

# ERFOLGSKRITERIEN FÜR TUNNELANSTRICHSYSTEME

**Tunnelanstrichsysteme sind für die Erhöhung der Sicherheit und die Reduktion der Instandhaltungs- und Energiekosten von wesentlicher Bedeutung. Allerdings ist die Dauerhaftigkeit der derzeit eingesetzten Systeme oft nicht zufriedenstellend.**

Basierend auf der eingehenden Untersuchung bestehender Tunnelbauwerke und anschließenden Laborversuchen unter definierten Bedingungen wurden die Einflussfaktoren auf die Dauerhaftigkeit von Tunnelanstrichsystemen untersucht.

Während den Tunnelbegehungen wurde eine Vielzahl unterschiedlicher Schadensbilder beobachtet, die unabhängig vom Alter, Beschichtungssystem und der geografischen Lage in mehreren Bauwerken auftraten. Insbesondere Risse und Abplatzungen wurden in fast allen Objekten festgestellt. Die Schadensursachen konnten im Nachhinein zwar nicht eindeutig identifiziert werden, allerdings wurden wichtige Hinweise bezüglich dem Einfluss von Verarbeitungs- und Umgebungsbedingungen erhalten.

Während den Laborversuchen wurde ein problematischer Einfluss von bestimmten Verarbeitungsbedingungen und der Qualität des Innenschalenbetons festgestellt. Insbesondere beim Aufbringen mehrerer Lagen bei niedrigen Temperaturen und kurzen Überarbeitungsintervallen wurden eine geringere Haftung und eine schlechtere Beständigkeit festgestellt. Allerdings sind in den einschlägigen Normen und Richtlinien derzeit keine aussagekräftigen Prüfmethoden vorhanden um das System „Beton mit Beschichtung“ ausreichend zu charakterisieren.

## Facts:

- Initiative: VIF 2013
- Kurztitel: Tunnelanstriche
- Projektart: EE
- Laufzeit: 07.2014-12.2016
- Laufzeit in Monaten: 30
- Projektkonsortium: Smart Minerals GmbH (B. Achleitner, M. Peyerl), IKO Ingenieurbüro Kolar GmbH (K. Kolar, C. Koller)
- 7 Arbeitspakete
- 8 Meilensteine
- Ziel: Lösungswege zur dauerhaften Ausführung von Tunnelbeschichtungen
- Ergebnis: Leitfaden für Planer und Ausführende
- Gesamtkosten netto: ca. € 220.000,-



ABB 1. Katschbergtunnel Fahrtrichtung Salzburg bei der Begehung am 3.6.2015



a) Krakeleerisse im Ganzsteintunnel      b) Abplatzungen im Strenger Tunnel  
ABB 2. Schäden aus realen Tunnelbauwerken

## Kurzzusammenfassung

### Problem

Die Dauerhaftigkeit von Tunnelbeschichtungen ist von vielen Einflussfaktoren abhängig und kann nicht immer garantiert werden. Während manche, teilweise ältere Anstriche noch in gutem Zustand sind, zeigen andere bereits nach wenigen Jahren grobe Mängel.

### Gewählte Methodik

Es wurden ausgewählte Tunnelbauwerke besichtigt und umfassend bezüglich der Material-, Untergrundeigenschaften, Betriebsparameter, etc. untersucht. In Laborversuchen wurden anschließend kritische Witterungsbedingungen und Belastungsszenarien nachgestellt.

### Ergebnisse

Die Verarbeitungstemperaturen, Überarbeitungsintervalle als auch der Untergrundbeton wirken sich problematisch auf die Dauerhaftigkeit eines Beschichtungssystems aus. Eine aussagekräftige Prüfmethode ist in den Normen derzeit aber nicht vorhanden.

### Schlussfolgerungen

Die Forschungsergebnisse zeigen wichtige Einflussfaktoren auf die Beständigkeit von Anstrichsystemen auf. Die in den Normen vorgegebenen Prüfmethoden sind aber nicht immer sinnvoll. Insbesondere für das System „Beton mit Beschichtung“ muss eine alternative Beurteilungsmethode geschaffen werden.

### English Abstract

The durability of coatings is influenced by numerous parameters like processing and operating conditions, the quality of the inner shell concrete, the chemical and structural composition of the coating system and many more. To analyse these parameters and the related damaging mechanisms, various tunnels were inspected and samples taken. Additionally, critical climatic conditions and stress due to frost, de-icing salt and moisture were simulated in the laboratory. Although some parameters like processing conditions and the concrete quality proved to have a substantial effect on the tunnel coating, a meaningful test procedure has yet to be developed.

### Impressum:

#### Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

DI Dr. Johann Horvatits,  
Abt. IV/ST 2 Technik und  
Verkehrssicherheit  
johann.horvatits@bmvit.gv.at,

DI (FH) Andreas Blust,  
Abt. III/14 Mobilitäts- und  
Verkehrstechnologien  
andreas.blust@bmvit.gv.at,  
www.bmvit.gv.at

#### ÖBB-Infrastruktur AG

Ing. Wolfgang Zottl, ISM;  
Leitung Forschung & Entwicklung  
wolfgang.zottl@oebb.at,  
www.oebb.at

#### ASFINAG

DI Eva Hackl,  
Manager International Relations  
und Innovation  
eva.hackl@asfinag.at,

DI (FH) René Moser, Leiter Strategie,  
Internationales und Innovation  
rene.moser@asfinag.at,  
www.asfinag.at

#### Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH

DI Dr. Christian Pecharda,  
Programmleitung Mobilität  
Sensengasse 1, 1090 Wien  
christian.pecharda@ffg.at,  
www.ffg.at

Dezember, 2016

# Erfolgskriterien für Tunnelanstrichsysteme Tunnelanstriche

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung 2013  
(VIF2013)

Dezember 2016



## Impressum:

### Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie  
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien  
Radetzkystraße 2  
A - 1030 Wien



ÖBB-Infrastruktur AG  
Praterstern 3  
A - 1020 Wien



Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs  
Aktiengesellschaft  
Rotenturmstraße 5-9  
A - 1010 Wien



### Für den Inhalt verantwortlich:

Smart Minerals GmbH  
Franz-Grill-Straße 9  
1030 Wien



IKO Ingenieurbüro Kolar GmbH  
Edtstraße 3  
4060 Leonding



### Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH  
Bereich Thematische Programme  
Sensengasse 1  
A – 1090 Wien



# Erfolgskriterien für Tunnelanstrichsysteme Tunnelanstriche

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung  
(VIF2013)

**AutorInnen:**

**DI Birgit ACHLEITNER**

**Karl KOLAR**

**Dr. Martin PEYERL**

**Ing. Christian KOLLER**

**Dr. Stefan KRISPEL**

**Auftraggeber:**

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

**Auftragnehmer:**

Smart Minerals GmbH

IKO Ingenieurbüro Kolar GmbH

## INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS.....	4
1 EINLEITUNG.....	6
2 PROBLEMSTELLUNG UND ZIELE DES FORSCHUNGSVORHABENS.....	7
3 STAND DER TECHNIK.....	10
3.1 Einteilung von Beschichtungsstoffen .....	10
3.2 Anforderungen an den Untergrund .....	12
3.3 Bestandteile und Zusammensetzung von Tunnelbeschichtungen.....	15
3.4 Anforderungen an Tunnelbeschichtungen .....	16
3.5 Schäden an polymeren Beschichtungen.....	17
3.5.1 Änderungen von Farbe, Helligkeit, Glanz.....	17
3.5.2 Ablagerungen .....	18
3.5.3 Imperfektionen.....	18
3.5.4 Risse .....	18
3.5.5 Hohlräume und Blasen .....	19
3.5.6 Verbundversagen .....	22
3.5.7 Zersetzungen.....	22
4 LÖSUNGSVORSCHLÄGE UND VORGEHENSWEISE .....	23
5 PRAKTISCHE DURCHFÜHRUNG.....	26
5.1 Beurteilung von Referenztunnelbauwerken .....	26
5.1.1 Datenerhebung Anstrichhersteller.....	26
5.1.2 Vorauswahl relevanter Tunnelbauwerke.....	27
5.1.3 Datenerhebung Autobahnmeisterei .....	27
5.1.4 Visuelle Begutachtung ausgewählter Tunnelobjekte.....	27
5.1.5 Beprobung ausgewählter Tunnelobjekte.....	28
5.2 Laborversuche.....	32
5.2.1 Probekörperherstellung .....	36
5.2.2 Auslagerungsversuche .....	38
5.3 Erprobung neuer Beurteilungsmethoden .....	39
5.3.1 Keilspaltprüfung.....	39
5.3.2 Schichtdickenmessung mittels Ultraschall .....	40
5.3.3 Beurteilung von Staub auf für das Beschichten vorbereiteten Oberflächen (Klebeband-Verfahren) .....	40
6 ERGEBNISSE UND DISKUSSION .....	41
6.1 Zusammensetzung verwendeter Beschichtungssysteme.....	41
6.2 Beurteilung von Referenztunnelbauwerken .....	43

6.2.1	Visueller Zustand ausgewählter Tunnelobjekte.....	43
6.2.2	Beobachtete Schadensarten.....	61
6.3	Beprobung ausgewählter Tunnelbauwerke.....	73
6.3.1	Einfluss der Betonqualität.....	82
6.3.2	Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Tunnelbauwerke.....	85
6.3.3	Chemische Analyse ausgewählter Tunnelbauwerke.....	99
6.4	Laborversuche.....	121
6.4.1	Beschriftung/Kennzeichnung der Probeplatten.....	122
6.4.2	Einfluss der Verarbeitungsbedingungen.....	122
6.4.3	Einfluss der Auslagerungsbedingungen.....	129
6.4.4	Einfluss der Verarbeitungsbedingungen – Kurzversuche.....	156
6.5	Erprobung neuer Beurteilungsmethoden.....	160
6.5.1	Keilspaltversuche.....	160
6.5.2	Schichtdickenmessung mittels Ultraschall.....	162
6.5.3	Beurteilung von Staub auf für das Beschichten vorbereiteten Oberflächen (Klebeband-Verfahren).....	167
7	LEITFADEN FÜR EFFIZIENTE TUNNELANSTRICHSYSTEME.....	168
8	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	171
8.1	Beurteilung von Referenztunnelbauwerken.....	171
8.2	Beprobung ausgewählter Tunnelbauwerke.....	172
8.3	Laborversuche.....	174
8.4	Erprobung neuer Beurteilungsmethoden.....	177
8.5	Ausblick.....	179
9	LITERATUR.....	180
10	ANHANG.....	181
10.1	Datenerhebung Anstrichhersteller.....	181
10.2	Datenerhebung Autobahnmeisterei.....	185
10.3	Rohdaten zur Beprobung ausgewählter Tunnelbauwerke.....	202

## 1 EINLEITUNG

Tunnelanstrichsysteme leisten einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung der Sicherheit und Reduktion der Instandhaltungs- und Energiekosten für den Infrastrukturbetreiber, allerdings ist die Dauerhaftigkeit der derzeit eingesetzten Systeme in vielen Fällen nicht zufriedenstellend. Manche, teilweise sogar ältere Anstrichsysteme sind noch in gutem Zustand während andere bereits wenige Jahre nach dem Auftrag grobe Mängel, insbesondere Ablöseerscheinungen, aufweisen. Die Ursachen für diese Schadstellen sind vielfältig: Verschleiß, Alterung, Einflüsse durch Verarbeitungsmängel oder mangelnde Untergrundvorbereitung, uvm. können eine Rolle spielen. Dadurch gestaltet sich besonders die Ursachenfindung und Zuordnung von aufgetretenen Mängeln als äußerst vielschichtig. Zur Behandlung dieser Problematik wurden im Zuge dieses Forschungsprojektes einerseits bestehende Tunnelbauwerke eingehend untersucht, andererseits im Rahmen von Laborversuchen die Auswirkungen von Herstellungsparametern und Umwelteinflüssen auf die Beständigkeit von Tunnelanstrichen erforscht.



## 2 PROBLEMSTELLUNG UND ZIELE DES FORSCHUNGSVORHABENS

Durch ein immer höheres Verkehrsaufkommen sowie zusätzlichen, hohen Anforderungen an das Infrastrukturnetz wird sowohl die Zahl als auch der Anteil an Tunnelbauwerken am Gesamtnetz in Zukunft weiter ansteigen. Die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer, aber auch niedrige Instandhaltungs- und Betriebskosten sind bei der Wahl der entsprechenden Bauweise essentiell. Tunnelanstriche als sichtbare Oberfläche in Tunnelbauwerken leisten hier einen wesentlichen Beitrag. Folgende Anforderungen werden an eine Tunneloberfläche gestellt:

### ❖ Helligkeit

Zur Erhöhung der subjektiven und objektiven Sicherheit der Verkehrsteilnehmer müssen Tunnelanstriche eine ausreichende Helligkeit aufweisen. Des Weiteren leistet eine dauerhaft hohe Helligkeit einen wichtigen Beitrag zur Reduktion der Beleuchtungskosten im Tunnel. Aufgrund des verminderten Stromverbrauchs wird einerseits die Umwelt geschont, andererseits entsteht ein volkswirtschaftlicher Nutzen da die Kosten durch die Allgemeinheit getragen werden.

### ❖ Reinigungsfähigkeit

Um Reinigungsmaßnahmen möglichst rasch und mit geringem Chemikalieneinsatz durchführen zu können, sollen Schmutzpartikel an der Oberfläche des Tunnelbeschichtungssystems nur schwer anhaften und sich leicht wieder entfernen lassen. Die Reinigungsfähigkeit bzw. die Schmutzempfindlichkeit eines Tunnelanstriches beeinflusst infolgedessen ebenfalls die Helligkeit eines aufgetragenen Systems.

### ❖ Dauerhaftigkeit

Tunnelanstrichsysteme werden hohen Belastungen wie beispielsweise Frost-Tausalzbeanspruchung im Winter oder mechanischen Reinigungsvorgängen ausgesetzt und sollen diesen möglichst lange ohne die Entstehung von Schadstellen oder vollflächigem Lösen widerstehen. Je länger Tunnelanstriche intakt auf der Tunnelinnenschalenoberfläche haften, umso seltener müssen diese instandgesetzt oder erneuert werden. Dauerhafte und langlebige Anstrichsysteme reduzieren deshalb die Instandhaltungskosten von bestehenden Bauwerken und vermindern erforderliche Sperrzeiten und damit Beeinträchtigungen und das Unfallrisiko der Verkehrsteilnehmer durch Baumaßnahmen.

Die Materialeigenschaften wie Helligkeit und Reinigungsfähigkeit müssen für jedes zugelassene System nachgewiesen werden. Im Gegensatz dazu kann aufgrund wechselnder Verarbeitungsbedingungen und Umwelteinflüssen die Dauerhaftigkeit

derzeitiger Systeme, obwohl Anforderungen im Merkblatt „Tunnelbeschichtungen“ vorgegeben sind, nicht immer garantiert werden. Während manche, teilweise sogar ältere Tunnelbeschichtungen noch in gutem Zustand sind, weisen andere bereits nach wenigen Jahren grobe Mängel, insbesondere Ablöseerscheinungen auf, obwohl diese sogar teilweise mit dem gleichen Anstrichsystem beschichtet sind. Typische Schadensbilder von Tunnelanstrichsystemen sind in Abbildung 1 zu sehen.



Flächige Ablösungen der Tunnelbeschichtung

Risse und Ablösungen der Tunnelbeschichtung

**Abbildung 1: Typische Schadensbilder von Tunnelanstrichsystemen [Quelle: SMG]**

Die Beständigkeit von Beschichtungssystemen ist stark abhängig von vielerlei Faktoren wie der Verarbeitung, dem Untergrund, den Umwelteinflüssen, dem Verkehrsaufkommen, etc. Aus praktischen Erfahrungen kommt außerdem hinzu, dass

- unterschiedliche Schadensarten in einem Tunnel auftreten.
- gleiche Beschichtungssysteme in unterschiedlichen Tunnelbauwerken unterschiedliche Dauerhaftigkeit zeigen.
- Schäden sowohl lokal begrenzt als auch über die ganze Tunnellänge verteilt auftreten können.
- sich die Schadensbilder unterschiedlicher Beschichtungssysteme prinzipiell ähneln.
- die aufgetragenen Systeme innerhalb eines Tunnels variieren bezüglich Schichtaufbau, Produktzusammensetzung und Untergrundvorbereitung.

Deshalb ist alleine die Zusammenstellung der Ausgangssituation und die Beschreibung der Schäden eine umfangreiche Aufgabe. Des Weiteren handelt es sich bei den verwendeten Beschichtungsstoffen um komplexe chemische Systeme, wobei die Wechselwirkung mit dem Untergrund nicht vorhergesagt werden kann. Deshalb ist die Ursachenfindung für ein mangelhaftes Beschichtungssystem ein äußerst komplexes Thema. Die Vorgaben in den zugehörigen Normen sind dabei nicht immer eine ausreichende Hilfestellung.

Deshalb war es das Ziel dieses Forschungsvorhabens die Ursachen für eine mangelhafte Beständigkeit von Beschichtungssystemen eingehend zu untersuchen. Dazu sollten auf Basis von existierenden Vorgaben bzw. durch Beurteilung von konkreten Schadensbildern Lösungswege gefunden werden, die es ermöglichen Tunnelanstrichsysteme in Zukunft mit erhöhter Dauerhaftigkeit auszuführen. Diesbezüglich war es in einem ersten Schritt notwendig durch Besichtigungen und Prüfungen von realen Bauwerken eine Datengrundlage zu schaffen und mit diesem Wissen kritische Verarbeitungsbedingungen und Umwelteinflüsse im Labor nachzustellen. Besonders der Einfluss von baupraktisch relevanten Parametern wie Umgebungstemperatur, Zeitdruck, Verschmutzung auf der Baustelle, etc. waren hierbei von Interesse. Als Ergebnis dieses Forschungsprojekts sollte ein Kriterienkatalog für die Ausführung effizienter Tunnelanstrichsysteme zur Verfügung gestellt werden.

### 3 STAND DER TECHNIK

Tunnelbeschichtungen dienen zur Aufhellung der Tunnelinnenschale, zur Verminderung der Oberflächenporosität und der weitgehenden Verhinderung des Eindringens von Wasser und in Wasser gelösten Schadstoffen, zur Reduzierung der Karbonatisierung, zur Verbesserung der Frost- und Frost-Taumittel-Beständigkeit sowie zur farblichen Gestaltung. In weiterer Folge dient die Tunnelbeschichtung zur leichteren Reinigung und Instandhaltung. Wichtige Anforderungen werden im Merkblatt „Tunnelbeschichtungen“, welches eine Erweiterung der Richtlinie „Erhaltung und Instandsetzung von Bauten aus Beton und Stahlbeton“ darstellt, geregelt.

#### 3.1 Einteilung von Beschichtungsstoffen

Tunnelbeschichtungen gehören zu den Oberflächenschutzsystemen. Diese können einzeln oder im System angewendet werden, wobei grundsätzlich zwischen folgenden Oberflächenschutzverfahren unterschieden wird:

- Hydrophobierungen

Unter Hydrophobierung versteht man eine nachträgliche Behandlung der Betonoberfläche zur Herstellung einer wasserabweisenden Schicht, wobei die Poren und Kapillaren nicht gefüllt sondern nur ausgekleidet werden. Auf der Oberfläche des Betons bildet sich kein Film. Das Ziel einer Hydrophobierung ist die Verminderung der kapillaren Wasseraufnahme und damit der in Wasser gelösten Schadstoffe. [1]



Abbildung 2: Schematische Darstellung einer Hydrophobierung [2]

- Imprägnierungen

Bei der Imprägnierung handelt es sich um eine Behandlung des Betons zur Reduzierung der Oberflächenporosität und zur Verfestigung der Oberfläche. Die Poren und Kapillaren sind hierbei teilweise oder vollständig gefüllt. Außerdem entsteht ein ungleichmäßiger, dünner Film auf der Betonoberfläche. [1]



Abbildung 3: Schematische Darstellung einer Imprägnierung [2]

- Anstriche

Anstriche sind „Beschichtungen“ im Sinne der Richtlinie „*Erhaltung und Instandsetzung von Bauten aus Beton und Stahlbeton*“ mit einer Schichtdicke  $\leq 0,3$  mm. Sie bilden einen geschlossenen, weitgehend porenfreien Film im oberflächennahen Bereich des Betons. Anstriche dienen zur Verminderung der Oberflächenporosität, der weitgehenden Verhinderung des Eindringens von Wasser und darin gelösten Stoffen, zur Reduzierung der Karbonatisierung, zur Verbesserung der Frostbeständigkeit und zur farblichen Gestaltung. [1]

- Beschichtungen

Beschichtungen im Sinne der Richtlinie „*Erhaltung und Instandsetzung von Bauten aus Beton und Stahlbeton*“ entsprechen „Beschichtungen“ mit einer Schichtdicke  $> 0,3$  mm. Sie bilden eine geschlossene, rissüberbrückende Schutzschicht auf der Betonoberfläche aus und weisen gewöhnlich eine Schichtdicke bis ca. 0,5 mm auf. Sie dienen zur Verminderung der Wasseraufnahme, Erhöhung der  $\text{CO}_2$ -Dichtigkeit, Verbesserung der Frost-Taumittel-Beständigkeit, der Überbrückung vorhandener Risse und der farblichen Gestaltung. [1]

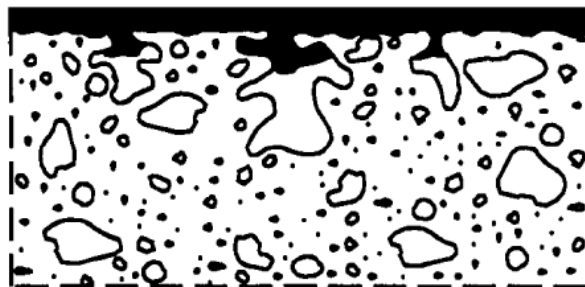


Abbildung 4: Schematische Darstellung einer Beschichtung [2]

### 3.2 Anforderungen an den Untergrund

Beim Bauen im Untergrund, d.h. für erdberührte Bauteile, liefert die Verwendung des Baustoffes Beton momentan die beste Möglichkeit, ein dauerhaftes Bauwerk herzustellen. Bei Tunnelbauwerken bietet Beton als Untergrund für Tunnelanstrichsysteme eine Kombination aus guten mechanischen Eigenschaften mit hoher Dichtigkeit gegenüber eindringenden Stoffen. Tunnelanstrichsysteme werden direkt auf die Betonoberfläche aufgebracht. Die Beständigkeit von Tunnelanstrichsystemen wird somit direkt von der Dauerhaftigkeit des Untergrundes beeinflusst.

Die Ursachen für schädigende Mechanismen im Beton liegen im Vorhandensein schädigender Stoffe und gleichzeitig vorherrschenden Transportvorgängen (Permeation, kapillare Wasseraufnahme, Diffusion). Stoffe, welche ein Bauteil aus Beton bzw. Stahlbeton schädigen, sind durch örtliche Gegebenheiten meist nicht zu verhindern. Eines der Ziele zur Herstellung dauerhafter Tunnelanstrichsysteme ist: den Widerstand des Betons gegenüber eindringenden Stoffen zu erhöhen. Dies wird generell durch ein dichteres Betongefüge erreicht [3] und ist auch in diversen Forschungsprojekten belegt [4]. Bei Tunnelbauwerken ist davon auszugehen, dass schädigende Stoffe (z. B. Chloride infolge des Einsatzes von Taumitteln) vor allem im Bereich des Ulmenfuß auftreten. In mehreren Forschungsarbeiten wurde vor allem der interfacenahe Bereich zwischen Tunnelanstrichsystem und Untergrund im Bereich 0 – 10 mm untersucht [3], [5]. Von außen eindringende Schadstoffe senkrecht und parallel zur Ulme sind dabei wahrscheinlich [5].

Wichtig ist, dass der Tunnelinnenschalenbeton so beschaffen ist, dass durch Schwachstellen eindringende Stoffe den Beton möglichst wenig schädigen. Die Beständigkeit der Tunnelinnenschale wird generell durch die Anforderungen gemäß ÖBV-Richtlinie Innenschalenbeton abgedeckt. Grundsätzlich wird ein dichteres und dauerhaftes Betongefüge durch Absenken des W/B-Wertes erreicht. Bei der Herstellung von Tunnelinnenschalen sind neben Festigkeit, Ausschalzeitpunkt und Verarbeitbarkeit auch Gebrauchseigenschaften bzw. die Vermeidung von Rissen ein wesentliches Kriterium. Innenschalenbetone sollen im Hinblick auf auftretende Temperatur- und Schwindspannungen mit einer geringen Bindemittelmenge hergestellt werden [6]. Aufgrund dieser Randbedingungen werden keine sehr hohen Festigkeiten bzw. wird keine sehr hohe Beständigkeit erreicht und können auch nur geringe Mengen an Chloriden gebunden werden.

Bei der Herstellung von Tunnelanstrichen ist ein geeignetes System zu identifizieren, welches mit dem Untergrund (Beton) eine bestmögliche mechanische Verbindung eingeht, wobei einerseits schädigende Transportmechanismen im Beton durch Verwendung des Tunnelanstrichsystems nicht verstärkt werden (diffusionsoffenes bzw. diffusionsgeschlossenes System) und andererseits keine schädigenden Mechanismen ausgehend vom Tunnelanstrichsystem stattfinden.

Grundsätzlich muss der Betonuntergrund so vorbereitet werden, dass zwischen dem Oberflächenschutzsystem und dem Betonuntergrund ein fester und dauerhafter Verbund erzielt wird. Dazu muss der Betonuntergrund fest, frei von Zementschlämmen, lockeren und mürben Teilen und trennenden Substanzen wie beispielsweise Anstrichresten, Trennmittel sein [1]. Die Anforderungen an den Untergrund gemäß Merkblatt [7] sind in Abbildung 5 dargestellt. Bei Neubauten ist im Regelfall bis mindestens 2 m Höhe die Anforderungsklasse UG<sub>2</sub>, darüber die Anforderungsklasse UG<sub>1</sub> auszuführen. Bei Instandsetzungen mit einem bestehenden Beschichtungssystem ist bis mindestens 2 m Höhe die Anforderungsklasse UG<sub>4</sub>, darüber die Anforderungsklasse UG<sub>3</sub> vorgeschrieben. Instandsetzungen ohne Beschichtungssystem verlangen bis mindestens 2 m Höhe die Anforderungsklasse UG<sub>2</sub>, darüber die Anforderungsklasse UG<sub>1</sub>. Beim Auftragen einer reaktionsgebundenen Spachtelung bzw. eines direkt aufgetragenen Anstrichs bedarf es einer Restfeuchte  $\leq 4\%$ , gemessen mit dem CM-Gerät in einer Tiefe von 2-3 cm. Bezüglich des zulässigen Chloridgehaltes im Untergrund gelten unterschiedliche Anforderungen für bewehrten und unbewehrten Beton. Bei bewehrtem Beton gelten die Grenzwerte gemäß [1]. Erfolgt kein Betonabtrag gelten zulässige Chloridgehalte wie im unbewehrten Beton. In unbewehrtem Beton ist aufgrund baupraktischer Erfahrungen ein Chloridgehalt von 2,0 % bezogen auf die Zementmasse zulässig. Der Nachweis erfolgt in einer Tiefe von 5-10 mm ab der Oberfläche. Außerdem ist im Spritzwasserbereich der Bodenzone zusätzlich eine lösemittelfreie Epoxidgrundierung als Sperrschicht aufzubringen. Bei höheren Chloridgehalten ist ein Betonabtrag bis zum Erreichen des maximal zulässigen Chloridgehaltes notwendig und die Betonoberfläche zu reprofiliert. [7]

Anforderungs- klasse	Untergrund- vorbehandlung	Üblicher Anwendungs- bereich	Anforderung
UG <sub>0</sub> <sup>1)</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reinigen der Oberfläche</li> <li>• Entfernung von Schalölen und Trennmitteln</li> </ul>	z.B. Auftrag von Hydrophobierung	
UG <sub>1</sub> Neubau oder neu hergestellte großflächige Instandsetzungen mit Poren-/Lunker-spachtelung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reinigen der Oberfläche</li> <li>• Entfernung von Schalölen und Trennmitteln</li> <li>• Porenspachtelung</li> </ul>	Ulmfläche über 2 m Höhe (darunter gilt UG <sub>2</sub> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abriebfestigkeit des Untergrunds MW ≥ 1,5 MPa EW ≥ 1,0 MPa</li> </ul>
UG <sub>2</sub> Neubau oder neu hergestellte großflächige Instandsetzungen mit vollflächiger Spachtelung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hochdruckwasserstrahlen</li> <li>• Entfernung von Schalölen und Trennmitteln</li> <li>• vollflächige Spachtelung</li> </ul>	Bodenzone bis 2 m Höhe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abriebfestigkeit des Untergrunds MW ≥ 1,5 MPa EW ≥ 1,0 MPa</li> <li>• Schlempenabtrag</li> <li>• mittlere Rautiefe &gt; 0,3 mm</li> </ul>
UG <sub>3</sub> Instandsetzung mit Poren-/Lunker-spachtelung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entfernen des Altanstrichs mit Haftzugfestigkeit &lt; 1,5 MPa</li> <li>• Reinigen und/oder Aufrauen des Altanstrichs bei Haftzugfestigkeit &gt; 1,5 MPa</li> </ul>	Ulmfläche über 2 m Höhe, (darunter gilt UG <sub>4</sub> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abriebfestigkeit des Untergrunds MW ≥ 1,5 MPa EW ≥ 1,0 MPa</li> <li>• bei Betonuntergrund: mittlere Rautiefe &gt; 0,3 mm<sup>2)</sup></li> </ul>
UG <sub>4,1</sub> Instandsetzung mit vollflächiger Spachtelung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vollständiges Entfernen des Altanstrichs (keine Altpachtelung vorhanden)</li> <li>• vollflächige Spachtelung</li> </ul>	Bodenzone bis 2 m Höhe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abriebfestigkeit des Untergrunds MW ≥ 1,5 MPa EW ≥ 1,0 MPa</li> <li>• mittlere Rautiefe &gt; 1,0 mm</li> <li>• Maximaler Abtrag 3mm</li> </ul>
UG <sub>4,2</sub> Instandsetzung mit vollflächiger Spachtelung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vollständiges Entfernen des Altanstrichs inklusive der zementgebundene Spachtelung</li> <li>• vollflächige Spachtelung</li> </ul>		
UG <sub>4,3</sub> Instandsetzung mit vollflächiger Spachtelung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vollständiges Entfernen des Altanstrichs inklusive der Reaktionsharzspachtelung</li> <li>• vollflächige Spachtelung</li> </ul>		

<sup>1)</sup> Die Anforderungsklasse UG<sub>0</sub> ist auch für die Reinigung von Oberflächen (z.B. Russpartikel) bei bestehenden Tunnelbauwerken zu verwenden.

<sup>2)</sup> Die Rautiefenanforderung entfällt bei Verbleib von Altanstrichen.

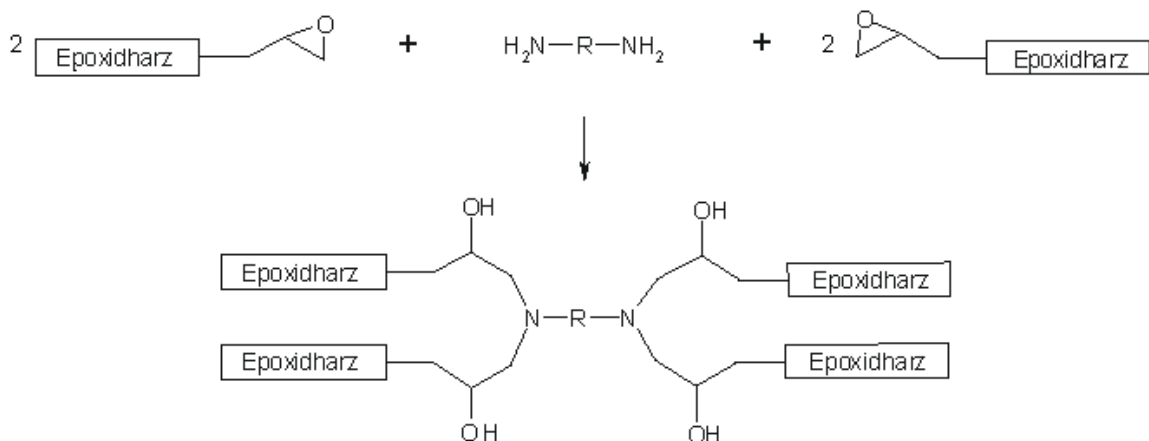
Abbildung 5: Anforderungen an den Untergrund gemäß [7]



### 3.3 Bestandteile und Zusammensetzung von Tunnelbeschichtungen

Tunnelbeschichtungen bestehen in der Regel aus mehreren Beschichtungslagen, welche sich je nach ihrer Funktion auch in der Zusammensetzung unterscheiden können. Generell enthalten Beschichtungsstoffe als wichtigsten Bestandteil ein Bindemittel, dessen Aufgabe es ist die Beschichtung auf dem Untergrund zu verankern, die Pigmente zu verbinden und einen festen, dauerhaften Film zu bilden. Weitere wichtige Bestandteile sind Pigmente, Füllstoffe, Hilfsstoffe bzw. Additive und Lösungsmittel oder Wasser. [8]

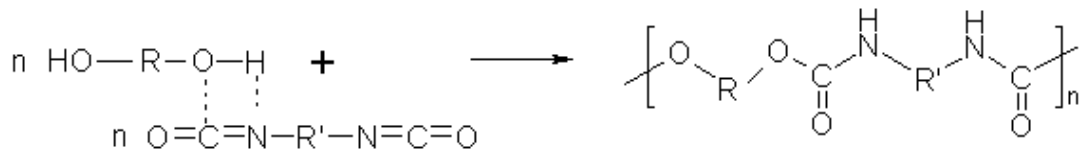
Im Zuge dieses Forschungsvorhabens wurde insbesondere mit lösemittelfreien oder wässrigen Formulierungen auf Basis von Zweikomponenten-Epoxidharzen gearbeitet, welche im Folgenden näher erläutert werden sollen. Ein Zweikomponenten-Beschichtungsstoff erhärtet infolge einer chemischen Reaktion zweier flüssiger, nicht flüchtiger Bindemittelvorstufen. Diese werden als Stammkomponente und Härterkomponente bezeichnet. Epoxidharze besitzen in ihrer Stammkomponente eine Epoxidgruppe, welche ihnen ihren Namen verleiht. Die Härterkomponente enthält als Bindemittelbestandteil in der Regel ein Amin, alternativ können auch Carbonsäuren oder Anhydride eingesetzt werden. Über diese beiden Gruppen setzt unmittelbar nach dem Vermischen der beiden Ausgangskomponenten eine chemische Vernetzung ein, welche schematisch in Abbildung 6 dargestellt ist. [8],[9]



**Abbildung 6: Vernetzung von Epoxidharzen mit einem Diamin [9]**

Epoxidharze sind aufgrund ihrer guten Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Beanspruchung, ihrer hohen Festigkeit, ihrer Beständigkeit gegenüber Basen und schwachen Säuren, und ihrer sehr guten Haftung auf nahezu allen Werkstoffen als Beschichtungsstoffe weit verbreitet. [8]

Als alternativer Beschichtungsstoff wurde außerdem ein Tunnelanstrich auf Polyurethan-Basis verwendet. Auch hier handelt es sich um ein Zweikomponenten-System. Polyurethane beinhalten in ihrer Stammkomponente ein Polyol und in ihrer Härterkomponente ein Isocyanat. Das Isocyanat ist unter bestimmten Bedingungen in der Lage auch mit Wasser zu reagieren, weshalb diese Produkte eher bei trockenen Umgebungsbedingungen verarbeitet werden sollen. Die chemische Vernetzung ist schematisch in Abbildung 7 zu sehen. [10]



**Abbildung 7: Vernetzung von Polyurethanen [10]**

### 3.4 Anforderungen an Tunnelbeschichtungen

Die Anforderungen an eine Tunnelbeschichtung sind in [7] festgelegt, wobei gesonderte Ansprüche an die Spachtelung und den Anstrich gestellt werden. Bei den Spachtelungen wird außerdem zwischen polymermodifiziertem Zementmörtel (kunststoffmodifizierte Mörtel, PCC) und reaktivem Polymermörtel (Kunstharzmörtel) unterschieden. Bei polymermodifizierten Zementmörteln handelt es sich um Feinmörtel, welche vollflächig mit einer Schichtdicke von mindestens 2 mm über den Spitzen aufgetragen werden müssen. Reaktive Polymermörtel können als Kratzspachtel zum Porenverschluss oder vollflächig mit einer Mindestschichtdicke von 0,3 mm über den Spitzen aufgetragen werden. Tunnelanstriche müssen vollflächig mit einer Mindestschichtdicke von 150 µm aufgetragen werden. Meist handelt es sich bei ihnen um Formulierungen auf Basis wässriger Zweikomponenten-Epoxidharze. Die genauen Anforderungen für die einzelnen Beschichtungslagen können in den jeweiligen Tabellen im Merkblatt „Tunnelbeschichtungen“ nachgeschlagen werden. [7]

Zusätzlich sind Anforderungen an das Beschichtungssystem vorgegeben. Für die Prüfung sind Mindestschichtdicken der jeweiligen Beschichtungsstoffe und eine glatte, weitgehend geschlossene Anstrichoberfläche festgelegt. [7] Folgende Eigenschaften müssen in der Systemprüfung erfüllt werden:

Nachweis	Anforderung	Toleranz	Prüfverfahren
Haftzugfestigkeit 28 d mit 48 h Zwischentrockenzeit	≥1,5 MPa (N/mm <sup>2</sup> )	Mindestwert lt. Anforderung (Mittelwert)	ÖNORM EN 1542
Haftzugfestigkeit 28 d mit 7 d Zwischentrockenzeit	≥1,5 MPa (N/mm <sup>2</sup> )	Mindestwert lt. Anforderung (Mittelwert)	ÖNORM EN 1542
Haftzugfestigkeit 28 d mit 14 d Zwischentrockenzeit	≥1,5 MPa (N/mm <sup>2</sup> )	Mindestwert lt. Anforderung (Mittelwert)	ÖNORM EN 1542
Klassifizierung des Brandverhaltens <sup>5)</sup>	A2-s1, d0 <sup>4)</sup> B-s2, d0 <sup>1)</sup> C-s2, d0 <sup>2)</sup> D-s3, d0 <sup>3)</sup>		ÖNORM EN 13501-1

- <sup>1)</sup> Üblicherweise erreichbar bei Verwendung von polymermodifiziertem Zementmörtel mit Tunnelanstrich
- <sup>2)</sup> Üblicherweise erreichbar bei Verwendung von Spachtelung mit wasserdispergiertem Reaktionsharz (bis 2 mm Schichtdicke) und Tunnelanstrich. Bei Verwendung von lösemittelfreiem Reaktionsharz sind materialtechnisch ergänzende Überlegungen anzustellen.
- <sup>3)</sup> Üblicherweise erreichbar ohne Einschränkung der verwendeten Materialien
- <sup>4)</sup> Üblicherweise erreichbar mit Sonderlösung (zementgebundene Materialien)
- <sup>5)</sup> Festzulegende Klasse beim Brandverhalten

#### Abbildung 8: Anforderungen an das Produktsystem bei Laborbedingungen [7]

Obwohl die Anforderungen an Beschichtungssysteme bekannt sind können die hohen Erwartungen an die Dauerhaftigkeit in der Realität in vielen Fällen nicht erfüllt werden. Insbesondere die Einflüsse von Untergrund, Verarbeitungs- und Umgebungsbedingungen spielen hier eine wichtige Rolle. Deshalb ist es von wesentlicher Bedeutung die Auswirkungen dieser Parameter zu charakterisieren und den Planern, Ausführenden, etc. zur Verfügung zu stellen.

### 3.5 Schäden an polymeren Beschichtungen

In der Praxis treten Schäden an polymeren Beschichtungen in unterschiedlichen Formen auf. Erscheinungen, welche im Zuge dieses Forschungsvorhabens von Relevanz sind, sollen im Folgenden kurz umrissen werden.

#### 3.5.1 Änderungen von Farbe, Helligkeit, Glanz

Änderungen der Farbe, Helligkeit und Glanz umfassen visuelle Änderungen der Beschichtung. Besonders die Helligkeit ist für Tunnelanstriche von wesentlicher Bedeutung. Diese dient zur Erhöhung der subjektiven und objektiven Sicherheit der Verkehrsteilnehmer sowie zur Reduktion der Beleuchtungskosten im Tunnel.

Zu diesem Schadensbild gehört ebenfalls die Vergilbung, welche nur bei bestimmten organischen Bindemitteln auftritt. Diese ist als ein erstes Anzeichen von Alterungsvorgängen anzusehen. Ebenfalls für die verwendeten Beschichtungssysteme von Relevanz ist das

Weißanlaufen durch Carbamatbildung. Sind nämlich amingehärtete Epoxide während der Vernetzung einer zu hohen Feuchte ausgesetzt, kann das in der Luft enthaltene CO<sub>2</sub> mit Hilfe des an der Oberfläche angelagerten Wasserfilms mit dem Amin zu einer Carbonat- bzw. einer Carbamatschicht reagieren.[8],[11]

Für Tunnelanstriche ist in [7] die Bestimmung des Reflexionsgrades (LRV) mit einer Mindestanforderung von  $\geq 70$  vorgeschrieben.

### **3.5.2 Ablagerungen**

Ablagerungen beschreiben sowohl organische als auch anorganische, meist dünnschichtige Beläge an der Oberfläche eines Beschichtungssystems. Typische Beispiele für Tunnelbeschichtungen sind Schmutzanlagerungen durch Anhaftung von Stäuben oder Korrosionsprodukte und Ausblühsalze des Untergrundes. [8]

Da die Reinigungsfähigkeit bzw. Schmutzempfindlichkeit eines Tunnelanstriches ebenfalls die Helligkeit im Tunnel beeinflusst, ist in [7] eine Anforderung an die Reinigungsfähigkeit nach ÖNORM EN ISO 11998 gestellt.

### **3.5.3 Imperfektionen**

Imperfektionen umfassen relativ fein strukturierte Unebenheiten wie beispielsweise Poren, Runzel, Tropfen oder Läufer auf der Beschichtungs Oberfläche.

### **3.5.4 Risse**

Risse in der Beschichtung können zu schwerwiegenden Schäden führen, da durch einen Riss die Schutzwirkung einer Beschichtung örtlich aufgehoben wird. Sie sind außerdem der Ursprungsort weiterer Schadensformen, beispielsweise dem Ablösen und Aufschlüsseln von Beschichtungen. Risse treten in einer Beschichtung dann auf, wenn diese übermäßig gedehnt oder aber an einer angestrebten Verkürzung behindert wird. Die verschiedenen Ursachen äußern sich im Erscheinungsbild der Risse. [8], [11] Typische Rissverläufe sind in Abbildung 9 dargestellt.

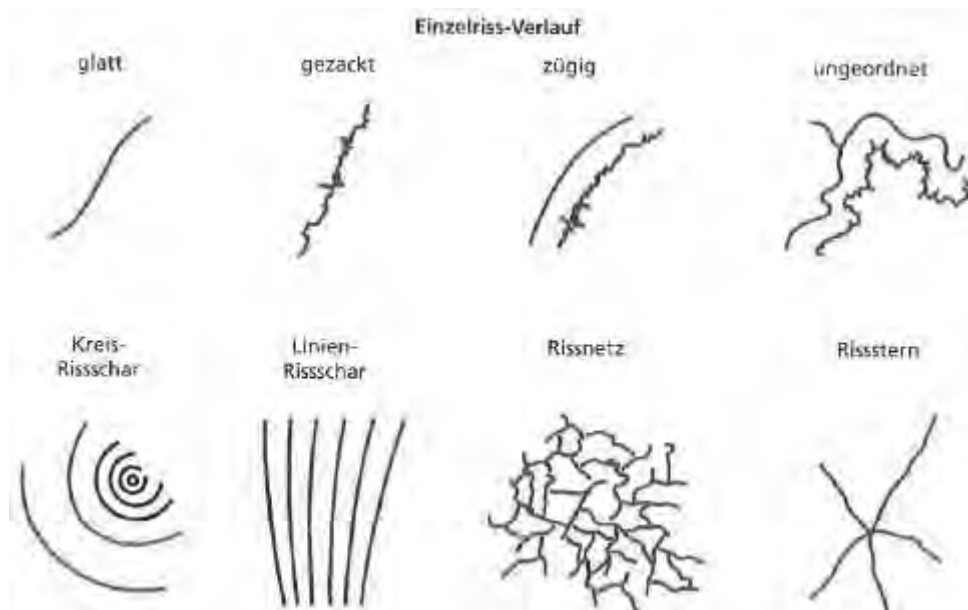
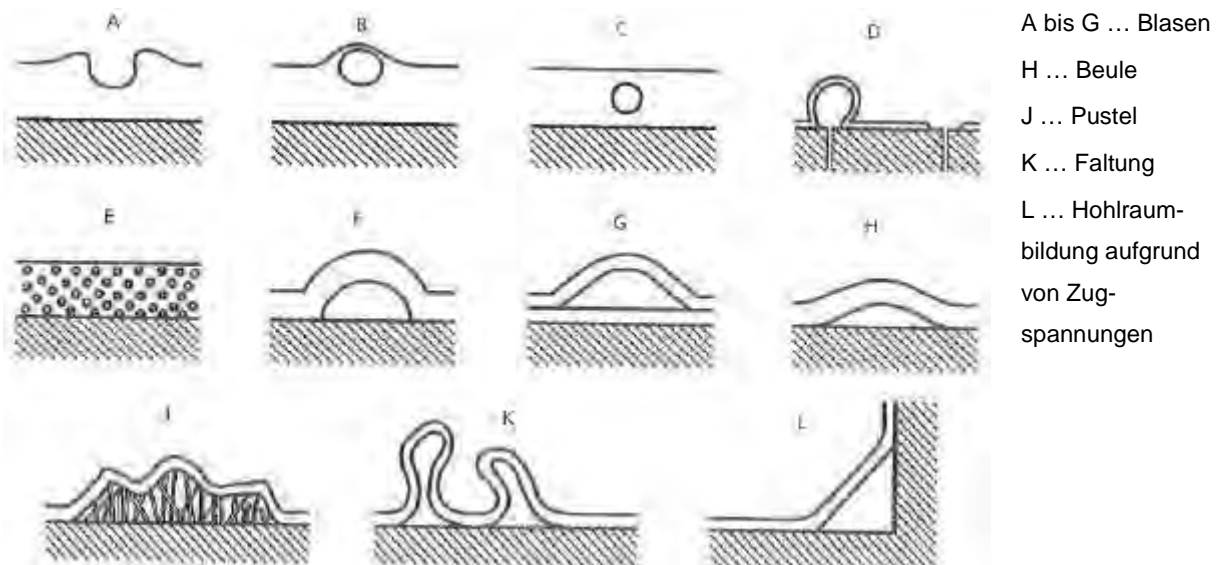


Abbildung 9: Formen und Anordnungen von Rissen [8]

### 3.5.5 Hohlräume und Blasen

Hohlräume und Blasen können sich sowohl zwischen Beschichtung und Untergrund als auch zwischen den Einzellagen eines Beschichtungssystems bilden. Außerdem können zahlreiche Mechanismen zur Ausbildung von Hohlräumen führen, Ursachen sind beispielsweise innere Drücke (z.B. Gas, Flüssigkeiten), äußere Beanspruchung (z.B. Zug- oder Schwerkkräfte) oder chemisch/physikalische Einwirkungen (z.B. Unterrostung). Wichtig für die Unterscheidung zwischen Hohlräumen und Blasen ist außerdem, dass als Blasen solche Hohlräume bezeichnet werden, die durch einen gleichmäßigen, inneren Überdruck entstehen wie er nur durch Gase oder Flüssigkeiten erzeugt werden kann. [8], [11] Abbildung 10 zeigt unterschiedliche Erscheinungsformen von Blasen und Hohlräumen.



**Abbildung 10: Formen der Hohlrumbildung [8]**

Die Erscheinungsformen A bis F bezeichnen Blasen, welche auf Vorgänge im noch nicht erhärteten Film zurückzuführen sind. Diese Gasblasen entstehen durch eingerührte Luft, welche in unterschiedlich stark erhärteten Beschichtungen an die Oberfläche entweichen möchte. Die bei weitem häufigste Blasenform wird durch die Erscheinungsform G symbolisiert und bezeichnet eine Blase, welche sich erst nach dem Erhärten der Beschichtung bildet. Die Ursachen sind vielfältig und oft im Nachhinein schwierig zu identifizieren. Grundsätzlich kann aufgrund eingeschlossener Gase, Luft, Wasserdampf oder Lösemittel eine Blase entstehen. [11]

Das Vorhandensein von Feuchte, beispielsweise als Kapillarwasser im Beton oder bei rückseitiger Durchfeuchtung, führt ebenfalls zur Blasenbildung. Dieses Phänomen wird oft als osmotische Blasenbildung bezeichnet. Diese Problematik ist bereits seit mehr als 35 Jahren bekannt und beschreibt die Entstehung von zeitverzögerten Ablöseerscheinungen, wobei sich einige Wochen bis einige Jahre nach der Applikation einer mehrlagigen Beschichtung i.d.R. flüssigkeitsgefüllte Blasen zwischen den Polymerschichten bilden.

In zahlreichen früheren Forschungsarbeiten (zum Beispiel [12], [13], [14], [15]) wurde die Hauptursache dieser zeitverzögerten Blasenbildung auf osmotische Transportprozesse zwischen dem mineralischen Untergrund und den einzelnen Lagen der Beschichtung zurückgeführt. Als Osmose bezeichnet man allgemein den Lösungsmittelstrom von zwei, durch eine semipermeable Membran getrennten Flüssigkeiten mit unterschiedlichen Konzentrationen einer oder mehrerer Osmose fähiger Substanzen. Voraussetzung für das Auftreten von Osmose sind daher das Vorhandensein einer semipermeablen Membran

zwischen Beton und Grundierung wobei nur das Lösungsmittel, im Allgemeinen Wasser, die Membran durchdringen kann, die gelösten Verbindungen jedoch nicht.

Ergebnisse aktueller Forschungsarbeiten und Veröffentlichungen ([16], [17]) haben jedoch gezeigt, dass die Kontaktzone Beton/Grundierung sehr wohl für die gelösten Alkalien in der Betonporenlösung permeabel ist. Aufgrund dessen können rein osmotische Transportvorgänge als Ursache der zeitverzögerten Blasenbildung ausgeschlossen werden. Vielmehr ist zur Ausbildung der beschriebenen Ablöseerscheinungen ein Zusammenwirken folgender Faktoren ausschlaggebend:

- Das Beschichtungsmaterial oberhalb der Blase muss druckdicht sein, damit sich ein Druck zur Ausbildung des Blasen Hohlräumtes aufbauen kann.
- Unterhalb der Beschichtung, beispielsweise im beschichteten Substrat müssen Wassermoleküle vorliegen. Bei Beton als Untergrund ist dies meist der Fall.
- Als Verbindung zwischen dem Kapillarporengefüge des Betons und dem Inneren der Blase müssen lokale Fehlstellen innerhalb der Grundierung existieren. Diese Störstellen in der Grundierung entstehen beim Auftragen der Beschichtung durch Wechselwirkungen zwischen dem Substratbeton und dem noch flüssigen Epoxidharz und führen zu lokalen Vernetzungsstörungen und einer Schwächung des Verbundes. Des Weiteren können bei Beschichtung einer wassergesättigten Betonoberfläche auch großflächigere Fehlstellen infolge der im Substrat verbleibenden Restfeuchte auftreten.

Blasen entstehen erst wenn der Druck im Kapillarporengefüge aufgrund von aufsteigender Feuchte und Temperaturschwankungen, einen bestimmten Grenzwert überschreitet. Mittels Laborversuchen und FE-Berechnungen konnte dieser erforderliche Druck/Grenzwert mit etwa 0,1 N/mm<sup>2</sup> beziffert werden. Im Beton sind, in Abhängigkeit vom Wassergehalt und von der Temperatur dauerhaft Drücke vorhanden, die diesen Wert überschreiten können. Der Kapillardruck wirkt über die Störzone auf die Beschichtung und kann zur Blasenbildung zwischen Beton und Grundierung oder zwischen Grundierung und den aufgehenden Beschichtungslagen führen. [16]

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Beschaffenheit des mineralischen Untergrundes, besonders das Kapillarporengefüge und der Wassergehalt, einen wesentlichen Einfluss auf die zeitverzögerte Blasenbildung zeigt. Die Feuchte kann in diesem Zusammenhang auf unterschiedlichen Wegen zu Adhäsionsversagen und Ablöseerscheinungen führen. Einerseits spielt die Wechselwirkung der Grundierung mit

wassergesättigtem Beton eine Rolle. Andererseits kann auch bei in trockenem beschichtetem Beton aufgrund vorhandener Vernetzungsstörungen und späterer rückseitiger Durchfeuchtung eine Delamination erfolgen. [16]

Trotz intensiver Forschung ist es bisher in der Praxis nicht möglich zeitverzögerte Blasenbildung zuverlässig auszuschließen. In der Literatur finden sich zahlreiche, teilweise jedoch widersprüchliche Maßnahmen zur Verhinderung bzw. Vermeidung der Entstehung dieser Schäden.

### **3.5.6 Verbundversagen**

Schäden durch Verbundversagen lassen sich je nach ihrer äußeren Erscheinungsform unterscheiden in Abschuppen, Ablättern, Abschälen und Unterwanderungen. Abschuppungen und Ablättern beschreiben Ablösungen die sich nur in ihrer Größe unterscheiden. Beim Abschälen liegt eine relativ weiche Beschichtung vor, welche sich vom Untergrund abziehen lässt. Und Unterwanderungen setzen eine vorhergehende Beschädigung der Beschichtung voraus. Wichtig für die Ursachenfindung sind demnach die Beschaffenheit der Trennfläche und der Ort der Bruchebene im Beschichtungsaufbau. Zum Erzielen eines dauerhaften Verbundes zwischen Untergrund und Beschichtung muss einerseits eine Affinität zwischen den beiden Stoffen gegeben sein. Außerdem ist eine Aufrauhung des Untergrundes von Vorteil, da die Haftverbundfläche gegenüber dem glatten Untergrund vergrößert wird. Für Tunnelbeschichtungen besonders relevant sind Feuchte und Verschmutzung zum Beschichtungszeitpunkt. Auch ein Quellen von einzelnen Beschichtungslagen, welches zu den Zersetzungsphänomenen gehört, kann zu einem Verbundversagen führen. [8],[11]

### **3.5.7 Zersetzungen**

Zu den Zersetzungserscheinungen gehören unter anderem Quellen und Verspröden von Beschichtungen. Das Verspröden ist oftmals eine Folge der Alterung bzw. des nachfolgenden Zersetzens des Polymerbindemittels. Die im Zuge einer Versprödung auftretenden Eigenspannungen führen außerdem zur Rissbildung. Im Bauwesen kann es zusätzlich zu einer chemischen Zersetzung von Beschichtungen durch das Einwirken von Basen oder Säuren kommen. [8],[11]



## 4 LÖSUNGSVORSCHLÄGE UND VORGEHENSWEISE

Das Ziel dieses Forschungsprojektes war es, auf Basis existierender Vorgaben, durch Beurteilung von konkreten Schadensbildern und durch ein umfangreiches Laborversuchsprogramm, Lösungswege zu finden, wie Tunnelanstrichsysteme in Zukunft dauerhafter ausgeführt werden können. Als Ergebnis sollte ein Kriterienkatalog für die Ausführung effizienter Tunnelanstrichsysteme erstellt werden.

Um die festgelegten Ziele zu erreichen wurden sowohl Anstrichsysteme an bestehenden Tunnelbauwerken analysiert als auch Laborversuche zur Festlegung der wesentlichen Einflussfaktoren auf die Beständigkeit von Beschichtungen durchgeführt.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden folgenden Detailziele definiert:

- Auswahl von repräsentativen Tunnelbauwerken mit unterschiedlichen Schadensbildern und Beschichtungssystemen
- Zusammenhänge zwischen Schadensbildern, Herstellungsparametern, Betriebsparametern und Prüfwerten darstellen
- Labortechnische Verifizierung von ungünstigen Herstellungsparametern und Witterungseinflüssen durch künstliche Beanspruchung und Auslagerungsszenarien
- Erprobung neuer Beurteilungsmethoden um zukünftig verstärkte Qualitätskontrollen während der Bauausführung zu ermöglichen
- Erstellung eines Leitfadens mit zusätzlichen Anforderungen und Hinweisen für eine Sicherstellung der Qualität und als Hilfestellung für Planer, Ausschreibende und Ausführende

Für die Projektabwicklung wurden unterschiedliche Arbeitspakete zur Erreichung der im vorherigen Abschnitt dargestellten Detailzeile erstellt. Dadurch wurde folgender Projektablauf bzw. folgende Vorgehensweise festgesetzt:

### **AP1: Detaillierte Literaturstudie**

Dieses Arbeitspaket beinhaltete die Sichtung relevanter Literatur sowie die Darlegung und Zusammenfassung des Standes der Technik.

### **AP2: Programmerstellung und Versuchsplanung**

Im Rahmen der Programmerstellung und Versuchsplanung erfolgte die Konzeption des

detaillierten Versuchsprogramms, die Koordination der Arbeiten aller Projektbeteiligten und die Koordination mit dem Verantwortlichen der Infrastrukturbetreiber.

### **AP3: Beurteilung von Referenztunnelbauwerken**

In diesem Arbeitspaket erfolgte die Auswahl von geeigneten Referenztunnelbauwerken auf Basis von Herstellungsparametern, klimatischen Bedingungen im Tunnel, den eingesetzten Beschichtungssystemen, der Jahreszeit und den Klimaparametern während der Beschichtungsausführung, dem Bauwerkszustand und der Betriebsbelastung. In Summe sollten 8 Tunnelbauwerke für eine detaillierte Beurteilung und eine anschließende Beprobung herangezogen werden. Um den Einfluss unterschiedlicher Beschichtungssysteme zu erfassen, wurden Tunnelbauwerke von verschiedenen Herstellern und mit unterschiedlichem Schichtaufbau ausgewählt. Folgende Untersuchungen wurden teilweise vor Ort, teilweise im Labor durchgeführt:

- Visuelle Beurteilung
- Ermittlung der Haftzugfestigkeit
- Ermittlung der Helligkeitseigenschaften
- Ermittlung der Schichtdicken
- Bestimmung der Porosität
- Ermittlung des Chloridgehaltes
- Chemische Beurteilung der Beschichtungssysteme

Ziel dieser Tunneluntersuchungen war es, Zusammenhänge zwischen Merkmalen der Beschichtung bzw. des Untergrundes und Schadenshäufungen zu finden.

### **AP4: Laborversuche**

Auf Basis der Untersuchung realer Tunnelbauwerke aus dem vorherigen Arbeitspaket wurden anschließend Laborversuche durchgeführt. Diese Versuchsreihen dienten dazu, insbesondere Witterungseinflüsse während der Beschichtung, welche im Nachhinein schlecht erfasst werden können, labortechnisch zu simulieren und die Probekörper genau definierten Auslagerungsbedingungen auszusetzen um die daraus resultierenden Schädigungen mit den Umwelteinflüssen zu verknüpfen.

Folgende Variationsparameter wurden definiert:

- Betonsorte
- Chloridgehalt im Untergrund

- Temperatur/Taupunkt
- Oberflächenvorbereitung des Untergrundes
- Aufbau und Zusammensetzung des Beschichtungssystems
- Auslagerungsbedingungen

#### **AP5: Erprobung neuer Beurteilungsmethoden**

Während diesem Arbeitspaket wurden neue Beurteilungsmethoden für eine verstärkte Qualitätskontrolle während der Bauausführung erprobt. Hierfür wurden verschiedene Ansätze, die bei der Beurteilung von Lacken und Anstrichen bereits Anwendung finden, auf deren Tauglichkeit zur Qualitätssicherung für Tunnelanstrichsysteme angewandt. Folgende Beurteilungsmethoden wurden getestet:

- Verschmutzung während der Bauausführung
- Zerstörungsfreie Schichtdickenbestimmung mittels Ultraschall
- Keilspaltprüfung

#### **AP6: Erstellung Leitfaden für effiziente Tunnelanstrichsysteme**

Die im Rahmen der Untersuchung gewonnenen Erkenntnisse wurden zur Erstellung eines Leitfadens bzw. einer Hilfestellung für Planung und Ausführung zusammengestellt.

#### **AP7: Versuchsauswertung und Berichtslegung**

Dieses Arbeitspaket beinhaltete die Zusammenstellung aller Versuchsergebnisse sowie die Erstellung des Abschlussberichtes.

## 5 PRAKTISCHE DURCHFÜHRUNG

### 5.1 Beurteilung von Referenztunnelbauwerken

Die Beurteilung von Referenztunneln erlaubte eine umfangreiche Ursachenanalyse an bestehenden Bauwerken und die Beurteilung von konkreten Schadensbildern. Die visuelle Begutachtung in Kombination mit der Untersuchung von Material- und Untergrundeigenschaften sowie der Erhebung von Betriebsparametern hatte den Aufbau einer weitreichenden Datengrundlage zum Ziel um im Anschluss Zusammenhänge und Einflussfaktoren auf die Dauerhaftigkeit von Tunnelanstrichsystemen feststellen zu können.

Folgende Schritte wurden während des Arbeitspaketes 3 konkret unternommen:

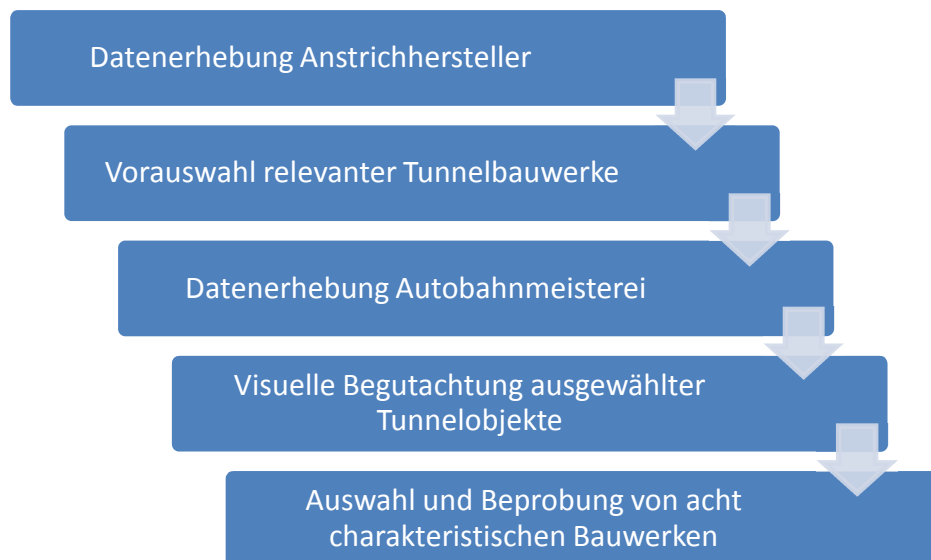


Abbildung 11: Arbeitsschritte während der Beurteilung von Referenztunnelbauwerken

#### 5.1.1 Datenerhebung Anstrichhersteller

Zur Erhebung von Informationen seitens der Anstrichhersteller wurde ein Fragebogen an folgende Unternehmen versandt:

- Avenarius Agro GmbH
- MAPEI Austria GmbH
- Sika AG
- Sto GmbH
- AM Surface GmbH
- Henelit Lackfabrik GmbH

Mit Hilfe des Fragebogens wurden Informationen zu den verwendeten Produktkombinationen, zum Beschichtungsaufbau, zur chemischen Zusammensetzung der jeweiligen Produkte und zur Untergrundvorbereitung in konkreten Tunnelbauwerken gesammelt.

### **5.1.2 Vorauswahl relevanter Tunnelbauwerke**

Basierend auf den Daten der Anstrichhersteller sowie den von der ASFINAG zur Verfügung gestellten Unterlagen wurde eine Vorauswahl relevanter Tunnelobjekte getroffen. Bei der Auswahl wurde versucht eine möglichst große Bandbreite an Einflussparametern beispielsweise Beschichtungshersteller und Beschichtungsaufbau, geografische Lage, Neubau oder Sanierung, Alter, etc. zu berücksichtigen.

### **5.1.3 Datenerhebung Autobahnmeisterei**

Mit Hilfe eines Fragebogens wurden Informationen seitens der Autobahnmeisterei zu diesen Tunnelbauwerken eingeholt. Von Interesse waren hierbei der generelle Zustand des Tunnels und die Beschreibung von konkreten Schadensbildern wobei eine Aufteilung in oberen und unteren Ulmenbereich sowie Portalbereich getroffen wurde.

### **5.1.4 Visuelle Begutachtung ausgewählter Tunnelobjekte**

Mit dem Ziel ideale Objekte zur Erkennung von Zusammenhängen zwischen Schädigungstypen und Umgebungs- und Herstellungsbedingungen auszuwählen wurden insgesamt 11 Tunnelbauwerke im Jahr 2015 besucht und visuell inspiziert. Eine Übersicht über die tatsächlich begutachteten Tunnel und wichtige Parameter zur Bauausführung sind in Tabelle 1 dargestellt.

Bei allen Objekten erfolgte eine Beurteilung der rechten Tunnelulme. Die Begehungen wurden aufgrund der geografischen Lage der einzelnen Bauwerke in 3 Pakete eingeteilt und fanden im Zeitraum von April bis Juni 2015 statt. Aufgrund der häufig schwierigen Einrichtung einer Fahrbahnsperre wurden bei einem Teil der Tunnel beide und bei anderen nur eine Richtungsfahrbahn begutachtet.

Während der Begutachtung wurde vor allem darauf geachtet Schädigungstypen und deren Ursache festzustellen. Es erfolgte dabei eine detaillierte Fotodokumentation, welche als Grundlage zur Festlegung von potentiellen Probenahmestellen diente. Außerdem wurden die Schadensarten je nach optischer Erscheinung und Auftrittsort (Portalbereich, oberer oder unterer Ulmenbereich) eingeteilt und die Schädigungen in unterschiedlichen Bauwerken einander gegenübergestellt.

**Tabelle 1: Ausgewählte Tunnelobjekte für die visuelle Begutachtung**

	<b>Objekt</b>	<b>Hersteller</b>	<b>Neu/Saniert</b>	<b>Straße</b>	<b>Jahr</b>	<b>Jahreszeit</b>
1	<b>Katschbergtunnel</b> Fahrtrichtung Salzburg	Agro	N	A10	2007	Mai, Juni
2	<b>Wolfsbergtunnel</b> Fahrtrichtung Villach	Agro	N	A10	2010	März – Juni
	<b>Wolfsbergtunnel</b> Fahrtrichtung Salzburg	Agro	S	A10	2010	Oktober, November
3	<b>Gräberntunnel</b> Fahrtrichtung Klagenfurt	Mapei	N	A2	2003	Juni, Juli
4	<b>Mitterbergtunnel</b> Fahrtrichtung Klagenfurt Fahrtrichtung Graz	Agro	S	A2	2004	Oktober, November
5	<b>Kalcherkogeltunnel</b> Fahrtrichtung Klagenfurt Fahrtrichtung Graz	Agro	S	A2	2004	Oktober, November
6	<b>Schartnerkogeltunnel</b> Fahrtrichtung Graz	Agro	S	A9	2005	Mai, Juni
7	<b>Ganzsteintunnel</b> Fahrtrichtung Wien	Agro	N	S6	2008	Jänner – März
8	<b>Flirscher Tunnel</b> Fahrtrichtung Arlberg	Sika	S	S16	2005	Juli
9	<b>Strenger Tunnel</b> Fahrtrichtung Innsbruck	Mapei	N	A12	2005	Mai, Juni
10	<b>Milser Tunnel</b> Fahrtrichtung Arlberg	Agro	S	A12	2005	April – Juli
11	<b>Wels Noitzmühle</b> Fahrtrichtung Graz	Agro	N	A8	2003	Juni, Juli

### 5.1.5 Beprobung ausgewählter Tunnelobjekte

Basierend auf den Ergebnissen der visuellen Begutachtung wurden 8 Tunnelbauwerke für eine Beprobung ausgewählt. Bei dieser Beprobung war vor allem der Vergleich zwischen geschädigten und intakten Tunnelabschnitten von Interesse, um die Ursache für die auftretenden Schädigungen feststellen zu können. Die zur Beprobung ausgewählten Tunnelobjekte sind in Tabelle 2 dargestellt, wobei 4 neue und 4 sanierte Bauwerke von dreierlei Herstellern und unterschiedlichem Alter miteinbezogen wurden.

**Tabelle 2: Ausgewählte Tunnelobjekte für die Beprobung**

	<b>Objekt</b>	<b>Hersteller</b>	<b>Neu/Saniert</b>	<b>Straße</b>	<b>Jahr</b>	<b>Jahreszeit</b>
1	Ganzsteintunnel RFB Wien	Agro	N	S6	2008	Jänner – März
2	Wels Noitzmühle RFB Graz	Agro	N	A8	2003	Juni, Juli
3	Wolfsbergtunnel RFB Villach	Agro	N	A10	2010	März – Juni
4	Wolfsbergtunnel RFB Salzburg	Agro	S	A10	2010	Oktober, November
5	Schartnerkogeltunnel RFB Graz	Agro	S	A9	2005	Mai, Juni
6	Strenger Tunnel RFB Innsbruck	Mapei	N	A12	2005	Mai, Juni
7	Flirscher Tunnel inkl. Gondobachtunnel – RFB Arlberg	Sika	S	S16	2005	Juli
8	Milser Tunnel RFB Arlberg	Agro	S	A12	2005	April – Juli

Bei der Auswahl der oben dargestellten Tunnelbauwerke kamen unterschiedliche Auswahlkriterien zum Einsatz:

Der Ganzsteintunnel – Fahrtrichtung Wien wurde aufgrund seines Herstellungszeitraumes (Herstellung im Winter 2008) mitaufgenommen um jahreszeitliche Einflüsse bei der Datenerhebung abzubilden. Außerdem deuteten sehr spröde Krakeleerisse im Anstrich auf eine eventuelle Temperaturunterschreitung bei der Verarbeitung/Aushärtung hin.

Beim Wolfsbergtunnel wurden beide Fahrtrichtungen zur Beprobung ausgewählt wodurch ein Vergleich Neubau/Sanierung ermöglicht wurde. Außerdem konnte aufgrund des Beschichtungsaufbaues der Einfluss einer diffusionsoffenen bzw. einer diffusionsdichten Beschichtung herausgearbeitet werden. Des Weiteren war ein Vergleich mit dem Schartnerkogeltunnel möglich, welcher denselben Anstrichhersteller aber ein anderes Alter aufweist. Der Schartnerkogeltunnel besitzt außerdem eine sehr gut erhaltene Beschichtung und konnte als Positivbeispiel bzw. Referenz in der Datenerfassung dienen.

Mils und Wels Noitzmühle besitzen ebenfalls ein Beschichtungssystem von Avenarius Agro, allerdings unterscheiden sie sich im Aufbau von den anderen Objekten. Der Vergleich der beiden Tunnel ermöglicht weiters den Einfluss regionaler Gegebenheiten zu berücksichtigen.

Die Tunnel Flirsch und Strenger wurden ausgewählt um die Beprobung auf zusätzliche Anstrichhersteller außer Avenarius Agro zu erweitern. Der Strenger Tunnel weist überdies eine große Anzahl unterschiedlicher Schadensarten auf, welche geblockt auftreten.

Die Vorgehensweise während der Tunnelbeprobung war bei allen Objekten die gleiche. Folgende Arbeitsschritte und Prüfungen wurden vor Ort durchgeführt:

- Entnahme von Bohrmehl in 3 Tiefen (0-2 cm, 2-4 cm, 4-6 cm) zur anschließenden Chloridbestimmung
- Bestimmung der Helligkeit: Dazu wurde ein ausgewählter Messbereich zuerst mit Seifenlauge gereinigt und die Helligkeit an einem Messraster mit 5 Stellen bestimmt.
- Bohrkernentnahme zur anschließenden Schichtdickenbestimmung, chemischen Analyse und Porositätsbestimmung im Labor.
- Bestimmung des Wassergehaltes an der Bohrkernunterseite

Im Labor der Smart Minerals GmbH wurden im Anschluss an die Beprobung folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Chloridbestimmung nach EN 14629 an den entnommenen Bohrmehlen
- Anfertigung eines Querschliffes und Bestimmung der Schichtdicken der einzelnen Beschichtungslagen mit dem Mikroskop
- Bestimmung der Porosität mittels Quecksilberdruckporosimeter
- Chemische Analyse ausgewählter Bohrkernproben mittels
  - FTIR (Fourier Transform Infrarot Spektroskopie),
  - TGA (Thermogravimetrische Analyse) und
  - DSC (Differenzkalorimetrie)

in Kooperation mit der TU Wien.

Für die chemische Analyse wurden jeweils Anstrich und Spachtelung getrennt analysiert. Dazu wurde mit einem Skalpell die oberste Schicht auf den Bohrkernproben vorsichtig entfernt. Je nach Beschaffenheit der Proben konnten entweder einzelne Blättchen des Anstriches abgelöst werden oder der Anstrich musste mit dem Skalpell abgeschabt werden. Anschließend wurde die oberste Schicht mit der Korundbürste eines Multifunktionswerkzeuges abgetragen. Die darunter liegende Spachtelung wurde ebenfalls mit Hilfe eines Skalpells abgeschabt. Danach wurden die Proben im Exsikkator unter Vakuum und über Blaugel bei Raumtemperatur gelagert.



Im Folgenden sind die Probenvorbereitung und der Messvorgang für die einzelnen Analysen ausführlich dargestellt.

### **FTIR (Fourier Transform Infrarot Spektroskopie)**

Für die FTIR Messungen wurden 3 mg der jeweiligen Beschichtungslage (Anstrich bzw. Spachtelung) mit einem Mörser zermahlen und mit 300 mg vorgetrocknetem Kaliumbromid (KBr) vermischt. Danach wurde die Mischung zu einem KBr-Pressling verarbeitet und rasch in Transmission mit einem FTIR von Bruker (*Bruker Tensor 27*) gemessen. Die Auswertung erfolgte mit der mitgelieferten Software „Opus“.

### **DSC (Differenzkalorimetrie)**

Für die DSC-Messung wurden etwa 4-6 mg Probe in einem Aluminium Tiegel (TA Standard) eingewogen und verschlossen. Die Prüfung erfolgte mit einem DSC Modell *TA Q2000* mit Autosampler. Die Messzelle wurde mit 50 ml/min Stickstoff gespült. Während der Messung wurde die Probe im Ofen auf -30 °C abgekühlt und mit einer Heizrate von 10 K/min auf 250 °C erhitzt (1. Aufheizkurve). Bei gleicher Rate wurde anschließend wieder auf -30 °C abgekühlt (Abkühlkurve) und nochmals auf 250 °C aufgeheizt (2. Aufheizkurve). Die Auswertung erfolgte mit „*Universal Analysis*“.

### **TGA (Thermogravimetrie)**

Für die TGA-Messung wurden ca. 10 mg der Probe in einen Keramiktiegel mit Platinbügel eingewogen und mit einer Heizrate von 10 K/min von Raumtemperatur auf 500 °C unter Stickstoffatmosphäre aufgeheizt. Bei 500 °C wurde von Stickstoff auf Luft umgeschaltet und bei gleicher Heizrate auf 700 °C weiter aufgeheizt. Die Auswertung erfolgte wie bei der DSC mit „*Universal Analysis*“.



Bruker Tensor 27 FTIR



TA DSC Q2000



TA TGA Q500

**Abbildung 12: Geräte für die chemische Analyse**

## 5.2 Laborversuche

Das Ziel der Laboruntersuchungen war die labortechnische Verifizierung von ungünstigen Herstellungsparametern bzw. Witterungseinflüssen durch künstliche Beanspruchung an unterschiedlichen Beschichtungssystemen.

Folgende Parameter waren hierbei von Interesse:

- Betonsorte

Um baupraktische Schwankungen zu simulieren wurden zwei Betonsorten mit unterschiedlichen W/B-Werten ausgewählt:

- C25/30(56)/XC4/XF3/XA1T/XA2L/WDI C3A-frei (Tunnelgewölbe) – geringe Porosität
- C25/30(56)/XC4/XF3/XA1T/XA2L/IG C3A-frei (Tunnelgewölbe) – hohe Porosität

- Chloridgehalt im Untergrund

Um den Einfluss einer bereits vor der Instandsetzungsmaßnahme vorhandenen Chloridbelastung im Untergrund festzustellen, wurden Betonprobekörper ohne und mit in der Mische dotierten Chloridgehalten (2 % bzw. 7 %) hergestellt sowie der Ausgleichs-Chloridgehalt durch kapillares Saugen einer unbelasteten Probe eingestellt.

- Oberflächenvorbereitung des Untergrundes

Die Rauheit des Substratbetons hat wesentlichen Einfluss auf die mechanische Adhäsion zwischen Beton und Beschichtung. Die unterschiedlichen Anforderungen von Neubauten und Instandsetzungen wurden durch die Auswahl zweier unterschiedlicher Rautiefen berücksichtigt.

- Verarbeitung bei definierten Temperaturen und Aushärtebedingungen

Die Applikation der Beschichtungssysteme erfolgte in einer definierten Laborumgebung wobei die Einflussfaktoren Temperatur und Wartezeiten zwischen den Schichten variiert wurden.

- Beschichtungssystem und –aufbau

Nicht nur die chemische Zusammensetzung des Produktes, auch die Anzahl und Art der aufgetragenen Schichten beeinflusst die Dauerhaftigkeit. Zur besseren Vergleichbarkeit mit den beprobten Tunneln wurde deshalb das am häufigsten verwendete Produkt ausgewählt.

– Witterungseinflüsse

Um die Auswirkungen von Umwelteinflüssen auf die Lebensdauer einer Beschichtung zu untersuchen wurden die hergestellten Probekörper definierten Belastungsszenarien ausgesetzt. Hierfür wurden eine Frost-Tau-Wechselbeanspruchung mit Tausalzangriff, die Alterung durch thermische Belastung sowie rückseitige Feuchteinwirkung ausgewählt.

Um die im vorherigen Abschnitt erläuterten Parameter bei der Probekörperherstellung zu berücksichtigen wurde folgende Matrix erstellt:

**Tabelle 3: Übersicht zur Probekörperherstellung**

	HERSTELLER 1																					
Chlorid	0 %						0 (Saugen)				2 %				7 %							
Beton	IG			WDI			IG		WDI		IG		WDI		IG		WDI					
Temp.	12	5	5	12	5	5	12	5	12	5	12	5	5	12	5	5	12	5	5	12	5	5
UG <sub>2</sub>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1		1	1		1	1	
UG <sub>4</sub>	1	1	1	1	1	1								1	1	1	1	1	1	1	1	1

Wie in Tabelle 3 zu sehen ist wurden Probekörper von je 2 Betonsorten mit 4 unterschiedlichen Chloridgehalten hergestellt. Diese wurden im Anschluss auf die vorgegebenen Rautiefen wassergestrahlt: UG<sub>2</sub> ≥ 0,3 mm bzw. UG<sub>4</sub> ≥ 1,0 mm. Um die Klimaverhältnisse und den Zeitdruck auf der Baustelle zu simulieren wurden außerdem 2 unterschiedliche Verarbeitungstemperaturen festgelegt. Die Farbcodierung schwarz/rot/grün wurde zur Kennzeichnung der Überarbeitungstemperaturen eingeführt, welche folgendermaßen gewählt wurden:

- 5 °C: jeden Tag ein Anstrich, Lagerung der Platten und der Beschichtungsstoffe bei 5 °C
- 5 °C: Überarbeitung gemäß Herstellervorgaben – längere Wartezeiten, Lagerung der Platten und der Beschichtungsstoffe bei 5 °C
- 12 °C: Überarbeitung gemäß Herstellervorgaben – längere Wartezeiten, Lagerung der Platten und der Beschichtungsstoffe bei 12 °C

Eine genaue Übersicht über die einzelnen Lagen des Beschichtungssystems sowie über die vom Hersteller vorgegebenen Überarbeitungszeiträume ist in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

**Tabelle 4: Überarbeitungsintervalle des gewählten Beschichtungssystems**

	Anstrichsystem für UG <sub>2</sub> /UG <sub>4</sub>	Wartezeit zwischen den Anstrichen			
		5°C	5°C	12°C	Lt. Hersteller
1)	<b>Grundierung</b> lösemittelfreies Epoxidharzbindemittel	24h	96h (4 Tage)	48h (2 Tage)	ca. 24h bei 20°C
2)	<b>Spachtelung</b> wasserdispergierte Epoxidharzspachtelmasse	24h	64h (3 Tage)	32h (2 Tage)	mind. 16h bei 20°C und 60% rel. Luftfeuchtigkeit
3)	<b>Anstrich</b> wasserverdünnbarer Epoxidharzanstrich	Lagern für 3-4 Tage bei vorgegebener Temperatur, dann bei 20°C			7 Tage bei 20°C und 60% rel. Luftfeuchtigkeit

In weiterer Folge wurde die Probekörpermatrix noch zweimal erweitert, einmal um ein alternatives Beschichtungssystem eines zweiten Herstellers aufzunehmen, das zweite Mal um weitere Witterungseinflüsse, insbesondere Feuchteeinwirkung während dem Auftragen des Beschichtungssystems zu untersuchen.

Folgende Probekörper wurden zur Prüfung alternativer Beschichtungssysteme hergestellt:

**Tabelle 5: Übersicht zur Probekörperherstellung – Erweiterung alternatives Beschichtungssystem**

	HERSTELLER 2			
	Produkt 1 (EP-basierend)		Produkt 2 (PU-basierend)	
<b>Chlorid</b>	0 %		0 %	
<b>Beton</b>	IG		IG	
Temp.	12	5	12	5
UG <sub>2</sub>	1	1	1	1

Es wurden insgesamt 4 neue Probekörperplatten derselben Betonsorte betoniert und nach ca. 28 Tagen auf eine Rautiefe von  $\geq 0,3$  mm sandgestrahlt. Vom Hersteller 2 wurden zwei unterschiedliche Produkte zur Verfügung gestellt. Bei Produkt 1 handelt es sich um einen handelsüblichen, zweikomponentigen Tunnelanstrich auf Epoxidharz-Basis, Produkt 2 ist eine Neuentwicklung auf Basis von Polyurethanen. Die Anstriche wurden jeweils zweilagig aufgetragen. Als Unterlage für die Anstriche diente ein PCC-Feinspachtel. Wieder wurde jeweils bei 5°C und bei 12°C beschichtet. Die genauen Überarbeitungsintervalle und Herstellervorgaben sind in Tabelle 6 angegeben.

**Tabelle 6: Überarbeitungsintervalle für die Beschichtungssysteme von Hersteller 2**

Anstrichsystem 1		Wartezeit zwischen den Anstrichen		
für UG <sub>2</sub>		5°C	12°C	Lt. Hersteller
1)	<b>PCC-Feinspachtel</b>	24h	48h (2 Tage)	ca. 24 h bei 20 °C und < 80 % relative Luftfeuchte
2)	<b>Anstrich (2-lagig)</b> Wässriger Epoxidharzanstrich	24h	48h (2 Tage)	Überarbeitungszeit: zwischen 4 und 120 h
Anstrichsystem 2		Wartezeit zwischen den Anstrichen		
für UG <sub>2</sub>		5°C	12°C	Lt. Hersteller
1)	<b>PCC-Feinspachtel</b>	24h	48h 2 Tage	ca. 24 h bei 20 °C und 80 % relative Luftfeuchte
2)	<b>Anstrich (2-lagig)</b> Lösemittelarme Polyurethan- Rollbeschichtung	5h	5h	Überarbeitungszeit: zwischen 2 und 12 h

In einer zweiten Erweiterung wurden nochmals 6 Probekörper hergestellt, um dieses Mal weitere Witterungseinflüsse, insbesondere Feuchteeinwirkung während dem Auftragen des Beschichtungssystems zu untersuchen. Insgesamt wurden 6 Platten der Betonsorte IG, Nullbeton hergestellt und auf eine Rautiefe von  $\geq 0,3$  mm sandgestrahlt. Diese Platten wurden mit dem Beschichtungssystem von Hersteller 1 bei 12 °C unter drei unterschiedlichen Bedingungen beschichtet:

- **Szenario 1: Rückseitige Feuchte**

Um die Verträglichkeit der Produkte mit hinterfeuchtem Beton in die Prüfmatrix aufzunehmen, wurden je 2 Platten vor der Beschichtung für 7 Tage unter Wasser gelagert. Etwa 2 Stunden vor dem Auftragen der ersten Lage wurden die Platten aus dem Wasser entnommen und die Grundierung auf der oberflächlich trockenen Betonplatte aufgebracht. Anschließend wurden die Platten rückseitig mit Wasser beaufschlagt und die Platten bei rückseitiger Feuchte beschichtet.

- **Szenario 2: Frost und Kondenswasser**

Zwei weitere Platten wurden während dem Beschichtungsauftrag extremen Temperaturwechseln zwischen 12 °C und 0 °C ausgesetzt. Nach der Grundierung wurden die Platten bei 0 °C gelagert, nach dem Auftrag der Spachtelung bei 12 °C und nach dem Aufbringen des Anstriches wiederum bei 0 °C. Eine grafische Darstellung der Temperaturwechsel ist in Abbildung 13 zu sehen. Als Überarbeitungsintervalle wurden die Standard-Überarbeitungsintervalle für 12 °C übernommen.

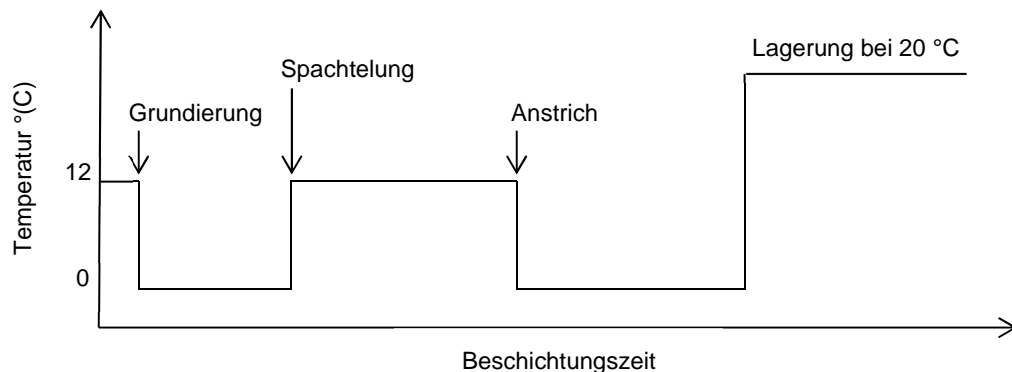


Abbildung 13: Temperaturwechsel während der Beschichtung Szenario 2

### - Szenario 3: Verdünnung

Da es sich beim Anstrich und bei der Spachtelung um wasserbasierte Systeme handelt, ist laut Datenblatt das Verdünnen mit Wasser bis zu einem bestimmten Grad erlaubt. Deshalb wurden zwei weitere Platten bei 12 °C unter Berücksichtigung des maximalen Verdünnungsgrades mit Produkten von Hersteller 1 beschichtet. Folgende Menge Wasser darf zu den jeweiligen Beschichtungsstoffen zugegeben werden:

- Spachtelung: mit Wasser bis max. 5 % verdünnen
- Anstrich: mit Wasser bis max. 3 % verdünnen

### 5.2.1 Probekörperherstellung

Laut der Probekörpermatrix in Tabelle 3 und Tabelle 5 wurden insgesamt 40 Probekörperplatten (50 x 40 x 5 cm) hergestellt plus 6 weitere Platten für die Erweiterung der Witterungseinflüsse betoniert. Von jeder Mische wurden die Frischbetoneigenschaften bestimmt sowie die Festbetoneigenschaften von jeder Betonsorte (Druckfestigkeit nach 28 Tagen, Feuchte mittels CM-Methode, Luftporenkennwerte). Nach einer Lagerzeit von ca. 1 Monat wurden die Platten wassergestrahlt bzw. die später hergestellten Platten sandgestrahlt und die geforderte Rautiefe im Haus nochmals mit der Sandfleckenmethode überprüft.

Anschließend erfolgte der Auftrag des Beschichtungssystems bei den gewählten Temperaturen von 12 °C und 5 °C. Neben den Platten wurden auch die Beschichtungsprodukte bei der eingestellten Temperatur für mindestens 3-4 Tage gelagert. Die Grundierung und der Anstrich wurden mit einer Rolle aufgetragen, die Spachtelung wurde als Flächenspachtelung aufgebracht. Die einzelnen Arbeitsschritte sind in Abbildung 14 für das Beschichtungssystem von Hersteller 1 exemplarisch dargestellt.



a) Grundierung



b) Spachtelung



c) Anstrich

**Abbildung 14: Auftragen des Beschichtungssystems von Hersteller 1**

Die Beschichtung bei einer Temperatur von 12 °C war generell für die Produkte beider Hersteller problemlos möglich. Nach den festgesetzten Überarbeitungsintervallen waren die jeweils vorher aufgetragenen Schichten trocken und zeigten keine Unregelmäßigkeiten.

Bei der Beschichtung der Platten bei 5 °C zeigten die Beschichtungsstoffe in einigen Fällen ein abweichendes Verhalten. Beispielsweise war die angerührte Grundierung von Hersteller 1 bei 5 °C milchig trüb und bröckelig und nicht farblos wie bei 12 °C. Auch der 2-Komponenten Epoxidharz-Anstrich von Hersteller 2 war nach dem Öffnen und Lagern bei 5 °C bröckelig und ließ sich nicht mehr vollständig durchmischen.



a) Grundierung von Hersteller 1



b) Epoxidharzanstrich von Hersteller 2

**Abbildung 15: Beschichtungsstoffe bei 5 °C**

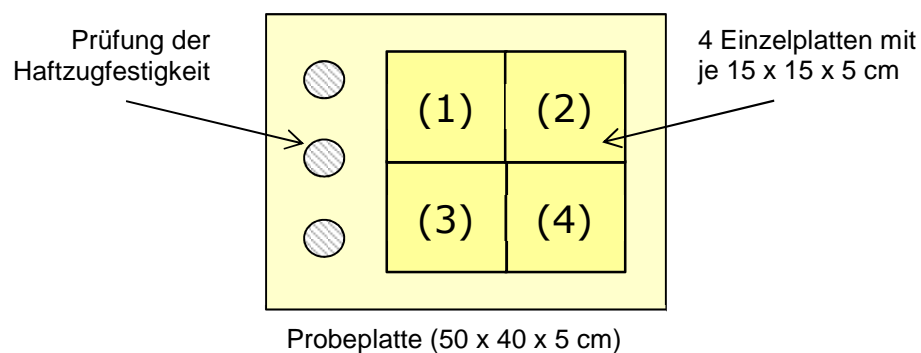
Des Weiteren waren die vorhergehenden Beschichtungslagen bei einer Umgebungstemperatur von 5 °C nach 24 h noch leicht klebrig und nicht vollständig trocken (rote Probenserie). Die neue Beschichtungslage wurde demnach auf eine noch feuchte Unterschicht aufgebracht. Bei der abschließenden Lagerung der Platten bei ca. 20 °C war die Beschichtung optisch in Ordnung, allerdings noch sehr weich. Bei der verlängerten Wartezeit (grüne Probenserie) war dies nicht mehr der Fall und ein Beschichten problemlos möglich.

Die Beschichtung der letzten Probenserie zur Untersuchung des Feuchteinflusses fand für alle Platten bei 12 °C statt. Allerdings wurden je 2 Platten während der gesamten Beschichtungszeit rückseitig in Wasser gelagert und 2 weitere Platten wurden einem Temperaturwechsel zwischen 0 °C und 12 °C ausgesetzt.

Nach einer Lagerung von 7 Tagen bei etwa 20 °C wurde von jeder Platte die Haftzugfestigkeit (nach ONR 23303, je 3 Einzelwerte) bestimmt und daraufhin 4 Einzelplatten zu je 15 x 15 x 5 cm aus der großen Probeplatte geschnitten.

### 5.2.2 Auslagerungsversuche

Von jeder beschichteten Probeplatte (50 x 40 x 5 cm) waren nach dem Schneiden je 4 kleine Einzelplatten (15 x 15 x 5 cm) vorhanden. Diese wurden von 1 bis 4 durchnummeriert (siehe Abbildung 16) und zur Dokumentation des Ausgangszustandes deren Reflexionsgrad bestimmt und die Oberfläche mit dem Mikroskop untersucht.



**Abbildung 16: Plattenvorbereitung für die Auslagerungsversuche**

Anschließend wurde eine kleine Platte als Rückstellmuster zurückbehalten. Die restlichen 3 Platten wurden unterschiedlichen Belastungsszenarien ausgesetzt.

- **Frost-Taumittel-Belastung (XF4)**

Die Frost-Taumittel-Belastung wurde nach EN 1504-2 durchgeführt. Insgesamt wurden 50 Zyklen mit abwechselnder zweistündiger Lagerung bei (-15±2) °C in gesättigter NaCl-Lösung und anschließender zweistündiger Wasserlagerung bei (21±2) °C durchgeführt. Über die Nacht und während den Wochenenden wurden die Probekörper ebenfalls bei (21±2) °C im Wasser gelagert.

- **Frost-Taumittel-Belastung in Kombination mit thermischer Alterung**

Um den Einfluss einer Frost-Tausalz-Belastung auf eine bereits durch Alterung angegriffene Beschichtung zu simulieren wurden die beiden Belastungsszenarien wie folgt kombiniert:

- Frost-Taumittel-Belastung nach EN 1504-2
- Konditionierung bei 70 °C für 7 Tage nach EN 1062-11
- Temperaturwechsellagerung in Anlehnung an EN 13687 mit insgesamt 5 Wechseln zwischen 70 °C und 20 °C



- Frost-Taumittel-Belastung nach EN 1504-2
- **Rückseitige Feuchteinwirkung**

Ziel dieses Auslagerungsszenarios war es den Einfluss rückseitiger Feuchte auf ein im trockenen Zustand appliziertes Beschichtungssystem zu untersuchen. Dazu wurde, in Anlehnung an EN 13578, je eine Einzelplatte auf Dreikantleisten gelagert und rückseitig für 30 Tage mit Wasser beaufschlagt.

### 5.3 Erprobung neuer Beurteilungsmethoden

Im Zuge dieses Forschungsvorhabens wurden mehrere alternative Prüfmethode auf ihre Eignung zur Untersuchung von Tunnelanstrichsystemen hin getestet. In diesem Zusammenhang sind auch die chemischen Analysen der Bohrkernproben und Laborprüfkörper erwähnenswert, da für diese Untersuchungen nur eine kleine Probenmenge notwendig ist und das Anstrichsystem bezüglich Vernetzung und Alterung analysiert werden kann. Die Ergebnisse werden in den Kapiteln 6.3.3 und 6.4.3 eingehend diskutiert.

#### 5.3.1 Keilspaltprüfung

Da die Krafteinwirkung bei der Blasenbildung von einer uniaxialen Belastung wie bei der Prüfung der Haftzugfestigkeit abweichen kann wurde alternativ eine Keilspaltprüfung für ausgewählte Probeplatten durchgeführt. Die Bestimmung bruchmechanischer Kennwerte (Kerb-Spaltzugfestigkeit und spezifische Bruchenergie) erfolgte mit dem statischen Prüfverfahren gemäß ÖNORM B 3592. Eine Systemskizze der Probekörpergeometrie sowie der Krafteinwirkung während der Prüfung ist in Abbildung 17 schematisch dargestellt.

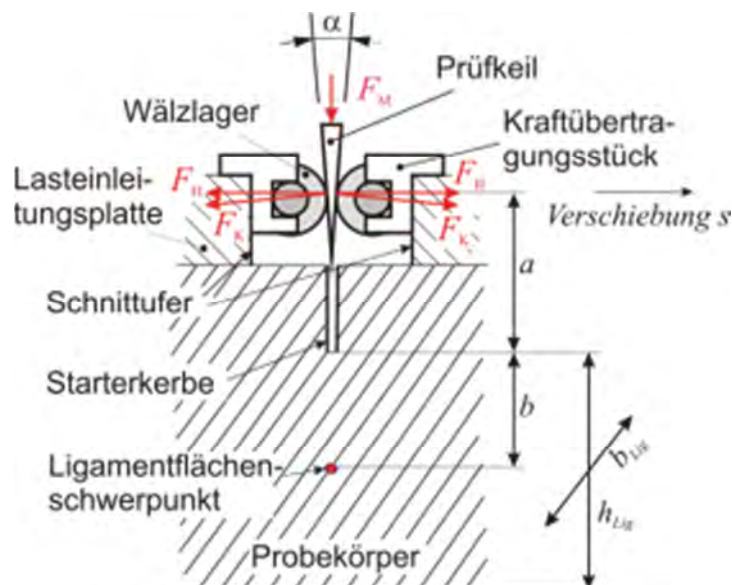


Abbildung 17: Systemskizze für die Keilspaltprüfung

Zur Probenvorbereitung wurden aus einer Einzelplatte mit den Maßen 15 x 15 x 5 cm kleine Würfel mit etwa 5 x 5 x 5 cm ausgeschnitten. Die Würfel wurden mit der Beschichtungsseite an ein Gegenstück geklebt und für die Prüfung vorbereitet (Schneiden einer Starterkerbe, Aufkleben von Lasteinleitungsplatten). Die Probekörper wurden bis zur Prüfung bei Raumtemperatur gelagert.

Die Bestimmung bruchmechanischer Kennwerte erfolgte mit einer Universalprüfmaschine. Als Belastungsgeschwindigkeit wurde bei allen Bohrkernen 0,1 mm/min gewählt, der Keilwinkel betrug stets 12,0 °.

### 5.3.2 Schichtdickenmessung mittels Ultraschall

Als alternative Methode zu den derzeit verfügbaren Nachweisen der Schichtdicke (an Querschnitten/-schliffen mittels Mikroskop - Verfahren 6A nach ÖNORM EN ISO 2808 oder mittels Keilschnittmessung - Verfahren 6B nach ÖNORM EN ISO 2808) wurde der Einsatz von ultraschallbasierten Messgeräten (Verfahren 10 nach ÖNORM EN ISO 2808, Abschnitt 5.8) überprüft. Es handelt sich dabei um Geräte mit einem Ultraschallsender und einer Empfangseinrichtung zum Bestimmen der Schichtdicke über die Laufzeit.

Zur Überprüfung der Praxistauglichkeit dieser Methode wurden willkürlich 7 beschichtete Probepplatten ausgewählt, deren Schichtdicke bereits durch Messungen an Querschliffen bekannt war. Für die Vergleichsmessungen kamen folgende Geräte zum Einsatz:

- **PosiTector 200B**, DeFelsko Corporation, 800 Proctor Avenue, Ogdensburg, NY 13669-2205 USA
- **Elcometer 500**, Elcometer Instruments GmbH, D-73431 Aalen

### 5.3.3 Beurteilung von Staub auf für das Beschichten vorbereiteten Oberflächen (Klebeband-Verfahren)

Im Kaisermühlen Tunnel wurde im Zuge der Baustellenkontrollen versucht einen standardisierten Test aus dem Korrosionsschutz nach ÖNORM EN ISO 8502-3 auf die Arbeiten an der Tunnelwand zu übertragen und Klebebandprüfungen sowohl an den gestrahlten Oberflächen, als auch auf der Spachtelung durchgeführt.

## 6 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

### 6.1 Zusammensetzung verwendeter Beschichtungssysteme

Die genaue Zusammensetzung und der Aufbau des Beschichtungssystems sind bei der Ursachenfindung auftretender Mängel von wesentlicher Bedeutung. Aus diesem Grund wurden Informationen seitens der Anstrichhersteller zu verwendeten Produkten und Produktkombinationen eingeholt.

Die Ergebnisse dieser Datenerhebung sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Objekt	Neu/San	Straße	Jahr	Verarbeiter	Hersteller	Untergrund- vorbehandlung			Hydrophobierung	Grundierung	Spachtelung zementär	2K-Spachtelung diff-offen	2K-Spachtelung diff-dicht	Anstrich diff-offen	Beschichtung diff-dicht
						UG1/UG2	UG3/UG4	UG4							
Flirscher Tunnel	S	S 16	2006	Chembau	Sika	X	X			1		3	2	4	
Strengen	N	A12	2006	Peiningner	Mapei	X						2		3	
Gräbermtunnel	N	A2	2004	Komat	Mapei		X					2		3	
Noitzmühle	S	A 8	2003	Junger	Agro										
Kalcherkogeltunnel	S	A 2	2004	Junger	Agro		X					4		6	
Mitterbergtunnel	S	A 2	2004	Junger	Agro		X					4		6	
Milser Tunnel	S	A 12	2005	Bauschutz	Agro		X			3			X	6	
Schartnerkogeltunnel	S	A 9	2005	Wegl	Agro		X					4	5	6	
Ganzsteintunnel	N	S 6	2008	Bauschutz	Agro	X				2		4	5	6	
Katschbergtunnel	S	A 10	2008	Junger	Agro		X			2			5	6	
Wolfsbergtunnel	S	A 10	2010	KBB-Meissl	Agro		X					4	5	6	
Wolfsbergtunnel	N	A 10	2010	KBB-Meissl	Agro	X						4	5	6	

**Tabelle 7: Übersicht Beschichtungssysteme**

Unter den oben genannten Kennziffern sind die eingesetzten Produkte in der nachfolgenden Tabelle aufgelistet und beschrieben. Die Angaben stammen aus den Auskünften der Materialhersteller in den Fragebögen. Wie Tabelle 8 zeigt, handelt es sich bei den meisten Produkten um Zweikomponenten-Systeme auf Epoxidharzbasis mit Aminen oder kristalliner Kieselsäure als Härter. Die Grundstruktur des Epoxidharzes dürfte ebenfalls für unterschiedliche Hersteller ähnlich sein. Außerdem wurden sowohl lösemittelfreie als auch wasserbasierte Produkte verwendet.

Produkt Nr.	Produktbezeichnung	Basis	Härter	Beschleuniger-system	Füllstoffe	Lösemittel- / Wasserbasis
<b>SIKA</b>						
1	Sikadur 186	Bisphenol-A-Epichlorhydrin-Harz MG<700	Amin	k.A.		
2	Sikadur 186	Bisphenol-A-Epichlorhydrin-Harz MG<700	Amin	k.A.		
3	Sikagard 331 W VP1	Bisphenol-A-Epichlorhydrin-Harz MG<700	Amin	k.A.		
4	Sika Wallcoat T	Bisphenol-A-Epichlorhydrin-Harz MG<700	Amin	k.A.		
<b>Mapei</b>						
1	Mapefloor I914	Bisphenol-A-Epichlorhydrin-Harz MG<700	30 % -40% Benzylalkohol	k.A.	k.A.	lösemittelfrei
2	Mapecoat WT	Bisphenol-A-Epichlorhydrin-Harz MG<700	20% - 25% kristalline Kieselsäure	k.A.	k.A.	WB
3	Mapecoat TU	Bisphenol-A-Epichlorhydrin-Harz MG<700	20% - 25% kristalline Kieselsäure	k.A.	k.A.	WB
4	Primer SN Rasante	Bisphenol-A-Epichlorhydrin-Harz MG<700	20% - 24.99% Benzylalkohol	k.A.	k.A.	
5	Mapefinish	zementär				entfällt
6	Mapecoat TU EP SF	Bisphenol-A-Epichlorhydrin-Harz MG<700	12 % 20% Benzylalkohol			lösemittelfrei
<b>Agro</b>						
1	Protectosil BHN	Silan-Siloxan	entfällt	entfällt	entfällt	lösemittelfrei
2	Agropox Kunststoffgrund	Epoxidharz A/F	Amin	entfällt	entfällt	lösemittelfrei
3	Disbocret Mörtel 520	Zement/Acrylat	entfällt	entfällt	Quarz	entfällt
4	Agropox TU Spachtel Fein (Agropox TU Filler WB)	Epoxidharzdispersion	Epichlorhydrin	entfällt	Quarz	WB
5	Agropox TU Spachtel LF (Agropox TU Filler SF)	Epoxidharz A/F	Amin	entfällt	Quarz	lösemittelfrei
6	Agropox TU GLF (Agropox TU Coat WB)	Epoxidharzdispersion	Epichlorhydrin	entfällt	Quarzmehl, Farbpigmente	WB
7	Agrovan TU (Agropox TU Coat LF)	Epoxidharz A/F	Amin	entfällt	Quarzmehl, Farbpigmente	lösemittelfrei

**Tabelle 8: Produktübersicht**

## 6.2 Beurteilung von Referenzunnelbauwerken

### 6.2.1 Visueller Zustand ausgewählter Tunnelobjekte

Um den Zustand ausgewählter Tunnelobjekte zu beurteilen wurden einerseits Informationen seitens der Autobahnmeisterei eingeholt, andererseits wurden insgesamt 11 Bauwerke vor Ort besichtigt und sichtbare Schäden dokumentiert. Während der Begehung der nachfolgenden Tunnelbauwerke wurde festgestellt, dass sich die Schädigungsmechanismen in verschiedenen Tunneln unabhängig von Alter, Hersteller, etc. ähneln. Außerdem wurden die Schäden Richtung Tunnelmitte in der Regel geringer, was vor allem auf geringere Frost-Tausalz-Beanspruchung, geringere Feuchtigkeitseinwirkung und geringere Temperaturschwankungen und –sprünge zurückzuführen ist. Ferner wurde beobachtet, dass bei diffusionsoffenen Beschichtungssystemen generell weniger Schäden auftraten.

In weiterer Folge soll kurz auf den Zustand jedes besichtigten Tunnels einzeln eingegangen werden.

#### Katschbergtunnel

Der Katschbergtunnel mit einer Länge von ca. 5,9 km befindet sich zwischen Salzburg und Kärnten auf der A10 (Tauernautobahn). Die neu errichtete zweite Röhre wurde im Jahr 2007 mit Produkten der Fa. Avenarius Agro beschichtet. Der Beschichtungsaufbau ist sowohl grafisch in Abbildung 18 als auch tabellarisch in Tabelle 9 ersichtlich.

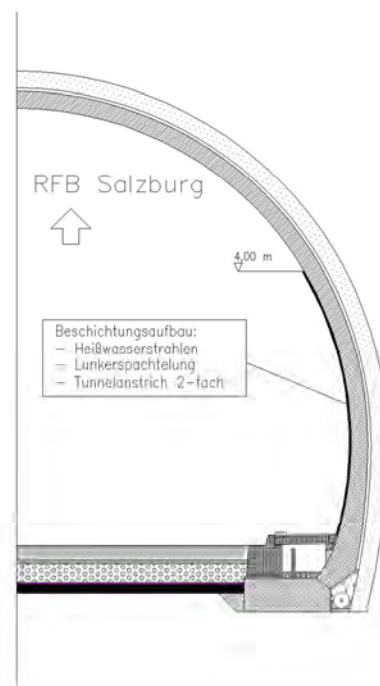


Abbildung 18: Beschichtungsaufbau Katschbergtunnel – RFB Salzburg

**Tabelle 9: Beschichtungsaufbau Katschbergtunnel – RFB Salzburg**

Arbeitsgang 0 – 4,00 m	Anforderung / Produkt
Heißwasserstrahlen	
Lunkerspachtelung	Agropox TU Spachtel LF (lösemittelfrei Agro)
Tunnelanstrich 2-fach	Agropox TU GL F (Dispersion Agro)

Während der Begehung am 3.6.2015 wurden teilweise Schäden basierend auf schlechter Strahlung beobachtet. Weiters waren Beschädigungen mit pulvriger, gelber Spachtelmasse sichtbar, welche den Anstrich darüber abplatzen ließen sowie zusätzliche schwarze Verschmutzungen an der Oberfläche. Diese Fehlerart war sowohl im Wolfsbergtunnel in beiden Richtungen als auch im Kalcherkogeltunnel in Richtung Graz bemerkbar. Die Ursache hierfür könnte ein Fehler in der Härtung der Spachtelmasse aufgrund von Feuchtigkeit, zu kurzen Aushärtezeiten oder lokal falschem Mischungsverhältnis gewesen sein. Obwohl diese Schadensart nur bei Beschichtungssystemen der Fa. Avenarius Agro auftrat, wurde sie nicht in allen besichtigten Tunnelbauwerken mit diesem Oberflächensystem festgestellt.

Krakeleerisse mit typischen Rissabständen mit teilweise damit verbundenen Abblätterungen und aufgebrochenen Pusteln wurden ebenfalls vorgefunden.



a) Schwarze Oberfläche mit pulvriger Spachtelung



b) Krakeleerisse im Anstrichsystem

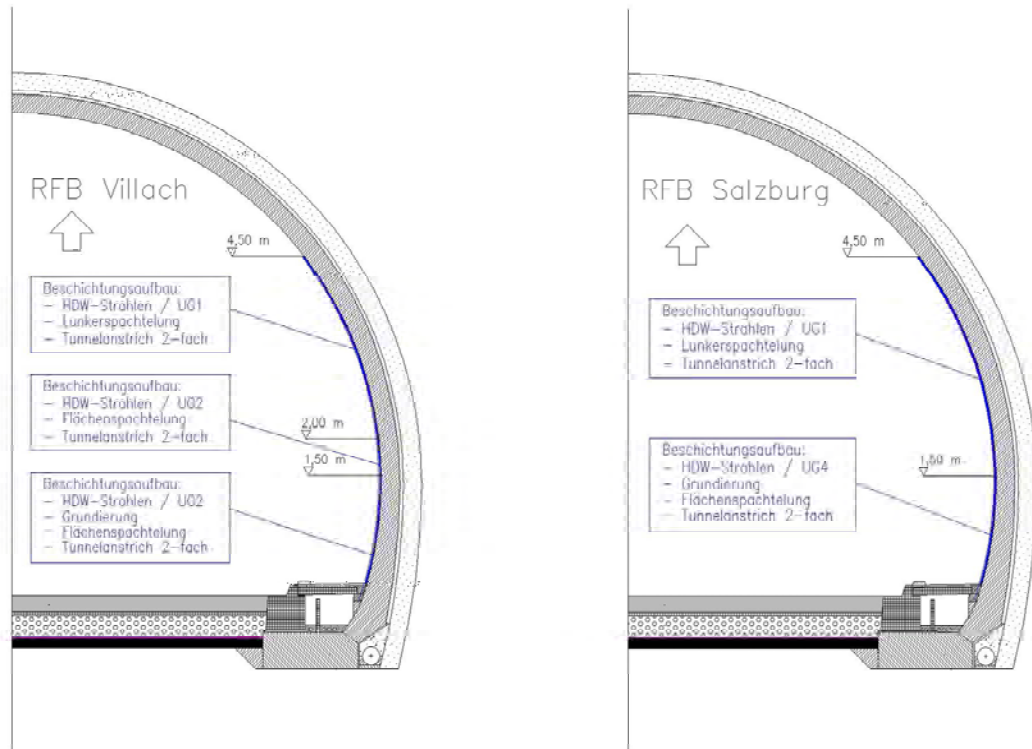


c) Abplatzungen

**Abbildung 19: Visuelle Eindrücke von der Begehung Katschbergtunnel – RFB Salzburg**

### Wolfsbergtunnel

Der Wolfsbergtunnel auf der A10 (Tauernautobahn) bei Spittal an der Drau wurde im Jahr 2010 saniert. In beiden Röhren wurde ein Beschichtungssystem der Fa. Avenarius Agro aufgebracht. Der genaue Schichtaufbau ist in der folgenden Abbildung sowie in Tabelle 10 und Tabelle 11 dargestellt. Seitens der Autobahnmeisterei befanden sich beide Tunnelröhren in sehr gutem bis gutem Zustand mit nur leichten Oberflächenschäden im unteren Ulmenbereich und in der Portalnähe. Beide Tunnelröhren wurden am 2.6.2015 begutachtet.



a) Wolfsbergtunnel – RFB Villach

b) Wolfsbergtunnel – RFB Salzburg

**Abbildung 20: Beschichtungsaufbau Wolfsbergtunnel**

**Tabelle 10: Beschichtungsaufbau Wolfsbergtunnel – RFB Villach**

Arbeitsgang 0 – 1,50 m	Anforderung / Produkt
Höchstdruckwasserstrahlen	Anforderungsklasse UG <sub>2</sub>
Grundierung	Agropox Kunststoffgrund (Agro)
Spachtelung vollflächig	Agropox TU Spachtel (Dispersion Agro)
Tunnelanstrich 2-fach	Agropox TU GL F (Dispersion Agro)

Arbeitsgang 1,50 – 2,00 m	Anforderung / Produkt
Höchstdruckwasserstrahlen	Anforderungsklasse UG <sub>2</sub>
Spachtelung vollflächig	Agropox TU Spachtel (Dispersion Agro)
Tunnelanstrich 2-fach	Agropox TU GL F (Dispersion Agro)
Arbeitsgang 2,00 – 4,50 m	Anforderung / Produkt
Höchstdruckwasserstrahlen	Anforderungsklasse UG <sub>1</sub>
Lunkerspachtelung	Agropox TU Spachtel (Dispersion Agro)
Tunnelanstrich 2-fach	Agropox TU GL F (Dispersion Agro)

**Tabelle 11: Beschichtungsaufbau Wolfsbergtunnel – RFB Salzburg**

Arbeitsgang 0 – 1,50 m	Anforderung / Produkt
Höchstdruckwasserstrahlen	Anforderungsklasse UG <sub>4</sub>
Grundierung	Agropox Kunststoffgrund (Agro)
Spachtelung vollflächig	Agropox TU Spachtel LF (lösemittelfrei Agro)
Tunnelanstrich 2-fach	Agropox TU GL F (Dispersion Agro)
Arbeitsgang 1,50 – 4,50 m	Anforderung / Produkt
Höchstdruckwasserstrahlen	Anforderungsklasse UG <sub>3</sub>
Spachtelung vollflächig	Agropox TU Spachtel (Dispersion Agro)
Tunnelanstrich 2-fach	Agropox TU GL F (Dispersion Agro)

Bei der Besichtigung des Wolfsbergtunnels – Richtungsfahrbahn Villach wurden, wie auch bei der Begehung des Katschbergtunnels schwarze Stellen mit pulvrigem, weichem Untergrund auf der Beschichtung festgestellt.



a) Schwarze Stelle



b) Schwarze Stelle mit pulvriger Spachtelmasse

**Abbildung 21: Visuelle Eindrücke von der Begehung Wolfsbergtunnel – RFB Villach**

Bei der Besichtigung der Richtungsfahrbahn Salzburg konnten ebenfalls schwarze Stellen mit weicher, pulvriger Spachtelmasse beobachtet werden. Außerdem wurden in beiden Portalbereichen vertikale Abplatzungen der oberen Schicht festgestellt, welche Richtung Tunnelinneres weniger wurden. Des Weiteren war eine rissige Struktur des Anstriches in einer Höhe bis ca. 150 cm fast durchgängig über mehrere Blöcke hinweg sichtbar.



a) Vertikale Abplatzungen im Portalbereich



b) Rissige Anstrichstruktur



c) Schwarze Stelle mit pulvriger Spachtelmasse

**Abbildung 22: Visuelle Eindrücke von der Begehung Wolfsbergtunnel – RFB Salzburg**



## Gräberntunnel

Der Gräberntunnel ist ein zweiröhriger Autobahntunnel im Zuge der Südautobahn A2 in Kärnten mit einer Gesamtlänge von ca. 2,1 km. Im Jahr 2004 wurde die neu eröffnete Tunnelröhre mit Produkten der Fa. Mapei beschichtet. Der Beschichtungsaufbau ist in Abbildung 23 und Tabelle 12 aufgelistet.

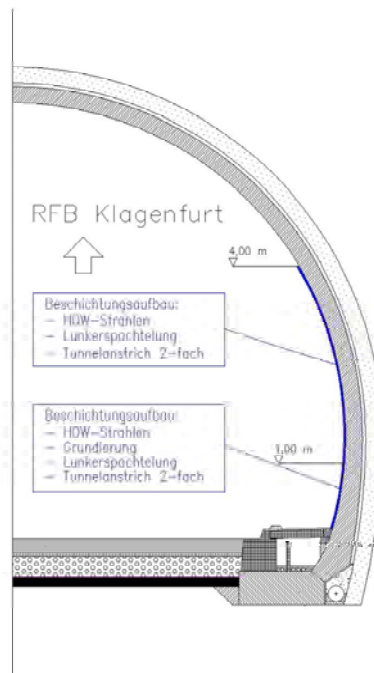


Abbildung 23: Beschichtungsaufbau Gräberntunnel – RFB Klagenfurt

Tabelle 12: Beschichtungsaufbau Gräberntunnel – RFB Klagenfurt

Arbeitsgang 0 – 1,00 m	Anforderung / Produkt
Höchstdruckwasserstrahlen	300 bar
Grundierung	Epoxidharz lösemittelfrei / Produkt unbekannt
Lunkerspachtelung	Epoxidharz lösemittelfrei / Produkt unbekannt
Tunnelanstrich 2-fach	Epoxidharz Dispersion / Produkt unbekannt
Arbeitsgang 1,00 – 4,00 m	Anforderung / Produkt
Höchstdruckwasserstrahlen	300 bar
Lunkerspachtelung	Epoxidharz lösemittelfrei / Produkt unbekannt
Tunnelanstrich 2-fach	Epoxidharz Dispersion / Produkt unbekannt

Seitens der Autobahnmeisterei wurde der generelle Zustand des Tunnels mit gut bewertet. Diverse Risse im Ulmenbereich, kleinere Korrosionsschäden in den bewehrten Portalbereichen sowie vereinzelte Mängel im oberen Bereich wurden von der Autobahnmeisterei registriert. Bei einer Tunnelbegehung am 1.6.2015 wurden vereinzelt Verschmutzungen durch Unebenheiten in der Beschichtung sowie lokale Abplatzungen in

diversen Abschnitten beobachtet. Des Weiteren löste sich der Beton bei einer Beschädigung der Beschichtung durch einen Unfallschaden aufgrund der Frost-Tausalz-Einwirkung auf und schädigte auch die angrenzende Beschichtung. Außerdem wurde ein leichteres Ablättern des Oberflächensystems in kleinen Buchten festgestellt, da dort der Untergrund durch manuelles Strahlen eine geringere Rauigkeit aufwies. Trotz des hohen Alters des Anstrichsystems waren viele intakte Flächen vorhanden. Ebenso wurden örtlich Krakeleerisse vorgefunden.



a) Verschmutzung durch Unebenheit der Beschichtung



b) Beschädigte Beschichtung aufgrund eines Unfallschadens

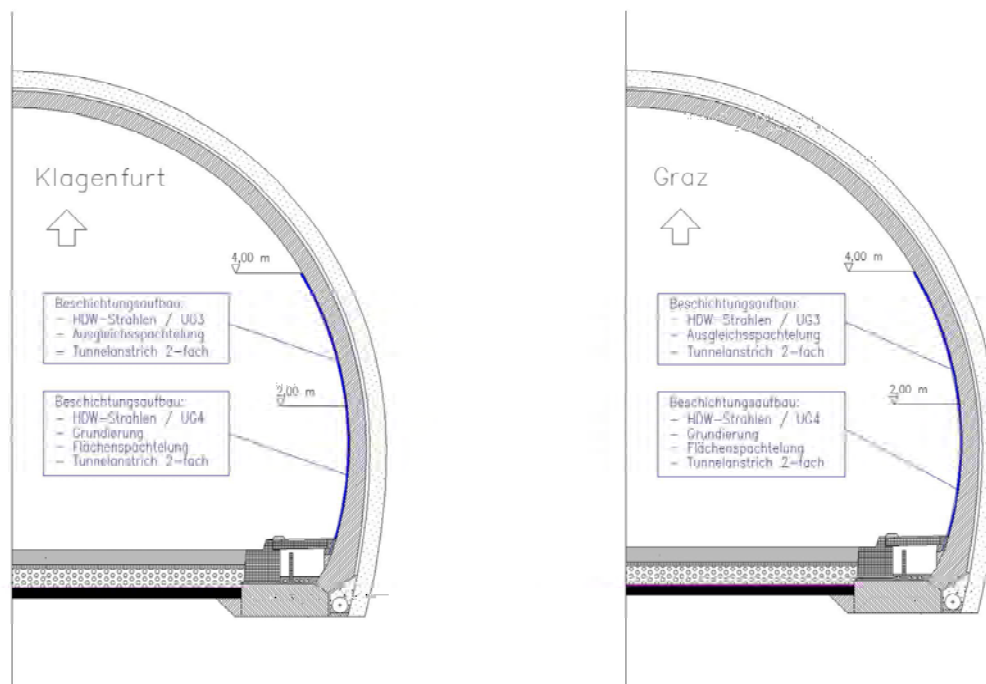


c) Krakeleerissbildung

**Abbildung 24: Visuelle Eindrücke von der Begehung Gräberntunnel – RFB Klagenfurt**

### Mitterbergtunnel

Der Mitterbergtunnel mit einer Gesamtlänge von ca. 1,1 km befindet sich im Bezirk Voitsberg in der Steiermark. Der Beschichtungsaufbau aus dem Jahr 2004 ist nachfolgend dargestellt.



a) Mitterbergtunnel – RFB Klagenfurt

b) Mitterbergtunnel – RFB Graz

**Abbildung 25: Beschichtungsaufbau Mitterbergtunnel**

**Tabelle 13: Beschichtungsaufbau Mitterbergtunnel – RFB Klagenfurt**

Arbeitsgang 0 – 2,00 m	Anforderung / Produkt
Höchstdruckwasserstrahlen	Anforderungsklasse UG <sub>4</sub>
Grundierung	Mapecoat I 900 (Mapei)
Spachtelung vollflächig	Mapecoat WT (Dispersion Mapei)
Tunnelanstrich 2-fach	Mapecoat TU (Dispersion Mapei)
Arbeitsgang 2,00 – 4,00 m	Anforderung / Produkt
Höchstdruckwasserstrahlen	Anforderungsklasse UG <sub>3</sub>
Lunkerspachtelung	Mapecoat WT (Dispersion Mapei)
Tunnelanstrich 2-fach	Mapecoat TU (Dispersion Mapei)

**Tabelle 14: Beschichtungsaufbau Mitterbergtunnel – RFB Graz**

Arbeitsgang 0 – 2,00 m	Anforderung / Produkt
Höchstdruckwasserstrahlen	Anforderungsklasse UG <sub>4</sub>
Grundierung	Mastertop P 601 (Fa. Degussa)
Spachtelung vollflächig	Agropox TU Spachtel F1 (Dispersion Agro)
Tunnelanstrich 2-fach	Agropox TU GL F (Dispersion Agro)
Arbeitsgang 2,00 – 4,00 m	Anforderung / Produkt
Höchstdruckwasserstrahlen	Anforderungsklasse UG <sub>3</sub>
Lunkerspachtelung	Agropox TU Spachtel F1 (Dispersion Agro)
Tunnelanstrich 2-fach	Agropox TU GL F (Dispersion Agro)

Der allgemeine Tunnelzustand wurde seitens der Autobahnmeisterei als gut beschrieben. Im unteren und oberen Ulmenbereich wurden vereinzelt punktuelle Abplatzungen mit einer Größe < 0,5 m<sup>2</sup> bemerkt. Außerdem wurde im Portalbereich entlang wasserführender Risse in den Ulmen die Beschichtung abgedrückt. Beide Richtungsfahrbahnen wurden am 8.6.2015 besichtigt. In Fahrtrichtung Klagenfurt wurde in einer Höhe > 200 cm eine schwache Haftung festgestellt. Hierbei ist anzumerken, dass ab einer Höhe von 200 cm ein anderer Beschichtungsaufbau zum Tragen kommt. Weiters wurden unterhalb von 100 cm Höhe längliche, vertikale, dunkle Flecken mit Blasen darunter beobachtet. Allerdings waren insgesamt über die Tunnellänge viele Abschnitte mit tadelloser Beschichtung zu sehen.



a) Schlechte Haftung > 200 cm



b) Längliche Schäden < 100 cm

**Abbildung 26: Visuelle Eindrücke von der Begehung Mitterbergtunnel – RFB Klagenfurt**

In Fahrtrichtung Graz wurde bis auf unter dem Mikroskop erkennbare örtliche Krakeleerissbildung eine nahezu tadellose Beschichtung über die gesamte Tunnellänge festgestellt.

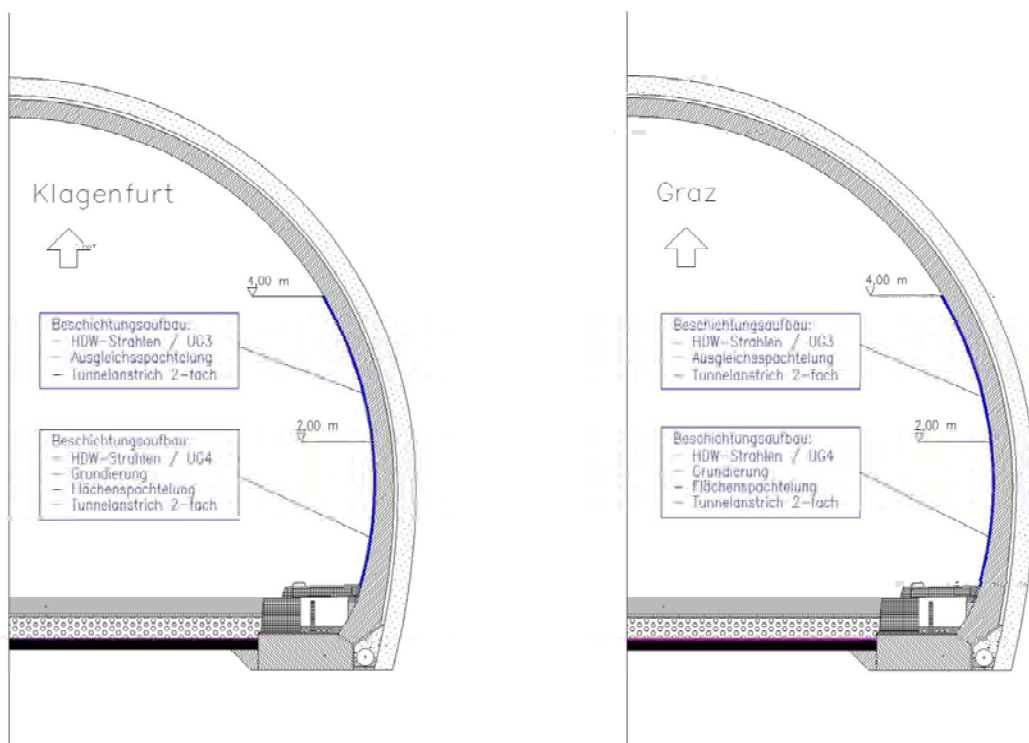


a) Beschichtung ohne sichtbare Schäden    b) Nahezu schadfreie Beschichtung

**Abbildung 27: Visuelle Eindrücke von der Begehung Mitterbergtunnel – RFB Graz**

### Kalcherkogeltunnel

Der Kalcherkogeltunnel befindet sich auf der A2 in der Nähe von Preitenegg (Kärnten) und besitzt eine Gesamtlänge von ca. 2,0 km. Der Beschichtungsaufbau ist für beide Röhren sowohl grafisch in Abbildung 28 als auch tabellarisch in Tabelle 15 und Tabelle 16 dargestellt.



a) Kalcherkogeltunnel – RFB Klagenfurt

b) Kalcherkogeltunnel – RFB Graz

**Abbildung 28: Beschichtungsaufbau Kalcherkogeltunnel**

**Tabelle 15: Beschichtungsaufbau Kalcherkogeltunnel – RFB Klagenfurt**

Arbeitsgang 0 – 2,00 m	Anforderung / Produkt
Höchstdruckwasserstrahlen	Anforderungsklasse UG <sub>4</sub>
Grundierung	Mastertop P 601 (Fa. Degussa)
Spachtelung vollflächig	Agropox TU Spachtel F1 (Dispersion Agro)
Tunnelanstrich 2-fach	Agropox TU GL F (Dispersion Agro)
Arbeitsgang 2,00 – 4,00 m	Anforderung / Produkt
Höchstdruckwasserstrahlen	Anforderungsklasse UG <sub>3</sub>
Lunkerspachtelung	Agropox TU Spachtel F1 (Dispersion Agro)
Tunnelanstrich 2-fach	Agropox TU GL F (Dispersion Agro)

**Tabelle 16: Beschichtungsaufbau Kalcherkogeltunnel – RFB Graz**

Arbeitsgang 0 – 2,00 m	Anforderung / Produkt
Höchstdruckwasserstrahlen	Anforderungsklasse UG <sub>4</sub>
Grundierung	Mastertop P 601 (Fa. Degussa)
Spachtelung vollflächig	Agropox TU Spachtel F1 (Dispersion Agro)
Tunnelanstrich 2-fach	Agropox TU GL F (Dispersion Agro)
Arbeitsgang 2,00 – 4,00 m	Anforderung / Produkt
Höchstdruckwasserstrahlen	Anforderungsklasse UG <sub>3</sub>
Lunkerspachtelung	Agropox TU Spachtel F1 (Dispersion Agro)
Tunnelanstrich 2-fach	Agropox TU GL F (Dispersion Agro)

Der allgemeine Tunnelzustand wurde seitens der Autobahnmeisterei als gut beschrieben. Im unteren und oberen Ulmenbereich wurden vereinzelt punktuelle Abplatzungen mit einer Größe < 0,5 m<sup>2</sup> angemerkt. Außerdem wurde im Portalbereich entlang wasserführender Risse in den Ulmen die Beschichtung abgedrückt.

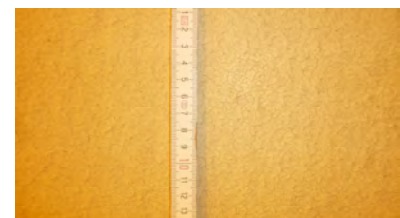
Bei der Begutachtung am 8.6.2015 durch die Fa. IKO und Fa. SMG wurde unter anderem in Richtung Klagenfurt ein ähnliches Schadensbild wie im Mitterbergtunnel festgestellt. Auch hier löste sich die Beschichtung aufgrund des veränderten Beschichtungsaufbaus ab einer Höhe von 200 cm ab. Zusätzlich wurde vereinzelt eine schwarze Verschmutzung sowie Krakeleerissbildung festgestellt.



a) Schwache Haftung ab 2 m Höhe



b) Lokale Verschmutzung mit Blasenbildung



c) großflächige Krakeleerissbildung

**Abbildung 29: Visuelle Eindrücke von der Begehung Kalcherkogeltunnel – RFB Klagenfurt**

In Fahrtrichtung Graz konnten ebenfalls diverse Abblätterungen, Krakeleerissbildung und Abplatzungen beobachtet werden. Teilweise wurden Beschädigungen bis in den Betonuntergrund festgestellt, wobei eine pulverige Spachtelmasse zu sehen war.



a) Oberflächenverschmutzung mit feiner Abplatzung



b) Abplatzung bis zum Beton mit pulveriger Spachtelmasse

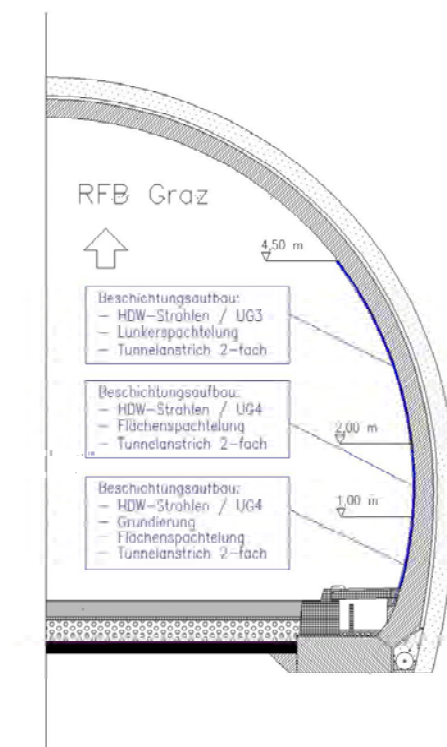


c) Feine Abblätterungen in > 200 cm Höhe

**Abbildung 30: Visuelle Eindrücke von der Begehung Kalcherkogeltunnel – RFB Graz**

### Schartnerkogeltunnel

Der Schartnerkogeltunnel verläuft entlang der Pyhrnautobahn A9 bei Deutschfeistritz und weist eine Länge von etwa 1,2 km auf. Der Tunnel wurde im Jahr 2009 saniert wobei ein Beschichtungssystem der Fa. Avenarius Agro aufgebracht wurde. Der genaue Beschichtungsaufbau der Richtungsfahrbahn Graz, welche am 1.6.2015 besichtigt wurde, ist in Abbildung 31 sowie in Tabelle 17 dargestellt.



**Abbildung 31: Beschichtungsaufbau Schartnerkogeltunnel – RFB Graz**

**Tabelle 17: Beschichtungsaufbau Schartnerkogeltunnel – RFB Graz**

Arbeitsgang 0 – 1,00 m	Anforderung / Produkt
Höchstdruckwasserstrahlen	Anforderungsklasse UG <sub>4</sub>
Grundierung	Mastertop P 601 (Fa. Degussa)
Spachtelung vollflächig	Agrovan 209 k thix (lösemittelfrei Agro)
Tunnelanstrich 2-fach	Agropox TU GL F (Dispersion Agro)
Arbeitsgang 1,00 – 2,00 m	Anforderung / Produkt
Höchstdruckwasserstrahlen	Anforderungsklasse UG <sub>4</sub>
Spachtelung vollflächig	Agrovan 209 k thix (lösemittelfrei Agro)
Tunnelanstrich 2-fach	Agropox TU GL F (Dispersion Agro)
Arbeitsgang 2,00 – 4,50 m	Anforderung / Produkt
Höchstdruckwasserstrahlen	Anforderungsklasse UG <sub>3</sub>
Lunkerspachtelung	Agrovan 209 k thix (lösemittelfrei Agro)
Tunnelanstrich 2-fach	Agropox TU GL F (Dispersion Agro)

Seitens der Autobahnmeisterei befindet sich der Schartnerkogeltunnel in gutem Zustand, wobei nur vereinzelt punktuelle Abplatzungen in den untersten 30 cm Höhe auftraten. Im Portalbereich wurde, ebenso wie im Kalcherkogeltunnel und Mitterbergtunnel die Beschichtung entlang wasserführender Risse abgedrückt. Örtlich sind Flächen mit Krakeleerissbildung vorhanden. Bei der Besichtigung vor Ort war der Schartnerkogel als positives Beispiel für eine gelungene Sanierung ins Auge gefallen. Er diene deshalb als Referenz für alle anderen Objekte während der nachfolgenden Tunnelbeprobung, insbesondere als Vergleich zum Wolfsbergtunnel da hier dasselbe Anstrichsystem verwendet wurde. Insgesamt wurde in vielen Bereichen ein intakter Anstrich festgestellt mit nur einzelnen, lokal begrenzten Abplatzungen in einer Höhe > 200 cm.



a) Schadfremie Tunnelbeschichtung



b) Anstrich etwas spröder, leichtes Abplatzen nach Messer-Ritztest



c) Krakeleerissbildung

**Abbildung 32: Visuelle Eindrücke von der Begehung Schartnerkogeltunnel – RFB Graz**

## Ganzsteintunnel

Der Ganzsteintunnel ist ein zweiröhriger Tunnel mit ca. 2,1 km Länge auf der Umfahrung von Mürzzuschlag (S6). Die Tunnelröhre in Fahrtrichtung Wien, welche am 27.4.2015 begutachtet wurde, wurde im Jahr 2008 mit Produkten der Fa. Avenarius Agro beschichtet. Der genaue Schichtaufbau ist in Abbildung 33 sowie in Tabelle 18 dargestellt.

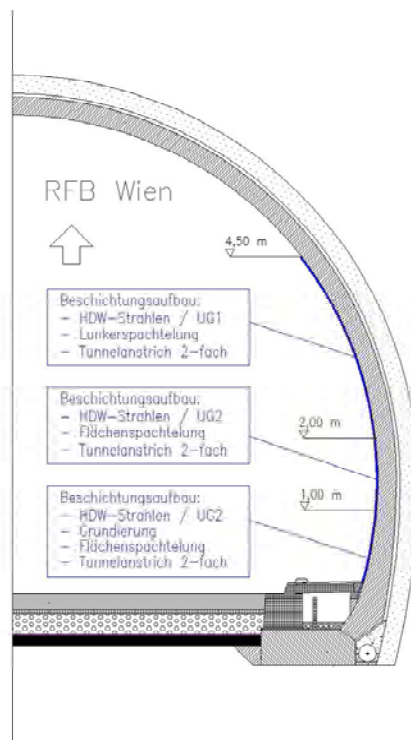


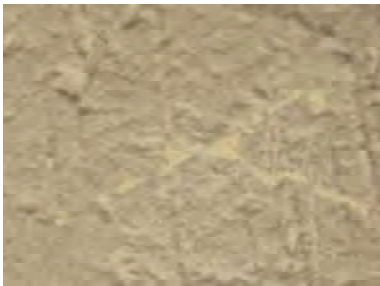
Abbildung 33: Beschichtungsaufbau Ganzsteintunnel – RFB Wien

Tabelle 18: Beschichtungsaufbau Ganzsteintunnel – RFB Wien

Arbeitsgang 0 – 1,00 m	Anforderung / Produkt
Höchstdruckwasserstrahlen	Anforderungsklasse UG <sub>2</sub>
Grundierung	Epoxidharz lösemittelfrei
Spachtelung vollflächig	Epoxidharz lösemittelfrei
Tunnelanstrich 2-fach	Epoxidharz Dispersion
Arbeitsgang 1,00 – 2,00 m	Anforderung / Produkt
Höchstdruckwasserstrahlen	Anforderungsklasse UG <sub>2</sub>
Spachtelung vollflächig	Epoxidharz lösemittelfrei
Tunnelanstrich 2-fach	Epoxidharz Dispersion
Arbeitsgang 2,00 – 4,50 m	Anforderung / Produkt
Höchstdruckwasserstrahlen	Anforderungsklasse UG <sub>1</sub>
Lunkerspachtelung	Epoxidharz Dispersion
Tunnelanstrich 2-fach	Epoxidharz Dispersion



Laut der Autobahnmeisterei befindet sich der Tunnel generell in einem guten Zustand mit vereinzelten, punktuellen Abplatzungen im unteren Ulmenbereich. Zusätzlich wurden im Portalbereich ebenfalls geringe Abplatzungen im Fußbereich beschrieben. Während der Begehung seitens der Fa. IKO und Fa. SMG wurde ein sehr spröder Anstrich mit Krakeleerissbildung festgestellt, wobei die Schäden von Block zu Block stark variierten. Generell konnte der Zustand > 200 cm besser beurteilt werden als die Bereiche < 200 cm.



a) Schlechte Haftung des Anstriches



b) Anstrich platzt ab

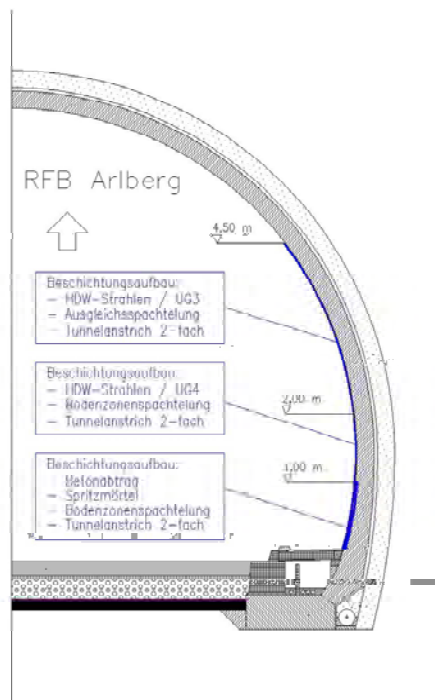


c) Schäden im unteren Bereich

**Abbildung 34: Visuelle Eindrücke von der Begehung Ganzsteintunnel – RFB Wien**

### Flirscher Tunnel

Der Flirscher Tunnel, mit einer Gesamtlänge von ca. 0,9 km liegt auf der S16 Arlberg Schnellstraße. Der Tunnel wurde im Jahr 2006 saniert wobei ein Beschichtungssystem der Fa. Sika aufgetragen wurde.



**Abbildung 35: Beschichtungsaufbau Flirscher Tunnel – RFB Arlberg**

**Tabelle 19: Beschichtungsaufbau Flirscher Tunnel – RFB Arlberg**

<b>Arbeitsgang 0 – 1,00 m</b>	<b>Anforderung / Produkt</b>
Betonabtrag	Abtragstiefe 3,5 cm
Spritzmörtel	Duriment SB/TS/4
Bodenzonenspachtelung	Epoxidharz lösemittelfrei, Sikadur 186
Tunnelanstrich 2-fach	Epoxidharz Dispersion, Sika Wallcoat T
<b>Arbeitsgang 1,00 – 2,00 m</b>	<b>Anforderung / Produkt</b>
Höchstdruckwasserstrahlen	Anforderungsklasse UG <sub>4</sub>
Bodenzonenspachtelung	Epoxidharz lösemittelfrei, Sikadur 186
Tunnelanstrich 2-fach	Epoxidharz Dispersion, Sika Wallcoat T
<b>Arbeitsgang 2,00 – 4,50 m</b>	<b>Anforderung / Produkt</b>
Höchstdruckwasserstrahlen	Anforderungsklasse UG <sub>3</sub>
Ausgleichsspachtelung	Epoxidharz Dispersion, Sikagard 331 W VP1
Tunnelanstrich 2-fach	Epoxidharz Dispersion, Sika Wallcoat T

Die Autobahnmeisterei beschrieb im Flirscher Tunnel vertikale und horizontale Risse im oberen, unbeschichteten Ulmenbereich, welche sich teilweise über die Beschichtung bis in den Fußbereich fortsetzten. Außerdem traten flächige Abplatzungen, vor allem im unteren Bereich auf. Während der Besichtigung am 20.5.2016 wurde der rechte Fahrstreifen in Fahrtrichtung Arlberg untersucht. Es wurden Krakeleerissbildungen, sowie vereinzelt Stellen mit schlechter Haftung und demzufolge Abplatzungen und Blasen bemerkt. Außerdem waren immer wieder dunkle Schatten erkennbar, welche wahrscheinlich den Beginn weiterer Blasenbildung bzw. Abhebungen markierten. Des Weiteren war eine Kante aufgrund des Beschichtungszyklus bzw. des Beschichtungsaufbaus in ca. 90 cm Höhe sichtbar, an welcher ebenfalls vereinzelt Abplatzungen auftraten.



a) Vereinzelt Abplatzungen



b) Dunkle Schatten mit schlechter Haftung



c) Krakeleerissbildung

**Abbildung 36: Visuelle Eindrücke von der Begehung Flirscher Tunnel – RFB Arlberg**

## Strenger Tunnel

Der ca. 5,9 km lange Strenger Tunnel ist ein zweiröhriger Tunnel auf der S16 Arlberg Schnellstraße und dient als Umfahrung für die Gemeinde Strengen am Arlberg. Die Inbetriebnahme erfolgte im Jahr 2006 wobei ein Beschichtungssystem der Fa. Mapei aufgetragen wurde. Der genaue Schichtaufbau ist im Folgenden dargestellt.

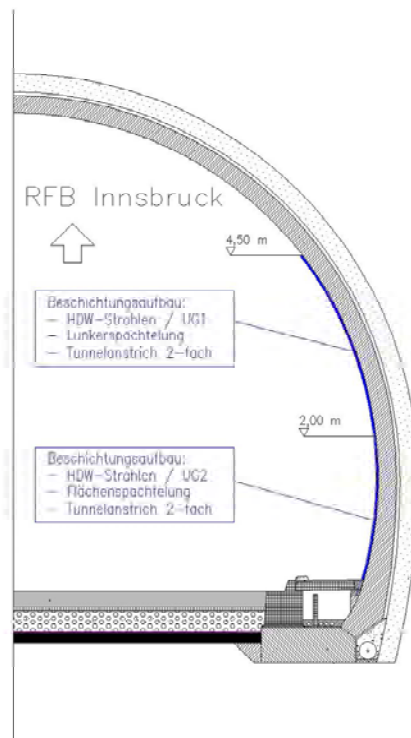


Abbildung 37: Beschichtungsaufbau Strenger Tunnel – RFB Innsbruck

Tabelle 20: Beschichtungsaufbau Strenger Tunnel – RFB Innsbruck

Arbeitsgang 0,00 – 2,00 m	Anforderung / Produkt
Höchstdruckwasserstrahlen	Anforderungsklasse UG <sub>2</sub>
Spachtelung vollflächig	Epoxidharz Dispersion / Mapecoat WT
Tunnelanstrich 2-fach	Epoxidharz Dispersion / Mapecoat TU
Arbeitsgang 2,00 – 4,50 m	Anforderung / Produkt
Höchstdruckwasserstrahlen	Anforderungsklasse UG <sub>1</sub>
Lunkerspachtelung	Epoxidharz Dispersion / Mapecoat WT
Tunnelanstrich 2-fach	Epoxidharz Dispersion / Mapecoat TU

Im Strenger Tunnel berichtete die Autobahnmeisterei einerseits von flächenhaften Abplatzungen im unteren Ulmenbereich und andererseits von vertikalen Rissen im oberen Ulmenbereich. Auch im Portalbereich waren Abplatzungen sichtbar. Des Weiteren traten Korrosionsschäden an der Ulmenunterseite auf. Während der Tunnelbegehung am

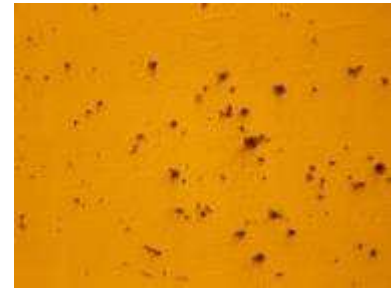
21.5.2015 wurde eine große Bandbreite unterschiedlicher Schadensbilder beobachtet, welche auch in anderen Tunnelbauwerken bereits aufgetreten waren. Unter anderem konnten Krakeleerisse, vertikale Schäden mit bis zu einer Länge von 100 cm sowie großflächige Abplatzungen festgestellt werden. Schäden an der Unterkante wurden ebenso bemerkt wie die von der Autobahnmeisterei bereits angeführten Korrosionsflecken, welche besonders im unteren Ulmenbereich häufig auftraten.



a) Längliche vertikale Schäden im unteren Bereich



b) Großflächige Abplatzungen im oberen Bereich

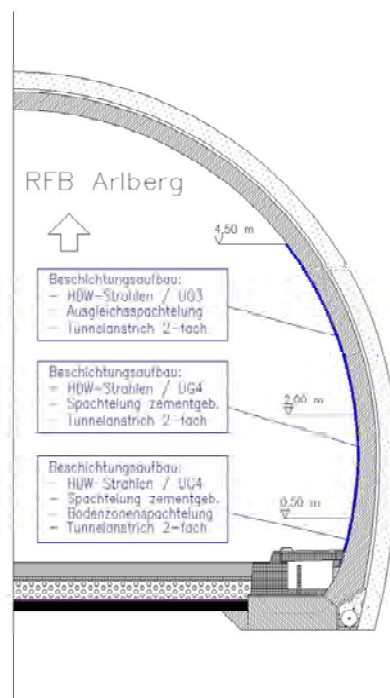


c) Braune Verfärbungen durch Korrosionsschäden

**Abbildung 38: Visuelle Eindrücke von der Begehung Strenger Tunnel – RFB Innsbruck**

### Milser Tunnel

Der Milser Tunnel befindet sich auf der A12 in Mils bei Imst in Tirol und besitzt eine Gesamtlänge von ca. 1,8 km. Die Beschichtung der Fa. Avenarius Agro wurde im Jahr 2005 im Zuge einer Sanierung mit folgendem Schichtaufbau aufgetragen:

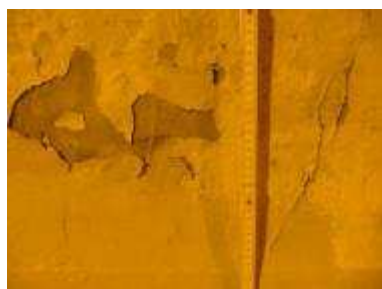


**Abbildung 39: Beschichtungsaufbau Milser Tunnel – RFB Arlberg**

**Tabelle 21: Beschichtungsaufbau Milser Tunnel – RFB Arlberg**

<b>Arbeitsgang 0 – 0,50 m</b>	<b>Anforderung / Produkt</b>
Höchstdruckwasserstrahlen	Anforderungsklasse UG <sub>4</sub>
Spachtelung vollflächig	zementgebunden, Icoment Mörtel 620
Bodenzonenspachtelung	Epoxidharz lösemittelfrei, Agrovan 209 k thix
Tunnelanstrich 2-fach	Epoxidharz Dispersion, Agropox TU GL F, RAL 1015
<b>Arbeitsgang 0,50 – 2,00 m</b>	<b>Anforderung / Produkt</b>
Höchstdruckwasserstrahlen	Anforderungsklasse UG <sub>4</sub>
Spachtelung vollflächig	zementgebunden, Icoment Mörtel 620
Tunnelanstrich 2-fach	Epoxidharz Dispersion, Agropox TU GL F, RAL 1015
<b>Arbeitsgang 2,00 – 4,50 m</b>	<b>Anforderung / Produkt</b>
Höchstdruckwasserstrahlen	Anforderungsklasse UG <sub>3</sub>
Ausgleichsspachtelung	Epoxidharz Dispersion, Agropox TU Spachtel fein, Farbton 101
Tunnelanstrich 2-fach	Epoxidharz Dispersion, Agropox TU GL F, RAL 1015

Seitens der Autobahnmeisterei wurde der generelle Zustand des Milser Tunnels mit "schlecht" beschrieben, da in beiden Röhren die Tunnelbeschichtung über die gesamte Tunnellänge abblättert und auch der Tunnelreinigung nicht standhielt. Diese Schäden wurden ebenfalls während der Besichtigung am 20.5.2015 festgestellt. Die häufigsten Schäden traten in einer Höhe von 50 bis 100 cm Höhe auf, wobei Krakeleerisse, Ablätterungen und Abplatzungen in verschiedenen Größen und Tiefen beobachtet wurden. Durch die Beschädigung der Beschichtung weist auch der Beton durch das eingebrachte Chlorid Frost-Taumittel-Schäden auf.



a) Abplatzungen (Detailansicht)

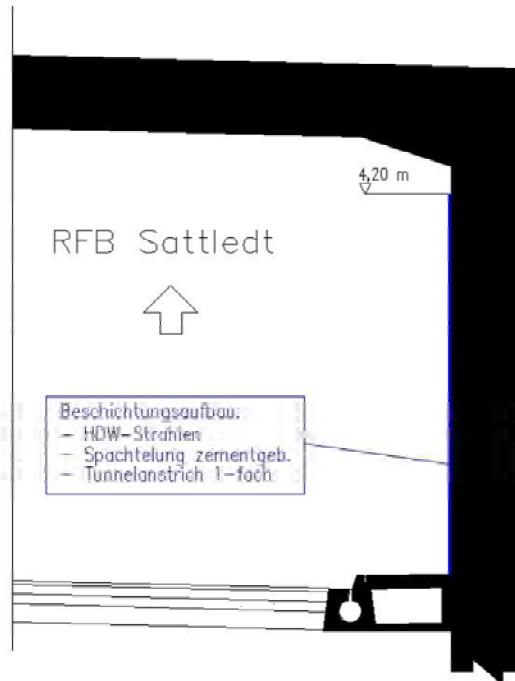


b) Abplatzungen entlang der Tunnelwand

**Abbildung 40: Visuelle Eindrücke von der Begehung Milser Tunnel – RFB Arlberg**

**Wels Noitzmühle:**

Der Tunnel Wels Noitzmühle befindet sich auf der A8 Innkreisautobahn im Abschnitt Wels-Sattledt und wurde im Jahr 2003 fertiggestellt. Als Beschichtung wurde das in Abbildung 41 und Tabelle 22 zusammengefasste System des Herstellers Avenarius Agro aufgebracht.



**Abbildung 41: Beschichtungsaufbau Wels Noitzmühle – RFB Sattledt**

**Tabelle 22: Beschichtungsaufbau Wels Noitzmühle – RFB Sattledt**

Arbeitsgang	Anforderung / Produkt
Höchstdruckwasserstrahlen	keine Anforderung definiert
Spachtelung vollflächig	zementgebunden, Produkt unbekannt
Tunnelanstrich 1-fach	Epoxidharz Dispersion, Agropox TU GL M, RAL 1015

Seitens der Autobahnmeisterei wurde der generelle Tunnelzustand mit “gut” bewertet mit lokalen, kleinflächigen Abplatzungen über den gesamten Tunnel verteilt. Des Weiteren wurde angemerkt, dass durch eine Hochdruckwaschung im Jahr 2012 kleine Beschädigungen entlang der Tunnelwand entstanden sind. Auch wäre generell eine bessere Helligkeit wünschenswert, da zwischendurch häufig Lichtwaschungen notwendig sind. Der beschriebene Tunnelabschnitt wurde am 27.4.2015 seitens der Fa. IKO und Fa. SMG besichtigt. Hierbei wurde unter anderem eine durchgängige Schädigung der Unterkante bis max. 50 cm Höhe sowie Krakeleerisse festgestellt. Außerdem wurde beobachtet, dass verstärkt in der Tunnelmitte flächige Blasen und Abplatzungen bis in ca. 150 cm Höhe

auftraten. In den Portalbereichen waren die Schäden weniger, da hier eine Lunkerspachtelung vorhanden ist. Zusätzlich wurden > 200 cm gar keine Schäden festgestellt. Aufgrund der beschriebenen Schadensbilder lässt sich ein generelles Problem im Beschichtungsaufbau aufgrund der fehlenden Spachtelung als wahrscheinlichste Ursache für die Abplatzungen identifizieren.



a) Durchgängige Schädigung an der Unterkante



b) Immer wieder auftretende Abplatzungen



c) Abplatzung (Detailansicht)

**Abbildung 42: Visuelle Eindrücke von der Begehung Wels Noitzmühle – RFB Sattledt**

### 6.2.2 Beobachtete Schadensarten

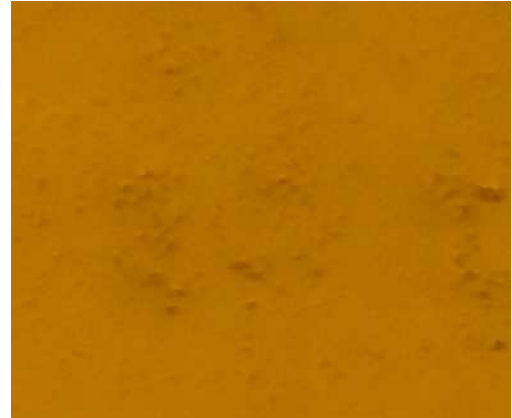
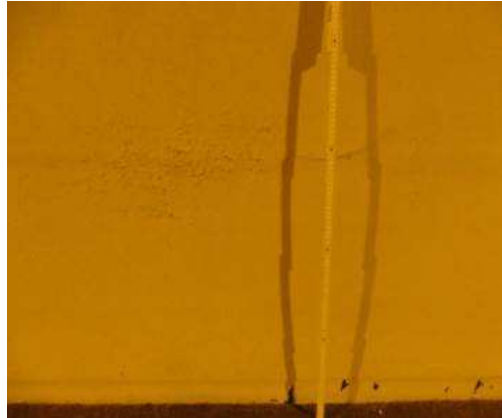
Im folgenden Abschnitt wurden die vor Ort beobachteten Schadensarten in Gruppen zusammengefasst und eingeteilt. Generell wurden in unterschiedlichen Tunnelobjekten ähnliche Schadensbilder festgestellt, wobei das Ausmaß der Schädigung Richtung Tunnelmitte tendenziell abgenommen hat. Dies ist auf die geringere Frost-Tausalzbeanspruchung, geringere Feuchtigkeitseinwirkung, geringere Temperatursprünge etc. zurückzuführen. Außerdem wurde festgestellt, dass bei diffusionsdichten Systemen vermehrt Schäden auftreten im Vergleich zu diffusionsoffenen Beschichtungen. Auch die Rauigkeit des Betonuntergrundes scheint einen wesentlichen Einfluss auf die Haftung des Beschichtungssystems zu haben, weshalb eine Rauigkeit von mindestens 0,1 mm vorliegen muss.

Folgenden Schadensarten wurden in den begutachteten Tunnelbauwerken festgestellt:

1. Verbundversagen

a. Abschuppungen und feine Abblätterungen

Der Anstrich reißt sehr fein auf und beginnt abzublättern.



a) Feine Abblätterungen (Strenger Tunnel)

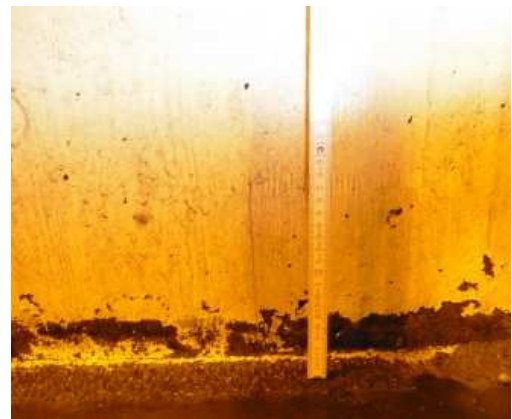
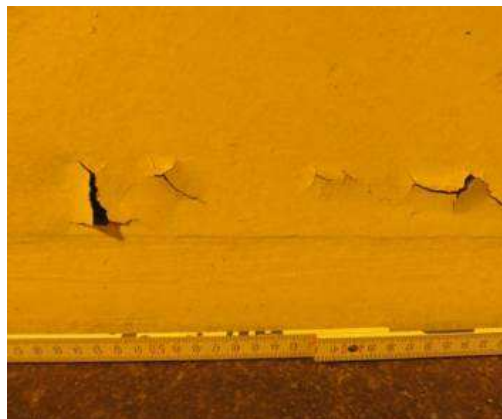
b) Feine Abblätterungen (Detailansicht)

**Abbildung 43: Feine Abblätterungen (Strenger Tunnel)**

b. flächige Abblätterungen

i. Schädigung Anschluss Seitenstreifen

Diese Schädigung tritt geblockt auf. Sie verläuft in diesen Bereichen nahezu durchgehend in einer Höhe von 0-20 cm. Die Ursache könnte aufsteigende Feuchtigkeit sein.



a) Schädigung im Strenger Tunnel

b) Schädigung Wels Noitzmühle

**Abbildung 44: Schädigung Anschluss Seitenstreifen**



ii. zwischen 1-2 m Höhe

In diesem Bereich treten Stellen mit lokal schlechterer Haftung mit Abblätterungen und Hohllagen des Tunnelanstrichs, manchmal bis 200 cm Höhe auf. Die benachbarte Beschichtung weist eine gute Haftung auf.



a) Schädigung im Flirscher Tunnel

b) Schädigung im Milser Tunnel

**Abbildung 45: Verbundversagen zwischen 100 und 200 cm Höhe**

iii. > 200 cm Höhe

Diese Schäden mit einem Durchmesser von 20 – 100 cm treten im oberen Ulmenbereich auf. Es sind jeweils einzelne, aber großflächige Abblätterungen. Die Ursache könnte eine schlechte Haftung auf dem sehr glatten Untergrund (unzureichende Untergrundvorbereitung) sein.



a) Verbundversagen > 200 cm Höhe

b) Verbundversagen (Detailansicht)

**Abbildung 46: Verbundversagen > 200 cm Höhe im Strenger Tunnel**

iv. Systemübergang in 200 cm Höhe

Knapp über 200 cm findet der Übergang des Beschichtungssystems von diffusionsdicht zu diffusionsoffen statt. Dort tritt schlechte Haftung in Form von Abblätterungen auf.



**Abbildung 47: Schäden beim Systemübergang im Mitterbergtunnel – RFB Klagenfurt**

v. Schäden bei Einbauten

An montierten Schildern, Kameras etc. häufen sich Schäden. Mögliche Ursachen sind eine unzureichende Untergrundvorbereitung oder eindringende Feuchtigkeit im Bereich von Bohrungen.



a) Schaden bei Einbauten



b) Schaden bei Beschilderung

**Abbildung 48: Schäden bei Einbauten im Strenger Tunnel**

c. streifenförmige Abblätterungen

Diese Schadensart in Form von länglichen, vertikalen Abblätterungen mit einer Länge bis zu ca. 100 cm und einer Breite von bis zu 10 cm tritt vor allem in Portalnähe auf und wird in Richtung Tunnelmitte weniger.



a) Streifenförmige Abblätterungen

b) Abblätterungen (Detailansicht)

**Abbildung 49: Streifenförmige Abblätterungen im Strenger Tunnel**

d. Unterwanderungen (Risse, Poren, mechanische Beschädigung)

Die Ursache für diese Abplatzungen stellt vermutlich die fehlende Spachtelung dar.



a) Abplatzungen durch Unterwanderung

b) Riss durch Unterwanderung

**Abbildung 50: Schäden durch Unterwanderung im Tunnel Wels Noitzmühle**

2. Krakeleerisse

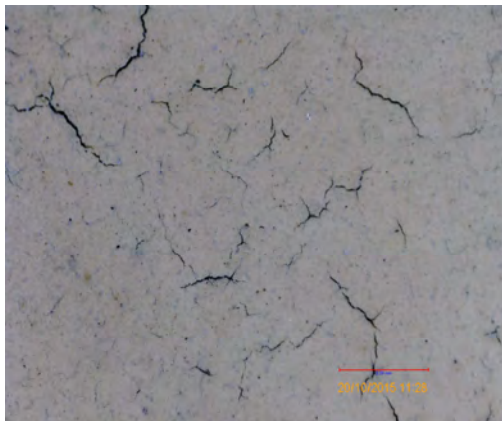
Bei Krakeleerissen handelt es sich um kleine Oberflächenrisse mit geringer Tiefe und kleiner Maschenweite. Sie entstehen einerseits in den ersten Stunden nach dem Einbau und können auf Spannungen während der Trocknung oder auf starke Temperatursprünge zurückzuführen sein. Krakeleerisse sind jedoch auch als Alterungserscheinung infolge der Versprödung des Beschichtungstoffes zu erklären. Die Beschichtungsfläche ist nicht mehr geschlossen und dicht, der Wasser- und Schadstofftransport kann somit auch durch kapillares Saugen erfolgen.



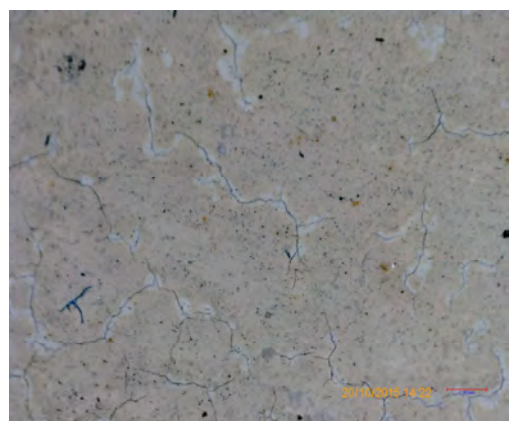
a) Krakeleerisse im Wolfsbergtunnel – RFB Salzburg



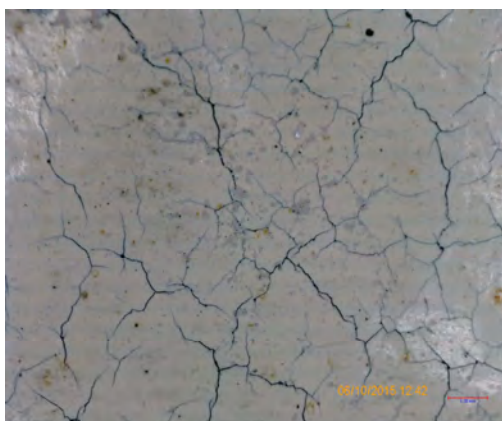
b) Krakeleerisse im Ganzsteintunnel



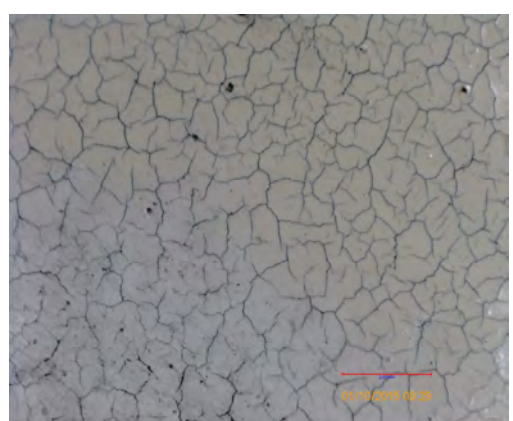
c) Krakeleerisse im Strenger Tunnel



d) Krakeleerisse im Flirscher Tunnel



e) Krakeleerisse im Schartner Kogel Tunnel



f) Krakeleerisse im Wolfsbergtunnel

**Abbildung 51: Krakeleerisse in unterschiedlichen Tunnelbauwerken**

### 3. Zersetzungen: Verfärbungen, Aufweichungen, klebrige Beläge

Charakteristisch für dieses Schadensbild ist eine schwarze Schmutzanhaftung mit einer darunterliegenden weichen, pulvrigen, gelbverfärbten Spachtelmasse. Als Ursache kann ein Mischungsfehler beispielsweise durch unzureichende Durchmischung in den Ecken des Mischbehälters vermutet werden.



a) Schwarze Verfärbung im  
Wolfsbergtunnel – RFB Villach



b) Schwarze Verfärbung im  
Wolfsbergtunnel – RFB Salzburg

**Abbildung 52: Schwarze Verfärbung im Wolfsbergtunnel**

Des Weiteren gehören auch helle, außergewöhnlich weiche Stellen und dunkle Stellen mit schlechter Haftung zu dieser Schadensgruppe.



a) Helle Stellen mit weicher Spachtelung im  
Wolfsbergtunnel – RFB Salzburg



b) Dunkle Schatten mit schlechter Haftung  
im Flirscher Tunnel

**Abbildung 53: Verfärbungen und Aufweichungen**

#### 4. Belegung der Beschichtungsoberfläche

##### a. Rostpunkte

Rost ist als braune Verfärbung auf dem Beschichtungssystem zu sehen und kann über die gesamte Höhe verteilt auftreten wobei sich die Schäden im Allgemeinen im unteren Bereich und im Portalbereich häufen. Im Strenger Tunnel treten die Rostpunkte beispielsweise geblockt in einzelnen Bereichen auf. Die Ursache könnten Stahlfasern im Beton (Durchrostung), Verunreinigungen im Tunnelanstrich (Durchrostung) oder Eisenspäne aus dem Abrieb der Schneepflüge sein (Überrostung).



a) Rostpunkte im unteren Bereich



b) Rostpunkte (Detailansicht)

**Abbildung 54: Rostpunkte im Strenger Tunnel**

##### b. Schmutzbeläge

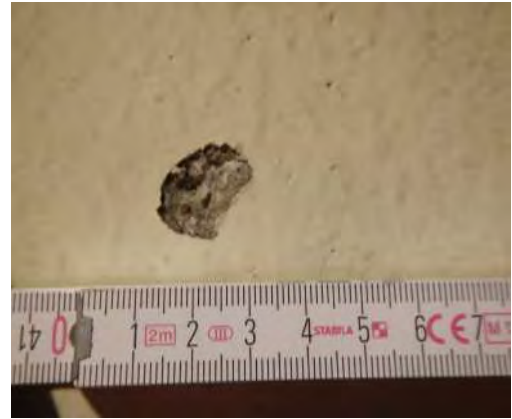
Hierbei handelt es sich um schwarze Flächen aufgrund von Schmutzanhaftung im Sockelbereich. Die Haftung ist an diesen Stellen etwas schwächer, es sind aber noch keine Ablätterungen aufgetreten.



**Abbildung 55: Schmutzbelag im Sockelbereich im Mitterbergtunnel – RFB Klagenfurt**

## 5. Betonabplatzungen

Diese lokal auftretenden und sehr tiefen Abplatzungen lassen entweder Mürbkorn oder Ablösung durch plattige Gesteinskörnung unter der Oberfläche vermuten.



a) Betonabplatzungen im Sockelbereich

b) Betonabplatzungen (Detailansicht)

**Abbildung 56: Betonabplatzungen im Gräberntunnel**

## 6. Imperfektionen der Beschichtungsoberfläche

### a. Runzelbildung

Die Runzelbildung beschreibt vereinzelte, faltige Stellen. Die Ursache laut Literatur wäre, dass die untere Spachtelmasse noch nicht ausgehärtet war als die darüber liegende Schicht bereits erstarrte.



a) Runzelbildung

b) Runzelbildung

**Abbildung 57: Runzelbildung im Wolfsbergtunnel – RFB Salzburg**

b. Tropfenbildung

Hierbei handelt es sich um feine Erhebungen, welche aufgrund von Schmutzanlagerungen bereits schwarz verfärbt sind.



a) Tropfenbildung im Gräberntunnel



b) Tropfenbildung im Kalcherkogeltunnel – RFB Klagenfurt

**Abbildung 58: Tropfenbildung in unterschiedlichen Tunnelbauwerken**

c. Läuferbildung

Läuferbildung ist ein Verarbeitungsmangel und auf zu hohe Nass-Schichtdicke im Verhältnis zur Viskosität des Anstrichstoffs zurückzuführen.



**Abbildung 59: Läuferbildung im Ganzsteintunnel**



Die im vorherigen Abschnitt dargestellten Schadensarten sind, teilweise unabhängig von Hersteller, Alter und geografischer Lage der Tunnelbauwerke in mehreren, unterschiedlichen Objekten festgestellt worden. Besonders Krakeleerisse und Abplatzungen jeglicher Art und Weise wurden in fast allen beobachteten Bauwerken registriert. Um einen besseren Zusammenhang zwischen den Tunnelobjekten, ihrem Zustand und den aufgetretenen Schäden herzustellen, wurde Tabelle 23 erstellt. Hierbei fällt auf, dass die Schadensart „2. Krakeleerisse“ in allen besichtigten Bauwerken, unabhängig vom Beschichtungshersteller beobachtet wurde, die Schadensarten „1. Verbundversagen“, welches in vielen unterschiedlichen Erscheinungen auftrat und „3. Zersetzungen: Verfärbungen, Aufweichungen, klebrige Beläge“ in relativ vielen Bauwerken zu sehen sind, während sich die restlichen Schadensbilder auf einzelne Bauwerke beschränken. Hierbei könnte es sich um Schäden aus regional wirkenden Einflussfaktoren handeln. Zur Schadensart 3 gehört außerdem angemerkt, dass unter diesem Punkt „schwarze Verschmutzungen mit weichem, pulvrigen Untergrund“ beschrieben wurden, welche ebenfalls nur in Tunnelbauwerken mit einem Beschichtungssystem der Fa. Avenarius Agro auftauchen. Hierbei könnte es sich also um einen beschichtungsspezifischen Schaden handeln.

Tabelle 23: Übersicht über die begutachteten Schadensarten

Objekt	Hersteller	Neu/Saniert	Jahr	Schadensbild														
				1. Verbundversagen				2. Krakeleerisse	3. Zersetzungen	4. Beläge		5. Betonabplatzungen	6. Imperfektionen					
				a	b	c	d			a	b		a	b	c			
<b>Katschbergtunnel</b> RFB Salzburg	Agro	N	2007															
<b>Wolfsbergtunnel</b> RFB Villach RFB Salzburg	Agro	N/S	2010															
<b>Gräberntunnel</b> RFB Klagenfurt	Mapei	N	2004															
<b>Mitterbergtunnel</b> RFB Klagenfurt RFB Graz	Agro	S	2004															
<b>Kalcherkogeltunnel</b> RFB Klagenfurt RFB Graz	Agro	S	2004															
<b>Schartnerkogeltunnel</b> RFB Graz	Agro	S	2005															
<b>Ganzsteintunnel</b> RFB Wien	Agro	N	2008															
<b>Flirscher Tunnel</b> RFB Arlberg	Sika	S	2006															
<b>Strenger Tunnel</b> RFB Innsbruck	Mapei	N	2006															
<b>Milser Tunnel</b> RFB Arlberg	Agro	S	2005															
<b>Wels Noitzmühle</b> RFB Graz	Agro	N	2003															

Legende:

- 1a) Abschuppungen und feine Abblätterungen
- 1b) flächige Abblätterungen
- 1c) streifenförmige Abblätterungen
- 1d) Unterwanderungen

- 2) Krakeleerisse
- 3) Zersetzungen
- 4a) Rost
- 4b) Schmutz

- 5) Betonabplatzungen
- 6a) Runzelbildung
- 6b) Tropfenbildung
- 6c) Läuferbildung

### 6.3 Beprobung ausgewählter Tunnelbauwerke

Anschließend an die visuelle Begutachtung verschiedener Tunnelobjekte wurden 8 Bauwerke für eine Beprobung ausgewählt. Ziel dieser Analysen war es, Proben aus geschädigten und intakten Bereichen des Beschichtungssystems zu entnehmen und zu untersuchen, um so die Ursachen für die auftretenden Schädigungen feststellen zu können. Um möglichst viele Einflussfaktoren abbilden zu können wurden sowohl neue als auch sanierte Tunnel mit unterschiedlichem Alter und von verschiedenen Herstellern miteinbezogen. Eine Übersicht über die ausgewählten Tunnelbauwerke ist in Tabelle 2 in Abschnitt 5.1.5 dargestellt. Des Weiteren sind die selektierten Objekte in Abbildung 60 eingezeichnet und markiert.



**Abbildung 60: Übersicht über die zur Beprobung ausgewählten Tunnelbauwerke**

Während der Beprobung vor Ort wurden Bohrkerne und Bohrmehl an kritischen Stellen zur anschließenden Untersuchung im Labor entnommen. Außerdem wurden die Helligkeit sowie der Wassergehalt bestimmt. Am Standort der SMG wurden daraufhin der Chloridgehalt im entnommenen Bohrmehl, die Schichtdicke der einzelnen Beschichtungslagen sowie die Porosität der Bohrkerne festgestellt. Bohrkerne von ausgewählten Tunnelbauwerken wurden zudem zur chemischen Untersuchung an die TU Wien weitergegeben.

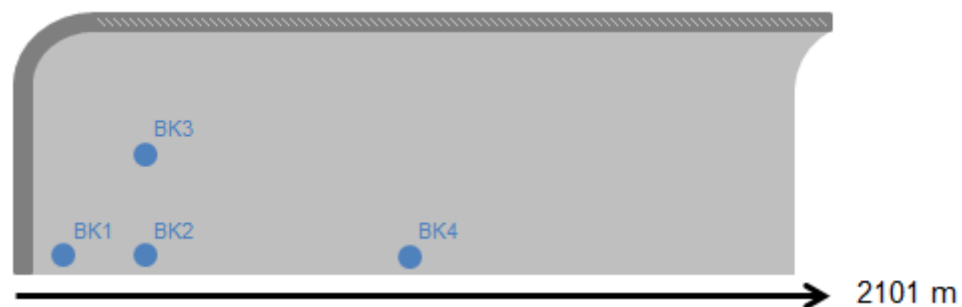
Im Folgenden sind die Ergebnisse der Beprobung für die jeweiligen Tunnelobjekte zusammengefasst:

### Ganzsteintunnel – RFB Wien

Aus dem Ganzsteintunnel wurden insgesamt 4 Proben, in unterschiedlicher Höhe und Entfernung zum Tunnelportal entnommen. Eine genaue Beschreibung des Probenahmeortes und des optischen Erscheinungsbildes ist im Folgenden gegeben. Die Ergebnisse der durchgeführten Analysen sind in Tabelle 25 dargestellt.

**Tabelle 24: Probenahmestellen Ganzsteintunnel - RFB Wien**

Avenarius Agro   Jänner bis März 2008   Neubau				
Nr.	Block	Entnahmeort	Entnahmehöhe	Beschreibung
Ga-BK1	1/0	45 m	50 cm	feine Krakeleerisse mit Abplatzungen
Ga-BK2	6/0	325 m	50 cm	intakter Block
Ga-BK3	6/0	325 m	230 cm	intakter Block
Ga-BK4	18/4	1065 m	50 cm	feine und grobe Krakeleerisse mit Abplatzungen



**Abbildung 61: Beprobung Ganzsteintunnel - RFB Wien**

**Tabelle 25: Ergebnisse der Beprobung Ganzsteintunnel - RFB Wien**

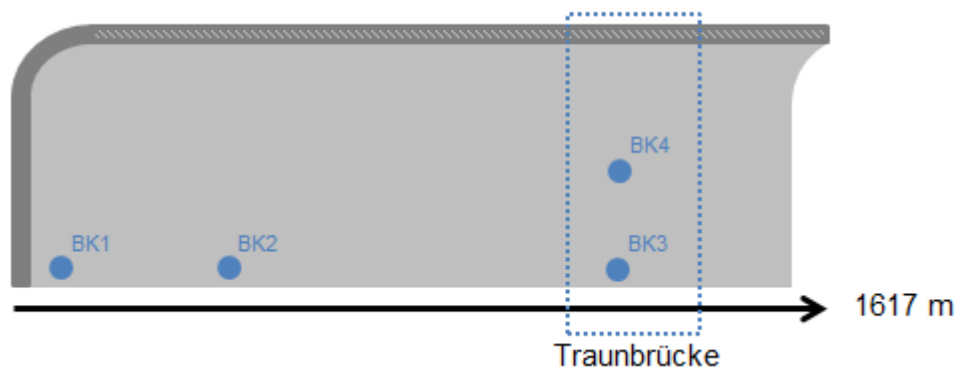
Avenarius Agro   Jänner bis März 2008   Neubau										
Nr.	Chloridgehalt [%]			Wassergehalt [%]	Reflexionsgrad [%]	Gesamtporosität [%]	Abreißfestigkeit [MPa]	Schichtdicke [mm]		
	0-2 cm	2-4 cm	4-6 cm					Lage I [mm]	Lage II [mm]	Lage III [mm]
Ga-BK1	0,57	0,15	0,17	2,0	61,81	10,63	3,2	0,190	0,799	
Ga-BK2	0,47	0,12	0,02	2,3	61,58	11,16	3,5	0,142	0,361	0,207
Ga-BK3	1,53	0,33	0,16	2,5	62,52		3,3	0,117	0,264	
Ga-BK4	0,17	0,17	0,17	1,8	60,06		2,7	0,109	0,475	

### Wels Noitzmühle – RFB Graz

Im Tunnel Wels Noitzmühle wurden ebenfalls 4 Stellen beprobt. Der genaue Entnahmeort, die Entnahmehöhe und eine Beschreibung der Beschichtungsoberfläche ist in Tabelle 26 zu sehen, die Analysenergebnisse beinhaltet Tabelle 27.

**Tabelle 26: Probenahmestellen Wels Noitzmühle – RFB Graz**

Avenarius Agro   Juni und Juli 2003   Neubau				
Nr.	Block	Entnahmeort	Entnahmehöhe	Beschreibung
We-BK1	G004	31,6 m	50 cm	1 Riss, System mit Spachtelung
We-BK2	G039	451 m	50 cm	Abplatzungen, System ohne Spachtelung
We-BK3	Traunbrücke Block 33	1314 m	60 – 70 cm	Bläschen < 50 cm
We-BK4	Traunbrücke Block 33	1314 m	195 – 205 cm	intakter Block



**Abbildung 62: Beprobung Wels Noitzmühle - RFB Graz**

**Tabelle 27: Ergebnisse der Beprobung Wels Noitzmühle - RFB Graz**

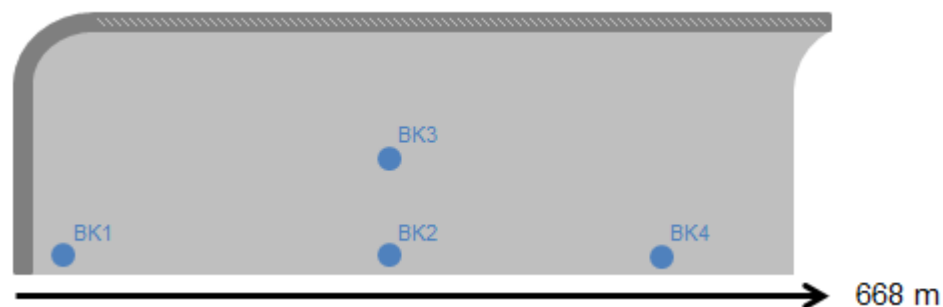
Avenarius Agro   Juni und Juli 2003   Neubau										
Nr.	Chloridgehalt [% ]			Wassergehalt [%]	Reflexionsgrad [%]	Gesamtporosität [%]	Abreißfestigkeit [MPa]	Schichtdicke [mm]		
	0-2 cm	2-4 cm	4-6 cm					Lage I [mm]	Lage II [mm]	Lage III [mm]
We-BK1	2,56	0,55	0,22	1,8	64,20		3,8	0,255	0,137	
We-BK2	0,33	0,50	0,28	2,0	64,06	13,31	1,4	0,246		
We-BK3	0,30	0,17	0,15	1,5	64,06	9,39	1,1	0,140		
We-BK4	0,40	0,10	0,17	1,0	61,66		2,5	0,174		

### Wolfsbergtunnel – RFB Villach

Im Wolfsbergtunnel wurden beiden Fahrrichtungen untersucht. In Fahrrichtung Villach wurden insgesamt 4 Proben genommen. Die Probenahmestellen und Schadensbilder sind Tabelle 28 zu entnehmen, die Analysenergebnisse finden sich in Tabelle 29.

**Tabelle 28: Probenahmestellen Wolfsbergtunnel – RFB Villach**

Avenarius Agro   März bis Juni 2010   Neubau				
Nr.	Block	Entnahmeort	Entnahmehöhe	Beschreibung
WoV-BK1	V03	16,8 m	50 cm	feine Krakeleerisse
WoV-BK2	V35	368,4 m	50 cm	schwarze Stellen mit pulvriger Spachtelmasse
WoV-BK3	V35	368,4 m	205 cm	schwarze Stellen mit pulvriger Spachtelmasse
WoV-BK4	V45	485,6 m	50 cm	intakter Block



**Abbildung 63: Beprobung Wolfsbergtunnel - RFB Villach**

**Tabelle 29: Ergebnisse der Beprobung Wolfsbergtunnel - RFB Villach**

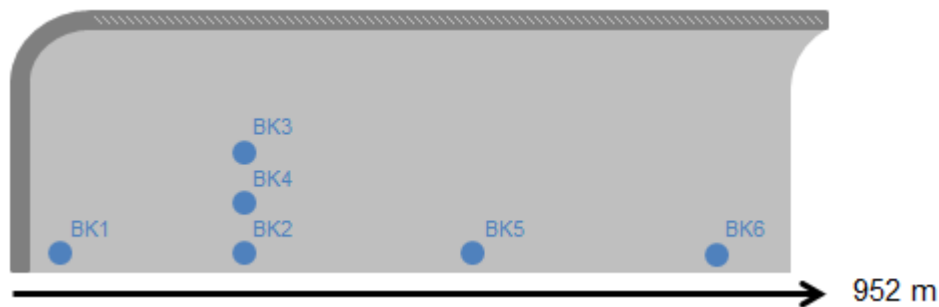
Avenarius Agro   März bis Juni 2010   Neubau										
Nr.	Chloridgehalt [% ]			Wassergehalt [%]	Reflexionsgrad [%]	Gesamtporosität [%]	Abreißfestigkeit [MPa]	Schichtdicke [mm]		
	0-2 cm	2-4 cm	4-6 cm					Lage I [mm]	Lage II [mm]	Lage III [mm]
WoV-BK1	0,52	0,62	0,53	3,0	60,29		5,3	0,187	0,697	
WoV-BK2	0,27	0,21	0,20	1,5	61,05	8,92	3,3	0,145	0,912	
WoV-BK3	1,93	0,05	0,13	0,9	65,10		3,6	0,117	0,381	
WoV-BK4	0,17	0,16	0,18	2,0	63,95	10,83	3,6	0,129	0,642	

### Wolfsbergtunnel – RFB Salzburg

Im Wolfsbergtunnel Richtung Salzburg wurden insgesamt 6 Stellen in unterschiedlicher Höhe und Entfernung zum Tunnelportal beprobt. Neben den Analysenergebnissen in Tabelle 31 wurde außerdem eine chemische Untersuchung mittels IR-Spektroskopie sowie DSC und TGA durchgeführt. Diese Ergebnisse werden separat in Kapitel 6.3.3 erläutert.

**Tabelle 30: Probenahmestellen Wolfsbergtunnel – RFB Salzburg**

Avenarius Agro   Oktober und November 2010   Sanierung				
Nr.	Block	Entnahmeort	Entnahmehöhe	Beschreibung
WoS-BK1	S79	17,2 m	50 cm	feine Krakeleerisse
WoS-BK2	S59	255,5 m	50 cm	weiße hellere Stelle und feine Krakeleerisse
WoS-BK3	S59	255,5 m	200 cm	weiße hellere Stelle und feine Krakeleerisse
WoS-BK4	S59	255,5 m	170 cm	weiße hellere Stelle
WoS-BK5	S22	496,5 m	50 cm	intakter Block
WoS-BK6	S09	856,2 m	80 cm	schwarze Stellen mit pulveriger Spachtelmasse



**Abbildung 64: Beprobung Wolfsbergtunnel - RFB Salzburg**

**Tabelle 31: Ergebnisse der Beprobung Wolfsbergtunnel - RFB Salzburg**

Avenarius Agro   Oktober und November 2010   Sanierung										
Nr.	Chloridgehalt [% ]			Wasser- gehalt [%]	Reflexions- grad [%]	Gesamt- porosität [%]	Abreiß- festigkeit [MPa]	Schichtdicke [mm]		
	0-2 cm	2-4 cm	4-6 cm					Lage I [mm]	Lage II [mm]	Lage III [mm]
WoS-BK1	0,17	0,15	0,17	2,0	55,18		5,3	0,071	0,951	
WoS-BK2	4,52	0,42	0,25	0,9	60,11	9,09	4,9	0,102	1,249	
WoS-BK3	2,61	0,85	0,05	1,5	62,93	8,61	2,5	0,068	0,197	0,074
WoS-BK4				0,5						
WoS-BK5	5,55	0,97	0,17	0,9	59,39		3,0	0,093	0,921	
WoS-BK6				0,9						

### Schartnerkogeltunnel – RFB Graz

Der Schartnerkogeltunnel wurde an insgesamt 4 Stellen beprobt. Eine genaue Beschreibung des Entnahmeortes, der optischen Erscheinung der beprobten Stelle sowie eine Zusammenstellung der Analyseergebnisse sind im Folgenden dargestellt.

**Tabelle 32: Probenahmestellen Schartnerkogeltunnel – RFB Graz**

Avenarius Agro   Mai und Juni 2005   Sanierung				
Nr.	Block	Entnahmeort	Entnahmehöhe	Beschreibung
Sc-BK1	3	17 m	50 cm	gute Haftung, Krakeleerisse vorhanden aber nicht durchgängig, da Anstrich rel. Dick; raues Unterprofil
Sc-BK2	34	477 m	50 cm	wenige Krakeleerisse
Sc-BK3	34	477 m	> 200 cm	Abplatzungen bei Rissen, vermutlich durch Feuchtigkeitseintritt, keine Krakeleerisse,
Sc-BK4	75	900 m	50 cm	wenige Krakeleerisse



**Abbildung 65: Beprobung Schartnerkogeltunnel - RFB Graz**

**Tabelle 33: Ergebnisse der Beprobung Schartnerkogeltunnel – RFB Graz**

Avenarius Agro   Mai und Juni 2005   Sanierung										
Nr.	Chloridgehalt [% ]			Wasser- gehalt [%]	Reflexions- grad [%]	Gesamt- porosität [%]	Abreiß- festigkeit [MPa]	Schichtdicke [mm]		
	0-2 cm	2-4 cm	4-6 cm					Lage I [mm]	Lage II [mm]	Lage III [mm]
Sc-BK1	4,57	3,04	1,60	0,9	58,03		4,5	0,203	0,947	
Sc-BK2	4,27	1,38	1,02	1,5	57,55	12,85	5,3	0,222	0,734	
Sc-BK3	2,82	0,54	0,08	1,5	56,65		2,3	0,153	0,296	
Sc-BK4	4,40	4,22	2,56	1,5	57,55	10,28	5,2	0,121	1,162	



### Strenger Tunnel – RFB Innsbruck

Im Strenger Tunnel wurden ebenso 4 unterschiedliche Proben entnommen. Wie auch bei den anderen Tunnelobjekten wurden unterschiedliche Entnahmeorte ausgewählt. Eine detaillierte Beschreibung sowie eine optische Einschätzung der Beschichtungsoberfläche ist in Tabelle 34 zusammengestellt, die Untersuchungsergebnisse der entnommenen Bohrkern- und Bohrmehle ist in Tabelle 35 dargestellt. Die Bohrkern- und Bohrmehle St-BK2 und St-BK3 wurden zusätzlich einer chemischen Untersuchung (siehe Kapitel 6.3.3) unterzogen.

**Tabelle 34: Probenahmestellen Strenger Tunnel – RFB Innsbruck**

Mapei   Mai und Juni 2006   Neubau				
Nr.	Block	Entnahmeort	Entnahmehöhe	Beschreibung
St-BK1	OWS5	12 m	50 cm	intakter Block
St-BK2	S425	792 m	50 cm	feine Abplatzungen von 0-100 cm Höhe, besonders stark unter Notausgangsschild
St-BK3	S283	1764 m	50 cm	intakter Block (nur wenige keine Risse)
St-BK4	S283	1764 m	210 cm	intakter Block (nur wenige keine Risse)



**Abbildung 66: Beprobung Strenger Tunnel - RFB Innsbruck**

**Tabelle 35: Ergebnisse der Beprobung Strenger Tunnel – RFB Innsbruck**

Mapei   Mai und Juni 2006   Neubau										
Nr.	Chloridgehalt [%]			Wassergehalt [%]	Reflexionsgrad [%]	Gesamtporosität [%]	Abreißfestigkeit [MPa]	Schichtdicke [mm]		
	0-2 cm	2-4 cm	4-6 cm					Lage I [mm]	Lage II [mm]	Lage III [mm]
St-BK1	0,58	0,47	2,28	0,9	61,77		4,9	0,170	0,239	
St-BK2	3,14	0,31	0,22	1,5	50,14	9,93	2,5	0,140	0,372	
St-BK3	0,16	0,11	0,20	0,9	52,34	12,38	3,1	0,218	0,424	
St-BK4	0,17	0,13	0,13	0,9	56,64		3,1	0,221	0,187	

### Flirscher Tunnel – RFB Arlberg

Weitere 4 Proben mit unterschiedlichem Schadbild und Entnahmeort wurden bei der Beprobung des Flirscher Tunnels genommen. Die Ergebnisse der Laboranalysen sind in Tabelle 37 zu finden. Die Bohrkern FI-BK2 und FI-BK3 wurden mittels IR-Spektroskopie, DSC und TGA im Detail untersucht. Die Ergebnisse diesbezüglich werden in Kapitel 6.3.3 detailliert erläutert.

**Tabelle 36: Probenahmestellen Flirscher Tunnel – RFB Arlberg**

Sika   Juli 2006   Sanierung				
Nr.	Block	Entnahmeort	Entnahmehöhe	Beschreibung
FI-BK1	7	36 m	50 cm	intakter Block
FI-BK2	18	156 m	50 cm	intakter Block
FI-BK3	18	156 m	120 cm	dunkle Schatten, leicht schlechterer Kreuzschnitt
FI-BK4	18	156 m	215 cm	intakter Block



**Abbildung 67: Beprobung Flirscher Tunnel - RFB Arlberg**

**Tabelle 37: Ergebnisse der Beprobung Flirscher Tunnel – RFB Arlberg**

Sika   Juli 2006   Sanierung										
Nr.	Chloridgehalt [% ]			Wassergehalt [%]	Reflexionsgrad [%]	Gesamtporosität [%]	Abreißfestigkeit [MPa]	Schichtdicke [mm]		
	0-2 cm	2-4 cm	4-6 cm					Lage I [mm]	Lage II [mm]	Lage III [mm]
FI-BK1	1,93	2,70	0,09	0,9	57,25		3,9	0,138	1,128	
FI-BK2	2,99	3,78	1,79	1,5	55,42	10,03	3,9	0,166	1,466	
FI-BK3	4,03	7,95	4,48	0,9	55,99	13,37	2,7	0,119	0,575	1,231
FI-BK4	0,43	1,24	0,84	0,9	61,28		3,2	0,302	0,082	0,089

### Milser Tunnel – RFB Arlberg

Der Milser Tunnel wurde ebenfalls an 4 unterschiedlichen Stellen beprobt. Eine Beschreibung des Entnahmeortes und der Entnahmehöhe, sowie eine optische Einschätzung der Beschichtungsoberfläche ist in Tabelle 38 gegeben. Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen sind in Tabelle 39 zusammengefasst.

**Tabelle 38: Probenahmestellen Milser Tunnel – RFB Arlberg**

Avenarius Agro   April bis Juli 2005   Sanierung				
Nr.	Block	Entnahmeort	Entnahmehöhe	Beschreibung
Mi-BK1	7	62 m	70 cm	sehr rau und viele Schmutzablagerungen
Mi-BK2	53	583 m	70 cm	sehr rau und viele Schmutzablagerungen
Mi-BK3	126	1448 m	90 cm	weniger rau, weniger Schmutz; zusätzlich Abplatzungen und schlechte Haftung bis 150 cm, derartige Schäden über 2/3 bis 3/4 der Tunnellänge
Mi-BK4	126	1448 m	220 cm	intakter Block



**Abbildung 68: Beprobung Milser Tunnel - RFB Arlberg**

**Tabelle 39: Ergebnisse der Beprobung Milser Tunnel – RFB Arlberg**

Avenarius Agro   April bis Juli 2005   Sanierung										
Nr.	Chloridgehalt [% ]			Wassergehalt [%]	Reflexionsgrad [%]	Gesamtporosität [%]	Abreißfestigkeit [MPa]	Schichtdicke [mm]		
	0-2 cm	2-4 cm	4-6 cm					Lage I [mm]	Lage II [mm]	Lage III [mm]
Mi-BK1	5,68	7,75	2,92	0,9	36,70		1,6	0,265	1,635	1,544
Mi-BK2	4,25	5,29	3,19	0,9	34,02	8,82	0,6	0,141		
Mi-BK3	5,05	1,66	0,21	0,4	44,39	4,85	1,1	0,303		
Mi-BK4	3,07	0,41	0,15	1,5	49,03		2,7	0,213		

### 6.3.1 Einfluss der Betonqualität

Bei der Herstellung von Tunnelinnenschalen werden üblicherweise die Betonsorten gemäß ÖBV Richtlinie „Innenschalenbeton“ für Gewölbe mit der Sortenbezeichnung IG bzw. für wasserdichte Innenschalen mit der Sortenbezeichnung WDI eingesetzt. Tabelle 40 gibt einen Überblick über die Zusammensetzung von typischen Innenschalenbetonen seit Erscheinen der ersten ÖBV Richtlinie im Jahr 1995 sowie zum Vergleich zwei Betonsorten mit gemäß ÖNORM B4710-1 für Frostbeanspruchung mit hoher Wassersättigung ohne Taumittel (XF3) und hoher Wassersättigung mit Taumittel (XF4).

**Tabelle 40: Betonsortenbezeichnungen und Zusammensetzung für Innenschalenbetone**

Richtlinie Ausgabe	Innenschalenbeton						B4710-1	
	1995		2003		2012		2007	
Betonsorte	Gewölbe- beton	WDI	Gewölbe- beton	WDI	IG	WDI	XF3	XF4
Zementgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	240-260	≤ 260	250 - 270	250 -270				
Zusatzstoff- gehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	-	-	70 -50	70 -50				
Bindemittel- gehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	≤ 330	≤ 330			≥ 260 bew. ≥ 290 Gewö.	≥ 260 bew. ≥ 290 Gewö.	≥ 300	≥ 340
W/B-Wert	≤ 0,62	≤ 0,62	≤ 0,63	≤ 0,58	≤ 0,67 Gewö. ≤ 0,70 Sohle	≤ 0,67 Gewö. ≤ 0,70 Sohle	≤ 0,55	≤ 0,45
Exposition					XC3, XF3	XC4, XF3	XC3, XF3	XC4, XF4

Obige Tabelle zeigt, dass trotz Vorhandenseins von Taumittel mit hoher Wassersättigung im Tunnel (durch XF4 abgedeckt) zur Gewährleistung einer niedrigen Hydratationswärme die Betonsorten gemäß ÖBV Richtlinien grundsätzlich mit geringeren Bindemittelgehalten auskommen als vergleichbare Betonsorten gemäß ÖNORM B4710-1. Die Beständigkeit dieser für Tunnelinnenschalen vorgesehenen Betonsorten gegenüber Umwelteinflüssen (z.B. Frost-Tausalzbeanspruchung) ist demgemäß geringer. Es wird bei Betonsorten für Tunnelinnenschalen davon ausgegangen, dass durch den vorhandenen Tunnelanstrich ein zusätzlicher Schutz des Betons gegeben ist. Ist dieser Schutz durch den Tunnelanstrich nicht mehr ausreichend vorhanden, kommt es rasch zu Frost-Tausalzschäden des Tunnelinnenschalenbetons.

Abbildung 69 zeigt eine durch einen Unfall hervorgerufene Schadsstelle des Tunnelanstrichs sowie den bereits lokal stark geschädigten Beton durch die auf die Betonoberfläche wirkende Frost-Tausalzbeanspruchung im Spitzwasserbereich.



a) Unfallschaden Tunnelanstrich



d) Detailansicht mit zerstörtem Betongefüge

**Abbildung 69: Unfallschaden Gräberntunnel**

Im Rahmen der Beprobung wurden Bohrkern aus den Tunnelbauwerken entnommen und unterschiedlichsten Prüfungen unterzogen. Rückstellproben wurden seit Sommer 2015 in Plastiksäcken im Labor bei Zimmertemperatur gelagert. Abbildung 70 zeigt Aufnahmen solcher Proben aus dem Milser- sowie dem Ganzsteintunnel. Bemerkenswert ist, dass sich im Zuge dieser Lagerung (vermutlich durch langsame Austrocknung) der Anstrich mit der obersten Betonschicht vom Rest des Bohrkernes abgelöst hat. Daraus lässt sich schließen, dass eine Schwachstelle im Verbund einige Millimeter unter der Beschichtung zu Tage trat, die offensichtlich bei den Probenahmen noch nicht vorhanden war.

Aufgrund der in Abbildung 70 gezeigten Proben mit der offensichtlichen Schwachstelle im Betongefüge einige Millimeter unter der Beton- bzw. Beschichtungsoberfläche kann vermutet werden, dass dieser Interfacebereich in Kombination mit den verwendeten Betonqualitäten Schadensmechanismen hervorrufen kann. Beim Eintrag von Chloriden durch kleine Risse können sich, aufgrund der vorhandenen Störungszone bzw. aufgrund unzureichender Beständigkeit gegenüber Frostangriff mit Taumittel, Schädigungen des Anstrichsystems von der Rückseite rasch ausbreiten.



a) Vorderansicht



b) Seitenansicht

Bohrkern aus dem Milser Tunnel Mi-BK3



c) Vorderansicht



d) Seitenansicht

Bohrkern aus dem Ganzsteintunnel Ga-BK2

**Abbildung 70: Entnommene Bohrkerne aus dem Milser Tunnel und Ganzsteintunnel**

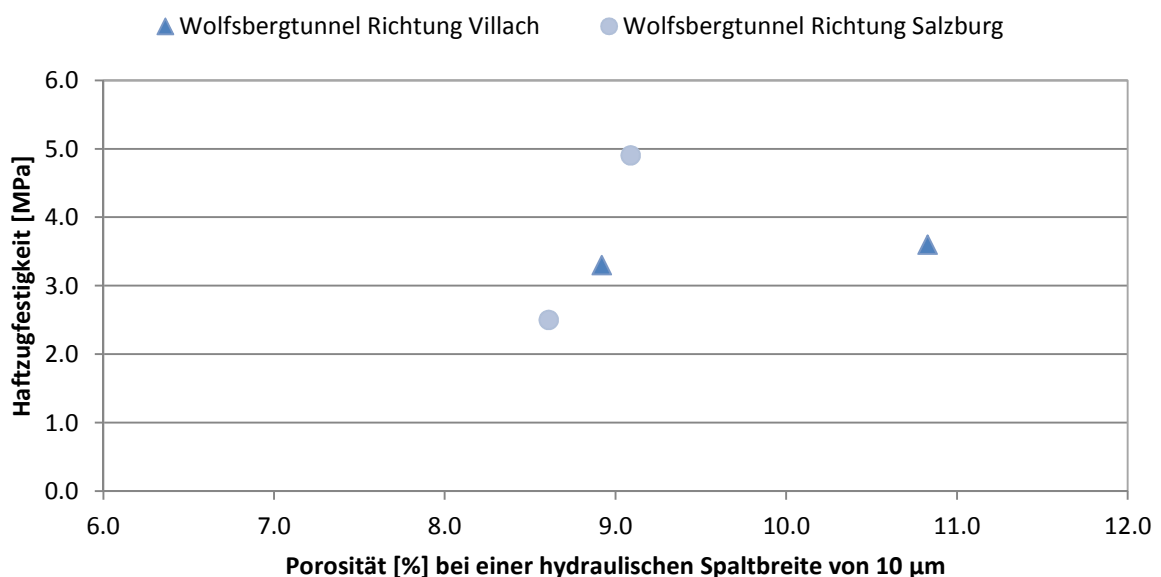
### 6.3.2 Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Tunnelbauwerke

Das Ziel der Beprobung verschiedenster Tunnelbauwerke war, einen Zusammenhang zwischen optisch sichtbaren Schäden und einfach messbaren Stoffparametern herzustellen. Des Weiteren sollte der Einfluss ungünstiger Herstellungsparameter auf die Beschichtungssysteme aufgearbeitet werden. Im folgenden Abschnitt werden deshalb die Ergebnisse der Tunnelbeprobung einander gegenübergestellt. Da bei der Auswahl der Tunnelobjekte auf die Betrachtung verschiedenster Einflussfaktoren wie Hersteller des Beschichtungssystems, Alter, geografische Lage etc. Wert gelegt wurde, wurden die Tunnelobjekte folgendermaßen miteinander in Beziehung gesetzt:

- Vergleich Neubau/Sanierung bei gleichem Alter und Hersteller:  
Wolfsbergtunnel Fahrtrichtung Villach (Neubau) – Fahrtrichtung Salzburg (Sanierung)
- Vergleich Sanierung bei gleichem Hersteller aber unterschiedlichem Alter:  
Wolfsbergtunnel Fahrtrichtung Salzburg – Schartnerkogeltunnel Fahrtrichtung Graz
- Vergleich aller Tunnelobjekte von einem Hersteller:  
Neubau und Sanierungen mit unterschiedlichem Alter von der Fa. Avenarius Agro
- Vergleich Neubau und Sanierungen für alle Hersteller

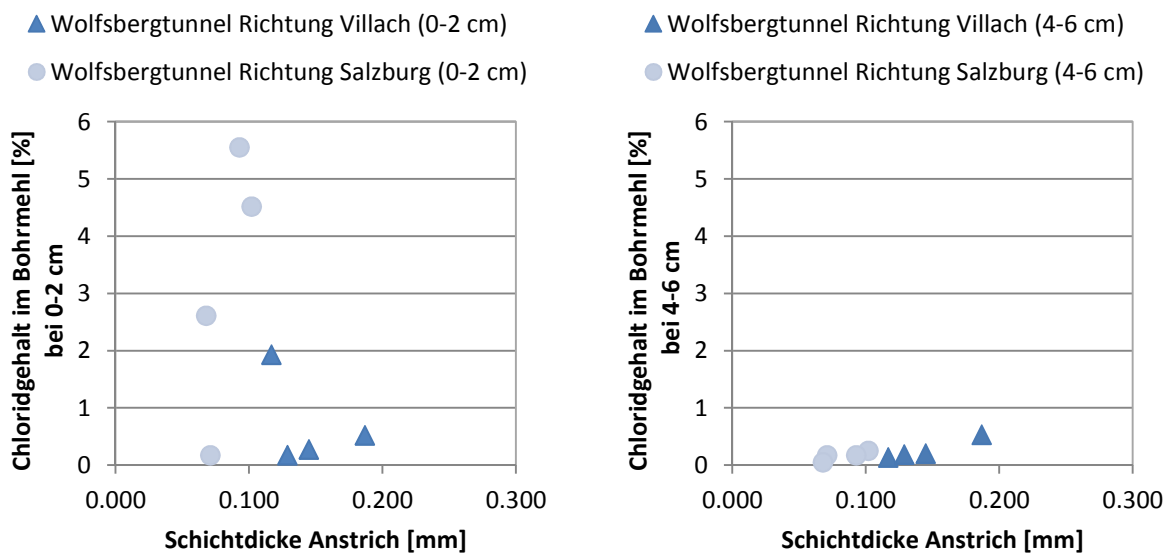
#### Vergleich Neubau/Sanierung bei gleichem Alter und Hersteller

Durch die Beprobung beider Tunnelröhren des Wolfsbergtunnels konnte ein Vergleich zwischen Neubau und Sanierung gezogen werden.



**Abbildung 71: Zusammenhang zwischen Haftzugfestigkeit und Porosität für den Wolfsbergtunnel für beide Fahrtrichtungen**

Im Wolfsbergtunnel Richtung Salzburg (Sanierung) schwankten die Werte für die Haftzugfestigkeit stark, obwohl annähernd gleiche Porosität festgestellt wurde. Auf beiden Bohrkernen war außerdem ein ähnliches Schadensbild festgestellt worden. Für den Wolfsbergtunnel Richtung Villach (Neubau) wurden bei unterschiedlicher Porosität annähernd gleiche Haftzugfestigkeiten beschrieben. Der Bohrkern mit der höheren Porosität wurde als intakt gekennzeichnet.



**Abbildung 72: Zusammenhang zwischen Chloridgehalt und Schichtdicke des Anstrichs für den Wolfsbergtunnel für beide Fahrtrichtungen**

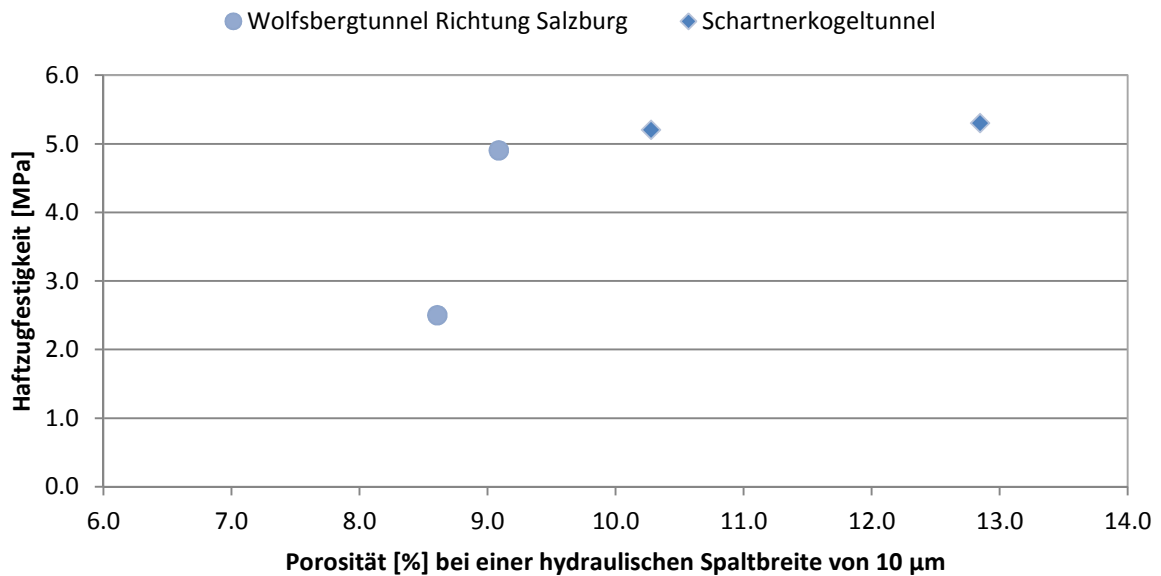
Wie in der obigen Abbildung zu sehen, waren die Schichtdicken des Anstrichs für beide Systeme in etwa gleich. Die Schichtdicke der Spachtelung wurde nicht miteinbezogen da diese je nach vorhandenem Untergrund (Lunker, Rauheit, etc.) stark schwanken kann. Laut Merkblatt „Tunnelbeschichtungen“ ist eine Mindestschichtdicke (Trockenfilm) von 150 µm aufzutragen. Dies wurde bei beiden Objekten nicht bzw. nur vereinzelt erreicht.

Vergleicht man die beiden Tunnelröhren miteinander, so unterscheiden sich die Chloridgehalte in der obersten Schicht (0-2 cm) stark. In Fahrtrichtung Salzburg (Sanierung) wurden tendenziell höhere Werte festgestellt, wahrscheinlich aufgrund der Vorbelastung. In tieferen Lagen (4-6 cm) waren die Chloridgehalte wesentlich niedriger und in beiden Tunnelröhren ähnlich. Weiters wurde jeweils 1 Bohrkern pro Tunnelröhre als intakt bezeichnet: In Richtung Villach (Neubau) war der Bohrkern mit dem niedrigstem Chloridgehalt intakt, in Richtung Salzburg (Sanierung) war dies nicht der Fall.



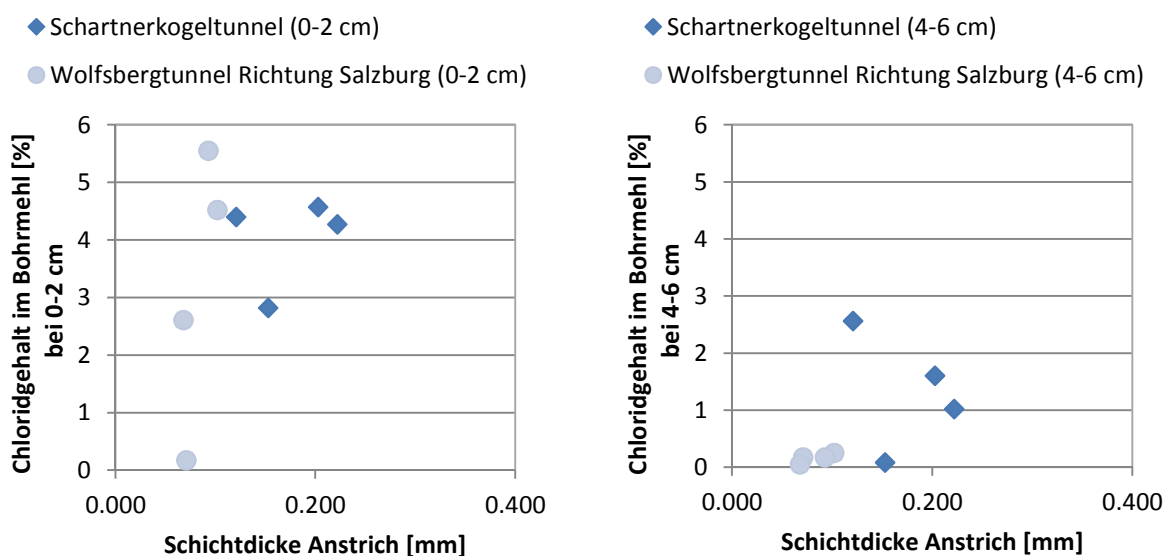
### Vergleich Sanierung bei gleichem Hersteller aber unterschiedlichem Alter

Für diesen Fall wurde der Wolfsbergtunnel Fahrtrichtung Salzburg (2010) dem Schartnerkogeltunnel Fahrtrichtung Graz (2005) gegenübergestellt.



**Abbildung 73: Zusammenhang zwischen Haftzugfestigkeit und Porosität für den Wolfsbergtunnel RFB Salzburg und den Schartnerkogeltunnel**

Die Porositäten und Haftzugfestigkeiten im Schartnerkogeltunnel waren tendenziell höher, allerdings waren die Ergebnisse für beide Bauwerke generell hoch. Im Schartnerkogeltunnel wurden beide Bohrkerns als intakt beschrieben, für den Wolfsbergtunnel wurden beide Bohrkerns als schadhaft beschrieben.

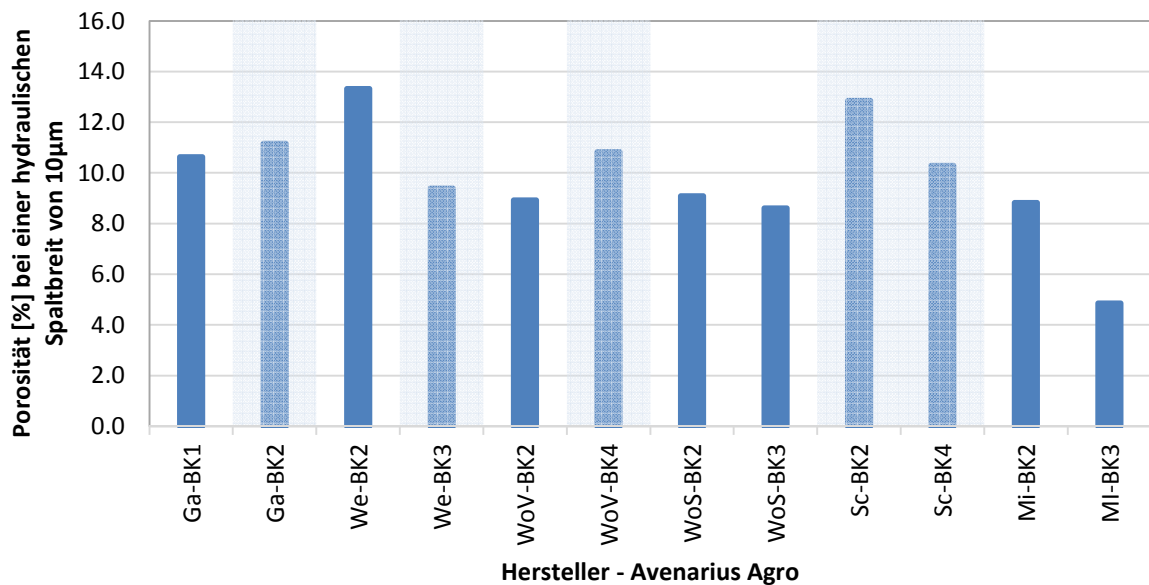


**Abbildung 74: Zusammenhang zwischen Chloridgehalt und Schichtdicke des Anstrichs für den Wolfsbergtunnel RFB Salzburg und den Schartnerkogeltunnel**

In beiden Tunneln wurden, wie Abbildung 74 zeigt vergleichsweise hohe Chloridgehalte in der obersten Schicht gemessen, was auf Altlasten zurückzuführen ist. Die Chloridbelastung nahm beim Wolfsbergtunnel mit zunehmender Entnahmetiefe stärker ab als beim Schartnerkogeltunnel. Beim Schartnerkogeltunnel wurde außerdem ein Bohrkern (Sc-BK3) als schadhaft beschrieben (Abplatzungen aufgrund von Rissen), dieser wies zwar den niedrigsten Chloridgehalt auf aber auch die niedrigste Haftzugfestigkeit.

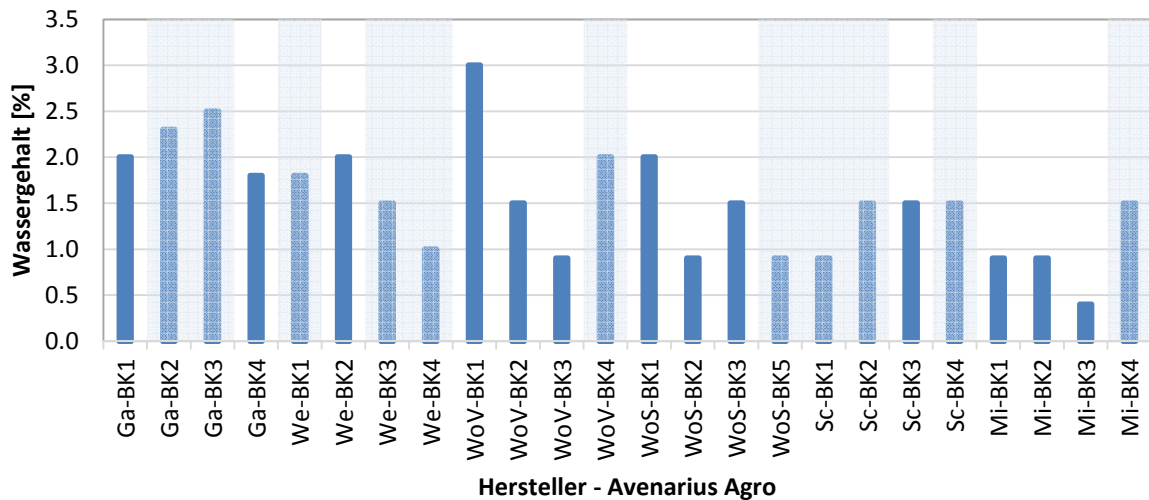
### Vergleich aller Tunnelobjekte von einem Hersteller

Im Anschluss wurden sowohl Neubauten als auch Sanierungen von einem Hersteller (Fa. Avenarius Agro) miteinander verglichen.



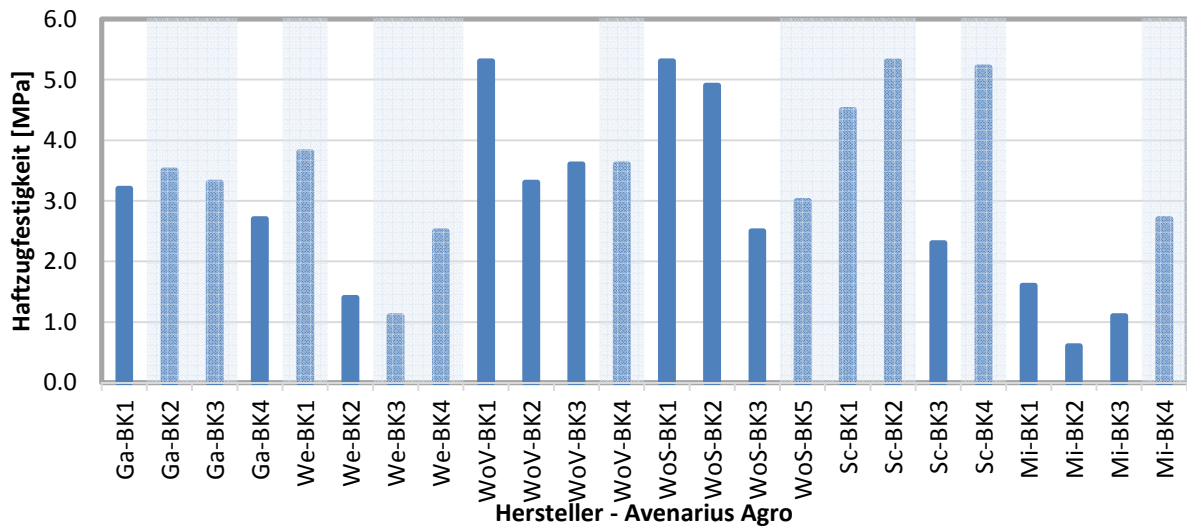
**Abbildung 75: Gesamtporosität für alle Bohrkern mit einer Beschichtung von Avenarius Agro (intakte Bohrkern sind hellblau hinterlegt)**

Pro Tunnelbauwerk wurden je 2 Bohrkern zur Bestimmung der Porosität ausgewählt. Die gemessene Gesamtporosität lag bei allen Bohrkernen zwischen 8 und 14 %, was bei realen Bauten kein Problem darstellt. Abbildung 75 zeigt weiters keinen Zusammenhang zwischen Schadensbild und Porosität. Beim Ganzsteintunnel und Wolfsbergtunnel Richtung Villach wiesen die intakten Bohrkern eine höhere Gesamtporosität auf als die schadhaften Proben. Beim Tunnel Welt Noitzmühle verhielt es sich genau anders herum.



**Abbildung 76: Wassergehalt für alle Bohrkerne mit einer Beschichtung von Avenarius Agro (intakte Bohrkerne sind hellblau hinterlegt)**

Der Wassergehalt wurde für jeweils 4 Bohrkerne pro Tunnelbauwerk bestimmt. Der maximal gemessene Gehalt lag bei 3 %. Laut dem Merkblatt „*Tunnelbeschichtungen*“ muss der Feuchtigkeitsgehalt  $\leq 4 \%$  in einer Tiefe von 2-3 cm betragen. Diese Anforderung war bei allen Bohrkerne erfüllt. Im Ganzsteintunnel und Milser Tunnel zeigten die intakten Bohrkerne eine höhere Feuchtigkeit; die Proben aus Wels Noitzmühle wiesen eine umgekehrte Tendenz auf. Bei allen anderen Tunnelobjekten wurde ein gemischtes Verhalten festgestellt. Im Mittel ergaben sich  $1,6 \pm 0,5 \%$  Wassergehalt für intakte Bohrkerne und  $1,5 \pm 0,7 \%$  bei schadhafte Bohrkerne. Ein Zusammenhang zwischen den Schadensbildern und dem Feuchtigkeitsgehalt konnte ebenfalls keiner hergestellt werden. Bezogen auf Krakeleerisse, welche an mehreren Bohrkerne auftraten wurde dies versucht. Im Ganzsteintunnel zeigten beide schadhafte Bohrkerne Krakeleerisse, diese wiesen tendenziell einen niedrigeren Wassergehalt auf. Im Wolfsbergtunnel Richtung Villach wurde ebenfalls ein Bohrkern mit Krakeleerissen entnommen. Dieser zeigte allerdings den höchsten Wassergehalt. Aufgrund dessen ließ sich keine eindeutige Beziehung zwischen der Feuchte und dem Schadensbild feststellen. Generell ist eine eindeutige Aussage aufgrund der natürlichen Schwankungsbreite der Messwerte und der limitierten Probekörperanzahl schwierig zu treffen.



**Abbildung 77: Haftzugfestigkeit für alle Bohrkerne mit einer Beschichtung von Avenarius Agro (intakte Bohrkerne sind hellblau hinterlegt)**

Die Haftzugfestigkeit wurde ebenfalls für je 4 Bohrkerne pro Tunnel bestimmt. Wie die obige Abbildung zeigt, schwankten die gemessenen Werte stark. Die Anforderung für den Untergrund laut Merkblatt „Tunnelbeschichtungen“ beträgt  $\geq 1,5$  MPa für den Mittelwert bzw.  $\geq 1,0$  MPa für die Einzelwerte. Der Grenzwert bezüglich des Mittelwertes wurde für insgesamt 4 Bohrkerne nicht erfüllt; einer davon wurde als intakt eingestuft, die anderen als schadhaft. Im Mittel waren die Haftzugfestigkeiten für intakt bezeichnete Bohrkerne höher:  $3,5 \pm 1,2$  MPa gegenüber  $2,9 \pm 1,5$  MPa für schadhafte Bohrkerne. Dieses Ergebnis spiegelt auch die in [5] veröffentlichten Resultate bezüglich Haftzugfestigkeit von schadhaften Probenahmestellen wider. Auch in [5] zeigten schadhafte Abschnitte tendenziell eine niedrigere Haftzugfestigkeit als augenscheinlich intakte Stellen.

Allerdings weisen die gemessenen Haftzugfestigkeiten in diesem Fall eine große Schwankungsbreite auf, welche sich in den großen Standardabweichungen wiederfindet. Auch bezogen auf die geringe Anzahl an Probekörpern sind diese Mittelwerte deshalb mit Vorsicht zu betrachten.

### Vergleich Neubau und Sanierungen für alle Hersteller

Anschließend wurden alle beprobten Tunnelobjekte einander gegenüber gestellt. Bei der Auswertung wurde zwischen Neubau und Sanierung unterschieden um die Vorbelastung beim Vergleich außen vor zu lassen. Die Ergebnisse sind in den folgenden Abbildungen dargestellt.

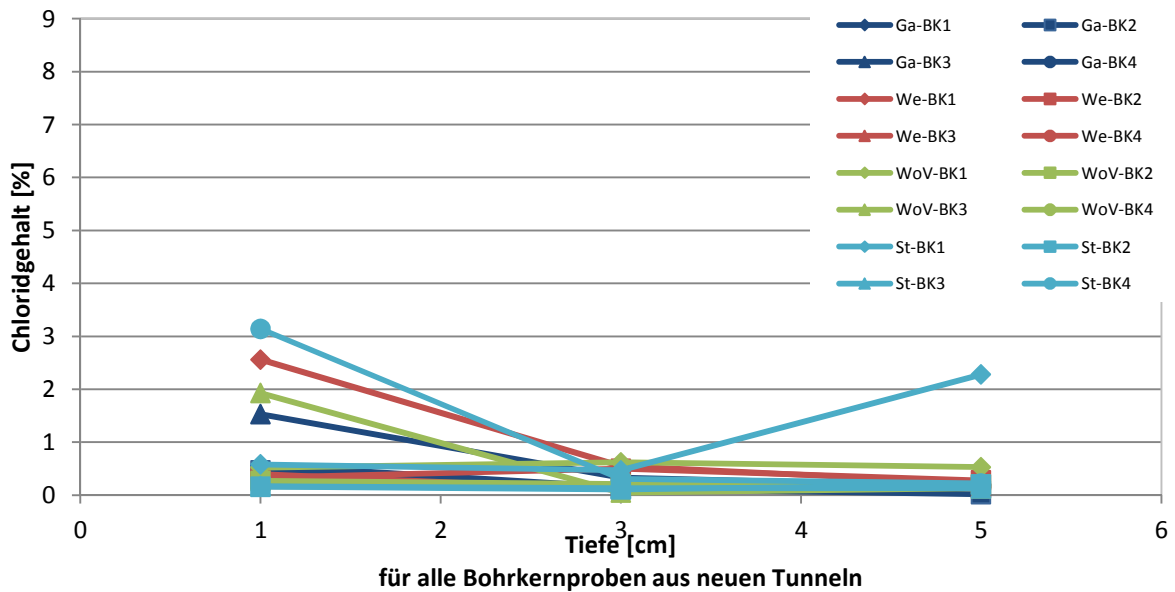


Abbildung 78: Chloridgehalt für alle Bohrkernproben aus neuen Tunneln

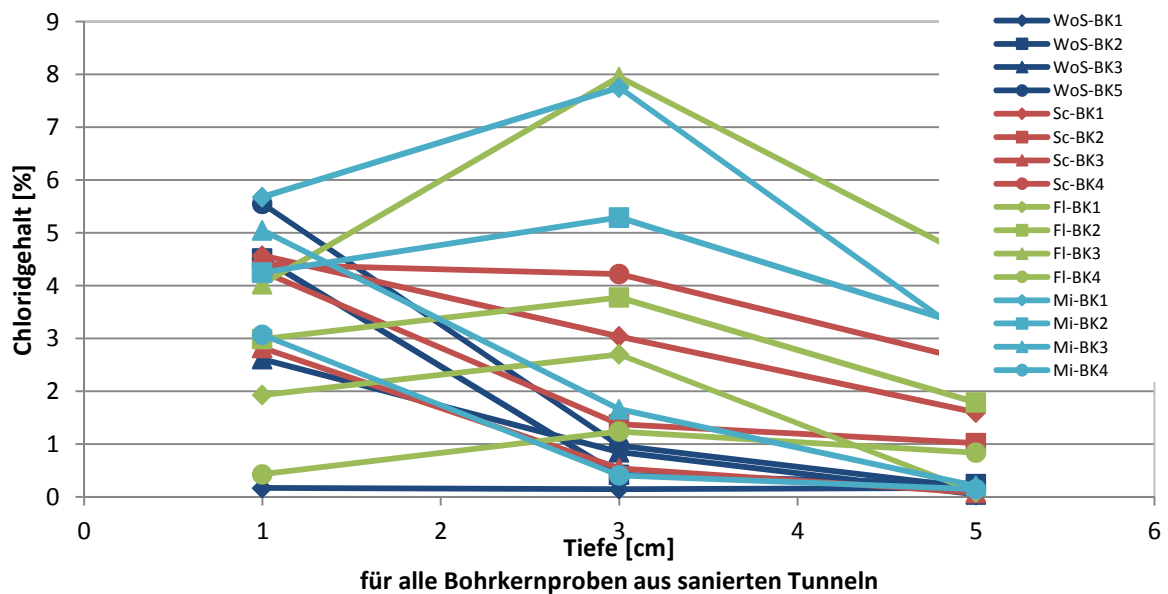
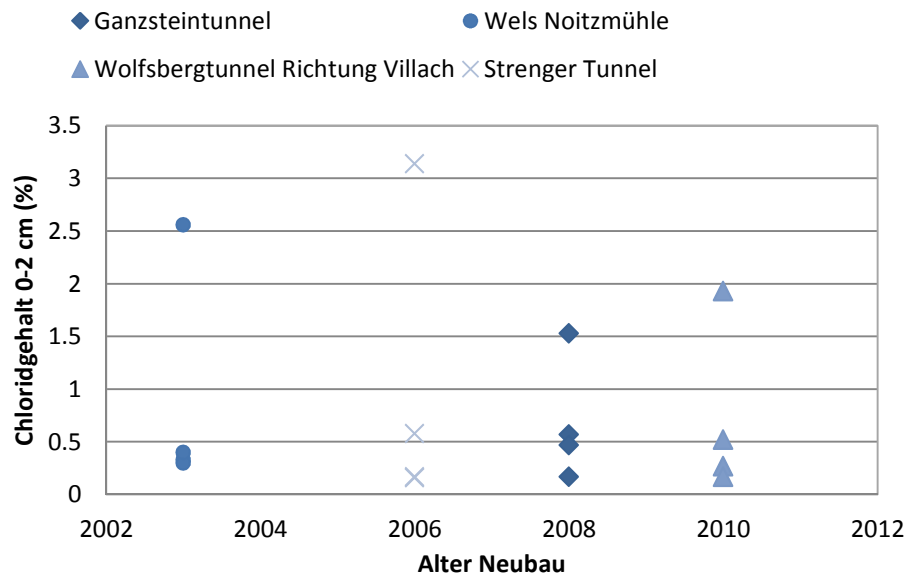


Abbildung 79: Chloridgehalt für alle Bohrkernproben aus sanierten Tunneln

Generell wiesen alle Neubauten eine geringere Chloridbelastung als Sanierungen auf. Bei den sanierten Bauwerken konnte außerdem oft in einer Tiefe von 2-4 cm ein Anstieg des Chloridgehaltes aufgrund der bereits vorhandenen Vorbelastung festgestellt werden.

Im Mittel ergaben sich für eine Entnahmetiefe von 0-2 cm  $0,83 \pm 0,92$  % im Neubau und  $3,52 \pm 1,59$  % bei Sanierungen.



**Abbildung 80: Zusammenhang Chloridgehalt - Alter im Neubau**

In Abbildung 80 ist der Zusammenhang zwischen Chloridgehalt und Alter für Neubauten dargestellt, da für diesen Fall eine Vorbelastung durch frühere Taumittelbehandlung ausgeschlossen werden kann. Pro Tunnel wurden je vier Bohrkern entnommen, wobei jeweils ein Bohrkern einen vergleichsweise hohen Chloridgehalt aufwies. Als Ursache für die erhöhten Messwerte kamen unterschiedliche Faktoren, wie Entnahmehöhe, Schichtdicke, Schädigung, etc. in Frage. Im Anschluss werden die Ursachen für die hohen Chloridgehalte der dargestellten Tunnelbauwerke erörtert.

Für den Tunnel Wels Noitzmühle wurde bei Bohrkern We-BK1 der höchste Chloridgehalt festgestellt. Dieser Bohrkern konnte trotz Riss in der Beschichtung allerdings auch die höchste Haftzugfestigkeit aufweisen. Da We-BK1 in einem Abstand von etwa 30 m vom Tunnelportal entnommen wurde, lässt sich der hohe Chloridgehalt vermutlich auf die stärkere Tausalzbelastung im Einfahrtsbereich zurückführen.

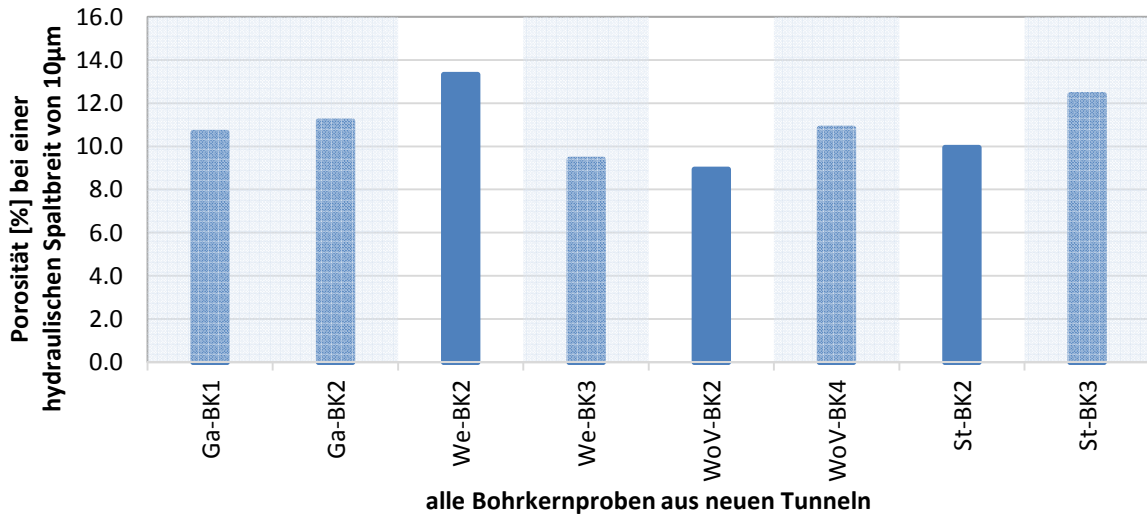
Der höchste Chloridgehalt wurde im Strenger Tunnel für den Bohrkern St-BK2 gemessen, auf dessen Oberfläche Abplatzungen sowie der höchste Wassergehalt, die niedrigste Haftzugfestigkeit und der niedrigste Reflexionsgrad festgestellt wurden. Eine Schädigung ist hier eindeutig vorhanden, außerdem ist ein Zusammenhang zwischen Chloridgehalt und Schadstellen gegeben. Ob nun die Schädigung aufgrund des Chloridgehaltes, Wassergehaltes, etc. entstanden ist, oder ob durch die Abplatzungen diese Substanzen erst eingedrungen sind, lässt sich leider im Nachhinein nicht mehr feststellen. Fest steht, dass eine Schädigung erfolgt ist, was auch durch den niedrigen Reflexionsgrad bewiesen wird. Alle anderen Bohrkern wurden als intakt bzw. mit nur feinen Abplatzungen beschrieben.

Im Ganzsteintunnel hatte Bohrkern Ga-BK3, welcher als intakt beschrieben wurde, den höchsten Chloridgehalt. Bei genauerer Analyse wurde festgestellt, dass dieser Bohrkern in ca. 230 cm Höhe entnommen wurde und dort einerseits ein anderes Beschichtungssystem aufgetragen wurde und andererseits die Schichtdicke etwa um die Hälfte geringer war als bei den anderen Bohrkernen.

Der Bohrkern WoV-BK3 mit dem höchsten Chloridgehalt aus dem Wolfsbergtunnel Richtung Villach wurde ebenfalls aus ca. 200 cm Höhe entnommen. Die deutlich geringere Schichtdicke ist die wahrscheinlichste Ursache für den hohen Messwert. Dieser Bohrkern wurde als schadhaft beschrieben (schwarze Stelle mit pulvriger Spachtelmasse).

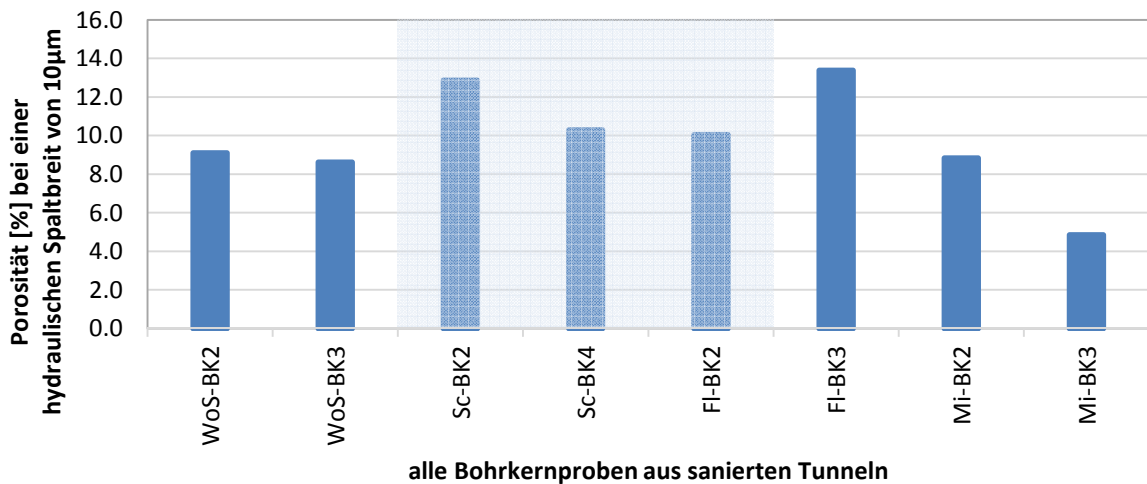
Mit Hilfe von Abbildung 80 konnten unterschiedliche Einflussfaktoren auf den Chloridgehalt dargestellt werden. Ein Zusammenhang zwischen Schädigung und Chloridgehalt ist bei einigen Bohrkernen gültig, es gibt aber noch weitere Parameter wie Entnahmehöhe oder Schichtdicke welche den Chloridgehalt signifikant beeinflussen können. Diese müssen für eine ganzheitliche Schadensanalyse ebenfalls miteinbezogen werden.

In weiterer Folge sind weitere Messwerte wie Gesamtporosität, Wassergehalt, Haftzugfestigkeit, etc. der entnommenen Bohrkernproben für alle neuen Tunnelbauwerke dargestellt.



**Abbildung 81: Gesamtporosität für alle Bohrkernproben aus neuen Tunneln (intakte Bohrkernproben sind hellblau hinterlegt)**

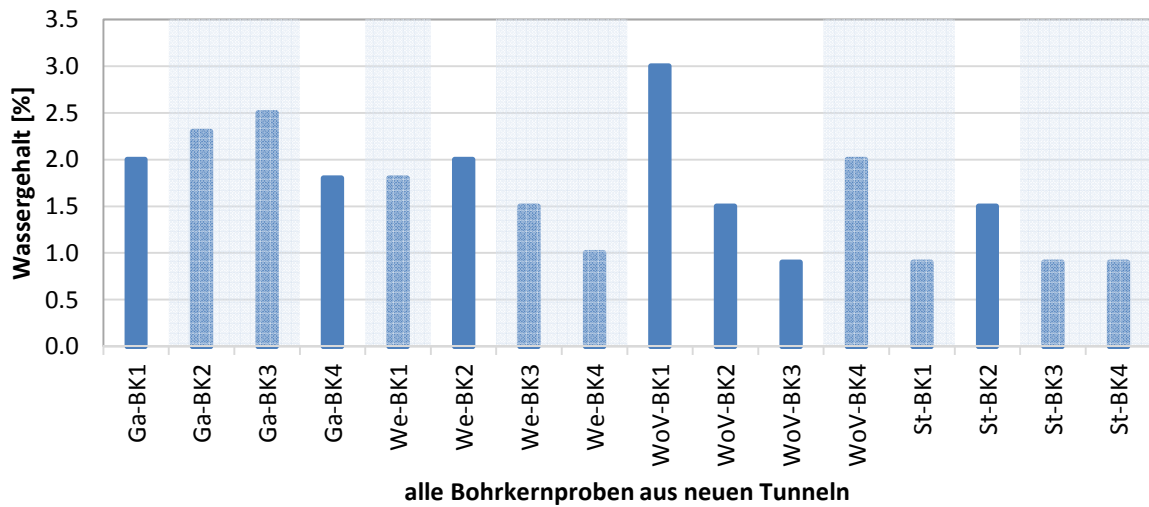
Abbildung 81 zeigt die Gesamtporosität für alle Neubauten. Es konnte kein Zusammenhang zwischen Porosität und Schadbild auf den Bohrkernen festgestellt werden.



**Abbildung 82: Gesamtporosität für alle Bohrkernproben aus sanierten Tunneln (intakte Bohrkernproben sind hellblau hinterlegt)**

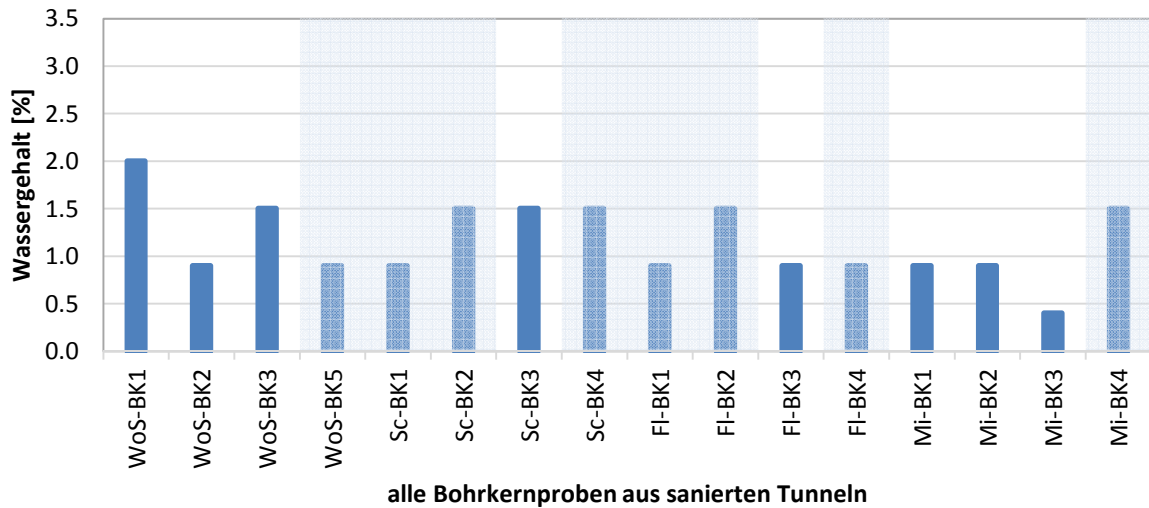
Auch für die Sanierungen konnte kein Zusammenhang zwischen Schadenshäufung und Porosität festgestellt werden. Generell lagen alle Werte in einem unbedenklichen Bereich.





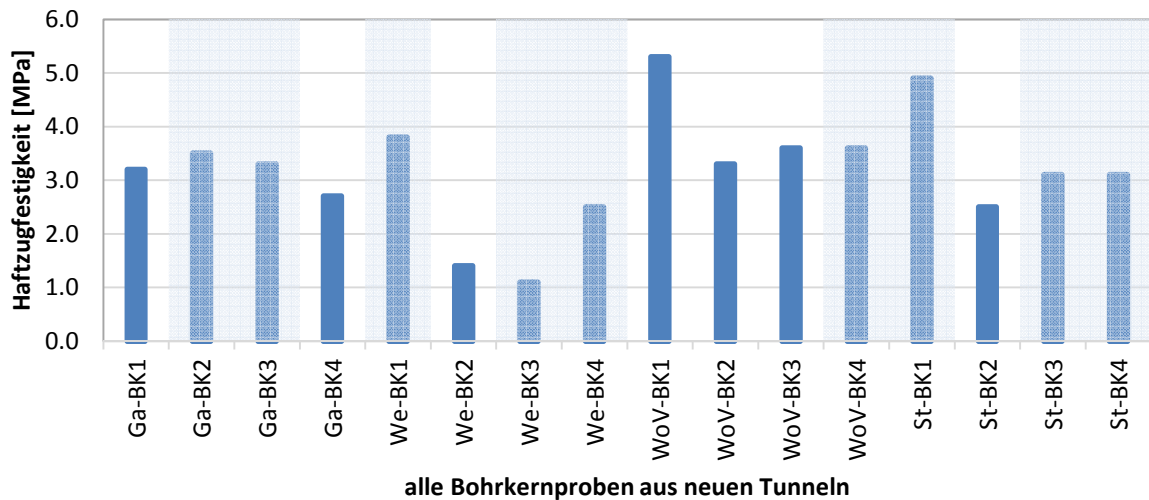
**Abbildung 83: Wassergehalt für alle Bohrkernproben aus neuen Tunneln (intakte Bohrkernproben sind hellblau hinterlegt)**

Bei einer Gegenüberstellung des Wassergehalts fallen die generell sehr niedrigen Werte für den Strenger Tunnel auf, besonders für dessen intakte Bohrkernproben. Für die restlichen Bohrkernproben aus den anderen Tunnelobjekten setzt sich dieser Trend allerdings nicht fort.



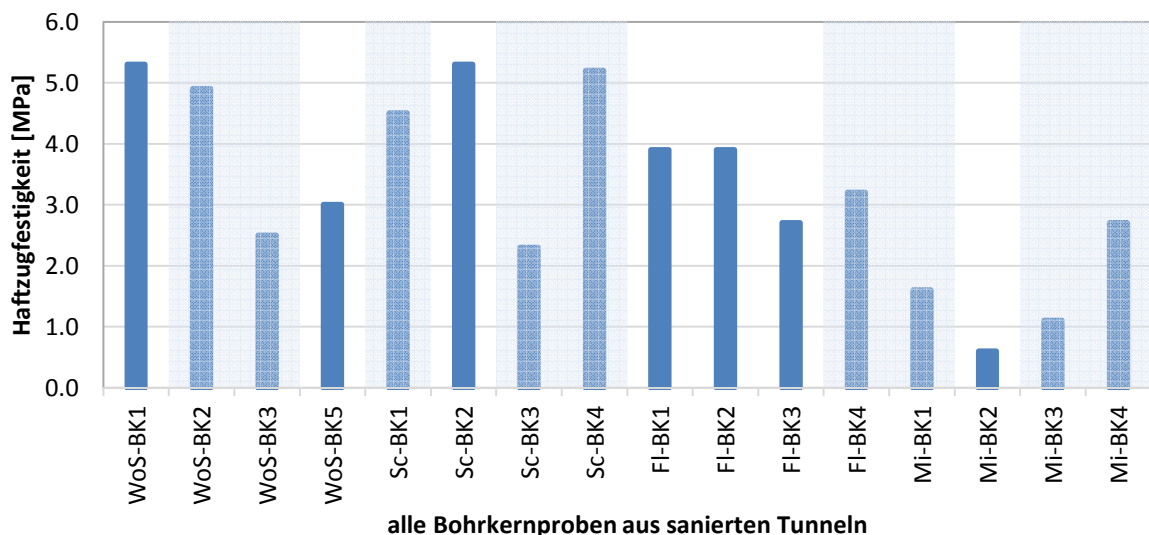
**Abbildung 84: Wassergehalt für alle Bohrkernproben aus sanierten Tunneln (intakte Bohrkernproben sind hellblau hinterlegt)**

Auch bei den Sanierungen war der Wassergehalt generell bei allen Bohrkernen sehr niedrig. Es konnte wiederum keine Aussage bezüglich Wassergehalt und Schadenshäufung getroffen werden.



**Abbildung 85: Haftzugfestigkeit für alle Bohrkern aus neuen Tunneln (intakte Bohrkern sind hellblau hinterlegt)**

Abschließend wurden die Haftzugfestigkeiten für alle Neubauten und alle Sanierungen einander gegenüber gestellt. Die Anforderungen laut Merkblatt „Tunnelbeschichtungen“ waren bis auf einen Bohrkern aus dem Tunnel Wels Noitzmühle erfüllt. Im Strenger Tunnel wiesen außerdem die als intakt beschriebenen Bohrkern die höchste Haftzugfestigkeit auf. Im Mittel ergab sich für die intakten Bohrkern eine Haftzugfestigkeit von  $3,2 \pm 1,1$  MPa, und für die schadhaften Bohrkern eine Haftzugfestigkeit von  $3,1 \pm 0,9$  MPa.



**Abbildung 86: Haftzugfestigkeit für alle Bohrkern aus sanierten Tunneln (intakte Bohrkern sind hellblau hinterlegt)**

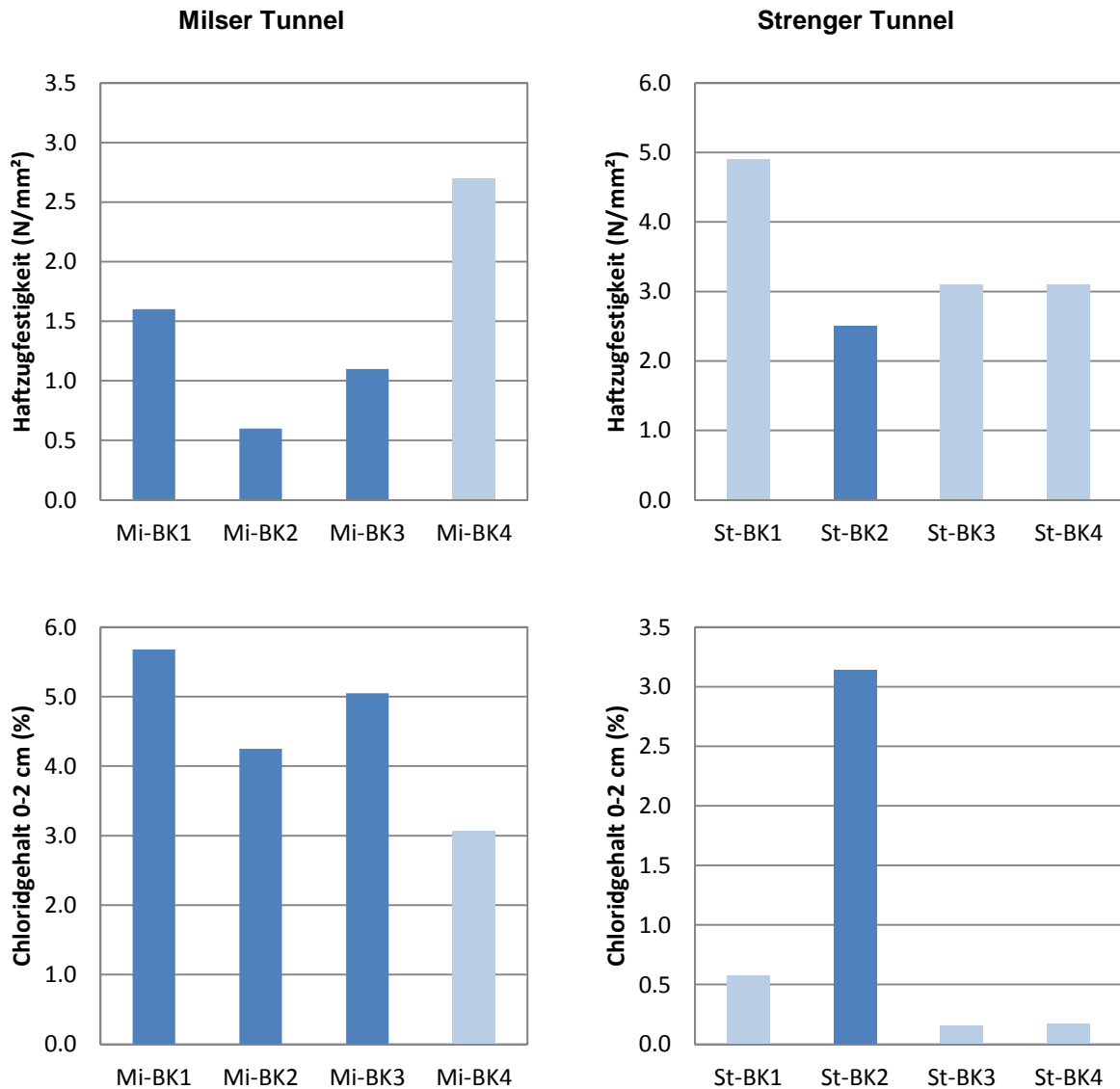
Die Haftzugfestigkeit der Bohrkern aus sanierten Tunnelbauwerken streute sehr stark, was auch an der Vorbelastung des Untergrundes liegen kann. Die Anforderungen laut Merkblatt waren in den meisten Fällen erfüllt.

## Fazit

Das Ziel der Tunnelbesichtigungen und der anschließenden Beprobung war es, einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Schadensbildern und Schadenshäufungen in einem Tunnelbauwerk und äußeren Einflüssen beziehungsweise messbaren Parametern herzustellen. Zwar konnte in Einzelfällen die Ursache eines bestimmten Schadens eruiert werden, ein allgemein gültiger Zusammenhang konnte allerdings nicht festgestellt werden. Generell wurden starke Streuungen der Messwerte beobachtet, was die Auswertung insbesondere im Hinblick auf die limitierte Anzahl an Bohrkernen mit einer gewissen Unsicherheit behaftet.

- ❖ Die im Merkblatt „*Tunnelbeschichtungen*“ vorgegebenen Grenzwerte bezogen auf den Wassergehalt und die Haftzugfestigkeit wurden zu fast 100 % erfüllt, auch auf oberflächlich geschädigten Stellen.
- ❖ Beim Chloridgehalt konnte ein Unterschied zwischen Sanierung und Neubau bemerkt werden. Die Chloridgehalte im Neubau waren in der oberflächennahen Schicht tendenziell niedriger als bei sanierten Bauwerken. Außerdem stiegen die Chloridwerte bei vielen Sanierungen in mittlerer Entnahmetiefe aufgrund der vorhandenen Vorbelastung wieder an. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Chloridgehalt und Schädigungsgrad konnte nicht für alle Tunnel festgestellt werden. Generell wurden sowohl für Sanierungen als auch für Neubauten gut erhaltene Tunneloberflächen besichtigt.
- ❖ Des Weiteren wurde bei der Gegenüberstellung von intakten und schadhafte Bohrkernen eines Beschichtungsherstellers (Fa. Avenarius Agro) eine höhere Haftzugfestigkeit für die intakten Bohrkern bestimmt (siehe Abbildung 77). Für intakte und schadhafte Bohrkern von allen Beschichtungsherstellern konnte dieser Trend nicht festgestellt werden. Da außerdem bei allen Beschichtungen bei der Prüfung der Haftzugfestigkeit Bruch im Beton auftrat, muss bei der Interpretation dieser Ergebnisse besonders der Einfluss aus Untergrundqualität und Untergrundvorbereitung miteinbezogen werden.
- ❖ Der in [5] veröffentlichte Zusammenhang zwischen Haftzugfestigkeit und Chloridgehalt an schadhafte Stellen konnte ebenfalls an einigen Tunnelobjekten festgestellt werden, beispielsweise im Milser Tunnel, im Strenger Tunnel (siehe auch Abbildung 80) sowie im Flirscher Tunnel. Auch bei einzelnen Bohrkernen anderer Tunnelobjekte beispielsweise WoS-BK5 aus dem Wolfsbergtunnel in Fahrtrichtung Salzburg trifft dies zu. Eine Gegenüberstellung der Haftzugfestigkeit und des Chloridgehaltes für diese beiden

Tunnel ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Die intakten Stellen sind jeweils hellblau, die schadhaften Stellen dunkelblau markiert.







**Abbildung 87: Gegenüberstellung Haftzugfestigkeit und Chloridgehalt für den Milser Tunnel und den Strenger Tunnel**

Alles in allem konnten durch die Tunnelbeprobung Hinweise auf die Ursachen von typischen Schadenfällen in Tunnelbauwerken gewonnen und eine umfassende Datenbasis aufgebaut werden. Ein allgemein gültiger Zusammenhang zwischen den gemessenen Laborparametern und Schadenshäufungen konnte allerdings keiner identifiziert werden. Besonders die Einflüsse von Verarbeitungstemperatur, Überarbeitungsintervallen und Sorgfältigkeit bzw. Sauberkeit während der Beschichtung lassen sich im Nachhinein nicht mehr feststellen.


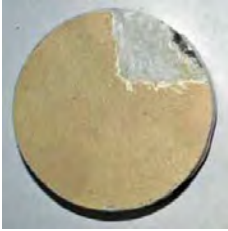


### 6.3.3 Chemische Analyse ausgewählter Tunnelbauwerke

Insgesamt wurden 11 Bohrkern aus verschiedenen Tunnelobjekten sowie eine Rückstellprobe aus dem Kalcherkogeltunnel einer chemischen Analyse unterzogen. In Tabelle 41 ist eine Übersicht über die untersuchten Proben dargestellt. Für jeden Bohrkern wurden FTIR Spektren des Anstrichs und der Spachtelung aufgenommen und DSC sowie TGA Analysen durchgeführt.

**Tabelle 41: Probenübersicht – chemische Analyse**

Nr.	Foto	Entnahmestelle	Beschreibung
Wolfsbergtunnel – RFB Salzburg Avenarius Agro   2010  Sanierung			
WoS-BK1		Block: S79 Entnahmeort: 17,2 m Entnahmehöhe: 50 cm	Feine Krakeleerisse
WoS-BK2		Block: S59 Entnahmeort: 255,5 m Entnahmehöhe: 50 cm	Weißer hellere Stelle und feine Krakeleerisse
WoS-BK3		Block: S59 Entnahmeort: 255,5 m Entnahmehöhe: 200 cm	Weißer hellere Stelle und feine Krakeleerisse
WoS-BK4		Block: S59 Entnahmeort: 255,5 m Entnahmehöhe: 170 cm	Weißer hellere Stelle

WoS-BK5		Block: S22 Entnahmeort: 255,5 m Entnahmehöhe: 50 cm	Intakter Bohrkern
WoS-BK7		Block: S79 Entnahmeort: 17,2 m Entnahmehöhe: 50 cm	Zusatzprobe: Bruchstück zwischen zwei Bohrkernen Feine Krakeleerisse
Wolfsbergtunnel – RFB Villach Avenarius Agro   2010   Neubau			
WoV-BK4		Block: V45 Entnahmeort: 485,6 m Entnahmehöhe: 50 cm	Intakter Bohrkern
Strenger Tunnel – RFB Innsbruck Mapei   2006   Neubau			
St-BK2		Block: S425 Entnahmeort: 792 m Entnahmehöhe: 50 cm	Feine Abplatzungen
St-BK3		Block: S283 Entnahmeort: 1784 m Entnahmehöhe: 50 cm	Intakter Bohrkern

Flirscher Tunnel – RFB Arlberg			
Sika   2006   Sanierung			
FI-BK2		Block: 18 Entnahmeort: 156 m Entnahmehöhe: 50 cm	Intakter Bohrkern
FI-BK3		Block: 18 Entnahmeort: 156 m Entnahmehöhe: 120 cm	Dunkle Schatten, leicht schlechterer Kreuzschnitt
Rückstellprobe Kalcherkogeltunnel			
Avenarius Agro   2004   Sanierung			
Ka-BK1		Entnahmeort nicht bekannt	Rückstellprobe aus dem Kalcherkogeltunnel Nur Spachtelung Keine Umwelteinflüsse
Ka-BK2		Entnahmeort nicht bekannt	Rückstellprobe aus dem Kalcherkogeltunnel Nur Spachtelung Keine Umwelteinflüsse

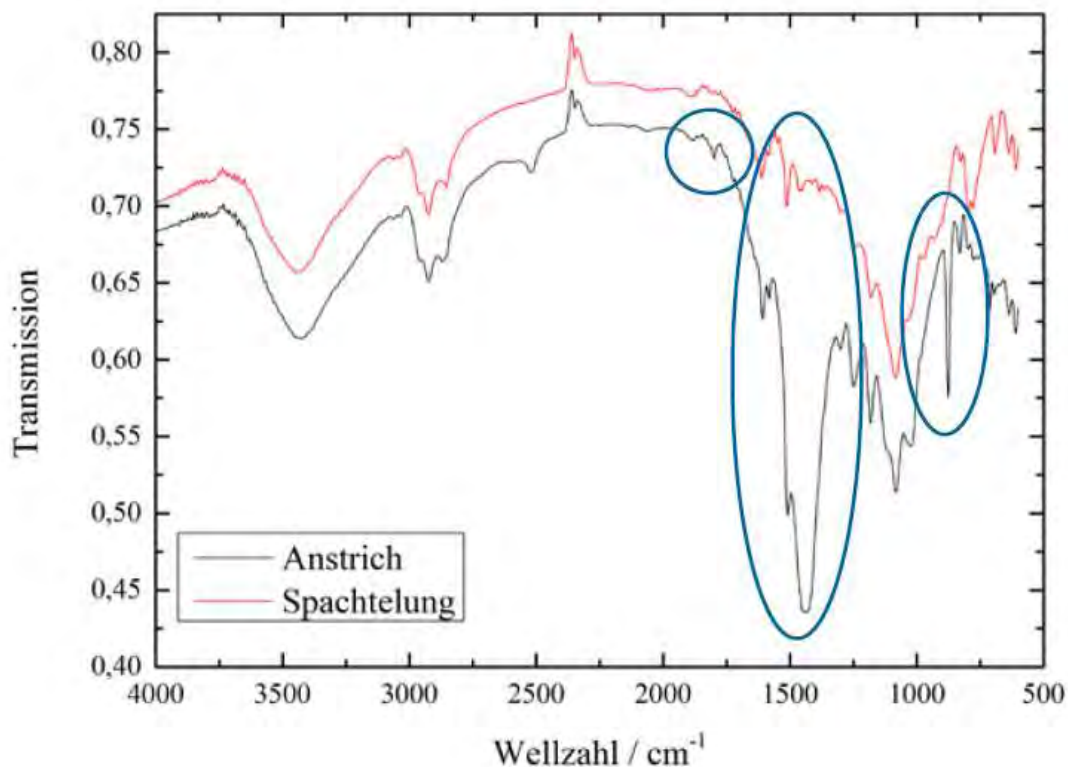
## FTIR

Die FTIR Spektroskopie erlaubt die Identifizierung von Polymeren und anderen organischen Verbindungen, indem die spezifische Absorption von Infrarot-Strahlung bestimmter Moleküle bzw. funktioneller Gruppen gemessen wird.

Im Anschluss sind ausgewählte Spektren definierter Bohrkerns aus Tabelle 41 einander gegenübergestellt wobei der Anstrich und die Spachtelung jeweils getrennt voneinander analysiert wurden.

Abbildung 88 zeigt die FTIR Aufnahmen von WoS-BK1 für Anstrich und Spachtelung. Für den Wolfsbergtunnel wurde ein Beschichtungssystem der Fa. Avenarius Agro verwendet, wobei bis in eine Höhe von 150 cm der Beton mit einer lösemittelfreien, 2-Komponenten - Grundierung (Agropox Kunststoffgrund) auf Epoxidharzbasis vorbereitet wurde. Auf diese Grundierung wurde eine quarzgefüllte, diffusionsdichte Epoxidharzspachtelung (Agropox TU

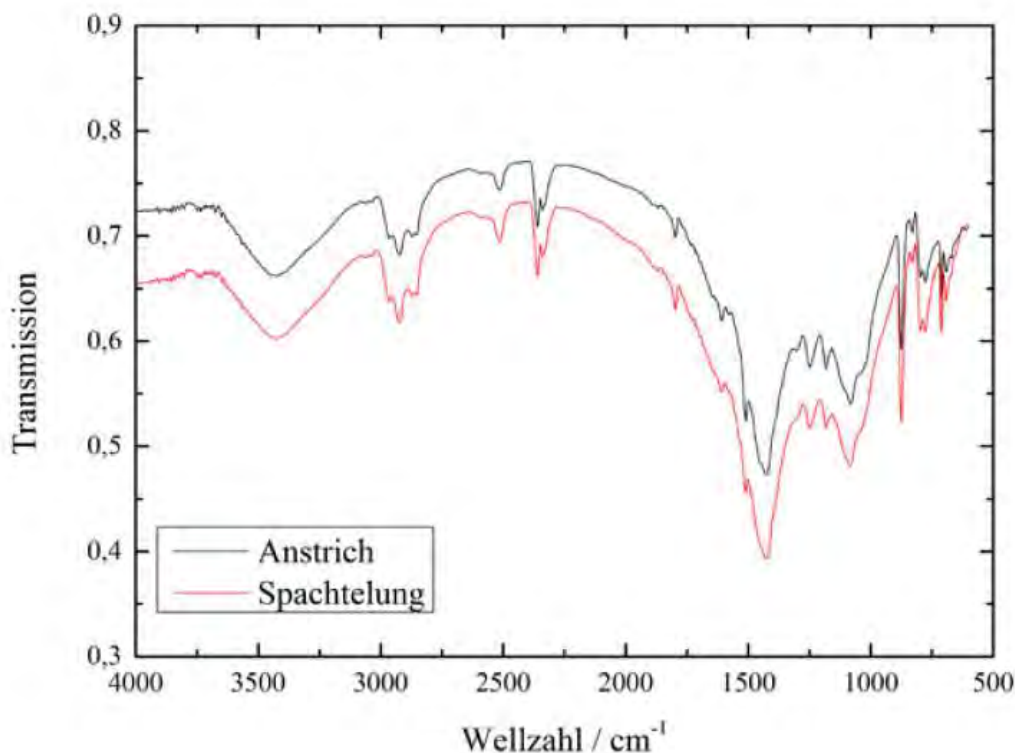
Spachtel LF mit Agropox TU Filler SF) aufgetragen, mit Aminen als Härterssystem. Der Anstrich erfolgte mit einer wasserbasierten Epoxidharzdispersion (Agropox TU GLF – Agropox TU Coat WB). Über 150 cm Höhe wurde auf eine entsprechende Grundierung verzichtet. Als Spachtelung wurde eine wasserbasierte, quarzgefüllte Epoxidharzdispersion (Agropox TU Spachtel) aufgetragen, beim Anstrich handelt es sich ebenfalls um eine wasserbasierte Epoxidharzdispersion (Agropox TU GLF – Agropox TU Coat WB). Laut Herstellerinformationen erfolgt die Härtung der wasserbasierten Systeme mittels Epichlorhydrin, während die lösemittelfreien Systeme Amine als Härterssystem beinhalten. Obwohl es sich bei beiden Beschichtungslagen um Epoxidharz-basierte Systeme handelt, war ein eindeutiger Unterschied zwischen wasserbasierten und lösemittelfreien Produkten zu sehen. Drei Banden (kleines Signal bei  $1798\text{ cm}^{-1}$ , breite und intensive Bande bei  $1428\text{ cm}^{-1}$ , scharfe intensive Bande bei  $875\text{ cm}^{-1}$ ) waren im Spektrum des Anstrichs zusätzlich erkennbar, welche aus den unterschiedlichen Härterssystemen resultierten. Eine genaue Zuweisung der Banden war aufgrund der Komplexität der Produktzusammensetzungen nicht im Detail möglich, allerdings konnten die Spektren qualitativ miteinander verglichen werden.



**Abbildung 88: FTIR Spektrum von WoS-BK1**



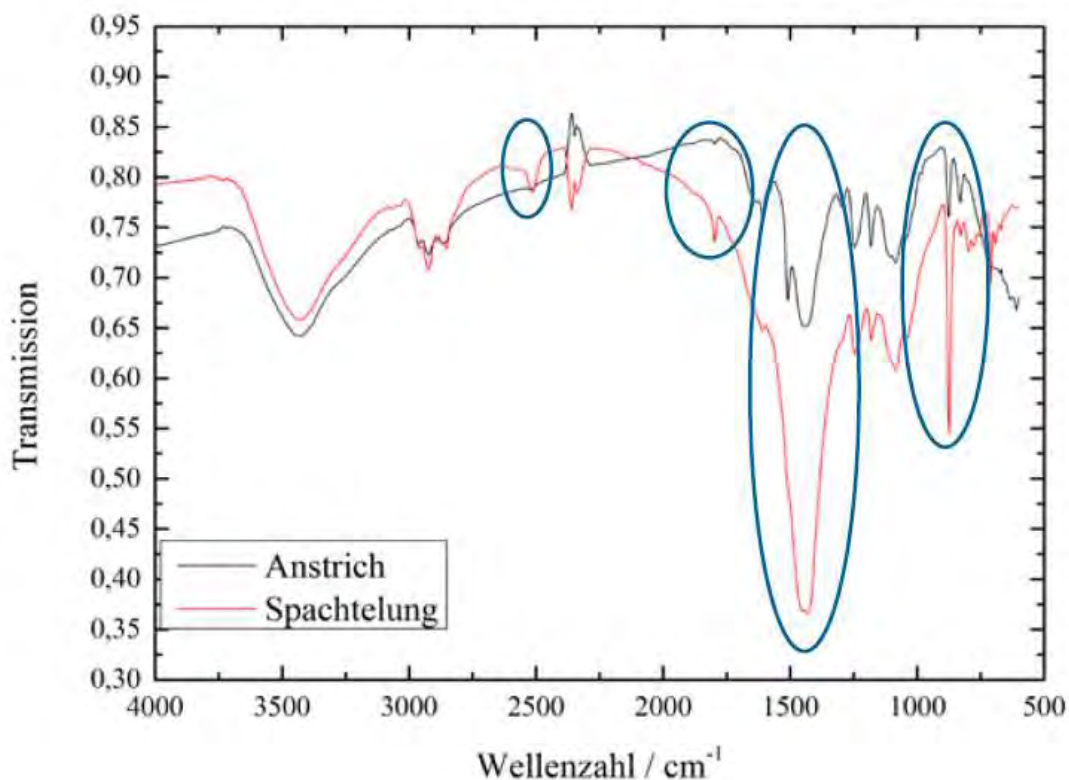
Zum Vergleich sind in Abbildung 89 die Spektren des Bohrkerns WoS-BK4 dargestellt. Dieser Bohrkern wurde in einer Höhe von 170 cm entnommen und unterscheidet sich deshalb im Schichtaufbau und den verwendeten Produkten vom vorherigen Bohrkern WoS-BK1. Bei beiden Beschichtungslagen handelt es sich um wasserbasierte Epoxidharzdispersionen, weshalb kein Unterschied in der chemischen Zusammensetzung feststellbar war. Bei gleichem Härterssystem war demnach keine Unterscheidung zwischen Spachtelung und Anstrich mittels FTIR möglich. Die Signale zeigten außerdem keinen signifikanten Unterschied im Vergleich mit dem Anstrich des WoS-BK1, da es sich bei den Anstrichen um das gleiche Produkt handelt.



**Abbildung 89: FTIR Spektrum von WoS-BK4**

Abgesehen von den Produkten der Fa. Avenarius Agro wurden außerdem Bohrkern mit Beschichtungssystemen der Fa. Sika und der Fa. Mapei analysiert. Abbildung 90 zeigt die FTIR Spektren des Anstrichs und der Spachtelung von St-BK2. Hier wurde bis in eine Höhe von 200 cm eine vollflächige Spachtelung (wasserbasierte Epoxidharzdispersion mit 20-25 % kristalliner Kieselsäure als Härter, Mapecoat WT) aufgetragen, ab einer Höhe von > 200 cm wurde nur mehr eine Lunkerspachtelung mit demselben Produkt ausgeführt. Der Tunnelanstrich erfolgte ebenfalls mit einer wasserbasierten Epoxidharzdispersion (Mapecoat TU) mit gleichem Härter. Vergleicht man Anstrich und Spachtelung des Herstellers

miteinander erkennt man im Falle der Spachtelung Banden bei ca.  $2500\text{ cm}^{-1}$  (carboxylische  $-\text{OH}$ -Schwingung), als auch bei  $1700\text{ cm}^{-1}$  (carboxylische C-O Schwingung). Es handelt sich wahrscheinlich um freie Carbonsäure, die voraussichtlich auf das Härtersystem zurückzuführen ist. Das sehr intensive Signal bei  $1450\text{ cm}^{-1}$ , welches nur bei wasserbasierten Dispersionen auftrat, ist ebenfalls auf das Härtersystem zurückzuführen. Im Falle des Anstrichs war es aber nicht so intensiv, weswegen Banden der aromatischen C-C- und C=C-Bindungen bei  $1509\text{ cm}^{-1}$  und  $1608\text{ cm}^{-1}$  erkennbar waren.

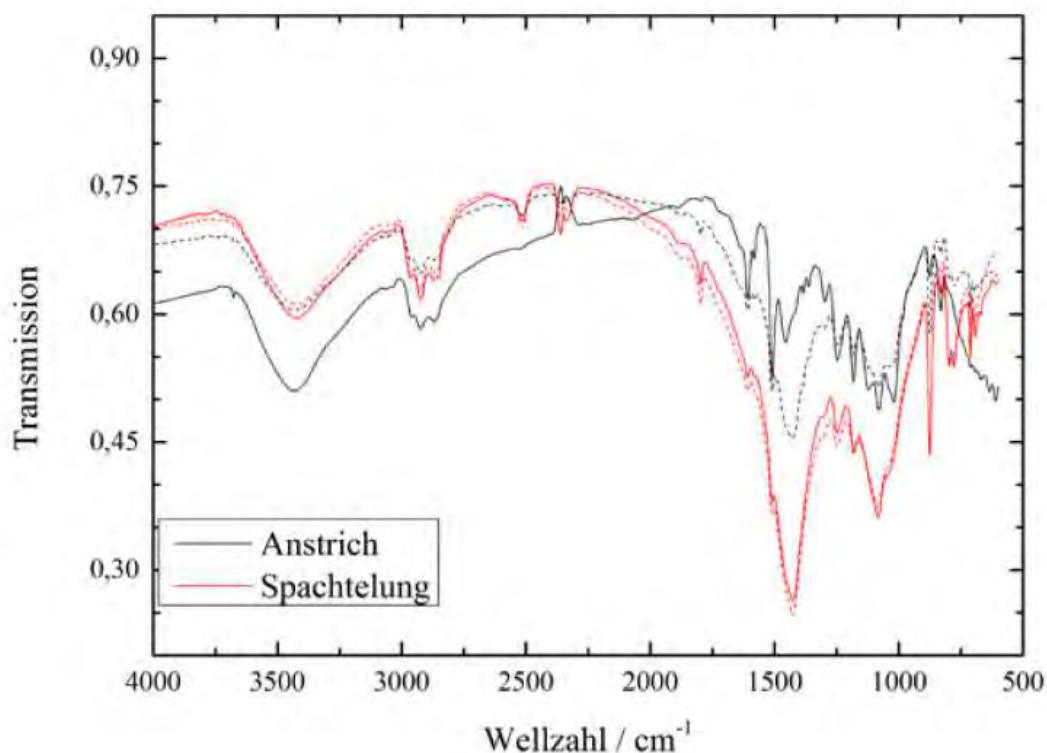


**Abbildung 90: FTIR Spektrum von St-BK2**

Vergleicht man das Spektrum in Abbildung 90 mit den Spektren der Produkte der Fa. Avenarius Agro (beispielsweise in Abbildung 88 oder Abbildung 89) so erkennt man grundsätzlich die gleichen Banden. Trotz unterschiedlicher Hersteller zeigten die FTIR-Spektren der Beschichtungsstoffe also eine ähnliche chemische Zusammensetzung obwohl von den Herstellern unterschiedliche Härtersysteme für die wasserbasierten Produkte angegeben wurden.

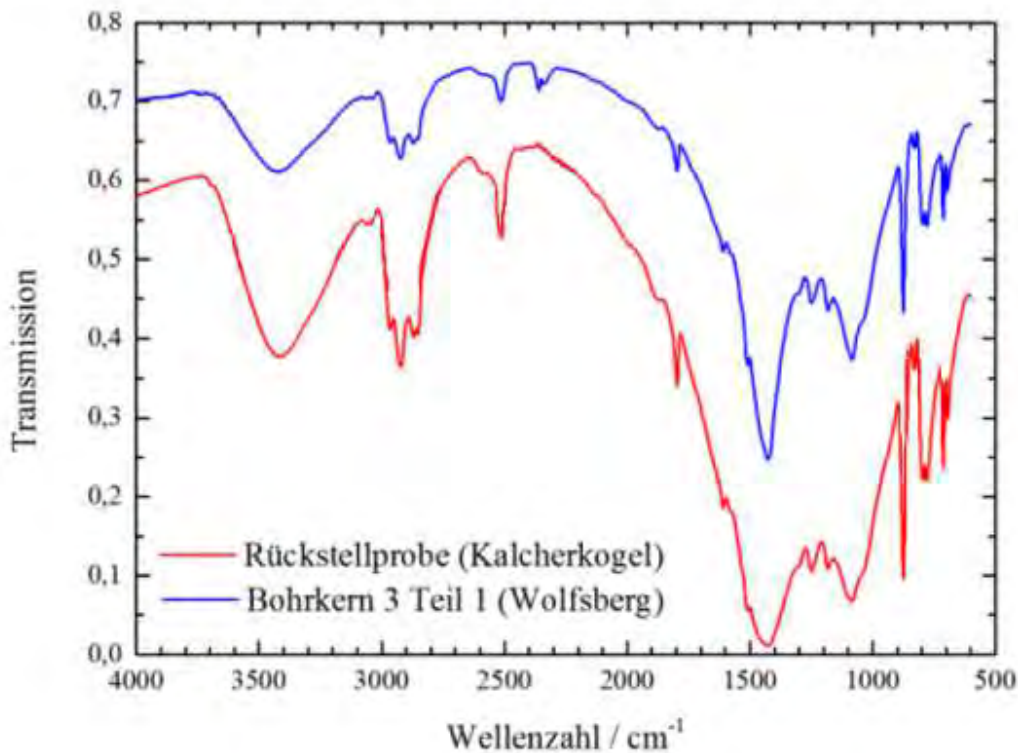
In einem nächsten Schritt wurde versucht die an den Bohrkernen festgestellten Schäden mittels FTIR-Analyse zu beschreiben. Dazu wurden die Spektren von Bohrkernen mit

unterschiedlichen Schadensbildern einander gegenübergestellt. In Abbildung 91 sind exemplarisch die Spektren des Bohrkerns WoV-BK4 den Spektren des Bohrkerns WoS-BK3 gegenübergestellt. WoV-BK4 hat einen intakten Anstrich während WoS-BK3 weiße Stellen und feine Krakeleerisse aufweist. Die Spektren der beiden Spachtelungen waren nahezu ident. Die Spektren der Anstriche wiesen leichte Unterschiede bezüglich der Intensität der beobachteten Banden auf. Für eine detailliertere Aussage müsste unbedingt die genaue Produktzusammensetzung bekannt sein, um die einzelnen Banden bestimmten Substanzen zuordnen zu können. Da die Absorption außerdem von der Menge an Probe abhängig ist, können sich Intensitätsunterschiede aufgrund der Einwaage ergeben.



**Abbildung 91: Vergleich der FTIR Spektren von WoV-BK4 und WoS-BK3  
(durchgezogene Linie ... WoV-BK4, gestrichelte Linie ... WoS-BK3)**

Des Weiteren wurde das Spektrum der Spachtelung einer Rückstellprobe mit dem Spektrum der Spachtelung des Wolfsbergtunnels verglichen, wie in Abbildung 92 zu sehen. Durch diese Gegenüberstellung wäre es möglich Alterungsprozesse im Spektrum sichtbar zu machen, da die Rückstellprobe aus dem Kalcherkogeltunnel keinen Umwelteinflüssen ausgesetzt war. Abbildung 92 zeigt allerdings keinen Unterschied zwischen den beiden Spachtelungen. Folglich konnten Alterungsphänomene an Tunnelbeschichtungen nicht mittels FTIR aufgezeigt werden. Da auf der Rückstellprobe kein Anstrich vorhanden war, konnte darüber keine Aussage getroffen werden.



**Abbildung 92: Vergleich der FTIR Spektren von Ka-BK1 und WoS-BK3**

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es mit Hilfe der FTIR-Analyse nicht möglich war bestimmte Schadensursachen eindeutig zu identifizieren. Auch das Messen von Alterungsvorgängen im Polymer war nicht durchführbar. Allerdings zeigten Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung der einzelnen Produkte sehr wohl Abweichungen im Spektrum. Lösemittelfreie und wasserbasierte Systeme können demzufolge voneinander unterschieden werden. Des Weiteren wurde festgestellt, dass sich die Produkte einzelner Hersteller nicht wesentlich in ihrem Spektrum bzw. ihrer chemischen Zusammensetzung unterscheiden.

## DSC

Bei der DSC handelt es sich um eine thermische Analyse bei der die abgegebene oder aufgenommene Wärmemenge einer Probe während einer Aufheizung oder Abkühlung aufgezeichnet wird. Für die Untersuchung polymerer Beschichtungstoffe besteht dadurch die Möglichkeit Phasenübergänge und Nacherhärtungsphasen zu detektieren und zu quantifizieren. In Tabelle 42 sind die Ergebnisse der DSC für alle untersuchten Tunnelbohrkerne aufgelistet. Für jede Probe wurde die Glasübergangstemperatur, die Nachhärteenthalpie und die Schmelztemperatur und Schmelzenthalpie bestimmt.

**Tabelle 42: Ergebnisse der DSC-Messungen**

Nr.		$T_g$ [°C]	$\Delta H$ [J*g <sup>-1</sup> ]	$T_m$ [°C]	$\Delta H_m$ [J*g <sup>-1</sup> ]
WoS-BK1	Anstrich	79,2	14,7		
	Spachtelung	96,6	2,5		
WoS-BK2	Anstrich	75,4	19,3		
	Spachtelung	97,7	2,9		
WoS-BK3	Anstrich	79,1	5,1		
	Spachtelung	81,3	5,4	129,2	1,2
WoS-BK4	Anstrich	77,9	10,9		
	Spachtelung	76,7	5,2	129,7	2,2
WoS-BK5	Anstrich	67,6	17,7		
	Spachtelung	97,9	2,3		
WoS-BK7	Anstrich	77,7	17,9		
	Spachtelung	95,3	2,9		
WoV-BK4 <sup>1</sup>	Anstrich	72,4	15,8		
	Spachtelung	68,5	9,1	129,5	1,2
St-BK2	Anstrich	62,2	27,8		
	Spachtelung	53,9	17,9		
St-BK3	Anstrich	67,6	27,9		
	Spachtelung	56,1	20,3		
FI-BK2	Anstrich	71,2	24,7		
	Spachtelung <sup>2</sup>	87,8	44,6	129,1	5,8
FI-BK3	Anstrich	69,0	25,0		
	Spachtelung	73,6	7,1		
Ka-BK1	Anstrich	-	-		
	Spachtelung	66,5	11,1	129,1	1,9
Ka-BK2	Anstrich	-	-		
	Spachtelung	63,4	12,7	129,1	2

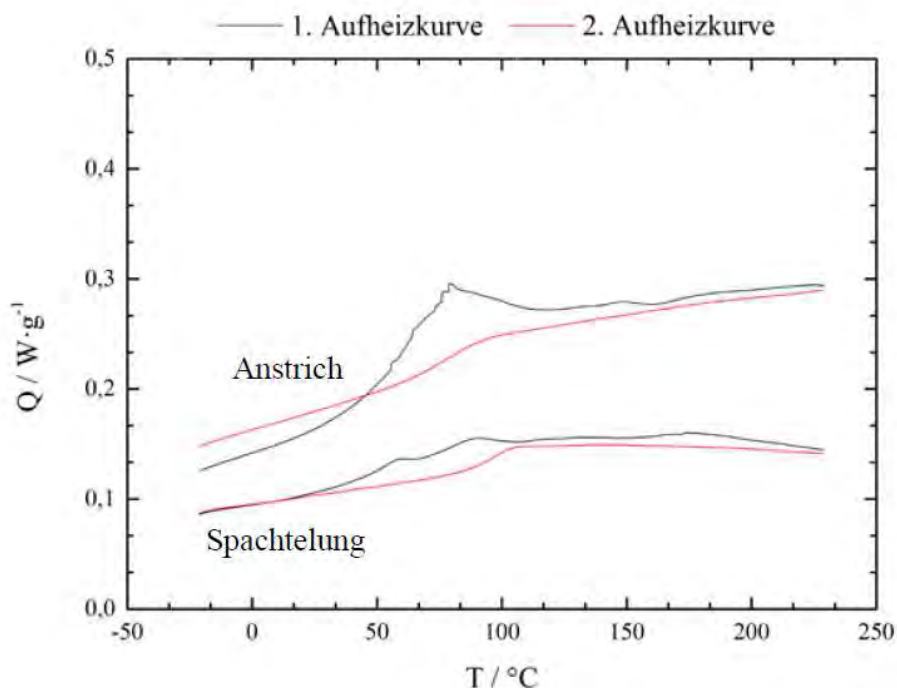
$T_g$  ... Glasübergangstemperatur in [°C]  
 $\Delta H$  ... Nachhärteenthalpie in [J\*g<sup>-1</sup>]  
 $T_m$  ... Schmelztemperatur in [°C]  
 $\Delta H_m$  ... Schmelzenthalpie in [J\*g<sup>-1</sup>]

Die Glasübergangstemperatur kennzeichnet die Temperatur, bei der ganz oder teilweise amorphe Polymere von dem hochviskosen oder gummielastischen, flexiblen Zustand in den glasartigen oder hartelastischen, spröden Zustand übergehen. Jeder Kunststoff besitzt eine spezifische Glasübergangstemperatur, da diese von dessen chemischer Natur abhängt. So beeinflussen beispielsweise die Kettensteifigkeit, intermolekulare Kräfte, die Molmasse, Vernetzungen, Endgruppen, die Kristallinität, die Taktizität sowie Plastifizierungsmittel ("Weichmacher") die Glasübergangstemperatur. Der Vernetzungsgrad von Polymeren beeinflusst ebenfalls  $T_g$ . Eine steigende Netzwerkdicke erhöht aufgrund der Verringerung des freien Volumens der Probe die Glasübergangstemperatur. Wichtig ist, dass Epoxidharze in der Regel keine 100 prozentige Vernetzung für eine einwandfreie Funktion und Haftung benötigen. Allerdings hilft die Bestimmung der Glasübergangstemperatur Unterschiede zwischen den Bohrkernen festzustellen.

<sup>1</sup> Besonders breites Nachhärtesignal.

<sup>2</sup> Das Nachhärtesignal geht in den Schmelzpeak über.

Während eines Messdurchganges wurde die Probe im Ofen zuerst auf  $-30\text{ °C}$  abgekühlt und mit einer Heizrate von  $10\text{ K/min}$  auf  $250\text{ °C}$  erhitzt (1. Aufheizkurve). Bei gleicher Rate wurde anschließend wieder auf  $-30\text{ °C}$  abgekühlt (Abkühlkurve) und danach wieder auf  $250\text{ °C}$  aufgeheizt. Abbildung 93 zeigt exemplarisch die aufgenommene Wärmestromkurve für den Bohrkern WoS-BK1. Vergleicht man die 1. Aufheizkurve mit der 2. Aufheizkurve, so erkennt man ein irreversibles, endothermes Signal im Bereich der Glasübergangstemperatur. Dabei handelt es sich vermutlich um die Nachhärteenthalpie der jeweiligen Beschichtungslage. Diese gibt ebenfalls einen Hinweis auf den Vernetzungsgrad eines Polymers. Je niedriger der Wert, umso weniger Energie muss vom System für den Phasenübergang aufgenommen werden, das System ist wahrscheinlich gut vernetzt. Die Nachhärteenthalpie wurde mittels Integration der 1. Aufheizkurve bestimmt und ist aufgrund der Schwierigkeit eine geeignete Basislinie zu wählen mit einer gewissen Ungenauigkeit behaftet. Die angegebenen Werte sind deshalb nicht als absolut zu interpretieren sondern nur für den Vergleich innerhalb der geprüften Bohrkerns geeignet. Des Weiteren wurde bei der Analyse einzelner Spachtelungen eine Komponente mit einem Schmelzpunkt bei ca.  $129\text{ °C}$  und einer Schmelzenthalpie von einigen  $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$  registriert. Abbildung 94 zeigt den Verlauf der Wärmestromkurve für diesen Fall.



**Abbildung 93: Wärmestromkurve von Anstrich und Spachtelung der Probe WoS-BK1**

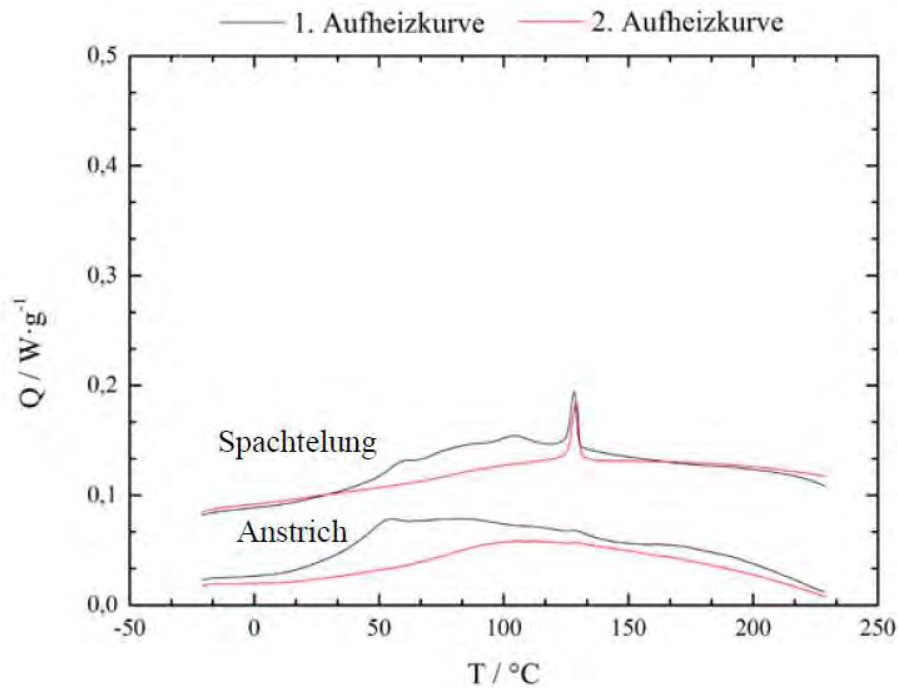


Abbildung 94: Wärmestromkurve von Anstrich und Spachtelung der Probe WoS-BK3

Abgesehen vom generellen Messprozedere soll anschließend auf die Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Messergebnisse der einzelnen Bohrkerne eingegangen werden. Der Wolfsbergtunnel wurde in beiden Richtungen mit einem Beschichtungssystem der Fa. Avenarius Agro ausgestattet, wobei sich der Aufbau je nach Tunnelhöhe leicht unterscheidet (siehe Tabelle 10 und Tabelle 11 in Kapitel 6.2.1).

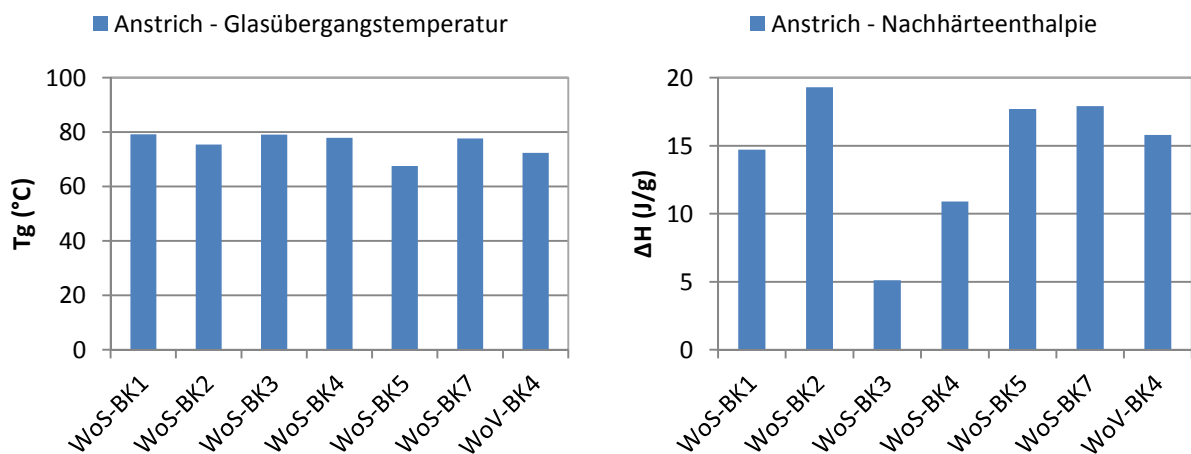
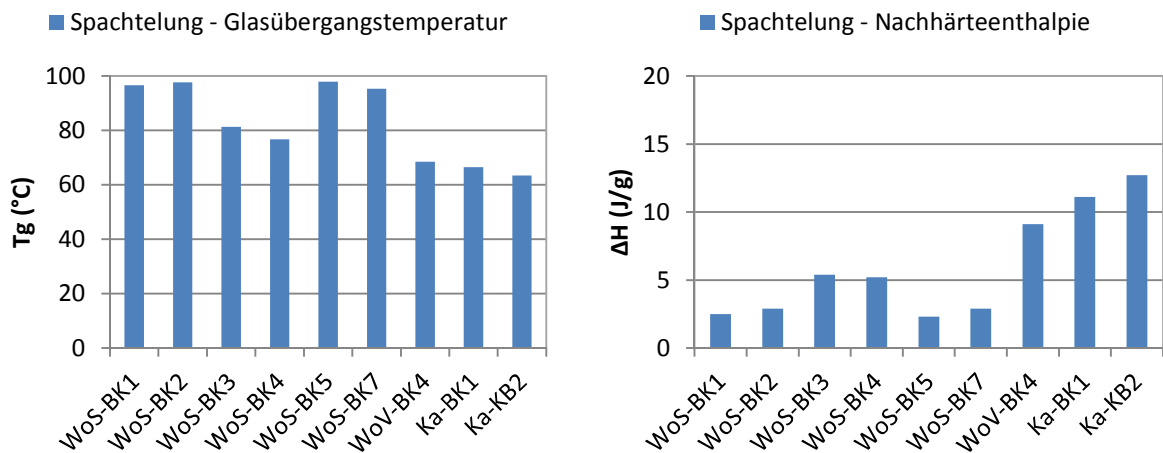


Abbildung 95: Ergebnisse der DSC-Messungen für die Anstriche (Wolfsbergtunnel – beide Fahrrichtungen)

Generell lagen die Glasübergangstemperaturen der Anstriche nahe beieinander wie in Abbildung 95 dargestellt. Bei einem Großteil der Proben wurden Glasübergangstemperaturen zwischen 75 °C und 80 °C gemessen. Nur der WoS-BK5 und der Bohrkern aus der Tunnelröhre in Fahrtrichtung Villach WoV-BK4 zeigten etwas niedrigere Werte. Auch die Nachhärteenthalpien, ebenfalls in Abbildung 95 zu sehen, lagen meist bei  $> 15 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$  außer bei WoS-BK3 und WoS-BK4. Diese beiden Bohrkern wurden aus einer Höhe  $> 150 \text{ cm}$  entnommen, wodurch sich der Beschichtungsaufbau vom Aufbau der anderen Bohrkern unterscheidet. In Summe zeigten die Messwerte also keinen eindeutigen Zusammenhang mit dem festgestellten Schadensbild, lediglich auf die Entnahmhöhe konnte mit Hilfe der Nachhärteenthalpie geschlossen werden.

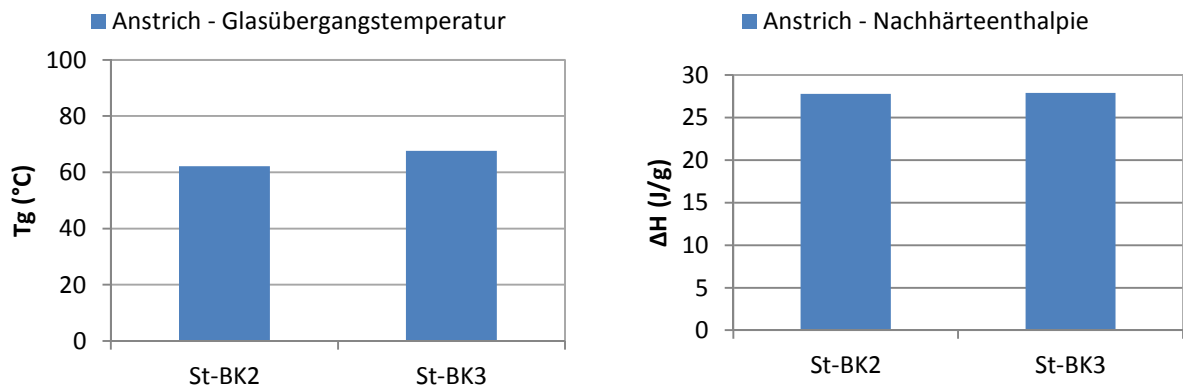
Für die Spachtelung im Wolfsbergtunnel wurde je nach Beschichtungshöhe entweder ein lösemittelfreies oder ein wasserbasiertes System verwendet. Die lösemittelfreien Proben (WoS-BK1, WoS-BK2, WoS-BK5 und WoS-BK7) zeigten Glasübergangstemperaturen zwischen 95 °C und 98 °C und Nachhärteenthalpien von 2,3 bis  $2,9 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ , wie in Abbildung 96 dargestellt. Die Ergebnisse der Bohrkernproben mit wasserbasierter Spachtelung (WoS-BK3, WoS-BK4 und WoV-BK4) ähnelten tendenziell den Messwerten der wasserbasierten Anstriche. Die Glasübergangstemperaturen lagen im selben Temperaturbereich, allerdings waren die Nachhärteenthalpien signifikant niedriger. Weiters konnte bei allen wasserbasierten Spachtelungen ein Schmelzsignal bei ca. 129 °C aufgezeichnet werden. Damit unterschied sich die lösemittelfreie Spachtelung eindeutig vom wasserbasierten System, wie bereits während der Auswertung der FTIR-Analysen festgestellt werden konnte. Für den Wolfsbergtunnel standen außerdem noch zwei Rückstellproben aus dem Kalcherkogeltunnel zur Verfügung, welche ebenfalls mit einer wasserbasierten Spachtelung der Fa. Avenarius Agro beschichtet wurden. Im Vergleich mit den realen Bohrkernproben lagen die Glasübergangstemperaturen etwas niedriger bei 63,4 °C und 66,5 °C und die Nachhärteenthalpien etwas höher bei  $11,1 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$  und  $12,7 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ . Dies lässt eventuell auf ein weniger ausgehärtetes System der Rückstellproben schließen, beziehungsweise läuft die Nachhärtung im Tunnel unter strengeren Bedingungen ab. Eine grafische Gegenüberstellung ist in Abbildung 96 zu sehen.





**Abbildung 96: Ergebnisse der DSC-Messungen für die Spachtelungen (Wolfsbergtunnel – beide Fahrrichtungen)**

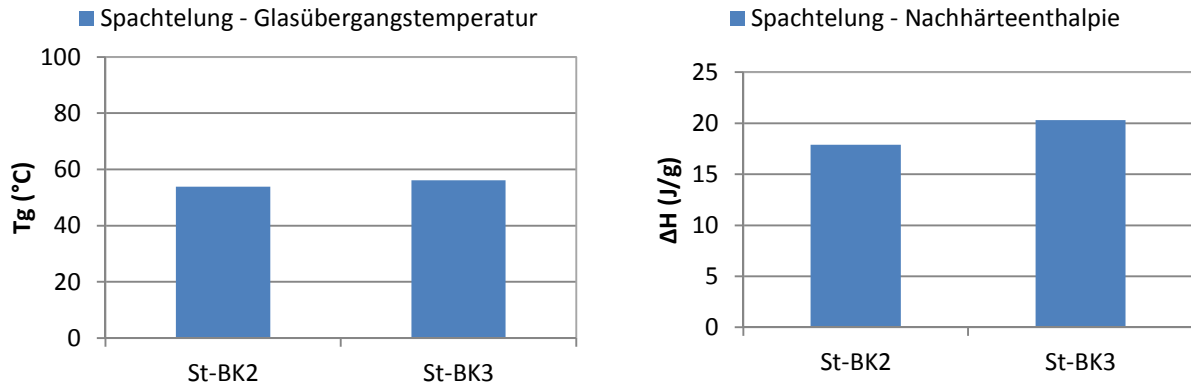
Aus dem Strenger Tunnel, welcher mit einem System der Fa. Mapei beschichtet wurde, wurden ebenfalls 2 Bohrkernproben untersucht. Die Anstriche zeigten, trotz unterschiedlichen Schadensbildern ähnliche Messergebnisse, sowohl bei der Glasübergangstemperatur als auch bei der Nachhärteenthalpie, wie in Abbildung 97 dargestellt. Im Vergleich zum Wolfsbergtunnel wurden für die Glasübergangstemperaturen niedrigere Werte und für die Nachhärteenthalpien tendenziell höhere Werte bestimmt.



**Abbildung 97: Ergebnisse der DSC-Messungen für die Anstriche (Strenger Tunnel)**

Bei den Messergebnissen der Spachtelung waren ebenfalls nur geringe Schwankungen in der Glasübergangstemperatur und der Nachhärteenthalpie bemerkbar, wie in Abbildung 98 zu sehen. Allerdings sind bei beiden Bohrkernen die Ergebnisse für die Glasübergangstemperatur niedriger und die Nachhärteenthalpie signifikant höher als die Spachtelungen im Wolfsbergtunnel, wie bereits bei den Anstrichen festgestellt. Die Unterschiede zum Wolfsbergtunnel könnten einerseits in den veränderten

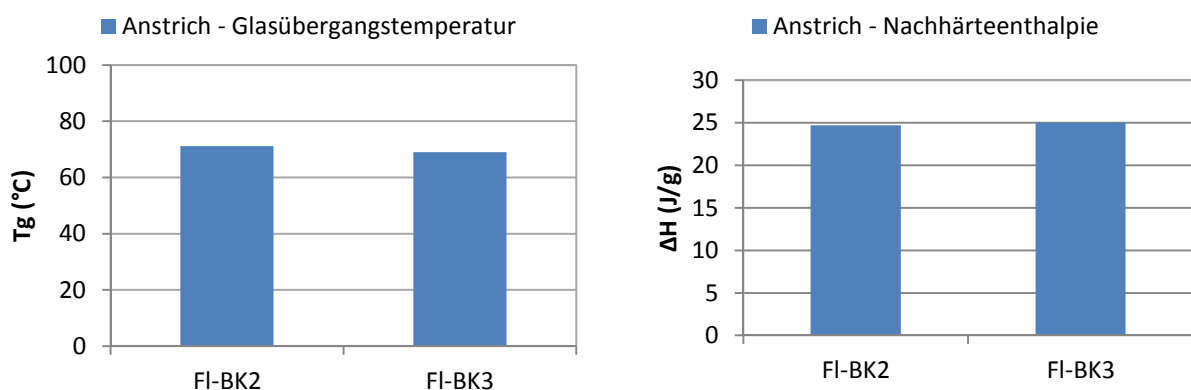
Umgebungsbedingungen beispielsweise während der Verarbeitung oder auch an den Produkten selbst liegen.



**Abbildung 98: Ergebnisse der DSC-Messungen für die Spachtelungen ( Strenger Tunnel)**

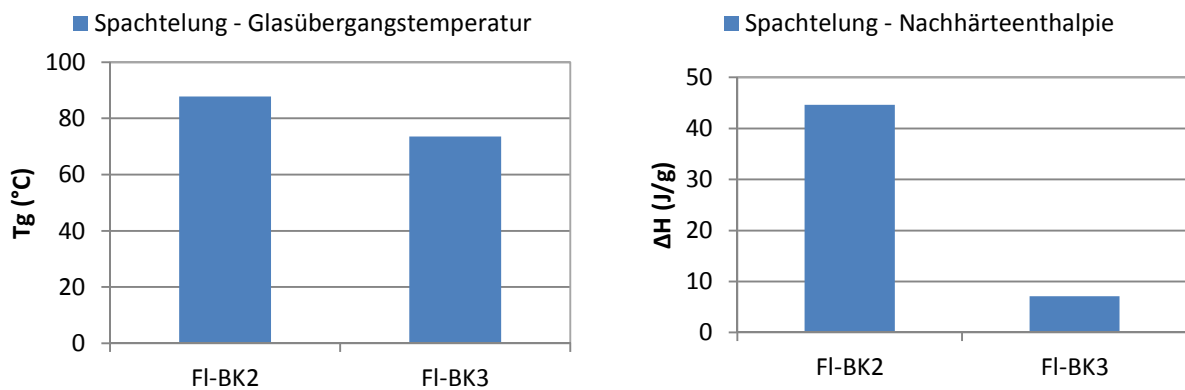
Obwohl die Bohrkerne aus dem Strenger Tunnel unterschiedliche Schadensbilder aufwiesen, St-B2 zeigte Abplatzungen, St-BK3 war intakt, wurden mittels DSC sehr ähnliche Messwerte erhalten. Bei diesen beiden Bohrkernen konnte kein Zusammenhang zwischen den Ergebnissen und dem Zustand der Beschichtungen hergestellt werden.

Auch aus dem Flirscher Tunnel, welcher mit Produkten der Fa. Sika ausgestattet wurde, wurden Anstrich und Spachtelung von je zwei Bohrkernen mittels DSC untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 99 und Abbildung 100 gegenübergestellt. Für die Anstriche wurden relativ ähnliche Messwerte für die Glasübergangstemperatur und die Nachhärteenthalpie erhalten. Die Glasübergangstemperatur lag außerdem nur etwas niedriger als im Wolfsbergtunnel; die Nachhärteenthalpien waren tendenziell höher.



**Abbildung 99: Ergebnisse der DSC-Messungen für die Anstriche ( Flirscher Tunnel)**

Die lösemittelfreie Spachtelung aus dem Flirscher Tunnel zeigte sehr unterschiedliche Messergebnisse. Generell wies FI-BK2 höhere Glasübergangstemperaturen und höhere Nachhärteenthalpien auf. Eine Nachhärteenthalpie von  $44,6 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$  ist außerdem außergewöhnlich hoch. Dieser Messwert kann allerdings auch auf die erschwerte Auswertung zurückzuführen sein, da das Nachhärtesignal in den Schmelzpeak überging. Bei FI-BK3 wurden tendenziell niedrigere Werte gemessen, diese sind vergleichbar mit den wasserdispergierten Spachtelungen der Fa. Avenarius Agro.



**Abbildung 100: Ergebnisse der DSC-Messungen für die Spachtelungen ( Flirscher Tunnel)**

Auch beim Flirscher Tunnel wurden zwei Bohrkern mit unterschiedlichem Schadensbild untersucht. FI-BK2 wurde als intakt beschrieben, FI-BK3 wies dunkle Schatten und einen leicht schlechteren Kreuzschnitt auf. Für die Anstriche konnte mit Hilfe der DSC keine Unterscheidung der beiden Bohrkern getroffen werden. Die Spachtelung ergab hingegen schon eine Abweichung. Allerdings wurde für den FI-BK3, welcher eine schadhafte Beschichtung aufwies, eindeutig eine niedrigere Nachhärteenthalpie bestimmt. Dies würde eigentlich auf ein besser vernetztes System deuten. Da allerdings auch die Glasübergangstemperatur niedriger ist als die von FI-BK2 könnte auch das Gegenteil der Fall sein. Eine niedrige Glasübergangstemperatur bedeutet ein tendenziell schlechter vernetztes System. Aufgrund dieser gegensätzlichen Messergebnisse ließ sich keine genaue Aussage zum Zustand des Bohrkerns FI-BK3 treffen.

## TGA

Die Untersuchung der Bohrkernproben wurde durch eine thermogravimetrische Analyse (TGA) abgerundet, bei der die Massenänderung einer Probe in Abhängigkeit von der Temperatur und Zeit gemessen wird. Dadurch ermöglicht die TGA die Charakterisierung der thermischen Beständigkeit bestimmter Substanzen, außerdem kann beispielsweise der Verlust von Wasser, Lösemittel, Weichmacher oder auch der Gehalt an Füllstoffen untersucht werden. Wie auch bei den vorherigen Analysen wurden Anstrich und Spachtelung getrennt behandelt. Eine Übersicht über die erhaltenen Ergebnisse ist in Tabelle 43 zusammengefasst. Während der Messung wurde die Probe unter Stickstoffatmosphäre zuerst auf 500 °C und anschließend unter Luft auf 700 °C aufgeheizt. Aus dem aufgezeichneten Temperaturverlauf wurden die Temperatur bei 96 % der Ausgangsmasse ( $T_{96\%}$ ), die Temperatur bei der maximalen Massenänderung ( $T_{\Delta m, \max}$ ) sowie die Restmasse ( $m_r$ ) bestimmt.

**Tabelle 43: Ergebnisse der TGA-Messungen**

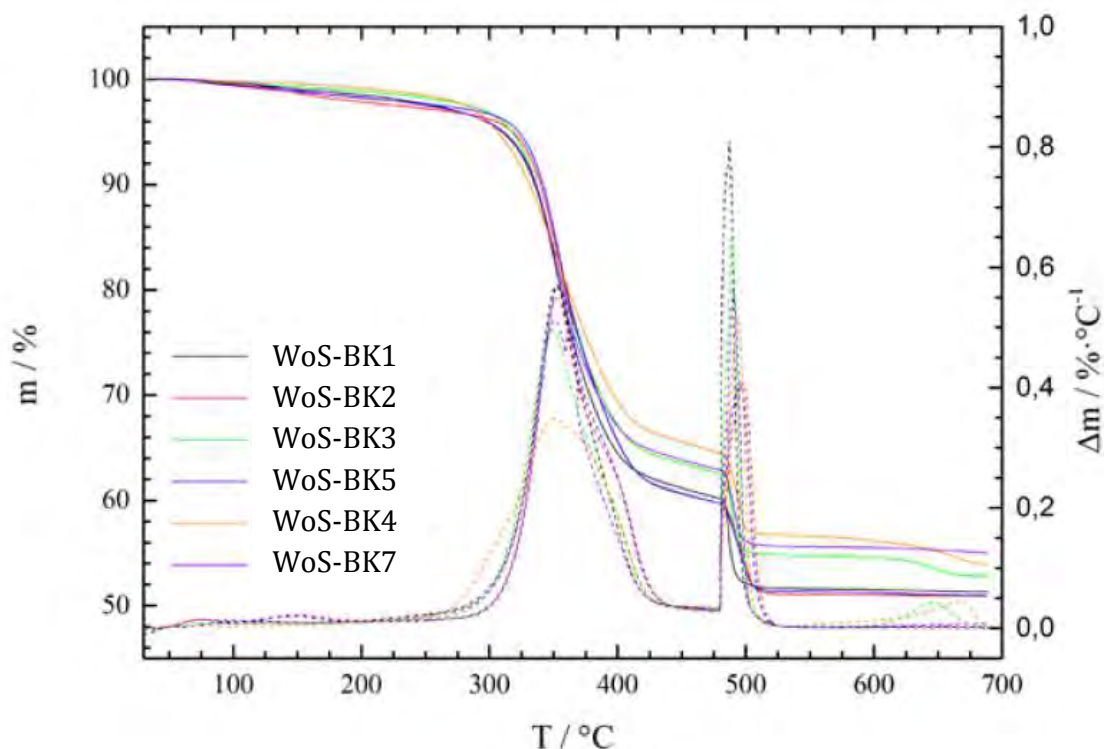
Nr.		$T_{96\%}$ [°C]	$T_{\Delta m, \max}$ [°C]	$m_r$ [%]
WoS-BK1	Anstrich	294,9	352,3	51,2
	Spachtelung	316,2	356,9	68,3
WoS-BK2	Anstrich	302,3	352,0	50,9
	Spachtelung	295,9	353,2	65,9
WoS-BK3	Anstrich	307,3	349,3	52,7
	Spachtelung	277,9	333,8	72,2
WoS-BK4	Anstrich	296,6	350,4	53,8
	Spachtelung	263,6	341,4	69,8
WoS-BK5	Anstrich	311,0	353,1	50,9
	Spachtelung	302,8	354,8	66,6
WoS-BK7	Anstrich	291,6	348,7	54,8
	Spachtelung	318,1	352,3	70,1
WoV-BK4	Anstrich	318,8	353,1	51,4
	Spachtelung	322,3	355,0	56,2
St-BK2	Anstrich	283,5	357,0	48,9
	Spachtelung	297,1	330,9	61,9
St-BK3	Anstrich	291,5	356,6	48,7
	Spachtelung	294,3	332,2	49,9
FI-BK2	Anstrich	275,3	348,6	52,1
	Spachtelung	118,1	373,1	28,1
FI-BK3	Anstrich	282,1	349,7	49,5
	Spachtelung	309,8	344,2	50,8
Ka-BK1	Anstrich	-	-	-
	Spachtelung	326,3	346,5	65,4
Ka-BK2	Anstrich	-	-	-
	Spachtelung	312,2	349,0	57,0

$T_{96\%}$  ... Temperatur bei 96% der Ausgangsmasse in [°C]

$T_{\Delta m, \max}$  ... Temperatur bei maximaler Massenänderung in [°C]

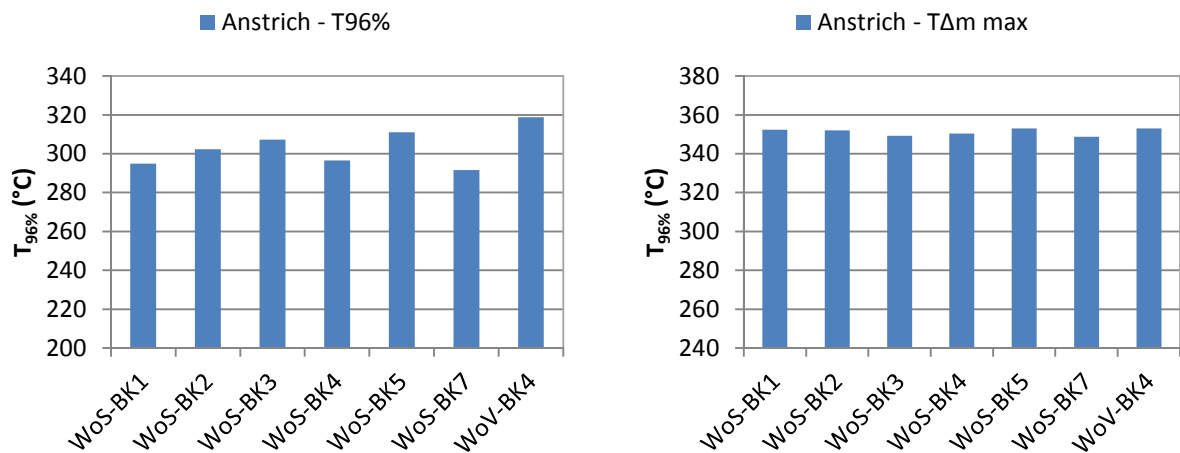
$m_r$  ... Restmasse am Ende der Messung bei  $T=700^\circ\text{C}$  in [%]

Im Anschluss werden die Ergebnisse, aufgeteilt auf die einzelnen Tunnelobjekte eingehend diskutiert. Aus dem Wolfsbergtunnel, welcher mit einem System der Fa. Avenarius Agro beschichtet wurde, wurden insgesamt 6 Bohrkerne aus der Tunnelröhre in Fahrtrichtung Salzburg und ein Vergleichsbohrkern aus der Tunnelröhre in Fahrtrichtung Villach untersucht. Bei allen Messungen, egal ob Anstrich oder Spachtelung wurde eine sehr hohe Restmasse bemerkt. Diese ist auf die verwendeten Füllstoffe zurückzuführen. Obwohl vom Hersteller keine Füllstoffe bekannt gegeben wurden, wurden im Anstrich etwa 50 % Restmasse erhalten; die Spachtelung wies nochmals höhere Reststoffgehalte auf. Zur Bestimmung der angegebenen Temperaturwerte wurden der Masseverlust über die Zeit und deren erste Ableitung aufgezeichnet. Diese Kurven sind für die Bohrkerne aus der Tunnelröhre in Fahrtrichtung Salzburg in Abbildung 101 dargestellt.



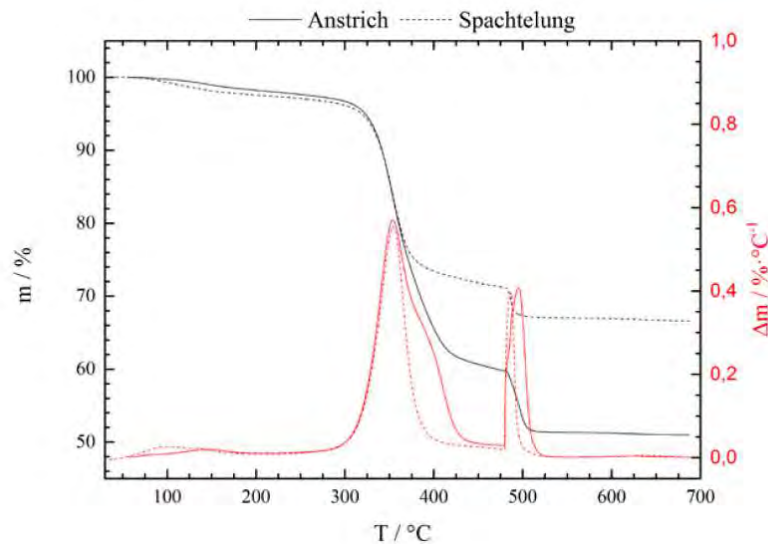
**Abbildung 101: Masseverlustkurven und deren 1. Ableitung (strichlierte Linie) der Anstriche für den Wolfsbergtunnel – Fahrtrichtung Salzburg**

Wie in Abbildung 101 ersichtlich, zeigten alle Anstrichproben aus dem Wolfsbergtunnel einen ähnlichen Masseverlustverlauf. Nur WoS-BK3 und WoS-BK4 fielen aus der Reihe, da diese beiden Proben nach 600 °C noch einen signifikanten Masseverlust zeigten. Die Temperatur bei 96 % der Masse und die Temperatur bei maximalem Masseverlust unterscheiden sich für diese Bohrkerne nicht signifikant, wie in Abbildung 102 zu sehen.

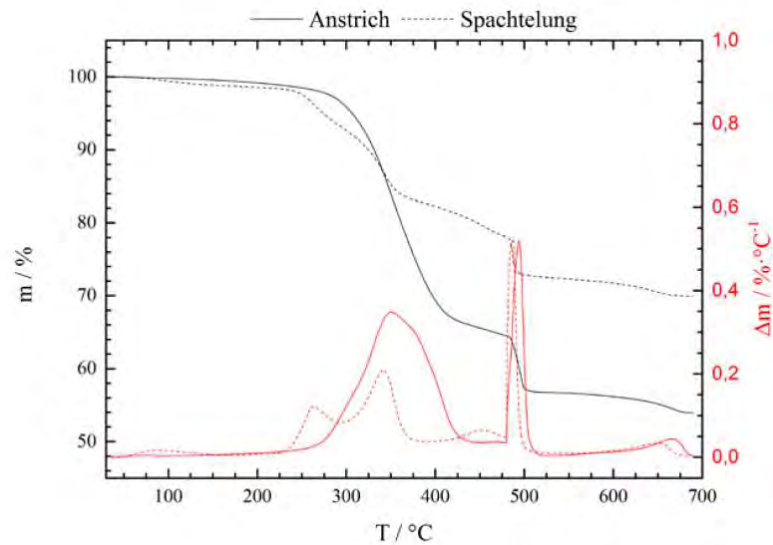


**Abbildung 102: : Ergebnisse der TGA-Messungen für die Anstriche ( Wolfsbergtunnel – beide Fahrrichtungen)**

Bei den Spachtelungen aus dem Wolfsbergtunnel konnte, wie bereits mit Hilfe der FTIR und der DSC, auch mit der TGA zwischen den lösemittelbasierten und wasserbasierten Produkten unterschieden werden. In Abbildung 103 ist der Masseverlust einer lösemittelhaltigen Spachtelung dargestellt, Abbildung 104 zeigt zum Vergleich den Masseverlust eines wasserbasierten Systems. Während die Amin-gehärtete Spachtelung nur einen Zersetzungspike aufweist, sind beim wasserbasierten System mit anderem Härter zwei Zersetzungspikes zu sehen.

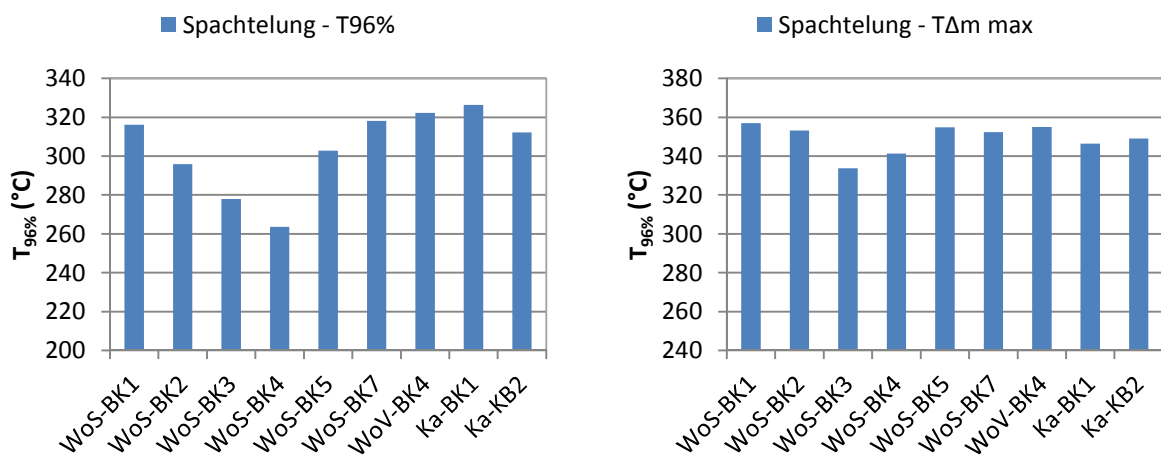


**Abbildung 103: Masseverlustkurve und deren 1. Ableitung von Bohrkern WoS-BK5**



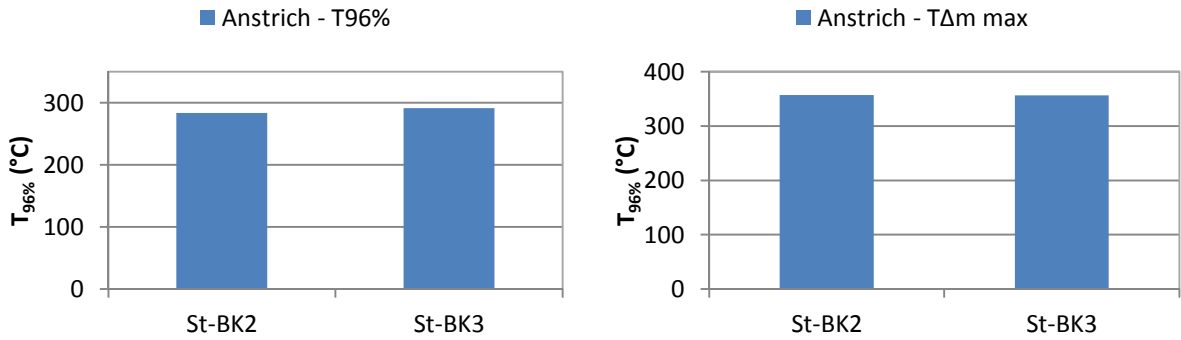
**Abbildung 104: Masseverlustkurve und deren 1. Ableitung von Bohrkern WoS-BK4**

Die Bohrkern mit einer wasserbasierten Spachtelung in Fahrtrichtung Salzburg (WoS-BK3 und WoS-BK4) zeigten außerdem eine schlechtere thermische Beständigkeit. Sowohl die Temperatur bei 96 % der Masse als auch die Temperatur bei maximalem Masseverlust waren niedriger. Die Spachtelung in Fahrtrichtung Villach, BoV-BK4, bei der es sich ebenfalls um eine Dispersion fällt zeigte diesen Trend allerdings nicht. Die Rückstellproben aus dem Kalcherkogeltunnel passten ebenfalls sehr gut mit den Ergebnissen der lösemittelhaltigen Spachtelungen zusammen, wie in den folgenden Abbildungen zu sehen ist.

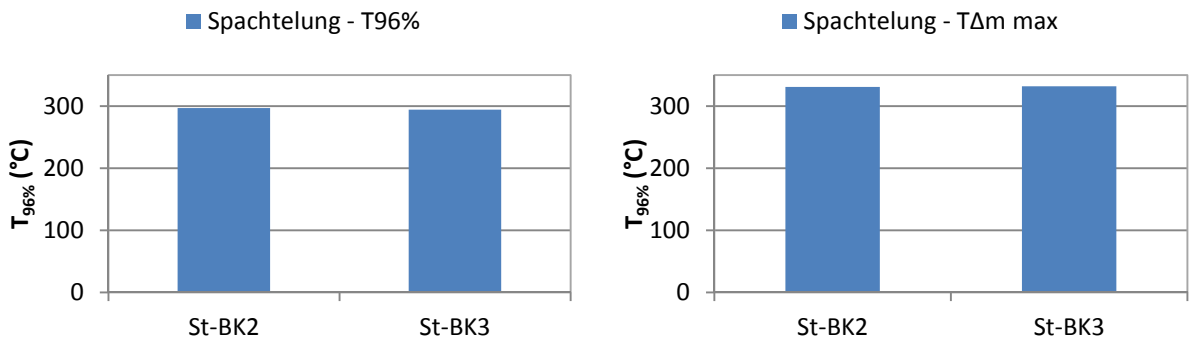


**Abbildung 105: Ergebnisse der TGA-Messungen für die Spachtelungen (Wolfsbergtunnel – beide Fahrrichtungen)**

Die Ergebnisse für den Strenger Tunnel, welcher mit einem System der Fa. Mapei ausgestattet wurde, zeigen Abbildung 106 und Abbildung 107. Trotz unterschiedlicher Schadensbilder waren keine Änderungen der Messwerte zu verzeichnen.

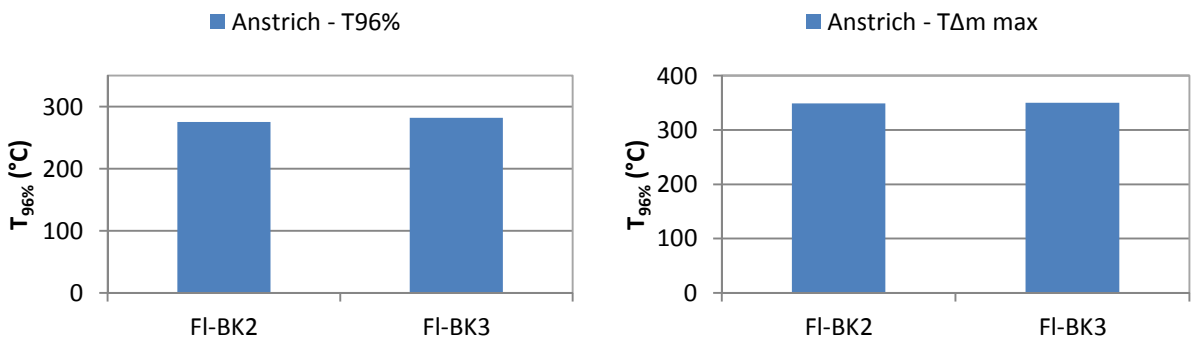


**Abbildung 106: Ergebnisse der TGA-Messungen für die Anstriche (Strenger Tunnel)**



**Abbildung 107: Ergebnisse der TGA-Messungen für die Spachtelungen (Strenger Tunnel)**

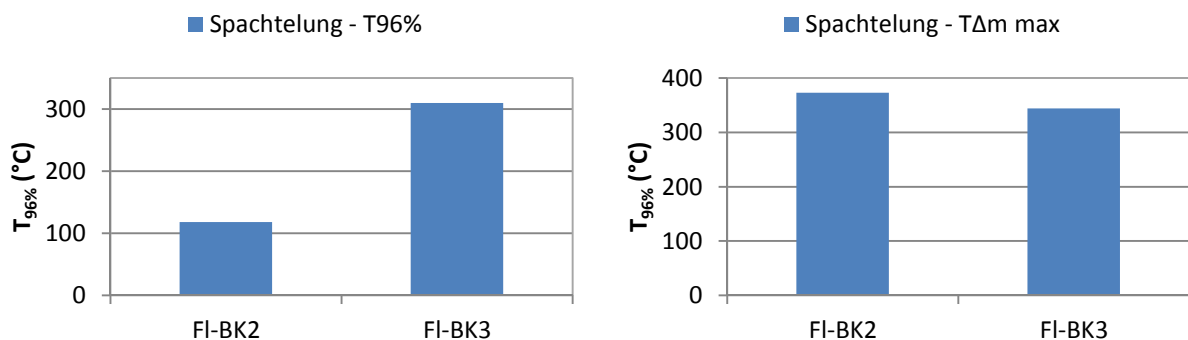
Abschließend sind in Abbildung 108 und Abbildung 109 die Ergebnisse der TGA-Analyse aus dem Flirscher Tunnel zu sehen. Die Anstriche zeigten bei beiden Proben kaum unterschiedliche Messwerte.



**Abbildung 108: Ergebnisse der TGA-Messungen für die Anstriche (Flirscher Tunnel)**



Die Spachtelung von Bohrkern FI-BK2 unterschied sich allerdings deutlich von der Spachtelung des FI-BK3. Der Masseverlust von FI-BK2 begann schon bei etwa 110 °C, und auch die Restmasse war für diese Probe ungewöhnlich niedrig. Bereits während der DSC-Prüfung war diese Probe aufgefallen, da hier eine äußerst hohe Nachhärteenthalpie der Spachtelung von 44 J\*g<sup>-1</sup> gemessen wurde. Als Ursache dieser starken Messwertabweichungen ließe sich, insbesondere auch aufgrund der niedrigen Restmasse ein Mischungsfehler vermuten. Interessant in diesem Zusammenhang ist, dass FI-BK2 als intakt beschrieben wurde. FI-BK3 welcher im Gegensatz dazu Abplatzungen aufwies zeigte während der TGA Analyse ähnliche Ergebnisse wie die Bohrkern aus dem Wolfsbergtunnel und dem Strenger Tunnel.



**Abbildung 109: Ergebnisse der TGA-Messungen für die Spachtelungen ( Flirscher Tunnel)**

## Fazit

Zusammenfassend kann zu den Ergebnissen der chemischen Analysen folgendes festgehalten werden:

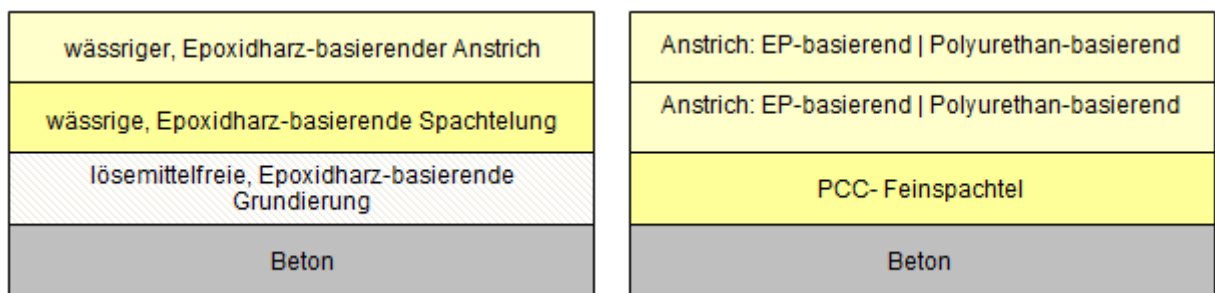
- ❖ Die FTIR eignet sich zwar nicht dazu eine Systematik zwischen Schadbild und IR-Spektrum zu erhalten, allerdings war eine Unterscheidung der Produkte bezüglich ihrer Zusammensetzung möglich. Amin-gehärtete Epoxidharzbeschichtungen konnten von wasserbasierten Dispersionen unterschieden werden. Auch die Produkte anderer Hersteller unterschieden sich, bei gleichem Härterssystem nicht voneinander. Die Unterscheidung dieser beiden Systeme war außerdem mit den beiden anderen Analysemethoden, DSC und TGA, möglich.
- ❖ Mittels DSC-Analyse konnte gezeigt werden, dass die Anstriche generell sehr hohe Nachhärteenthalpien aufwiesen und diese deutlich über den Nachhärteenthalpien der Spachtelungen lagen. Bei den Spachtelungen wiesen die lösemittelhaltigen Systeme die höchsten Glasübergangstemperaturen und niedrigsten Nachhärteenthalpien auf.
- ❖ Für die unterschiedlichen Tunnelbauwerke konnten folgende Ergebnisse erhalten werden: Für den Wolfsbergtunnel konnte kein definierter Zusammenhang zwischen Schadbild und Analyseergebnissen hergestellt werden. Die Ergebnisse für die Bohrkerne WoS-BK3 und WoS-BK4 wichen etwas von den Messwerten der restlichen Bohrkerne ab, hierbei handelte es sich aufgrund der Höhenlage aber auch um ein anders zusammengesetztes Beschichtungssystem. Für die Rückstellprobe aus dem Kalcherkogeltunnel wurden tendenziell niedrigere Glasübergangstemperaturen gemessen, was wahrscheinlich auf die milden Lagerungsbedingungen zurückzuführen ist. Aus dem Strenger Tunnel wurden ebenfalls zwei Bohrkerne untersucht, welche beide ähnliche Messwerte lieferten. Im Gegensatz dazu lieferten die Bohrkerne aus dem Flirscher Tunnel sehr unterschiedliche Ergebnisse. Hier wurde ein Mischungsfehler der beiden Epoxidharzkomponenten vermutet.

## 6.4 Laborversuche

Mit Hilfe der Laborversuche wurden ungünstige Herstellungsparameter und Witterungseinflüsse im Tunnel simuliert und die Auswirkungen auf das Beschichtungssystem untersucht. Folgende Einflussgrößen wurden dabei geprüft:

- Betonsorte
- Chloridgehalt im Untergrund
- Oberflächenvorbereitung des Untergrundes
- Verarbeitungstemperatur und Überarbeitungsintervalle
- Beschichtungssystem und –aufbau
- Witterungseinflüsse

Insgesamt wurden in einem ersten Durchlauf 36 Platten mit 2 unterschiedlichen Betonsorten und 4 Chloridgehalten betoniert und auf 2 verschiedene Rautiefen gestrahlt. Anschließend wurden nochmals 4 Betonplatten einer Betonsorte gefertigt um ein weiteres Beschichtungssystem in die Untersuchungen mitaufzunehmen. Eine genaue Übersicht über die Eigenschaften der jeweils hergestellten Platten findet sich in Tabelle 3 und Tabelle 5 in Kapitel 5.2. Jede Platte wurde anschließend bei definierten Umgebungstemperaturen und Überarbeitungsintervallen beschichtet. Diese sind in Tabelle 4 und Tabelle 6, ebenfalls in Kapitel 5.2 aufgelistet. Eine Zusammenfassung des Schichtaufbaus und der verwendeten Produkte ist in Abbildung 110 dargestellt.



a) Schichtaufbau Hersteller 1

b) Schichtaufbau Hersteller 2

**Abbildung 110: Schichtaufbau der Laborprobekörper**

#### 6.4.1 Beschriftung/Kennzeichnung der Probeplatten

Die Probeplatten, welche mit dem Beschichtungssystem von Hersteller 1 beschichtet wurden, wurden wie folgt beschriftet:

##### Nr<sub>x</sub>\_IG/WDI\_UG<sub>0y</sub>\_z\_Farbe

- x fortlaufende Nummer von 1 bis 8 laut Tabelle 3  
 Beispiel: Nr 1 = Betonsorte IG, 0 % Chlorid  
 Nr 2 = Betonsorte WDI, 0 % Chlorid
- y Anforderungsklasse UG<sub>2</sub> oder UG<sub>4</sub>
- z fortlaufende Nummer von 1 bis 4 da aus jeder betonierten Probeplatte (50 x 40 cm) je 4 kleine Einzelplatten (15 x 15 cm) geschnitten wurden, welche separat verwendet und geprüft wurden

Farbe schwarz/rot/grün zur Beschreibung der Überarbeitungszeit

Für die Probeplatten mit einem Beschichtungssystem von Hersteller 2 wird im Anschluss folgende Bezeichnung verwendet:

##### H2\_System\_x\_y\_Farbe

- x Kurzzeichen für das Beschichtungssystem  
 EP ... 2-komponentiger Anstrich auf Epoxidharz-Basis  
 PU ... 2-komponentiger Anstrich auf Polyurethan-Basis
- y fortlaufende Nummer von 1 bis 4 zur Kennzeichnung der Einzelplatten (15 x 15 cm)

Farbe schwarz oder rot zur Kennzeichnung der Überarbeitungszeit

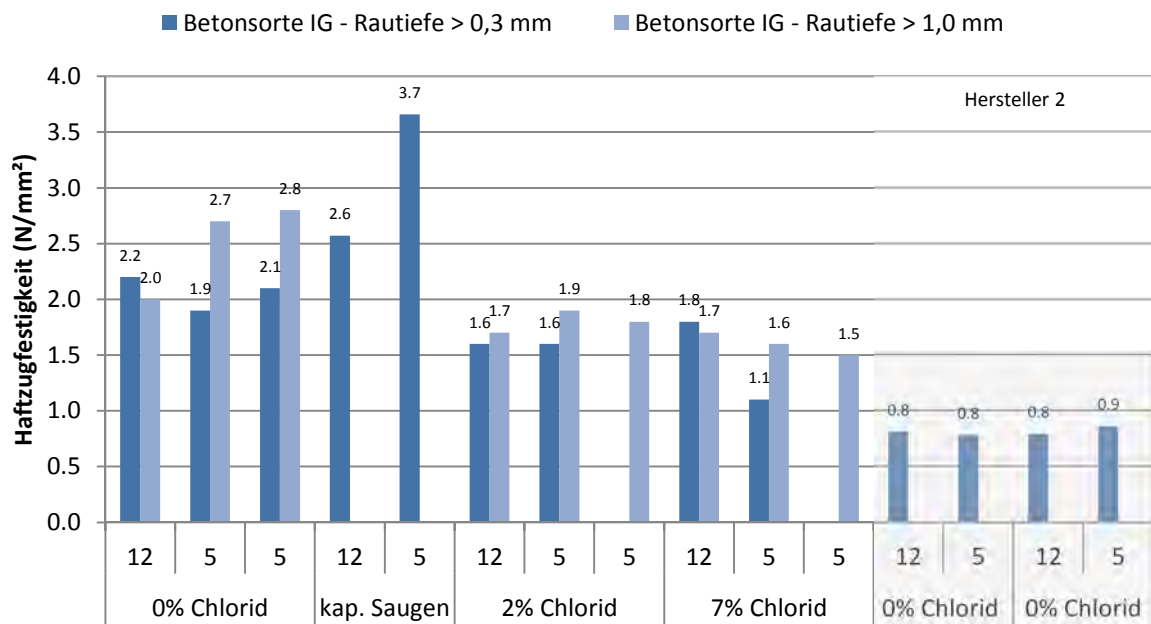
#### 6.4.2 Einfluss der Verarbeitungsbedingungen

Nach dem Beschichten wurde von allen hergestellten Betonplatten die Haftzugfestigkeit bestimmt. Die Mittelwerte aus je 3 Einzelmessungen sind in Tabelle 44 angegeben. Bei Probeplatten mit einem Beschichtungssystem von Hersteller 1 trat ausnahmslos Bruch im Beton auf; bei Probeplatten mit einem Beschichtungssystem von Hersteller 2 trat ausschließlich Bruch in der zementösen Spachtelung auf.

**Tabelle 44: Ergebnisse der Haftzugfestigkeitsprüfung nach def. Verarbeitungsbedingungen**

Chlorid	0 %				0 % (Saugen)				2 %				7 %									
Beton	IG		WDI		IG		WDI		IG		WDI		IG		WDI							
<b>HERSTELLER 1</b>																						
Temp.	12	5	5	12	5	5	12	5	12	5	12	5	5	12	5	5	12	5	5	12	5	5
UG <sub>2</sub>	2,2	1,9	2,1	3,1	2,9	3,6	2,6	3,7	1,9	3,2	1,6	1,6	-	3,2	2,3	-	1,8	1,1	-	3,0	3,2	-
UG <sub>4</sub>	2,0	2,7	2,8	3,6	2,8	2,5	-	-	-	-	1,7	1,9	1,8	3,2	2,7	2,9	1,7	1,6	1,5	3,0	2,8	2,9
<b>HERSTELLER 2 – SYSTEM 1</b>																						
Temp.	12	5	5	12	5	5	12	5	12	5	12	5	5	12	5	5	12	5	5	12	5	5
UG <sub>2</sub>	0,8	0,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>HERSTELLER 2 – SYSTEM 2</b>																						
Temp.	12	5	5	12	5	5	12	5	12	5	12	5	5	12	5	5	12	5	5	12	5	5
UG <sub>2</sub>	0,8	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Zur besseren Übersicht sind in den folgenden Grafiken die Werte für jede Betonsorte separat aufgetragen.



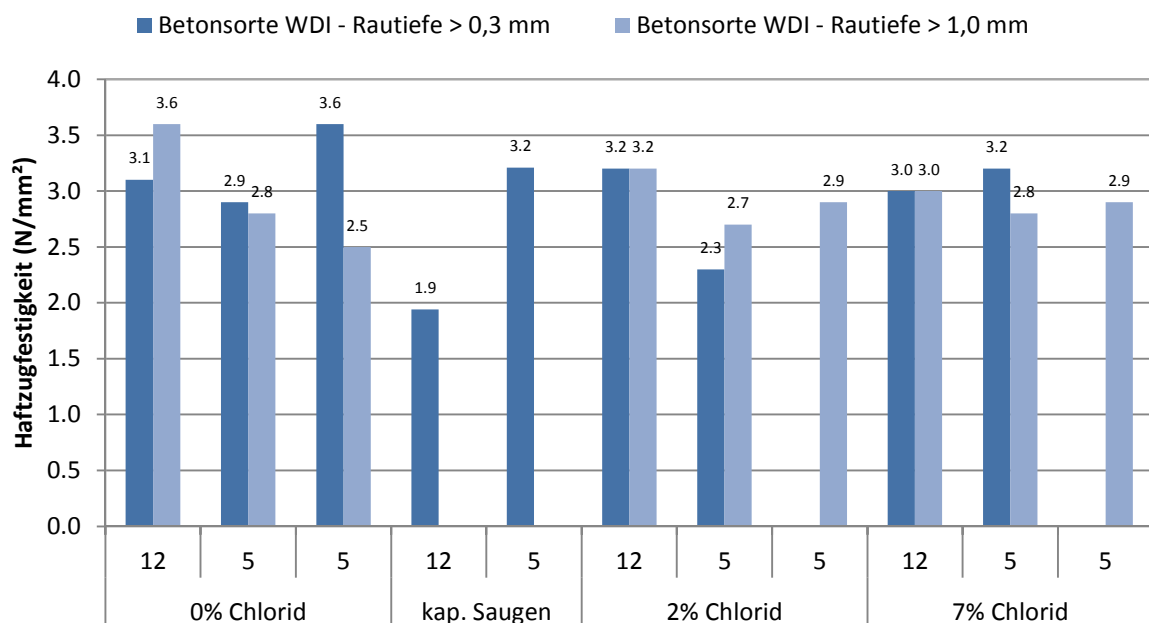
**Abbildung 111: Haftzugfestigkeit für alle Probekörper der Betonsorte IG**

Die Ergebnisse für die Betonsorte IG und Produkte der beiden unterschiedlichen Hersteller zeigt die obige Grafik. Die Anforderung an die Haftzugfestigkeit ist laut Merkblatt „Tunnelbeschichtungen“  $\geq 1,5$  MPa.

Bei Hersteller 1 trat bei allen Prüfungen Bruch im Beton auf, außerdem wurden die Anforderungen des Merkblattes bis auf eine Ausnahme erfüllt. Generell wurden niedrigere Haftzugfestigkeiten bei allen Prüfkörpern mit Chlorid im Anmachwasser gemessen. Die

bestätigt somit die in [5] veröffentlichten Ergebnisse. Ferner wurde im Mittel kein Unterschied zwischen den beiden Rautiefen mit einem Mittelwert von  $2,1 \pm 0,9$  MPa für Rautiefe  $> 0,3$  mm;  $2,0 \pm 0,4$  MPa für Rautiefe  $> 1,0$  mm erhalten.

Bei der Systemprüfung von Hersteller 2 trat bei allen Probekörpern Bruch in der Spachtelung auf. Zusätzlich wurde die Anforderung laut Merkblatt nicht erfüllt. Dieses Verhalten trat bei allen vier Platten bei beiden Verarbeitungsbedingungen auf, weshalb die Ursache in der Spachtelung selbst bzw. der generellen Verarbeitung zu suchen ist.



**Abbildung 112: Haftzugfestigkeit für alle Probekörper der Betonsorte WDI**

Abbildung 112 zeigt die Ergebnisse für die Betonsorte WDI und Hersteller 1, da für diesen Beton keine Platten mit einem System von Hersteller 2 beschichtet wurden. Ebenso wie beim IG-Beton trat auch hier bei allen Platten Bruch im Beton auf und die Anforderung laut Merkblatt wurde erfüllt. Tendenziell wurden für die Betonsorte WDI etwas höhere Werte als für IG-Beton gemessen, wobei wiederum kein Unterschied bezüglich Rautiefe festgestellt wurde. Im Mittel wurden  $2,9 \pm 0,5$  MPa für Rautiefe  $> 0,3$  mm und  $2,9 \pm 0,3$  MPa für Rautiefe  $> 1,0$  mm erhalten. Ein Beton mit einem niedrigeren W/B-Wert erhöht somit die Haftzugfestigkeit des Systems.

Abgesehen von der Prüfung der Haftzugfestigkeit wurde die Oberfläche der Platten mit dem Mikroskop untersucht und die Schichtdicke der aufgetragenen Systeme bestimmt. Abgesehen von kleineren Abplatzungen und Ausbrüchen welche während der Bearbeitung entstanden sind, konnte auf keiner der untersuchten Platten mit einem Beschichtungssystem

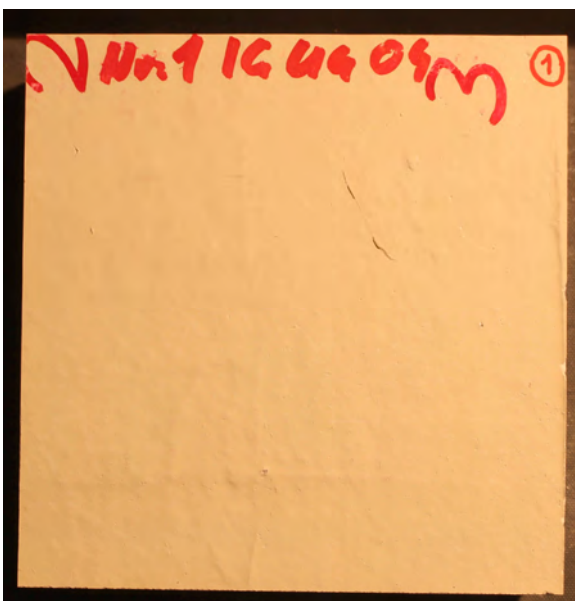
von Hersteller 1 nach der Beschichtung Risse oder Abplatzungen festgestellt werden. Eine Auswahl an Mikroskopaufnahmen sowie Fotos der gesamten Beschichtungsfläche sind in Abbildung 113 dargestellt, wobei jeweils Platten mit unterschiedlichen Beschichtungsbedingungen (schwarz/rot/grün) dargestellt sind. Ein direkter Zusammenhang zwischen dem optischen Zustand der Beschichtungsfläche und den Verarbeitungsbedingungen konnte nicht festgestellt werden, da die Beschaffenheit der Beschichtung generell bei allen Platten gleich gut war.



a) Nr1\_IG\_UG02\_1\_schwarz



b) Nr1\_IG\_UG04\_1\_schwarz



c) Nr1\_IG\_UG02\_1\_rot



d) Nr1\_IG\_UG04\_1\_rot





e) Nr1\_IG\_UG02\_1\_grün

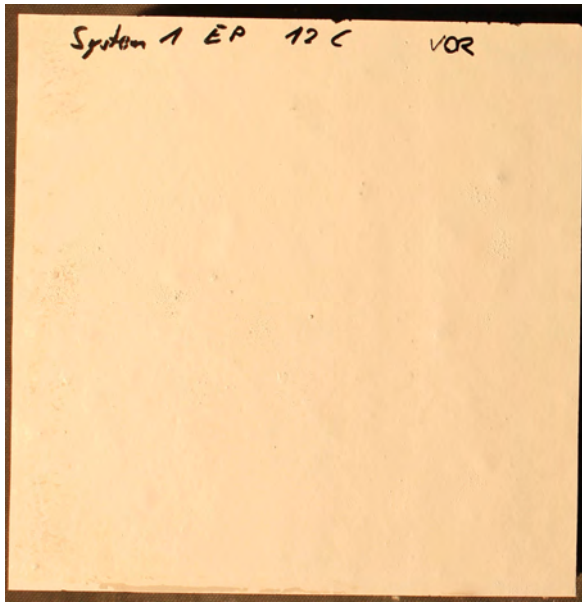
f) Nr1\_IG\_UG04\_1\_grün

**Abbildung 113: Oberfläche der Versuchsplatten mit unterschiedlichen  
Verarbeitungsbedingungen (Beschichtungssystem von Hersteller 1)**

Auch von den Beschichtungssystemen von Hersteller 2 wurden Fotos und Mikroskopaufnahmen angefertigt. Die Oberflächen der beiden unterschiedlichen Beschichtungssysteme sind in Abbildung 114 zu sehen. In Abbildung 114 a) und b) ist exemplarisch die Epoxidharz-basierende Beschichtung, aufgetragen bei 12 °C zu sehen. Obwohl die Oberfläche auf den ersten Blick fehlerfrei wirkte, waren bei genauerem Hinsehen raue Stellen bemerkbar. Diese wurden im Mikroskop als feine Bläschen identifiziert. Generell war die Epoxidharz-basierende Beschichtung an den Rändern relativ spröde und platzte bei Beanspruchung schnell ab. Außerdem war bei 5 °C die Verarbeitung des Anstrichs etwas schwierig, da sich nach dem Öffnen Klumpen im Material gebildet hatten. Diese konnten auch nach längerer Rührzeit nicht in Lösung gebracht werden und blieben dementsprechend beim Auftragen als feste Brocken auf der Oberfläche zurück.

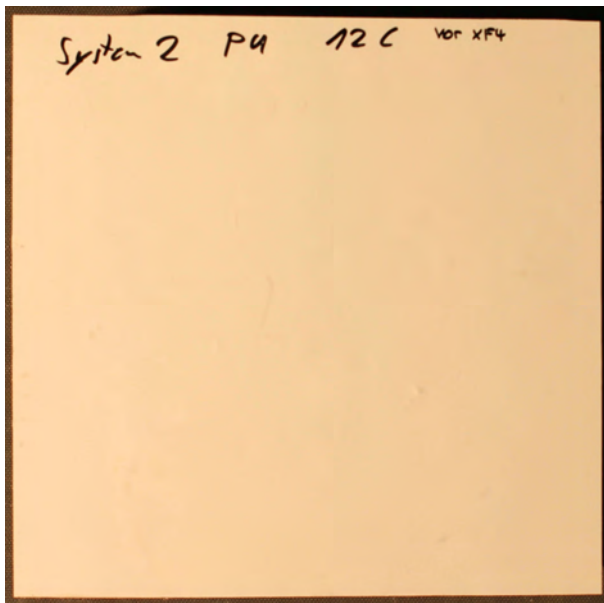
Abbildung 114 c) und d) zeigen im Gegensatz dazu die Polyurethan-basierende Beschichtung von Hersteller 2. Hier wurde bei beiden Verarbeitungstemperaturen eine weiß glänzende, fehlerfreie Beschichtungsoberfläche erhalten. Aufgrund der mechanischen Bearbeitung (Stapeln, Schneiden, etc.) waren ebenfalls leichte Abschürfungen an wenigen Stellen an der Oberfläche zu sehen.





a) H2\_System\_EP\_1\_schwarz

b) H2\_System\_EP\_1\_schwarz



c) H2\_System\_PU\_1\_schwarz

d) H2\_System\_PU\_1\_schwarz

**Abbildung 114: Oberfläche der Versuchsplatten mit unterschiedlichen  
Verarbeitungsbedingungen (Beschichtungssystem Hersteller 2)**

## Fazit

Nach dem Auftragen der Beschichtungen konnten folgende Ergebnisse für die beiden unterschiedlichen Produktsysteme festgehalten werden:

### ❖ Hersteller 1:

Die Beschichtung von Hersteller 1 hat bei allen gewählten Beschichtungsbedingungen die Anforderungen laut Merkblatt erfüllt. Die Probeplatten mit der Betonsorte IG wiesen verhältnismäßig niedrigere Haftzugfestigkeiten auf, wobei sich außerdem der Chloridgehalt im Anmachwasser signifikant auf das Ergebnis auswirkte. Dieses Verhalten bestätigt die Forschungsergebnisse aus [5]. Bei der Zugabe von Chlorid zum Anmachwasser ist das Chlorid außerdem fest in der Betonmatrix integriert, Transportvorgänge wie sonst üblich finden keine statt. Die Probeplatten mit der Betonsorte WDI konnten etwas höhere Abreißfestigkeiten vorweisen; wobei der Chloridgehalt im Anmachwasser keinen Einfluss auf das Endergebnis zeigte. Die Verarbeitungsbedingungen der Beschichtung zeigten keine Auswirkungen auf die Haftzugfestigkeit.

Mit dem Mikroskop konnten außerdem keine Unregelmäßigkeiten auf der Beschichtungsoberfläche festgestellt werden (Risse, Abplatzungen, Blasen, etc.) welche auf die Verarbeitungsbedingungen wie Temperatur und Überarbeitungsintervalle zurückzuführen wären. Es waren nur vereinzelt Risse und Abschürfungen, wahrscheinlich aufgrund der Handhabung (Schneiden, Stapeln, etc.) zu sehen. Generell waren die Beschichtungsoberflächen in einem sehr guten Zustand.

### ❖ Hersteller 2:

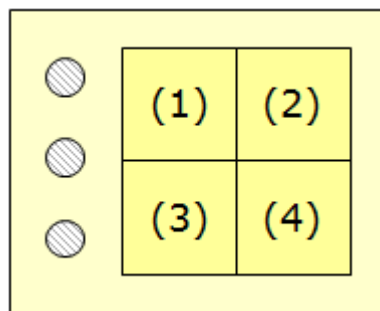
Bei den Platten mit einem Beschichtungssystem von Hersteller 2 wurde bei allen Haftzugfestigkeitsprüfungen Bruch in der ersten Beschichtungslage festgestellt. Die gemessenen Abreißfestigkeiten waren dementsprechend niedrig. Außerdem war die Verarbeitung der Epoxidharz-basierenden Beschichtung bei 5 °C nur sehr schlecht möglich, da sich Klumpen im flüssigen Material gebildet hatten, welche auch nach langer Rührzeit nicht vollständig in Lösung gebracht werden konnten.

Bei der optischen Untersuchung der Beschichtungsoberflächen wurde beim Epoxidharz-basierenden Produkt ein relativ spröder Anstrich mit vereinzelter Bläschenbildung festgestellt. Bei den Platten welche bei 5°C beschichtet wurden, waren außerdem noch Materialklumpen auf der Oberfläche zu sehen. Die Oberfläche der Polyurethan-basierenden Beschichtung war im Gegensatz nahezu fehlerfrei.

### 6.4.3 Einfluss der Auslagerungsbedingungen

Nach dem Beschichten wurden die Probepplatten unterschiedlichen Auslagerungsbedingungen ausgesetzt. Da aus jeder Platte mit den Maßen 50 x 40 cm je 4 kleinere Platten (15 x 15 cm) geschnitten wurden, konnten insgesamt 4 unterschiedliche Szenarien getestet werden. Eine Übersicht über die durchgeführten Versuche ist in Tabelle 45 dargestellt. Die Ergebnisse werden im Folgenden, getrennt nach Belastungsbedingungen, erörtert.

**Tabelle 45: Übersicht über die Auslagerungsbedingungen**



(1)	(2)	(3)	(4)
Frost-Taumittel-Belastung (XF4)	Frost-Taumittel-Belastung in Kombination mit thermischer Alterung	Rückseitige Feuchtelagerung	Thermische Alterung
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reflexionsgrad</li> <li>- Mikroskopie</li> <li>- XF4 laut EN 13687-1</li> <li>- Reflexionsgrad</li> <li>- Mikroskopie</li> <li>- Prüfung der Haftzugfestigkeit</li> <li>- Chloridgehalt bei ausgewählten Probekörpern</li> <li>- Keilspaltprüfung bei ausgewählten Probekörpern</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reflexionsgrad</li> <li>- Mikroskopie</li> <li>- XF4 laut EN 13687-1</li> <li>- Konditionierung bei 70 °C für 7 Tage</li> <li>- Temperaturwechsellagerung für 7 Tage</li> <li>- XF4 laut EN 13687-1</li> <li>- Mikroskopie</li> <li>- Prüfung der Haftzugfestigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reflexionsgrad</li> <li>- Mikroskopie</li> <li>- Rückseitige Feuchtelagerung laut EN 13578</li> <li>- Mikroskopie</li> <li>- Prüfung der Haftzugfestigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Chemische Analyse mittels FTIR, DSC, TGA</li> <li>- Alterung ausgewählter Probekörper bei 140°C</li> <li>- Chemische Analyse mittels FTIR, DSC, TGA</li> </ul>

#### Frost-Taumittel-Belastung (XF4)

Je eine Probepplatte mit den Maßen 15 x 15 cm wurde einer Frost-Taumittel-Belastung nach EN 13687-1 ausgesetzt. Nach den insgesamt 50 Wechseln wurden die Haftzugfestigkeit, der Reflexionsgrad und der Chloridgehalt bestimmt. Außerdem wurden ausgewählte Probekörper mit dem Mikroskop untersucht. Die Ergebnisse der Haftzugfestigkeitsprüfung sind in Tabelle 46, aufgeteilt auf die unterschiedlichen Beschichtungssysteme zusammengefasst. Bei den Probepplatten mit einem Beschichtungssystem von Hersteller 1

trat bis auf zwei Ausnahmen Bruch im Beton auf; bei den Probekörpern mit einem Beschichtungssystem von Hersteller 2 trat, wie auch schon vor der XF4-Prüfung Bruch in der ersten Beschichtungslage auf.

**Tabelle 46: Ergebnisse der Haftzugfestigkeitsprüfung nach der XF4-Prüfung**

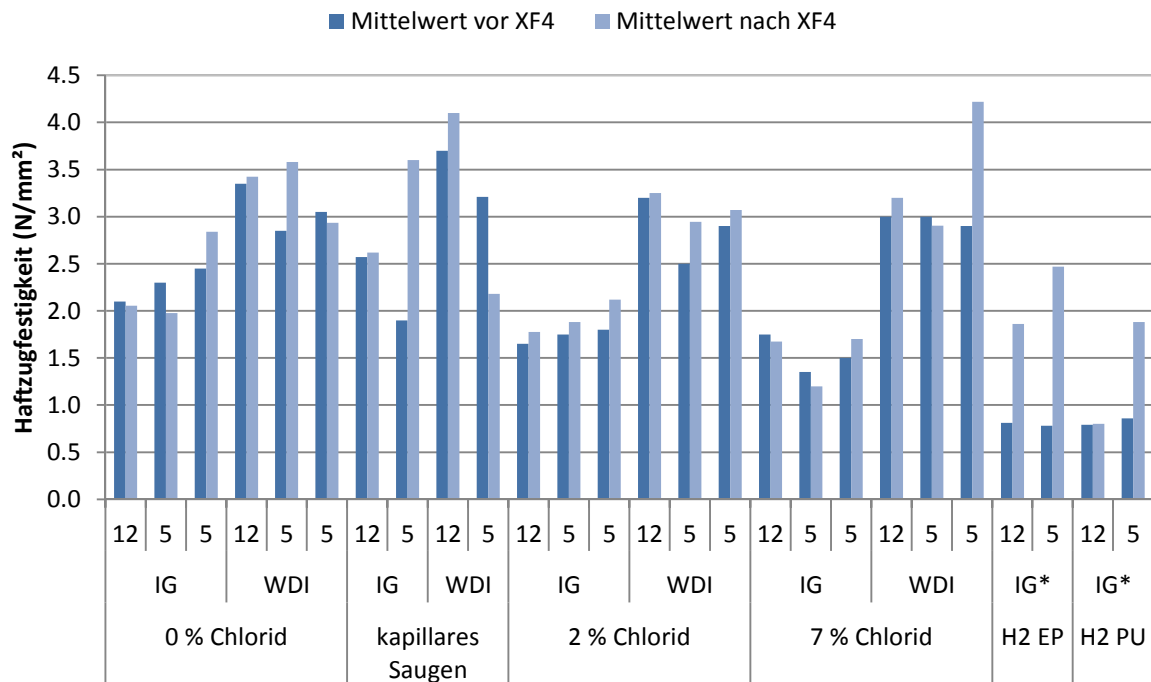
Chlorid	0 %						0 % (Saugen)						2 %						7 %						
Beton	IG			WDI			IG			WDI			IG			WDI			IG			WDI			
<b>HERSTELLER 1 – NACH XF4</b>																									
Temp.	12	5	5	12	5	5	12	5	12	5	12	5	5	12	5	5	12	5	5	12	5	5	12	5	5
UG <sub>2</sub>	2,6	1,0	2,7	3,6	4,2	3,6	2,6	4,1 <sup>1</sup>	3,6	2,2 <sup>2</sup>	1,0	1,7	-	3,6	2,9	-	2,0	1,4	-	3,3	2,8	-			
UG <sub>4</sub>	1,5	2,9	3,0	3,2	3,0	2,3	-	-	-	-	2,5	2,1	2,1	2,9	3,0	3,1	1,4	1,0	1,7	3,1	3,0	4,2			
<b>HERSTELLER 2 – SYSTEM 1 – NACH XF4</b>																									
Temp.	12	5	5	12	5	5	12	5	12	5	12	5	5	12	5	5	12	5	5	12	5	5	12	5	5
UG <sub>2</sub>	1,9	2,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>HERSTELLER 2 – SYSTEM 2 – NACH XF4</b>																									
Temp.	12	5	5	12	5	5	12	5	12	5	12	5	5	12	5	5	12	5	5	12	5	5	12	5	5
UG <sub>2</sub>	0,8	1,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

<sup>1</sup> ... Bruch zwischen Grundierung und Spachtelung (B:C = 20:80)

<sup>2</sup> ... Bruch zwischen Beton und Grundierung (A:B = 30:70)

Generell sind bei den Ergebnissen in Tabelle 46 große Schwankungen der Haftzugfestigkeiten pro Betonsorte, Chloridgehalt und Rautiefe zu beobachten. Da es aufgrund der Abmessungen nach der XF4-Prüfung nicht möglich war mehr als eine Haftzugfestigkeitsprüfung pro Platten durchzuführen, sind diese Ergebnisse mit einer gewissen Vorsicht zu betrachten. Für die anschließende Diskussion und Gegenüberstellung wurden deshalb die Ergebnisse für die Rautiefen UG<sub>2</sub> und UG<sub>4</sub> zu einem Mittelwert zusammengefasst. In Abbildung 115 sind die Ergebnisse vor und nach der XF4-Belastung einander gegenüber gestellt. Es konnte kein eindeutiger Trend zwischen den Verarbeitungsbedingungen und der Beständigkeit bei der XF4-Prüfung festgestellt werden. Die Anforderung von einer Mindesthaftzugfestigkeit von  $\geq 1,5$  MPa wurde für das Beschichtungssystem von Hersteller 1 in fast allen Fällen erfüllt, außer bei der Beschichtung bei 5 °C der stark chloridhaltigen Betonplatten. Auch trat bei den Probekörpern „kapillares Saugen + rote Probenserie“ nach der XF4-Belastung beides Mal Bruch in der Beschichtung auf. Dies liefert zwar einen Hinweis auf die Beständigkeit der Beschichtung bei Nicht-Einhaltung der vorgegeben Verarbeitungsbedingungen allerdings wäre für eine Untermauerung dieser Ergebnisse eindeutig eine Erweiterung der Probekörperanzahl notwendig.

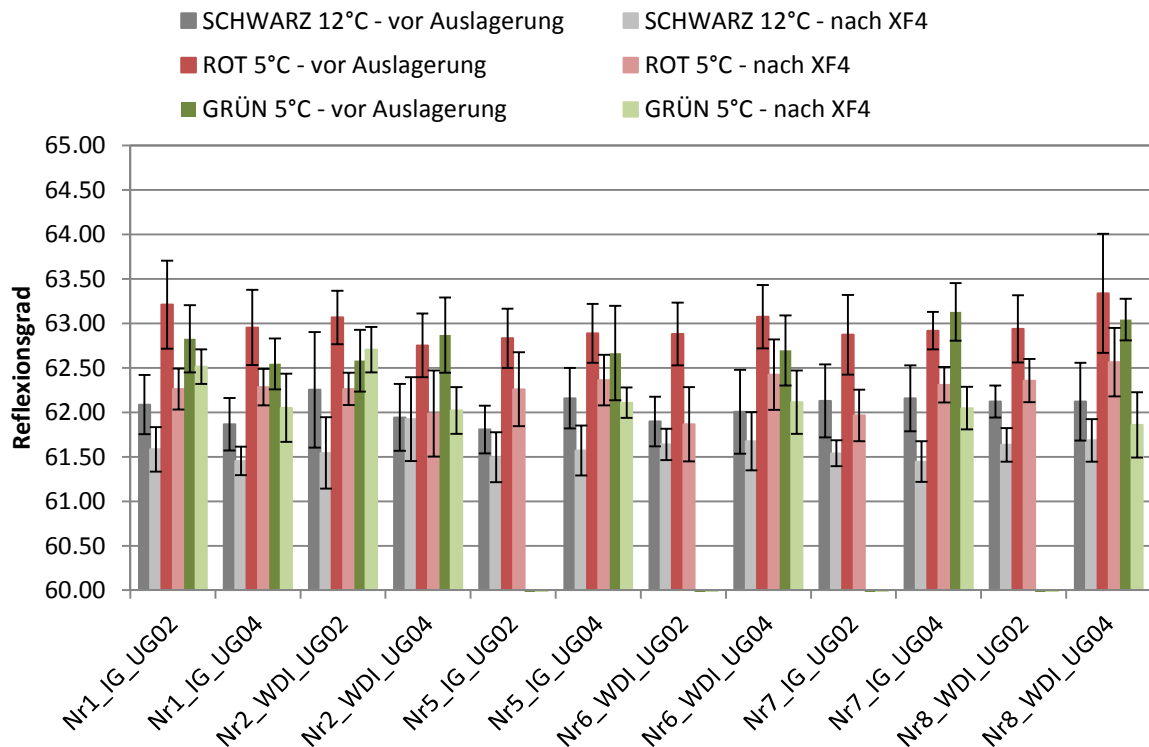
Für die Beschichtungssysteme von Hersteller 2 wurden nach der XF4-Prüfung gleiche oder sogar bessere Werte für die Haftzugfestigkeit erhalten. Dies führt nochmals die lokale Abhängigkeit und die daraus resultierende Schwankungsbreite der Haftzugfestigkeitsprüfung vor Augen.



**Abbildung 115: Mittelwerte der Haftzugfestigkeitsprüfung vor und nach der XF4-Prüfung mit (\*) Versagen in Spachtelung bei Hersteller 2**

Zusätzlich zur Haftzugfestigkeit wurde vor und nach der XF4-Auslagerung der Reflexionsgrad der Beschichtung bestimmt um eine eventuelle Schädigung, sichtbar als Vergilbung festzustellen. Pro Platte wurde an insgesamt 4 Stellen gemessen, wobei je ein Mittelwert pro Prüfkörper gebildet wurde. Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse vor und nach der XF4-Prüfung ist in Abbildung 116 dargestellt. Der Reflexionsgrad ist in der obigen Abbildung für das Beschichtungssystem von Hersteller 1, getrennt für jede Betonsorte, jeden Chloridgehalt und jede Rauheit dargestellt. Die Standardabweichungen (n=16 für die Werte vor der Auslagerung bzw. n=8 für Werte nach der Auslagerung) wurden ebenfalls eingezeichnet. Generell waren keine Unterschiede zwischen chloridbelasteten und nicht belasteten Proben erkennbar, wobei die Werte für die schwarze Probenserie im Schnitt ca. 1 % unterhalb der Proben der roten und grünen Probenserie lag. Außerdem lagen die Werte für alle Probenplatten unterhalb der Anforderung laut Merkblatt „Tunnelbeschichtungen“. Hier wird ein Reflexionsgrad  $\geq 70$  gefordert. Des Weiteren lagen die Reflexionswerte nach der XF4-Belastung, bis auf 1 Ausnahme unterhalb der Werte welche vor der Auslagerung

gemessen wurden. Prinzipiell waren die hier beschriebenen Änderungen allerdings äußerst gering und lagen meist innerhalb der Standardabweichung. Deshalb ist fraglich ob es sich bei diesen Tendenzen nur um zufällige Abweichungen oder Geräteungenauigkeit handelte oder ob hier sehr wohl ein Trend beobachtet werden konnte. Verwunderlich wäre in diesem Fall, dass die schwarze Probenreihe etwas schlechter abschnitt als die rote und grüne Probenreihe.



**Abbildung 116: Ergebnisse der Reflexionsgradmessungen vor und nach der XF4-Belastung**

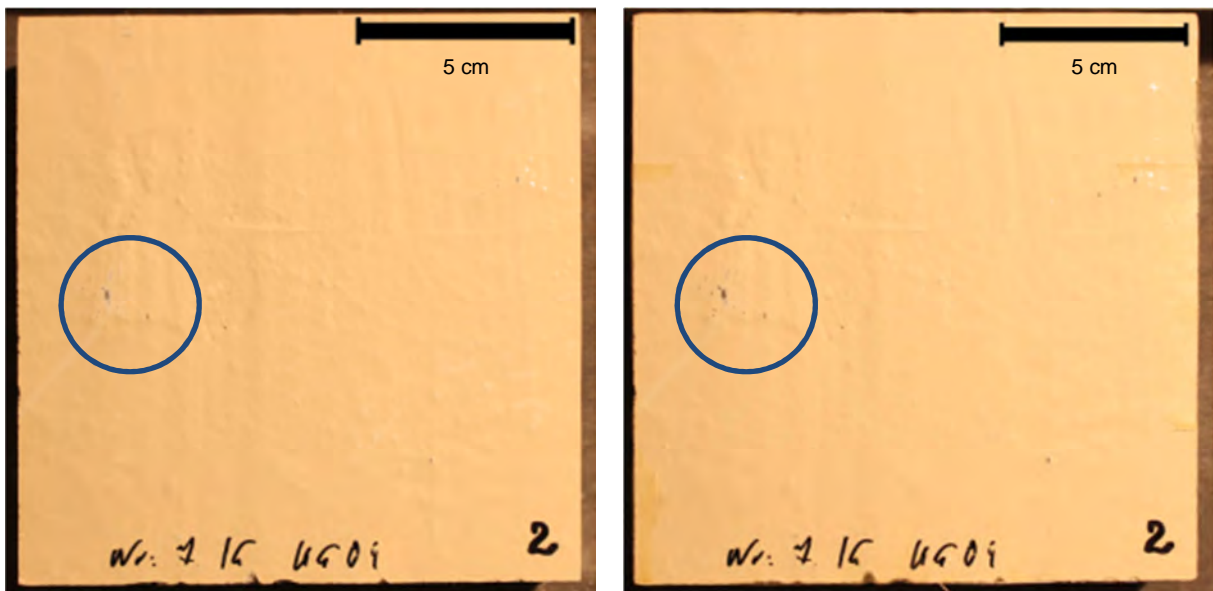
Um die Beständigkeit der jeweiligen Beschichtungssysteme während der XF4-Belastung zu charakterisieren wurde außerdem von ausgewählten Probenplatten ein Chloridprofil erstellt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 47 zusammengefasst.

**Tabelle 47: Chloridgehalt nach der XF4-Prüfung**

Entnahmetiefe	Chloridgehalt [%] im Zement		
	0 - 1 cm	1 - 3 cm	3 – 4,5 cm
Nr2_WDI_UG02_1_schwarz	0.56	0.17	0.40
Nr2_WDI_UG02_1_rot	0.15	0.14	0.87
Nr2_WDI_UG02_2_grün	0.18	0.05	0.91
H2_System_EP_1_schwarz	0.18	0.13	0.45

Wie die Ergebnisse in Tabelle 47 zeigen, ließ sich kein Zusammenhang zwischen dem Chloridgehalt und den einzelnen Systemen und Verarbeitungsbedingungen herstellen. Bei allen Proben stieg der Chloridgehalt außerdem mit der Entnahmetiefe an. Dies lässt auf eine fehlerhafte Abdichtung der Probekörper schließen. Das Tausalz konnte demnach direkt durch das Dichtungsharz in den Probekörper eindringen.

Abschließend sind exemplarisch Fotos und Mikroskopaufnahmen vor und nach der XF4-Belastung zusammengestellt. Wie Abbildung 117 zeigt, wurden bereits vorhandene Abschürfungen, wahrscheinlich entstanden durch die Handhabung, das Schneiden und Stapeln der Platten auf den ersten Blick nicht weiter angegriffen.



a) vor der XF4-Prüfung

b) nach der XF4-Prüfung

**Abbildung 117: Nr7\_IG\_UG04\_2\_schwarz**

Blasen, Risse, Ablätterungen und Einschlüsse, wie im Merkblatt „Tunnelanstriche“ beschrieben, waren nur bei einer einzigen der 64 getesteten Platten zu beobachten. Diese ist in Abbildung 118 abgebildet.



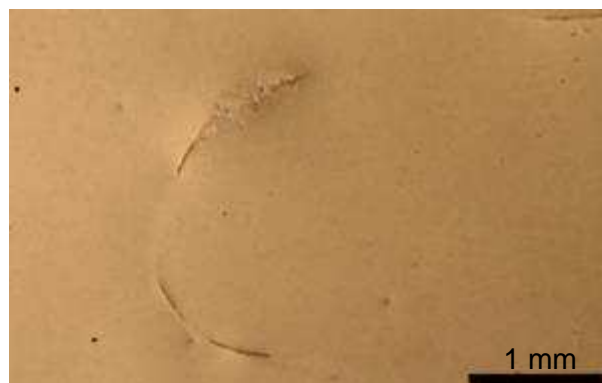
**Abbildung 118: Nr8\_WDI\_UG04\_4\_grün nach der XF4-Belastung**

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen wurden sowohl Proben der schwarzen Probenserie als auch der roten und grünen Probenserie stichprobenartig unter dem Mikroskop begutachtet. Hier konnte eine leichte Diskrepanz in der Beschaffenheit der Beschichtung vor und nach der XF4-Prüfung festgestellt werden. Folgende Aufnahmen sollen ein Beispiel für die Beschaffenheit der untersuchten Betonplatten darstellen und die Besonderheiten bei der Begutachtung der Proben zusammenfassen:



a) Nr1\_IG\_UG02\_4\_rot

Abschürfungen und/oder Ausbrüche an der Oberfläche in der Größenordnung einiger weniger Millimeter; Diese waren bereits vor der XF4-Prüfung vorhanden und kommen wahrscheinlich von der Bearbeitung der Platten. Nach der XF4-Prüfung war optisch allerdings keine „Verschlechterung“ sichtbar.

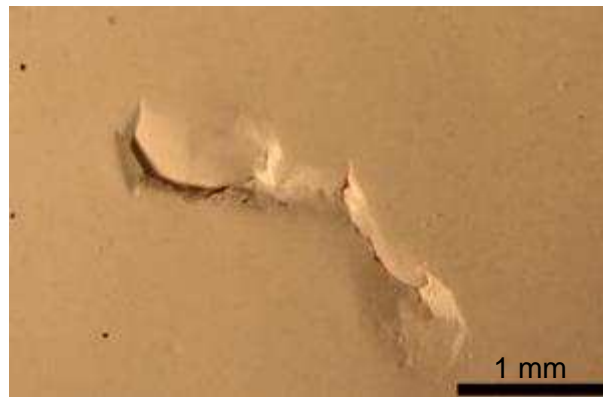


b) Nr5\_IG\_UG04\_2\_rot

Auf den Probenoberflächen waren vereinzelt kleine, dünne Strukturen zu sehen, wobei in der Mitte der Struktur eine dunklere Substanz zu sehen war. Diese könnten durch Unebenheiten auf der Probenoberfläche beim Auftragen der Beschichtung entstehen oder durch Fremdkörpereinschlüsse wie Pinselhaare oder Fasern aus der Rolle. Eventuell ist an dieser Stelle ein Vernetzungsproblem vorhanden. Diese Stellen könnten außerdem als Entstehungspunkt für zukünftige Risse dienen.

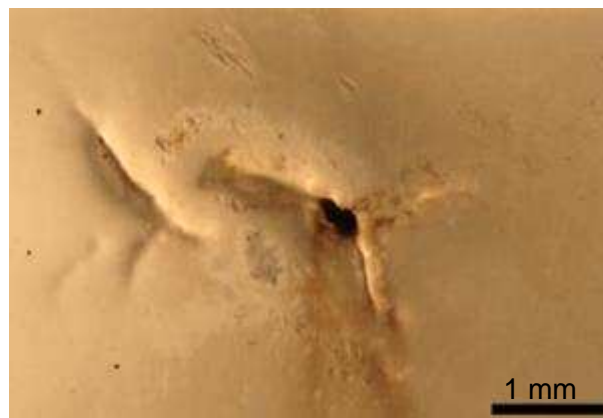
Derartige Strukturen waren auf fast allen Platten sichtbar. Eine Häufung dieser Strukturen bei einzelnen Probenserien war jedoch nicht zu beobachten.





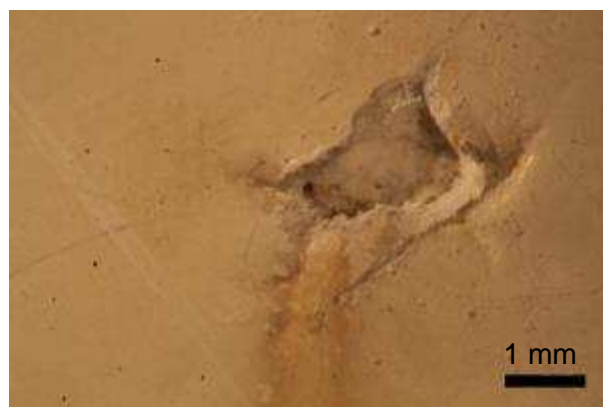
c) Nr5\_IG\_UG04\_2\_rot

Tiefere Risse und Eindrücke; Diese können durch die Bearbeitung der Platten mit der Schneidmaschine, vom Stapeln, etc. entstanden sein. Viele dieser Risse befinden sich auf oder neben kleinen Erhebungen und könnten deshalb auch von ungleicher Verteilung des Harzes während der Beschichtung herrühren.



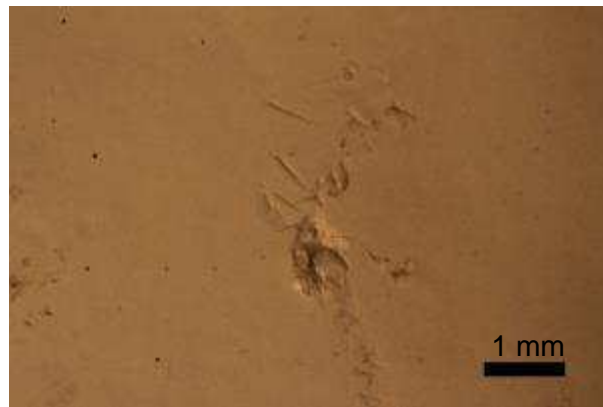
d) Nr5\_IG\_UG04\_2\_rot

„Poren“ in der Beschichtung; Ob eine Schädigung des Betons aufgetreten ist ließ sich mit dem Mikroskop alleine nicht beurteilen, die Beschichtung wurde zumindest optisch soweit sichtbar nicht weiter angegriffen. Nach dem Öffnen der Pore mit dem Messer wurde darunter eine aufgeweichte, pulvrige Spachtelmasse festgestellt. Dies lässt auf eine Beeinflussung der Beschichtung durch das gewählte Auslagerungsszenario schließen.



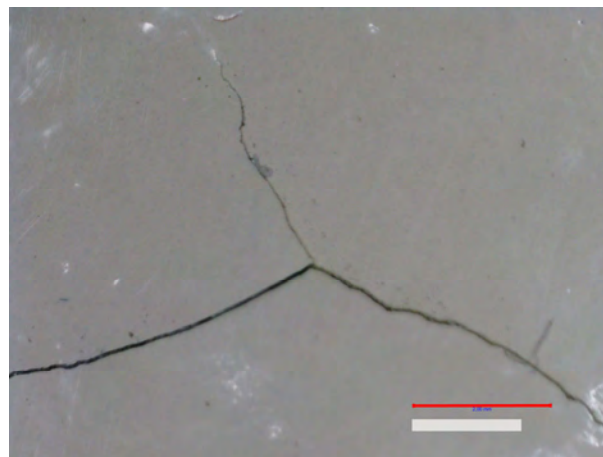
e) Nr5\_IG\_UG04\_2\_rot nach dem Öffnen der Pore mit dem Messer

Unter dem ungeschädigten Anstrich befand sich eine aufgeweichte, pulvrige Spachtelmasse.



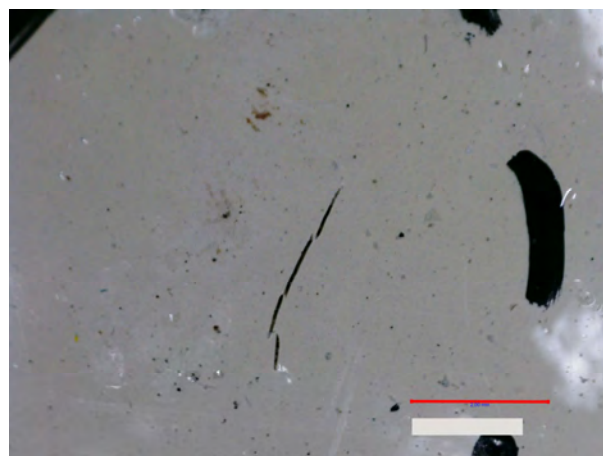
f) Nr5\_IG\_UG04\_2\_rot

Bei manchen Eindrücken und leichten Beschädigungen der Oberfläche wurde eine Verschlechterung des Schadbildes festgestellt, sichtbar durch eine Vertiefung der Beschädigung.



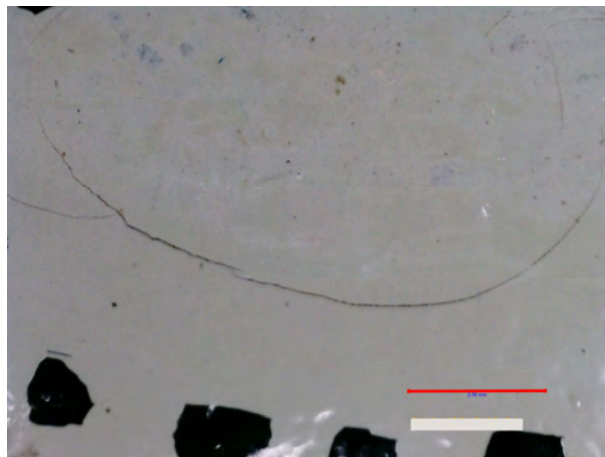
g) Nr1\_IG\_UG02\_1\_grün

Verzweigender Riss als Ansatz zur Krakeleerissbildung und beginnende Ablösung des Anstrichs



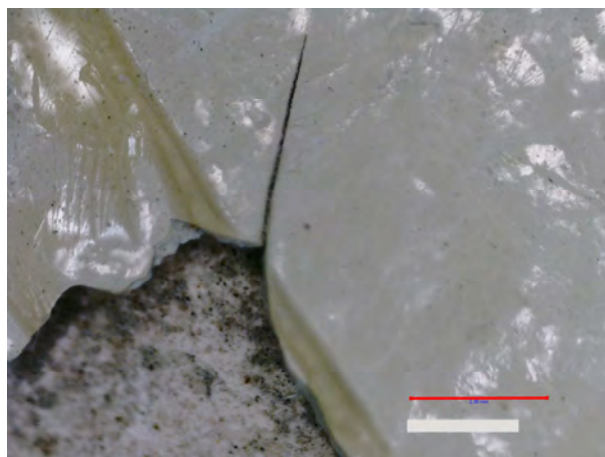
h) Nr2\_WDI\_UG02\_2\_schwarz

Rissbildung im Anstrich



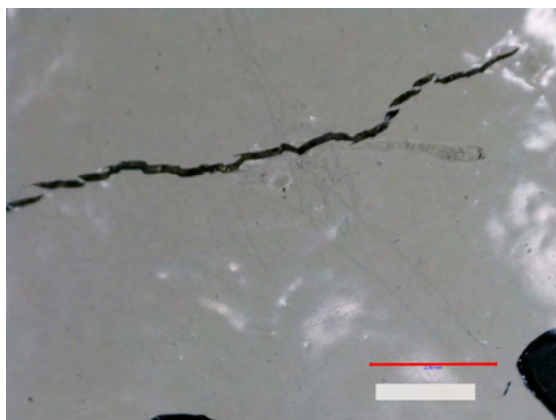
i) Nr8\_WDI\_UG04\_1\_rot

Verzweigender Riss als Ansatz zur Krakeleerissbildung



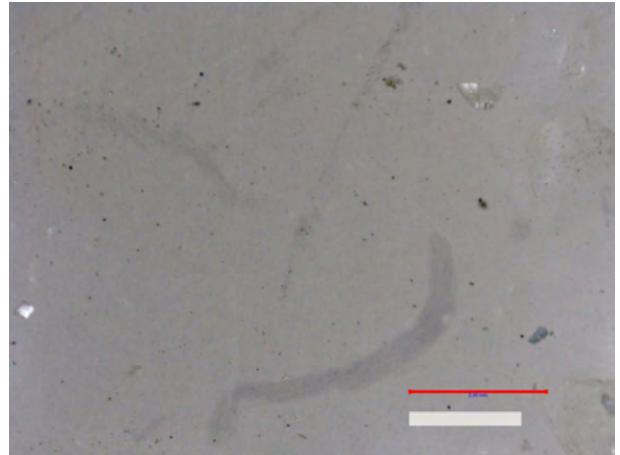
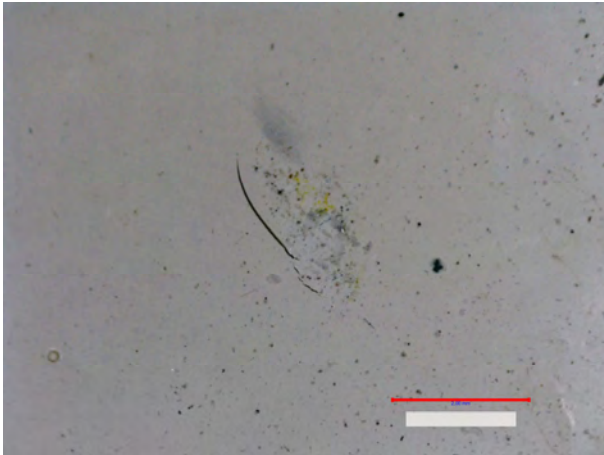
j) Nr8\_WDI\_UG04\_4\_grün

Rissbildung und Ablätterung des Anstrichs durch zusätzliche mechanische Beschädigung



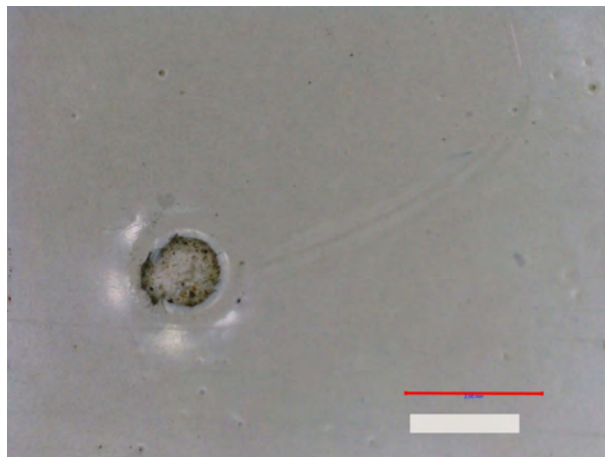
k) Nr5\_IG\_UG04\_2\_rot

Rissbildung in mehreren Bereichen der Probeplatte



l) Nr4\_WDI\_UG02\_schwarz

Rissbildung, noch nicht geöffnete Risse durch Verfärbung der Oberfläche zu erkennen



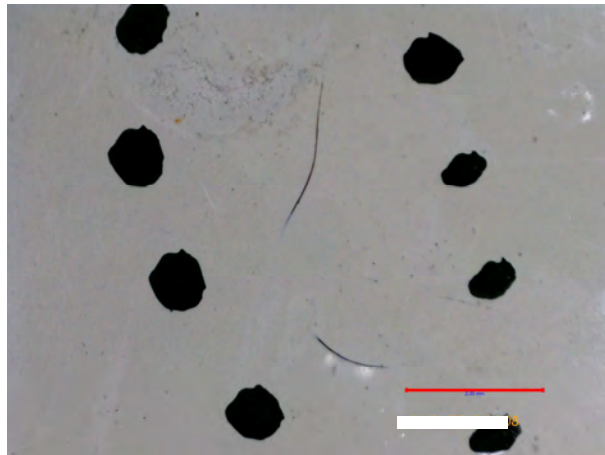
m) Nr3\_IG\_UG02\_schwarz

Krater (aufgeplatze Blase) mit davon ausgehender Rissbildung



n) Nr5\_IG\_UG02\_1\_rot

Rissbildung im Anstrich



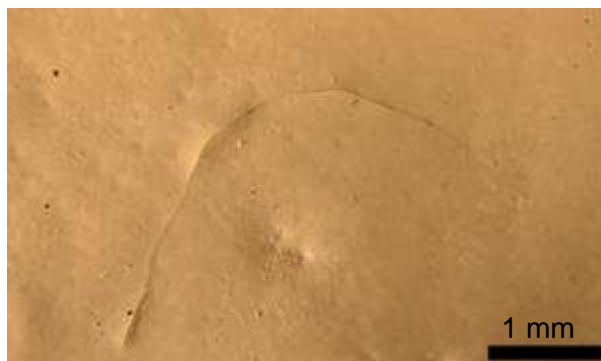
o) Nr8\_WDI\_UG04\_1\_schwarz

Rissbildung im Anstrich

**Abbildung 119: Mikroskopaufnahmen ausgewählter Platten nach der XF4-Prüfung**

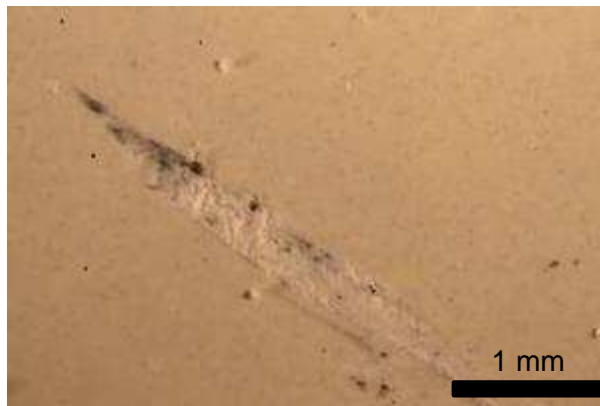
Insgesamt wurden bei mehreren Probenkörpern schadhafte Stellen, hauptsächlich Risse nach den Auslagerungsversuchen auf der Beschichtungsoberfläche festgestellt. Risse und Rissvorstufen waren sowohl auf den Platten welche bei 12 °C beschichtet wurden, als auch auf Platten welche bei 5 °C beschichtet wurden zu sehen. Eine Häufung bezogen auf die Beschichtungsbedingungen konnte nicht beobachtet werden.

Abgesehen von den gebildeten Rissen und den leicht pulverigen Stellen in Porennähe konnte an bereits beschädigten Stellen keine Verschlechterung der Oberflächenbeschaffenheit durch die Auslagerung festgestellt werden. Als Beispiel seien hier Abschürfungen oder Risse welche durch die Verarbeitung entstanden sind zu nennen, sowie Unregelmäßigkeiten aus der Beschichtung. Zum Vergleich sind hier noch zwei Bilder von „Schäden“ vor der XF4-Prüfung abgebildet:



e) Nr8\_WDI\_UG04\_rot

Dünne Struktur mit dunkler Substanz in der Mitte. Diese Strukturen waren auf fast allen Platten sichtbar.



f) Nr1\_IG\_UG04\_1\_rot

Abschürfung an der Oberfläche, welche mit großer Wahrscheinlichkeit von der Handhabung der Platten stammt.

**Abbildung 120: Mikroskopaufnahmen ausgewählter Platten vor der XF4-Prüfung**

### Frost-Taumittel-Belastung in Kombination mit thermischer Alterung

Eine weitere Probeplatte wurde laut Tabelle 45 sowohl einer XF4-Prüfung als auch einer thermischen Konditionierung ausgesetzt. Diese Belastung wurde aufgrund der langen Prüfdauer (jede XF4-Belastung dauerte etwa 1 Monat) nur bei Platten mit einem Beschichtungssystem von Hersteller 1 durchgeführt. Nach Abschluss der Auslagerung wurden sowohl die Haftzugfestigkeiten bestimmt als auch eine optische Untersuchung der Platten durchgeführt. Die Ergebnisse der Abreißfestigkeitsprüfung sind in Tabelle 48 zusammengefasst, wobei bei fast allen Prüfkörpern Bruch im Beton auftrat.

**Tabelle 48: Ergebnisse der Haftzugfestigkeitsprüfung nach XF4 und thermischer Belastung**

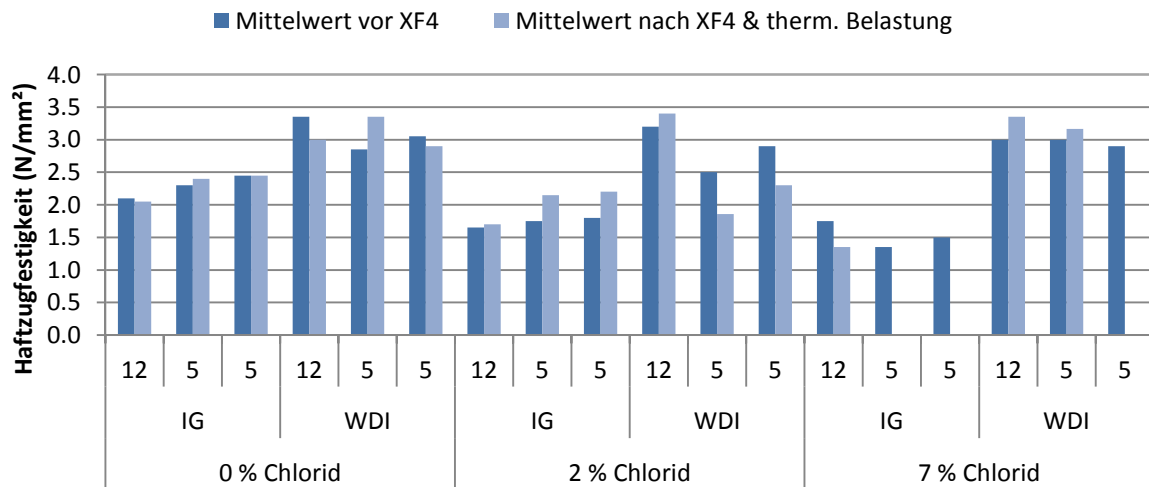
Chlorid	0 %						0 % (Saugen)						2 %						7 %						
Beton	IG			WDI			IG			WDI			IG			WDI			IG			WDI			
<b>HERSTELLER 1 – NACH XF4 &amp; THERM. BELASTUNG</b>																									
Temp.	12	5	5	12	5	5	12	5	12	5	12	5	5	12	5	5	12	5	5	12	5	5	12	5	5
UG <sub>2</sub>	1,9	2,2	2,5	3,1	3,1	2,9	-	-	-	-	1,7	2,2	-	3,4	2,1	-	1,3	<sup>1</sup>	-	3,0	2,9	-			
UG <sub>4</sub>	2,2	2,6	2,4	2,9	3,6	2,9	-	-	-	-	1,7	2,1	2,2	3,4	1,6 <sup>2</sup>	2,3	1,4	<sup>1</sup>	<sup>1</sup>	3,7	3,4 <sup>3</sup>	<sup>1</sup>			

<sup>1</sup> ... Beton gesprungen

<sup>2</sup> ... Bruch zwischen Beton und Spachtelung (A:C = 80:20)

<sup>3</sup> ... Bruch zwischen Beton und Spachtelung (A:C = 60:40)

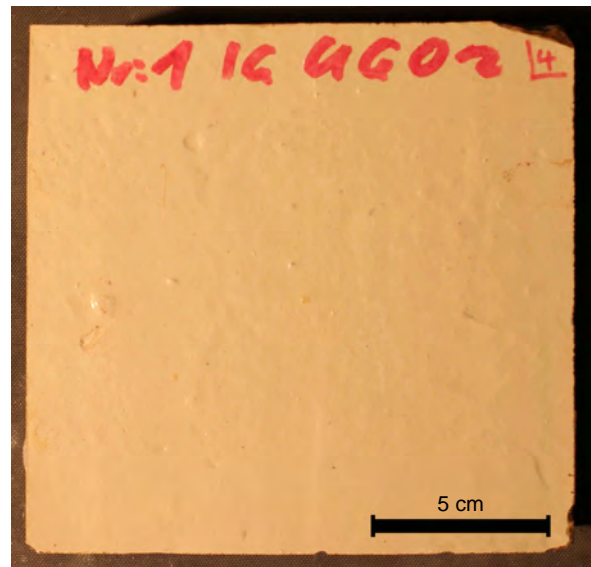
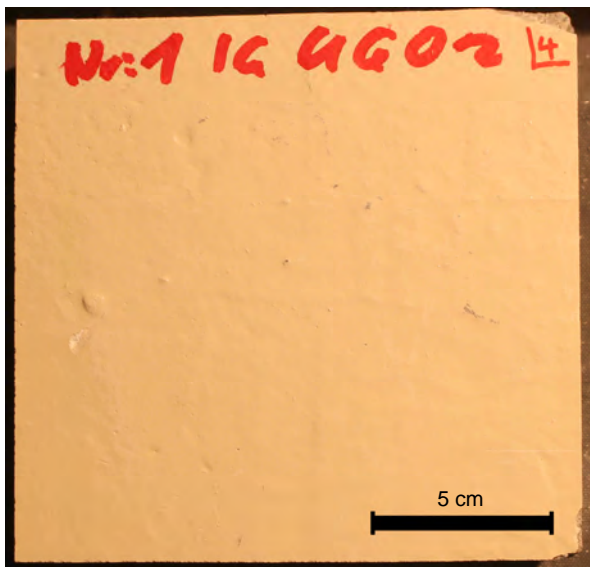
Tabelle 48 zeigt das Ergebnis je einer Einzelmessung pro belasteter Platte, weshalb für die weitere Diskussion und Gegenüberstellung ein Mittelwert für die Rautiefen UG<sub>2</sub> und UG<sub>4</sub> gebildet wurde. In Abbildung 121 sind die Ergebnisse vor und nach dem Belastungsszenario einander gegenübergestellt.



**Abbildung 121: Mittelwerte der Haftzugfestigkeitsprüfung vor und nach der XF4-Prüfung mit thermischer Belastung**

Die Abreißfestigkeiten vor und nach der Auslagerung lagen bei fast allen Probekörpern sehr nahe beieinander wobei sowohl höhere als auch niedrigere Ergebnisse im Vergleich zu den unbehandelten Prüfkörpern erhalten wurden. Daher konnte kein Trend zwischen den Verarbeitungsbedingungen und der Beständigkeit festgestellt werden. Die Anforderung von einer Mindesthaftzugfestigkeit von  $\geq 1,5$  MPa wurde in fast allen Fällen erfüllt, außer bei der Beschichtung bei 12°C des stark chloridhaltigen IG-Betons. Des Weiteren trat bei chloridhaltigem Beton und niedriger Verarbeitungstemperatur zweimal Bruch zwischen dem Beton und der Spachtelung auf und mehrere Platten der Betonsorte IG sind gesprungen. Dies bestätigt die Ergebnisse aus dem Auslagerungsszenario (1), wo ebenfalls bei niedrigen Beschichtungstemperaturen und hohen Chloridgehalten Bruch in der Beschichtung auftrat sowie die Ergebnisse laut [5]. Da die Ergebnisse der Haftzugfestigkeitsprüfung allerdings abhängig vom Prüfort stark schwanken wäre auf jeden Fall eine genauere Untersuchung dieses Sachverhaltes notwendig.

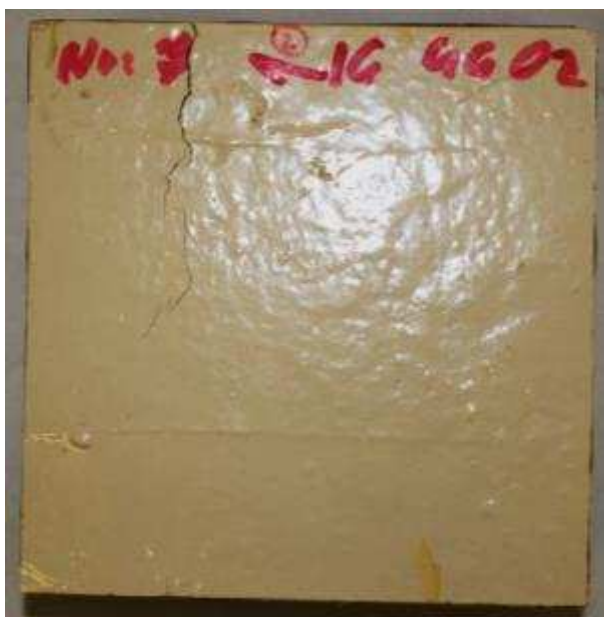
Abschließend sind exemplarisch Fotos und Mikroskopaufnahmen vor und nach der Auslagerung gegenübergestellt. Wie Abbildung 122 zeigt, wurde die Oberfläche rein optisch nicht weiter angegriffen. Blasen, Risse und Ablätterungen, wie im Merkblatt „Tunnelbeschichtungen“ beschrieben, wurden nur auf einer Platte festgestellt. Allerdings sind mehrere Platten aufgrund der Temperaturwechsellagerung in Kombination mit der XF4-Prüfung gesprungen. Dies betraf vor allem stark chloridhaltige Betone. Abbildung 123 zeigt eine dieser Platten nach der Auslagerung.



a) vor der XF4-Prüfung mit therm. Konditionierung

b) nach der XF4-Prüfung mit therm. Konditionierung

**Abbildung 122: Nr1\_IG\_UG02\_4\_rot**



a) Nr7\_IG\_UG02\_2\_rot Vorderansicht

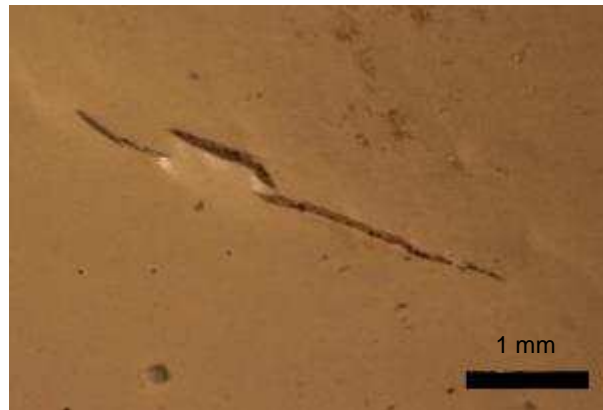
a) Nr7\_IG\_UG02\_2\_rot Seitenansicht

**Abbildung 123: gesprungene Betonplatte nach XF4-Belastung und thermischer Konditionierung**

Abgesehen von den Schädigungen des Betons, wie in Abbildung 123, wurden mit dem Mikroskop Veränderungen der Beschichtungsoberfläche aufgespürt. Abschürfungen aufgrund der Handhabung der Platten wurden durch die Auslagerung auf den ersten Blick nicht in jedem Fall weiter geschädigt. Allerdings wurden, wie auch beim vorherigen Auslagerungsszenario, vereinzelt Risse, Rissvorstufen oder beschädigte Eindrücke auf der Beschichtungsoberfläche festgestellt. Eine Auswahl an Mikroskopaufnahmen ist in Abbildung

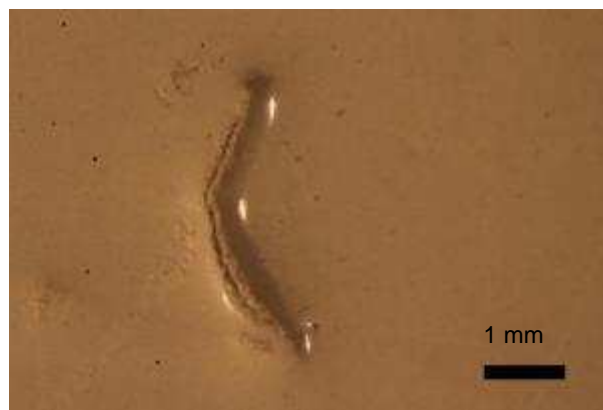


124 dargestellt.



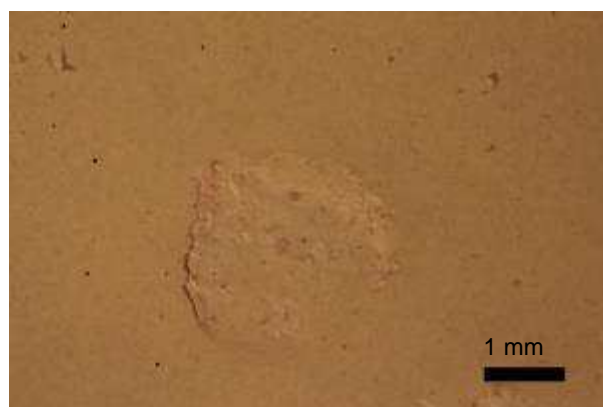
a) Nr5\_IG\_UG04\_2\_rot

Riss in der Beschichtung mit einigen Millimetern Länge



b) Nr6\_WDI\_UG02\_3\_rot

Bei diesem Schadensbild könnte es sich um die Vorstufe eines Risses handeln. Vor der Auslagerung war in der Mitte noch eine dunklere Substanz vorhanden, welche sich aber mit dem Messer herauslösen lies. Hierbei könnte es sich um eine lokale Vernetzungsstörung handeln.



b) Nr6\_WDI\_UG04\_1\_rot

An dieser Stelle war bereits vor der Auslagerung ein leichter Eindruck in der Beschichtungsoberfläche durch die Handhabung der Platten vorhanden. Nach der Auslagerung war ein kleiner Riss an der linken Seite zu sehen.

**Abbildung 124: Mikroskopaufnahmen nach der XF4 Prüfung mit thermischer Belastung**

## Rückseitige Feuchtelagerung

Je eine der vier hergestellten kleinen Probestplatten wurde nach dem Erhärten der Beschichtung für 30 Tage rückseitiger Feuchte ausgesetzt. Nach Abschluss der Auslagerung wurde sowohl die Haftzugfestigkeit bestimmt als auch eine optische Untersuchung der Platten durchgeführt. Die Ergebnisse der Abreißfestigkeitsprüfung sind in Tabelle 49 zusammengefasst, wobei bei fast allen Prüfkörpern Bruch im Beton auftrat.

**Tabelle 49: Ergebnisse der Haftzugfestigkeitsprüfung nach rückseitiger Feuchtelagerung**

Chlorid	0 %						0 % (Saugen)				2 %				7 %							
	IG		WDI		IG		WDI		IG		WDI		IG		WDI							
<b>HERSTELLER 1 – NACH XF4 &amp; THERM. BELASTUNG</b>																						
Temp.	12	5	5	12	5	5	12	5	12	5	12	5	5	12	5	5	12	5	5	12	5	5
UG <sub>2</sub>	1,6	1,7 <sup>1</sup>	2,0	3,0	3,2	3,1	2,4	1,6	3,5	4,8	1,5	1,5	-	4,0	2,3	-	1,3	1,7	-	3,5	3,2	-
UG <sub>4</sub>	1,9	2,6	2,8	3,5	2,4	3,4	-	-	-	-	1,2	1,5	1,8	3,4	2,2	2,5	1,2	2,6	1,3	3,3	2,4	2,8
<b>HERSTELLER 2 – SYSTEM 1 – NACH XF4 &amp; THERM. BELASTUNG</b>																						
Temp.	12	5	5	12	5	5	12	5	12	5	12	5	5	12	5	5	12	5	5	12	5	5
UG <sub>2</sub>	1,4 <sup>2</sup>	1,1 <sup>3</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>HERSTELLER 2 – SYSTEM 2 – NACH XF4 &amp; THERM. BELASTUNG</b>																						
Temp.	12	5	5	12	5	5	12	5	12	5	12	5	5	12	5	5	12	5	5	12	5	5
UG <sub>2</sub>	1,0 <sup>2</sup>	1,6 <sup>4</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

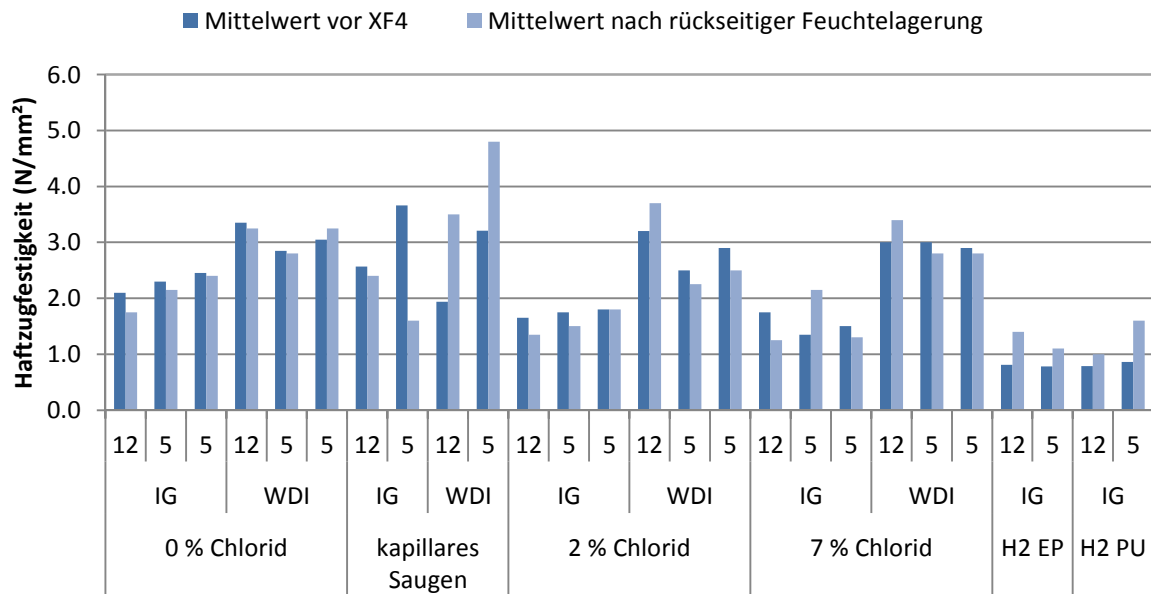
<sup>1</sup> ... Bruch zwischen Beton und Spachtelung (A:C = 30:70)

<sup>2</sup> ... Bruch in Spachtelung

<sup>3</sup> ... Bruch zwischen Beton und Spachtelung (A:B = 20:80)

<sup>4</sup> ... Bruch zwischen Beton und Spachtelung (A:B = 40:60)

Tabelle 49 zeigt das Ergebnis von je einer Einzelmessung pro belasteter Platte, weshalb für die weitere Diskussion und Gegenüberstellung ein Mittelwert der Ergebnisse für die Rautiefen UG<sub>2</sub> und UG<sub>4</sub> gebildet wurde. In Abbildung 125 sind die Ergebnisse vor und nach der rückseitigen Feuchtelagerung einander gegenübergestellt.

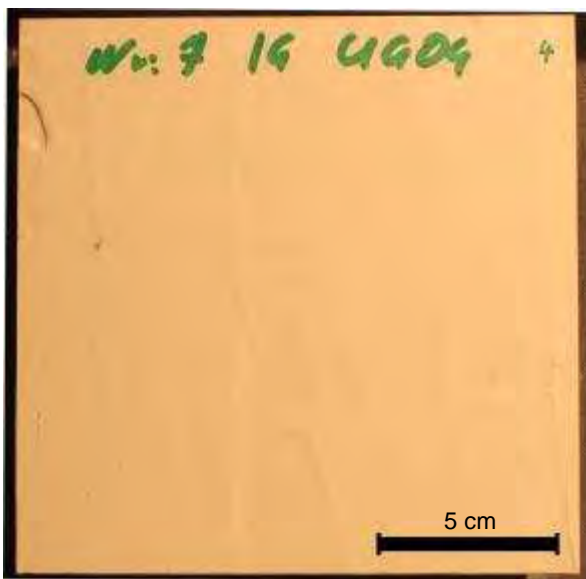


**Abbildung 125: Mittelwerte der Haftzugfestigkeitsprüfung vor und nach der XF4-Prüfung mit thermischer Belastung**

Die Werte für die Haftzugfestigkeit lagen vor und nach der Auslagerung bei fast allen Proben in derselben Größenordnung. Es wurden sowohl niedrigere als auch höhere Abreißfestigkeiten nach der rückseitigen Feuchtelagerung festgestellt. Die Mindestanforderung von  $\geq 1,5$  MPa wurde für das Beschichtungssystem von Hersteller 1 in fast allen Fällen erfüllt. Zu Unterschreitungen kam es, wie auch bei den anderen Auslagerungsversuchen nur bei stark chloridhaltigem Beton der Sorte IG. Da bei allen Probepplatten bis auf eine Ausnahme Bruch im Beton auftrat, konnte kein Zusammenhang zwischen den Verarbeitungsbedingungen und der Beständigkeit festgestellt werden. Für ein aussagekräftigeres Ergebnis wäre eindeutig eine Ausweitung des Versuchsprogramms auf mehrere Probekörper notwendig.

Die Beschichtungssysteme von Hersteller 2 lieferten bereits vor der rückseitigen Feuchtelagerung Haftzugfestigkeiten unterhalb den Mindestanforderungen. Nach der Auslagerung wurde für alle Platten eine höhere Abreißfestigkeit festgestellt, wobei wiederum bei beiden Verarbeitungsbedingungen Bruch in der Spachtelung oder zwischen der Spachtelung und dem Beton auftrat. Auch hier muss die Schwankungsbreite der Haftzugfestigkeitsprüfung miteinbezogen werden. Da außerdem bei allen Auslagerungsbedingungen sowie bei den frisch beschichteten Probepplatten Bruch in der Spachtelung auftrat, muss die Ursache wohl beim Produkt selbst bzw. bei der Verarbeitung gesucht werden.

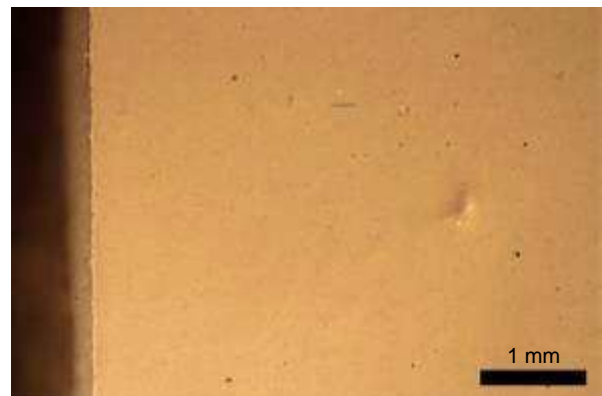
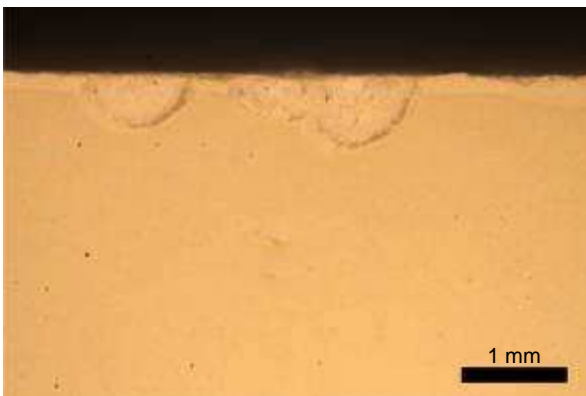
Abschließend sind Fotos und Mikroskopaufnahmen ausgewählter Platten vor und nach der Auslagerung dargestellt. Wie in Abbildung 126 und Abbildung 127 zu sehen, waren durch die rückseitige Feuchteinwirkung auf der Oberfläche weder Blasen noch Abplatzungen entstanden. Insbesondere konnten unter dem Mikroskop keine Veränderungen der Oberfläche aufgrund des Feuchteinflusses festgestellt werden. Abbildung 127 zeigt eine glatte, fast einwandfreie Beschichtungsoberfläche mit leichten Abschlägen an den Plattenrändern.



a) vor der rückseitigen Feuchtelagerung

b) nach der rückseitigen Feuchtelagerung

**Abbildung 126: Nr7\_IG\_UG04\_4\_grün**



a) Nr1\_IG\_UG04\_4\_schwarz

b) Nr7\_IG\_UG02\_4\_rot

**Abbildung 127: Mikroskopaufnahmen nach der rückseitigen Feuchteinwirkung**

## Thermische Alterung

Insgesamt wurden je 3 beschichtete Betonplatten vor und nach einer thermischen Alterung mittels FTIR, DSC und TGA chemisch charakterisiert. Für die unbehandelten Proben wurde ein Beschichtungshersteller ausgewählt (Hersteller 1) und Platten mit unterschiedlicher Beschichtungstemperatur und Aushärtezeit analysiert. Die gleichen Platten wurden anschließend über 4 Wochen bei 140 °C im Ofen unter Luftatmosphäre gelagert um eine Alterung hervorzurufen. Temperatur und Dauer der Ofenlagerung wurden in diesem Fall nicht nach real auftretenden Alterungsszenarien ausgewählt, im Endeffekt sollte eine möglichst weitreichende Schädigung erzielt werden um diese mittels chemischen Analysemethoden zu identifizieren. Die Probenbezeichnung und die Parameter sind in Tabelle 50 zusammengefasst.

**Tabelle 50: Probenübersicht für die thermische Alterung bzw. chemische Analyse**

	Probenbezeichnung	Beschichtungstemperatur	Aushärtezeit
1.	Nr1_IG_UG02_schwarz	12 °C	48 h
2.	Nr1_IG_UG02_rot	5 °C	24 h
3.	Nr1_IG_UG02_grün	5 °C	96 h
4.	Nr1_IG_UG02_4_schwarz_alt	12 °C	48 h
5.	Nr1_IG_UG02_1_rot_alt	5 °C	24 h
6.	Nr1_IG_UG02_4_grün_alt	5 °C	96 h

Die gealterten Probplatten wiesen nach vier Wochen im Ofen bereits eine starke Vergilbung auf. Abbildung 128 zeigt diese Platten im Vergleich zu einer unbehandelten Probe.



**Abbildung 128: Probplatten nach thermischer Behandlung (4 Wochen bei 140 °C)**

Die Beschichtungsoberfläche wurde vor der chemischen Analyse mit dem Mikroskop untersucht um etwaige Risse oder Abplatzungen festzustellen. Bis auf vereinzelte Abplatzungen an den Ecken der Probekörper waren keine Schäden aufgrund der

thermischen Alterung sichtbar. Einige Bilder sind in Abbildung 129 zu sehen. Abbildung 129 a) zeigt eine Abplatzung am Rand des Probekörpers. Besonders die Spachtelung war dort bereits sehr vergilbt und spröde. Am Anstrich selbst, beispielsweise Abbildung 129 b) konnten keine Auffälligkeiten, abseits der Vergilbung festgestellt werden. Wie auch auf den unbehandelten Platten waren vereinzelt Poren und Abschürfungen an der Oberfläche zu sehen. Eine Unterscheidung der Verarbeitungsbedingungen bezüglich thermischer Beständigkeit war augenscheinlich nicht sichtbar, wie Abbildung 129 c) und d) zeigen.



a) Nr1\_IG\_UG02\_4\_schwarz



b) Nr1\_IG\_UG02\_4\_schwarz



c) Nr1\_IG\_UG02\_1\_rot

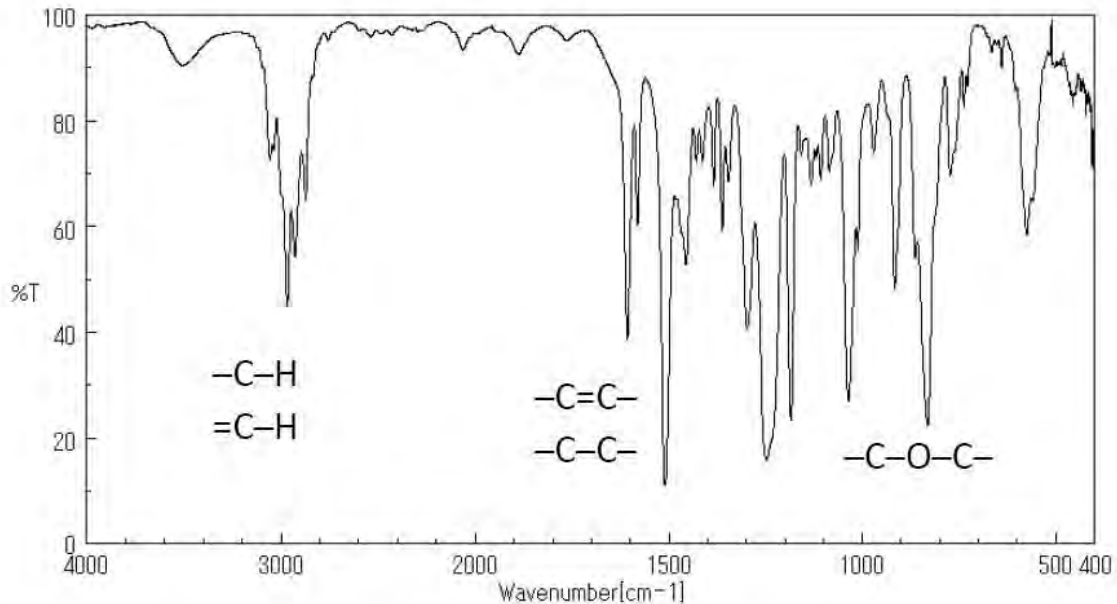


d) Nr1\_IG\_UG02\_4\_grün

**Abbildung 129: Mikroskopaufnahmen der gealterten Probeplatten**

Im Anschluss sind die Ergebnisse der chemischen Analyse gesondert für jede Analysenmethode dargestellt. Für die FTIR-Spektroskopie wurden zusätzlich zu den gealterten und nicht-gealterten Proben auch Nassmuster der Einzelkomponenten von Anstrich und Spachtelung zur Verfügung gestellt um bestimmte Banden den jeweiligen Substanzen zuordnen zu können. Als Referenzspektrum wurde das ATR-FTIR Spektrum von Bisphenol-A-Diglycidylether aus der Spektrendatenbank (<http://sdfs.db.aist.go.jp>) für

organische Verbindungen des nationalen Instituts für industrielle Forschung und Technologie Japans (AIST) verwendet. Abbildung 130 zeigt dieses Referenzspektrum.



**Abbildung 130: ATR-FTIR von Bisphenol-A-Diglycidylether (sdfs.db.aist.go.jp) CAS-Nr. 1675-54-3, 19.07.2016**

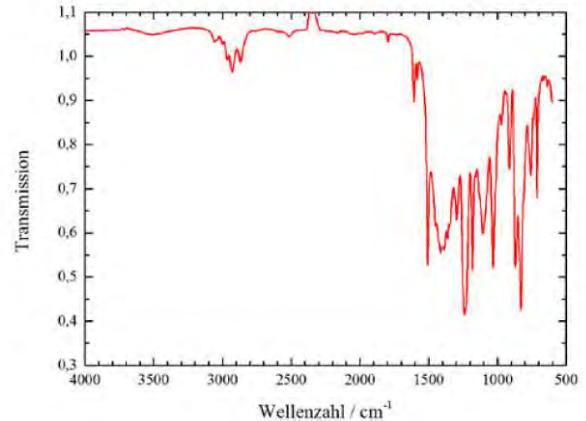
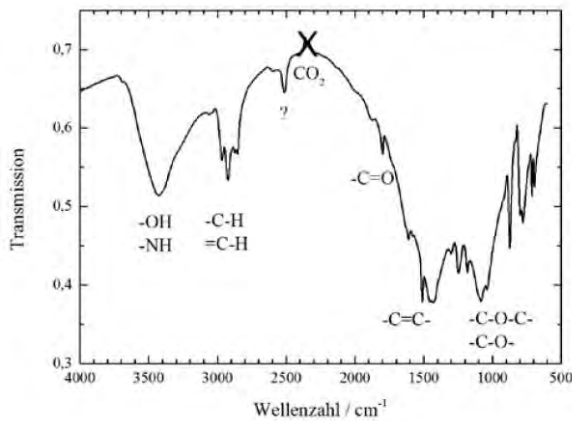
Laut Gebindebeschriftung konnte folgender Hinweis auf die Produktzusammensetzung erhalten werden:

**Tabelle 51: Produktzusammensetzung laut Gebindebeschriftung**

	<b>Spachtelung</b>	<b>Anstrich</b>
Beschreibung	wasserdispergierte Epoxidharzspachtelmasse	wasserverdünnbarer Epoxidharzanstrich
Komponente A enthält	keine Angabe	Polyamin
Komponente B enthält	Bisphenol-A-Diglycidylether Bisphenol-F-Epoxidharz	Bisphenol-A-Epoxidharz p-tert-Butylphenyl-Glycidylether
Mischungsverhältnis A:B	4:1	84:16

Die Spektren der einzelnen Komponenten der Spachtelung sind in Abbildung 131 zu sehen, die Spektren des Anstrichs sind in Abbildung 132 dargestellt. Vergleicht man nun den reinen Bisphenol-A-Diglycidylether mit den aufgenommenen Spektren für die Spachtelung, fiel zuerst die hohe Ähnlichkeit des Referenzspektrums mit der Komponente B auf, welche auch auf dem Gebinde angemerkt wurde. Die Komponente A zeigte einen breiten Wasserpeak im Bereich von  $3500\text{ cm}^{-1}$  (-OH und -NH Streckschwingung), da im Produkt Wasser als

Dispersionmittel verwendet wird. Des Weiteren konnten einzelne Banden charakteristischen Gruppenschwingungen zugeordnet werden, wie in Abbildung 131 a) vermerkt. Wichtig für die Alterungsversuche ist die Bande im Bereich der Carbonylverbindungen bei  $1800\text{-}1700\text{ cm}^{-1}$ .

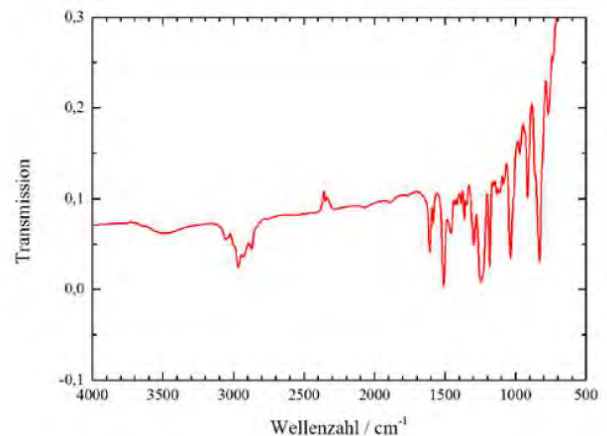
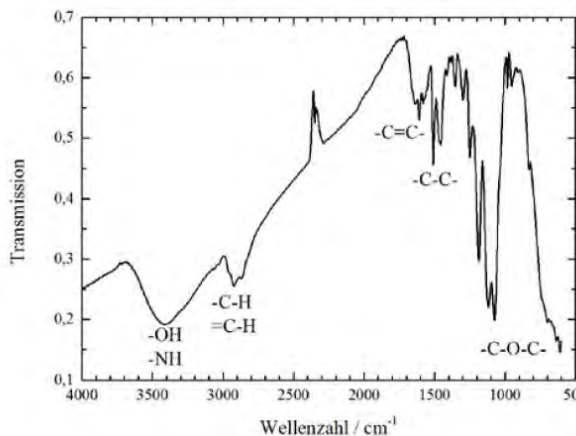


a) Komponente A

b) Komponente B

**Abbildung 131: FTIR-Spektrum der Spachtelung**

Beim Vergleich des reinen Bisphenol-A-Diglycidylether mit den Einzelkomponenten des Anstrichs war ebenfalls eine hohe Ähnlichkeit zwischen dem Referenzspektrum und der Komponente B vorhanden. Für die Komponente A konnten wiederum einzelne Banden zugeordnet werden, welche in Abbildung 132 a) beschriftet sind.



a) Komponente A

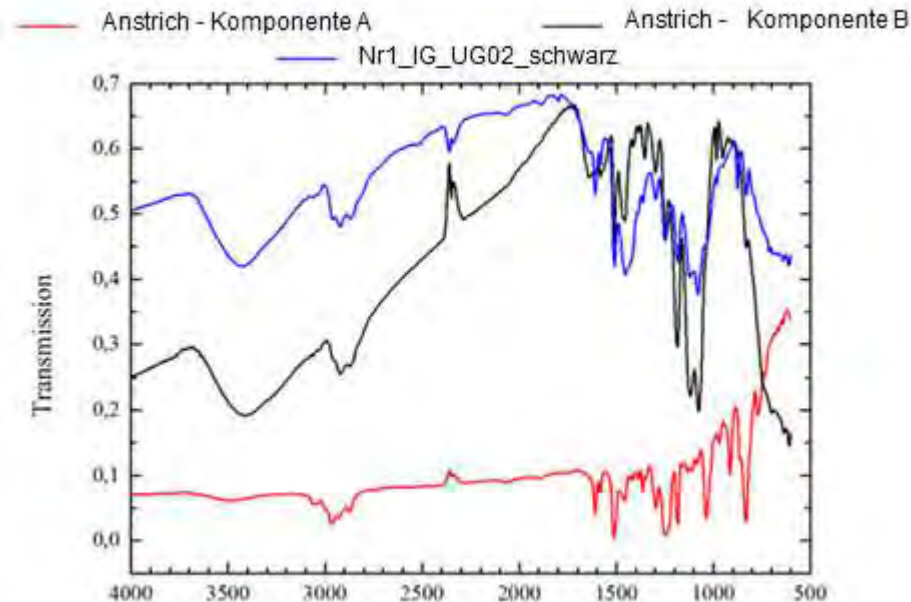
b) Komponente B

**Abbildung 132: FTIR-Spektrum des Anstrichs**

In Abbildung 133 sind die Einzelkomponenten des Anstrichs und eine fertig gemischte Beschichtung gegenübergestellt. Das Spektrum der Beschichtung ähnelte sehr stark dem Spektrum von Komponente A, da diese mengenmäßig den größeren Anteil darstellte. Relevante Unterschiede waren im Bereich  $1500\text{ cm}^{-1}$  und  $1100\text{ cm}^{-1}$  erkennbar. Während bei Komponente B die Bande bei  $1100\text{ cm}^{-1}$  eine deutlich höhere Intensität als die Bande bei

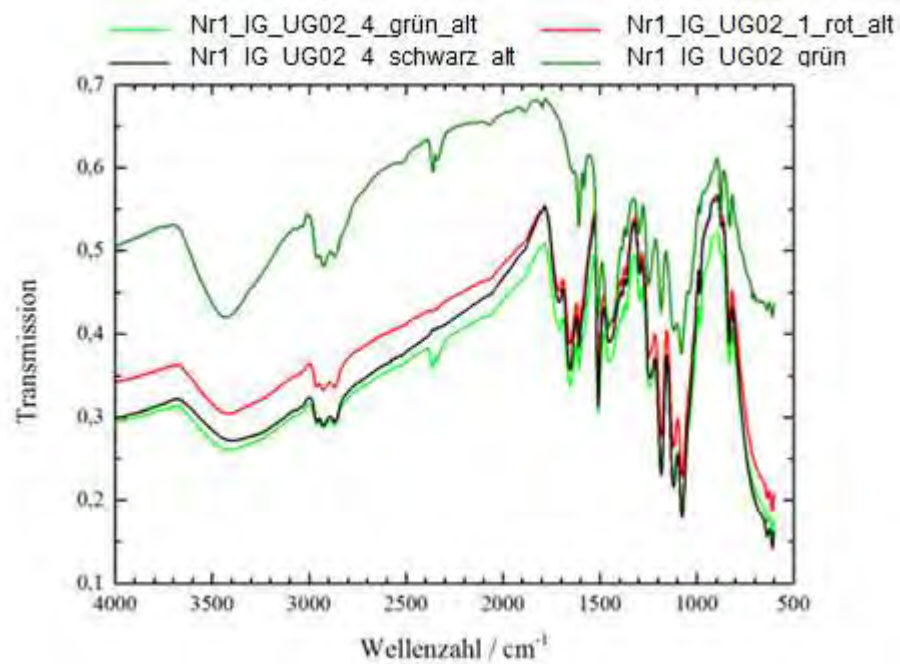


1500  $\text{cm}^{-1}$  besaß, nahm die Intensität bei 1100  $\text{cm}^{-1}$  in der fertig gemischten Beschichtung merklich ab. Da bei der Spachtelung derselbe Effekt zu beobachten war, könnten diese Änderungen der Peakverhältnisse auf Vernetzungsreaktionen zurückzuführen sein.



**Abbildung 133: FTIR-Spektren von Agropox TU Coat W**

Da nun die einzelnen Banden zumindest teilweise charakteristischen Gruppenschwingungen zugeordnet werden konnten, wurde im nächsten Schritt versucht die Alterungsprozesse mit Hilfe von FTIR-Spektren darzustellen. In Abbildung 134 sind die FTIR-Spektren der Anstriche der gealterten Platten und als Vergleich ein unbehandelter Anstrich (Nr1\_IG\_UG02\_grün) zu sehen. Im Bereich der Carbonyle bei 1700-1600  $\text{cm}^{-1}$  trat bei den gealterten Proben eine kleine Bande auf. Da Banden in diesem Bereich üblicherweise bereits bei niedrigen Konzentrationen sehr ausgeprägt sind, kann von einer guten Beständigkeit der Beschichtung gegenüber einer thermischen Alterung ausgegangen werden. Vor allem wenn man die sehr harschen Auslagerungsbedingungen bei 140 °C für 4 Wochen mitberücksichtigt. Zusätzlich ist auch in dieser Abbildung eine Veränderung der Peakverhältnisse im Bereich von 1500  $\text{cm}^{-1}$  und 1100  $\text{cm}^{-1}$  beobachtbar.



**Abbildung 134: FTIR-Spektren der gealterten Anstriche und Vergleich mit einer unbehandelten Probe**

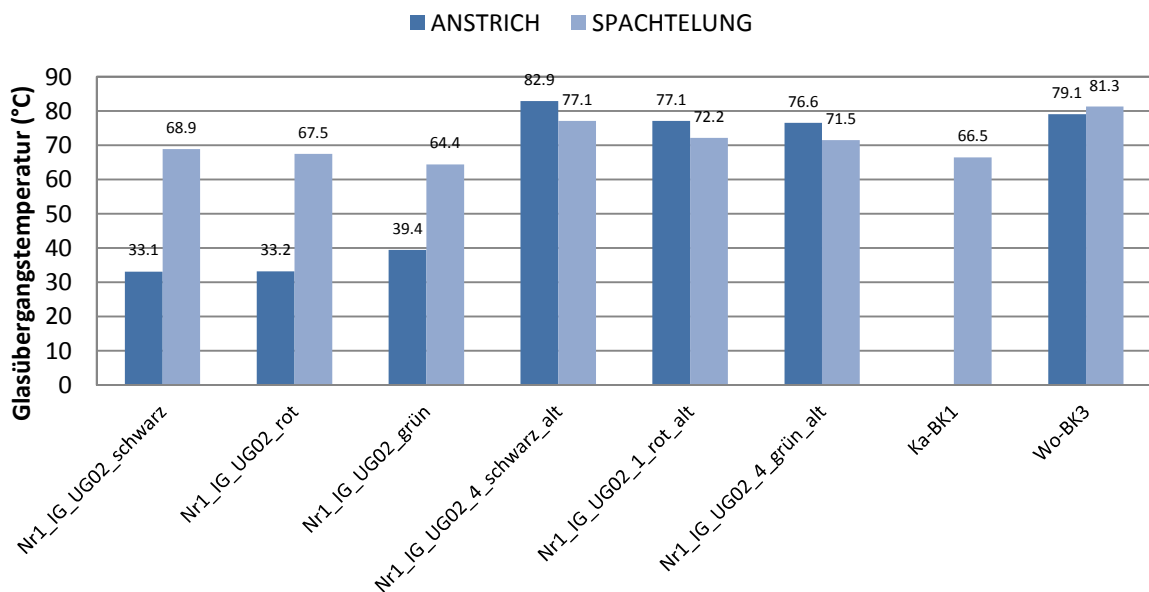
Des Weiteren wurden die gealterten und nicht-gealterten Probekörper mittels DSC und TGA untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 52 für die DSC und in Tabelle 53 für die TGA zusammengefasst.

**Tabelle 52: Ergebnisse der DSC-Messungen für die Laborprobekörper**

Nr.		$T_g$ [°C]	$\Delta H$ [J*g <sup>-1</sup> ]	$T_m$ [°C]	$\Delta H_m$ [J*g <sup>-1</sup> ]
Nr1_IG_UG02_schwarz	Anstrich	33,1	19,0		
	Spachtelung	68,9	12,9	128,9	1,9
Nr1_IG_UG02_rot	Anstrich	33,2	21,2		
	Spachtelung	67,5	13,1	129,1	2,0
Nr1_IG_UG02_grün	Anstrich	39,4	16,5		
	Spachtelung	64,4	10,8	129,1	1,9
Nr1_IG_UG02_4_schwarz_alt	Anstrich	82,9	10,0		
	Spachtelung	77,1	5,0	128,4	1,9
Nr1_IG_UG02_1_rot_alt	Anstrich	77,1	8,4		
	Spachtelung	72,2	6,7	128,1	1,7
Nr1_IG_UG02_4_grün_alt	Anstrich	76,6	11,0		
	Spachtelung	71,5	6,0	128,1	1,9

$T_g$  ... Glasübergangstemperatur in [°C]  
 $\Delta H$  ... Nachhärteenthalpie in [J\*g<sup>-1</sup>]  
 $T_m$  ... Schmelztemperatur in [°C]  
 $\Delta H_m$  ... Schmelzenthalpie in [J\*g<sup>-1</sup>]

Die DSC ergab speziell im Falle der Anstriche ein sehr breites endothermes Signal, welches sich von 50 °C bis 150 °C in der 1. Aufheizkurve zog. Die Glasübergangstemperatur  $T_g$  wurde aus der 2. Aufheizkurve ermittelt, welche bei allen drei unbehandelten Proben bei etwa 35 °C lag. Auch die Nachhärteenthalpie war dementsprechend hoch. Die Glasübergangstemperatur der unbehandelten Spachtelung lag zwischen 66-69 °C. Im Vergleich mit den realen Bohrkernen aus dem Wolfsbergtunnel (beispielsweise Wo-BK3) bzw. der Rückstellprobe aus dem Kalcherkogeltunnel (Ka-BK1) wurden bei den Laborprüfkörpern beim Anstrich deutlich niedrigere Werte gemessen. Im Gegensatz dazu wurde bei den gealterten Laborprobekörpern eine ähnlich hohe Glasübergangstemperatur für den Anstrich festgestellt wie bei den realen Bohrkernen. Außerdem waren die  $T_g$  für Spachtelung und Anstrich ähnlich. Trotz der Auslagerung war aber immer noch eine Nachhärteenthalpie von einigen  $J \cdot g^{-1}$  messbar. Eine grafische Gegenüberstellung der  $T_g$  ist in Abbildung 135 zu sehen.



**Abbildung 135: Ergebnisse der DSC-Messungen für die Laborprobekörper**

Wie Abbildung 135 zeigt, nimmt die Glasübergangstemperatur für die unbehandelten Proben von schwarz über rot nach grün für den Anstrich leicht zu und für die Spachtelung leicht ab. Des Weiteren nahmen die  $T_g$  der Anstriche durch die thermische Beanspruchung um mehr als das Doppelte zu, die  $T_g$  der Spachtelungen lagen ebenfalls um einige Grade höher. Besonders interessant ist in diesem Zusammenhang, dass die Glasübergangstemperaturen des realen Bohrkerns eher im Bereich der gealterten Proben liegen als in Höhe der unbehandelten Laborprüfkörper.

Abschließend sind die Ergebnisse der TGA in Tabelle 53 zusammengefasst.

**Tabelle 53: Ergebnisse der TGA-Messungen für die Laborprobekörper**

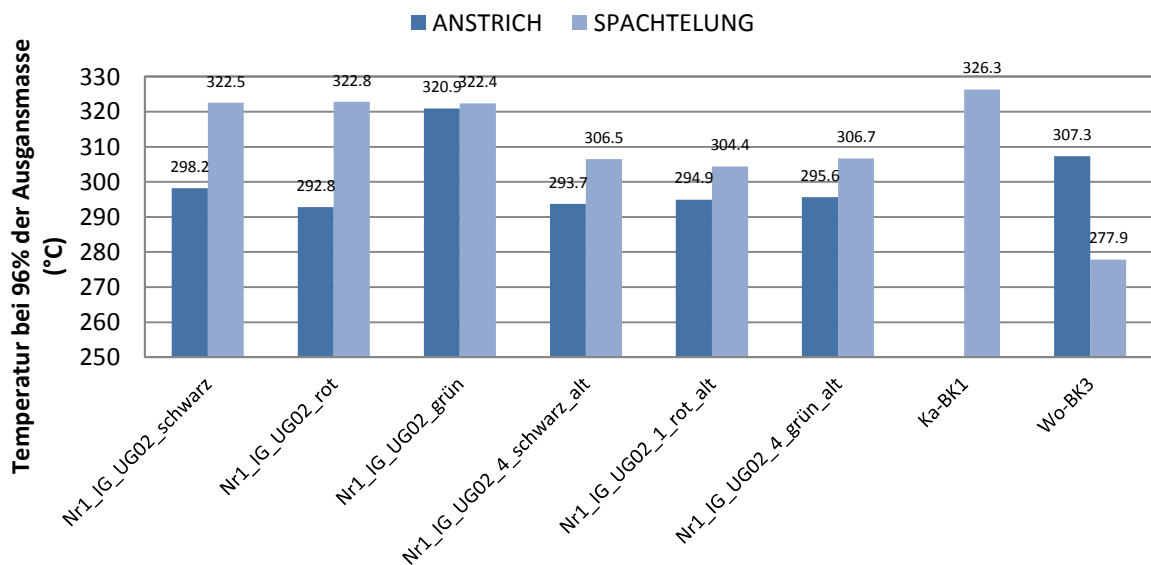
Nr.		T <sub>96%</sub> [°C]	T <sub>Δm,max</sub> [°C]	m <sub>r</sub> [%]
Nr1_IG_UG02_schwarz	Anstrich	298,2	356,6	51,1
	Spachtelung	322,5	341,4	62,9
Nr1_IG_UG02_rot	Anstrich	292,8	359,7	49,9
	Spachtelung	322,8	346,2	63,5
Nr1_IG_UG02_grün	Anstrich	320,9	358,4	51,7
	Spachtelung	322,4	348,7	63,5
Nr1_IG_UG02_4_schwarz_alt	Anstrich	293,7	368,1	61,6
	Spachtelung	306,5	373,3	66,7
Nr1_IG_UG02_1_rot_alt	Anstrich	294,9	367,7	60,5
	Spachtelung	304,4	369,4	64,6
Nr1_IG_UG02_4_grün_alt	Anstrich	295,6	367,0	61,1
	Spachtelung	306,7	368,5	67,5

T<sub>96%</sub> ... Temperatur bei 96% der Ausgangsmasse in [°C]

T<sub>Δm,max</sub> ... Temperatur bei maximaler Massenänderung in [°C]

m<sub>r</sub> ... Restmasse am Ende der Messung bei T=700°C in [%]

Wie auch bei der DSC-Analyse zeigten die Anstriche und Spachtelungen unterschiedliches Verhalten, allerdings war zwischen gealterten und nicht-gealterten Probekörpern kaum ein Unterschied zu erkennen. Generell lag die Temperatur bei 96 % der Restmasse knapp unterhalb von 300 °C, während die Spachtelungen etwas höhere Temperaturen aufwiesen. Nur die Temperatur für den Anstrich von Nr1\_IG\_UG02\_grün lag etwas höher und damit ebenfalls im Bereich der Spachtelungen. Auffällig war außerdem, dass die T<sub>96%</sub> für die gealterten Spachtelungen im Vergleich zu den unbehandelten Spachtelungen etwas abnahm. Die Ergebnisse sind in Abbildung 136 zusätzlich nochmals grafisch dargestellt und mit den Ergebnissen aus dem Wolfsbergtunnel (Wo-BK3) und der Rückstellprobe aus dem Kalcherkogeltunnel (Ka-BK1) verglichen. Im Vergleich zur Rückstellprobe ließ sich kein Unterschied zu den Spachtelungen der unbehandelten Proben feststellen, nur die T<sub>96%</sub> der gealterten Probekörper war etwas niedriger. Bezogen auf den realen Bohrkern aus dem Wolfsbergtunnel WoS-BK3 lag deren T<sub>96%</sub> des Anstriches etwas höher und die T<sub>96%</sub> der Spachtelung deutlich niedriger als bei den Laborprüfkörpern. Die TGA ergab, wie auch schon die DSC einen eindeutigen Unterschied zwischen den Laborprobeplatten und den realen Proben aus dem Tunnel. Von Interesse wäre in diesem Zusammenhang die Aushärtung und Vernetzung der verwendeten Beschichtungssysteme genauer zu analysieren und so Rückschlüsse auf den Fertigungszeitpunkt und die klimatischen Bedingungen im Tunnel zu ziehen.



**Abbildung 136: Ergebnisse der TGA-Messungen für die Laborprobekörper**

## Fazit

- ❖ Mittels FTIR wurden die Spektren der einzelnen Produktkomponenten mit einer Referenzsubstanz (Bisphenol-A-Diglycidylether) verglichen, wobei eine gute Übereinstimmung erhalten wurde. Die Spektren des fertig gemischten Beschichtungssystems ähnelten der mengenmäßig dominanten Komponente. Außerdem waren Änderungen im Peakverhältnis bei etwa  $1500\text{ cm}^{-1}$  und  $1100\text{ cm}^{-1}$  zwischen den Einzelsubstanzen und dem gemischten System beobachtbar. Durch genauere Untersuchung könnte dies einen Rückschluss auf den Vernetzungsgrad bzw. auf Mischungsfehler ermöglichen. Die gealterten Proben zeigten des Weiteren eine gute thermische Beständigkeit, da nur ein kleiner Carbonyl-Peak im Spektrum zu sehen war.
- ❖ Die Ergebnisse der DSC ergaben deutlich niedrigere  $T_g$  der Anstriche im Vergleich mit realen Bohrkerne. Die Spachtelungen lieferten in etwa gleiche Messwerte. Interessanterweise wiesen gealterte und reale Bohrkerne ähnliche  $T_g$  auf. Bezüglich der Verarbeitungsbedingungen war eine leichte Tendenz zwischen von der schwarzen, roten zur grünen Probenserie erkennbar. Die grüne Probenserie ergab hier die höchsten  $T_g$ .
- ❖ Die Ergebnisse der TGA zeigen diesen Trend ebenfalls, allerdings müsste eine genauere Untersuchung zur Bestätigung dieses Verhaltens durchgeführt werden. Außerdem wäre es interessant festzustellen inwieweit die gemessenen Parameter in der Realität streuen um einen Vergleich zwischen den Laborprüfkörpern und Tunnelbohrkernen zu ermöglichen und im Idealfall Rückschlüsse auf die Vernetzung zu schließen.

#### 6.4.4 Einfluss der Verarbeitungsbedingungen – Kurzversuche

Um weitere Witterungseinflüsse während des Auftragens des Beschichtungssystems zu simulieren, wurden nochmals 6 Probekörper der Betonsorte IG ohne Chloridvorbelastung hergestellt, vorbereitet auf Rautiefe  $\geq 0,3$  mm und unter unterschiedlichen Bedingungen mit dem System von Hersteller 1 beschichtet. Anschließend wurde bei allen Platten die Haftzugfestigkeit bestimmt und die Oberfläche optisch untersucht. Die Ergebnisse dieser Kurzversuche sind im Folgenden dargestellt:

##### Szenario 1: Rückseitige Feuchte

Bei je zwei Platten wurde das Beschichtungssystem auf hinterfeuchtem Beton bei einer Umgebungstemperatur von 12 °C aufgetragen. Tabelle 54 zeigt die Haftzugfestigkeit (Mittelwert aus 3 Einzelwerten) der Prüfkörper nach dem Beschichten.

**Tabelle 54: Ergebnisse der Haftzugfestigkeitsprüfung nach Beschichtung bei rückseitiger Feuchte**

Plattenbezeichnung	Haftzugfestigkeit (MPa)	
1_1	1,9	Bruch zwischen Beton und Spachtelung
1_2	2,0	Bruch im Beton

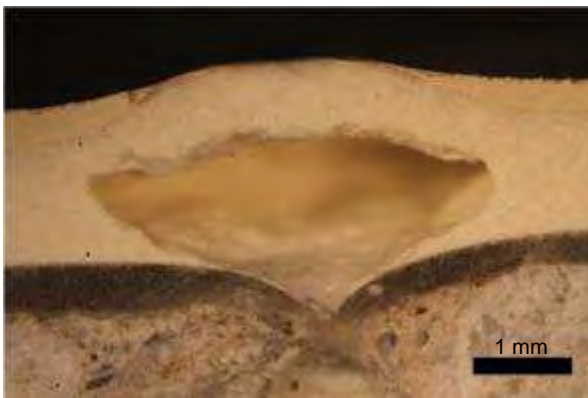
Wie in Tabelle 54 ersichtlich wurde die Mindestanforderung an die Haftzugfestigkeit von  $\geq 1,5$  MPa von beiden Probeplatten erfüllt. Obwohl beide Platten dieselbe Betongüte aufwiesen, trat bei einer der beiden Bruch zwischen Beton und Spachtelung und bei der anderen Platte Bruch im Beton auf. Für eine genauere Aussage müssten deshalb weitere Platten beschichtet werden, allerdings lässt sich ein Einfluss der Feuchte auf das Aushärten des Beschichtungssystems vermuten. Außerdem dürfte das Porensystem einen entscheidenden Einfluss auf die Auswirkungen der Feuchtelagerung haben. Auf derselben Platte (1\_1) welche bei der Haftzugfestigkeitsprüfung Bruch zwischen Beton und Spachtelung aufwies, wurden ebenfalls kleine Bläschen auf der Beschichtungsoberfläche festgestellt. Diese sind in Abbildung 137 und Abbildung 138 zu sehen. Auf der Platte 1\_2 waren nach der Beschichtung keine Blasen sichtbar.

Die Bläschen auf Platte 1\_1 waren etwa einige Millimeter im Durchmesser groß und über die gesamte Oberfläche verteilt. Die Bläschen waren außerdem schon nach dem Auftragen der Grundierung auf der Oberfläche zu sehen und haben sich bis in den Anstrich durchgedrückt.

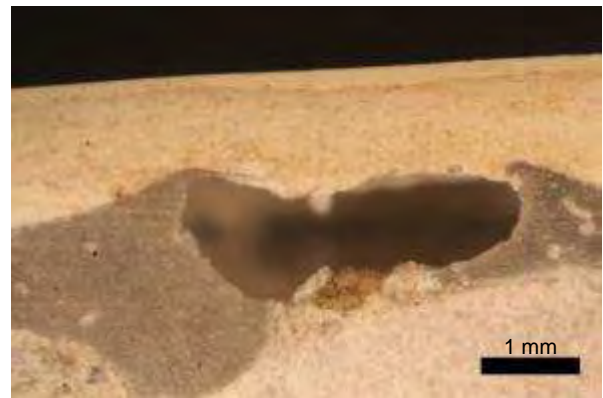


**Abbildung 137: Platte 1\_1 mit Grundierung nach einem Tag**

Abbildung 138 zeigt sowohl eine Blasenbildung in der Grundierung mit Verbindung zum Porensystem als auch eine Blasenbildung in der Spachtelung oder in der Grundierung ohne sichtbare Verknüpfung mit einer Pore im Beton.



a) Blase in der Grundierung und Spachtelung



b) Blase in der Grundierung



c) Blase in der Spachtelung

**Abbildung 138: Querschnitt einiger Blasen auf Platte 1\_1**

## Szenario 2: Frost und Kondenswasser

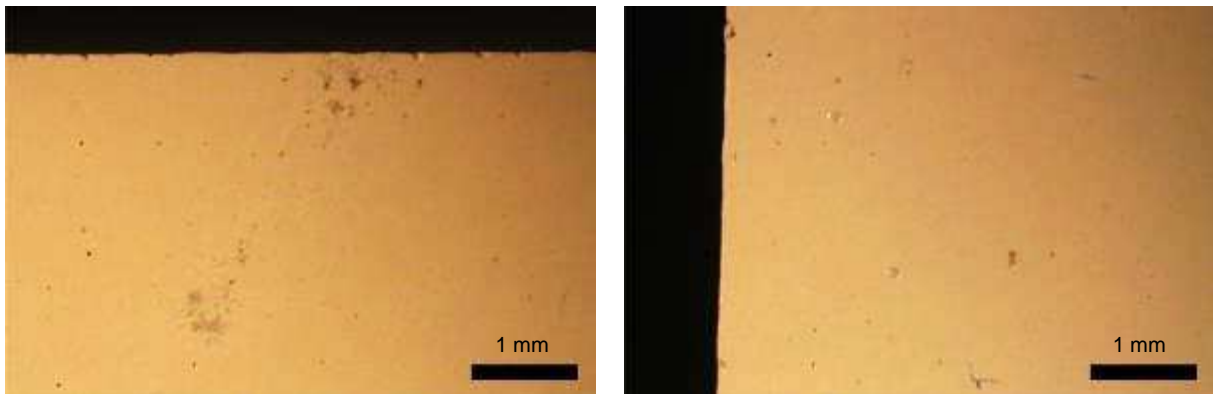
Zwei weitere Platten wurden während der Beschichtung abrupten Temperaturschwankungen zwischen +12 °C und 0 °C ausgesetzt. Die Haftzugfestigkeiten nach dem Beschichten sind in Tabelle 55 zusammengefasst (Mittelwert aus je 3 Einzelwerten).

**Tabelle 55: Ergebnisse der Haftzugfestigkeitsprüfung nach Beschichtung bei Frost und Kondenswasser**

Plattenbezeichnung	Haftzugfestigkeit (MPa)	
2_1	2,5	Bruch im Beton
2_2	3,2	Bruch im Beton

Bei beiden Platten trat bei der Haftzugfestigkeitsprüfung Bruch im Beton auf, auch die Anforderung aus dem Merkblatt „Tunnelbeschichtungen“ wurde erfüllt.

Die Platten wurden zusätzlich optisch auf Risse und Abplatzungen hin untersucht. Abbildung 139 zeigt exemplarisch zwei Mikroskopaufnahmen.



a) leichte Abschürfungen an der Oberfläche

b) fehlerfreie Beschichtungsoberfläche

**Abbildung 139: Beschichtungsoberfläche auf Platte 2\_2**

Wie in Abbildung 139 deutlich zu sehen, konnten weder Risse noch Abplatzungen auf der Beschichtungsoberfläche festgestellt werden. Nur Abschürfungen welche aufgrund der Handhabung der Platten entstanden waren, waren vereinzelt vorhanden.



### Szenario 3: Verdünnung

Bei den letzten beiden Platten wurden die Spachtelung und der Anstrich in verdünnter Form aufgetragen. Die maximale Verdünnung war dem Datenblatt der jeweiligen Beschichtungsstoffe entnommen worden. Generell war die Verarbeitbarkeit der verdünnten Produkte sehr gut. Die Ergebnisse (Mittelwert aus je 3 Einzelmessungen) der Haftzugfestigkeitsprüfung sind in Tabelle 56 zusammengefasst.

**Tabelle 56: Ergebnisse der Haftzugfestigkeitsprüfung nach Beschichtung mit verdünnten Produkten**

Plattenbezeichnung	Haftzugfestigkeit (MPa)	
3_1	2,1	Bruch im Beton
3_2	2,2	Bruch im Beton



**Abbildung 140: Platte 3\_1 nach der Prüfung der Haftzugfestigkeit**

Bei beiden Platten trat bei der Haftzugfestigkeitsprüfung Bruch im Beton auf, auch die Anforderung aus dem Merkblatt „Tunnelbeschichtungen“ wurde erfüllt. Auch auf der Oberfläche der Platten waren keine Unregelmäßigkeiten zu erkennen.

## 6.5 Erprobung neuer Beurteilungsmethoden

Während diesem Arbeitspaket wurden neue Beurteilungsmethoden für eine verstärkte Qualitätskontrolle während der Bauausführung erprobt. Hierfür wurden verschiedene Ansätze, wie in den folgenden Kapiteln beschrieben, auf deren Tauglichkeit zur Qualitätssicherung für Tunnelanstrichsysteme angewandt.

### 6.5.1 Keilspaltversuche

Die Keilspaltprüfung wurde als Alternative bzw. Erweiterung zur Prüfung der Haftzugfestigkeit erprobt, da die Krafteinwirkung beim Entstehen von Ablöseerscheinungen und Blasen von einer uniaxialen Belastung wie bei der Haftzugprüfung abweichen kann. Mit Hilfe der Keilspaltmethode kann die Kerb-Spaltzugfestigkeit und die spezifische Bruchenergie von Baustoffen ermittelt werden. Bei der spezifischen Bruchenergie  $G_F$  handelt es sich um die mittels numerischer Integration berechnete Fläche unter der Last-Verschiebungskurve bezogen auf die Ligamentfläche. Dieser Wert stellt ein Maß für den Widerstand gegen Rissausbreitung dar. Die Kerb-Spaltzugfestigkeit  $\alpha_{kz}$  wird aus der Bruchlast (Höchstkraft) und der Ligamentfläche berechnet.

Insgesamt wurden 8 Probelplatten für eine Keilspaltprüfung präpariert und anschließend die bruchmechanischen Kennwerte ermittelt. Dazu wurden Prüfkörper mit unterschiedlicher Chloridbelastung und unterschiedlichem Verarbeitungsszenario ausgewählt. Außerdem wurde der Einfluss einer XF4-Auslagerung mitberücksichtigt. Eine Übersicht über die Prüfkörper und die Ergebnisse ist in Tabelle 57 dargestellt.

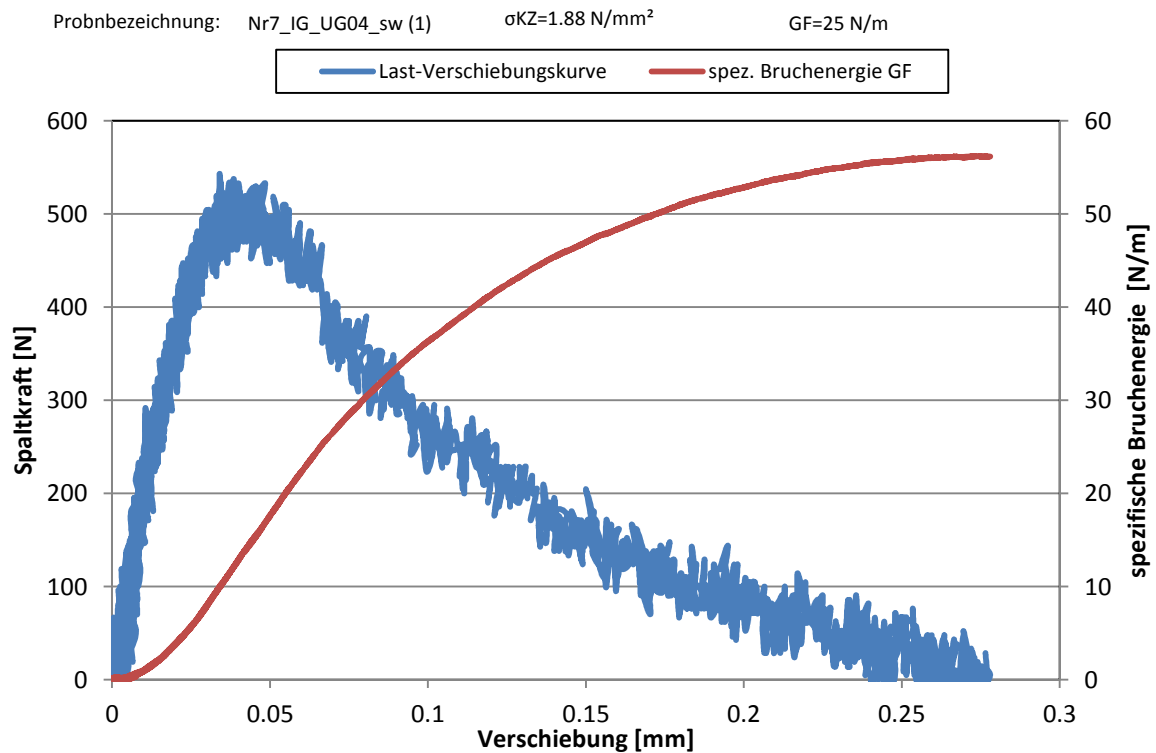
**Tabelle 57: Ergebnisse der Keilspaltprüfung**

	$\sigma_{kz}$ in N/m			$G_F$ in N/m		
	(1)	(2)	Mittelwert	(1)	(2)	Mittelwert
<b>Vor XF4</b>						
Nr1_IG_UG04_schwarz	2.97	2.40	<b>2.69</b>	62	51	<b>57</b>
Nr1_IG_UG04_rot	-	-	-	-	-	-
Nr7_IG_UG04_schwarz	2.60	2.58	<b>2.59</b>	51	135	<b>93</b>
Nr7_IG_UG04_rot	3.57	3.56	<b>3.57</b>	148	124	<b>136</b>
<b>Nach XF4</b>						
Nr1_IG_UG04_schwarz	3.36	3.23	<b>3.30</b>	72	72	<b>72</b>
Nr1_IG_UG04_rot	4.06	3.92	<b>3.99</b>	38	37	<b>38</b>
Nr7_IG_UG04_schwarz	1.88	2.88	<b>2.38</b>	25	88	<b>57</b>
Nr7_IG_UG04_rot	2.79	3.33	<b>3.06</b>	121	118	<b>120</b>



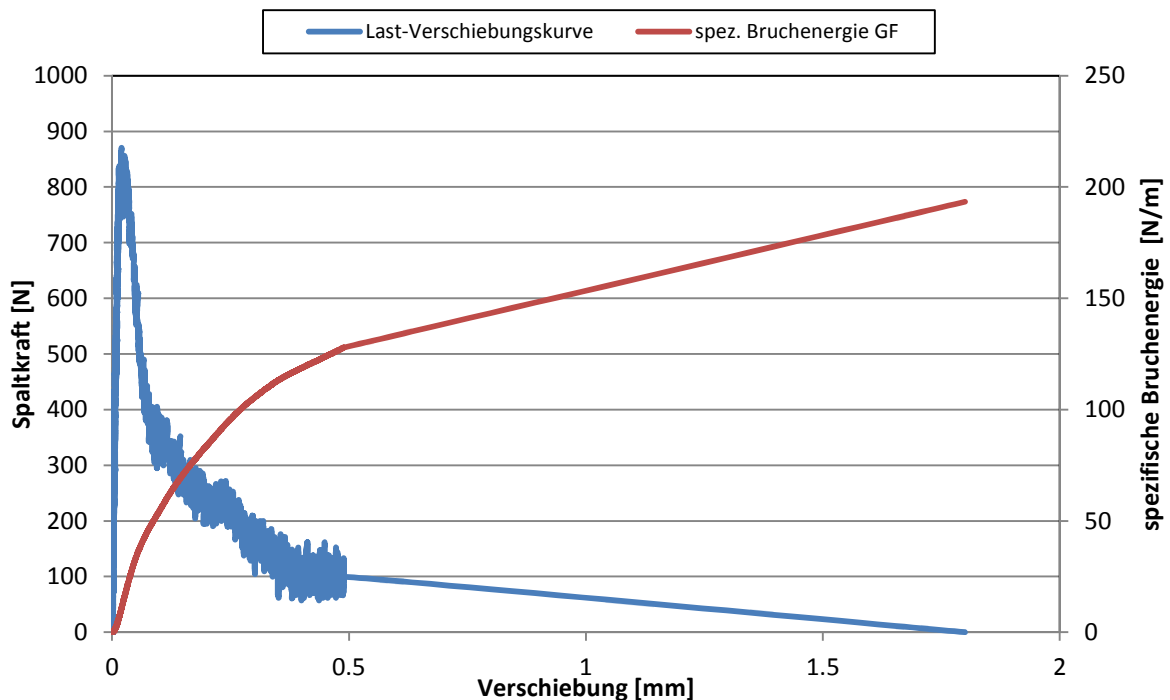
**Abbildung 141: Bruchbild von Nr1\_IG\_UG04\_schwarz (nach XF4) nach der Keilspaltprüfung**

Bei allen in Tabelle 57 gezeigten Ergebnissen erfolgte zu 100 % Bruch im Trägerbeton, wie auch Abbildung 141 zeigt. Deshalb konnten keine Daten bezüglich der Haftung der oberen beiden Beschichtungslagen, Spachtelung und Anstrich gesammelt werden. Allerdings wurde eine Beeinflussung des Bruchverhaltens durch die in die obere Betonschicht eingezogene Grundierung festgestellt werden, da insbesondere die Ergebnisse für die spezifische Bruchenergie einer hohen Schwankung ausgesetzt waren, wie in Abbildung 142 und Abbildung 143 zu sehen. Obwohl beide Prüfkörper aus einer Platte hergestellt wurden, unterschieden sich die Ergebnisse für die spezifische Bruchenergie deutlich.



**Abbildung 142: Last-Verschiebungskurve von Nr7\_IG\_UG04\_schwarz\_(1) (nach XF4)**

Probenbezeichnung: Nr7\_IG\_UG04\_sw (2)       $\sigma_{KZ}=2.88 \text{ N/mm}^2$       GF=88 N/m



**Abbildung 143: Last-Verschiebungskurve von Nr7\_IG\_UG04\_schwarz\_(2) (nach XF4)**

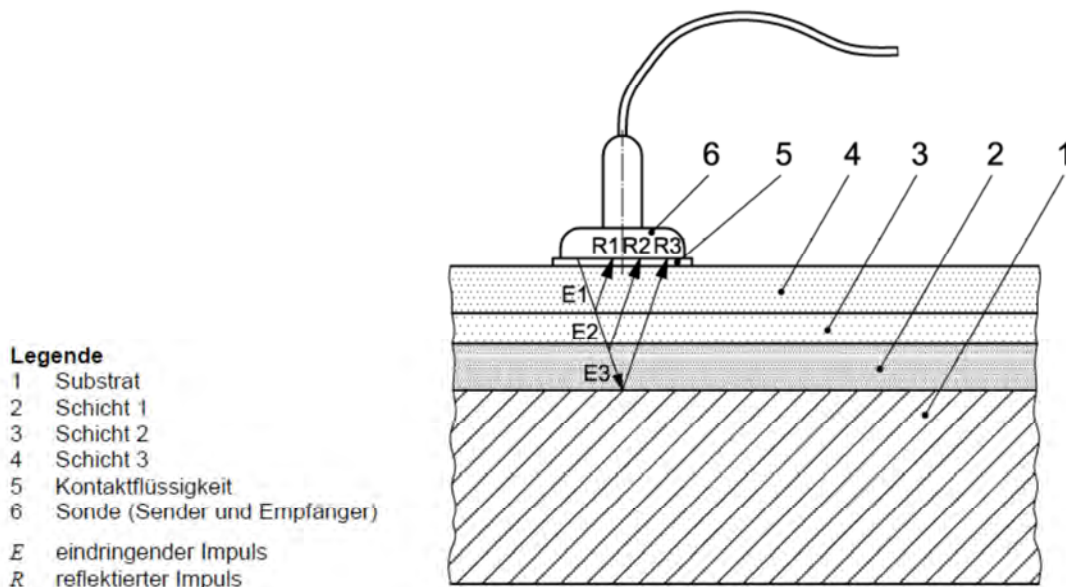
Dadurch, dass die Grundierung je nach Eindringtiefe starken Einfluss auf die Messwerte ausübte, konnte mit Hilfe der Keilspaltprüfung für diesen Beschichtungsaufbau kein Zusammenhang zwischen Bruchverhalten und Verarbeitungsbedingungen, Chloridbelastung oder Schädigung durch Auslagerung erhalten werden. Allerdings wäre eine Anwendung bei abweichendem Beschichtungsaufbau noch zu prüfen.

### 6.5.2 Schichtdickenmessung mittels Ultraschall

Der Nachweis der vertraglich vereinbarten Schichtdicke stellt ein Abnahmekriterium dar und wird derzeit an Querschnitten/-schliffen mittels Mikroskop (Verfahren 6A nach ÖNORM EN ISO 2808) oder mittels Keilschnittmessung (Verfahren 6B nach ÖNORM EN ISO 2808) durchgeführt. Bei beiden Verfahren handelt es sich um zerstörende Prüfmethode. Die Messung an Querschnitten/-schliffen ist in Streitfällen als Schiedsverfahren anerkannt, hat jedoch den Nachteil, dass das Ergebnis nicht gleich bei der Probenentnahme zur Verfügung steht. Die Messung mittels Keilschnitt ergibt zwar unmittelbar bewertbare Messergebnisse, die Genauigkeit leidet jedoch, da der Betonuntergrund bzw. die Spachtelmasse unter dem Tunnelanstrich häufig unregelmäßig ausbrechen. Dazu kommt in beiden Verfahren, dass sehr oft Spachtelmasse und Anstrich sowohl im Farbton, als auch in der Struktur sehr

ähnlich sind und dadurch die Schichtdickenmessung erschwert wird.

Als alternative Methoden wurde der Einsatz von ultraschall-basierten Messgeräten (Verfahren 10 nach ÖNORM EN ISO 2808, Abschnitt 5.8) überprüft. Es handelt sich dabei um Geräte mit einem Ultraschallsender und einer Empfangseinrichtung zum Bestimmen der Schichtdicke über die Laufzeit.



**Abbildung 144: Ultraschall-Verfahren**

Auf die Beschichtung, deren Schichtdicke gemessen werden soll, wird ein Koppelmittel aufgebracht. Das Gerät wird flach auf die Beschichtung aufgesetzt, die Sonde überträgt einen Schallimpuls durch das Koppelmittel in die Beschichtung. Dieser wird an jeder Grenzfläche mit unterschiedlicher Dichte reflektiert. Man erhält den Wert der Schichtdicke, indem man die Zeit misst, die das Ultraschallsignal benötigt, um die Strecke zwischen Sonde und der Grenzfläche zwischen Beschichtung und Untergrund bzw. den einzelnen Schichten und wieder zurück zu durchlaufen. Die ermittelte Laufzeit wird durch zwei geteilt und mit der spezifischen Schallgeschwindigkeit der Beschichtung multipliziert, um die Schichtdicke zu ermitteln.

Zur Überprüfung der Praxistauglichkeit dieser Methode wurden willkürlich 7 beschichtete Probestplatten ausgewählt, deren Schichtdicke bereits durch Messungen an Querschliffen bekannt war. Für die Vergleichsmessungen kamen folgende Geräte zum Einsatz:

- **PosiTector 200B**, DeFelsko Corporation, 800 Proctor Avenue, Ogdensburg, NY 13669-2205 USA

Es handelt sich um ein Messgerät, das für die zerstörungsfreie Messung von Schichtdicken auf unterschiedlichen Untergründen konzipiert ist. Verwendet wurde

ein Messkopf vom Typ 200B, der für Schichtdicken zwischen 13 µm und 1000 µm geeignet ist, als Koppelmittel wurde DeFelsko Ultrasonic Couplant eingesetzt.

Laut Herstellerbeschreibung ist das Gerät je nach Voreinstellung in der Lage bis zu drei Schichten einer Beschichtung aufzulösen und deren Schichtdicke zu bestimmen. Die Messergebnisse werden sowohl digital, als auch als A-Scan ausgegeben.

Das Gerät ist mit Messwertspeicher ausgestattet, die Werte können mit einer speziellen Software auf handelsübliche Computer übertragen und dort ausgewertet werden.

- **Elcometer 500**, Elcometer Instruments GmbH, D-73431 Aalen

Das Messgerät wurde für Schichtdickenmessungen von Epoxidharzschichten auf Beton konzipiert. Es stehen 2 Sonden zur Verfügung, deren Messbereich von 150 µm bis 2500 µm bzw. 750 – 10000 µm reicht. Verwendet wurde ein Messkopf vom Typ C1, der für Schichtdicken zwischen 150 µm und 2500 µm geeignet ist, als Koppelmittel wurde Elcometer Ultrasonic Couplant blue eingesetzt.

Das Messgerät ist für Messungen an Einzelschichten geeignet, die Messergebnisse werden digital ausgegeben.

Das Gerät ist mit Messwertspeicher ausgestattet, die Werte können mit einer speziellen Software auf handelsübliche Computer übertragen und dort ausgewertet werden.

### **PosiTector 200B**

Das Gerät wurde mittels Kalibrierfolie auf 129 µm kalibriert, die Referenzmessungen nach Abschluss der Kalibrierung lagen zwischen 130 µm und 133 µm.

Da die Probekörper mit Grundierung – Spachtelung – Tunnelanstrich einen 3-lagigen Aufbau aufweisen, wurde das Gerät im ersten Testdurchgang für Schichtdickenmessungen in 3 Lagen eingestellt. Mit dieser Einstellung konnten keine reproduzierbaren Ergebnisse erzielt werden.

Da die Grundierung größtenteils in den Untergrund eindringt und nur eine relativ geringe Schichtdicke über den Spitzen aufweist, wurde im zweiten Testdurchgang in der Voreinstellung die Messung von 2 Lagen eingestellt. Diese Methode erbrachte auf den Kalibrierfolien brauchbare Ergebnisse, jedoch wurde teilweise nur die Gesamtschichtdicke ausgegeben und nicht die Dicken der Einzelschichten.

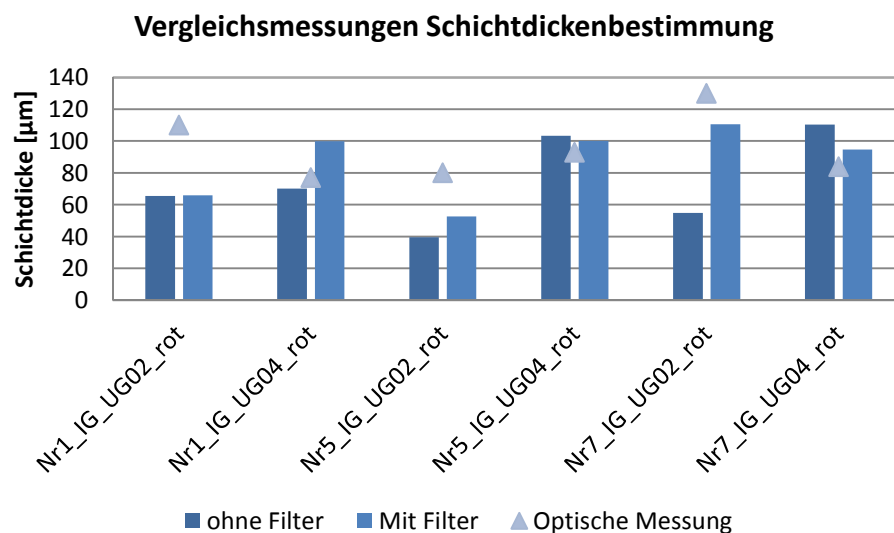
Die an den ausgewählten Probekörpern gemessenen Schichtdicken korrelierten nicht mit

den Ergebnissen der optischen Messung an Querschliffen. Aufgrund dieser Erfahrungen wurde die Voreinstellung in allen weiteren Testdurchgängen mit einer Lage gewählt.

In dieser Einstellung wurden im ersten Testdurchgang allgemein zu niedere Schichtdicken gemessen. Bei 53% der Einzelmessungen lagen die Werte unter 50 µm, zudem wiesen die Messwerte mit Standardabweichungen zwischen 37% und 108% je Prüfstelle eine große Streuung auf.

Bei einer telefonischen Rückfrage wies der Gerätehersteller darauf hin, dass äußere Einflüsse, wie zum Beispiel die Oberflächenrauigkeit der Beschichtung dazu führen, dass das Messgerät sehr niedrige oder nicht reproduzierbare Messwerte anzeigt. In diesem Fall kann ein Filter gesetzt werden, der nur Messwerte über einem Mindestniveau als gültige Anzeige zulässt. In der Gerätebeschreibung wird eine untere Schwelle von etwa 25% des erwarteten Messwertes empfohlen.

Weitere Messungen wurden unter Berücksichtigung dieses Filters durchgeführt. Der Vergleich der US-Messwerte untereinander und mit den Werten aus optischer Messung zeigt, dass eine Tendenz zur Verbesserung festzustellen ist, eine wesentliche Verbesserung konnte jedoch nicht erzielt werden.



**Abbildung 145: Messwertvergleich Ultraschallmessungen versus optische Messungen**

Im Zuge der Diskussion der Messwerte und angeregt durch ein Gespräch mit einem Kollegen, der Ultraschallgeräte zur Schichtdickenmessung auf mineralischen Untergründen schon seit längerem in der Praxis – wenn auch für Beschichtungen größerer Dicke –

verwendet, wird vorgeschlagen, eine Referenzbeschichtung auf einer Blechplatte hergestellt. Die Schichtdicke dieser Referenzbeschichtung wird mittels magnetischer Verfahren nach ÖNORM EN ISO 2808 gemessen und anschließend das Ultraschall-Messgerät auf diesen Wert kalibriert.

### **Elcometer 500**

Mit diesem Gerät konnten keine Ergebnisse erzielt werden. Vereinzelt erfolgten zwar Anzeigen zwischen etwa 200 µm und 800 µm, größtenteils wurde jedoch kein verwertbares Signal erhalten. Nach Rücksprache mit dem Gerätehersteller ist dies darauf zurück zu führen, dass die Schichtdicke des Anstrichs im unteren Grenzbereich des Gerätemessbereichs liegt.

Dieses Gerät ist also mit den derzeit verfügbaren Sonden nicht für den Einsatz auf Tunnelanstrichen geeignet.

### **Fazit**

Schichtdickenmessungen mittels Ultraschall auf der Baustelle sind möglich, wenn

- auf die erwartete Schichtdicke abgestimmte Messköpfe zum Einsatz kommen,
- lediglich die oberste Lage des Anstrichsystems gemessen wird,
- die beschichtete Oberfläche soweit eben ist, dass der Messkopf plan aufliegen kann,
- der Prüfer Erfahrung im Umgang mit Ultraschallgeräten hat.

Der Vorteil dieser Methode liegt in der raschen, flächendeckenden Messung der Schichtdicke und der automatisierten statistischen Auswertung. Ergebnisse stehen sofort zur Verfügung, allenfalls erforderliche Reparaturmaßnahmen können zeitnah erkannt und durchgeführt werden.

Die Messgenauigkeit kann entscheidend verbessert werden, wenn die Kalibrierung auf einem Beschichtungsfilm des zu prüfenden Materials mit bekannter Schichtdicke erfolgt. Bei entsprechender Erfahrung ist diese Methode sowohl für die Eigenüberwachung und Fehlersuche, als auch für Abnahmeprüfungen geeignet.



### **6.5.3 Beurteilung von Staub auf für das Beschichten vorbereiteten Oberflächen (Klebeband-Verfahren)**

Im Korrosionsschutz wird vor dem Aufbringen der Beschichtung ein in ÖNORM EN ISO 8502-3 standardisierter Test zur Bestimmung der Staubfreiheit der Oberfläche eingesetzt. Dazu wird ein Klebeband mit definierter Klebekraft auf die vorbereitete Oberfläche aufgerieben und anschließend abgezogen. Menge und Größe der anhaftenden Staubpartikel können anhand von Vergleichsbildern bzw. Durchmesserangaben charakterisiert werden.

Je nach Belastung sind nur bestimmte Staubmengen und/oder Partikelgrößen zulässig.

Im Kaisermühlen Tunnel wurde im Zuge der Baustellenkontrollen versucht diesen Test auf die Arbeiten an der Tunnelwand zu übertragen und Klebebandprüfungen sowohl an den gestrahlten Oberflächen, als auch auf der Spachtelung durchgeführt. In beiden Fällen konnte aufgrund der großen Oberflächenrauigkeit der zu prüfenden Fläche keine eindeutige Aussage über Staubmenge und Partikelgröße gemacht werden. Die optisch erkennbare Beschädigung der Kleberschicht überlagerte das Bild der anhaftenden Partikel.

## 7 LEITFADEN FÜR EFFIZIENTE TUNNELANSTRICHSYSTEME

Eine Kurzfassung der relevanten Projektergebnisse soll Planern und Ausführenden in Form eines Leitfadens zur Verfügung gestellt werden. Die Veröffentlichung erfolgt in Absprache mit dem Auftraggeber. Im Folgenden sind wesentliche Punkte, welche sich als wichtige Einflussfaktoren herauskristallisiert haben, nochmals zusammengefasst.

### 7.1 Untergrund

#### Verringerung der Porosität des Untergrundes

Die Ergebnisse der Laborversuche (siehe beispielsweise Abbildung 115) und die fotografischen Belege von zerstörtem Beton unter beschädigter Beschichtung aus den Tunnelbegehungen zeigen, dass als erste Maßnahme die Betonqualität zu verbessern ist. Zumindest ist eine Frost-Taumittel-Beständigkeit entsprechend der Expositionsklasse XF2 – (Frostangriff mit Taumittel mit mäßiger Wassersättigung – W/B-Wert 0,5 BM  $\geq$  320 kg/m<sup>3</sup>) anzustreben.

Mit dieser Reduktion des W/B-Wertes erfolgt eine Reduktion der Porosität, damit gehen eine Reduktion des Saugverhaltens, weniger Chlorideindringung und geringerer Transport von Schadstoffen einher. Damit sollte das in der Praxis zu beobachtende Versagen der Feinmörtelschicht zu vermeiden sein, welches in weiterer Folge zum Versagen des Beschichtungssystems führt.

#### Erhöhung der Rauheit – Entfernung der obersten Zementschlemme

Flächen schlechter Haftung im Tunnel zeigen in vielen Fällen eine glatte Betonoberfläche. Dies wurde vor allem in Bereichen festgestellt, die nicht mechanisiert gestrahlt, sondern wie zum Beispiel rund um Einbauten oder in Nischen, händisch gestrahlt wurden.

Das Entfernen der oberflächennahen Zone (Feinmörtelschicht mit minderer Qualität und erhöhte Porosität aufgrund ungenügender oder keiner Nachbehandlung) z.B. mittels HDW – Strahlen – ist daher mit gleichbleibender Qualität auf der gesamten Betonoberfläche durchzuführen. Anzustreben ist zumindest die in [18] für Anstriche und Beschichtungen geforderte Rautiefe von 0,1 mm – 0,3 mm. Besser ist das Erfüllen der Anforderungsklasse UG<sub>2</sub> mit einer Rautiefe > 0,3 mm.

#### Feuchte im Untergrund

Der im Regelwerk [7] vorgesehene Nachweis des Feuchtigkeitsgehaltes mittels CM – Prüfung mit einem maximal zulässigen Feuchtegehalt von 4 % ist zwingend auszuführen.

Die Prüfstellen sollten dabei zumindest die Bereiche mit dem jüngsten Betonierdatum und allfällige Verdachtsflächen (Feuchtstellen,...) umfassen. Ergänzend kann auch der in [18] beschriebene Folientest verwendet werden.

### Chloridgehalt

Im Neubau ist zwingend eine Verringerung der Chlorideindringung in das Bauwerk anzustreben. Eine erste Maßnahme ist die bereits beschriebene Änderung der Betonqualität. Diese ist durch die Wahl entsprechender chloriddichter Systeme, insbesondere im Spritzwasserbereich der Portale und der einfahrtsnahen Tunnelblöcke zu ergänzen.

In der Instandsetzung sind die in [7] vorgesehenen Maßnahmen umzusetzen. Eine Entkoppelung stark chloridhaltiger Untergründe vom Beschichtungssystem z.B. durch porositätsbrechende, hoch kunststoffvergütete Spachtelmassen oder durch Spritzmörtelschichten oder vergleichbare Sondermaßnahmen ist vorzusehen.

## **7.2 Materialwahl**

Wasser- und chloriddichte Systeme sind zumindest im Spritzwasserbereich zu wählen, um ein Aufsaugen und damit die Chloridanreicherung zu verhindern.

Die eingesetzten Produkte müssen auf den Einsatz unter baupraktischen Bedingungen (niedrige Temperaturen, erhöhte Luftfeuchtigkeit) optimiert sein, um eine ausreichende Vernetzung und somit Belastbarkeit und Dauerhaftigkeit zu gewährleisten.

Die Systeme sind mit ausreichenden Schichtdicken auszuschreiben und auszuführen. Die Überprüfung der Referenztunnel hat gezeigt, dass die ausgeschriebene Schichtdicke oft nicht erreicht wurde.

## **7.3 Verarbeitungsbedingungen**

Im Zuge der Verarbeitung ist auf folgende Punkte zu achten:

- Mischungsverhältnisse und Mischzeiten laut Herstellerangabe sind zwingend einzuhalten.
- Die Klimabedingungen laut Herstellerangaben und [7] (Umgebungstemperatur, Umgebungsluftfeuchte, Taupunkt, Untergrundtemperatur) sind einzuhalten. Bei Verwendung von wasseremulgierten Formulierungen ist das Verdunsten des Wassers (je nach Arbeitsgang 45% bis 30% des aufgetragenen Materials) zu beachten und die Prüfhäufigkeit gegenüber [7] zu erhöhen.

- Die von den Klimabedingungen abhängigen Zwischentrockenzeiten sind einzuhalten. Dazu ist es zweckmäßig, dass die Materialhersteller in die jeweiligen technischen Merkblätter Tabellen aufnehmen, in denen die Überarbeitungszeiten und Endaushärtungszeiten von der Mindestverarbeitungstemperatur ausgehend in 5° Schritten angegeben sind.
- Der Einfluss von Wind auf die Klimabedingungen und auf die Filmbildung ist zu beachten. In die technischen Datenblätter der Materialhersteller sind entsprechende Angaben aufzunehmen.

#### **7.4 Prüfungen bei der Anwendung und im ausgehärteten Zustand**

Die Prüfungen bei der Anwendung sind in [7] geregelt. Aufgrund der Praxiserfahrung in einer Vielzahl von Beschichtungsprojekten wird angeregt, die Prüfhäufigkeit – wie zum Beispiel in den diversen RVS für die Brückeninstandsetzung und Abdichtung bereits geschehen – zu verdichten. Der Vorschlag:

- Klimabedingungen laufend mit automatischen, kalibrieren Geräten prüfen und dokumentieren. Zusätzlich soll eine manuelle Messungen zu Beginn und zum Ende der Spachtelungs- / Beschichtungsarbeiten erfolgen.
- Messung der Nass-Schichtdicke laufend durch das Applikationspersonal. Eine tabellarische Dokumentation ist nicht erforderlich, jedoch sind die Auftragsmengen entsprechend zu korrigieren.
- Prüfungen im ausgehärteten Zustand in folgender Prüflosgröße:
 

bis 1.000 m <sup>2</sup>	4 Prüfungen
1.000 bis 10.000 m <sup>2</sup>	zusätzlich 1 Prüfung je 1.000 m <sup>2</sup>
danach	eine weitere Prüfung je 5.000 m <sup>2</sup>
- Trockenschichtdickenmessungen nur noch an Bohrkernen mittels Mikroskop. Das Keilschnittverfahren bringt durch den inhomogenen Untergrund Beton und die geringere Messauflösung ungenaue Ergebnisse.
- Trockenschichtdickenmessungen in einem genau definierten Prüfalter (z.B. 10 Tage bei 20 °C). Dadurch wird das bei wasseremulgierten Systemen vorhandene Schwind-/Schrumpfverhalten berücksichtigt und vereinheitlicht.

Wesentlich ist, dass bei Abweichungen unmittelbar Aktionen durch Verarbeiter und/oder ÖBA zu setzen sind.

## 8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Tunnelanstrichsysteme sind für die Erhöhung der Sicherheit und die Reduktion der Instandhaltungs- und Energiekosten für den Infrastrukturbetreiber von wesentlicher Bedeutung. Allerdings ist die Dauerhaftigkeit der derzeit eingesetzten Systeme oft nicht zufriedenstellend. Während manche Beschichtungssysteme auch nach längerer Zeit noch in gutem Zustand sind, zeigen andere bereits nach wenigen Jahren grobe Mängel. Ziel dieses Forschungsprojektes war es den Ursachen dieser Schadensfälle auf den Grund zu gehen. Dazu wurden in einem ersten Schritt konkrete Schäden in ausgewählten Tunnelbauwerken begutachtet und untersucht. Anschließend wurden Laborversuche zur Simulation kritischer Verarbeitungsbedingungen und Umgebungseinflüssen durchgeführt. Des Weiteren wurden neue Beurteilungsmethoden für eine zukünftige Qualitätskontrolle während der Bauausführung getestet. Die Ergebnisse sind im Folgenden kurz zusammengefasst:

### 8.1 Beurteilung von Referenztunnelbauwerken

Im Zuge dieses Forschungsprojektes wurden insgesamt 11 Tunnelobjekte vor Ort besichtigt und sichtbare Schäden dokumentiert. Während den Begehungen wurde festgestellt, dass sich die Schadensbilder in verschiedenen Tunneln unabhängig von Alter, Hersteller, etc. ähneln. Außerdem wurden die Schäden Richtung Tunnelmitte in der Regel geringer, was vor allem auf geringere Frost-Tausalz-Beanspruchung, geringere Feuchtigkeitseinwirkung und geringere Temperaturschwankungen und –sprünge zurückzuführen ist.

Die beobachteten Schadensbilder wurden in Gruppen zusammengefasst und potentielle Ursachen recherchiert. Die Einteilung wurde wie folgt getroffen:

- 1) Verbundversagen
- 2) Krakeleerisse
- 3) Zersetzungen
- 4) Belegungen an der Beschichtungsoberfläche
- 5) Betonabplatzungen
- 6) Imperfektionen

Verbundversagen in Form von Ablösungen unterschiedlicher Größe wurde in allen Tunnelobjekten und bei Beschichtungsprodukten aller Hersteller festgestellt. Beispielsweise trat in einigen Tunnelbauwerken eine durchgängige Abblätterung in einer Höhe von 0-20 cm im Anschluss des Seitenstreifens auf. Die Ursache hierfür könnte aufsteigende Feuchtigkeit sein. Auch Schäden bei Einbauten, aufgrund mangelnder Untergrundvorbereitung oder

eindringender Feuchtigkeit wurden in vielen Fällen beobachtet. Bei einzelnen Abplatzungen in sonst unbeschädigten Bereichen war eine eindeutige Ursachenfindung allerdings nicht möglich.

Krakeleerissbildung mit Rissabständen im Milimeterbereich wurde in alle beprobten Tunnelbauwerken und bei Beschichtungsprodukten aller Hersteller gefunden. Dieses Schadensbild tritt vor allem in Portalbereichen auf und zieht sich meist mehrere 100 Meter in den Tunnel und ist bei wasseremulgierten Systemen als typische Alterungserscheinung infolge von Versprödung anzusehen.

Abgesehen von diesen beiden Schadenstypen wurden ebenfalls noch Zersetzungen in vielen Bauwerken beobachtet. Dieses Schadensbild wurde als „schwarze Verschmutzung mit weichem, pulvrigen Untergrund“ beschrieben und trat nur bei Beschichtungssystemen der Fa. Avenarius Agro auf, allerdings nicht in allen inspizierten Tunnelbauwerken. Die restlichen, aufgelisteten Schadensbilder beschränkten sich auf einzelne Bauwerke weshalb die Ursache ein regional einwirkender Einflussfaktor sein könnte.

## 8.2 Beprobung ausgewählter Tunnelbauwerke

Von den 11 besichtigten Tunneln wurden insgesamt 8 repräsentative Bauwerke für eine Beprobung ausgewählt. Dies hatte zum Ziel einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Schadensbildern bzw. Schadenshäufungen und äußeren Einflüssen bzw. messbaren Parametern herzustellen. Generell wurden starke Streuungen der Messwerte, insbesondere der Haftzugfestigkeit festgestellt, was die Auswertung insbesondere im Hinblick auf die limitierte Anzahl an Bohrkernen mit einer gewissen Unsicherheit behaftet.

Beim Chloridgehalt konnte ein eindeutiger Unterschied zwischen Sanierungen und Neubauten beobachtet werden. Die Chloridgehalte im Neubau waren in der oberflächennahen Schicht tendenziell niedriger als bei sanierten Bauwerken. Im Mittel ergab sich ein Chloridgehalt von  $0,83 \pm 0,92$  % bezogen auf den Zementgehalt für Neubauten und  $3,52 \pm 1,59$  % bezogen auf den Zementgehalt für Sanierungen. Außerdem stiegen die Chloridgehalte bei vielen Sanierbauten in mittlerer Entnahmetiefe aufgrund der vorhandenen Vorbelastung wieder an. Bei der Gegenüberstellung von Chlorid und Alter für Neubauten war es außerdem möglich die Ursachen für eine hohe Chloridbelastung festzustellen, beispielsweise die Nähe zum Tunnelportal oder geringe Schichtdicken. Für bestimmte Tunnelbauwerke war auch der Zusammenhang mit einem Schaden gegeben. Allerdings lässt sich im Nachhinein nicht mehr feststellen ob der Schaden durch die hohe Chloridbelastung (oder den ebenfalls hohen Wassergehalt, etc.) entstanden ist oder ob die Substanzen erst durch die beschädigte Beschichtung in den Beton eingedrungen sind. Ein

eindeutiger Zusammenhang zwischen Chloridgehalt und Schädigungsgrad konnte in den meisten Fällen also nicht festgestellt werden.

Für die Gesamtporosität wurde bei allen Bohrkernen ein unbedenklicher Wert zwischen 8-14 % ermittelt. Intakte Bohrkern wiesen außerdem teilweise eine höhere und teilweise eine niedrigere Porosität als schadhafte Bohrkern auf. Deshalb konnte kein Zusammenhang zwischen Schadensbildern und der Porosität des Betonuntergrundes hergestellt werden. Auch beim Wassergehalt war keine Relation gegeben. Im Mittel wurde bei intakten Bohrkernen ein Wassergehalt von  $1,6 \pm 0,5$  % gemessen, bei schadhafte Bohrkernen wurde ein Wassergehalt von  $1,5 \pm 0,7$  % bestimmt.

Insbesondere die Auswertung der Haftzugfestigkeit war aufgrund der stark schwankenden Ergebnisse mit einer großen Unsicherheit behaftet. Vergleicht man die Mittelwerte für Neubauten, wurden  $3,2 \pm 1,1$  MPa für intakte Bohrkern und  $3,1 \pm 0,9$  MPa für schadhafte Bohrkern gemessen.

Der in [5] veröffentlichte Zusammenhang zwischen Haftzugfestigkeit und Chloridgehalt an schadhafte Stellen konnte ebenfalls an einzelnen Tunnelobjekten festgestellt werden, beispielsweise im Milser Tunnel und auch im Strenger Tunnel (siehe auch Abbildung 80, sowie Abbildung 87). In diesen Bauwerken wurde an oberflächlich schadhafte Stellen eine niedrigere Haftzugfestigkeit bei einem höheren Chloridgehalt im Vergleich zu unbeschädigten Stellen festgestellt.

Alles in allem konnten durch die Tunnelbeprobung Hinweise auf die Ursachen von typischen Schadenfällen in Tunnelbauwerken gewonnen und eine umfassende Datenbasis aufgebaut werden. Ein bestimmter Zusammenhang zwischen den gemessenen Laborparametern und Schadenshäufungen konnte allerdings nicht identifiziert werden. Besonders die Einflüsse von Verarbeitungstemperatur, Überarbeitungsintervallen und Sorgfältigkeit bzw. Sauberkeit während der Beschichtung ließen sich im Nachhinein nicht mehr feststellen.

Ausgewählte Bohrkern wurden des Weiteren zur chemischen Analyse mittels FTIR, DSC und TGA an die TU Wien gebracht. Die FTIR eignet sich zwar nicht dazu eine Systematik zwischen Schadensbild und IR-Spektrum zu erhalten, allerdings war eine Unterscheidung der Produkte bezüglich ihrer Zusammensetzung möglich. Amin-gehärtete Epoxidharzbeschichtungen konnten von wasserbasierten Dispersionen unterschieden werden. Auch die Produkte anderer Hersteller unterschieden sich, bei gleichem Härterssystem nicht voneinander. Die Unterscheidung dieser beiden Systeme war außerdem mit den beiden anderen Analysemethoden, DSC und TGA, möglich. Hier lieferten die

gemessenen Glasübergangstemperaturen und Nachhärteenthalpien einen Hinweis auf den Aushärtegrad der Bohrkernproben. Generell deuten eine hohe Glasübergangstemperatur und eine niedrige Nachhärteenthalpie auf gut vernetzte Systeme hin. Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass die Anstriche generell sehr hohe Nachhärteenthalpien aufwiesen und diese deutlich über den Nachhärteenthalpien der Spachtelungen lagen. Bei den Spachtelungen wiesen die lösemittelhaltigen Systeme die höchsten Glasübergangstemperaturen und niedrigsten Nachhärteenthalpien auf.

Diese Ergebnisse legen den Schluss nahe, dass speziell Dispersionssysteme unter Baustellenbedingungen nicht optimal vernetzen und somit Schutzwirkung und Dauerhaftigkeit nur eingeschränkt gegeben sind.

Für den Wolfsbergtunnel konnte kein definierter Zusammenhang zwischen Schadensbild und Analyseergebnissen hergestellt werden. Die Ergebnisse für die Bohrkernproben WoS-BK3 und WoS-BK4 wichen etwas von den Messwerten der restlichen Bohrkernproben ab, hierbei handelte es sich aufgrund der Höhenlage aber auch um ein anders zusammengesetztes Beschichtungssystem. Für die Rückstellprobe aus dem Kalcherkogeltunnel wurden tendenziell niedrigere Glasübergangstemperaturen gemessen, was wahrscheinlich auf die milden Lagerungsbedingungen zurückzuführen ist.

Aus dem Strenger Tunnel wurden ebenfalls zwei Bohrkernproben untersucht, welche beide ähnliche Messwerte lieferten. Im Gegensatz dazu lieferten die Bohrkernproben aus dem Flirscher Tunnel sehr unterschiedliche Ergebnisse, wobei die als intakt beschriebene Probe tendenziell schlechter abschnitt. Hier wurde ein Mischungsfehler der beiden Epoxidharzkomponenten vermutet.

### 8.3 Laborversuche

Mit Hilfe der Laborversuche wurden ungünstige Herstellungsparameter und Witterungseinflüsse im Tunnel simuliert und die Auswirkungen auf das Beschichtungssystem untersucht. Einflussgrößen wie Betonsorte, Chloridgehalt im Untergrund, Oberflächenvorbereitung, Verarbeitungsbedingungen, und Beschichtungsaufbau waren hierbei von Interesse.

Rein durch die Beschichtung bei unterschiedlichen Temperaturen und Überarbeitungszeiten konnten keine Beschädigungen festgestellt werden. Für alle Proben wurde die Haftzugfestigkeit bestimmt und die Oberfläche mittels Mikroskop untersucht. Die Beschichtung von Hersteller 1 hat bei allen gewählten Beschichtungsbedingungen die



Anforderung von mindestens 1,5 MPa erfüllt, wobei bei allen Probekörpern Bruch im Beton auftrat. Die Probeplatten mit der Betonsorte IG wiesen verhältnismäßig niedrigere Haftzugfestigkeiten auf, wobei sich außerdem der Chloridgehalt im Anmachwasser signifikant auswirkte. Dies stimmt wiederum mit den veröffentlichten Forschungsergebnissen in [5] überein. Mit dem Mikroskop konnten außerdem keine Unregelmäßigkeiten auf der Beschichtungsoberfläche festgestellt werden, welche auf die Verarbeitungsbedingungen zurückzuführen wären. Bei der Beschichtung von Hersteller 2 wurde bei allen Prüfungen Bruch im PCC-Feinmörtel, bei sehr geringen Haftzugfestigkeiten festgestellt. Die Ursache hierfür ist im Produkt oder in den Verarbeitungsbedingungen zu suchen.

Nach den Auslagerungsversuchen wurden die Platten wiederum unter dem Mikroskop untersucht sowie die Haftzugfestigkeit bestimmt. Folgende Ergebnisse wurden erhalten:

- Nach der XF4-Auslagerung wurden, wie auch schon bei den vorherigen Prüfungen, abhängig von der gewählten Prüfstelle große Schwankungen erhalten, weshalb die dargestellten Ergebnisse auch immer mit einer gewissen Vorsicht betrachtet werden müssen. Bei fast allen Probeplatten mit einem Beschichtungssystem von Hersteller 1 trat nach der Auslagerung Bruch im Beton auf. Nur bei 2 Platten war dies nicht der Fall, nämlich bei den Probekörpern „kapillares Saugen und Beschichtung bei 5 °C“. Dies liefert einen ersten Hinweis auf die Beständigkeit der Beschichtung bei Nicht-Einhaltung der vorgegebenen Verarbeitungsbedingungen insbesondere in Kombination mit einem porösen, chloridbelasteten Untergrundbeton. Für das Beschichtungssystem von Hersteller 2 trat ebenfalls bei allen Proben Bruch in der Beschichtung auf, allerdings wurden nach der XF4-Prüfung gleiche oder sogar bessere Werte für die Haftzugfestigkeit erhalten. Dies führt nochmals die lokale Abhängigkeit und die daraus resultierende Schwankungsbreite der Ergebnisse vor Augen. Bei der optischen Untersuchung mit dem Mikroskop wurden vereinzelt Risse, Rissvorstufen, Schäden an bereits vorhandenen Abschürfungen etc. erhalten. Rissbildung trat dabei bei Platten mit allen möglichen Chloriddotierungen auf, gehäuft jedoch bei Platten mit höherer Dotierung. Beim Öffnen von Poren mit dem Messer war unterhalb des Anstriches eine weiche, pulverige Spachtelmasse vorhanden. Dies deutet auf eine Schädigung der Beschichtung durch die Auslagerung hin.
- Nach der Frost-Taumittel-Belastung in Kombination mit thermischer Alterung wurde ebenfalls bei chloridhaltigen Betonen und niedrigen Verarbeitungstemperaturen teilweise Bruch in der Beschichtung gemessen. Außerdem waren mehrere Platten

der Betonsorte IG aufgrund der Belastung gesprungen. Bei der Untersuchung mit dem Mikroskop wurden die gleichen Schäden wie auch nach der XF4-Belastung festgestellt. Auf einer Platte der roten Probenserie waren auch mit freiem Auge Risse erkennbar.

- Die Einwirkung von dreißigtägiger rückseitiger Feuchte auf die ausgehärtete Beschichtung zeigte keine Auswirkungen auf die Haftzugfestigkeit und die optische Beschaffenheit der Probekörper.
- Die thermische Beständigkeit der Tunnelbeschichtungen wurde anhand von unterschiedlichen chemischen Analysen an der TU Wien untersucht. Mittels FTIR wurden die Spektren der einzelnen Produktkomponenten mit einer Referenzsubstanz verglichen, wobei eine gute Übereinstimmung erhalten wurde. Die Spektren des fertig gemischten Beschichtungssystems ähnelten naturgemäß der mengenmäßig dominanten Komponente. Außerdem waren Änderungen im Peakverhältnis bei etwa  $1500\text{ cm}^{-1}$  und  $1100\text{ cm}^{-1}$  zwischen den Einzelsubstanzen und dem gemischten System beobachtbar. Intensivere Analysen könnten hier einen Rückschluss auf den Vernetzungsgrad bzw. auf Mischungsfehler ermöglichen. Die thermisch gealterten Proben zeigten des Weiteren eine gute Beständigkeit, da nur ein kleiner Carbonyl-Peak im Spektrum zu sehen war. Die Ergebnisse der DSC ergaben deutlich niedrigere Glasübergangstemperaturen der Anstriche im Vergleich mit realen Bohrkernen. Die Spachtelungen lieferten in etwa gleiche Messwerte. Interessanterweise wiesen gealterte und reale Bohrkernkerne ähnliche  $T_g$  auf. In diesem Fall wäre eine vertiefende Analyse interessant um aufzuklären warum sich die Glasübergangstemperaturen der Laborproben und der realen Proben um mehr als das Doppelte unterscheiden. Bezüglich den Verarbeitungsbedingungen war eine leichte Tendenz von der schwarzen ( $12\text{ °C}$ , Überarbeitung gemäß Herstellervorgaben), über die rote ( $5\text{ °C}$ , jeden Tag ein Anstrich) zur grünen ( $5\text{ °C}$ : Überarbeitung gemäß Herstellervorgaben) Probenserie erkennbar. Die grüne Probenserie ergab hier die höchsten Glasübergangstemperaturen. Die Ergebnisse der TGA bestätigten die Schlüsse aus der DSC-Analyse bezüglich der Verarbeitungsbedingungen, allerdings müsste eine genauere Untersuchung zur Bestätigung dieses Trends durchgeführt werden. Zusätzlich zeigten die gealterten Laborprüfkörper generell eine schlechtere thermische Beständigkeit, gemessen als  $T_{96\%}$  als die unbehandelten Laborproben und der Anstrich der realen Bohrkernprobe aus dem Wolfsbergtunnel.

In Zusammenhang mit den durchgeführten Analysen wäre es interessant festzustellen inwieweit die Messwerte von entnommenen Tunnelproben in der Realität wirklich streuen um einen Vergleich zu den Laborprüfkörpern herzustellen. Dadurch wäre es eventuell möglich Rückschlüsse auf die Vernetzung zu schließen.

- Während der Kurzversuche stellte sich außerdem Feuchteeinwirkung während der Beschichtung als kritisch bezüglich Blasenbildung und Haftung der Beschichtung heraus. So wurde bei 50 % der Probekörper ein negativer Einfluss eines feuchten Betonuntergrundes bemerkt. Dies lässt die Struktur des Betonuntergrundes und die Untergrundvorbereitung als wichtige Faktoren bezüglich Schadensausbildung vermuten.

#### **8.4 Erprobung neuer Beurteilungsmethoden**

Die Erprobung neuer Beurteilungsmethoden erwies sich in einigen Fällen als recht anspruchsvoll und war nicht immer von Erfolg gekrönt.

- Die Keilspaltprüfung wurde durch das Eindringen der Grundierung in den Beton stark beeinflusst und lieferte Ergebnisse mit sehr großer Schwankungsbreite. Ein Einsatz für Beschichtungen ohne Grundierung wäre noch zu prüfen.
- Die zerstörungsfreie Bestimmung der Schichtdicke mittels Ultraschall konnte im Praxistest mit der Bestimmung an Bohrkernen mittels Mikroskop nicht mithalten. Hier müssen noch weitere Erfahrungswerte bezüglich Genauigkeit und Praxistauglichkeit der unterschiedlichen Geräte gesammelt werden.
- Die Beurteilung von Staub auf vorbereiteten Oberflächen mittels Klebeband-Verfahren wurde während einer Baustellenbegleitung am Kaisermühlentunnel erprobt. Aufgrund der großen Oberflächenrauigkeit der zu prüfenden Fläche war allerdings keine eindeutige Aussage über Staubmenge und Partikelgröße möglich.

Zusammenfassend kann zu den Ergebnissen aus diesem Forschungsprojekt folgendes festgehalten werden: Durch die Besichtigung ausgewählter Tunnelobjekte konnte eine umfassende Datengrundlage bezüglich den Erscheinungsformen möglicher Beschichtungsschäden erstellt werden. Außerdem war eine erste Abschätzung möglicher Einflussparameter auf die Dauerhaftigkeit von Tunnelbeschichtungen möglich. Durch die anschließende Beprobung der Tunnelobjekte wurde weiters versucht, einen Zusammenhang zwischen einfach bestimmbar Parametern und bestimmten Schadensbildern bzw.

Schadenshäufungen festzustellen. Obwohl eine Zuweisung in einzelnen Fällen möglich war, beispielsweise ein hoher Chloridgehalt und niedrige Haftzugfestigkeit bei einer Abplatzung, konnte aufgrund der stark streuenden Messwerte und der limitierten Probezahl kein eindeutiger Zusammenhang zwischen einzelnen Messwerten und bestimmten Schadensmerkmalen festgestellt werden.

Während den Laborversuchen wurden die Auswirkungen ungünstiger Herstellungsbedingungen und Witterungseinflüsse auf die Beschichtung untersucht. Hierbei wurde in unterschiedlichen Auslagerungsszenarien ein Einfluss der Betonqualität (W/B-Wert, Chloridgehalt) und den Verarbeitungsbedingungen festgestellt.

## 8.5 Ausblick

Obwohl die durchgeführten Laborversuche dieses Forschungsprojektes einen Einfluss der Betonqualität und der Verarbeitungsbedingungen auf die Beständigkeit von Tunnelbeschichtungen zeigen, war aufgrund der großen Schwankungsbreite eine eindeutige Tendenz schwierig nachzuvollziehen. Für mehr Aussagekraft müsste die Probenanzahl deutlich vergrößert werden und eine Angabe der Ergebnisse als „Schädigungswahrscheinlichkeit“ erfolgen.

Des Weiteren wäre es notwendig die Sinnhaftigkeit einzelner Prüfscenarien abzuwägen und durch alternative Methoden zu ersetzen. Insbesondere zur Beurteilung des gesamten Systems „Beton mit Beschichtung“ fehlen aussagekräftige Beurteilungsmethoden und Zeitrafferversuche. Die Entwicklung solcher Szenarien ist allerdings äußerst komplex, wie die Ergebnisse in 6.5 zeigen, aber für die Gestaltung dauerhafter Beschichtungssysteme unbedingt notwendig. Die wichtigsten Punkte für zukünftige Forschungsarbeiten wären demnach:

- Alternative Untersuchungsmethode zur Charakterisierung des Haftverbundes  
Diese Notwendigkeit zeigt sich in der starken Streuung der gemessenen Haftzugfestigkeitswerte. Des Weiteren kann die Kraftereinwirkung beim Entstehen von Ablöseerscheinungen und Blasen von einer uniaxialen Belastung wie bei der Haftzugprüfung abweichen.
- Identifikation messbarer Parameter um den Vernetzungsgrad und die Alterung einer Beschichtung zu bestimmen

Aufgrund der komplexen Zusammensetzung der verwendeten Produkte ist diese Aufgabe wahrscheinlich nur sehr schwer zu realisieren. Zusätzlich wäre hierzu der Aufbau einer umfassenden Datenbasis für verschiedene Hersteller und Produkte notwendig. Außerdem muss dieses Verfahren vor Ort einfach anwendbar und im Idealfall zerstörungsfrei arbeiten. In der Literatur [16,17] werden in diesem Zusammenhang Untersuchungen mittels NMR-Mouse vorgestellt, welche eventuell von Interesse sein könnten.

## 9 LITERATUR

- [1] *Österreichische Bautechnik Vereinigung*: Richtlinie Erhaltung und Instandsetzung von Bauten aus Beton und Stahlbeton (April 2004).
- [2] *ÖNORM EN 1504-2*: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Definitionen, Anforderungen, Qualitätsüberwachung und Beurteilung der Konformität - Teil 2: Oberflächenschutzsysteme für Beton (01.02.2005).
- [3] *Universitätsverlag Karlsruhe* (Hg.): Symposium Dauerhafter Beton – Grundlagen, Planung und Ausführung bei Frost- und Frost-Taumittel-Beanspruchung. 6. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung 2009.
- [4] *Ungricht, H.*: Wasserhaushalt und Chlorideintrag in Beton – Einfluss der Exposition und der Betonzusammensetzung. Dissertation. Zürich 2004.
- [5] *Dillig, C., Krispel, S., Marchtrenker, S., Peyerl, M.*: Instandsetzung von chloridhaltigem, unbewehrtem Beton – Problematik von Tunnelanstrichsystemen 2013.
- [6] *Österreichische Bautechnik Vereinigung*: Richtlinie Innenschalenbeton (Dezember 2012).
- [7] *Österreichische Bautechnik Vereinigung*: Merkblatt Tunnelbeschichtungen (August 2014).
- [8] *Engelfried, R., Eisenkrein, H.*: Schäden an polymeren Beschichtungen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl. 2012.
- [9] *Nuyken, O., Samarian, H., Wurdack, I.*: Epoxidharze.  
<http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/9/mac/stufen/polyaddition/epoxide/epoxidharz.vlu.html>, 15.12.2016.
- [10] *Nuyken, O., Samarian, H., Wurdack, I.*: Polyurethane I - Grundlagen.  
<http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/9/mac/stufen/polyaddition/polyurethane/polyurein.vlu.html>, 15.12.2016.
- [11] *Klopfer, H.*: Anstrichschäden. Strukturen, Verhaltensweisen und Schadensformen von Anstrichen und Kunststoffbeschichtungen. Wiesbaden: Bauverl. 1976.
- [12] *Stenner, R., Machill, N.*: Adhäsion und Blasenbildung von Beschichtungen bei rückseitiger Feuchteeinwirkung. 5. Internationales Kolloquium Industrieböden 03. 21.-23. Januar 2003 [Tagungsband Industrieböden 2003] (2003), S. 79–102.
- [13] *Fiebrich, M., Werse, H.-P.*: Reaktionsharz-Beschichtungen auf ständig durchfeuchtetem Beton. *Beton- und Stahlbetonbau* 87 (1992), S. 69–73.
- [14] *Ignoul, S., van Rickstal, F., van Gemert, D.*: Blistering of epoxy industrial floor on concrete substrate: phenomena and case study. Berlin June 2-4, 2004.
- [15] *Frick, R.*: Rückwärtige Durchfeuchtung erdberührter Betonplatten; Langjährige Erfahrung mit Reaktionsharzbeschichtungen aus der Praxis. *Ostfildern* 31.1 - 1. 2. 2006.
- [16] *Wolff, L.*: Mechanismen der Blasenbildung bei Reaktionsharzbeschichtungen auf Beton: Beuth 2009.
- [17] *Raupach, M., Orłowsky, J.*: Erhaltung von Betonbauwerken. Baustoffe und ihre Eigenschaften. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage, Wiesbaden 2008.
- [18] *Österreichische Bautechnik Vereinigung*: Richtlinie Erhaltung und Instandsetzung von Bauten aus Beton und Stahlbeton (April 2014).

## 10 ANHANG

### 10.1 Datenerhebung Anstrichhersteller

Hersteller:	AM-Surface GmbH, Spissenstrasse 72, CH 6045 Meggen					Ansprachpartner:		Dipl. Ing Meier/Arnold									
Objekt	Neu/San	Strasse	Gemeinde	Jahr	Verarbeiter	Untergrundvorbehandlung											
						UG1/UG2	UG3/UG4	UG4	Hydrophobierung	Grundierung	Spachtelung zementär	2K-Spachtelung diff-offen	2K-Spachtelung diff-dicht	Anstrich diff-offen	Beschichtung diff-dicht	funktionale Endbeschichtung	
Tunnel Melide Grancia Nord	s	A 2	Melide	2013	Trauffer AG		x								1		1
Tunnel Melide Grancia Süd	s	A 2	Melide	2012	Trauffer AG		x								1		1
Passage Auvernier	s	A 5	Auvernier	2013	Firma Nideröst AG		x								1		1
Tunnel Spreitengraben	s	H 6	Guttannen	2013	Trauffer AG	x									1		1
Tunnel les Serrières	n	A 5	Auvernier	2013	Trauffer AG	x						2			1		1
Tunnel Andrade Gutierrez	n		Rio de Janeiro	2012	Firma Andrade Gutierrez	x						2			1		1
Tunnel Grota Funda	n		Rio de Janeiro	2011	Firma Odebrecht	x						2			1		1
Unterführung Chevenez	n	A 16	Chevenez	2011	Firma Nideröst AG	x			?			2			1		1
Tunnel Rontal	n	A 14	Dierikon	2011	Firma Nideröst AG	x			3			2			1		1
Tunnel Tuttligen	n	A 311	Tuttlingen	2010	Firma Nideröst AG	x			3			2			1		1
Tunnel Saas	n	A 28	Saas	2010	Trauffer AG	x			3			2			1		1
Tunnel Küblis	n	A 28	Küblis	2014/15	Trauffer AG	x			4			2			1		1
Unterführung Kröschenbrunnen	n	?	Trubschachen-Wiggen	2012	Firma Nideröst AG	x			?						1		1

Produkt Nr.	Produktbezeichnung	Basis	Härter	Beschleunigersystem	Füllstoffe	Lösungsmittel- / Wasserbasis	Glasübergangstemperatur
2	rx400	Bisphenol-A-Epichlorhydrin-Harz MG<700 Bisphenol-F-Epichlorhydrin-Harz MG<700	Polyamin, modifiziert				
1	AM-Tunnel 2K	epoxy-basierend	amin-basierend			Lösungsmittelfrei	
2	StoCreate TF 301/303						
3	Sikaguard 706 Thixo						
4	StoCryl hc100						

Hersteller:		Henelit Lackfabrik GmbH				Ansprechpartner:		Hr. Müller / Fr. Ortner								
Objekt	Neu/San	Straße	Gemeinde	Jahr	Verarbeiter	Untergrundvorbehandlung			Hydropho-blierung	Grundierung	Spachtelung zementär	2K-Spachtelung diff-offen	2K-Spachtelung diff-dicht	Anstrich diff-offen	Beschichtung diff-dicht	funktionale Endbeschichtung
						UG1/UG2	UG3/UG4	UG4								
Plabutschunnel	s	A9	Graz Umgebung	2001	Goritschnig		x			1			2		3	4
Herzogbergtunnel	n	A2	Gemeinde Mooskirchen	2002	Goritschnig	x				1			2		3	4
Loibltunnel (österreichische Seite)	s	B91	Gemeinde Ferlach	2004	Goritschnig		x			1			2		3	4

Produkt Nr.	Produktbezeichnung	Basis	Härter	Beschleunigersystem	Füllstoffe	Lösungsmittel- / Wasserbasis	Glasübergangstemperatur
2	px400	Bisphenol-A-Epichlorhydrin-Harz MG<700 Bisphenol-F-Epichlorhydrin-Harz MG<700	Polyamin, modifiziert				



Hersteller:		MAPEI GmbH, 3134 Nussdorf o. d. Traisen				Ansprechpartner:		Hr. Panzl								
Objekt	Neu/San	Straße	Gemeinde	Jahr	Verarbeiter	Untergrundvorbehandlung										
						UG1/UG2	UG3/UG4	UG4	Hydrophobierung	Grundierung	Spachtelung zementär	2K-Spachtelung diff-offen	2K-Spachtelung diff-dicht	Anstrich diff-offen	Beschichtung diff-dicht	funktionale Endbeschichtung
Strengen	N	A12		2006	Peininger	x						2		3		
Roppener Tunnel	S	A12		2010	Trauffer		x					2		3		7
Plabutschunnel	S	A9		2004	Gontschnig		x					2		3		
Pfändertunnel	S	A14		2011	Chembau	x						2		3		
Tunnel Freistadt	N	S10		2013	Chembau	x						2		3		
Tunnel Freistadt	N	S10		2013	Chembau	x				1			4	3	6	
Niklasdorf	S	S6		2013	Chembau		x					2		3		
Niklasdorf	S	S6		2013	Chembau		x				5			3		
Niklasdorf	S	S6		2013	Chembau		x			1			4	3	6	7
Bosrucktunnel	N	A9		2013	Chembau	x						2		3		7
Gräberntunnel	N	A2		2004	Komat		x					2		3		
Unterführung Salzburg	S	B		2014	Bauschutz	x						2		3		

Produkt Nr.	Produktbezeichnung	Basis	Härter	Beschleunigersystem	Füllstoffe	Lösungsmittel- / Wasserbasis	Glasübergangstemperatur
1	Mapefloor I914	Bisphenol-A-Epichlorhydrin-Harz MG<700	30 % -40% Benzylalkohol	?	?	Lösemittelfrei	?
2	Mapecoat WT	Bisphenol-A-Epichlorhydrin-Harz MG<700	20% - 25% kristalline Kieselsäure	?	?	W	?
3	Mapecoat TU	Bisphenol-A-Epichlorhydrin-Harz MG<700	20% - 25% kristalline Kieselsäure	?	?	W	?
4	Primer SN Rasante	Bisphenol-A-Epichlorhydrin-Harz MG<700	20% - 24.99% Benzylalkohol	?	?		?
5	Mapefinish	zementär					
6	Mapecoat TU EP SF	Bisphenol-A-Epichlorhydrin-Harz MG<700	12 % -20% Benzylalkohol			Lösemittelfrei	
7	Mapefloor Finish 53 W/L	PU				W	

Hersteller:		Sika Österreich, Bingser Dorfstrasse 23, 6700 Bludenz				Ansprechpartner: Dr. Wanner										
Objekt	Neu/San	Straße	Gemeinde	Jahr	Verarbeiter	Untergrundvorbehandlung			Hydrophobierung	Grundierung	Spachtelung zementär	2K-Spachtelung diff-offen	2K-Spachtelung diff-dicht	Anstrich diff-offen	Beschichtung diff-dicht	funktionale Endbeschichtung
						UG1/UG2	UG3/UG4	UG4								
Flirscher Tunnel	s	S 16	Flirsch	2006	Chembau, Mils, Tirol					1		2	2	3		
Mautstelle St. Jakob	s	S 16	St. Jakob	2006	Bauschutz					1		2	2		3	
Kaiserparktunnel	s	B 158	Bad Ischl	2013	Chembau, Mils, Tirol	x	x		1			2	2	3		
Galerie Mötz	s	A 12	Mötz	2014	Trauffer, Schweiz	x	x			1		2		3		4
Galerie Senftenberg	s	A 12	Schönwies	2014	Trauffer, Schweiz	x	x			1		2		3		4

## 10.2 Datenerhebung Autobahnmeisterei

Objekt	Tunnel Noitzmühle (km 9,250-10,938) - A8 Innkreis Autobahn		Tunnelwaschung Frühjahr 2015 (Datum)	27.-30.04.2015
Richtungsfahrbahn	RFB-Passau und RFB-Graz		Ansprechpartner Autobahnmeisterei	AM Detlev Dantinger
Tunnellänge	1.688 m		Kontaktdaten (Telefonnummer/ Email)	050108 35010 / detlev.dantinger@asfinag
Tunnelanstrich	Spachtelmasse AgropoxTU.Giller.W (nur Einfahrtsbereiche), Anstrich: AgropoxTU.CO			
Zustand der Beschichtung	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Allgemeiner Zustand Tunnelanstrich (kurze Beschreibung)		vereinzelt kleinflächige Ablösungen an der Tunnelwand		
Zustand im unteren Bereich	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Schäden im unteren Bereich (kurze Beschreibung)		vereinzelt kleinflächige Ablösungen an der Tunnelwand		
Zustand im oberen Bereich	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Schäden im oberen Bereich (kurze Beschreibung)		vereinzelt kleinflächige Ablösungen an der Tunnelwand		
Zustand im Portalbereich	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Schäden (kurze Beschreibung)		lokal kleinflächige Ablösungen an an der Tunnelwand (etwas besser durch zusätzliche Spachtelmasse)		
Sonstige Bemerkungen (z.B. ergänzende visuelle Beschreibung des Zustandes bzw. von Schäden)	Die Tunnelbeschichtung löst sich vereinzelt kleinflächig ab (Zustand: gut - ausreichend)			

Objekt	Flirscher Tunnel		Tunnelwaschung Frühjahr 2015 (Datum)	22.-23.4.2015 (RFB Innsbruck)
Richtungsfahrbahn			Ansprechpartner Autobahnmeisterei	<a href="mailto:Stefan.Siegele@Asfinag.at">Stefan.Siegele@Asfinag.at</a>
Tunnellänge	872 m		Kontaktdaten (Telefonnummer/ Email)	0664-60108-38310
Hersteller				
Tunnelanstrich	Sika			
Zustand der Beschichtung	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Allgemeiner Zustand Tunnelanstrich (kurze Beschreibung)	bis auf die angeführten Mängel ist die Beschichtung in einem relativ guten Zustand	Risse im oberen Bereich	wenige flächenhafte Abplatzungen speziell im Fußbereich	
Zustand im unteren Bereich	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Schäden im unteren Bereich (kurze Beschreibung)			wenige flächenhafte Abplatzungen	
Zustand im oberen Bereich	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Schäden im oberen Bereich (kurze Beschreibung)		Vertikal Risse hauptsächlich im obersten Bereich und Längsrisse im obersten 1/3		
Zustand im Portalbereich	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Schäden (kurze Beschreibung)				
Sonstige Bemerkungen (z.B. ergänzende visuelle Beschreibung des Zustandes bzw. von Schäden)	generell viele Vertikal und Horizontalrisse im (unbeschichteten) Ulmenfirnbereich teilweise setzen sich die Risse über die Beschichtung bis in den Fußbereich fort, oft Kantenabplatzungen und Sinterungen an den Blockfugen			

<b>Objekt</b>	Strenger Tunnel		Tunnelwaschung Frühjahr 2015 (Datum)	siehe unten
<b>Richtungsfahrbahn</b>	RFB Bludenz		Ansprechpartner Autobahnmeisterei	<a href="mailto:Stefan.Siegele@Asfinag.at">Stefan.Siegele@Asfinag.at</a>
<b>Tunnellänge</b>	RFB Bludenz 5740m		Kontaktdaten (Telefonnummer/ Email)	0664-60108-38310
<b>Hersteller</b>	Map		waschung 15.4-16.4 u. 16.4-17.4.2015 (RFB Innsbruck) . 20.4-21.4 u. 21.4-22.4. (RFB Bludenz)	
<b>Tunnelanstrich</b>	Map		waschung 15.4-16.4 u. 16.4-17.4.2015 (RFB Innsbruck) . 20.4-21.4 u. 21.4-22.4. (RFB Bludenz)	
<b>Zustand der Beschichtung</b>	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
<b>Allgemeiner Zustand Tunnelanstrich (kurze Beschreibung)</b>	bis auf die angeführten Mängel ist die Beschichtung in einem relativ guten Zustand		wenige flächenhafte Abplatzungen speziell im Fußbereich	
<b>Zustand im unteren Bereich</b>	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
<b>Schäden im unteren Bereich (kurze Beschreibung)</b>			wenige flächenhafte Abplatzungen	
<b>Zustand im oberen Bereich</b>	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
<b>Schäden im oberen Bereich (kurze Beschreibung)</b>		Vertikal Risse hauptsächlich im obersten Bereich und Längsrisse im obersten 1/3		
<b>Zustand im Portalbereich</b>	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
<b>Schäden (kurze Beschreibung)</b>		wenige Schwindrisse und geringe Beschichtungsmängel und Korrosion an Ulmenunterseite		
<b>Sonstige Bemerkungen (z.B. ergänzende visuelle Beschreibung des Zustandes bzw. von Schäden)</b>	wenige Schwindrisse und geringe Beschichtungsmängel und Korrosion an Ulmenunterseite			

Objekt	Strenger Tunnel		Tunnelwaschung Frühjahr 2015 (Datum)	siehe unten
Richtungsfahrbahn	RFB Innsbruck		Ansprechpartner Autobahnmeisterei	<a href="mailto:Stefan.Siegele@Asfinag.at">Stefan.Siegele@Asfinag.at</a>
Tunnellänge	RFB Innsbruck 5659m		Kontaktdaten (Telefonnummer/ Email)	0664-60108-38310
Tunnelanstrich	Map		waschung 15.4-16.4 u. 16.4-17.4.2015 (RFB Innsbruck) , 20.4-21.4 u. 21.4-22.4. (RFB B)	
Zustand der Beschichtung	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Allgemeiner Zustand Tunnelanstrich (kurze Beschreibung)	bis auf die angeführten Mängel ist die Beschichtung in einem relativ guten Zustand		wenige flächenhafte Abplatzungen speziell im Fußbereich	
Zustand im unteren Bereich	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Schäden im unteren Bereich (kurze Beschreibung)			wenige flächenhafte Abplatzungen	
Zustand im oberen Bereich	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Schäden im oberen Bereich (kurze Beschreibung)		Vertikal Risse hauptsächlich im obersten Bereich und Längsrisse im obersten 1/3		
Zustand im Portalbereich	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Schäden (kurze Beschreibung)		Riss m. Sinterung im Portalbereich, horizontaler Riss ca. 1m über Seitenstreifen bei Portalende, im		
Sonstige Bemerkungen (z.B. ergänzende visuelle Beschreibung des Zustandes bzw. von Schäden)	wenige Schwindrisse und geringe Beschichtungsmängel und Korrosion an Ulmenunterseite			

Objekt	67/L Tunnel Ganzstein		Tunnelwaschung Frühjahr 2015 (Datum)	
Richtungsfahrbahn	Wien		Ansprechpartner Autobahnmeisterei	
Tunnellänge	2101,5 m		Kontaktdaten (Telefonnummer/ Email)	
mer Steiner	AGRO (lt. Von Hr. Steiner übermittelter Liste)		DW 37310 / walter.schaffnerberger@asfinag.at	
Tunnelanstrich				
Zustand der Beschichtung	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Allgemeiner Zustand Tunnelanstrich (kurze Beschreibung)		Vereinzelt punktuelle Abplatzungen <= 1m <sup>2</sup> (Detaillierte Aufschlüsselung s.u.)		
Zustand im unteren Bereich	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Schäden im unteren Bereich (kurze Beschreibung)		Vereinzelt punktuelle Abplatzungen <= 1m <sup>2</sup> bzw. teilweise unterste 30cm betroffen		
Zustand im oberen Bereich	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Schäden im oberen Bereich (kurze Beschreibung)				
Zustand im Portalbereich	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Schäden (kurze Beschreibung)	Im Fußbereich tw. Geringe Abplatzungen			
Sonstige Bemerkungen (z.B. ergänzende visuelle Beschreibung des Zustandes bzw. von Schäden)	Grundlage für die Bewertung ist die Prüfung 2013 durchgeführt durch das Ingenieurbüro Dipl.-Ing. Dr. Bernd Strobl			

Objekt	71/1 Schartnerkogeltunnel		Tunnelwaschung Frühjahr 2015 (Datum)	20-23.04.2015
Richtungsfahrbahn	Spielfeld		Ansprechpartner Autobahnmeisterei	Siegfried Edlinger
Tunnellänge	1324m		Kontaktdaten (Telefonnummer/ Email)	+43 664 60108 26113 <a href="mailto:siegfried.edlinger@asfinaq.at">siegfried.edlinger@asfinaq.at</a>
Tunnelanstrich	AGRO (lt. von Hr. Steiner übermittelter Liste)			
Zustand der Beschichtung	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Allgemeiner Zustand Tunnelanstrich (kurze Beschreibung)		Vereinzelt punktuelle Abplatzungen <= 1m <sup>2</sup> (Detaillierte Aufschlüsselung s.u.)		
Zustand im unteren Bereich	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Schäden im unteren Bereich (kurze Beschreibung)		vereinzelt punktuelle Abplatzungen <= 1m <sup>2</sup> bzw. teilweise unterste 30cm betroffen		
Zustand im oberen Bereich	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Schäden im oberen Bereich (kurze Beschreibung)				
Zustand im Portalbereich	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Schäden (kurze Beschreibung)		entlang wasserführender Risse in den Ulmen wird die Beschichtung abgedrückt		
Sonstige Bemerkungen (z.B. ergänzende visuelle Beschreibung des Zustandes bzw. von Schäden)	entlang wasserführender Risse in den Ulmen wird die Beschichtung abgedrückt, Schäden geringer als altergemäß zu erwarten, Aufbringung der Beschichtung erfolgte 2005 händisch mit Rolle, Zustandsbeurteilung erfolgte entsprechend den Ergebnissen der EMS Kontrolle 2013 mit Note 2			



Objekt	79LKalcherkogeltunnel		Tunnelwaschung Frühjahr 2015 (Datum)	07 und 08.04.2015
Richtungsfahrbahn	Wien (Angaben gelten auch für die Rfb. Thörl Maglern)		Ansprechpartner Autobahnmeisterei	Markus Bratschko
Tunnellänge	1.968m		Kontaktdaten (Telefonnummer/ Email)	+43 664 60108 13324 <a href="mailto:markus.bratschko@asfinag.at">markus.bratschko@asfinag.at</a>
Tunnelanstrich	siehe sonstige Bemerkungen			
Zustand der Beschichtung	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Allgemeiner Zustand Tunnelanstrich (kurze Beschreibung)		Vereinzel punktuelle Abplatzungen <= 1m <sup>2</sup> (Detaillierte Aufschlüsselung s.u.)		
Zustand im unteren Bereich	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Schäden im unteren Bereich (kurze Beschreibung)		vereinzel punktuelle Abplatzungen <= 0,5m <sup>2</sup> in den Einfahrtbereichen		
Zustand im oberen Bereich	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Schäden im oberen Bereich (kurze Beschreibung)		vereinzel punktuelle Abplatzungen <= 0,5m <sup>2</sup>		
Zustand im Portalbereich	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Schäden (kurze Beschreibung)		vereinzel entlang wasserführender Risse in den Ulmen wird die Beschichtung abgedrückt		
Sonstige Bemerkungen (z.B. ergänzende visuelle Beschreibung des Zustandes bzw. von Schäden)	2006/2007 Beschichtung durch Fa. Junger erneuert Auftragsnummer: Fa18B 43M1/03-16, Zustand generell gut , Zustandsbeurteilung erfolgte entsprechend den Ergebnissen der EMS-Kontrolle 2014 und Befahrung von 25.03.2015 durch EMS 2015 mit Note 2 Material (entnommen Prüfbericht): Grundierung: Mastertop Fa. Degussa Spachtelung: Agropox TU Spachtel Fa. Avenarius Agro Beschichtung: Agropox TU GL F Fa. Avenarius Agro			

Objekt	61L Mittebergtunnel		Tunnelwaschung Frühjahr 2015 (Datum)	07 und 08.04.2015
Richtungsfahrbahn	Wien (Angaben gelten auch für die Rfb. Thörl Maglern)		Ansprechpartner Autobahnmeisterei	Markus Bratschko
Tunnellänge	1.142m		Kontaktdaten (Telefonnummer/ Email)	+43 664 60108 13324 <a href="mailto:markus.bratschko@asfinag.at">markus.bratschko@asfinag.at</a>
Tunnelanstrich	siehe sonstige Bemerkungen			
Zustand der Beschichtung	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Allgemeiner Zustand Tunnelanstrich (kurze Beschreibung)		Vereinzelt punktuelle Abplatzungen <= 1m <sup>2</sup> (Detaillierte Aufschlüsselung s.u.)		
Zustand im unteren Bereich	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Schäden im unteren Bereich (kurze Beschreibung)		vereinzelt punktuelle Abplatzungen <= 0,5m <sup>2</sup> in den Einfahrtsbereichen		
Zustand im oberen Bereich	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Schäden im oberen Bereich (kurze Beschreibung)		vereinzelt punktuelle Abplatzungen <= 0,5m <sup>2</sup>		
Zustand im Portalbereich	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Schäden (kurze Beschreibung)		vereinzelt entlang wasserführender Risse in den Ulmen wird die Beschichtung abgedrückt		
Sonstige Bemerkungen (z.B. ergänzende visuelle Beschreibung des Zustandes bzw. von Schäden)	2006/2007 Beschichtung durch Fa. Junger erneuert Auftragsnummer: Fa18B 43M1/03-16, Zustand generell gut , Zustandsbeurteilung erfolgte entsprechend den Ergebnissen der EMS-Kontrolle 2014 und Befahrung von 25.03.2015 durch EMS 2015 mit Note 2 Material (entnommen Prüfbericht): Grundierung: Mastertop Fa. Degussa Spachtelung: Agropox TU Spachtel Fa. Avenarius Agro Beschichtung: Agropox TU GL F Fa. Avenarius Agro			

<b>Objekt</b>	A010.238 L / Katschbergtunnel		<b>Tunnelwaschung Frühjahr 2015 (Datum)</b>	20150420 bis 20150423
<b>Richtungsfahrbahn</b>	Salzburg		<b>Ansprechpartner Autobahnmeisterei</b>	Herr Essl
<b>Tunnellänge</b>	5897.781M1		<b>Kontaktdaten (Telefonnummer/ Email)</b>	DW 25210 / bernd.essl@asfinag.at
<b>Hersteller Tunnelanstrich</b>	Avenarius Agro			
<b>Zustand der Beschichtung</b>	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
<b>Allgemeiner Zustand Tunnelanstrich (kurze Beschreibung)</b>		Diverse kleinere Risse und Abplatzungen im gesamten Ulmenbereich. (mechanische Belastung)		
<b>Zustand im unteren Bereich</b>	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
<b>Schäden im unteren Bereich (kurze Beschreibung)</b>		Diverse kleinere Risse im unteren Ulmenbereich. (mechanische Belastung)		
<b>Zustand im oberen Bereich</b>	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
<b>Schäden im oberen Bereich (kurze Beschreibung)</b>		Diverse kleinere Risse und Abplatzungen im oberen Ulmenbereich. (mechanische Belastung)		
<b>Zustand im Portalbereich</b>	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
<b>Schäden (kurze Beschreibung)</b>		Diverse kleinere Risse		
<b>Sonstige Bemerkungen (z.B. ergänzende visuelle Beschreibung des Zustandes bzw. von Schäden)</b>	Prüfung analog RVS 13.03.31 und RVS AP 12 wurde 2014 umgesetzt. Die Prüfungsunterlagen sind unter <a href="I:\SG\24_EMS_Daten\A10\03_Tunnel\109.088-A010.238_Katschbergtunnel\Inspektionen_Fotos\2014_Prüfung_2014_Tunnelpruefung_A10-238R_KaT_RFB_2">I:\SG\24_EMS_Daten\A10\03_Tunnel\109.088-A010.238_Katschbergtunnel\Inspektionen_Fotos\2014_Prüfung_2014_Tunnelpruefung_A10-238R_KaT_RFB_2</a> einsehbar.			

<b>Objekt</b>	Gräberntunnel		<b>Tunnelwaschung Frühjahr 2015 (Datum)</b>	15. - 16. 04.2015
<b>Richtungsfahrbahn</b>	Villach		<b>Ansprechpartner Autobahnmeisterei</b>	Herr Schrammel
<b>Tunnellänge</b>	2148 M1		<b>Kontaktdaten (Telefonnummer/ Email)</b>	DW 38210/ robert.schrammel@asfinag.at
<b>Hersteller Tunnelanstrich</b>	??? (Robert Schnabl müsste diesbezügliches Wissen haben)			
<b>Zustand der Beschichtung</b>	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
<b>Allgemeiner Zustand Tunnelanstrich (kurze Beschreibung)</b>		Diverse Risse (v.a. Vertikalrisse) im Ulmenbereich, kleinere Korr.schäden in den bewehrten Portalbereichen		
<b>Zustand im unteren Bereich</b>	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
<b>Schäden im unteren Bereich (kurze Beschreibung)</b>		Zu bemängeln ist die Beschichtung v.a. in den Nischenbereichen. Diverse kleinere Mängel (mechanische Belastungen)		
<b>Zustand im oberen Bereich</b>	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
<b>Schäden im oberen Bereich (kurze Beschreibung)</b>		wenig Mängel		
<b>Zustand im Portalbereich</b>	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
<b>Schäden (kurze Beschreibung)</b>				
<b>Sonstige Bemerkungen (z.B. ergänzende visuelle Beschreibung des Zustandes bzw. von Schäden)</b>				

<b>Objekt</b>	Milser Tunnel, A12 km 136,6 - 138,4		<b>Tunnelwaschung Frühjahr 2015 (Datum)</b>	13. - 17.04.2015
<b>Richtungsfahrbahn</b>	RFB Bregenz / RFBKufstein		<b>Ansprechpartner Autobahnmeisterei</b>	ABM Imst, Ing. Santer Günter
<b>Tunnellänge</b>	1811 m / 1615 m		<b>Kontaktdaten (Telefonnummer/ Email)</b>	50108 38510, guenter.santer@asfinag.at
<b>Tunnelanstrich</b>	Agro Avenarius (2005)			
<b>Zustand der Beschichtung</b>	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
<b>Allgemeiner Zustand Tunnelanstrich (kurze Beschreibung)</b>			In beiden Röhren blättert die Beschichtung immer wieder ab (gesamte Tunnellänge)	
<b>Zustand im unteren Bereich</b>	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
<b>Schäden im unteren Bereich (kurze Beschreibung)</b>			Hält der Tunnelreinigung nicht stand	
<b>Zustand im oberen Bereich</b>	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
<b>Schäden im oberen Bereich (kurze Beschreibung)</b>			Beschichtung nur bis ca. 3 m	
<b>Zustand im Portalbereich</b>	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
<b>Schäden (kurze Beschreibung)</b>			wie im Tunnel	
<b>Sonstige Bemerkungen (z.B. ergänzende visuelle Beschreibung des Zustandes bzw. von Schäden)</b>	Schäden an der Beschichtung wurden 2011 schon einmal saniert			

<b>Objekt</b>	Wolfsbergtunnel		<b>Tunnelwaschung Frühjahr 2015 (Datum)</b>	4. und 5. Mai 2015
<b>Richtungsfahrbahn</b>	<i>Salzburger</i>		<b>Ansprechpartner Autobahnmeisterei</b>	
<b>Tunnellänge</b>			<b>Kontaktdaten (Telefonnummer/ Email)</b>	
<b>Hersteller Tunnelanstrich</b>	Avenarius Agro ?			
<b>Zustand der Beschichtung</b>	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
<b>Allgemeiner Zustand Tunnelanstrich (kurze Beschreibung)</b>	X			
<b>Zustand im unteren Bereich</b>	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
<b>Schäden im unteren Bereich (kurze Beschreibung)</b>		X		
<b>Zustand im oberen Bereich</b>	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
<b>Schäden im oberen Bereich (kurze Beschreibung)</b>	X			
<b>Zustand im Portalbereich</b>	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
<b>Schäden (kurze Beschreibung)</b>		X		
<b>Sonstige Bemerkungen (z.B. ergänzende visuelle Beschreibung des Zustandes bzw. von Schäden)</b>	<i>Keine</i>			

<b>Objekt</b>	Wolfsbergtunnel		<b>Tunnelwaschung Frühjahr 2015 (Datum)</b>	4. und 5. Mai 2015
<b>Richtungsfahrbahn</b>	Villach		<b>Ansprechpartner Autobahnmeisterei</b>	
<b>Tunnellänge</b>			<b>Kontaktdaten (Telefonnummer/ Email)</b>	
<b>Hersteller Tunnelanstrich</b>	Avenarius Agro ?			
<b>Zustand der Beschichtung</b>	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
<b>Allgemeiner Zustand Tunnelanstrich (kurze Beschreibung)</b>	X			
<b>Zustand im unteren Bereich</b>	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
<b>Schäden im unteren Bereich (kurze Beschreibung)</b>		X		
<b>Zustand im oberen Bereich</b>	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
<b>Schäden im oberen Bereich (kurze Beschreibung)</b>	X			
<b>Zustand im Portalbereich</b>	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
<b>Schäden (kurze Beschreibung)</b>		X		
<b>Sonstige Bemerkungen (z.B. ergänzende visuelle Beschreibung des Zustandes bzw. von Schäden)</b>	Keine			

Objekt	BT 1 - Bergiseltunnel		Tunnelwaschung Frühjahr 2015 (Datum)	22.04.2015
Richtungsfahrbahn	RFB Brenner		Ansprechpartner Autobahnmeisterei	ABM Plon
Tunnellänge m	484		Kontaktdaten (Telefonnummer/ Email)	0664/6010839210
Tunnelanstrich	nicht bekannt			
Zustand der Beschichtung	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Allgemeiner Zustand Tunnelanstrich (kurze Beschreibung)			größere Flächen blättern ab - vor allem im Bereich von Blockfugen bei eindringender Feuchtigkeit; Risse	
Zustand im unteren Bereich	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Schäden im unteren Bereich (kurze Beschreibung)			wie oben	
Zustand im oberen Bereich	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Schäden im oberen Bereich (kurze Beschreibung)			wie oben	
Zustand im Portalbereich	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Schäden (kurze Beschreibung)			Risse und abblättern der Beschichtung	
Sonstige Bemerkungen (z.B. ergänzende visuelle Beschreibung des Zustandes bzw. von Schäden)	Der Großteil der Schäden an der Tunnelbeschichtung rührt von Schäden an der Tunnelschale her, die durch eindringendes Wasser von hinten verursacht sind. Dadurch kommt es vor allem im Bereich der Blockfugen zu Abplatzungen.			



<b>Objekt</b>	<b>BT 1 - Bergiseltunnel</b>		<b>Tunnelwaschung Frühjahr 2015 (Datum)</b>	<b>23.04.2015</b>
<b>Richtungsfahrbahn</b>	<b>RFB Innsbruck</b>		<b>Ansprechpartner Autobahnmeisterei</b>	<b>ABM Plon</b>
<b>Tunnellänge</b>	473		<b>Kontaktdaten (Telefonnummer/ Email)</b>	<b>0664/6010839210</b>
<b>Hersteller</b>	nicht bekannt			
<b>Tunnelanstrich</b>	nicht bekannt			
<b>Zustand der Beschichtung</b>	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
<b>Allgemeiner Zustand Tunnelanstrich (kurze Beschreibung)</b>			größere Flächen blättern ab - vor allem im Bereich von Blockfugen bei eindringender Feuchtigkeit; starke Rissbildungen	
<b>Zustand im unteren Bereich</b>	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
<b>Schäden im unteren Bereich (kurze Beschreibung)</b>			wie oben	
<b>Zustand im oberen Bereich</b>	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
<b>Schäden im oberen Bereich (kurze Beschreibung)</b>			wie oben	
<b>Zustand im Portalbereich</b>	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
<b>Schäden (kurze Beschreibung)</b>			Risse und abblättern der Beschichtung	
<b>Sonstige Bemerkungen (z.B. ergänzende visuelle Beschreibung des Zustandes bzw. von Schäden)</b>	Der Großteil der Schäden an der Tunnelbeschichtung rührt von Schäden an der Tunnelschale her, die durch eindringendes Wasser von hinten verursacht sind. Dadurch kommt es vor allem im Bereich der Blockfugen zu Abplatzungen.			

Objekt	BT 2 - Sonnenburghoftunnel		Tunnelwaschung Frühjahr 2015 (Datum)	23.04.2015
Richtungsfahrbahn	RFB Bregenz		Ansprechpartner Autobahnmeisterei	ABM Plon
Tunnellänge meister	170		Kontaktdaten (Telefonnummer/ Email)	0664/6010839210
Tunnelanstrich	nicht bekannt			
Zustand der Beschichtung	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Allgemeiner Zustand Tunnelanstrich (kurze Beschreibung)		lokales Abblättern der Beschichtung; Netzrisse		
Zustand im unteren Bereich	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Schäden im unteren Bereich (kurze Beschreibung)		wie oben		
Zustand im oberen Bereich	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Schäden im oberen Bereich (kurze Beschreibung)		wie oben		
Zustand im Portalbereich	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Schäden (kurze Beschreibung)			Beschichtung großteils abgelöst - Betonabplatzungen	
Sonstige Bemerkungen (z.B. ergänzende visuelle Beschreibung des Zustandes bzw. von Schäden)				

Objekt	BT 2 - Sonnenburghoftunnel		Tunnelwaschung Frühjahr 2015 (Datum)	23.04.2015
Richtungsfahrbahn	RFB Brenner		Ansprechpartner Autobahnmeisterei	ABM Plon
Tunnellänge in Meter	158		Kontaktdaten (Telefonnummer/ Email)	0664/6010839210
Tunnelanstrich	nicht bekannt			
Zustand der Beschichtung	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Allgemeiner Zustand Tunnelanstrich (kurze Beschreibung)	lokales Abblättern der Beschichtung; Netzrisse			
Zustand im unteren Bereich	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Schäden im unteren Bereich (kurze Beschreibung)	wie oben			
Zustand im oberen Bereich	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Schäden im oberen Bereich (kurze Beschreibung)	wie oben			
Zustand im Portalbereich	sehr gut (intakte Oberfläche)	gut (leichte Oberflächenschäden, Risse)	schlecht (flächenhafte Ablösung)	weitgehende Zerstörung (flächenhafte Ablösung)
Schäden (kurze Beschreibung)			Beschichtung großteils abgelöst - Betonabplatzungen	
Sonstige Bemerkungen (z.B. ergänzende visuelle Beschreibung des Zustandes bzw. von Schäden)	tendenziell ist die RFB Brenner in einem etwas schlechteren Zustand als die RFB Bregenz			

## 10.3 Rohdaten zur Beprobung ausgewählter Tunnelbauwerke

Beschreibung Probenahmestellen																						
Ganzsteintunnel Richtung Wien																						
Bohrk	Bohrmehl ENr.	5390	Jahr	N/S	Herstel	Block	Abstand vom Portalen	Höhe vom Boden	Chloridgehalt im Bohrmehl [%]			Wassergehalt [%]	Reflexionsgrad Y	Porosität [%] unter hydraulischer Spaltbreite[μm] von				f <sub>cz</sub> [Mpa]	Schichtdicke [mm]			Schäden
									0-2 cm	2-4 cm	4-6 cm			0.01	0.1	1	10		Beschichtung	Spachtelung I	Spachtelung II	
13	1-3	2008	N	Agro	1/0	45 m	Helligkeit: 120 cm, Bohrkern+Rest: 50 cm	0.57	0.15	0.17	2.0	61.81	0.78	5.62	9.4	10.63	3.2	0.190	0.799		schlecht, feine Krakeleerisse mit Abplatzungen	
14	4-6				6/0	325 m	Helligkeit: 70-80 cm, Bohrkern+Rest: 50 cm	0.47	0.12	0.02	2.3	61.58	1.86	6.19	9.93	11.16	3.5	0.142	0.361	0.207	intakter Block	
15	7-9				6/0	325 m	230 cm	1.53	0.33	0.16	2.5	62.52					3.3	0.117	0.264		intakter Block	
16	10-12				18/4	1065 m	50 cm	0.17	0.17	0.17	1.8	60.06					2.7	0.109	0.475		schlecht, feine+grobe Krakeleerisse mit Abplatzungen	
Anmerkungen: Blocklänge 10-20 cm Gesamtlänge: 2101 m																						
Wels Noitzmühle Traunbrücke Richtung Graz																						
Bohrk	Bohrmehl ENr.	5395	Jahr	N/S	Herstel	Block	Abstand vom Portalen	Höhe vom Boden	Chloridgehalt im Bohrmehl [%]			Wassergehalt [%]	Reflexionsgrad Y	Porosität [%] unter hydraulischer Spaltbreite[μm] von				f <sub>cz</sub> [Mpa]	Schichtdicke [mm]			Schäden
									0-2 cm	2-4 cm	4-6 cm			0.01	0.1	1	10		Beschichtung	Spachtelung I	Spachtelung II	
13	1-3	2003	N	Agro	G004	31,6 m	50 cm	2.56	0.55	0.22	1.8	64.20					3.80	0.255	0.137		gut, keine (1 Riss)	
14	4-6				G039	451 m	50 cm	0.33	0.5	0.28	2.0	64.06	2.04	6.41	11.07	13.31	1.4	0.246			schlecht, Abplatzungen	
15	7-9				Traunbrück	1314 m (9C 60-70 cm)		0.3	0.17	0.15	1.5	64.06	1.88	6.99	8.77	9.39	1.1	0.140			ok	
16	10-12				Traunbrück	1314 m (9C 195-205 cm)		0.4	0.1	0.17	1.0	61.66					2.5	0.174			ok	
Traunbrücke dunkle Stellen (bei Blasen) h=24 cm 54.97																						
Anmerkungen: Tunnelende = 1617 m Traunbrücke zum Vergleich mit Mills, v.a. Wasser+Chlorid																						
Wolfsbergtunnel Richtung Villach																						
Bohrk	Bohrmehl ENr.	5403	Jahr	N/S	Herstel	Block	Abstand vom Portalen	Höhe vom Boden	Chloridgehalt im Bohrmehl [%]			Wassergehalt [%]	Reflexionsgrad Y	Porosität [%] unter hydraulischer Spaltbreite[μm] von				f <sub>cz</sub> [Mpa]	Schichtdicke [mm]			Schäden
									0-2 cm	2-4 cm	4-6 cm			0.01	0.1	1	10		Beschichtung	Spachtelung I	Spachtelung II	
13	1-3	2010	N	Agro	V03	16,8 m	50 cm	0.52	0.62	0.53	3.0	60.29					5.3	0.187	0.697		feine Krakeleerisse	
14	4-6				V35	368,4 m	50 cm	0.27	0.21	0.2	1.5	61.05	1.01	4.64	8	8.92	3.3	0.145	0.912		schwarze Stellen mit pulvriger Spachtelmasse	
15	7-9				V35	368,4 m	205 cm	1.93	0.05	0.13	0.9	65.10					3.6	0.117	0.381		schwarze Stellen mit pulvriger Spachtelmasse	
16	10-12				V45	485,6 m	50 cm	0.17	0.16	0.18	2.0	63.95	1.12	5.63	9.92	10.83	3.6	0.129	0.642		Intakter Block	
Anmerkungen: Portal = 62,5m lang (Voreinhausung) Ende bei V61 = 667,6 m																						

Wolfsbergtunnel Richtung Salzb				Wolfsbergtunnel Richtung Salzb																
Bohrk	Bohrmehl ENr.	Jahr	N/S	Herstel	Block	Abstand vom Portal	Höhe vom Boden	Chloridgehalt im Bohrmehl [%]			Wassergehalt [%]	Reflexionsgrad	Porosität [%] unter hydraulischer Spaltbreite [µm] von				f <sub>tz</sub> [Mpa]	Schichtdicke [mm]		Schäden
								0-2 cm	2-4 cm	4-6 cm			0.01	0.1	1	10		Beschichtung	Spachtelung I	
13	1-3	2010	S	Agro	S79	17,2 m	50 cm	0.17	0.15	0.17	2.0	55.18					5.3	0.071	0.951	feine Krakeleerisse
14	4-6				S59	255,5 m	50 cm	4.52	0.42	0.25	0.9	60.11	1.7	3.94	7.65	9.09	4.9	0.102	1.249	weiße hellere Stelle + feine Krakeleerisse
15	7-9				S59	255,5 m	200 cm	2.61	0.85	0.05	1.5	62.93	2.17	5.92	7.63	8.61	2.5	0.068	0.197	0.074 weiße hellere Stelle + feine Krakeleerisse
18					S59 - Zusatz	255,5 m	170 cm				0.5									weiße hellere Stelle
16	10-12				S22	496,5 m	50 cm	5.55	0.97	0.17	0.9	59.39					3.0	0.093	0.921	Intakter Block
17					S09 - Zusatz	856,2 m	80 cm				0.9									schwarze Stellen mit pulvriger Spachtelmasse
Anmerkungen:																				
80 Blöcke zu je ca. 10 m																				
Tunnelende bei 951,5 m																				

Schartnerkogeltunnel Richtung				Schartnerkogeltunnel Richtung Graz																
Bohrk	Bohrmehl ENr.	Jahr	N/S	Herstel	Block	Abstand vom Portal	Höhe vom Boden	Chloridgehalt im Bohrmehl [%]			Wassergehalt [%]	Reflexionsgrad	Porosität [%] unter hydraulischer Spaltbreite [µm] von				f <sub>tz</sub> [Mpa]	Schichtdicke [mm]		Schäden
								0-2 cm	2-4 cm	4-6 cm			0.01	0.1	1	10		Beschichtung	Spachtelung I	
13	1-3	2005	S	Agro		3 17 m	50 cm	4.57	3.04	1.60	0.9	58.03					4.5	0.203	0.947	gut: gute Haftung, Krakeleerisse vorhanden aber nicht durchgängig, da Anstrich rel. Dick, raues Unterprofil
14	4-6					34 477 m	50 cm	4.27	1.38	1.02	1.5	57.55	2.33	6.48	11.12	12.85	5.3	0.222	0.734	weniger Krakeleerisse
15	7-9					34 477 m	> 200 cm	2.82	0.54	0.08	1.5	56.65					2.3	0.153	0.296	Abplatzungen bei Rissen, vermutlich durch Feuchtigkeitseintritt, keine Krakeleerisse,
16	10-12					75 900 m	50 cm	4.40	4.22	2.56	1.5	57.55	2.42	6.24	9.4	10.28	5.2	0.121	1.162	fast keine Krakeleerisse
Anmerkungen:																				
Tunnellänge = 1230 m																				
Abnahme der Krakeleerisse aufgrund Wind																				
deutliche Zunahme der Verschmutzung gegen Ende des Tunnels																				
Wölbung der Abplatzung = Abhebung																				
Abplatzungen idR bei wasserführenden Rissen im Beton																				
bei besonders großen Rissen mit hoher Feuchtigkeit Abplatzung mit anhaftender Grundierung, ansonsten immer Fehlstelle zwischen Beschichtung und Grundierung																				
Abplatzungen nur über 2 m Höhe																				
> 2 m weniger Rauigkeit																				
Krakeleerisse gehen nicht durch den Anstrich durch																				

Strenger Tunnel Richtung Innsbruck										Strenger Tunnel Richtung Innsbruck											
Bohrnr	Bohrmehl ENr.	Jahr	N/S	Herstel	Block	Abstand vom Portal	Höhe vom Boden	Chloridgehalt im Bohrmehl [%]			Wassergehalt [%]	Reflexionsgrad	Porosität [%] unter hydraulischer Spaltbreite [µm] von				f <sub>cz</sub> [Mpa]	Schichtdicke [mm]			Schäden
								0-2 cm	2-4 cm	4-6 cm			0.01	0.1	1	10		Beschichtung	Spachtelung I	Spachtelung II	
13	1-3	2006	N	Mapel	OWS5	12 m	50 cm	0.58	0.47	2.28	0.9	Y	61.77					4.9	0.170	0.239	intakt
16	4-6				S425	792 m	50 cm (Helligkeit über Schäden bei 85 cm)	3.14	0.31	0.22	1.5		50.14	2.33	7.12	9.17	9.93	2.5	0.140	0.372	feine Abplatzungen von 0-100cm Höhe, besonders stark unter Notausgangsschild. (unter Notausgang kein Bohrkern möglich wegen Rostflecken, unten verstärkt wegen aufsteigender Feuchtigkeit)
17					S385 - Zusa	1272 m															
14	7-9				S283	1764 m	50 cm	0.16	0.11	0.20	0.9		52.34	1.88	7.2	11.55	12.38	3.1	0.218	0.424	intakt (keine Netzkrisse, keine Abplatzungen, fast keine Risse)
15	10-12				S283	1764 m	210 cm	0.17	0.13	0.13	0.9		56.64					3.1	0.221	0.187	intakt (keine Netzkrisse, keine Abplatzungen, fast keine Risse)

**Anmerkungen:**

Länge: 5775 m, Beprobung + Begehung bis zur Mitte = 3. Pannenbucht = 2,8km  
 Beschriftung: zuerst OWS4 bis OWS8, danach weiter mit S486, abwärts nummeriert  
 Einbauten in der Regel stark geschädigt  
 Blocklänge 12 m (gemessen an S282) --> damit Abstand von Portal berechnet  
 Kurven: zuerst II, dann re, dann II  
 Abwärts verlaufend  
 bei großflächigen Schäden (zum Teil <200cm) vermutlich Wasser auf Betonoberfläche. Ebenso bei länglich verlaufenden vertikalen Schäden. Wassertropfen durch Farbrolier länglich verwischt

Flirscher Tunnel inkl. Gondebach										Flirscher Tunnel inkl. Gondebach											
Bohrnr	Bohrmehl ENr.	Jahr	N/S	Herstel	Block	Abstand vom Portal	Höhe vom Boden	Chloridgehalt im Bohrmehl [%]			Wassergehalt [%]	Reflexionsgrad	Porosität [%] unter hydraulischer Spaltbreite [µm] von				f <sub>cz</sub> [Mpa]	Schichtdicke [mm]			Schäden
								0-2 cm	2-4 cm	4-6 cm			0.01	0.1	1	10		Beschichtung	Spachtelung I	Spachtelung II	
13	1-3	2006	S	Sika		7 36 m	50 cm	1.93	2.70	0.09	0.9		57.25					3.9	0.138	1.128	intakt
14	4-6					18 156 m	50 cm	2.99	3.78	1.79	1.5		55.42	0.52	4.77	9.03	10.03	3.9	0.166	1.466	intakt
15	7-9					18 156 m	120 cm	4.03	7.95	4.48	0.9		55.99	2.34	7.94	11.92	13.37	2.7	0.119	0.575	1.231 dunkle Schatten, leicht schlechterer Kreuzschnitt
16	10-12					18 156 m	215 cm	0.43	1.24	0.84	0.9		61.28					3.2	0.302	0.082	0.089 intakt

**Anmerkungen:**

Gondebach: 354 m  
 Flirsch: 872 m  
 Gesamt: 1226 m  
 Gegenverkehrstunnel  
 Einbauten ok  
 ca. 12 m je Block  
 drei Höhen bei Block 18 beprobt für Ergebnis bei chemischer Analyse

Milsér Tunnel Richtung Arlberg										Milsér Tunnel Richtung Arlberg											
Bohrnr	Bohrmehl ENr.	Jahr	N/S	Herstel	Block	Abstand vom Portal	Höhe vom Boden	Chloridgehalt im Bohrmehl [%]			Wassergehalt [%]	Reflexionsgrad	Porosität [%] unter hydraulischer Spaltbreite [µm] von				f <sub>cz</sub> [Mpa]	Schichtdicke [mm]			Schäden
								0-2 cm	2-4 cm	4-6 cm			0.01	0.1	1	10		Beschichtung	Spachtelung I	Spachtelung II	
13	1-3	2005	S	Agro		7 62 m (in G 70 cm)	50 cm	5.68	7.75	2.92	0.9		36.7					1.6	0.265	1.635	1.544 sehr rau + dreckig (unregelmäßig --> versch. schlechte Helligkeitswerte), durchgehend von ca. Block 38-70 (Portal bis Block 70) (mind. bis 130))
14	4-6					53 583 m (in G 70 cm)	90 cm (Helligkeit bei 70 cm)	4.25	5.29	3.19	0.9		34.02	2.99	5.56	8.02	8.82	0.6	0.141		sehr rau + dreckig (unregelmäßig --> versch. schlechte Helligkeitswerte), durchgehend von ca. Block 38-70 (Portal bis Block 70) (mind. bis 130))
15	7-9					126 1448 m (in cm)		5.05	1.66	0.21	0.4		44.39	0.57	2.06	4.18	4.85	1.1	0.303		Haftung bis 150 cm, derartige Schäden mind. über 2/3 bis 3/4 der Länge des Tunnels (von Block 70 bis ? (mind. bis 130))
16	10-12					126 1448 m (in 220 cm)		3.07	0.41	0.15	1.5		49.03					2.7	0.213		intakt

**Anmerkungen:**

Blocklänge in Galerie: ~8,85 m  
 Blocklänge in Tunnel: ~11,85 m  
 in 50 cm und 200 cm Höhe Anstrichkante  
 --> Proben über 50cm-Kante genommen  
 <50 und >200 cm deutlich glatter, als dazwischen  
 <50 Abplatzungen scheinen wie abgeschnitten  
 >200 cm überall intakt  
 Galerie bis Block 15  
 Block 7 ohne Schäden, Block 8 vereinzelt leichte Abplatzungen

## 10.4 Rohdaten Haftzugfestigkeit vor und nach der Auslagerung

Hersteller	Hersteller 1																				Hersteller 2								
	0 % Chlorid						kapillares Saugen				2 % Chlorid						7 % Chlorid						EP		PU				
	IG			WDI			IG		WDI		IG			WDI			IG			WDI			IG		IG				
Temp.	12	5	5	12	5	5	12	5	12	5	12	5	5	12	5	5	12	5	5	12	5	5	12	5	5	12	5	12	5
UG2	2.2	1.9	2.1	3.1	2.9	3.6	2.6	1.9	3.7	3.2	1.6	1.6		3.2	2.3		1.8	1.1		3.0	3.2		0.8 <sup>1</sup>	0.8 <sup>1</sup>	0.8 <sup>1</sup>	0.9 <sup>1</sup>			
UG4	2.0	2.7	2.8	3.6	2.8	2.5					1.7	1.9	1.8	3.2	2.7	2.9	1.7	1.6	1.5	3.0	2.8	2.9							
Mittelwert vor XF4	2.1	2.3	2.5	3.4	2.9	3.1	2.6	3.7	1.9	3.2	1.7	1.8	1.8	3.2	2.5	2.9	1.8	1.4	1.5	3.0	3.0	2.9	0.8	0.8	0.8	0.9			
UG2	2.6	1.0	2.7	3.6	4.2	3.6	2.6	3.6	4.1 <sup>1</sup>	2.2 <sup>2</sup>	1.0	1.7		3.6	2.9		2.0	1.4		3.3	2.8		1.9 <sup>1</sup>	2.5 <sup>1</sup>	0.8 <sup>1</sup>	1.9 <sup>1</sup>			
UG4	1.5	2.9	3.0	3.2	3.0	2.3					2.5	2.1	2.1	2.9	3.0	3.1	1.4	1.0	1.7	3.1	3.0	4.2							
Mittelwert nach XF4	2.1	2	2.8	3.4	3.6	2.9	2.6	4.1	3.6	2.2	1.8	1.9	2.1	3.3	2.9	3.1	1.7	1.2	1.7	3.2	2.9	4.2	1.9	2.5	0.8	1.9			
UG2	1.9	2.2	2.5	3.1	3.1	2.9					1.7	2.2		3.4	2.1		1.3			3.0 <sup>2</sup>	2.9								
UG4	2.2	2.6	2.4	2.9	3.6	2.9					1.7	2.1	2.2	3.4	1.6 <sup>2</sup>	2.3	1.4			3.7	3.4								
Mittelwert nach XF4 & therm. Belastung	2.1	2.4	2.5	3.0	3.4	2.9					1.7	2.2	2.2	3.4	1.9	2.3	1.4			3.4	3.2								
UG0	1.6	1.7 <sup>2</sup>	2.0	3.0	3.2	3.1	2.4	1.6	3.5	4.8	1.5	1.5		4.0	2.3		1.3	1.7		3.5	3.2		1.4 <sup>1</sup>	1.1 <sup>1</sup>	1.0 <sup>1</sup>	1.6 <sup>1</sup>			
UG0	1.9	2.6	2.8	3.5	2.4	3.4					1.2	1.5	1.8	3.4	2.2	2.5	1.2	2.6	1.3	3.3	2.4	2.8							
Mittelwert nach rückseitiger Feuchte	1.8	2.2	2.4	3.3	2.8	3.3	2.4	1.6	3.5	4.8	1.4	1.5	1.8	3.7	2.3	2.5	1.3	2.2	1.3	3.4	2.8	2.8	1.4	1.1	1.0	1.6			

1 ... Bruch zwischen erster und zweiter Beschichtungslage

2 ... Bruch zwischen Beton und erster Beschichtungslage