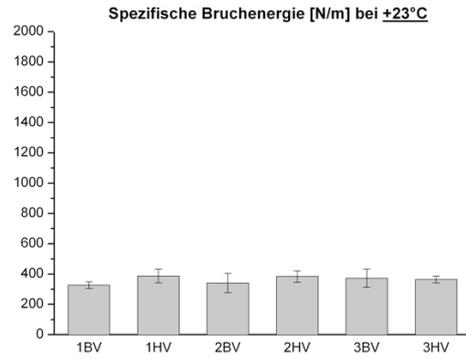
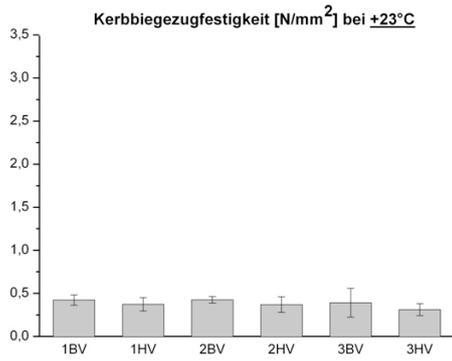
Die spezifischen Bruchenergien liegen bei -10°C zwischen 400 und 1100  $N/m$ , erreichen bei 0°C ihre Maxima von 1000 bis 1500  $N/m$  und haben bei Raumtemperatur einen gemeinsamen Wert von 400  $N/m$ . Auf die höchsten Risswiderstände mit einem Maximum von 1500  $N/m$  kommt der Probekörper 2BV. Alle sechs Probetypen haben ihren maximalen Risswiderstand in der Nähe von 0°C.

Mit den Ergebnissen der Keilspaltversuche kann der Einfluss unterschiedlicher Betonoberflächengestaltungen auf den Haftverbund charakterisiert werden. Die Kerbbiegezugfestigkeiten der wasserstrahlbehandelten Betonoberflächen (blaue Messkurven in Abbildung 5.16a) deuten auf keinen wesentlichen Vorteil gegenüber den Schalungsbeton-Probekörpern (schwarze Messkurven) hin. Die Risswiderstände verlaufen ebenso ähnlich, bis auf eine Abweichung der Probetypen 1HV und 3HV bei der Prüftemperatur -10°C. Hier erreicht der Probentyp 1HV nur 45% vom Risswiderstand des Typs 3HV.

Der Probetyp 2HV (Betonschlämme mit Hydrobit-Voranstrich) erreicht unter den Hydrobit-Proben bei 0°C, +10°C und +23°C die höchsten Kennwerte. Bei der Temperatur -10°C kommt die Probe 2HV auf 85% der Festigkeit und auf 55% der Bruchenergie des Probetyps 3HV. Unter den Büscherit-Proben zeigt der Typ 2BV bei allen Temperaturen die höchste Festigkeit und Bruchenergie auf.

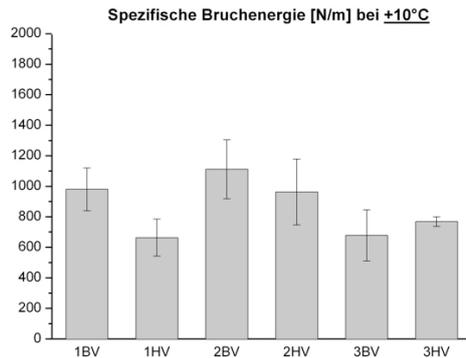
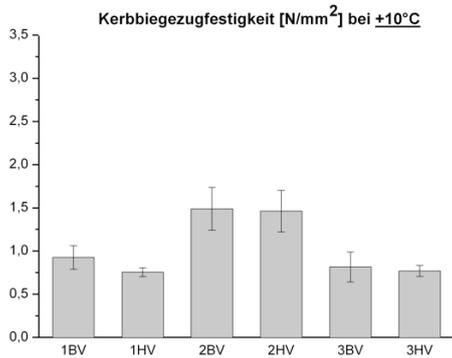
Um die Abhängigkeit der Haftverbundsqualität von der Art des Voranstriches zeigen zu können, sind in der Abbildung 5.17 die bruchmechanischen Werte bezo-

gen auf die Prüftemperaturen dargestellt. Bei +23°C ergeben die Prüfungen der Hydrobit- sowie der Büscherit-Proben keine merklichen Unterschiede der gemessenen Werte. Erst bei Temperaturen unter +10°C zeigt sich, dass die Büscherit-Proben höhere Kerbbiegezugfestigkeiten und spezifische Bruchenergien erreichen wie die Hydrobit-Proben. Der Grund dafür ist die Versprödung des Hydrobit-Interfaces bei kälteren Temperaturen.



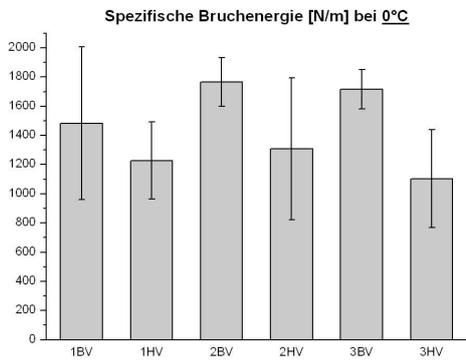
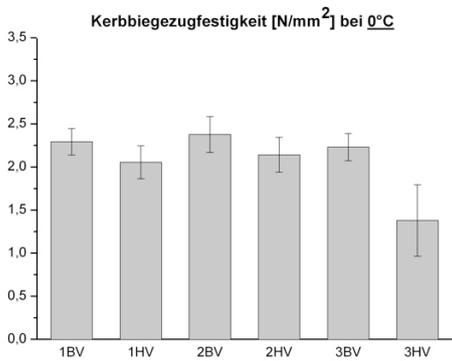
(a)

(b)



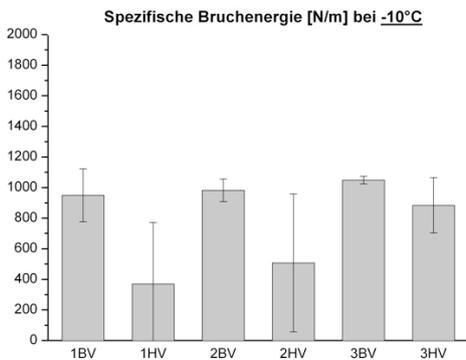
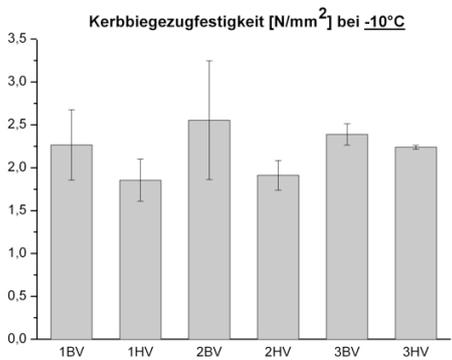
(c)

(d)



(e)

(f)



(g)

(h)

Abbildung 5.17: Bruchmechanische Kennwerte bezogen auf Prüftemperaturen

## 5.3 Healingverhalten

### 5.3.1 Allgemeines

Die Untersuchungen von Rissen mit Healingeffekten, siehe Kapitel 3.4, soll mit geeigneten Versuchstechniken und Messverfahren durchgeführt werden. Diese erfassen nicht nur die mechanischen Größen, sondern auch die Bruchenergien, die zur Charakterisierung der Brucheigenschaften dienen. Als eine effiziente Messmethode zur Bestimmung der bruchmechanischen Kenngrößen wurde die Keilspaltmethode nach Tschegg gewählt. Aufbauend auf die Ergebnisse der Haftverbundprüfungen verschiedener Probetypen wird zur Untersuchung des Healingeffektes der Probetyp 1BV verwendet, bestehend aus Schalungsbeton mit BV Büscherit Voranstrich. Die Entscheidung für den Probetyp 1BV begründet sich dadurch, dass Abdichtungsbahnen in der Praxis fast nur auf Schalungsbeton geflämmt werden und durch Anwendung des Büscherit-Voranstriches die höheren Kennwerte erreicht werden, siehe Kapitel 5.2.2.

Die Rissheilung wurde für zwei Healing-Varianten vorgenommen:

- Heilungsprozess bei +23°C Raumtemperatur
- Heilungsprozess bei +40°C im Wärmeschränk

Jede der zwei Healingvarianten wurde mit drei Proben (Probe a, b und c) des Probentyps 1BV durchgeführt und durchlief zehn Messzyklen bei den Prüftemperaturen von -10°C, 0°C und +23°C. Insgesamt ergeben sich daraus 180 Einzelmessungen. Ein Messzyklus besteht aus folgenden Schritten:

1. Bruch der ungeschädigten Probe (1. Bruch):

Die Probekörper wurden bei +23°C Raumtemperatur, bei 0°C und -10°C in einer Kühlkammer 24 Stunden vor der geplanten Materialprüfung gelagert. Nach der Entnahme aus diesem Raum erfolgte innerhalb weniger Minuten die Montage der Keilspalteinrichtung und die Bruchprüfung mit der Vertikalgeschwindigkeit des Querhauptes von 3 mm/min. Dabei wurde der Riss an der Stelle der Risseinleitung zirka 10 mm weit geöffnet (CMOD=10 mm) [Tsc86]. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich die Temperatur im Inneren der Probe innerhalb dieser kurzen Zeit nicht verändert hat.

## 2. Schließen des Risses:

Um eine Sauerstoffzufuhr und eine Angleichung der Probertemperatur an die Raumtemperatur zu ermöglichen, wurde der Riss einen Tag lang offen gehalten. Nach dem Schließen des Risses bei  $+23^{\circ}\text{C}$  diente das körpereigene Gewicht des Betongegenstückes (zirka 1 kg) als dauerhafte Belastung normal auf die Ligamentfläche. Dazu wird der Probekörper in eine seitliche Lage gebracht, sodass das Betongegenstück oben liegt und als Belastung wirkt.

## 3. Healingprozess:

### a) Healingprozess bei $+23^{\circ}\text{C}$ Raumtemperatur:

Nach Schließen des Risses wurden die Probekörper unter Belastung des eigenen Körpergewichtes für 24 Stunden bei Raumtemperatur gelagert, bevor sie wieder in den Kühlraum gebracht wurden und der Zyklus, wie in Punkt 1 beschrieben, erneut beginnt. Diesmal jedoch mit der geschädigten Probe.

### b) Healingprozess bei $+40^{\circ}\text{C}$ :

Die Probekörper wurden unmittelbar nach Schließen des Risses 24 Stunden lang bei einer Umgebungstemperatur von  $+40^{\circ}\text{C}$  in einem Wärmeschrank gelagert. Danach folgte wieder eine Abkühlung auf die Prüftemperaturen nach Schritt 1.

Durch die Aufnahme der Kraft-Verschiebungsdiagramme beobachtet man im Allgemeinen, dass die Kerbbiegezugfestigkeiten und die spezifischen Bruchenergien nach jedem durchgeführten Belastungszyklus geringer werden, siehe Abbildung 5.18. Der „Initialbruch“ der ungeschädigten Probe stellt im Diagramm die mit Messzyklus „MZ 1“ gekennzeichnete Kurve dar. Erwartungsgemäß besitzt sie, im Vergleich zur gesamten Kurvenschar, den höchsten Wert der Maximalkraft und weist auch den höchsten Risswiderstand auf. Die weiteren Kurven im Diagramm beziehen sich auf die Prüfungen eines jeden x-ten Messzyklus, wobei x für die Werte 2 bis 10 steht.

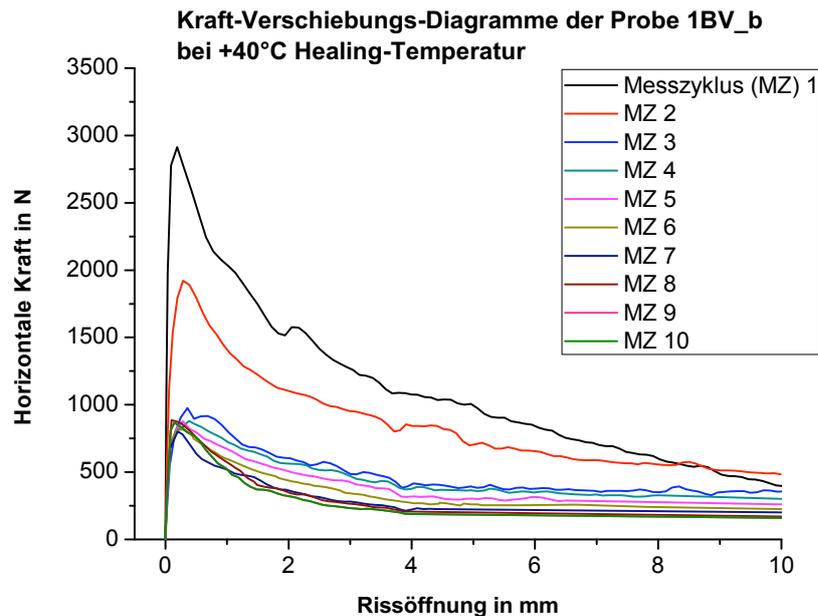


Abbildung 5.18: Darstellung der Kraft-Verschiebungskurven eines jeden Messzyklus des Probekörpers 1BV Probe b bei der Healingtemperatur von +40°C

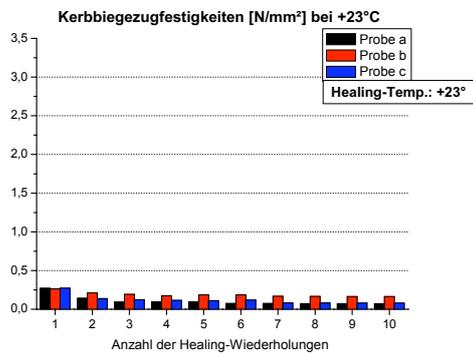
Die Messkurven werden mit zunehmenden Messzyklen immer ähnlicher. Die Kraftmaxima, also die Kerbbiegezugfestigkeiten, bleiben ab einem gewissen Messzyklus annähernd gleich. Die Bruchenergien der Kurven werden jedoch stetig kleiner. Im folgenden Kapitel 5.3.2 werden die Ergebnisse der Healingversuche mit der Healingtemperatur von +23°C dargestellt, im Kapitel 5.3.3 die Ergebnisse bei +40°C Healingtemperatur. Im Kapitel 5.3.4 werden die Ergebnisse diskutiert.

### 5.3.2 Kerbbiegezugfestigkeiten und spezifische Bruchenergien bei +23°C Healingtemperatur

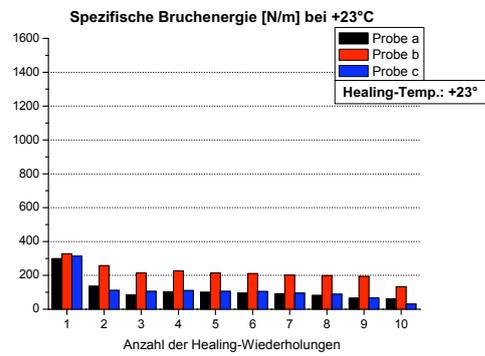
Die Abbildung 5.19 enthält die ausgewerteten Histogramme der Healingversuche des Probekörpers 1BV a,b und c bei drei Prüftemperaturen von -10°C, 0°C und +23°C. Die Gründe für die Abweichungen einzelner Balken von den restlichen werden nachfolgend geschildert. Zur Bruchflächen-Beschreibung dienen die Rissverläufe nach Abbildung 5.10 in Kapitel 5.2.1.

#### Abweichungen der Probe b in Abbildung 5.19a und b bei +23°C Prüftemperatur:

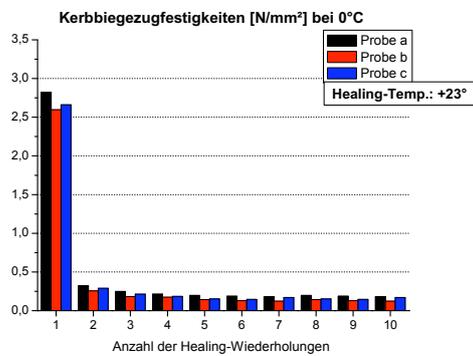
Beim Initialbruch zeigen alle drei Proben ähnliche Kennwerte auf. Erst die wei-



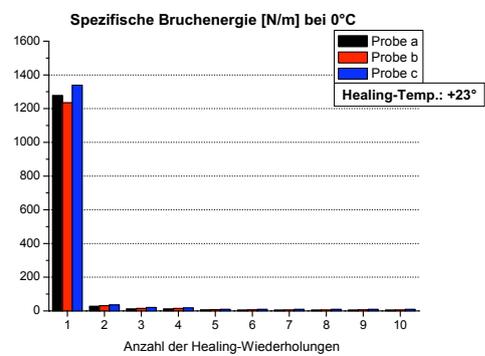
(a)



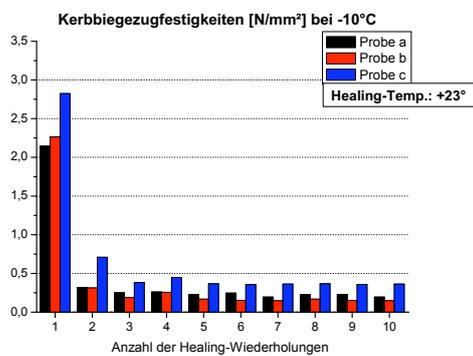
(b)



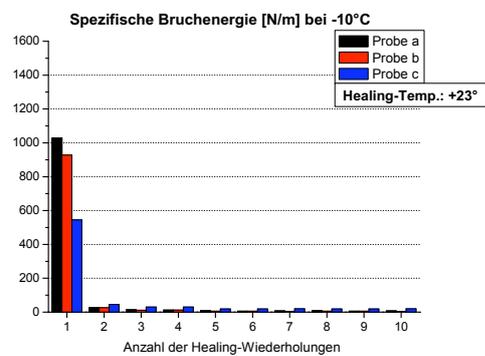
(c)



(d)



(e)



(f)

Abbildung 5.19: Kerbbiegezugfestigkeiten und spezifische Bruchenergien der Healingversuche mit Probetyp 1BV für +23°C Healingtemperatur

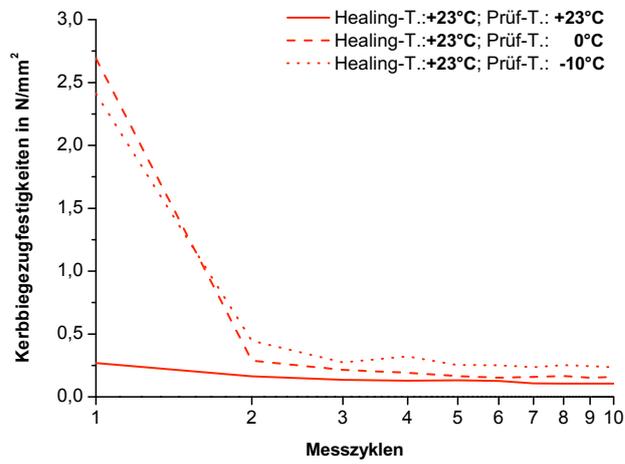
teren Healing-Wiederholungen zeigen bei der Probe b eine höhere Kerbbiegezugfestigkeit und eine größere Bruchenergie im Vergleich zur Probe a und c. Eine Bruchflächenanalyse zeigt, dass durch den Initialbruch bei Probe a und c teilweise das Interface zwischen Bitumen und Kunststoffvlieseinlage (siehe Abbildung 3.9, Kapitel 3.2) geschädigt wurde. Diese Bruchflächenanteile konnten während der Rastperioden bei der Temperatur von  $+23^{\circ}\text{C}$  nicht geheilt werden und bildeten daher keine Bridgingfläche mehr. Bei der Probe b wurde hingegen dieses Interface nicht zerstört. Die größere Bridgingfläche macht sich anhand der höheren Kennwerte bemerkbar.

Abweichungen der Probe c in Abbildung 5.19e und f bei  $-10^{\circ}\text{C}$

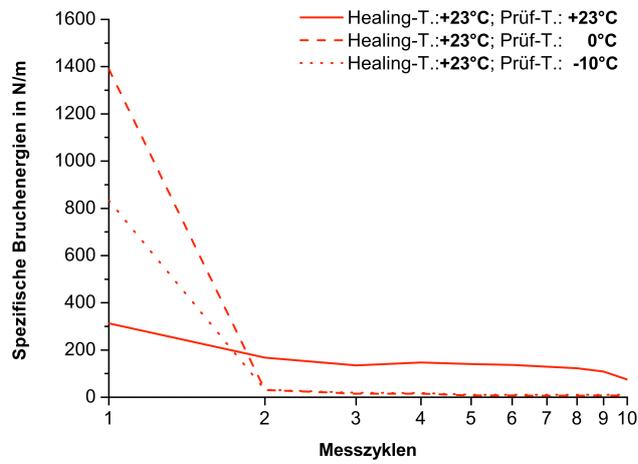
Prüftemperatur:

Beim Initialbruch erfolgte die Rissinitiierung bei Probe a und b nach dem Versagentyp C, d.h. der Riss breitet sich in der Bitumenbahn, entlang des Interfaces Bitumen und Trägereinlage aus. Die Bridgingeffekte der faserigen Verbindungen im kalten Bitumen erhöhen die spezifische Bruchenergie. Die Rissausbreitung in der Probe c erfolgte bei der ersten Bruchprüfung durch den Versagentyp B, bei dem zuerst das Interface Betonoberfläche und Bitumenbahn spröde versagt und danach erst der Riss ins Bitumen umgeleitet wird. Das spröde Versagen des Interfaces Betonoberfläche und Bitumenbahn ist verantwortlich für die hohe Kerbbiegezugfestigkeit und den geringeren Risswiderstand. Die Healing-Wiederholungen zeigen wieder, dass das geschädigte Interface Bitumenbahn und Trägereinlage bei der Temperatur von  $+23^{\circ}\text{C}$  so gut wie nicht geheilt wird.

Zur besseren Übersicht zeigt die Abbildung 5.20 zwei Diagramme, in denen die gemessenen Kenngrößen untereinander verglichen werden.



(a)



(b)

Abbildung 5.20: Vergleich der Kerbbiegezugfestigkeiten und spezifischen Bruchenergien bei der Healing-Temperatur von  $+23^\circ\text{C}$

### 5.3.3 Kerbbiegezugfestigkeiten und spezifische Bruchenergien bei +40°C Healingtemperatur

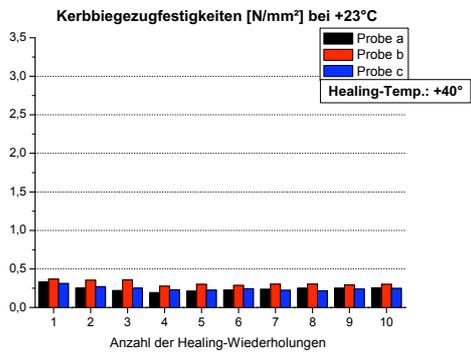
Die Abbildung 5.21 enthält die gemessenen Kenngrößen für die Healingtemperatur von +40°C. Die Gründe für die Abweichungen einzelner Balken von den restlichen werden nachfolgend beschrieben.

Abweichungen der Probe b in Abbildung 5.21e und f bei -10°C

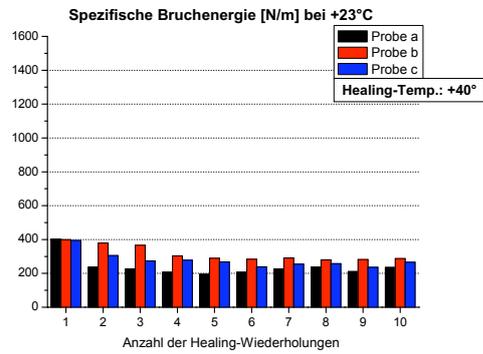
Prüftemperatur:

Bei der Probe b versagte der Großteil des Verbundes im Interface Betonoberfläche und Bitumenbahn, d.h. nach Typ A. Dadurch erreichte diese Probe die hohen Kerbbiegezugfestigkeiten und dementsprechend geringen Bruchenergien. Die Proben a und c versagten nach Typ B zuerst im Interface Betonoberfläche und Bitumenbahn und danach wurde der Riss ins Bitumen umgelenkt. Durch die erhöhte Healingtemperatur erreicht man einen deutlich besseren Heilungseffekt der geschädigten Interfaces.

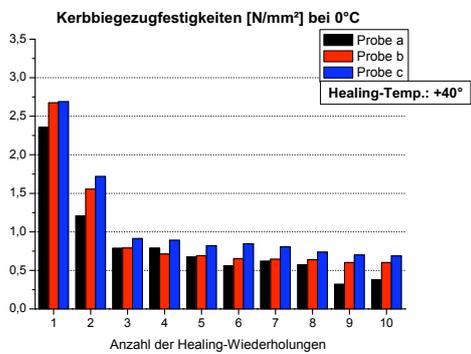
Zusammenfassend und zur besseren Übersicht zeigt die Abbildung 5.22 zwei Diagramme, in denen die gemessenen Kenngrößen untereinander verglichen werden.



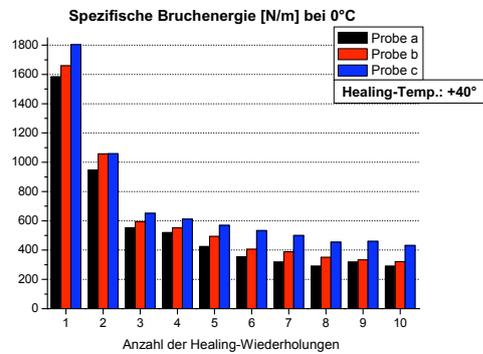
(a)



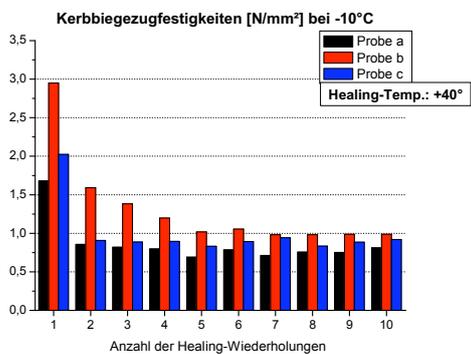
(b)



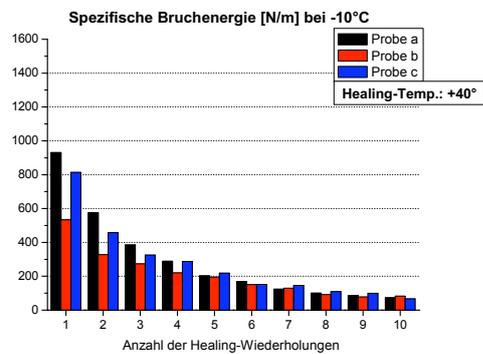
(c)



(d)

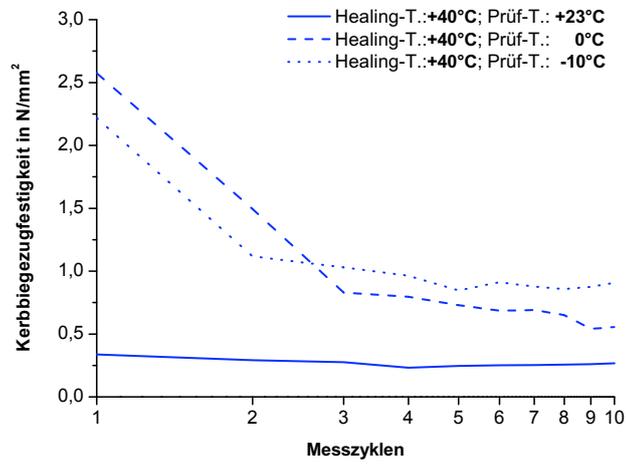


(e)

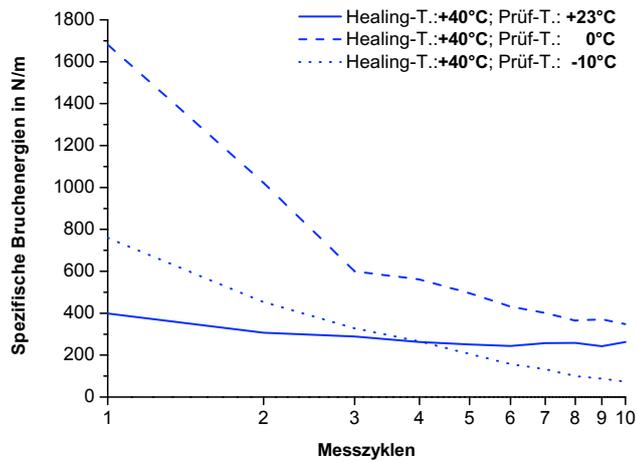


(f)

Abbildung 5.21: Kerbbiegezugfestigkeiten und spezifische Bruchenergien der Healingversuche mit Probetyp 1BV für +40°C Healingtemperatur



(a)

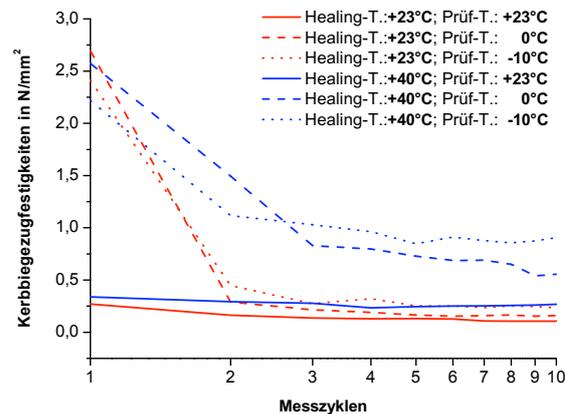


(b)

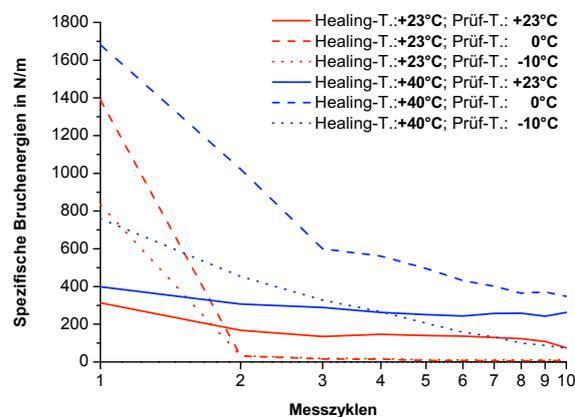
Abbildung 5.22: Vergleich der Kerbbiegezugfestigkeiten und spezifischen Bruchenergien bei der Healing-Temperatur von  $+40^\circ\text{C}$

### 5.3.4 Diskussion zu den Ergebnissen der Healingversuche

In den folgenden Abbildungen sind die Entwicklungen der Kerbbiegezugfestigkeiten und der spezifischen Bruchenergien im Laufe mehrerer Messzyklen nochmals zusammengefasst. Die Abbildung 5.23 zeigt die bruchmechanischen Kennwerte bei den Healing-Temperaturen von  $+23^{\circ}\text{C}$  und  $+40^{\circ}\text{C}$ .



(a)



(b)

Abbildung 5.23: Zusammenfassung der bruchmechanischen Kennwerte aus den Healingversuchen bei  $+23^{\circ}\text{C}$  und  $+40^{\circ}\text{C}$  Healing-Temperatur

Die roten Linien in Abbildung 5.23 beziehen sich auf bruchmechanischen Werte der Proben mit  $+23^{\circ}\text{C}$  Healingtemperatur. Die Kerbbiegezugfestigkeiten und Risswiderstände bei  $+23^{\circ}\text{C}$  Prüftemperatur bleiben während den zehn Zyklen annähernd gleich. Die Bitumenbrücken werden durch die Prüfung zwar stark ge-

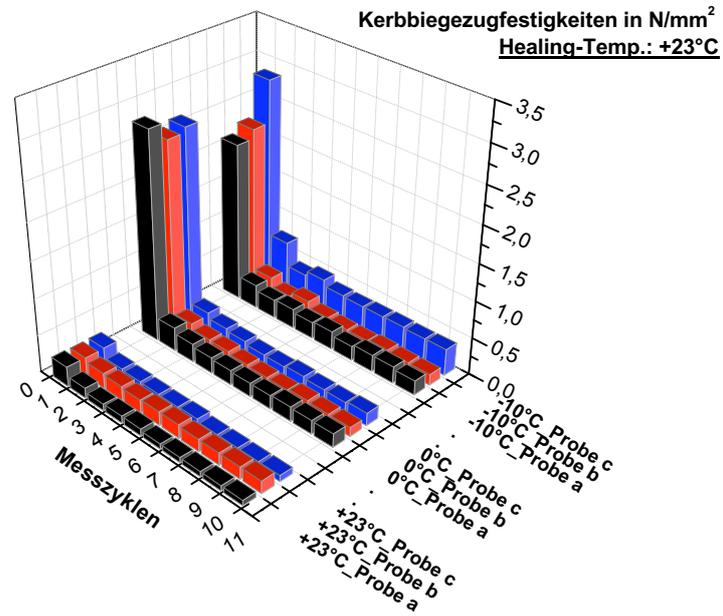
dehnt, aber kaum beschädigt. In der Healing-Phase erreicht der Haftverbund beinahe wieder die Eigenschaften des Initialbruches.

Bei 0°C Prüftemperatur (strichlierte rote Messkurven) beträgt die Kerbbiegezugfestigkeit des zweiten Zyklus 11% und der Risswiderstand gerade mal 2% gegenüber der Prüfung der unbeschädigten Probe. Bei -10°C Prüftemperatur (punktierte rote Messkurven) fällt die Festigkeit des zweiten Messzyklus auf 17% und der Risswiderstand auf 3% gegenüber der Initialprüfung. Die „Versprödung“ des Bitumens bei kälteren Temperaturen führt zu einer höheren Steifigkeit der Bitumenbrücken und zur Schädigung des Haftverbundes. Die große Differenz der Kennwerte zwischen ersten und zweiten Zyklus weist auf einen schlechten Heilingeffekt hin. Eine Temperatur von +23°C reicht folglich keineswegs zum Ausheilen beschädigter Interfaces.

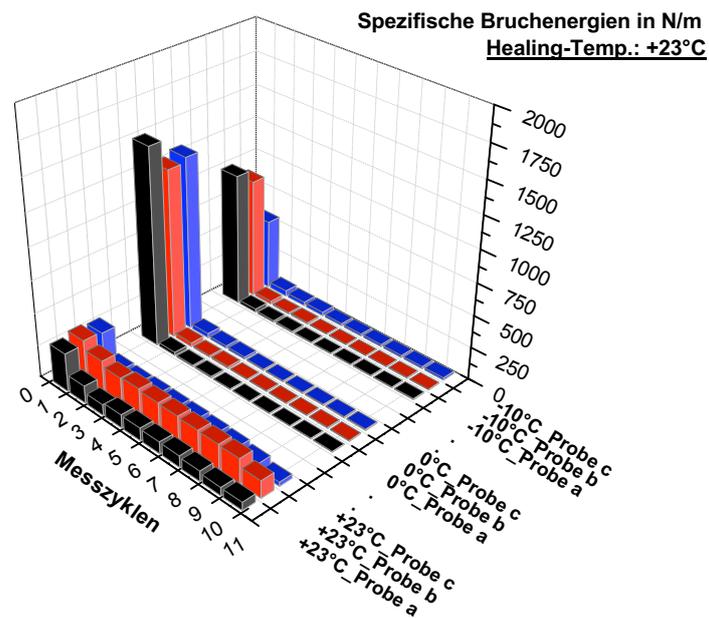
Die blauen Linien in Abbildung 5.23 beziehen sich auf bruchmechanische Kennwerte der Proben mit +40°C Healingtemperatur. Die Kerbbiegezugfestigkeiten und spezifischen Bruchenergien bei +23°C Prüftemperatur bleiben wieder annähernd gleich. Der beste Heilingeffekt wird mit +40°C Healingtemperatur und +23°C Prüftemperatur gemessen (Abbildung 5.23, blaue Linie).

Bei 0°C Prüftemperatur beträgt die Kerbbiegezugfestigkeit und die spezifische Bruchenergie des zweiten Zyklus etwa 60% des Ersten. Die Festigkeit bei -10°C Prüftemperatur erreicht im zweiten Messzyklus zirka die Hälfte vom Initialwert und die Bruchenergie 60%.

Die Abbildungen 5.24 und 5.25 zeigen eine 3D-Übersicht der Ergebnisse der Heilingversuche. Mit +40°C Healingtemperatur erreicht man einen deutlich besseren Heilingeffekt. Die Kerbbiegezugfestigkeiten und Rissausbreitungswiderstände bei beschädigten Proben können durch den Heilingeffekt bei +40°C mindestens verdoppelt werden.



(a)



(b)

Abbildung 5.24: 3D-Übersicht zu den durchgeführten Healingversuchen bei +23°C  
Healing-Temperatur

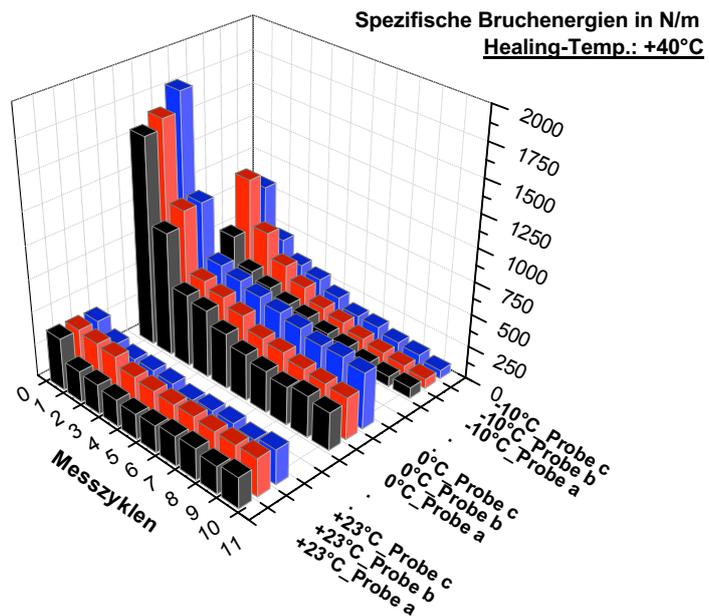
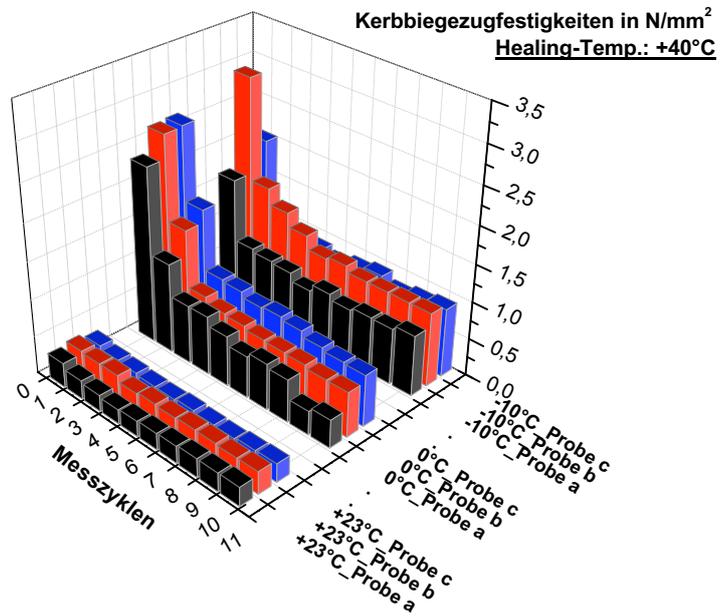


Abbildung 5.25: 3D-Übersicht zu den durchgeführten Healingversuchen bei +40°C  
Healing-Temperatur

## 6 Zusammenfassung

Die Lebensdauer und Wirksamkeit eines Abdichtungssystems hängt von der Haftung zwischen Abdichtungsbahn und Betonoberfläche ab. Das Auftreten von Rissen in bituminösen Abdichtungsbahnen führt zu einer Schädigung des Beton-Bitumen Schichtverbundes und verringert die Haftung. Die Optimierung und Überprüfung von Abdichtungssystemen erfordert eine Charakterisierung der mechanischen Qualität der Schichtverbunde.

In dieser Arbeit wurde der Einfluss unterschiedlich gestalteter Beton-Bitumen Haftverbunde auf die mechanischen und bruchmechanischen Eigenschaften der Grenzflächen zwischen Elastomerbitumenbahn und Betonoberflächen untersucht. Die Prüfungen wurden mit dem Haftzugversuch und der Keilspaltmethode durchgeführt. Weiters wurde das Selbstheilungsverhalten beschädigter Schichtverbunde in Abhängigkeit verschiedener Temperaturen in den Heilungsphasen charakterisiert.

Die Haftzugversuche wurden an 10x10x7cm großen Probekörpern bei zwei unterschiedlichen Temperaturen (0°C und +23°C) durchgeführt. Vergleichend dazu fanden die Keilspaltversuche nach dem Bruchenergiekonzept bei den Temperaturen -10°C, 0°C, +10°C und +23°C ihre Anwendung. Die Zusammensetzung der Beton-Bitumen Haftverbunde variierte in der Oberflächengestaltung der Betonplatten und in der Wahl der Voranstriche. Die Oberflächen der Betonplatten können in drei Kategorien eingeteilt werden. Die Erste beinhaltet die unbehandelte, die Zweite eine mit Zementschlämme überzogenen und die Dritte eine wasserstrahlbehandelte Oberfläche. Als Voranstriche wurden ein lösemittelfreier Hydrobit-Voranstrich und ein bituminöser Büscherit-Voranstrich verwendet.

Zur Beschreibung der Oberflächeneigenschaften der Probekörper wurde das stereoskopische Verfahren adaptiert. Dieses Verfahren erwies sich als sehr geeignet für die Bestimmung der Rauheitsprofile von Betonoberflächen. Die Messungen können mit einer Digitalkamera problemlos im Labor sowie auch vor Ort durchgeführt wer-

den. Die Auswertung ergab die kleinste mittlere Rauheit für den unbehandelten Schalungsbeton und die größte mittlere Rauheit für die wasserstrahlbehandelte Oberfläche.

Folglich werden die Ergebnisse der Haftzugversuche, der Keilspaltversuche und des Healingsverhaltens zusammengefasst.

1. **Ergebnisse der Haftzugversuche:** Die Haftzugversuche bei 0°C und +23°C haben wie erwartet ergeben, dass dieses Verfahren nicht zur Bewertung der bruchmechanischen Eigenschaften des Haftverbundes herangezogen werden kann. Die Versuche erlauben nur die Bestimmung eines maximalen Festigkeitswertes. Die Ergebnisse werden wie folgt zusammengefasst:

- Aufgrund der Prüfvorrichtung und der ungekerbten Probekörper konnte kein zielsicherer Bruch im Beton-Bitumen Interface erreicht werden. Der Schichtverbund versagte in vier unterschiedlichen Grenzflächen:
  - Rissverlauf im Interface Betonoberfläche und Abdichtungsbahn (Versagenstyp A)
  - Rissverlauf im Interface Sandschicht und Abdichtungsbahn (Versagenstyp B)
  - Rissverlauf im Interface Klebeschicht und oberer Aluminiumdeckel (Versagenstyp C)
  - Rissverlauf im Interface Beton und Klebeschicht (Versagenstyp D)

Trotz dieser unterschiedlichen Versagenstypen ergeben die gemessenen Festigkeitswerte kaum eine Abweichung.

- Mit dem Haftzugversuch konnte keine Aussage über den Einfluss unterschiedlich gestalteter Betonoberflächen auf die mechanische Qualität des Haftverbundes abgeleitet werden.
- Bei Raumtemperatur variieren die Haftzugfestigkeiten zwischen 0,2 und 0,3  $N/mm^2$ , bei 0°C befinden sich die Festigkeiten im Bereich zwischen 1,2 und 1,4  $N/mm^2$ . Der Haftverbund erreicht bei Prüfungen mit 0°C die fünffache Festigkeit der Prüfungen bei +23°C Prüftemperatur. Daraus lässt sich eine erhöhte Steifigkeit des Bitumens bei kalten Temperaturen feststellen.

2. **Ergebnisse der Keilspaltversuche:** Die Keilspaltversuche eignen sich zur Beschreibung des Bruchverhaltens von bituminösen Haftverbunden bei unterschiedlichen Temperaturen. Sie lassen auch eine Aussage über die Auswirkung der Oberflächengestaltung in Kombination mit der Art des Voranstriches zu. Die Ergebnisse werden wie folgt zusammengefasst:

- Die Risse an den gekerbten Probekörpern verlaufen nicht immer im selben Interface. Es konnten drei unterschiedliche Versagenstypen festgestellt werden:
  - Durchgehender Riss im Interface Betonoberfläche und Bitumenbahn (Versagenstyp A)
  - Zuerst verläuft der Riss im Interface Betonoberfläche und Bitumenbahn, danach Rissumleitung in die Bitumenbahn (Versagenstyp B)
  - Durchgehender Riss in der Bitumenbahn (Versagenstyp C)

Der Versagenstyp A konnte bei Prüfungen mit  $+23^{\circ}\text{C}$  Raumtemperatur beobachtet werden, in seltenen Fällen jedoch auch bei kalten Probekörpern mit emulsionsartigen Hydrobit-Voranstrich. Die Versagenstypen B und C treten nur bei Prüftemperaturen von  $-10^{\circ}\text{C}$  und  $0^{\circ}\text{C}$  auf.

- Bei niedrigen Temperaturen ( $-10^{\circ}\text{C}$  und  $0^{\circ}\text{C}$ ) ergeben Rissinitiierungen im Interface Betonoberfläche und Bitumenbahn (Probetyp 2BV,  $-10^{\circ}\text{C}$ :  $3,4 \text{ N/mm}^2$ ) eine höhere Kerbbiegezugfestigkeit als Rissinitiierungen in der Bitumenbahn selbst (Probetyp 2BV,  $-10^{\circ}\text{C}$ :  $2 \text{ N/mm}^2$ ). Das zeigt, dass sich ein Riss in der Bitumenbahn leichter einleiten lässt als in der Beton-Bitumen Grenzfläche. Weiters ergibt die Rissausbreitung im Interface Betonoberfläche und Bitumenbahn einen deutlich geringeren Widerstand (Probetyp 1HV,  $-10^{\circ}\text{C}$ :  $150 \text{ N/m}$ ) als eine Ausbreitung in der Bitumenbahn (Probetyp 1HV,  $-10^{\circ}\text{C}$ :  $800 \text{ N/m}$ ).

Im Bezug auf die bruchmechanischen Werte wäre es erstrebenswert, dass der Riss im Beton-Bitumen Interface entsteht und danach in die Bitumenbahn geleitet wird.

- Die Haftverbunde zeigen bei den Prüfungen ein typisches temperaturbedingtes Verhalten. Die Kerbbiegezugfestigkeiten beginnen bei tiefen Prüftemperaturen unter  $0^{\circ}\text{C}$  mit hohen Werten ( $1,5 - 2,5 \text{ N/mm}^2$ ) und fallen bei höheren Temperaturen über  $0^{\circ}\text{C}$  stark ab ( $0,25 - 1,5 \text{ N/mm}^2$ ).

Die spezifische Bruchenergie (Rissausbreitungswiderstand) erreicht bei 0°C ihr Maximum mit 1500  $N/m$ . In Richtung tieferer und höherer Prüftemperaturen verringert sich der Rissausbreitungswiderstand und fällt auf niedrige Werte ab (Spez. Bruchenergie bei -10°C: 400 - 1100  $N/m$ ; bei +23°C: 400  $N/m$ ).

- Die Prüfungen bei den Temperaturen +10°C und +23°C zeigen ein ausgeprägtes Bridgingverhalten zwischen den Bruchflächen. Dieses plastische Verhalten der Bitumenbrücken trägt zur Erhöhung des Risswiderstandes bei und stoppt die Rissausbreitung. Bei niedrigen Prüftemperaturen wird der Beton-Bitumen Haftverbund steifer und spröder. Je niedriger die Temperatur, desto geringer wird der Bridgingeffekt und bei -10°C ist die Wirkung nicht mehr beobachtbar.
- Die Art des Voranstriches wirkt sich auf die bruchmechanischen Eigenschaften der Beton-Bitumen Haftverbunde aus. Bei der Prüftemperatur von +23°C ergeben die Prüfungen der Hydrobit- sowie der Büscherit-Proben keine merklichen Unterschiede in ihren bruchmechanischen Werten. Erst bei den Temperaturen -10°C und 0°C zeigt sich, dass die Büscherit-Proben höhere Kerbbiegezugfestigkeiten und spezifische Bruchenergien erreichen wie die Hydrobit-Proben. Bei -10°C erreichen die Hydrobit-Proben eine Kerbbiegezugfestigkeit von 1,8 bis 2,3  $N/mm^2$  und eine spezifische Bruchenergie von 400 bis 900  $N/m$ . Die Büscherit-Proben bei -10°C erreichen 2,3 bis 2,6  $N/mm^2$  und 950 bis 1050  $N/m$ . Der Grund dafür ist die Versprödung des Hydrobit-Interfaces bei kälteren Temperaturen.
- Die Oberflächengestaltung der Betonplatten hat einen Einfluss auf die bruchmechanischen Eigenschaften von Beton-Bitumen Haftverbunden. Die Proben mit der Betonschlämme an der Oberfläche erreichten durchwegs bei allen Prüftemperaturen die höchsten bruchmechanischen Werte. Die gemessenen Kerbbiegezugfestigkeiten und Risswiderstände der wasserstrahlbehandelten Oberflächen deuten auf keinen Vorteil gegenüber den unbehandelten Oberflächen hin. Nur bei der Prüftemperatur von -10°C erreicht der Hydrobit-Probentyp mit unbehandelter Oberfläche die Hälfte des Risswiderstandes des Hydrobit-Probentyps mit wasserstrahl-

behandelter Oberfläche.

**3. Ergebnisse der Healingversuche:** Die Untersuchung des Healingeffekts von Rissen im Beton-Bitumen Haftverbund wurde mithilfe des Keilspaltverfahrens vorgenommen. Das Ergebnis jeder Keilspaltmessung ist das Kraft-Verschiebungsdiagramm, aus dem zwei grundlegende Materialkennwerte bestimmt werden. Diese sind die Kerbbiegezugfestigkeit und die spezifische Bruchenergie (Rissausbreitungswiderstand). Die Veränderung dieser Kenngrößen über mehrere Healingzyklen beschreibt den Grad der Ausheilung. Folgender Messzyklus wurde zehn mal wiederholt und im Kapitel 5.3.1 genau erklärt:

- a) Temperieren der Proben auf  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$  und  $+23^{\circ}\text{C}$
- b) Bruchprüfung der Beton-Bitumen Haftverbundproben mit dem Keilspaltverfahren
- c) Schließen des Risses unter dauerhaften Belastung des eigenen Körpergewichtes normal auf die Ligamentfläche über 24 Stunden
- d) Healingprozess über 24 Stunden bei unterschiedlichen Temperaturen ( $+23^{\circ}\text{C}$  und  $+40^{\circ}\text{C}$ ) während der Healingphase
- e) Erneutes Temperieren der Proben

Die Messungen wurden an Probekörpern mit unbehandelter Schalungsbetonoberfläche und Büscherit-Voranstrich durchgeführt. Als Ergebnisse sind folgend angeführt:

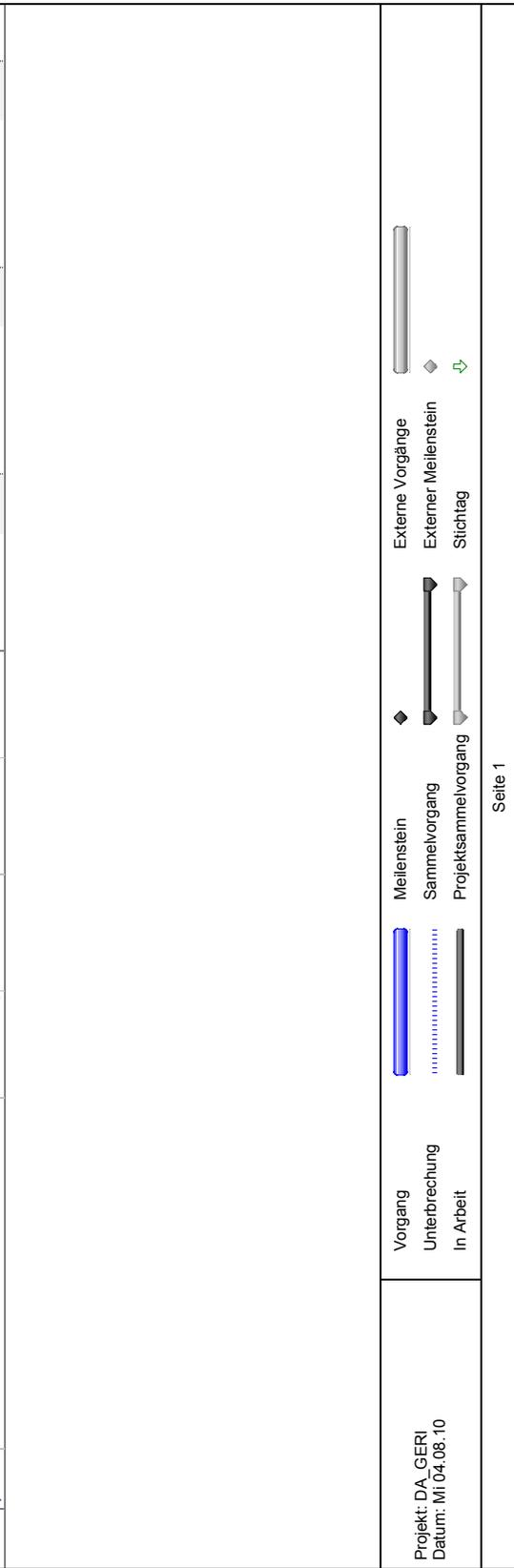
- Zwischen der ersten Messung (Initialbruch) und der zweiten Messung der erstmals geheilten Probe fällt die Kerbbiegezugfestigkeit und die spezifische Bruchenergie am stärksten ab, siehe Abbildung 5.19. Die Kerbbiegezugfestigkeiten bleiben ab dem dritten Messzyklus annähernd gleich, wobei die spezifischen Bruchenergien, mit zunehmenden Messzyklen, stetig kleiner werden.
- Prüfungen bei Raumtemperatur ( $+23^{\circ}\text{C}$ ) zeigen ein Bridgingverhalten. Dabei werden die Bitumenbrücken verformt, reißen aber nicht ab. In der Healingphase werden die bruchmechanischen Werte des Initialbruches wieder erreicht. Bei tiefen Prüftemperaturen ( $-10^{\circ}\text{C}$  und  $0^{\circ}\text{C}$ ) wird das Bitumen steifer und die Bitumenbrücken reißen. Dadurch wird der Haftverbund beschädigt. Dabei verläuft der Riss entweder im Beton-Bitumen

Interface oder nur im Bitumen selbst. Bei  $0^{\circ}\text{C}$  Prüftemperatur beträgt die Kerbbiegezugfestigkeit des zweiten Zyklus 11% und der Risswiderstand nur 2% gegenüber der Initialprüfung, siehe Abbildung 5.19. Dieser starke Abfall der Kenngrößen weist darauf hin, dass die Healingtemperatur von  $+23^{\circ}\text{C}$  zum Ausheilen beschädigter Schichtverbunde nicht ausreicht.

- Mit einer Healingtemperatur von  $+40^{\circ}\text{C}$  erreicht man einen deutlich besseren Healingeffekt als mit  $+23^{\circ}\text{C}$ , siehe Abbildung 5.21. Die bruchmechanischen Werte der geheilten Proben können durch den Healingeffekt bei  $40^{\circ}\text{C}$ , im Gegensatz zu dem bei  $+23^{\circ}\text{C}$ , mindestens verdoppelt werden, siehe Abbildung 5.23 . Werden bituminöse Abdichtungsbahnen für Dach- oder Terrassenabdichtungen verwendet, können sie Temperaturen von  $-30^{\circ}\text{C}$  bis zu  $+90^{\circ}\text{C}$  ausgesetzt sein. Durch diese hohen Temperaturen kann eine gute Heilung der beschädigten Haftverbunde erreicht werden. Werden die Abdichtungsbahnen für unterirdische Kellerabdichtungen an Grundmauern verwendet, wird durch die Umgebungstemperatur von  $-10^{\circ}\text{C}$  bis  $+25^{\circ}\text{C}$  kein Ausheileffekt erreicht werden.

# 7 Projektmanagement

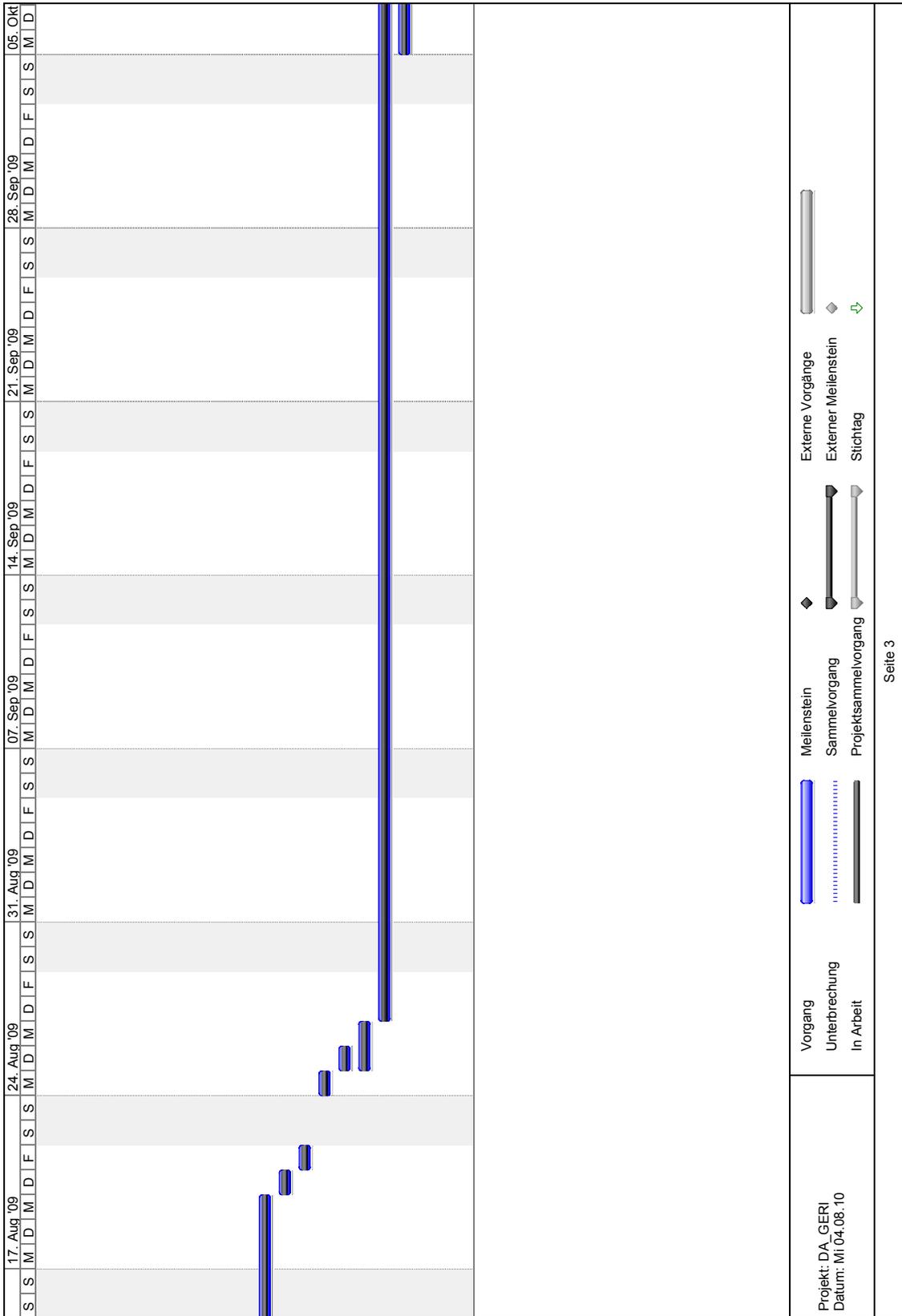
| Nr. | Vorgangname                            | Dauer   | Anfang      | Ende        | Vorgänger | Jun '09 |   |   |   |   |   |   | 06. Jun '09 |   |   |   |   |   |   | 15. Jun '09 |   |   |   |   |   |   | 22. Ju |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-----|--|---------|-------------|-------------|-----------|---------|---|---|---|---|---|---|-------------|---|---|---|---|---|---|-------------|---|---|---|---|---|---|--------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
|     |  |         |             |             |           | D       | M | D | F | S | S | M | D           | M | D | F | S | S | M | D           | M | D | F | S | S | M | D      |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 1   | Materialbeschaffung                    | 3 Tage  | Mi 03.06.09 | Fr 05.06.09 |           |         |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 2   | Probenpräparation                      | 5 Tage  | Mo 08.06.09 | Fr 12.06.09 |           |         |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 3   | Rauheitsmessungen                      | 2 Tage  | Di 09.06.09 | Mi 10.06.09 |           |         |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 4   | Flämmen                                | 2 Tage  | Mi 10.06.09 | Do 11.06.09 |           |         |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 5   | Fertigen der Betonwürfel               | 2 Tage  | Mo 15.06.09 | Di 16.06.09 |           |         |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 6   | Beschriften der Betonwürfel            | 1 Tag   | Mi 17.06.09 | Mi 17.06.09 |           |         |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 7   | Probenpräparation Haft-Zug Versuch     | 2 Tage  | Do 18.06.09 | Fr 19.06.09 |           |         |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 8   | Adaptieren der Haft-Zugmaschine        | 1 Tag   | Fr 19.06.09 | Fr 19.06.09 |           |         |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 9   | Haft-Zug Versuche                      | 5 Tage  | Mo 22.06.09 | Fr 26.06.09 |           |         |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 10  | Probenpräparation Keilspaltversuche    | 5 Tage  | Mo 29.06.09 | Fr 03.07.09 |           |         |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 11  | Keilspaltversuche                      | 24 Tage | Mo 29.06.09 | Do 30.07.09 |           |         |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 12  | Pause                                  | 14 Tage | Fr 31.07.09 | Mi 19.08.09 |           |         |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 13  | Präsentation Teil 1                    | 1 Tag   | Do 20.08.09 | Do 20.08.09 |           |         |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 14  | Lieferung Betonplatten Healingversuche | 1 Tag   | Fr 21.08.09 | Fr 21.08.09 |           |         |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 15  | Flämmen                                | 1 Tag   | Mo 24.08.09 | Mo 24.08.09 |           |         |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 16  | Fertigen der Betonwürfel               | 1 Tag   | Di 25.08.09 | Di 25.08.09 |           |         |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 17  | Probenpräparation Healingversuche      | 2 Tage  | Di 25.08.09 | Mi 26.08.09 |           |         |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 18  | Healingversuche 23°C                   | 36 Tage | Do 27.08.09 | Do 15.10.09 |           |         |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 19  | Healingversuche 40°C                   | 45 Tage | Mo 05.10.09 | Fr 04.12.09 |           |         |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 20  | Messdaten Auswertung                   | 28 Tage | Mi 09.12.09 | Fr 15.01.10 |           |         |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 21  | Schriftliche Dokumentation             | 76 Tage | Mi 20.01.10 | Mi 05.05.10 |           |         |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 22  | Präsentation Teil 2                    | 1 Tag   | Mi 20.01.10 | Mi 20.01.10 |           |         |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |             |   |   |   |   |   |   |        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |



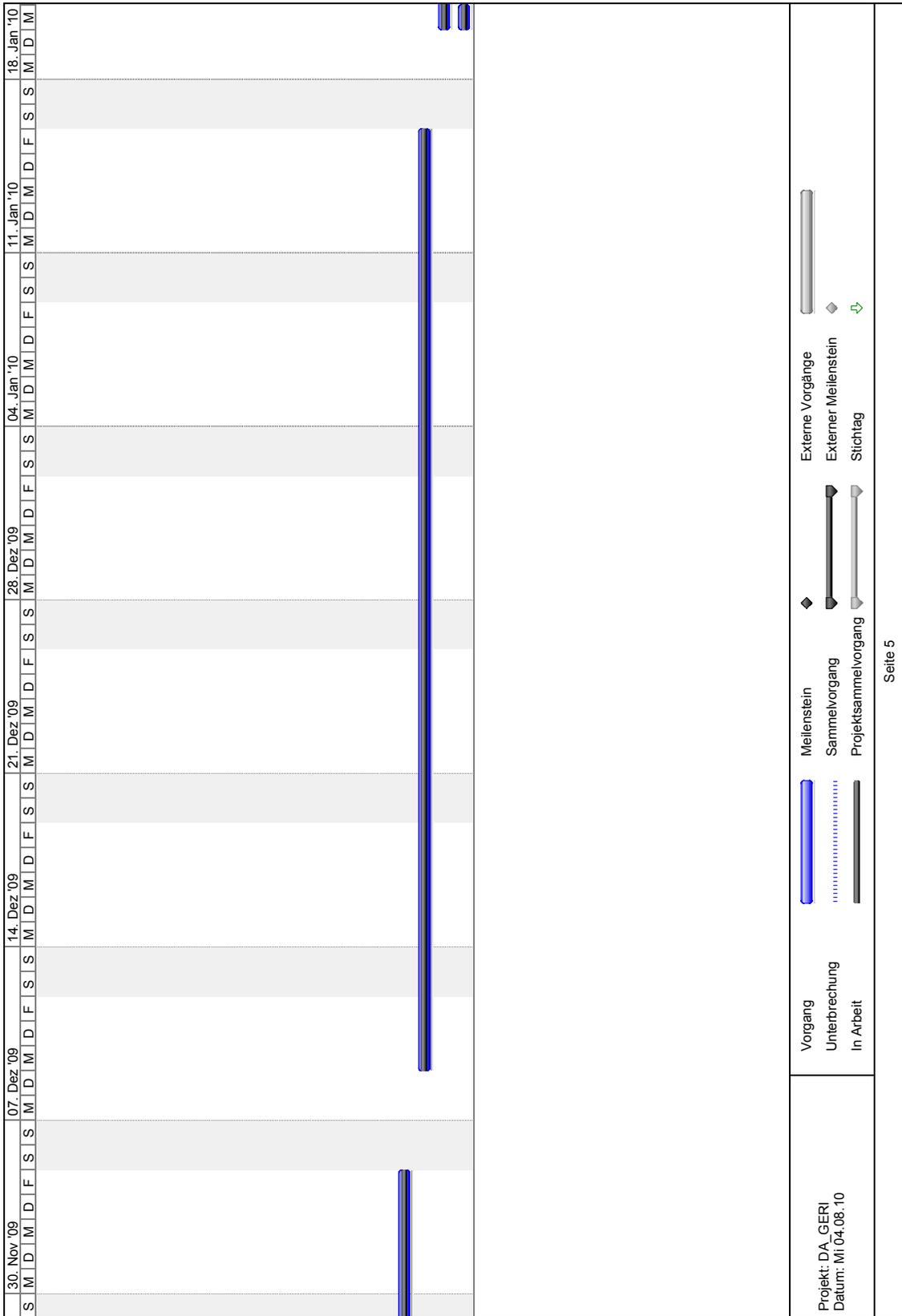
Projekt: DA\_GERI  
Datum: Mi 04.08.10

 Vorgang  
 Unterbrechung  
 In Arbeit  
 Meilenstein  
 Sammelvorgang  
 Projektsammelvorgang  
 Externe Vorgänge  
 Externer Meilenstein  
 Stichtag





| '09<br>M   D   F   S   S   M   D   M   D   F   S   S   M   D   M   D   F   S   S   M   D   M   D   F   S   S   M   D   M   D   F   S   S | 12. Okt '09 | 19. Okt '09 | 26. Okt '09 | 02. Nov '09 | 09. Nov '09 | 16. Nov '09 | 23. Nov '09 |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|  |             |             |             |             |             |             |             |
| Projekt: DA_GERI<br>Datum: 01.04.08.10   |             |             |             |             |             |             |             |
| Seite 4  |             |             |             |             |             |             |             |



Projekt: DA\_GERI  
 Datum: 01.04.08.10



| 15. Mrz '10<br>M   D   M   D   F   S   S | 22. Mrz '10<br>M   D   M   D   M   D   F   S   S | 29. Mrz '10<br>M   D   M   D   M   D   F   S   S | 05. Apr '10<br>M   D   M   D   M   D   F   S   S | 12. Apr '10<br>M   D   M   D   M   D   F   S   S | 19. Apr '10<br>M   D   M   D   M   D   F   S   S | 26. Apr '10<br>M   D   M   D   M   D   F   S   S | 03. Mai '10<br>M   D   M   D |
|--|--|--|--|--|--|--|------------------------------|
|  |  |  |  |  |  |  |                              |
|  |  |  |  |  |  |  |                              |
| Projekt: DA_GERI<br>Datum: MI 04.08.10   |  |  |  |  |  |  |                              |

# Literaturverzeichnis

- [22002] ÖN B 2209-1. *Abdichtungsarbeiten-Werkvertragsnorm: Bauwerke*, volume 1. Österreichisches Normungsinstitut, 2002.
- [36397] ÖN B 3639-2. *Technische Asphalte für den Straßenbau und verwandte Gebiete. Prüfung. Haftverbund von Asphaltsschichten*, volume 1. 1997.
- [Ali08] Alicona. [www.alicon.com](http://www.alicon.com), 2008.
- [BHRS08] M. Balak, W. Hubner, R. Rosenberger, and M. Steinbrecher. *2. Österreichischer Bauschadensbericht. Abdichtungen im Hochbau. Erdberührte Teil*. IBF, 2008.
- [Böh09] H. Böhmer. *Bauschäden im Hoch- und Tiefbau. Bd. 2. Hochbau. Standardwerk zur Schadenserkenkung und Schadensvermeidung*. IBF Hannover, 2009.
- [Buc08] M. Buchta. *Mechanische und bruchmechanische Bewertung von Grenzflächen zwischen angefrästen und neuen Asphaltsschichten*. PhD thesis, Technische Universität Wien, 2008.
- [Czi01] Erich Cziesielski. *Lufsky Bauwerksabdichtungen*, volume 5. Teubner, 2001.
- [DIM09] DIME. <http://www.dime-bitumendachbeschichtung.de/>, 2009.
- [GS07] D. Gross and Th. Seelig. *Bruchmechanik mit einer Einführung in die Mikromechanik*, pages 55–60. Springer, 2007.
- [Hil83] A. Hillerborg. *Analysis of single Crack. Fracture Mechanics of Concrete Developments in Civil Engineering*, pages 223–249. Elsevier Amsterdam, 1983.

- [HMP76] A. Hillerborg, R. Modeer, and Petersson P.E. *Analysis of formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements*, pages 141–170. Cement and Concrete Research, 1976.
- [JTL09] M. Jamek, E.K. Tschegg, and R. Lugmayr. Mechanical and fracture-mechanical properties of geosynthetic-reinforced asphalt systems. Technical report, TU Wien, Labor für Materialwissenschaften E206/4, 2009.
- [JTTS01] M. Jamek, E.K. Tschegg, and S.E. Tschegg-Stanzl. *Bruch- und Selbstheilungsverhalten von Asphalt und Asphaltverbunden*, volume Heft 516. BfVIT Straßenforschung, 2001.
- [Kau71] N. Kaufmann. *Das Sandflächenverfahren*, volume Strassenbau-Technik 3/71, Nachdruck aus den Vft-Mitteilungen Strassenbau und Bautenschutz mit Steinkohlenteer. Kaufmann, 1971.
- [MH06] C Manhart and H. Harmuth. *Anwendung eines stereoskopischen Verfahrens zur fraktografischen Charakterisierung von grobkeramischen Baustoffen*, volume Prakt. Metallogr. 43, pages 438–449. Alicona Imaging GmbH, Software Mex4.1, 2006.
- [Pey09] Peyerl. Private mitteilung. Master’s thesis, Technische Universität Wien, 2009.
- [Pos09] H.P. Possler. *Oberflächenrauheit von Baustoffen*. Diplomarbeit TU Wien, 2009.
- [Ric68] J.R. Rice. *A path independent Integral and the approximate analysis of strain concentrations by notches and cracks*, volume 35, pages 79–386. Journal of Mechanics, 1968.
- [TKT<sup>+</sup>91] E.K. Tschegg, G. Kroyer, D.M. Tan, J. Litzka, and S.E. Tschegg-Stanzl. *Charakterisierung der Brucheigenschaften von Asphalt*, volume Heft 440. BfWA Straßenforschung, issn 0379-1491 edition, 1991.
- [TKT<sup>+</sup>95] E.K. Tschegg, G. Kroyer, D.M. Tan, J. Litzka, and S.E. Tschegg-Stanzl. *Investigation of Bonding between Asphalt Layers on Road Construction*, volume 121, pages 309–316. ASCE J. of Transportation Engineering, 1995.

- [Tsc86] E.K. Tschegg. *Prüfeinrichtung zur Ermittlung bruchmechanischer Kennwerte sowie hierfür geeignete Prüfkörper*. Patent AT-390328, 1986.
- [TTSJ01] E.K. Tschegg, S.E. Tschegg-Stanzl, and M. Jamek. *Bruch- und Selbstheilungsverhalten von Asphalt und Asphaltverbunden*, volume Heft 516. BfWA Straßenforschung, issn 0379-1491 edition, 2001.
- [TTSL96] E.K. Tschegg, S.E. Tschegg-Stanzl, and J. Litzka. *Charakterisierung der Hafteigenschaften von Asphaltsschichten*, volume Heft 452. BfWA Straßenforschung, issn 0379-1491 edition, 1996.
- [Wel61] A.A. Wells. *Proceedings Crack Propagation*, volume 1, chapter paper 4. Symposium Cranfield England, 1961.
- [WI57] M. Williams and G.R. Irwin. *Journal of Applied Mechanics*, volume 1, page 109. 1957.
- [www09] www.bueho.at. Büsscher und hoffmann, 2009.

# Abbildungsverzeichnis

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.1  | Schematisierter Probekörper . . . . .  | 14 |
| 2.2  | Mechanismus der Rissinitiierung und Rissausbreitung . . . . .  | 15 |
| 2.3  | Kraft-Weg-Kurve einer spröder und einer „duktilen“ Verbundtrennung   | 17 |
| 2.4  | a) Entfestigungszone im ungekerbten Probekörper unter Zugbeanspruchung; b) Prozesszone im gekerbten Probekörper unter einseitiger Zugbeanspruchung . . . . .                         | 18 |
| 2.5  | Rissausbreitung im Interface Beton-Bitumenbahn . . . . .   | 18 |
| 2.6  | Spannungsverteilung im Rissspitzenbereich: a) homogenes ideal elastisches Material; b) heterogenes Material . . . . .  | 19 |
| 2.7  | Bestimmung des vollständigen Kraft-Verschiebungsdiagramms (KVD) eines heterogenen Werkstoffes: a) Zugprobe; b) Vollständiges KVD; c) KVD im Bereich B; d) KVD im Bereich A . . . . . | 20 |
| 2.8  | Schematische Darstellung der Rissöffnungsarten Mode I, II und III .  | 21 |
| 2.9  | Definition des J-Integrals . . . . .   | 23 |
| 2.10 | COD Konzept . . . . .  | 25 |
| 3.1  | Flächenausschnitte der drei unterschiedlichen Oberflächen (Maßstab in mm): a) Unbehandelter „Schalungsbeton“; b) Zementschlämme; c) Wasserstrahlbehandelt . . . . .                  | 28 |
| 3.2  | Wasserstrahlbehandlung der Betonoberfläche [Pey09] . . . . .   | 29 |
| 3.3  | Prüfstand zum Aufzeichnen der stereoskopischen Halbbilder mit befestigter Digitalkamera . . . . .  | 29 |
| 3.4  | Halbbilder der wasserstrahlbehandelten Betonoberfläche mit Software „MEX v4.2“ . . . . .   | 30 |
| 3.5  | Bilder links: Grafische Auswertungen der Linienrauheit (unterschiedliche Maßstäbe); Bilder rechts: Zu analysierende Oberflächen mit Linienanalyse . . . . .                          | 31 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 3.6  | Flächenanalyse des Schalungsbetons: a) Linienraster für die Auswertung; b) Tabelle der wichtigsten Rauheitsparameter . . . . .   | 31 |
| 3.7  | 3D-Auswertung eines Oberflächenstücks mit Software „MEX v4.2“ (Maßstab in mm): a) Unbehandelter „Schalungsbeton“; b) Zementschlämme; c) Wasserstrahlbehandelt . . . . .        | 32 |
| 3.8  | Volumenanalyse mit MEX v4.2: a) 3D-Modell der wasserstrahlbehandelten Betonoberfläche; b) Ansicht oberhalb der Parallelebene; c) Ansicht unterhalb der Parallelebene . . . . . | 33 |
| 3.9  | Schematisierte Elastomer-Bitumenbahn mit eingebetteter Kunststoffvlieseinlage . . . . .  | 34 |
| 3.10 | a) Flämmen der Elastomer-Bitumenbahn; b) Betonoberfläche mit Voranstrich und Elastomer-Bitumenbahn . . . . .   | 36 |
| 3.11 | Flämmvorgang mit Abrollen der Abdichtungsbahn und sichtbarer Schmelze aus Voranstrich und Bitumen . . . . .  | 37 |
| 3.12 | 120 Stück Probekörper, aus sechs Betonplatten angefertigt . . . . .  | 37 |
| 3.13 | Beispielbilder für Rissbildung im Bitumen [DIM09] . . . . .  | 38 |
| 3.14 | Überlagerte Prozesse bei Materialermüdung [JTTS01] . . . . .   | 40 |
| 4.1  | a) Vorbereitung der Probekörper; b) Haft-Zug Maschine mit eingespanntem Probekörper . . . . .  | 42 |
| 4.2  | Schematische Darstellung eines eingespannten Probekörpers und des Kraft-Verschiebungsdiagramms beim Haft-Zugversuch . . . . .  | 43 |
| 4.3  | a) Zwei Probekörper mit Abmessung 10x10x7 cm; b) Probekörper mit aufgeklebten Gegenstück; c) Fertig präparierter Probekörper . . . . .   | 44 |
| 4.4  | Schematische Darstellung der Keilspaltmethode nach Tschegg an einem Probekörper [TTSJ01] . . . . .   | 45 |
| 4.5  | a) Detaildarstellung des Kraftübertragungstückes; b) Kräfte am Keil [Buc08] . . . . .  | 46 |
| 4.6  | Einspannvorrichtung mit Probekörper und elektronischen Wegaufnehmern . . . . .   | 47 |
| 4.7  | Schematisches Kraft-Verschiebungsdiagramm [TTSJ01] . . . . .   | 47 |
| 4.8  | Abmessungen und Dimensionen des Probekörpers [JTL09] . . . . .   | 48 |
| 5.1  | Schematische Darstellung der unterschiedlichen Rissverläufe . . . . .  | 52 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 5.2  | a) Fotoreihe Versagenstyp A bei +23°C Prüftemperatur  |    |
|      | b) Fotoreihe Versagenstyp B bei 0°C Prüftemperatur . . . . .  | 53 |
| 5.3  | Erläuterung Versagenstypen A und B:   |    |
|      | a) Probekörper 3BV bei 23°C Versagenstyp A  |    |
|      | b) Aludeckel 3BV bei 23°C Versagenstyp A  |    |
|      | c) Probekörper 3HV bei 23°C Versagenstyp B  |    |
|      | d) Aludeckel 3HV bei 23°C Versagenstyp B . . . . .  | 54 |
| 5.4  | Probekörpers 3HV (Temp.: 0°C; Probe c): Bruchfläche entstanden<br>durch 50% Versagenstyp B und 50% Typ C . . . . .                    | 55 |
| 5.5  | Erläuterung Versagenstyp D: Riss im Interface Beton und unterer<br>Aluminiumdeckel . . . . .  | 55 |
| 5.6  | Haftzugfestigkeiten: a) Prüftemperatur bei +23°C, b) Prüftempe-<br>ratur bei 0°C . . . . .  | 56 |
| 5.7  | a) Bridgingverhalten während Rissausbreitung; b) Bridgingverhal-<br>ten bei unterschiedlichen Prüftemperaturen . . . . .              | 58 |
| 5.8  | Kraft-Weg Diagramme bei den Temperaturen a) +23°C; b) 0°C; c)<br>-10°C . . . . .  | 59 |
| 5.9  | Risseinleitung einer Materialprüfung bei -10°C Prüftemperatur . . .   | 60 |
| 5.10 | Schematische Darstellung der Rissverläufe während der Keilspalt-<br>versuche . . . . .  | 61 |
| 5.11 | Schematische Darstellung der Temperaturabhängigkeit von a) Kerb-<br>biegezugfestigkeiten und b) Spezifischen Bruchenergien [TTSL96] . | 61 |
| 5.12 | Kerbbiegezugfestigkeiten der Probetypen a) 1BV; b) 1HV; c) 2BV;<br>d) 2HV; e) 3BV; f) 3HV . . . . .                                   | 63 |
| 5.13 | Spezifische Bruchenergien der Probetypen a) 1BV; b) 1HV; c) 2BV;<br>d) 2HV; e) 3BV; f) 3HV . . . . .                                  | 64 |
| 5.14 | Bruchfläche Typ 2HV, Prüftemperatur -10°C: a) Probe a; b) Probe b   | 66 |
| 5.15 | Bruchfläche Typ 1BV, Prüftemperatur 0°C: a) Probe a; b) Probe c<br>Bruchfläche Typ 1HV, Prüftemperatur -10°C: c) Probe b; d) Probe c  | 67 |
| 5.16 | Übersicht der Einzelmessungen anhand der sechs unterschiedlichen<br>Probetypen . . . . .  | 68 |
| 5.17 | Bruchmechanische Kennwerte bezogen auf Prüftemperaturen . . . .   | 71 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 5.18 | Darstellung der Kraft-Verschiebungskurven eines jeden Messzyklus des Probekörpers 1BV Probe b bei der Healingtemperatur von +40°C | 74 |
| 5.19 | Kerbbiegezugfestigkeiten und spezifische Bruchenergien der Healingversuche mit Probetyp 1BV für +23°C Healingtemperatur . . . . . | 75 |
| 5.20 | Vergleich der Kerbbiegezugfestigkeiten und spezifischen Bruchenergien bei der Healing-Temperatur von +23°C . . . . .              | 77 |
| 5.21 | Kerbbiegezugfestigkeiten und spezifische Bruchenergien der Healingversuche mit Probetyp 1BV für +40°C Healingtemperatur . . . . . | 79 |
| 5.22 | Vergleich der Kerbbiegezugfestigkeiten und spezifischen Bruchenergien bei der Healing-Temperatur von +40°C . . . . .              | 80 |
| 5.23 | Zusammenfassung der bruchmechanischen Kennwerte aus den Healingversuchen bei +23°C und +40°C Healing-Temperatur . . . . .         | 81 |
| 5.24 | 3D-Übersicht zu den durchgeführten Healingversuchen bei +23°C Healing-Temperatur . . . . .  | 83 |
| 5.25 | 3D-Übersicht zu den durchgeführten Healingversuchen bei +40°C Healing-Temperatur . . . . .  | 84 |

# Tabellenverzeichnis

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 3.1 | Zusammensetzung des Betons [Pey09] . . . . .                             | 26 |
| 3.2 | Übersicht zur Probenkennzeichnung . . . . .                              | 38 |
| 3.3 | Temperaturbereiche der Materialprüfungen . . . . .                       | 39 |
| 5.1 | Statistik zur Auftretshäufigkeit der Versagenstypen beim Haft-Zugversuch | 52 |