

Materialeigenschaften von Kunststoffdichtungs- bahnen bestehender Straßentunnel

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 107

The logo for the Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) is displayed in a bold, green, lowercase sans-serif font. The letters are thick and have a slight shadow effect, giving them a three-dimensional appearance. The logo is positioned in the bottom right corner of the page.

Materialeigenschaften von Kunststoffdichtungs- bahnen bestehender Straßentunnel

von

Daniela Robertson
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Berlin

Zori Bronstein
Kiwa MPA Bautest GmbH
Greven

Katrin Brummermann
BKB Büro
Ronnenberg

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 107

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv **ELBA** zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 15.0461/2008/ERB:
Materialeigenschaften von
Kunststoffdichtungsbahnen bestehender Straßentunnel

Fachbetreuung:
Ingo Kaundinya

Herausgeber
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag
Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-95606-104-2

Bergisch Gladbach, August 2014

Kurzfassung – Abstract

Materialeigenschaften von Kunststoffdichtungsbahnen bestehender Straßentunnel

Im Zuge von Nachrüstungsarbeiten konnten Kunststoffdichtungsbahnproben (KDB) aus fünf deutschen Straßentunneln entnommen werden. Im Rahmen des Forschungsvorhabens FE 15.461/2008/ERB „Materialeigenschaften von Kunststoffdichtungsbahnen bestehender Straßentunnel“ beauftragte das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), die ausgebauten KDB-Proben systematisch zu untersuchen. Die Kunststoffdichtungsbahnen waren zwischen 10 und 23 Jahren in den jeweiligen Straßentunneln eingebaut.

Im ersten Schritt wurden die Materialeigenschaften der KDB-Proben mit dafür geeigneten Methoden charakterisiert, wie Thermischen Analysen (DSC, OIT), Dichtebestimmung, Zugprüfung (mechanischen Eigenschaften), Ermittlung des Stabilisatorgehalts (ICOT), der Dicke der KDB sowie der Qualität der Fügenaht und der geotextilen Schutzschicht.

Im Verlauf des Vorhabens wurden Bergwasserproben aus den Straßentunneln entnommen und analysiert. Der Auftraggeber übermittelte der BAM die Ergebnisse zur Auswertung. Bei der Entnahme wurden folgende Parameter vor Ort bestimmt: Entnahmetemperatur, pH-Wert sowie partiell der Sauerstoffgehalt. Im Prüflabor wurden dann die Bestimmung der Leitfähigkeit und die Elementaranalyse mittels ICP-OES zur Bestimmung der Metallionenkonzentration (u. a. Eisen, Mangan und Kupfer) durchgeführt.

Zusätzlich wurden weiterführende Versuche zur Oxidationsbeständigkeit im Autoklaven in Anlehnung an DIN EN ISO 13438 durchgeführt, um den Einfluss von Metallionen auf die oxidative Beständigkeit zu untersuchen. Mit Hilfe der Daten aus der Bergwasseranalyse wurde ein geeignete Modellmedium entwickelt, die im Autoklaventest an einem bereits ohne Metallionen untersuchten Produkt (Produkt II, FE 15.449/207/ERB) erprobt wurden.

Die aus diesem Forschungsprojekt entstehenden neuen Erkenntnisse sollen in die aktuelle Normungs- und Gremienarbeit eingebracht werden.

Material properties of geosynthetic liners removed from existing road tunnel constructions

In the course of retrofitting works geomembrane samples (GBR-P) were removed from German road tunnels. In the framework of the research project FE 15.461/2008/ERB „Material properties of geosynthetic liners removed from existing road tunnel constructions“ instructed by the Federal Highway Research Institute (BASt), the Federal Institute for Material Research and Testing (BAM) investigated removed GBR-P products received from five different road tunnels. The GBR-P products were installed for a period of 10 up to 23 years in the respective road tunnels.

In the first step, the material properties of the natural aged geomembranes were characterized using suitable methods, such as thermal analysis (DSC and standard OIT), density, tensile tests (mechanical properties), the thickness of the geomembrane, the stabilizer content (ICOT), the quality of the seam weld (shear and peel properties) and on a selected GBR-P products the burst strength and the water permeability was determined.

During the course of the project, mountain water samples were taken from the road tunnels and analyzed. The field parameter such as the pH value, the oxygen content as well as the sampling temperature of the mountain water was determined. In the laboratory, the determination of the conductivity and the elementary analysis by ICP-OES to determine the metal ion content (iron, copper, manganese etc) was performed.

In addition, further autoclave tests according to DIN EN ISO 13438 were performed to investigate the influence of different metal ions on the oxidative stability. For this purpose, a model medium was developed, which was tested in the autoclave test on an already examined product (product II from the R&D project FE 15.449/2007/ERB).

The results from the R&D project findings will be incorporated into the standards and committee work.

Inhalt

Abkürzungen	7	6.6	ICOT-Methode (Stabilisatorgehalt)	22
1 Einleitung	11	7	Untersuchungsmethoden zur beschleunigten oxidativen Alterung von KDB-Produkten	24
1.1 Veranlassung	11	7.1	Autoklaventest nach DIN EN ISO 13438	24
1.2 Ziele	12	7.2	Ofentest nach DIN EN 14575	26
2 Stand der Wissenschaft und Technik	12	8	Ergebnisse der Materialcharakterisierung	26
3 Bergwasseranalyse	13	8.1	Dicke der KDB und der geotextilen Schutzschichten	26
4 Probenmaterial	14	8.2	Dichte der KDB	28
4.1 Kunststoffdichtungsbahn (KDB)	14	8.3	Flächenbezogene Masse der ausgebauten KDB-Proben und der geotextilen Schutzschicht	29
4.2 Geotextile Schutzschicht	15	8.4	Thermische Eigenschaften der KDB	30
4.3 Rückstellmuster	15	8.4.1	DSC	30
5 Versuchsplanung/-durchführung	16	8.4.2	Standard-OIT	33
6 Untersuchungsmethoden	17	8.5	Mechanische Eigenschaften	33
6.1 Dicke der KDB und der geotextilen Schutzschicht	17	8.5.1	Eigenschaften der KDB-Fügenähte nach Ausbau (Schäl- und Schereigenschaften)	33
6.2 Dichte der KDB	17	8.5.2	Reißfestigkeit und -dehnung nach DIN EN ISO 527	34
6.3 Flächenbezogene Masse der KDB und der geotextilen Schutzschicht	17	8.5.3	Berstdruckfestigkeit nach DIN 61551	35
6.4 Thermische Eigenschaften der KDB	17	8.5.4	Wasserdurchlässigkeit	36
6.4.1 DSC	17	8.5.5	Schutzwirksamkeit der geotextilen Schutzschicht	37
6.4.2 Standard-OIT	18	8.6	Stabilisierungszustand der ausgebauten KDB-Produkte mittels ICOT-Methode (Initiated Cumene Oxidation Test)	38
6.5 Mechanische Eigenschaften der KDB	19	9	Ergebnisse zur Oxidationsbeständigkeit	39
6.5.1 Eigenschaften der Fügenaht	19	9.1	Autoklaventests nach DIN EN ISO 13438	39
6.5.2 Zugversuche an den ausgebauten KDB	19			
6.5.3 Berstdruckfestigkeit (Wölbungsdehnung im mehrachsigen Zugversuch)	20			
6.5.4 Wasserdurchlässigkeit	21			
6.5.5 Schutzwirksamkeit der geotextilen Schutzschicht	22			

9.1.1 Autoklaventest – Einfluss von Metallionen im Prüfmedium auf die Oxidationsbeständigkeit	39	12.9 Dokumentation der Materialschädigung während der Autoklavenlagerung (Material aus dem Staufertunnel/ QS _{west})	62
9.1.2 Autoklaventest an ausgebauten KDB-Proben	42	Literatur	63
9.2 Ofentest nach DIN EN 14575.	44		
10 Schlussfolgerungen	44		
10.1 Erkenntnisse aus der Materialcharakterisierung	45		
10.2 Erkenntnisse zur Oxidationsbeständigkeit.	45		
11 Empfehlungen	46		
11.1 Dokumentation und Identifikation	46		
11.2 Empfehlungen für die Überarbeitung der TL/TP KDB	47		
12 Dokumentationen	48		
12.1 Dokumentation des Ausbauzustandes der KDB-Proben	48		
12.2 Dokumentation des Ausbauzustandes der geotextilien Schutzschicht	49		
12.3 Dokumentation der Vorschädigungen im Material	50		
12.4 Dokumentation der Materialschädigung während der Autoklavenlagerung (10 ⁻³ mol/l Eisensulfat in Standardmedium bei pH 10).	52		
12.5 Dokumentation der Materialschädigung während der Autoklavenlagerung (10 ⁻³ mol/l Eisensulfat in Standardmedium bei pH 6,3)	53		
12.6 Dokumentation der Materialschädigung während der Autoklavenlagerung (10 ⁻³ mol/l Eisensulfat in Wasser bei pH 3,14)	56		
12.7 Dokumentation der Materialschädigung während der Autoklavenlagerung (10 ⁻³ mol/l Kupfersulfat in Standardmedium bei pH 7,1)	58		
12.8 Dokumentation der Materialschädigung während der Autoklavenlagerung (10 ⁻³ mol/l Mangansulfat in Wasser bei pH 9,8)	61		

Abkürzungen

A	Faktor/Konstante (Arrhenius)	Cr	Chemisches Zeichen für Chrom
A_F	Fläche	Cu	Chemisches Zeichen für Kupfer
A_0	Querschnitt des Ausgangszustandes einer Probe	d_O	Bahndicke der oberen KDB
A_1	Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten vor der Induktionszeit (ICOT)	d_U	Bahndicke der unteren KDB
A_2	End-Reaktionsgeschwindigkeitskonstante (ICOT)	d_{N1}, d_{N2}	Dicke der Naht N1 und N2
AO	Abkürzung für Stabilisator	D	Innendurchmesser des Klemmrings
α	Halbwinkel des Kreisbogens	DSC	Dynamic Scanning Calorimetry
AIBN	2,2'-Azobis (2-methylpropionitril)	DIN EN ISO 139	Normalklimate für die Probenvorbereitung und Prüfung
[AIBN]	Initiatorkonzentration	DIN EN ISO 463	Geometrische Produktspezifikationen – Längenmessgeräte – Konstruktionsmerkmale und messtechnische Merkmale für mechanische Messuhren
ATR-IR-Spektroskopie	Abgeschwächte Totalreflektion – Infrarotspektroskopie	DIN EN ISO 527-1	Bestimmung der Zugeigenschaften, Teil 1: Allgemeine Grundsätze
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung	DIN EN ISO 527-2	Bestimmung der Zugeigenschaften, Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen
b_{N1}, b_{N2}	Breite der Teilnähte	DIN EN ISO 527-3	Bestimmung der Zugeigenschaften, Teil 3: Prüfbedingungen für Folien und Tafeln
b_P	Breite des Prüfkanals	DIN EN 9863-1	Geokunststoffe – Bestimmung der Dicke unter festgelegten Drücken, Teil 1: Einzellagen
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen	DIN EN ISO 9864	Geokunststoffe – Prüfverfahren zur Bestimmung der flächenbezogenen Masse von Geotextilien und geotextilverwandten Produkten (2005)
BD	Bruchdehnung/ %	DIN EN ISO 1183-1	Kunststoffe – Verfahren zur Bestimmung der Dichte von nicht verschäumten Kunst-
B. i. N.	Bruch im Nahtbereich		
B. i. Nü.	Bruch im Nahtübergangsbereich		
BK	Bruchkraft/N		
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung		
$^{\circ}\text{C}$	Grad Celsius		
Ca	Chemisches Zeichen für Kalzium		
Co	Chemisches Zeichen für Cobalt		

	stoffen, Teil 1: Eintauchverfahren, Verfahren mit Flüssigkeitspyknometer und Titrationsverfahren (2004)	EAG-EDT	Empfehlungen zu Dichtungssystemen im Tunnelbau
DIN EN ISO 11357-1	Dynamische Differenz Thermoanalyse (DSC), Teil 1: Allgemeine Grundlagen	EN 12311-2	Abdichtungsbahnen – Bestimmung des Zug-Dehnverhaltens – Teil 2: Kunststoff- und Elastomerbahnen für Dachabdichtungen
DIN EN ISO 11357-6	Plastics – Differential Scanning Calorimetry, Part 6: Determination of Oxidation Induction Time	Gl.	Abkürzung für Gleichung
		ε	Dehnung
		$\varepsilon_{\text{Ö}}$	Örtliche Dehnung
DIN EN ISO 12316-2	Abdichtungsbahnen – Bestimmung des Schälwiderstandes der Fügenähte, Teil 2: Kunststoff- und Elastomerbahnen für Dachabdichtungen	ε_{M}	Zur Zugfestigkeit σ_{M} dazugehörige Dehnung
		$\varepsilon_{\text{M, P}}$	Dehnung einer gealterten Probe
		$\varepsilon_{\text{M, K}}$	Dehnung der Kontrollprobe
		Fe	Chemische Zeichen für Eisen
DIN EN ISO 12317-2	Abdichtungsbahnen – Bestimmung des Scherwiderstandes der Fügenähte, Teil 2: Kunststoff- und Elastomerbahnen für Dachabdichtungen	F_{max}	Maximale Zugkraft
		$F_{\text{max, P}}$	Maximale Zugkraft einer gealterten Probe
		$F_{\text{max, K}}$	Maximale Zugkraft der Kontrollprobe
DIN EN ISO 13438	Geotextilien und geotextilverwandte Produkte – Auswahlprüfverfahren zur Bestimmung der Oxidationsbeständigkeit	FPP	Flexibles Polypropylen
		g/cm^3	Einheit der Dichte
		h	Abkürzung für Stunden
		HAS	Sterisch gehinderte Amine
DIN EN 13491	Geosynthetische Dichtungsbahnen – Eigenschaften, die für die Anwendung beim Bau von Tunneln und Tiefbauwerken erforderlich sind	Hg	Chemisches Zeichen für Quecksilber
		ICOT	Initiated Cumene Oxidation Test
		Irganox 1010	Stabilisator für Oxidationsbeständigkeit
DIN EN 14575	Geosynthetische Dichtungsbahnen – Orientierungsprüfung zur Bestimmung der Oxidationsbeständigkeit	Irgafos 168	Stabilisator für Oxidationsbeständigkeit
		K	Kelvin (Einheit Temperatur)
DIN 16726	Kunststoffbahnen-Prüfungen	K	Kalium
DIN 53455	Prüfung von Kunststoffen – Zugeigenschaften	KDB	Kunststoffdichtungsbahn
DIN 61551	Geokunststoffe Bestimmung der Berstdruckfestigkeit	L_0	Ausgangslänge
		l_{d}	Länge deformiert
ΔL	Längenänderung	l_{u}	Länge undeformiert
$\Delta(\text{O}_2)$	Sauerstoffverbrauch	LE	Klemmabstände (Zugprüfung)
E_{A}	Aktivierungsenergie	[InH]	Stabilisatorkonzentration

M	Mol (Stoffmengenangabe)	R	Universelle Gaskonstante [8,314J/K* mol]
MW	Mittelwert	r	Radius
wt%	Masseprozent	Rü	Rückstellmuster
m	Masse	ρ_A	Flächenbezogene Masse
mm	Millimeter	ρ_{IL}	Flüssigkeitsdichte
min	Minuten	ρ_S	Feststoffdichte
Mg	Chemisches Zeichen für Magnesium	R_{BK}	Restbruchkraft/%
Mn	Chemisches Zeichen für Mangan	R_{BD}	Restbruchdehnung/%
Mo	Chemisches Zeichen für Molybdän	[RH]	Cumolkonzentration
n. b.	nicht bestimmt	ShPh	Sterisch gehinderte Phenole
N ₂	Chemische Zeichen für Stickstoff	σ	Spannung
Na	Chemisches Zeichen für Natrium	σ_B	Bruchspannung
NaHCO ₃	Natriumhydrogencarbonat	σ_M	Zugspannung = Zugfestigkeit
NaOH	Natriumhydroxid	σ_Y	Streckspannung
Ni	Chemisches Zeichen für Nickel	T	Temperatur [°C bzw. K]
O ₂	Sauerstoff	Tg	Glasübergangstemperatur
OIT	Oxidation Induction Time	T ₀	Referenzbedingung (T = 25 °C)
p	Druck [bar] oder [kPa]	t	Reaktionszeit (ICOT)
P ₀	Referenzbedingung (p = 0,21 bar)	t ₁	Zeitpunkt des Erreichens der Messtemperatur (Std.-OIT)
P _d	Chemisches Zeichen für Palladium	t ₂	Zeitpunkt des Gasstromwechsels von Stickstoff auf Sauerstoff (Std.-OIT)
PE	Polyethylen	τ	Beanspruchungsdauer bis zum definierten Schädigungsgrad
PE-HD	Polyethylen hoher Dichte mit schwach verzweigten Ketten	τ_{ICOT}	Induktionszeit
PE-LD	Polyethylen mit geringer Dichte und stark verzweigten Ketten	TL/TP-ING, Teil 5, Abschnitt 5	Technische Lieferbedingungen und Technische Prüfvorschriften für Ingenieurbauten
PE-LLD	Lineares Polyethylen mit geringer Dichte und kurzen Verzweigungen		
PE-MD	Polyethylen mittlerer Dichte		
pH	Negativer dekadischer Logarithmus der [H ⁺]-Konzentration	TL/TP KDB	Technische Lieferbedingungen und Technische Prüfvorschriften für KDB und zugehörige Profilbänder
PP	Polypropylen		
PTFE	Polytetrafluorethen (Teflon)	TL/TP SD	Technische Lieferbedingungen und Technische Prüfvorschriften für Schutz- und Dränschichten aus Geokunststoffen
PVC	Polyvinylchlorid		
QS	Querschlag		

ü ₁ , ü ₂	Überlappung vorn und hinter der Fügenaht
V	Chemisches Zeichen für Vanadium
v	Prüfgeschwindigkeit mm/min
Zn	Chemisches Zeichen für Zink
ZTV-ING	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten

1 Einleitung

1.1 Veranlassung

Kunststoffdichtungsbahnen (KDB) werden in Abdichtungssystemen in Tunnelbauwerken eingesetzt. Für die Anforderungen an diese KDB-Produkte gibt es zum jetzigen Zeitpunkt grundlegende Richtlinien (EOTA Guidelines [1]) und Empfehlungen (EAG-EDT [2]), die eine Funktionsfähigkeit von mindestens 100 Jahren fordern. Schon seit Jahrzehnten werden KDB in Abdichtungssystemen gegen Berg-, Sicker- oder Druckwasser in Tunnelbauwerken eingesetzt. Deutschlandweit werden im Tunnelbau zur Abdichtung überwiegend KDB-Produkte auf Basis von Polyethylen (PE) und in kleinerem Umfang Polyvinylchlorid (PVC) eingesetzt. Der Aufbau eines Abdichtungssystems im Tunnelbauwerk ist schematisch in Bild 1 dargestellt.

Für KDB-Produkte auf Basis von Polyolefinen ist die primäre Ursache der Alterung die Oxidation. Entsprechende Prüfverfahren und Anforderungen sind daher auf die Untersuchung der Oxidationsstabilität ausgerichtet. Als Prüfverfahren zur Beschleunigung des oxidativen Abbaus werden unter anderen der Ofentest nach DIN EN 14575 und der Autoklaventest nach DIN EN ISO 13438 eingesetzt.

In einem bereits abgeschlossenen Forschungsvorhaben FE 15.449/2007/ERB [3] wurden acht marktübliche KDB-Produkte von vier Herstellern mit Autoklaventests in Anlehnung an DIN EN ISO 13438 [4] untersucht. Zum Vergleich wurden an zwei Produkten auch Ofenlagerungen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten deutlich um einen Faktor von 5 bis 6 verkürzte Prüfdauern.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens FE 15.461/2008/ERB „Materialeigenschaften von Kunststoffdichtungsbahnen bestehender Straßentunnel“ stand Probenmaterial zur Verfügung, das unter realen Bedingungen (Einbauphase, Funktionsphase) beansprucht wurde. Das Alter der ausgebauten KDB-Proben ist auf 10 bis 23 Jahre datiert. Das Probenmaterial für dieses Vorhaben wurde aus fünf Straßentunneln (Tunnel Füssen, Wattkopftunnel, Saukopftunnel, Staufertunnel und Ditschhardtunnel) während Nachrüstungsarbeiten für Rettungstollen entnommen und von der BAST zur Charakterisierung der Materialeigenschaften zur Verfügung gestellt.

Hierfür werden die Dicke der KDB (Verhältnis Grundbahn zur Signalschicht), die Dichte, die ther-

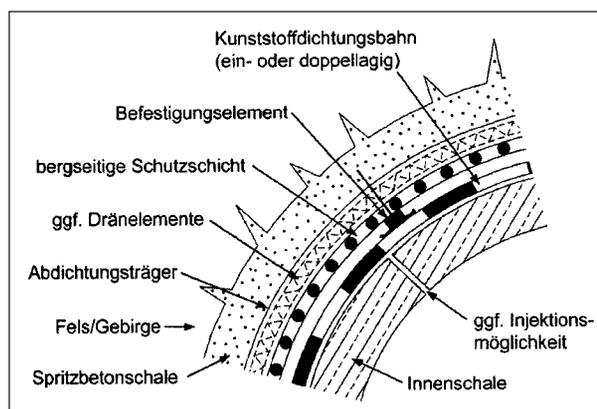


Bild 1: Darstellung des Aufbaus einer Tunnelabdichtung mit KDB bei geschlossener Bauweise (Quelle: EAG-EGT)

mischen Eigenschaften (Schmelz- und Kristallisationsverhalten), die Oxidationsstabilität (OIT-Wert) sowie die mechanischen Eigenschaften der KDB (Zugprüfung), die Berstdruckfestigkeit, die Wasserdurchlässigkeit und die Schäl- und Schereigenschaften der Fügenaht bestimmt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sollen zeigen, ob die ausgebauten Produkte im jetzigen Zustand den Anforderungen für KDB-Produkte nach ZTV-ING entsprechen.

Die in Tabelle 1 zusammengefassten Prüfmethoden und -normen wurden aus den Anforderungstabellen der TL/TP KDB für Kunststoffdichtungsbahnen und TL/TP SD für geotextile Schutzschichten ausgewählt, anhand derer die Materialeigenschaften der ausgebauten Produkte überprüft werden sollten.

Während des Vorhabens sollen alle verfügbaren Informationen über die KDB-Produkte von Seiten des Bauherrn und der Herstellerfirmen zusammengetragen werden. Falls vorhanden, werden Rückstellmuster von den Herstellern der KDB-Produkte angefordert.

Die Betrachtung der Umgebungsbedingungen unter straßentunnelspezifischen Anforderungen soll eine weitere Fragestellung im Vorhaben sein. Im Vordergrund stand die Untersuchung des Bergwassers. Die Entnahme und Analyse der Bergwasserproben wurden durch den Auftraggeber sichergestellt. Auf Grundlage der Analyseergebnisse wurde dann das Prüfmedium des Autoklavenversuchs mit Metallionen modifiziert. Mit Hilfe dieser Untersuchungen wurden die Frage nach dem Einfluss von Metallionen auf die oxidative Beständigkeit von KDB-Produkten eingehender untersucht. Für diese ersten Untersuchungen sind drei Metallsalze ausgewählt worden, die auch durch die Elementarana-

Produkt	Methode	Norm	Forderung in TL/TP
Geotextile Schutzschicht	Flächenbezogene Masse	DIN EN ISO 9864	TL/TP SD
	Dicke	DIN EN ISO 9863-1	TL/TP SD
KDB	Gesamtdicke	DIN EN 1849-2	TL/TP KDB
	Flächenbezogene Masse	DIN EN ISO 9864	nein
	Dichte	DIN EN ISO 1183-1	TL/TP KDB
	DSC	DIN EN ISO 11357	TL/TP KDB
	ATR-IR- Spektroskopie		nein
	Oxidationsbeständigkeit a) Ofen b) Autoklav*	a) DIN EN 14575 b) DIN EN ISO 13438	TL/TP KDB
	ICOT		nein
	Reißfestigkeit und -dehnung	DIN EN ISO 527	TL/TP KDB
	Berstdruckfestigkeit	DIN EN 14151	TL/TP KDB
	Wasserdurchlässigkeit	DIN EN 14150	nein
KDB-Fügenreiß	Scherversuch	DIN EN 12317-2	TL/TP KDB
	Schälversuch	DIN EN 12316-2	TL/TP KDB

* mit Standardmedium und mit Metallionen modifiziertem Medium

Tab. 1: Angewendete Prüfmethode und -normen

lyse des Bergwassermediums identifiziert wurden. Hierbei handelt es sich um Eisen(II)-, Kupfer(II)- und Mangan(II)-sulfat.

1.2 Ziele

Die wesentlichen Schwerpunkte des Forschungsvorhabens sind hier kurz zusammengefasst:

- Dokumentation des Ausbauszustandes der vorliegenden KDB-Produkte aus den fünf Straßentunneln,
- Materialcharakterisierung der ausgebauten KDB-Produkte und der vorhandenen Rückstellmuster (Prüfmethode, Tabelle 1),
- Auswertung der Analyseergebnisse der Bergwasserproben hinsichtlich der Metallgehalte von Eisen, Kupfer und Mangan und Zusammenstellung der vor Ort gemessenen Parameter wie der pH-Werte und der Sauerstoffgehalt des Bergwassers,
- Autoklaventest nach DIN EN ISO 13438 an ausgebauten KDB-Produkten und vergleichend dazu Ofenlagerungen nach DIN EN 14575,
- Autoklaventests in Anlehnung an DIN EN ISO 13438 mit modifiziertem (Metallionen) Prüfme-

dium an einem bekannten Produkt zur Untersuchung des Einflusses von Metallsalzen auf den oxidativen Alterungsprozess der KDB.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Kunststoffdichtungsbahnen werden im Tunnelbau schon seit Anfang der 60er Jahre als Barriersystem gegen Bergwasser sowohl in geschlossener als auch in offener Bauweise verwendet. Im Laufe der Zeit hat sich natürlich die Materialzusammensetzung im Hinblick auf die verwendeten Polymere und Additive verändert. In den 70er und 80er Jahren wurden vorrangig Dichtungsbahnen auf Basis von Polyvinylchlorid (PVC) und Ethylen-Copolymerisat-Bitumen (ECB) eingesetzt. Seit Anfang der 90er Jahre sind Dichtungsbahnen auf Basis von Polyolefinen (PE-LD oder PE-VLD) im Einsatz.

Die Auswahl der geeigneten Dichtungsbahn ist von unterschiedlichen Faktoren abhängig und dazu zählen z. B. die Geologie der Umgebung, die Hydrologie und zum Teil auch das Tunnelbauverfahren. Der zu erwartende Wasserdruck und die che-

mische Zusammensetzung des Bergwassers und des anstehenden Bodens sind bei der richtigen Auswahl des einzusetzenden Produkts von großer Bedeutung. Bei hohen Wasserdrücken werden Dichtungsbahnen mit einer Dicke von bis zu 3,00 mm eingesetzt.

Die Auswahl der geeigneten Kunststoffdichtungsbahn ist vom Anwendungsgebiet abhängig. HDPE-Dichtungsbahnen sind meist aus einem MDPE-Rohstoff aufgebaut und werden durch Zugabe von Ruß auf eine Materialdicke von HDPE gebracht. Eine typische HDPE-Dichtungsbahn besteht aus ca. 96 bis 97 % PE-Rohstoff, 2 bis 3 % Ruß, 0,5 bis 1 % Stabilisatoren (z. B. IRGANOX 1010, IRGAFOS 168).

In Deutschland werden heute im Tunnelbau zur Abdichtung überwiegend flexible KDB-Produkte auf Polyolefinbasis, aber auch PVC-Kunststoffdichtungsbahnen eingesetzt. Zur Optimierung ihrer Produkteigenschaften und zur Erfüllung der Anforderungen im Tunnelbau können unterschiedliche Werkstoffkonzepte eingesetzt werden. Als Rohstoffe sind in erster Linie lineares Polyethylen niedriger Dichte (Linear Low Density Polyethylene – LLDPE), PE-Copolymere, flexibles PP (FPP) und Polymermischungen (Blends) zu nennen.

Bei der Breite des Spektrums unterschiedlicher Basispolymere, Copolymere und Polymerblends, die infrage kommen und als „Polyolefine“ bezeichnet werden, ist die gewünschte Anwendung einheitlicher Prüfverfahren und Bewertungskriterien zur Einschätzung der Langzeitbeständigkeit keinesfalls selbstverständlich, zumal die Beständigkeit wesentlich von zugesetzten Additiven (z. B. Stabilisatoren, Füllstoffe, Pigmente, Gleitmittel usw.) bestimmt wird.

Generell sind die eingesetzten Rohstoffe (Polymere) für sich selbst aufgrund ihrer Oxidationsemp-

findlichkeit in Anwesenheit von Sauerstoff nicht ausreichend langzeitbeständig. Die Beständigkeit wird durch Zugabe geeigneter Additive (Stabilisatoren bzw. Antioxidantien) erhöht, um den anwendungsbezogenen Anforderungen gerecht zu werden. Die Antioxidantien greifen hemmend in den Oxidationsprozess ein und verlängern dadurch die Gebrauchsfähigkeit des Polymerwerkstoffs bzw. des entsprechenden Produkts. Im Laufe der Zeit werden diese Antioxidantien durch chemische Reaktionen mit Sauerstoff (Oxidation) verbraucht oder ihre Konzentration im Produkt durch andere physikalische Vorgänge, wie Extraktion, Migration oder Diffusion, verringert.

3 Bergwasseranalyse

Die Entnahme und Analyse der Bergwasserproben wurden direkt vom Auftraggeber (BAST) durchgeführt und die Ergebnisse an den Auftragnehmer (BAM) übermittelt. In vier der fünf Straßentunnel konnten bis zum jetzigen Zeitpunkt mindestens eine, häufig aber mehrere Bergwasserproben zu unterschiedlichen Jahreszeiten entnommen werden. Die für dieses Projekt wichtigsten Parameter sind in den Tabellen 2 und 3 zusammengefasst. Bei der Bergwasserentnahme vor Ort wurden folgende Parameter bestimmt:

- Entnahmetemperatur des Wassers/°C,
- pH-Wert,
- Sauerstoffgehalt/mg/l,
- Leitfähigkeit/(µS/cm).

Die gemessenen pH-Werte liegen in einem Bereich von 7,5 bis 9, d. h., die Bergwässer sind vom pH-Wert neutral bis schwach basisch. Die pH-Werte sind aber deutlich niedriger als bei Straßentunneln,

Nr.	Tunnel	pH-Wert	O ₂ -Gehalt/mg/l	T/°C	Leitfähigkeit/µS/cm
1	Füssen	8,3	-	8,9	320-430
2	Wattkopftunnel	8-9	7-10	10-17	350-540
3	Saukopftunnel	7,5-9	5,5-8	15-20	330-530
4	Staufertunnel	8,15	8	9,6	270
5	Ditschhardtunnel*	-	-	-	-

* kein Bergwasser vorhanden

Tab. 2: Zusammenfassung der vor Ort gemessenen Parameter pH-Wert, Temperatur, Sauerstoffgehalt und Leitfähigkeit

Nr.	Tunnel	Fe-Gehalt/mg/l	Cu-Gehalt/mg/l	Mn-Gehalt/mg/l
1	Tunnel Füssen	0,01-0,03	0,001-0,002	-
2	Wattkopftunnel	0,005-2,37	0,0054-0,028	0,001-0,0025
3	Saukopftunnel	0,005-0,01	0,002-0,01	0,001-0,0098
4	Staufertunnel	< 0,005	< 0,001	< 0,001
5	Ditschhardtunnel*	-	-	-

* kein Bergwasser vorhanden

Tab. 3: Metallionengehalt im Bergwasser (Elementaranalyse mittels ICP OES); Fe = Eisen; Cr = Chrom; Mn = Mangan

deren Bauphase gerade abgeschlossen wurde. Dies geht aus den Rechercheergebnissen hervor, die im Vorhaben FE 15.499/2007/ERB [3] ausgewertet wurden. In dem Vorhaben wurden Analyseergebnisse der Bergwässer aus fünf Straßentunneln, deren Proben aus den Revisionsschächten kurz nach Fertigstellung des Bauwerkes entnommen wurden, ausgewertet. Die pH-Werte lagen in einem Bereich von 7,5 bis 12,9, also im stark basischen Bereich, aufgrund der eluierten Bestandteile aus dem Spritzbeton.

Die Elementaranalytik erfolgte zeitnah im Labor mittels ICP-OES, und der Gehalt an Metallen wird in mg/l angegeben. Folgende Elemente wurden mit dieser Methode bestimmt:

- Alkalimetalle (Na, K),
- Erdalkalimetalle (Mg, Ca),
- Übergangsmetalle (V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Mo, Pd, Hg).

Aus diesem Spektrum von Ergebnissen wurden für eine nähere Untersuchung des Einflusses von Metallionen auf die oxidative Beständigkeit der KDB-Produkte Eisen, Chrom und Mangan ausgewählt, und deren Gehalt ist in Tabelle 3 zusammengefasst.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurde eine Metallionenkonzentration von 10^{-3} mol/l für die ersten Autoklavenversuche ausgewählt. Dieser Wert spiegelt den maximalen Gehalt an Eisen (entspricht ca. 2,3 mg/l) im Bergwasser wider.

4 Probenmaterial

4.1 Kunststoffdichtungsbahn (KDB)

Für das Forschungsprojekt wurden von Seiten des Auftraggebers Kunststoffdichtungsbahnproben auf

Nr.	Tunnel	Einbau KDB	Ausbau KDB	Alter/ Jahr
1	Tunnel Füssen	1998	2008	10
2	Wattkopftunnel	1993	2009	16
3	Saukopftunnel	1987-89	2010	23
4	Staufertunnel	1993	2010	17
5	Ditschhardtunnel	1995	2010	15
6	Engelbergbasistunnel*	1997	2012	15

* Zusätzliches KDB-Probenmaterial

Tab. 4: Einbau- und Ausbaudaten der KDB

Polyolefinbasis aus fünf verschiedenen Straßentunneln (Tabelle 4), zum Teil mit Fügenahtbereichen, zur Verfügung gestellt. Die Entnahme der Proben erfolgte durch den Auftraggeber. Die BAM war nicht an der Probenentnahme vor Ort beteiligt, und es lag auch kein Entnahmeprotokoll bzw. eine fotografische Dokumentation vor. Die Position der entnommenen KDB-Proben in Maschinenquerrichtung der Dichtungsbahnen wurde nicht bei allen Probenstücken dokumentiert. Über die Materialzusammensetzung und den Gehalt an Stabilisatoren stehen uns keine Informationen zur Verfügung. Die Dicke der Dichtungsbahnen variiert zwischen 1,80 und 2,93 mm.

Die ausgebauten KDB-Proben aus den Straßentunneln Füssen und Ditschhard sind von einem Hersteller. Nach den vorliegenden Produktdatenblättern handelt es sich um das Produkt MP 910-20 B2 und MP 910-30 B2 der Firma Sarnafil AG.

Das Probenmaterial aus dem Engelbergbasistunnel wurde im Laufe des Vorhabens entnommen. Dieses wurde ebenfalls von der Firma Sarnafil AG hergestellt.

Im Wattkopf-, Saukopf- und Staufertunnel wurden Produkte der Firma HT Troplast AG und HÜLS

Nr.	Entnahmeort	Grundbahn	Signalschicht	
			Farbe	Struktur
1	QS 1	Schwarz	Beige	nein
2	QS 5	Schwarz	Hellgelb	ja
2a	QS 6	Schwarz	Hellgelb	ja
3	QS 3	Schwarz	Hellbeige	ja
3a	QS 5	Schwarz	Hellbeige	ja
4	QS _{west}	Schwarz	Cremweiß	ja
4a	QS _{ost}	Schwarz	Cremweiß	ja
5	QS	Schwarz	Beige	nein
6	QS	Schwarz	Beige	nein

Tab. 5: Produktinformationen der KDB-Produkte

Troisdorf AG eingebaut. Hierbei handelt es sich um eine 2 mm dicke Carbofol-CHD-Tunnelbahn. Für das Produkt aus dem Staufertunnel liegt kein Produktdatenblatt vor. Informationen zum Entnahmeort und zu den ausgebauten KDB-Proben sind in Tabelle 4 und 5 zusammengefasst.

In Bild 30 in Kapitel 12.1 sind Probenstücke der ausgebauten KDB abgebildet. Anhand der Fotos sind unterschiedliche Schädigungsbilder zu erkennen, deren Ursprung nicht genau geklärt werden kann. Hierbei könnte es sich um Verformungen (Bild 32, Kapitel 12.3) der KDB handeln, die schon während der Bauphase entstanden sind. Diese Verformungen sind unterschiedlich stark ausgeprägt. Die Korrelation zwischen flächenbezogener Masse und Dicke der geotextilen Schutzschicht und der Ausprägung der Verformungen wurde dahingehend untersucht.

Die Anforderungen an die flächenbezogene Masse der geotextilen Schutzschichten wurden aufgrund der Ergebnisse der Forschungsvorhaben [5, 6] auf Nennmassen von 1.000 g/m² erhöht. Die entnommenen Proben mit unterschiedlichen flächenbezogenen Massen erlauben eine Verifizierung dieser Erhöhung an aus dem Bauwerk entnommenen Proben. Daher wurden Bestimmungen der unterschiedlichen flächenbezogenen Massen und der Dicken der geotextilen Schutzschichten in das Untersuchungsprogramm aufgenommen. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, den Einfluss der Masse der geotextilen Schutzschicht auf ihre Wirksamkeit mit Hilfe des Schädigungsbilds der aus den Bauwerken entnommenen KDB-Proben zu bewerten. Hierzu sollen die Verformungen an einem KDB-Produkt vermessen werden.

Tunnel	Entnahmeort	Farbe
Wattkopftunnel	QS 5	Hellbraun
Saukopftunnel	QS 1	Grau
Saukopftunnel	QS 7	Hellbraun
Staufertunnel	QS _{west}	Hellgrau
Staufertunnel	QS _{ost}	Dunkelgrau

Tab. 6: Zuordnung der ausgebauten geotextilen Schutzschicht

Die Proben aus dem Saukopftunnel weisen hierbei die höchste Schädigung auf. Die Proben aus dem Tunnel Füssen, dem Tunnel Ditschhard und dem Staufertunnel zeigen deutlich weniger beschädigte Bereiche auf der KDB-Oberfläche (Bild 32).

4.2 Geotextile Schutzschicht

Zusätzlich zu den KDB-Proben wurden auch geotextile Schutzschichten aus dem Wattkopf-, Saukopf- und Staufertunnel entnommen (Tabelle 6). Der Ausbauzustand dieser Proben war sehr unterschiedlich und ist fotografisch in Bild 2 und Kapitel 12.2, Bild 31 dokumentiert.

Bei erster visueller Betrachtung fällt auf, dass es sich bei allen Proben wahrscheinlich um mechanisch verfestigte Vliesstoffe handelt, die aus unterschiedlich farbigen (multicolor) Fasern aufgebaut sind. Des Weiteren ist auffällig, dass die Proben aus dem Staufertunnel sich äußerlich unterscheiden, d. h. unterschiedliche Produkte wurden eingebaut.

Der Polymerrohstoff und der Stabilisierungsgrad der geotextilen Schutzschicht waren nicht bekannt und waren auch nicht im Fokus des Vorhabens.

4.3 Rückstellmuster

Für dieses Forschungsvorhaben wurden von der Firma Naue GmbH & Co. KG (Rechtsnachfolger der Firmen HAT Troplast AG und HÜLS Troisdorf AG) zwei Rückstellmuster aus dem Jahr 1993 und ein Rückstellmuster aus dem Jahr 1987 zur Verfügung gestellt. Die Rückstellmuster entsprechen nach den Angaben des Herstellers den KDB-Proben aus den im Wattkopf- und Saukopftunnel eingebauten Kunststoffdichtungsbahnen.

Eine genaue Zuordnung der Rückstellmuster zu den ausgebauten KDB-Proben ist nicht möglich, da für eine eindeutige Zuordnung die Rollennummern



Bild 2: Fotografische Darstellung der ausgebauten geotextilen Schutzschichten

Nr.	Rollenummer/Hersteller	Grundbahn	Signalschicht	
			Farbe	Struktur
Rü1	896213/Naue	Schwarz	Hellbeige	ja
Rü2	814962/Naue	Schwarz	Hellbeige	ja
Rü3	131632/Naue	Schwarz	Hellbeige	ja

Tab. 7: Produktinformationen der Rückstellmuster

der eingebauten Produkte vorliegen müssen. In der Tabelle 7 sind die zur Verfügung stehenden Rückstellmuster aufgelistet.

5 Versuchsplanung/ -durchführung

An jeder ausgebauten KDB-Probe wird zunächst eine Grundcharakterisierung der relevanten Materialeigenschaften durchgeführt. Die Grundcharakterisierung beinhaltet die Bestimmung der Dicke der KDB, der Dichte, des Stabilisatorgehalts (ICOT), der thermischen Eigenschaften (DSC, OIT), der

mechanischen Eigenschaften (Zugprüfung) und der flächenbezogenen Masse nach dem Ausbau. Die hierbei gewonnenen Daten dienen zur Identifizierung der KDB-Proben. Eine Übersicht der geplanten Prüfungen zur Materialcharakterisierung ist in Tabelle 1 gegeben. An ausgesuchten Proben werden dann Untersuchungen zur oxidativen Beständigkeit mittels Autoklaventest in Anlehnung an DIN EN ISO 13438 und Ofentest nach DIN EN ISO 14575 durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sollen zeigen, ob die ausgebauten KDB-Proben den heutigen Anforderungen der TL/TP KDB entsprechen.

Einen großen Teil des Projekts nahmen die Untersuchungen zum Einfluss von Metallionen auf den oxidativen Abbau ein. Hierzu wurden zahlreiche Lagerungen im Autoklaven mit modifiziertem Prüfmedium an einem bereits untersuchten Material (Kontrollprobe: Produkt II; FE 15.449/2007/ERB) durchgeführt.

6 Untersuchungsmethoden

6.1 Dicke der KDB und der geotextilen Schutzschicht

Die Dicke der KDB-Proben wurde mit einem Dickenmessgerät/Schnelltaster mit einer Genauigkeit von 0,01 mm nach DIN EN ISO 463 [7] bestimmt. Für die Bestimmung eines Durchschnittswertes wurden 10 Messungen verteilt über die gesamte Probenfläche durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 10 angegeben. Da die KDB-Proben unterschiedlich aufgebaut sind, wurde nicht nur die Gesamtdicke der KDB bestimmt, sondern auch das Verhältnis der Dicke der Signalschicht zur Grundbahn. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 11 und 12 in Kapitel 8.1 dokumentiert.

Die Dickenbestimmung der geotextilen Schutzschicht unter den geforderten Normalspannungen wurde nach DIN EN 9863-1 [8] durchgeführt. Für diese Prüfung stand uns Probenmaterial aus dem Wattkopf-, Saukopf- und Staufertunnel zur Verfügung. Je nach Zustand der entnommenen Proben wurden zwischen 2 und 5 Prüfkörper untersucht. Die Ergebnisse der Dickenbestimmung sind in Kapitel 8.1, Tabelle 12 zusammengefasst.

6.2 Dichte der KDB

Die Dichtebestimmung erfolgte mit einer Sartorius-MC410S-OCE-Analysenwaage mit Dichteset Sartorius YDK01 nach dem Eintauchverfahren nach DIN EN ISO 1183-1 [9].

Zuerst wird die Masse des Probekörpers an der Luft bestimmt. Hierfür wird der Probekörper an einer speziellen Vorrichtung in der Waage aufgehängt. Anschließend wird der aufgehängte Probekörper in die Eintauchflüssigkeit (n-Heptan, Dichte ρ_{IL} : 0,68 g/cm³) eingetaucht. Die Masse des eingetauchten Probekörpers wird mit einer Genauigkeit von 0,1 mg gemessen. Die Berechnung der Dichte ρ_S des Probekörpers erfolgt nach folgender Gleichung:

$$\rho_S = \frac{m_{S,A} \cdot \rho_{IL}}{m_{S,A} - m_{S,IL}} \quad (\text{Gl. 1})$$

Dabei sind ρ_{IL} die Dichte der Eintauchflüssigkeit (g/cm³), $m_{S,A}$ die scheinbare Masse der Probekörper an der Luft (g) und $m_{S,IL}$ die scheinbare Masse der Probekörper in der Eintauchflüs-

	LD-PE	LLD-PE	HD-PE
Dichte/(g/cm ³)	0,915-0,935	0,87-0,94	0,94-0,97

Tab. 8: Materialdichten von PE-Typen

sigkeit (g). Für typische PE-Modifikationen werden folgende Feststoffdichten angegeben (Tabelle 8).

Die Ergebnisse sind in Tabelle 13 im Kapitel 8.2 zusammengestellt.

6.3 Flächenbezogene Masse der KDB und der geotextilen Schutzschicht

Die Bestimmung der flächenbezogenen Masse der KDB-Proben erfolgte in Anlehnung an DIN EN ISO 9864 [10]. Nach dieser Norm sind zehn Prüfkörper mit einer Nenngröße von 100 cm² (10 x 10 cm) herzustellen. Aufgrund des begrenzten Probenmaterials wurden nur fünf Prüfkörper hergestellt. Anschließend wurde die Masse der Proben bestimmt und an drei Messpunkten die Länge und Breite des Prüfkörpers gemessen. Die flächenbezogene Masse ρ_A der Prüfkörper in g/m² wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$\rho_A = \frac{m \cdot 10000}{A_F} \quad (\text{Gl. 2})$$

Dabei sind m die Masse der Probenkörper in g und A die Fläche der Probenkörper in cm². Die mittlere flächenbezogene Masse wird in g je m² angegeben.

Die Bestimmung der flächenbezogenen Masse der geotextilen Schutzschichten erfolgte in Anlehnung an DIN EN 9864 an kreisrunden Prüfkörpern mit einem Durchmesser von 150 mm, d. h. entspricht einer Fläche von 176,7 cm². Die Zahl der Prüfkörper richtet sich nach der verfügbaren unbeschädigten Fläche. Vor der Bestimmung der flächenbezogenen Masse wurden die Prüfkörper gereinigt.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 14 für die KDB-Proben und in Tabelle 15 für die geotextilen Schutzschichten (Kapitel 8.3) zusammengefasst.

6.4 Thermische Eigenschaften der KDB

6.4.1 DSC

Die thermische Analyse (DSC: Differential Scanning Calorimetry/Dynamische Differenz-Kalorime-

trie) wurde zur Materialcharakterisierung und Identifikation von Materialveränderungen bzw. Übergangstemperaturen (z. B. für Kristallisation und Schmelzen) eingesetzt. Die Messungen wurden mit einer Perkin-Elmer-DSC nach DIN EN ISO 11357-1 [11] durchgeführt.

Bei den DSC-Untersuchungen wird ein Temperaturbereich von -100 °C bis $+200\text{ °C}$ mit einer Heizrate von 10 K/min unter N_2 -Strom (Gasfluss: 50 ml/min) abgescannt und die auftretenden Materialveränderungen/-umwandlungen, wie Schmelz- bzw. Kristallisationsvorgänge, detektiert. Die maximale Materialeinwaage beträgt ca. 8 bis 10 mg . Die Materialien werden in einem geschlossenen Aluminium-Tiegel mit gelochtem Deckel geprüft.

Es werden jeweils eine 1. Aufheizkurve, eine Abkühlkurve sowie eine 2. Aufheizkurve aufgezeichnet.

In Bild 3 ist ein Beispiel für ein Temperaturprogramm schematisch dargestellt. Hier werden jeweils eine 1. Aufheizkurve (I), eine Abkühlkurve (II) sowie eine 2. Aufheizkurve (III) aufgenommen. Beim ersten Aufheizen wird die thermische Vorgeschichte des Produktes sichtbar, die in der Regel vorwiegend aus dem Herstellungsprozess resultiert.

Für verschiedene Polyethylentypen findet man in der Literatur folgende typische Bereiche der Schmelzpeak-Maxima: für PE-LD von 100 bis 110 °C , für PE-LLD von 115 bis 125 °C und für PE-HD von 125 bis 135 °C .

Die beiden bei höheren Temperaturen detektierten Peaks sind wahrscheinlich dem Schmelzen (Aufheizkurve) bzw. Kristallisieren (Abkühlkurve) zuzuordnen. Die bei einigen Materialien deutliche Trennung beider Peaks lässt auf zwei Komponenten schlie-

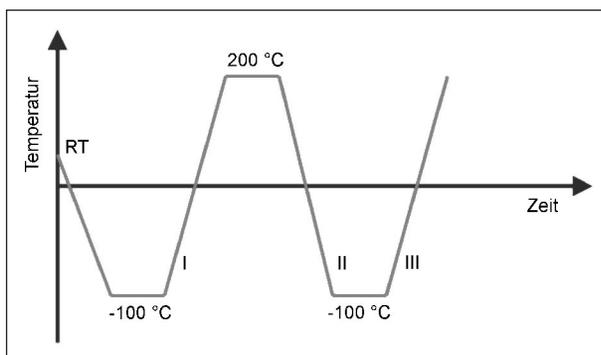


Bild 3: Temperaturprogramm zur Polymerwerkstoffcharakterisierung; I 1. Aufheizen: thermische Vorgeschichte/Herstellungsprozess; II Abkühlen: Erzeugung einer identischen Vorgeschichte; III 2. Aufheizen: Bestimmung der Produkteigenschaften

ßen (Blend oder Copolymer), die sich in ihrem Kristallisationsverhalten deutlich unterscheiden. Die weniger deutlich getrennten Peaks könnten auch auf Unterschiede im Molekulargewicht (multimodale Molmassenverteilung) oder in der Molekülarchitektur (Verzweigungsdichte, Länge der kristallisationsfähigen CH_2 -Segmente) zurückzuführen sein.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 16 im Kapitel 8.4.1 beschrieben.

6.4.2 Standard-OIT

Die Bestimmung der Oxidations-Induktions-Zeit (engl. Oxidation-Induction-Time (OIT)) zur Charakterisierung des Stabilisierungszustands wurde in Anlehnung an die DIN EN ISO 11357-6 [12] (Standard-OIT) durchgeführt.

Die Standard-OIT-Untersuchungen wurden entsprechend DIN EN ISO 11357-6 bei einer isothermen Messtemperatur von 200 , 190 bzw. 180 °C durchgeführt. Die Endtemperatur wurde mit einer Aufheizrate von 10 K/min unter Stickstoff als Schutzgas (Gasfluss: 50 ml/min) erreicht. Nach einer fünf Minuten dauernden isothermen Phase zum Ausgleich der Temperaturschwankungen erfolgte der Gaswechsel vom Spülgas Stickstoff auf Sauerstoff (Gasfluss: 50 ml/min). Die Einwaage an Probenmaterial beträgt ca. 8 mg . Die Materialien wurden in einem offenen Aluminium-Tiegel untersucht. Die Auswertung, also die Bestimmung der Oxidationsinduktionszeit, erfolgt üblicherweise durch den extrapolierten Anfangszeitpunkt (t_{OIT}) als

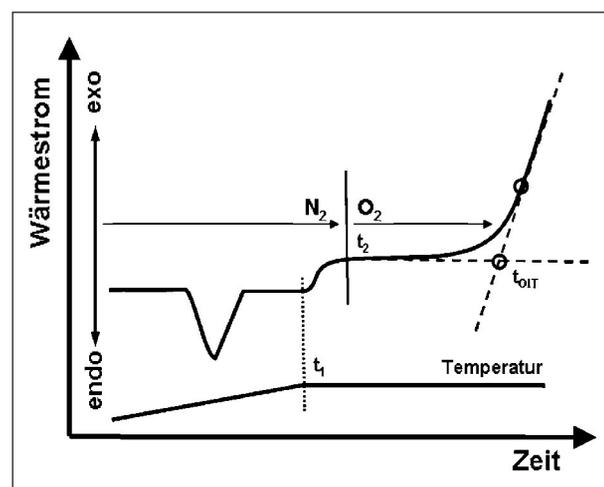


Bild 4: Schematische Darstellung des Auswertungsmechanismus einer statischen Standard-OIT-Messkurve; t_1 = Zeitpunkt des Erreichens der Messtemperatur; t_2 = Zeitpunkt des Gaswechsels von Stickstoff (N_2) auf Sauerstoff (O_2)

Schnittpunkt zwischen der geraden Basislinie und der an dem Steilanstieg angelegten Tangente.

$$OIT = t_{OIT} - t_1(\text{isotherm}) \quad (\text{Gl. 3})$$

In Bild 4 ist der Auswertemechanismus einer Standard-OIT-Messkurve schematisch dargestellt. Die Ergebnisse der OIT-Untersuchungen sind im Kapitel 8.4.2 zusammengestellt.

6.5 Mechanische Eigenschaften der KDB

6.5.1 Eigenschaften der Fügenaht

Zur Analyse der Funktionsfähigkeit der Fügenähte wurden das Schälverhalten nach DIN EN 12316-2 [13] von KDB-Proben aus zwei Tunneln und das Scherverhalten nach DIN EN 12317-2 [14] von KDB-Proben aus fünf Tunneln untersucht. Beide Prüfungen sind für den Bereich von Kunststoff- und Elastomerbahnen für Dachabdichtungen entwickelt worden und werden auf den Bereich der Tunnelabdichtung übertragen. Für diese Versuche wurde ein Prüfkörper mit Fügenahtbereich mit konstanter Geschwindigkeit mit einer Zugkraft bzw. Scherbeanspruchung bis zum Eintreten des Bruchs der Fügenaht belastet.

Zum besseren Verständnis ist in Bild 5 eine Fügenaht, eine Überlappnaht mit Prüfkanal, abgebildet und die einzelnen Bereiche genau definiert.

- Bahndicke (d_O , d_U),
- Überlappung vorn (\ddot{u}_1),
- Überlappung hinten (\ddot{u}_2),
- Breite der Teilnähte (b_{N1} , b_{N2}),
- Breite des Prüfkanals (b_P),
- Dicke der Naht (d_{N1} , d_{N2}).

In Anlehnung an die Norm DIN EN 13216-2 zur Bestimmung der Schälereigenschaften von Fügenähten betragen die Probenbreiten der Prüfkörper 50 mm und die Klemmenabstände (LE) 30 mm.

Nach DIN EN 13217-2 zur Bestimmung der Schereigenschaften von Fügenähten betragen die Pro-

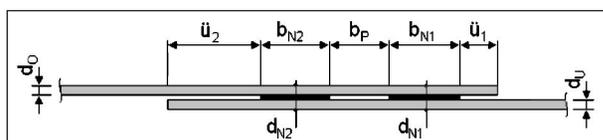


Bild 5: Schematische Darstellung des Fügenahtbereichs einer Überlappnaht mit Prüfkanal

benbreiten der Prüfkörper auch 50 mm und die Klemmenabstände (LE) 200 mm. Beide Prüfungen wurden bei konstanten Prüfbedingungen (T , rel. Luftfeuchte) durchgeführt, und die Prüfgeschwindigkeit bzw. Verformungsgeschwindigkeit betrug 100 mm/min. Die Zugkraft wurde während der Prüfungen kontinuierlich aufgezeichnet. Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden dann mit den Anforderungen an die Fügenähte beim Einbau verglichen. Die Untersuchungsergebnisse sind in Kapitel 8.5.1 angegeben.

6.5.2 Zugversuche an den ausgebauten KDB

Der Zugversuch ist ein genormtes Standardverfahren zur Bestimmung der Zugfestigkeit und weiterer Werkstoffkennwerte, wie Streckspannung σ_Y und Bruchdehnung ϵ_B . Aufgrund der großen Vielfalt von Kunststoffen sind unterschiedliche Ausführungsvarianten des Zugversuchs bekannt, die differenzierte Probekörper, Belastungsbedingungen oder Einspannvorrichtungen erfordern.

Der hier eingesetzte konventionelle Zugversuch, d. h. der Zugversuch mit konstanter Traversengeschwindigkeit, zählt zu den quasistatischen, zerstörenden Prüfverfahren. Die Lastaufbringung muss stoßfrei erfolgen+, und die Lastzunahme (infolge der konstanten Dehnungsgeschwindigkeit) erfolgt stetig steigend und langsam zunehmend bis zum Bruch des Prüfkörpers. In Bild 6 ist eine Auswahl an Prüfkörpern für Zugversuche an Kunststoffen nach DIN EN ISO 527-1, -2 und -3 [15, 16, 17] zusammenfassend dargestellt.

Die Zugfestigkeit σ_M ist die Spannung, die im Zugversuch aus der maximalen Zugkraft F_{max} bezogen

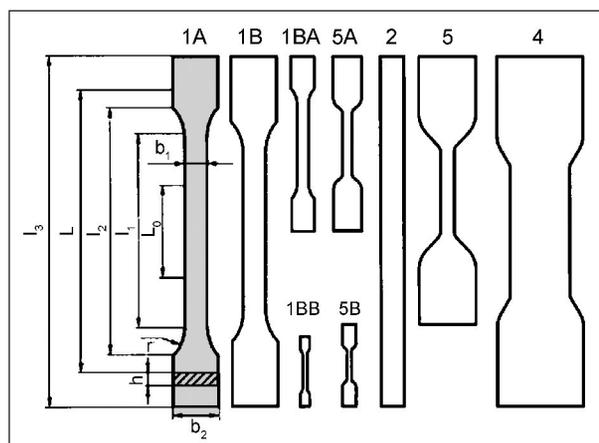


Bild 6: Probekörper für den Zugversuch an Kunststoffen nach DIN EN ISO 527 [18]

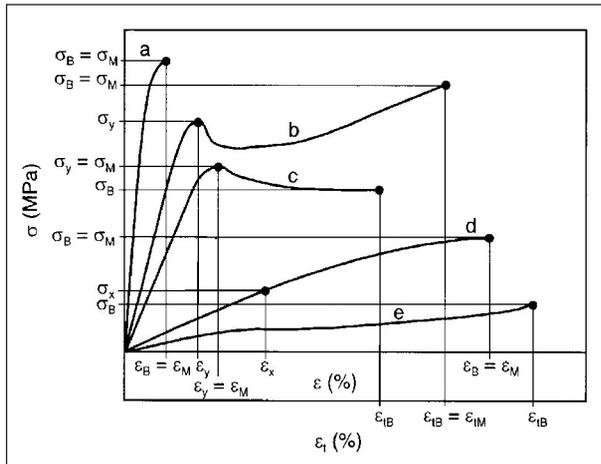


Bild 7: Spannungs-Dehnungs-Diagramm und Kenngrößen von verschiedenen Kunststoffen: a) spröde Werkstoffe, b und c) zähe Werkstoffe mit Streckpunkt, d) zähe Werkstoffe ohne Streckpunkt, e) elastomere Werkstoffe [20]

auf den ursprünglichen Querschnitt A_0 der Probe errechnet wird:

$$\sigma_M = \frac{F_{\max}}{A_0} \quad (\text{Gl. 4})$$

In den meisten Fällen wird bei der Auswertung von Spannungs-Dehnungs-Diagrammen auch die zur Zugfestigkeit gehörende Dehnung ε_M mit angegeben. Diese berechnet sich nach Gleichung 5 als Verhältnis aus der Längenänderung ΔL und der Ausgangslänge L_0 :

$$\varepsilon_M = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 \% \quad (\text{Gl. 5})$$

In Bild 7 sind typische Spannungs-Dehnungs-Diagramme verschiedener Kunststoffe dargestellt. Die Kurve a entspricht einem spröden Werkstoff mit einer relativ hohen Zugfestigkeit σ_M . Die dabei erreichte Dehnung ($\varepsilon_M = \varepsilon_B$) kann bis zu 10 % betragen. Andere Spannungs-Dehnungs-Diagramme entsprechen den Kurven b bis d, die ein duktileres Deformationsverhalten mit Dehnungen ($\varepsilon_M = \varepsilon_B$) von mehreren hundert Prozent, aber mit geringeren Zugfestigkeiten aufweisen. Typische Vertreter für dieses Werkstoffverhalten sind unter anderem die klassischen Polyolefine und die Polyamide [19].

6.5.3 Berstdruckfestigkeit (Wölbungsdehnung im mehrachsigen Zugversuch)

Die in der TL/TP KDB ausgewiesene Norm DIN EN ISO 14151 zur Bestimmung der Berstdruckfestigkeit ist von der CEN gestrichen und der Entwurf

prEN 14151 zurückgezogen worden. Die DIN EN ISO 14151 wurde durch die DIN 61551:2008 [21] ersetzt.

Das Verfahren zur Bestimmung der Berstdruckfestigkeit wird angewendet, um die multiaxialen Eigenschaften von Kunststoffdichtungsbahnen zu untersuchen. Hierfür wird ein runder Prüfkörper in die Prüfeinrichtung eingespannt. Durch kontinuierliche Erhöhung des Wasserdrucks wird die Probe bis zum Bersten beansprucht. Bei der Prüfung werden die Parameter Wasserdruck unter dem Prüfkörper und die Wölbhöhe der Messprobe ermittelt.

Die Prüfeinrichtung (Bild 8 (A)) besteht aus einem Druckgefäß mit Grundplatte (7) und einem Klemmring (8). Der Innendurchmesser (D) des Rings beträgt 200 mm und ist gleichzeitig der wirksame Durchmesser der geprüften Probe.

Bild 8 (A) zeigt eine KDB im Nullzustand (2) und im verformten Zustand (3). Die Verformung wird mit einem Wölbhöhenmessgerät (1) bestimmt.

Zur Berechnung der Spannung und Dehnung während des Versuchs sind geometrische Betrachtungen notwendig. Die Dehnung ist definiert als:

$$\varepsilon = 100 \left(\frac{2r\alpha}{D} - 1 \right) \quad (\text{Gl. 6})$$

r ist der Radius der sphärischen Verformung in Meter (m) und wird nach Gleichung 7 berechnet.

$$r = \frac{H^2 + \frac{D^2}{4}}{2H} \quad (\text{Gl. 7})$$

Dabei sind D der Innendurchmesser des Klemmringes und H die maximale Wölbhöhe, und α ist der Halbwinkel des Kreisbogenanteils und wird nach Gleichung 8 bestimmt.

$$\alpha = \pi + \arctan \left[\frac{D}{2(r - H)} \right] \quad (\text{Gl. 8})$$

wenn die Wölbhöhe $H \geq D/2$. Die Spannung σ der Messprobe ist definiert als:

$$\sigma = \frac{pR}{2d} \quad (\text{Gl. 9})$$

d ist die anfängliche Dicke (m) der Messprobe (KDB) und p der Druck unter der Messprobe (kPa).

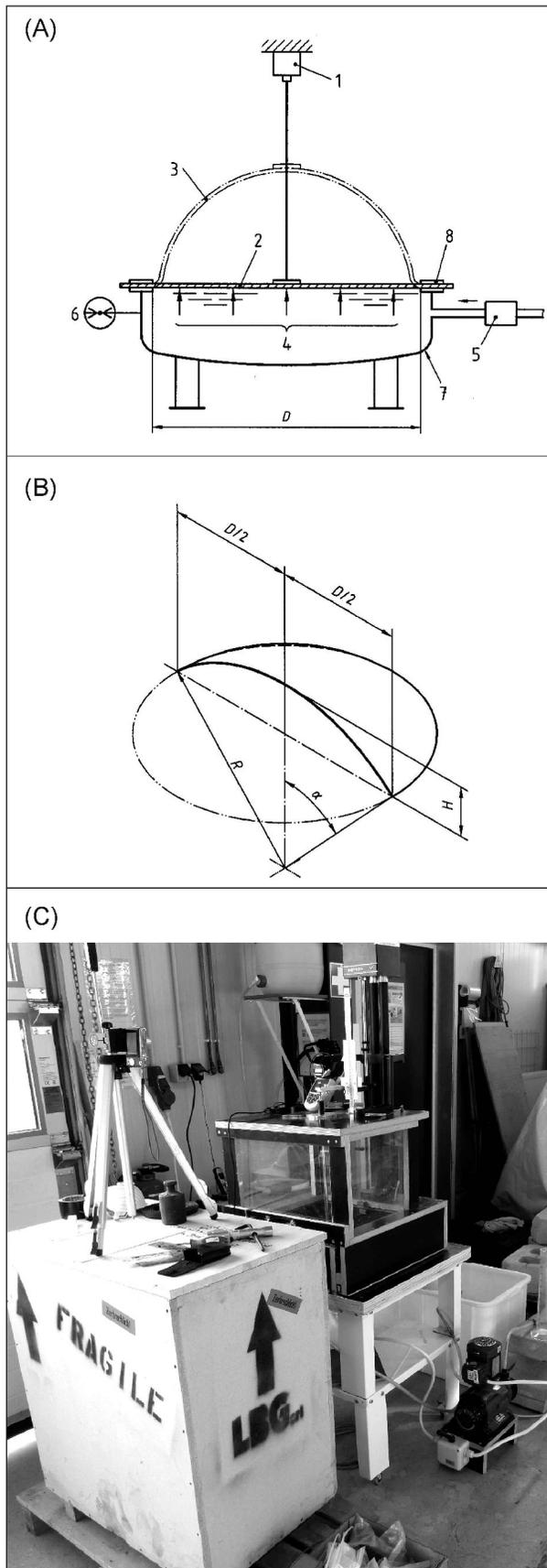


Bild 8: Schematische Darstellung der Prüfeinrichtung zur Bestimmung der Berstdruckfestigkeit (A), geometrische Betrachtung für die Auswertung (B) und die Abbildung der Prüfeinrichtung (C)

6.5.4 Wasserdurchlässigkeit

Die Prüfung der Wasserdurchlässigkeit nach DIN EN 15150 [32] ist keine Anforderung nach TL/TP KDB an Kunststoffdichtungsbahnen, sondern wird für die Erstprüfung laut DIN EN 13491 gefordert. Im Rahmen des Vorhabens wurde an einem ausgebauten KDB-Produkt die Wasserdurchlässigkeit geprüft.

Hierbei handelt es sich um ein Verfahren zur Messung des stationären Flüssigkeitsdurchflusses durch eine Dichtungsbahn. Bei dieser Prüfung wurde ein hydraulischer Differenzdruck zwischen den zwei Seiten einer KDB aufgebracht. Dieser wurde während der Prüfung auf einen konstanten Wert von 100 kPa eingestellt. Auf der Eingangsseite wurde ein Druck von 150 kPa und auf der Ausgangsseite ein Druck von 50 kPa eingestellt. Der Durchfluss durch die Dichtungsbahn wird aus der Veränderung des auf beiden Seiten gemessenen Volumens berechnet. Die Prüfung wurde bei einer konstanten Temperatur von $23 \pm 0,2$ °C durchgeführt.

Die Gültigkeit der Prüfung ergibt sich durch den Vergleich des eingangsseitigen und des ausgangs-

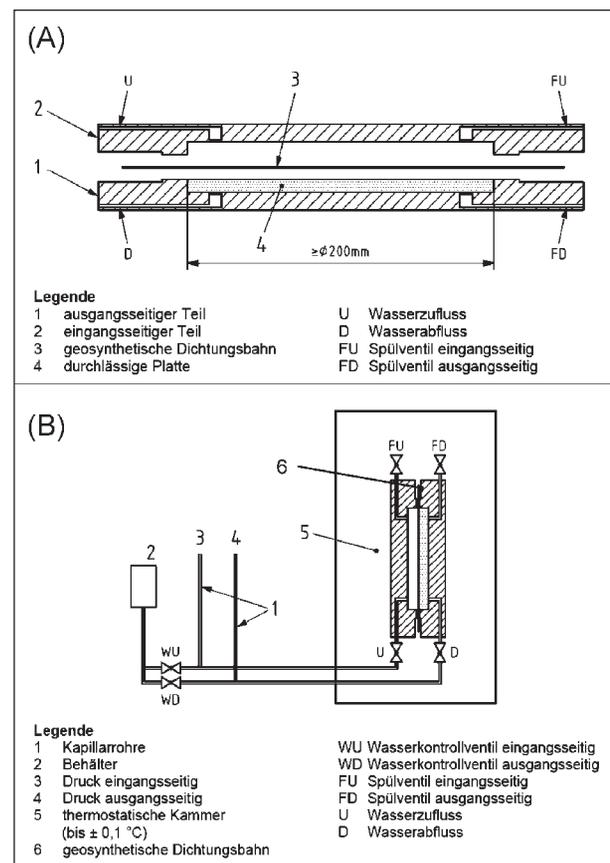


Bild 9: Schematische Darstellung der Prüzzelle (A) und Prüfgerät (B) zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit nach DIN EN 14150

seitigen Durchflusses. In Bild 9 sind die Prüfwelle und -gerät schematisch dargestellt. Die Prüfung der Wasserdurchlässigkeit wurde an einer KDB-Probe aus dem Waukopftunnel durchgeführt. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 8.5.4.

6.5.5 Schutzwirksamkeit der geotextilen Schutzschicht

An einigen KDB-Proben wurden deutliche Schäden beobachtet, die nicht durch oxidative Alterungsprozesse am Material hervorgerufen wurden, sondern durch bauwerksbedingte Beanspruchungen. Aus diesem Grund wurde das Schadensbild der KDB aus dem Waukopftunnel genauer untersucht.

Die Charakterisierung der Materialschädigung erfolgte zunächst mit Hilfe der Mikroskopie. Im Anschluss daran wurde die Dicke der Dichtungsbahn in den geschädigten Stellen vermessen.

Um die Verformungen in der Dichtungsbahn zu charakterisieren, wurde der Auswertemechanismus nach DIN EN 13719 [22] angewendet. Die Norm beinhaltet ein Verfahren zur Bestimmung der Wirksamkeit, mit der eine geotextile Schutzschicht eine Dichtungsbahn, die als Barriere dient, gegen die mechanische Langzeiteinwirkung von statischen Punktlasten schützen soll. Die Verformung der KDB wurde durch Differenzmessung der verformten Länge l_d einer direkten Verbindung von zwei zu beiden Seiten der Verformung befindlichen Punkten und der nicht verformten Länge zwischen denselben zwei Punkten, geteilt durch die nicht verformte Länge l_u , bestimmt.

$$\varepsilon_{\text{ö}} = \frac{(l_d - l_u)}{l_u} \quad (\text{Gl. 10})$$

In Bild 10 ist die Messmethodik grafisch dargestellt. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 8.5.5.

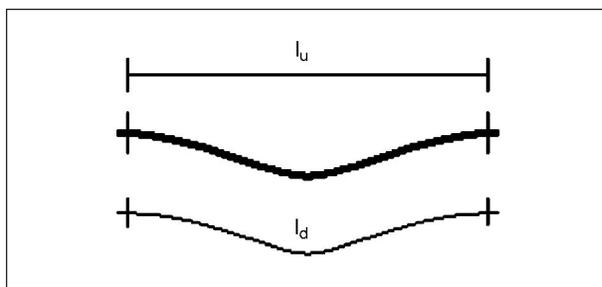


Bild 10: Grafische Darstellung der Methodik zur Bestimmung der örtlichen Dehnung

Die Schadensbilder der KDB sollten nicht auftreten bei ausreichender Bemessung der geotextilen Schutzschicht. Beim Ausbau der KDB-Proben wurden aus dem Waukopftunnel, Saukopftunnel und Staufertunnel geotextile Schutzvliesstoffe entnommen und stehen damit für weitere Untersuchungen zur Verfügung. An diesen Materialien wurde die flächenbezogene Masse nach DIN EN ISO 9864 bestimmt. Parallel dazu wurden die Dicken der geotextilen Schutzschichten bei zwei unterschiedlichen Anpressdrücken (2 kPa und 20 kPa) bestimmt. Die Auswertung dieser Ergebnisse erfolgt in Kapitel 8.1, 8.3 und 8.6.

6.6 ICOT-Methode (Stabilisatorgehalt)

Das Messprinzip des ICOT-Verfahrens (engl.: Initiated Cumene Oxidation Test) beruht auf einer wohldefinierten Modelloxidation. Das hier eingesetzte Cumol wird als extrahierendes Lösungsmittel für die Stabilisatoren aus dem Polymerwerkstoff und gleichzeitig als Reaktionspartner des Sauerstoffs verwendet. Die Oxidationsreaktion des Cumols wird durch den Zerfall eines zugegebenen Radikalinitiators (AIBN) bestimmt und läuft daher bei konstanter Temperatur mit definierter Geschwindigkeit ab. Durch die Anwesenheit extrahierter Stabilisatoren wird diese Oxidationsreaktion inhibiert – die Erfassung der Reaktionsgeschwindigkeit (barometrische Bestimmung des Sauerstoffverbrauchs) ermöglicht so nach Kalibrierung mit bekannten Stabilisatoren eine quantitative Charakterisierung des Stabilisierungszustands.

Das zu untersuchende Material wird in kleine Stücke zerkleinert und anschließend in einer Kryo-Mühle (6750 SPEX CertiPrep) gemahlen. Das entstandene Pulver sollte eine Korngröße von $\leq 250 \mu\text{m}$ besitzen. Das gemahlene Material wird 24 h bei Raumtemperatur vor der eigentlichen Messung zum Trocknen über Kieselgel in einem Exsikkator gelagert. Das Reaktionsgefäß wird mit Cumol und dem zerkleinerten Probenmaterial gefüllt und in das Temperierbad ($60 \pm 0,05 \text{ }^\circ\text{C}$) gelegt. Eine ausreichende Durchmischung des Reaktionsmediums wird durch den Einsatz der Magnetrührer plus Rührfisch erreicht.

Die computergestützte Erfassung des Sauerstoffverbrauchs wird durch eine barometrische Detektion realisiert, d. h., es wird die Abnahme des Gesamtdrucks der Gasphase in einem abgeschlossenen Volumen über dem Reaktionsgemisch verfolgt.

Empfindlichkeit des Drucksensors und Gasvolumen sind hierbei so bemessen, dass die Druckänderung einerseits mit ausreichender Genauigkeit erfasst werden kann, andererseits aber Gesamtdruck und Sauerstoffgehalt im Hinblick auf den Ablauf der Oxidationsreaktion als konstant angesehen werden können.

In Bild 11 ist der Aufbau der ICOT-Apparatur dargestellt. Die Temperierung des Reaktionsgemisches (Cumol und gemahlene Probenmaterial bzw. Kalibriersubstanz (AO)) in einem Erlenmeyerkolben (V1) auf 60 °C erfolgt mit einem Wasserbad (Doppelmantelgefäß (3)), welches über einen elektronisch geregelten Laborthermostaten (Th1) temperiert wird. Gerührt wird das Reaktionsgemisch mit einem Magnetrührer (4) und einem glasummantelten Rührstäbchen.

Magnetrührer und Doppelmantelgefäß sind mittels einer Hebebühne (5) höhenverstellbar, um das Reaktionsgefäß austauschen und zum Start der Reaktion den Initiator zudosieren zu können. Das Gasvolumen über dem Reaktionsgemisch (V2), in dem der Sauerstoffverbrauch im Verlauf der indu-

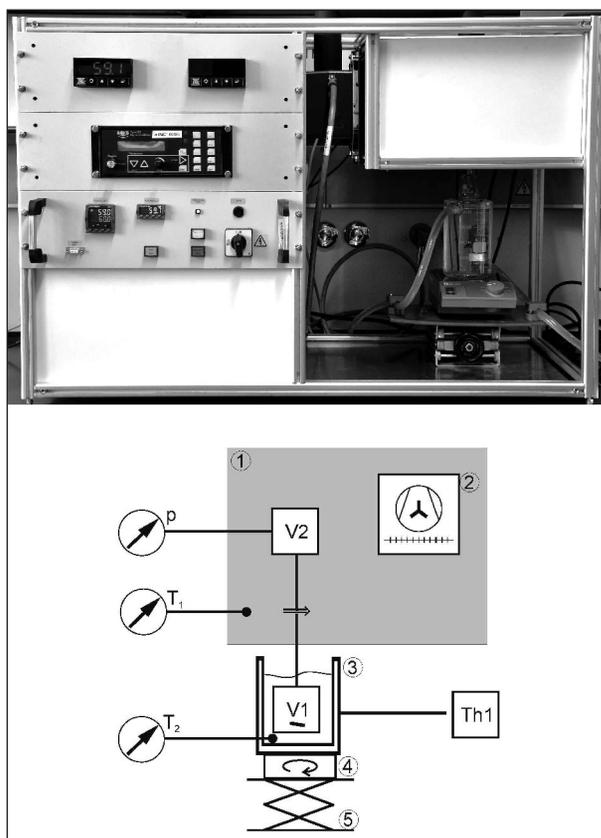


Bild 11: Darstellung der ICOT-Apparatur zur Messung des Sauerstoffverbrauches zur Ermittlung des Stabilisatorgehaltes

zierten Oxidationsreaktion erfasst wird, wird mittels eines elektronischen Temperaturreglers in einem Luftbad (1) ebenfalls auf 60 °C temperiert. Die Druckabnahme infolge des Sauerstoffverbrauchs wird mit einem empfindlichen, auf 70 °C temperierten Absolut-Drucksensor (p) gemessen und mit einer hierfür erstellten Software (ICOT 3.0) zeitabhängig erfasst.

Die Methode erlaubt eine quantitative Bestimmung der funktionellen Gruppen der Stabilisatoren, die für die Oxidationsinhibierung verantwortlich sind. Bislang können mit dieser Methode sterisch gehinderte Phenole (ShPh) und sterisch gehinderte Amine (HAS) als Antioxidantien differenziert erfasst werden. Eine Bestimmung der eingesetzten Stabilisatorarten ist jedoch nicht möglich.

Zur Bestimmung des Stabilisatorgehalts des zu untersuchenden Produkts wird im Vorfeld mit geeigneten Referenzsubstanzen (z. B. IRGANOX 1010, IRGANOX 1330) eine Kalibrierkurve erstellt, die dann eine Berechnung des Stabilisatorgehalts in Abhängigkeit der gemessenen Induktionszeit bzw. End-Reaktionsgeschwindigkeit ermöglicht.

Die optimale Einwaagemenge des gemahlene Probenmaterials variiert je nach zu erwartendem Stabilisatorgehalt des Produkts zwischen 100 und 500 mg und muss daher mittels Vorversuchen produktspezifisch angepasst werden. Das gemahlene Probenmaterial wird in 8 ml Cumol in einem Erlenmeyerkolben (V1) suspendiert. Auf diesem Wege erfolgt die Extraktion der im Produkt enthaltenen Stabilisatoren (10 min bis mehrere Stunden, Standardversuch 30 min). Der Erlenmeyerkolben wird an die Messapparatur angeschlossen. Nach ca. 10 min stellt sich ein Druck- und Temperaturgleichgewicht ein (Überwachung durch Temperaturfühler, Drucksensor). Im Anschluss an die materialspezifische Extraktionszeit erfolgen die Zugabe von AIBN (gelöst in 2 ml Cumol) und der Start der computergesteuerten Messwerterfassung ($t = 0$).

Nach Abschluss der Messung werden die erhaltenen Messdaten an eine Fitfunktion gemäß Gleichung 11 angepasst:

$$y = A_2 + (A_1 - A_2) / (1 + \exp^{((x-x_0)/dx)}) \quad (\text{Gl. 11})$$

Mit Hilfe der 1. Ableitung des Drucks nach der Zeit wird dann der Wendepunkt x_0 der Funktion bestimmt (Bild 12 (B) (unten)). Der angepasste Wert von x_0 entspricht der Induktionszeit τ_{ICOT} der Oxidationsreaktion. Die Werte A_1 und A_2 entsprechen

den Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten vor und nach der Induktionszeit (A_2 – End-Reaktionsgeschwindigkeit). Mit Hilfe der Kalibrierkurve und der so bestimmten Induktionszeit τ_{COT} kann dann der Stabilisatorgehalt des untersuchten Probenmaterials errechnet werden.

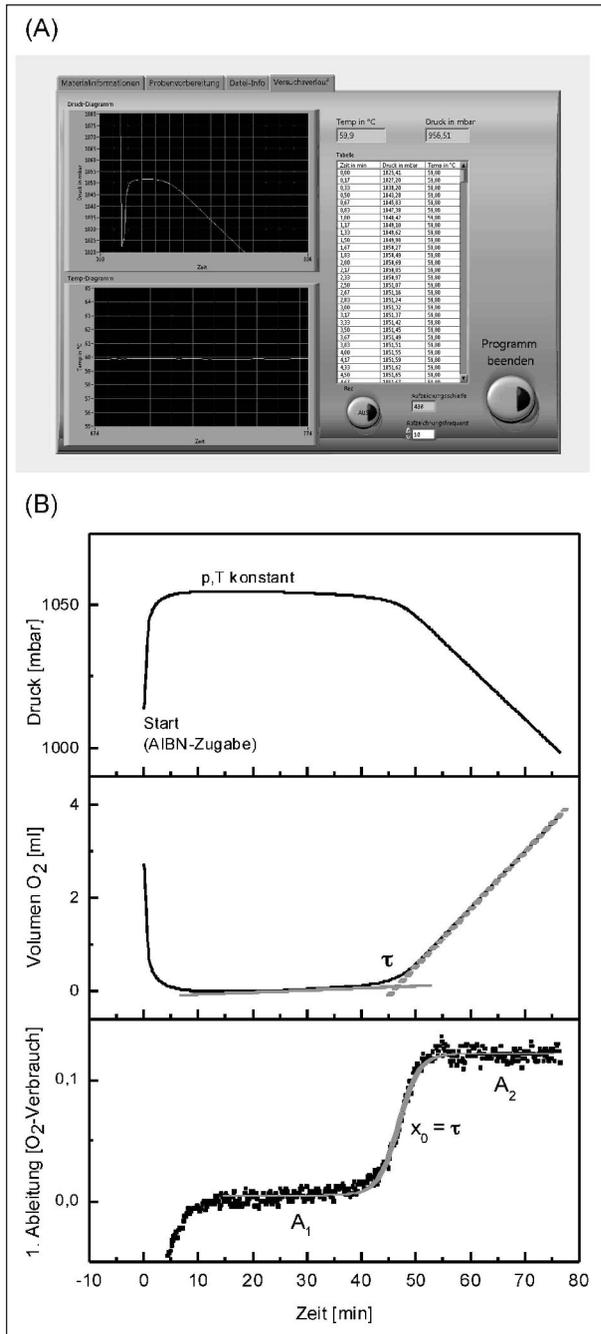


Bild 12: (A) Monitorabbild bei laufender Messung, (B) grafische Darstellung der Messergebnisse – Druckänderung durch fortschreitende Oxidation in Abhängigkeit der Zeit (oben), Auswertung der Messergebnisse der O₂-Volumenänderung infolge des Sauerstoffverbrauchs, $\Delta V(\text{O}_2)(\text{SATP})$ (Mitte), 1. Ableitung der Messdaten (unten)

Um Sauerstoffverbrauch und Reaktionsgeschwindigkeiten auch direkt quantitativ angeben zu können, ist die Umrechnung des Sauerstoffverbrauchs aus der Druckabnahme (mbar) in Volumen (ml) erforderlich. Hierzu muss das abgeschlossene Gasvolumen über dem Reaktionsgemisch bestimmt werden. Das Sauerstoffvolumen wird dann mittels eines Faktors $f = V_{\text{eff}} \cdot \frac{T_0}{T \cdot p_0}$ berechnet, wobei

V_{eff} das effektive Gasvolumen über dem Reaktionsgemisch ist. Für Phenolstabilisatoren (ShPh) beobachtet man eine Verzögerung der Oxidationsreaktion, die nach Verbrauch des anwesenden Stabilisators jedoch mit der ursprünglichen (nicht inhibierten) Geschwindigkeit einsetzt. HAS dagegen führen während der gesamten Versuchsdauer zu einer geringeren Reaktionsgeschwindigkeit. Beim häufig anzutreffenden Einsatz einer Kombination von Phenolstabilisatoren mit HAS sind sowohl eine verlängerte Induktionsphase als auch eine verringerte End-Reaktionsgeschwindigkeit (A_2) zu beobachten, die jeweils für eine quantitative Betrachtung ausgewertet werden können.

7 Untersuchungsmethoden zur beschleunigten oxidativen Alterung von KDB-Produkten

7.1 Autoklaventest nach DIN EN ISO 13438

Der Autoklaventest ist ein Prüfverfahren zur Beurteilung der oxidativen Langzeitbeständigkeit von Polymerwerkstoffen auf Basis von Polyolefinen. Die für die Untersuchung entwickelten Autoklaven mit einem Volumen von ca. 8 Litern ermöglichen eine maximale Prüftemperatur von 100 °C und einen maximalen Gasdruck von 100 bar und sind vom TÜV für diese Maximalwerte zugelassen. Der Innenraum des Autoklaven ist so konstruiert, dass die zu untersuchenden Prüfkörper von einem definierten flüssigen Medium vollständig umspült werden. Die Versuchsparameter Druck und Temperatur werden während der Messung in konstanten Abständen elektronisch erfasst und gespeichert.

Der Aufbau der Versuchsautoklaven umfasst drei Baueinheiten (Bild 13):

- Gasversorgung (Gasein- und Gasauslassventil, Drucktransmitter),

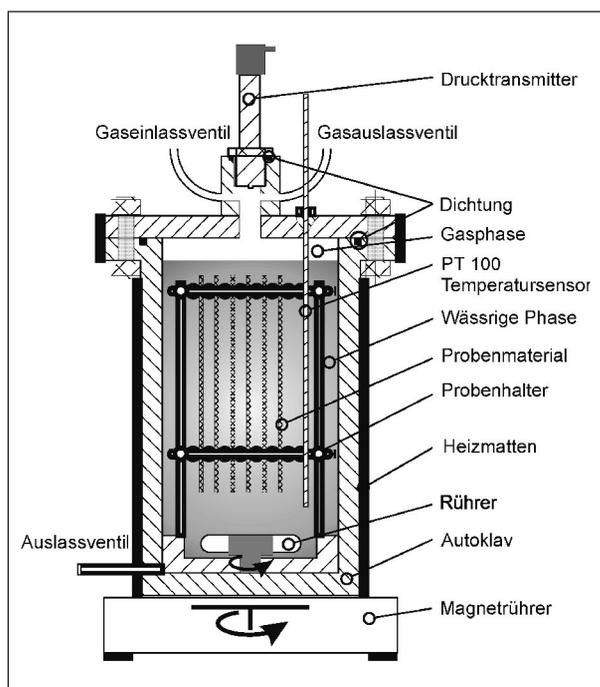


Bild 13: Schematische Darstellung der Autoklaven

- Autoklav (Rührer, Heizmanschetten, Probenhalter, Temperatursensor),
- Magnetrührwerk.

Alle medienberührenden Teile sind aus Edelstahl gefertigt, Halterung und Beschichtung des im Autoklaven befindlichen Rührkerns bestehen aus PTFE (Teflon). Hierdurch ist sichergestellt, dass keine Fremdkörper oder Schwermetalle in das wässrige Prüfmedium gelangen, die den oxidativen Abbau der untersuchten Kunststoffprodukte beeinflussen (z. B. katalytisch beschleunigen) könnten.

Neben dem Indextest (1) als Auswahlprüfverfahren für Nutzungsdauern bis 25 Jahre, existieren die zeitabhängige Erfassung (2) des Abbauprozesses und die Bestimmung eines „Nutzungsdauerparameters“ (3) durch Extrapolation der Ergebnisse von mindestens fünf Autoklavenlagerungen bei drei unterschiedlichen Temperaturen (60, 70 und 80 °C) und drei unterschiedlichen Sauerstoffdrücken (10, 20 und 50 bar).

Tabelle 9 zeigt eine Übersicht der zur Verfügung stehenden Prüfvarianten des Autoklaventests. Bei allen drei in Tabelle 9 aufgelisteten Varianten des Autoklaventests werden die zu untersuchenden Produkte in einem definierten wässrigen Medium (pH 10) eingelagert. Dieses in der DIN EN ISO 13438 angegebene wässrige Prüfmedium wurde im Hinblick auf normale Bodenbedingungen und gän-

Prüfvariante	Beanspruchung	Entnahmen
(1) Indextest	80 °C/50 bar O ₂	1 (14 Tage)
(2) Zeitabhängigkeit	80 °C/50 bar O ₂	5-8
(3) Lebensdauerparameter (Zeitabhängigkeit)	80 °C/50 bar O ₂	5-8
	70 °C/50 bar O ₂	5-8
	60 °C/50 bar O ₂	5-8
	80 °C/20 bar O ₂	5-8
	80 °C/10 bar O ₂	5-8

Tab. 9: Übersicht der Prüfvarianten der Autoklavenmethode

gige Antioxidantien vorwiegend auf Basis sterisch gehinderter Phenole konzipiert.

Der Autoklaventest erlaubt die Anpassung des Mediums hinsichtlich pH-Werts oder Gehalts an Metallionen für andere Anforderungen, Bodenbedingungen oder Geokunststoffe. Ggf. sind dafür modifizierte Bewertungskriterien erforderlich.

Die zur Charakterisierung des Schädigungsgrades herangezogene Restfestigkeit wird auf die Zugfestigkeit eines Ausgangszustandes (Kontrollprobe) bezogen. Für die Festlegung des Ausgangszustands wird eine Probe (Kontrollprobe) nach bereits einem Tag im Autoklaven entnommen und die mechanischen Eigenschaften bestimmt und als Ausgangswert festgelegt.

Die Auswertung der Beständigkeitsuntersuchungen sollte prinzipiell sowohl auf der Grundlage der Rest-Bruchkraft R_{BK} als auch der beobachteten Rest-Bruchdehnung R_{BD} erfolgen.

Prüfvariante 1: Indextest

Die Bedingungen für das Prüfverfahren sind in der DIN EN ISO 13438, Verfahren C1 und C2 festgelegt. Die Prüfung wird bei 80 °C und 50 bar Sauerstoffdruck in einem wässrigen Medium mit einem pH-Wert von 10 durchgeführt. Die Ermittlung der Rest-Bruchkraft R_{BK} und der Rest-Bruchdehnung R_{BD} der im Autoklaven beanspruchten Proben erfolgt nach einer festgelegten Lagerungsdauer von 14 Tagen (Produkt ohne bewehrende Funktion) bzw. 28 Tagen (Produkt mit bewehrender Funktion). Entsprechende Anforderungen sind in Anwendungsnormen, z. B. für KDB für Anwendungen im Tunnelbau in der DIN EN 13256, Annex B [23], in der TL/TP KDB oder den Empfehlungen EAG-EDT [24], angegeben. Derzeit sind dies mindestens

50 % Restfestigkeit bzw. -dehnung im Vergleich zu einer Kontrollprobe (Ausgangswert).

Prüfvariante 2: Zeitabhängigkeit des oxidativen Abbaus im Autoklaven

Diese Verfahrensvariante des Autoklaventests wird bei den Prüfbedingungen des Indextests von 80 °C und 50 bar O₂ durchgeführt. Dabei wird der zeitabhängige Verlauf des fortschreitenden oxidativen Abbaus bei Beanspruchung im Autoklaven untersucht. Die Auswertung der Messreihen erfolgt durch grafische Darstellung des Verlaufs und geeignete Kurvenanpassung, die eine Ermittlung der Zeitdauer τ bis zum Erreichen eines definierten Schädigungsgrads (z. B. τ_{50} bis 50 % Restfestigkeit zum Kontrollwert) erlaubt. Hierfür sind erfahrungsgemäß mindestens fünf bis acht Datenpunkte und somit Probenentnahmen erforderlich.

Als Fitfunktion zur Darstellung unterschiedlicher Verläufe des oxidativen Abbaus hat sich die sigmoide Funktion in Gleichung 12 bewährt:

$$y = a + \frac{b}{1 + \exp\left\{\frac{-(x-c)}{d}\right\}} \quad (\text{Gl. 12})$$

Prüfvariante 3: Bestimmung eines „Lebensdauerparameters“

Bei dieser Verfahrensvariante wird der zeitliche Verlauf des oxidativen Abbaus bei unterschiedlichen Sauerstoffdrücken (10, 20 und 50 bar) und unterschiedlichen Temperaturen (60, 70 und 80 °C) ermittelt (Tabelle 9). Mit Hilfe der ermittelten charakteristischen Zeiten (z. B. τ_{50} oder τ_{80}) und eines geeigneten theoretischen oder empirischen Modellansatzes wird durch Extrapolation auf Bezugs- oder Einsatzbedingungen ein sogenannter Nutzungsdauerparameter bestimmt.

Dieser kann zur Abschätzung der unter Einsatzbedingungen zu erwartenden Nutzungsdauer herangezogen werden, wobei gegebenenfalls produkt- und anwendungsspezifische Aspekte und Einflussfaktoren zu berücksichtigen sind. Dazu sind Erfahrungen und Voruntersuchungen notwendig, die dem komplexen Zusammenspiel zwischen verschiedenen Alterungs- und Abbaumechanismen Rechnung tragen und die Anwendbarkeit des Extrapolationsmodells über den betrachteten Temperatur- und Druckbereich sicherstellen.

Der aus der Auswertung mittels Extrapolation erhaltene Lebensdauerparameter Θ wird derzeit noch

direkt auf eine Anwendungstemperatur von 25 °C bezogen, was in [25] als obere Grenze der normalen Beanspruchungsdauer für Geokunststoffe genannt ist.

7.2 Ofentest nach DIN EN 14575

Die Untersuchungen zum oxidativen Abbau mittels Ofenlagerungen erfolgt bei 85 °C \pm 1 °C nach DIN EN ISO 14575 [26] in einem Wärmeschrank. Die Beanspruchungsdauer für KDB-Produkte beträgt 90 Tage.

Im Ofen wurden 100 x 100 mm² große Platten eingelagert, die nach der vorgeschriebenen Beanspruchungsdauer entnommen werden. Anschließend werden aus diesen Platten Prüfstäbe des Typs 5A nach DIN EN 527-3 ausgestanzt und die Zugprüfung zur Untersuchung der Restfestigkeitsabnahme im Vergleich zum Ausgangswert durchgeführt.

Bei diesem Versuch soll an KDB-Proben aus zwei Tunneln überprüft werden, ob die ausgebauten KDB-Proben die Anforderungen an neuwertige KDB-Produkte nach TL/TP KDB erfüllen würden. Die Änderung der Reißfestigkeit und der Reißdehnung gegenüber dem Ausgangswert darf nicht 20 % überschreiten.

Für diese Untersuchungen wurden die KDB-Proben aus dem Watkopf- und dem Staufertunnel ausgewählt, da diese Proben relativ wenige Schäden im Vergleich zu den anderen Proben aufwiesen.

8 Ergebnisse der Materialcharakterisierung

8.1 Dicke der KDB und der geotextilen Schutzschichten

Nach dem heutigen Stand der Technik bestehen Anforderungen nach TL/TP KDB [27] an die Gesamtdicke der KDB, die im Zuge der Baustoffeingangsprüfung überprüft werden muss. Die Nennstärke der KDB (z. B. 2,0; 3,0; 4,0 mm) muss angegeben werden. Der gemessene Mittelwert darf nicht kleiner sein als die Nennstärke, und der kleinste bzw. der größte Wert darf nicht mehr als 5 % vom Mittelwert abweichen.

Tabelle 10 zeigt die Ergebnisse zur Bestimmung der KDB-Dicke. In der Tabelle sind die gemittelten

Werte (MW) der gemessenen Gesamtdicken der einzelnen KDB-Proben zusammengefasst und den Nenndicken laut Produktdatenblatt bzw. Fremdüberwachungsprotokoll gegenübergestellt. Anhand dieser Ergebnisse sind deutliche Abweichungen zwischen den gemessenen Gesamtdicken und den geforderten Nenndicken zu erkennen. Dabei ist nur das Unterschreiten der geforderten Gesamtdicke der KDB als kritisch zu betrachten.

Nr.	Tunnel/Ort	MW der Gesamtdicke/ mm	Nenndicke/ mm
1	Füssen/QS3	1,84 ± 0,01	2,00* ≥ 1,90*
2	Wattkopftunnel/QS5	2,10 ± 0,02	2,00**
2a	Wattkopftunnel/QS6	1,80 ± 0,03	2,00*
3	Saukopftunnel/QS3	1,87 ± 0,03	2,00*
3a	Saukopftunnel/QS5	1,82 ± 0,02	2,00*
4	Staufertunnel/QS _{west}	2,12 ± 0,02	2,00**
4a	Staufertunnel/QS _{ost}	2,23 ± 0,02	2,00*
5	Ditschhardtunnel	2,93 ± 0,01	3,00*
6	Engelbergbasistunnel	2,94 ± 0,05	-
Rü1	RN:896213	1,96 ± 0,03	-
Rü2	RN:814962	2,42 ± 0,02	-
Rü3	RN:131632	3,00 ± 0,04	-

* Produktdatenblatt
** Fremdüberwachung nach DS 853

Tab. 10: Ergebnisse der Dickenmessung der ausgebauten KDB-Proben

Des Weiteren wurde das Verhältnis der Dicke der Signalschicht zur Gesamtdicke der KDB bestimmt und in Tabelle 11 dokumentiert. Nach dem heutigen Stand der Technik besteht die Anforderung an die Dicke der Signalschicht nach TL/TP KDB, dass diese nicht größer als 0,2 mm sein darf. Diese Anforderung würde nur ein sehr geringer Anteil der untersuchten KDB-Proben erfüllen.

Die KDB-Dicken der Rückstellmuster Rü1, Rü2 und Rü3 des Watt- und Saukopftunnels sind nicht identisch, sodass davon ausgegangen werden kann, dass nicht die dazugehörigen Rückstellmuster vorliegen. Für eine genaue Zuordnung ist die Kenntnis der Rollnummer der eingebauten Produkte von entscheidender Bedeutung. Die Signalschichtdicken der vorliegenden Rückstellmuster würden die aktuellen Anforderung der TL/TP KDB von ≤ 0,2 mm nicht erfüllen.

Die Anforderungen zur Einbauzeit der KDB waren in der DS 853 [28] bzw. ab 1995 in der ZTV-Tunnel, Teil 1/95 festgelegt [29].

Nach der DS 853 musste die KDB eine Dicke von 2,0/2,5 oder 3,0 mm nachweisen.

Nach dem heutigen Stand der Technik besteht die Anforderung nach TL/TP SD [30] an die Dicke von geotextilen Schutzschichten, die im Zuge der Baustoffeingangsprüfung überprüft werden muss. Die Bestimmung der Dicke der geotextilen Schutzschicht wurde nach DIN EN ISO 9863-1 durchge-

Nr.	Tunnel/Ort	MW der Gesamtdicke/ mm	MW der Signalschicht- dicke/ mm	Anteil der Signalschicht an der Gesamtdicke/ %
1	Füssen/QS3	1,84	0,92 ± 0,02	49,9
2	Wattkopftunnel/QS5	2,10	0,27 ± 0,08	12,88
2a	Wattkopftunnel/QS6	1,80	0,19 ± 0,1	10,54
3	Saukopftunnel/QS3	1,87	0,11 ± 0,03	5,08
3a	Saukopftunnel/QS5	1,82	0,15 ± 0,07	8,26
4	Staufertunnel/QS _{west}	2,12	0,27 ± 0,11	12,74
4a	Staufertunnel/QS _{ost}	2,23	0,19 ± 0,06	8,5
5	Ditschhardtunnel	2,93	1,34 ± 0,03	45,67
6	Engelbergbasistunnel	2,94	1,42 ± 0,06	48,20
Rü1	RN: 896213	1,96	0,29 ± 0,06	14,77
Rü2	RN: 814962	2,42	0,29 ± 0,03	11,92
Rü3	RN:131632	3,00	0,32 ± 0,02	10,6

Tab. 11: Ergebnisse der Dickenmessung der KDB-Proben (Verhältnis der Dicke der Signalschicht zur Gesamtdicke der KDB)

Nr.	Tunnel/Ort	Dicke/mm 2 kPa	Dicke/mm 20 kPa
2	Wattkopftunnel/QS5	5,19	4,68
3	Saukopftunnel/QS3	4,39	3,06
4	Staufertunnel/QS _{west}	3,95	3,04
4a	Staufertunnel/QS _{ost}	4,08	3,26

Tab. 12: Ergebnisse der Dickenmessung der ausgebauten geotextilen Schutzschichten gemessen unter Normalspannung von 2 und 20 kPa nach DIN EN ISO 9863-1

führt. Bei diesem Verfahren wurde die Dicke unter definierter Druckbeanspruchung von 2 und 20 kPa bestimmt. Nach der TL/TP SD muss eine Dicke von ≤ 10 mm (2 kPa) und ≥ 4 mm (20 kPa) nachgewiesen werden. Die Ergebnisse aus den Untersuchungen sind in Tabelle 12 enthalten.

Nach heutigem Kenntnisstand würde keine der hier untersuchten geotextilen Schutzschichten für diese Anwendungen mehr eingebaut werden. Die hier ermittelten Werte der Dickenmessung der geotextilen Schutzschichten sind für diese Anwendungen nicht ausreichend. Diese Erkenntnis korreliert mit den beim Ausbau gefundenen Materialschäden auf der Oberfläche der KDB (mikroskopische Aufnahmen: Bild 22).

Die Anforderungen der geotextilen Schutzschichten zur Einbauzeit waren in den DS 853 bzw. ab 1995 in den ZTV-Tunnel, Teil 1/95 festgelegt. Nach diesen Regelwerken musste eine Nenndicke von ≥ 3 mm eingehalten werden, was von allen entnommenen Proben der geotextilen Schutzschicht noch erfüllt wurde.

8.2 Dichte der KDB

Die Materialdichte ist ein wichtiger Kennparameter zur Identifizierung von polymeren Werkstoffen. In Tabelle 8 von Kapitel 6.2 wurden typische Werte von PE-Materialdichten unterschiedlicher Modifikationen zusammengestellt. Die Tabelle 13 zeigt die Ergebnisse der Dichtemessungen nach DIN EN ISO 1183-1 der ausgebauten KDB-Proben und der Rückstellmuster. Diese gemessenen Dichtewerte der KDB-Proben 2 und 3 zeigen deutliche Abweichungen zu den Werten typischer PE-Rohstoffe.

Die gemessenen Dichten der Rückstellmuster Rü1, Rü2 und Rü3 und die Dichten der Proben aus dem

Nr.	Tunnel/Ort	Dichte/ g/cm ³	Nenndichte/ g/cm ³
1	Tunnel Füssen/QS3	0,942	0,94*
2	Wattkopftunnel/QS5	1,002	-
2a	Wattkopftunnel/QS6	1,000	-
3	Saukopftunnel/QS3	1,004	-
3a	Saukopftunnel/QS5	0,999	-
4	Staufertunnel/QS _{west}	0,928	-
4a	Staufertunnel/QS _{ost}	0,925	-
5	Ditschhardtunnel	0,945	0,94**
6	Engelbergbasistunnel	0,945	
Rü1	RN: 896213	0,966	-
Rü2	RN: 814962	0,972	-
Rü3	RN:131632	0,979	-

* Produktdatenblatt Sarnafil MP 910-20 B2
 ** Produktdatenblatt Sarnafil MP 910-30 B2
 RN = Rollnummer

Tab. 13: Zusammenfassung der Ergebnisse der Dichtebestimmung und Vergleich mit den Daten aus dem vorliegenden Produktdatenblättern

Watt- und Saukopftunnel passen nicht zueinander. Für eine genaue Zuordnung ist die Rollnummer der eingebauten Produkte von entscheidender Bedeutung.

Des Weiteren ist die Dichte von 1,000 g/cm³ der KDB-Proben aus dem Wattkopf- und Saukopftunnel für reine PE-Produkte nicht typisch. Daher liegt nahe, dass es sich bei diesen Produkten um kein reines PE-Produkt handelt, sondern um ein co-polymerisiertes Produkt. Aus der ATR-IR-Analyse der Proben geht hervor, dass es sich um ein EVA-Copolymerisat handelt. In Abhängigkeit des VAc-Anteils kann die Dichte den Wert des PVAc von 1,17 g/cm³ anstreben [31].

Eine weitere mögliche Erklärung für den hohen Dichtewert könnte sein, dass dem Polymerrohstoff noch weitere Zusätze wie z. B. Füllstoffe (Kreide oder Talkum) zugesetzt wurden. Bei Zugabe dieser Füllstoffe sind Dichten von über 1,2 g/cm³ möglich [31]. Um diesen Verdacht zu bestätigen, müssten thermogravimetrische Untersuchungen durchgeführt werden, die hier aber nicht im Fokus standen.

8.3 Flächenbezogene Masse der ausgebauten KDB-Proben und der geotextilen Schutzschichten

Die flächenbezogene Masse wird nach heutigem Stand der Technik nur noch für geotextile Schutzschichten angewendet. Für die KDB-Probe Nr. 1 und 5 ist dennoch die flächenbezogene Masse im Produktdatenblatt angegeben. Aus diesem Grund wurde auch für die ausgebauten KDB-Proben eine flächenbezogene Masse bestimmt.

Die flächenbezogene Masse wurde nach DIN EN ISO 9864 bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 14 für die KDB-Proben und in Tabelle 15 für die geotextilen Schutzschichten zusammengestellt. Bild 32 in Kapitel 12.3 zeigt die KDB-Prüfkörper, die zur Bestimmung der flächenbezogenen Masse eingesetzt wurden.

Nr.	Tunnel/Ort	Flächenbezogene Masse/ g/m ²	Nennwert der flächenbezogene Masse/ g/m ²
1	Tunnel Füssen/QS3	1.822 ± 32	1900*
2	Wattkopftunnel/QS5	2.179 ± 15	-
2a	Wattkopftunnel/QS6	1.896 ± 16	-
3	Saukopftunnel/QS3	1.995 ± 17	-
3a	Saukopftunnel/QS5	1.882 ± 21	-
4	Staufertunnel/QS _{west}	2.068 ± 8	-
4a	Staufertunnel/QS _{ost}	2.152 ± 24	-
5	Ditschhardtunnel	2.844 ± 6	2.800**

* Produktdatenblatt Sarnafil MP 910-20 B2
** Produktdatenblatt Sarnafil MP 910-30 B2

Tab. 14: Zusammenfassung der Ergebnisse der flächenbezogenen Masse der untersuchten KDB-Proben nach DIN EN ISO 9864

Nr.	Tunnel/Ort	Flächenbezogene Masse/ g/m ² (verschmutzt)	Flächenbezogene Masse/ g/m ² (gereinigt)
2	Wattkopftunnel/QS5	798	637
3	Saukopftunnel/QS1	391	380
4	Staufertunnel/QS _{west}	451	428
4a	Staufertunnel/QS _{ost}	532	512

Tab. 15: Zusammenfassung der Ergebnisse der flächenbezogenen Masse der geotextilen Schutzschichten nach DIN EN ISO 9864

Die Probenentnahme an den geotextilen Schutzschichten zur Bestimmung der flächenbezogenen Masse war aufgrund der Beschädigungen des Materials nicht in ausreichender Anzahl durchführbar. So wurden je nach Zustand des vorliegenden Probenmaterials 2 bis 5 Prüfkörper ausgestanzt.

Nach dem heutigen Stand der Technik besteht die Anforderung nach TL/TP SD an die Masse pro Fläche einer geotextilen Schutzschicht von $\geq 900 \text{ g/m}^2$ für Tunnel in geschlossener Bauweise. Danach würde kein ausgebautes Material der geotextilen Schutzschicht die heutigen Anforderungen erfüllen.

Nach den Anforderungen zur Einbauzeit musste gemäß DS 853 bzw. ZTV-Tunnel, Teil 1/95 eine flächenbezogene Masse von $\geq 500 \text{ g/m}^2$ eingehalten werden, was von den entnommenen Proben aus dem Wattkopftunnel auch noch erfüllt wurde.



Bild 14: Probenentnahme zur Bestimmung der flächenbezogenen Masse an den geotextilen Schutzschichten (runde Prüfkörper)

8.4 Thermische Eigenschaften der KDB

8.4.1 DSC

Die thermische Analyse mittels DSC liefert Informationen über charakteristische Materialeigenschaften (Schmelzen, Kristallisation) von polymeren Werkstoffen, die auch als Anhaltspunkt für eine Produktidentifikation herangezogen werden können. Für verschiedene Polyethylentypen findet man in der Literatur folgende typische Bereiche der Schmelzpeak-Maxima: für PE-LD von 100 bis 110 °C, für PE-LLD von 115 bis 125 °C und für PE-HD von 125 bis 135 °C. Die wichtigsten Informationen über den verwendeten Rohstoff lassen sich aus der 2. Heiz- und Abkühlkurve einer DSC-Messung herausziehen. Die Auswertung der DSC-Kurven in den Bildern 15 und 16 erfolgt in zwei Gruppen, da die vorliegenden KDB-Proben von zwei Herstellern produziert wurden und diese jeweils ein unterschiedliches Materialkonzept verfolgen. Die erste Gruppe besteht aus den KDB-Proben Nr. 1 (Tunnel Füßen) und 5 (Ditschhardtunnel). Die zweite Gruppe besteht aus den KDB-Proben Nr. 2 (Wattkopftunnel), 3 (Saukopftunnel) und 4 (Staufertunnel). In Bild 15 sind die Schmelz- und Kristallisationskurven der ersten Gruppe grafisch dargestellt, und die dazugehörigen Schmelz- und Kristallisationspeaks sind tabellarisch in den Tabellen 16 und 17 aufgeführt.

Die hier im Projekt untersuchten KDB-Proben zeigen in der 2. Aufheizkurve zwei Peakmaxima. Das

erste Peakmaximum befindet sich um 86 °C und das zweite Peakmaximum bei 121 °C. Die Peakmaxima kennzeichnen unterschiedliche Polymerkomponenten im Produkt und deren Schmelzeigenschaften. Die Schmelz- und Kristallisationskurven in Bild 15 sehen sehr ähnlich aus, sodass davon ausgegangen werden kann, dass die Produkte in Bezug auf ihre Polymerkomponente trotz ihrer geringen Peakmaximaverschiebung im 1. Schmelzpeak von ca. 1,5 °C und im 1. Kristallisationspeak von ca. 2,5 °C ähnlich sind.

Im Abkühlgang beobachtet man, bei jeweils etwas niedrigeren Temperaturen, ebenfalls zwei Peaks

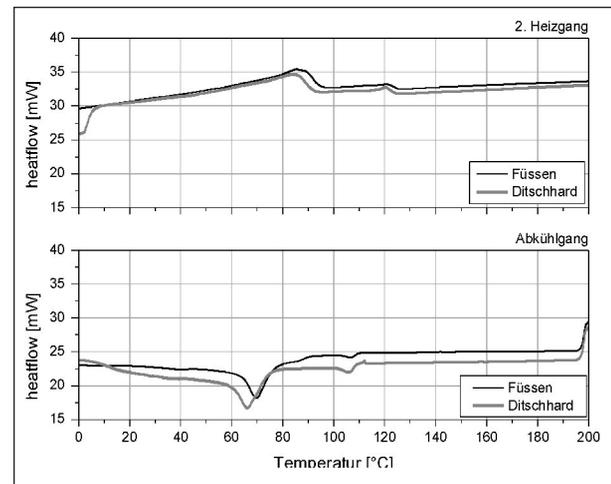


Bild 15: DSC-Diagramm der KDB-Proben aus dem Tunnel Füßen (Probe Nr. 1) und dem Ditschhardtunnel (Probe Nr. 5); oben: 2. Heizgang (Schmelzpeak), unten: Abkühlgang (Kristallisationspeak)

Nr.	Tunnel/Ort	Peak _{max} /°C	
		2. Heizgang	
1	Tunnel Füßen/QS3	86,5	121,2
2	Wattkopftunnel/QS5	88,5	125,5
2a	Wattkopftunnel/QS6	89,0	125,3
3	Saukopftunnel/QS3	89,5	126,6
3a	Saukopftunnel/QS5	87,2	124,5
4	Staufertunnel/QS _{west}	105,2	121,0
4a	Staufertunnel/QS _{ost}	103,0	122,7
5	Ditschhardtunnel	85,7	121,2
Rü1	RN: 896213	88,0	126,9
Rü2	RN: 814962	87,5	126,4
Rü3	RN:131632	83,5	125,0

Tab. 16: Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse zur Bestimmung des Schmelzpeaks (2. Heizgang, DSC)

Nr.	Tunnel/Ort	Peak _{max} /°C		
		Abkühlgang		
1	Füßentunnel/QS3	68,8	-	105,8
2	Wattkopftunnel/QS5	67,4	89,3	105,1
2a	Wattkopftunnel/QS6	68,3	89,9	104,6
3	Saukopftunnel/QS3	66,4	94,3	105,6
3a	Saukopftunnel/QS5	66,3	93,9	105,4
4	Staufertunnel/QS _{west}	71,9	-	103,1
4a	Staufertunnel/QS _{ost}	71,3	-	102,8
5	Ditschhardtunnel	65,4	-	105,1
Rü1	RN: 896213	68,3	-	107,9
Rü2	RN: 814962	68,6	-	108,9
Rü3	RN:131632	63,3	74,8	106,1

Tab. 17: Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse zur Bestimmung der Kristallisationspeaks (Abkühlgang, DSC)

(Kristallisationspeaks). Der erste dieser Peaks befindet sich zwischen 65 und 69 °C, der zweite Peak hat sein Maximum bei ca. 105 °C. Aufgrund der Peakseparation kann man davon ausgehen, dass es sich um mehrere Polymere (Blend oder Copolymer) mit unterschiedlichen Massenanteilen handelt, die sich in ihrem Schmelz- und Kristallisationsverhalten deutlich unterscheiden.

Die KDB-Proben der zweiten Gruppe zeigen auch zwei Peakmaxima, die in der Intensität unterschiedlich ausgeprägt sind und sich von den KDB-Proben der Gruppe eins unterscheiden.

Die KDB-Proben Nr. 2 und 3 sind in den thermischen Eigenschaften ähnlich. Die KDB-Probe Nr. 4 dagegen zeigt deutliche Unterschiede gegenüber den KDB-Proben Nr. 2 und 3.

Das erste Peakmaximum von KDB-Probe Nr. 2 und 3 befindet sich um 89 °C und das zweite Peakmaximum bei 126 °C. Die KDB-Probe Nr. 4 hat das erste Peakmaximum bei ca. 104 °C, das eher einem Maximum einer breiten Schulter als einem Peak entspricht, und das zweite Peakmaximum wird bei 122 °C detektiert.

Beim kontrollierten Abkühlen der Probe zeigten die Proben 2 und 3 jeweils drei Peakmaxima und die Probe 4 nur zwei Peakmaxima. Der erste dieser Peaks befindet sich zwischen 66 und 68 °C, danach folgen ein relativ breiter Peak mit einem Peakmaximum zwischen 89 und 94 °C und zum Schluss ein kleiner Peak bei ca. 108 °C.

Ein wichtiger Punkt für die eindeutige Identifikation der eingebauten Materialien ist die Dokumentation der Rollennummer der KDB-Produkte während der Bauphase und die anschließende Aufbewahrung dieser Dokumente für einen definierten Zeitraum. Diese Informationen über die eingebauten KDB-Produkte standen nicht zur Verfügung, und daher konnten die Rückstellmuster nur anhand eines ungefähren Einbaudatums der KDB-Produkte vom Hersteller angefordert werden.

In Bild 16 sind nicht nur die DSC-Diagramme der KDB-Proben Nr. 2, 3 und 4 dargestellt sondern auch die DSC-Diagramme der Rückstellmuster. Die Rückstellmuster sollen den KDB-Proben Nr. 2 und 3 entsprechen.

Anhand der DSC-Diagramme wird deutlich, dass es sich bei den Rückstellmustern nicht um die Materialien handelt, die im Wattkopf- bzw. Saukopf-tunnel

eingebaut wurden. Die Lage der Maxima der Schmelzpeaks von ca. 88 °C und 126 °C und die Lage der Kristallisationspeaks von ca. 68 °C und 108 °C für Produkt Rü1 und Rü2 liegen zwar in derselben Dimension wie die der KDB-Proben Nr. 2 und 3, aber die Peakfläche und das Verhältnis der Peaks zueinander stimmen nicht überein.

Nach bisherigem Kenntnisstand handelt es sich vorrangig um LD-PE-Materialien mit einem variierenden Anteil an einem Copolymer. Um genauere Aussagen über den eingesetzten polymeren Rohstoff zu erhalten, wurden zusätzliche Untersuchungen mit der ATR-IR-Spektroskopie (Abgeschwächte Totalreflexion) durchgeführt. Diese Methode wird eingesetzt, um die Zusammensetzung von Polymerwerkstoffen zu identifizieren. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tabelle 18 zusammengefasst.

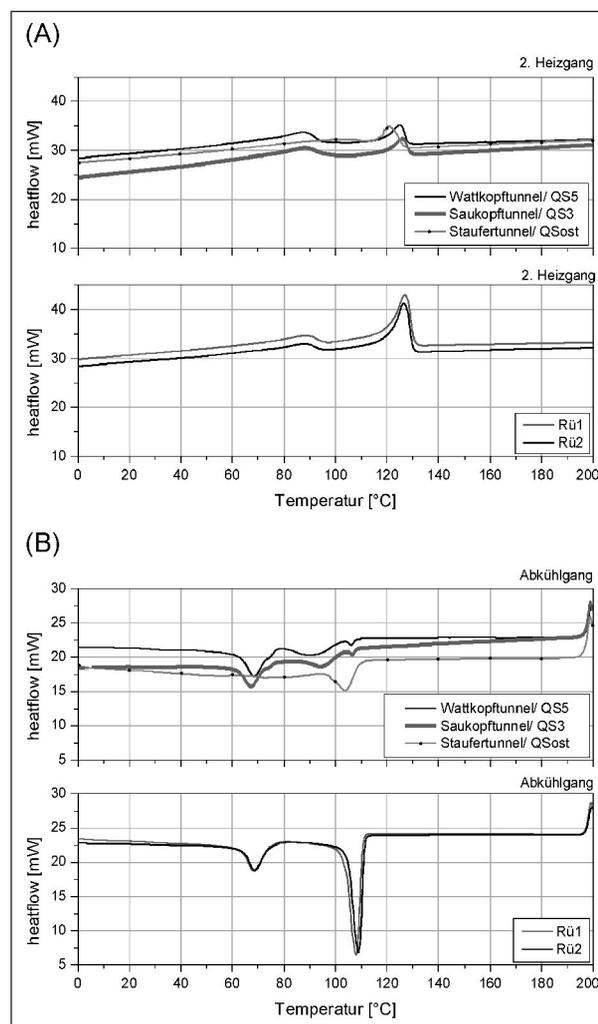
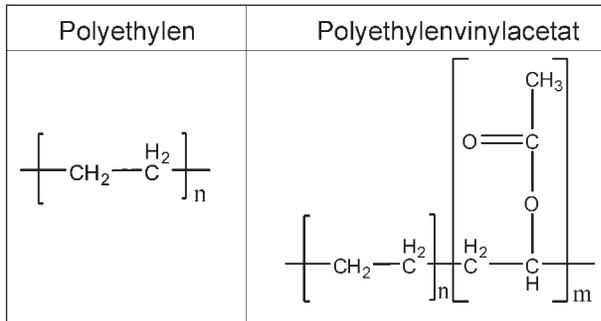


Bild 16: DSC-Diagramme der KDB-Proben aus dem Wattkopf-, Saukopf- und Staufertunnel und der Rückstellmuster der Firma Naue GmbH & Co. KG; (A) 2. Heizgang; (B) Abkühlgang

Nr.	Tunnel/Ort	Polymer der Grundbahn	Polymer der Signalschicht
1	Tunnel Füssen/QS3	PE/EVA	PE/EVA
2	Wattkopftunnel/QS5/6	PE/EVA	PE/EVA
3	Saukopftunnel/QS3/5	PE/EVA	PE/EVA
4	Staufertunnel/QS _{west/ost}	PE	PE/EVA
5	Ditschhardtunnel/QS	PE/EVA	PE/EVA
6	Engelbergbasistunnel	PE/EVA	PE/EVA
Rü1	RN: 896213	PE/EVA	PE/EVA
Rü2	RN: 814962	PE/EVA	PE/EVA
Rü3	RN:131632	PE/EVA	PE/EVA

Tab. 18: Ergebnisse der ATR-IR-Spektroskopie



Tab. 19: Strukturformel von Polyethylen und Polyethylvinylacetat

Bei den vorliegenden KDB-Proben handelt es sich nicht um reine PE-Materialien. Anhand der Ergebnisse der IR-Untersuchungen sind fast alle Produkte ein Co-Polymerisat aus PE (Polyethylen) und EVA (Ethylvinylacetat), deren Strukturformeln in Tabelle 19 angegeben sind. Mit dieser Erkenntnis ist der niedrige Schmelzpeak zwischen 85 und 90 °C auch erklärbar. In Abhängigkeit vom Polymerisationsgrad variiert der Schmelzbereich von EVA zwischen 70 und 210 °C.

Anhand von Bild 17 soll beispielhaft die Auswertung der ATR-Spektren erklärt werden. Für Polyethylen sind die Peaks bei den Wellenzahlen von 2.908 cm⁻¹, 2.850 cm⁻¹ (-CH₂ und CH₃-Valenzschwingung, dublett), 1.463 cm⁻¹ (-CH₂ und CH₃-Deformationsschwingung) und 717 cm⁻¹ (-C-C-Biegeschwingung) signifikant. Für das Copolymerisat aus PE und EVA kommen weitere charakteristische Gruppen hinzu, die Absorptionsbanden bei 1.737 cm⁻¹ (-C = O-Valenzschwingung), 1.234 cm⁻¹ und 1.020 cm⁻¹ (C-O-C-Valenzschwingung), die die Acetatgruppe charakterisieren.

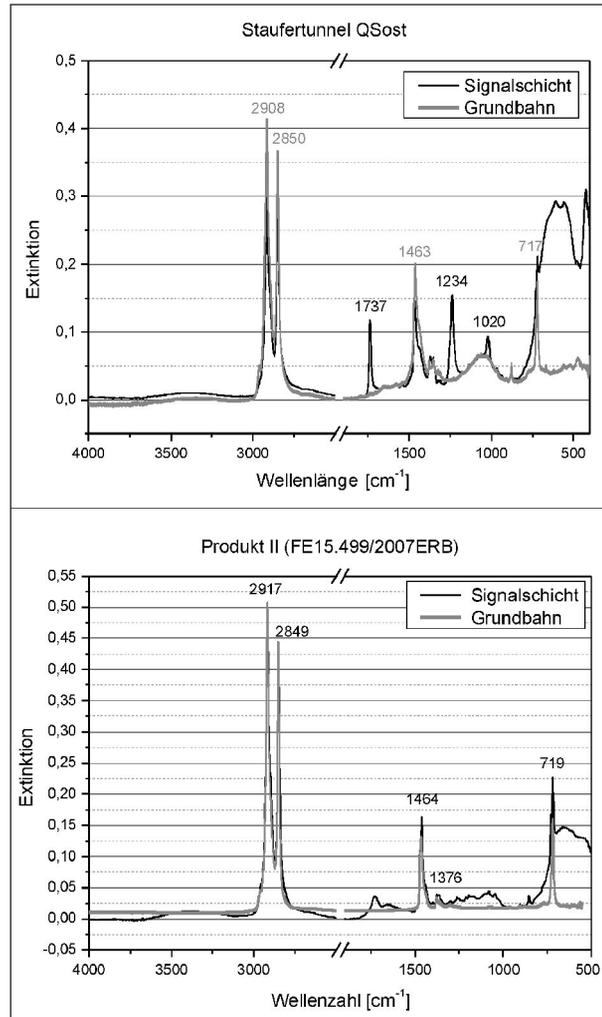


Bild 17: ATR-IR-Spektrum der Grundbahn und der Signalschicht der KDB aus dem Staufertunnel/QS_{ost} (obere Abb.) und eines neuwertigen Produktes auf Basis von VLDPE (Very Low Density Polyethylene)

Bild 17 zeigt zwei unterschiedliche Generationen von KDB-Produkten. Die obere Grafik zeigt das ATR-Spektrum der KDB aus dem Staufertunnel (QS_{ost}) aus dem Jahre 1993, und bei der unteren Grafik ist das ATR-Spektrum von Produkt II (FE 15.449/2007/ERB) dargestellt. Dieses Produkt wurde 2007 hergestellt.

Bei beiden Produkten sind die für PE typischen Signale bei 2.917 cm⁻¹, 2.850 cm⁻¹, 1.463 cm⁻¹ und 719 cm⁻¹ zu erkennen. Des Weiteren sind in der oberen Grafik die typischen Banden für EVA bei 1.737 cm⁻¹, 1.234 cm⁻¹ und 1.020 cm⁻¹ sichtbar, die bei dem neueren Produkt gänzlich fehlen.

Die Unterschiede in der Rohstoffzusammensetzung der KDB-Produkte haben Auswirkungen auf die Auswahl der Alterungsmethoden und -bedingungen, auch wenn solche Unterschiede und Wechsel

in der Zusammensetzung von Kunststoffdichtungsbahnen für Käufer oft nicht transparent sind. Des Weiteren kann man auch davon ausgehen, dass der oxidative Abbau bei signifikanten Änderungen in der Rohstoffzusammensetzung zu anderen Abbaumechanismen führen wird.

8.4.2 Standard-OIT

Die OIT-Messungen dienen zur Charakterisierung der Oxidationsstabilität von Polyolefinen. In Tabelle 20 sind die Ergebnisse der Standard-OIT-Messungen nach DIN EN ISO 11357-6 zusammengefasst. Die Standard-OIT-Messungen wurden bei 180 °C, 190 °C und 200 °C durchgeführt. Aus Tabelle 20 ist ersichtlich, dass die KDB-Proben deutliche Unterschiede in den OIT-Messwerten zeigen. Dies kann verschiedene Ursachen haben:

- nur Basisstabilisierung bzw. Prozessstabilisierung,
- Extraktion des Stabilisators,
- Verbrauch des Stabilisators.

Ein hoher OIT-Wert deutet auf eine höhere oxidative Beständigkeit hin.

8.5 Mechanische Eigenschaften

8.5.1 Eigenschaften der KDB-Fügenähte nach Ausbau (Schäl- und Schereigenschaften)

Die nach DIN 12316-2 an KDB-Proben aus zwei Tunneln ermittelten maximalen Schälwiderstände sind in Tabelle 21 und die nach DIN 12317-2 an KDB-Proben aus fünf Tunneln ermittelten Scherwiderstände sind in Tabelle 22 zusammengestellt. In beiden Methoden erfolgte die Prüfung in CMD-Richtung, d. h. quer zur Produktionsrichtung. Der Aufbau einer Fügenaht ist schematisch in Bild 5 in Kapitel 6.5.1 dargestellt.

Die Berechnung des mittleren Schälwiderstands laut Norm DIN EN 12316-2 war aufgrund des Kurvenverlaufs während des Schälversuchs nicht möglich. Daher wird nur der maximale Schälwiderstand angegeben. F_{max} ist hierbei die gemessene maximale Höchstkraft, und daraus lässt sich der maximale Schälwiderstand R_S mit $F_{max}/50$ mm berechnen. Die 50 mm beziehen sich auf die Breite des Prüfkörpers. Aufgrund des vorliegenden Probenmaterials musste von der geforderten Breite des Prüfkörpers abgewichen werden. Für die Prüfung

Nr.	Tunnel/Ort	OIT/min (Onset)		
		200 °C	190 °C	180 °C
1	Tunnel Füßen/QS3	12,1	39,2	-
2	Wattkopftunnel/QS5	148,6	268,3	-
2a	Wattkopftunnel/QS6	150,4	274,7	-
3	Saukopftunnel/QS3	122,6	207,8	-
3a	Saukopftunnel/QS5	122,8	209,9	-
4	Staufertunnel/QS _{west}	-	9,51	38,1
4a	Staufertunnel/QS _{ost}	20,6	51,4	-
5	Ditschhardtunnel	4,7	26,1	
Rü1	RN: 896213	118,5	239,6	
Rü2	RN: 814962	131,2	256,7	
Rü3	RN:131632	109,9	185,7	

Tab. 20: Ergebnisse der Standard-OIT-Messungen

Probe		F_{max}/N	Max. Schälwiderstand R_S der Fügenaht/ N/mm	Versagensart
Nr. Tunnel	Ort			
1	QS3	649 (± 10)	21,6 (649 N/30 mm)	B. i. N.
5	QS	870 (± 40)	29,0 (870 N/30 mm)	B. i. N.
B. i. N. = Bruch im Nahtbereich				

Tab. 21: Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Schälversuchen nach DIN EN 12316-2 aus 5 Einzelmessungen

Probe		F_{max}/N	Max. Scherwiderstand der Fügenaht/ N/mm	Versagensart
Nr. Tunnel	Ort			
1	QS3/ QS5	815 (± 64)	16,3 (815/50 mm)	
2	QS6/ QS5	751 (± 21)	15 (751/50 mm)	B. i. Nü.
3	QS3	682 (± 15)	13,6 (682/50 mm)	B. i. Nü.
4 ¹	QS _{west}	944 (± 16)	18,8 (944/50 mm)	B. i. Nü.
5	QS	1094 (± 16)	21,9 (1094/50 mm)	B. i. Nü.
¹ Abweichende Prüfbedingungen der Scherversuche der Proben 4/Staufertunnel, * .LE nur 120 mm und v nur 60 mm/min B. i. Nü. = Bruch im Nahtübergangsbereich				

Tab. 22: Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Scherversuchen nach DIN EN 12317-2



Bild 18: Darstellung der Prüfung der Schälfestigkeit; links: eingespannter Probekörper vor der Prüfung; rechts: eingespannter Probekörper während der Prüfung

wurden Probekörper mit einer Breite von 30 mm verwendet. Danach verändert sich auch die Berechnung des Schälwiderstandes R_S und erfolgt danach mit $F_{max}/30$ mm.

Bei allen Messungen des Schälversuchs wurde ein Versagen der Probe durch Bruch im Nahtbereich (B. i. N.) beobachtet. Dies ist nach TL/TP KDB zulässig, wenn ein Schälwiderstand R_S von $\geq 6,0$ N/mm erreicht wird. Für die beiden untersuchten Proben (1 und 5) gilt die Prüfung nach heutigen Richtlinien als bestanden.

Die Prüfung der Fügenaht in Bezug auf das Scherverhalten nach DIN EN 12317-2 gilt nach heutigem Stand der Technik als bestanden, wenn der Abriss außerhalb der Fügenaht stattfindet. Bei den untersuchten Proben wurde in allen Fällen ein Versagen, d. h. Bruch, im Nahtübergangsbereich (B. i. Nü.) beobachtet. Es erfolgte kein Abriss im Fügenahtbereich, und somit gilt die Prüfung als bestanden.

8.5.2 Reißfestigkeit und -dehnung nach DIN EN ISO 527

An den ausgebauten KDB-Proben wurden Zugversuche nach DIN EN ISO 527-1, -2 und -3 mit folgenden Prüfparametern durchgeführt:

- Prüfkörper Typ 5,
- Prüfgeschwindigkeit: 100 mm/min,
- Prüfklima 23 °C/50 % rel. LF.

Nach der TL/TP KDB müssen folgende Anforderungen an die KDB erfüllt werden:

Nr. Tunnel	Reißfestigkeit (N/mm ²)		Reißdehnung (%)	
	längs	quer	längs	quer
1	14,42	13,10	757,84	841,46
2	13,13	14,07	848,04	1016,5
3	10,24	11,53	706,46	924,53
4	16,72	15,39	1.265,38	1.274,02
5	15,9	14,14	928,15	924,33

Tab. 23: Auswertung der Zugprüfung nach DIN EN ISO 527 nach den Anforderungen der TL/TP KDB

- Reißfestigkeit in Längs- und Querrichtung von ≥ 15 N/mm²,
- Reißdehnung in Längs- und Querrichtung von ≥ 500 %.

Nach heutigem Stand der Technik wird die Zugprüfung von KDB-Proben nach DIN EN ISO 527 durchgeführt. Die Vergleichbarkeit der Prüfergebnisse ist stark von den verwendeten Prüfbedingungen, aber auch von den eingesetzten Prüfgeräten abhängig. Umso wichtiger ist es, die vollständige Dokumentation dieser Daten zu gewährleisten. Das Probenmaterial, welches in diesem Projekt untersucht wird, ist bereits bis zu 23 Jahre in Tunneln eingebaut gewesen, und der Stand der Technik bzw. die Produktanforderungen und Prüfmethode wurden in diesem Zeitraum verändert. Aus den uns vorliegenden Produktdatenblättern und Fremdüberwachungsprotokollen ist ersichtlich, dass zu dieser Zeit andere Prüfnormen (DIN 53455) und andere Prüfbedingungen (Prüfgeschwindigkeit) angewendet wurden. Mit Blick auf diesen Sachverhalt wird es schwierig, die Ergebnisse von heute mit den im Produktdatenblatt oder Fremdüberwachungsprotokoll dokumentierten Werten zu vergleichen. In Tabelle 23 sind die Ergebnisse der Zugprüfung nach heutigem Stand der Technik zusammengestellt.

Aufgrund der Ergebnisse lässt sich zusammenfassen, dass die KDB-Proben aus dem Tunnel 1, 2, 3 und 5, d. h. Tunnel Füssen, Wattkopf-, Saukopf- und Ditschhardtunnel, die heutigen Anforderungen gemäß TL/TP KDB für die Reißfestigkeit nicht erfüllen würden.

In der Tabelle 24 sind die Rechercheergebnisse zu den einzelnen Prüfnormen zur Bestimmung der Zugeigenschaften (Reißfestigkeit und Reißdehnung), die in den Datenblättern der Produkte und den Fremdprüferüberwachungsprotokollen doku-

Nr. Tunnel	Norm	Prüfbedingung		
		Prüfkörper	v/mm/min	Prüfklima
1	DIN 16726/ EN 12311-2	Variante B-Schulterproben; entspricht Typ 5 (ISO 527-3))	500	23 °C/50 % rel. LF
2	DIN 16726/ EN 12311-2	Variante B-Schulterproben; entspricht Typ 5 (ISO 527-3))	500	23 °C/50 % rel. LF
3	DIN 16726/ EN 12311-2	Variante B-Schulterproben; entspricht Typ 5 (ISO 527-3))	500	23 °C/50 % rel. LF
4	DIN 16726/ EN 12311-2	Variante B-Schulterproben; entspricht Typ 5 (ISO 527-3))	500	23 °C/50 % rel. LF
5	DIN 53455	Typ 4 entspricht Typ 5 (ISO 527-3)	200	20 °C/60 % rel.LF

Tab. 24: Angewendete Prüfnormen zur Bestimmung der Zugeigenschaften zur Zeit der Einbauphase

mentiert waren, in kurzer Übersicht tabellarisch zusammengetragen.

Aus den Daten geht hervor, dass die DIN 53455 („Prüfung von Kunststoffen – Zugeigenschaften“) und DIN 16726 („Kunststoffbahnen – Prüfungen“) in Verbindung mit der EN 12311-2 („Abdichtungsbahnen – Bestimmung des Zugdehnverhaltens – Teil 2: Kunststoff- und Elastomerbahnen für Dachabdichtungen“) Anwendung fanden. Aus dieser Recherche geht auch hervor, dass der Prüfkörper bei allen Normen identisch ist, aber unterschiedliche Verformungsgeschwindigkeiten im Zugversuch verwendet wurden. Des Weiteren wurden die Vorkonditionierung und die Prüfung nicht unter einheitlichen Prüfbedingungen, d. h. Klima, durchgeführt.

In Tabelle 25 sind die Datenblattangaben zu den Zugeigenschaften enthalten.

Die mechanischen Anforderungen an KDB waren zum Zeitpunkt des Einbaus in der DS 853 bzw. ZTV-Tunnel, Teil 1/95 festgelegt. Danach musste eine Kunststoffdichtungsbahn für die Reißfestigkeit und -dehnung in Längs- und Querrichtung folgende Anforderungen erfüllen:

- Reißfestigkeit in Längs- und Querrichtung von $\geq 10 \text{ N/mm}^2$,
- Reißdehnung in Längs- und Querrichtung von $\geq 200 \%$.

Die Prüfungen sind nach DIN 16726 durchgeführt worden. Die Prüfbedingungen sind in Tabelle 24 zusammengefasst. Der Unterschied zwischen den heutigen und den damaligen Prüfbedingungen besteht in der verwendeten Prüfgeschwindigkeit von 500 mm/min (Einbauzeit) bzw. 100 mm/min (heute).

Nr. Tunnel	Produkt	Anforderungen laut Datenblatt an Zugeigenschaften in Längs- und Querrichtung DIN 16726/EN 12311-2	
		Reißfestigkeit/ N/mm ²	Reißdehnung/ %
1	Sarnafil MP 910-20 MP	11*	> 500*
2	Carbofol CHD Tunnelbahn 2,00 mm	≥ 10 (1993)** ≥ 8 (1991)**	≥ 200 (1993)** ≥ 300 (1991)**
3	Carbofol CHD Tunnelbahn 2,00 mm	≥ 8 (1991)**	≥ 300 (1991)**
4	Carbofol CHD Tunnelbahn 2,00 mm	-	-
5	Sarnafil MP 910-30 B2	11* ≥ 10 (1994)**	> 500* ≥ 200 (1994)**

* Produktdatenblatt bzw.
** Fremdüberwachungsprotokoll

Tab. 25: Zusammenstellung von Prüfanforderungen zur Bestimmung der Zugeigenschaften laut Produktdatenblatt bzw. Fremdüberwachungsprotokoll

Aufgrund der unterschiedlichen Prüfbedingungen sind die Ergebnisse der Zugprüfung nach DIN EN ISO 527 mit den Anforderungen nach DS 853 bzw. ZTV-Tunnel, Teil 1/95 nicht direkt zu vergleichen.

8.5.3 Berstdruckfestigkeit nach DIN 61551

Die Berstdruckfestigkeit wurde an einer KDB-Probe aus dem Wattkopftunnel nach der in Kapitel 6.5.3 beschriebenen Prüfmethode untersucht. Bei diesem Versuch wurde die Probe mehraxial durch ansteigenden Wasserdruck bis zum Bersten belastet. Durch die mehraxiale Zugbeanspruchung der

KDB-Probe im Zuge der kontinuierlichen Wasserdruckerhöhung wurde eine halbkugelförmige Verformung beobachtet (Bild 19 (A)). Das Versagen des Prüfkörpers erfolgte durch das Bersten der KDB-Probe in Produktionsrichtung, wie es in Bild 19 (B) zu erkennen ist.

Das Ergebnis des Berstdruckversuches ist grafisch in Bild 20 dargestellt. Zur Auswertung des Versuchs

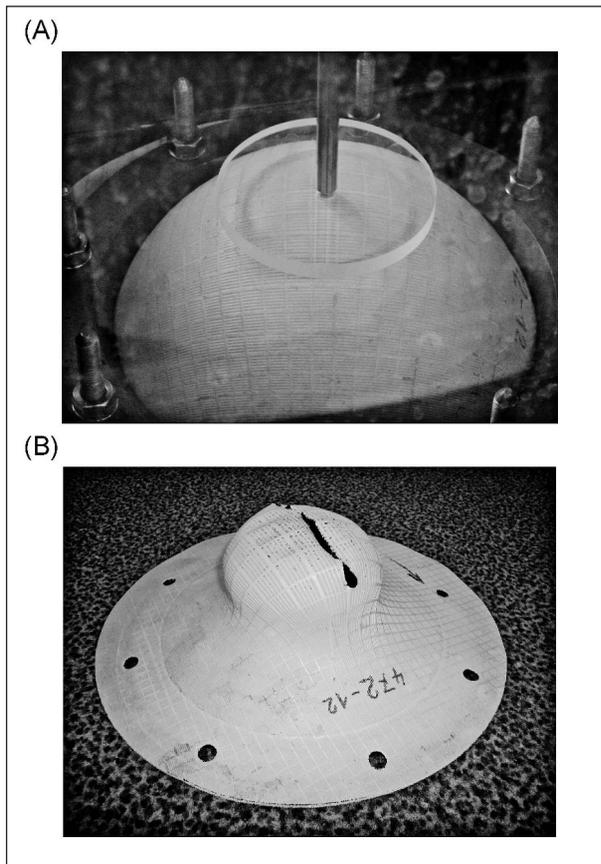


Bild 19: Aufnahme der KDB-Probe vor (A) und nach (B) dem Berstdruckversuch nach DIN EN ISO 14151

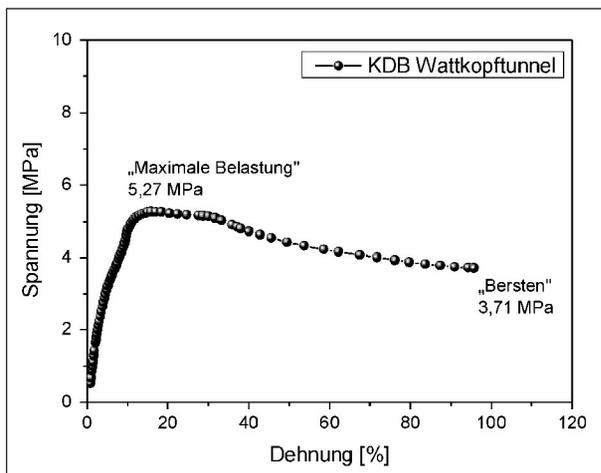


Bild 20: Diagramm Berstversuch der KDB-Probe aus dem Wattkopftunnel

wurden die aus der Wölbbogenhöhe berechneten Spannungs- und Dehnungswerte gegeneinander aufgetragen. Aus dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm ist zu erkennen, dass ein maximaler Spannungswert von 5,27 MPa bei einer Dehnung von 16 % erreicht wurde. Das Bersten des Prüfkörpers erfolgt bei einer Spannung von 3,71 MPa. Beim Bersten der KDB-Probe betrug die Wölbbogenhöhe 136 mm, und für die Dehnung wurde ein Wert von 95,7 % errechnet. Nach den Anforderungen der TL/TP KDB an Kunststoffdichtungsbahnen muss ein Wert von ≥ 50 % erreicht werden. Die hier untersuchte KDB-Probe hätte damit die Anforderungen erfüllt.

8.5.4 Wasserdurchlässigkeit

Die Wasserdurchlässigkeit wurde nach DIN EN 14150 [32] geprüft. Bei der Auswertung dieses Versuches wurde die Volumenänderung auf der Eingangs- und Ausgangsseite in Abhängigkeit der Zeit betrachtet. Im Idealfall sollten diese Werte identisch sein oder nicht mehr als 10 % betragen. Der Schwellenwert des Prüfverfahrens liegt bei $1 \cdot 10^{-6} \text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$. Die Ergebnisse der Prüfung sind grafisch in Bild 21 zusammenfassend dargestellt. Für die Eingangsseite wurde ein Wert von $3,7 \cdot 10^{-6} \text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ und für die Ausgangsseite ein Wert von $1,2 \cdot 10^{-6} \text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ermittelt. Die Abweichung zwischen Eingangs- und Ausgangsseite ist größer als 10 %. Eine Ursache für die erhöhte Abweichung der Werte könnte in der Beschaffenheit der ausgebauten KDB-Probe liegen. Für eine ideale Prüfung sollte eine glatte Oberfläche vorhanden sein, um die Prüfzelle mit geeigneten Mitteln abzudichten. Die hier untersuchte KDB-Probe besitzt eine strukturierte Signalschicht und Beschädigungen auf der Grundbahn, die das Abdichten der Prüfzelle erschweren und daher zu geringfügigen Undichtigkeiten führen kann. Die gemessenen Volu-

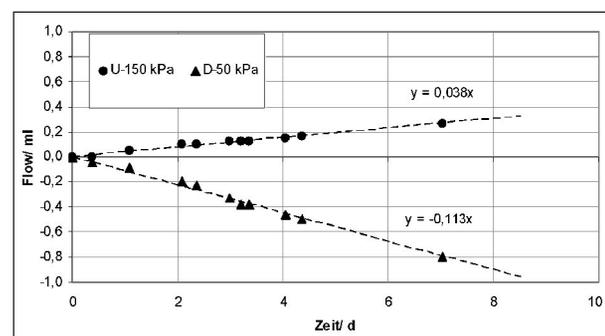


Bild 21: Grafische Darstellung der Ergebnisse zur Prüfung der Wasserdurchlässigkeit nach DIN EN 14150

menänderungen sind dennoch sehr gering und lassen die Schlussfolgerung zu, dass die untersuchte KDB-Probe aus dem Wattkopftunnel die Prüfung bestanden hat.

Erfahrungswerte für die Durchlässigkeit für neuwertige HDPE-KDB-Produkte liegen in einem Größenbereich von $2,6$ bis $3 \cdot 10^{-6} \text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$.

8.5.5 Schutzwirksamkeit der geotextilen Schutzschicht

Gebirgsseitig eingebaute geotextile Schutzschichten haben die Aufgabe, die mechanischen Beanspruchungen auf die anschließende Kunststoffdichtungsbahn zu reduzieren. Um diese Funktion im ausreichenden Maße erfüllen zu können, ist nach den einschlägigen Regelwerken [24, 30] eine Nennmasse von $\geq 900 \text{g/m}^2$ für geotextile Schutzschichten vorgeschrieben. Ferner muss die Dicke der Schutzvliesstoffe unter Normalspannung $\leq 10 \text{mm}$ (2 kPa) bzw. $\geq 4 \text{mm}$ (20 kPa) betragen. Wenn das nicht der Fall ist, können Schädigungen an der Kunststoffdichtungsbahn auftreten. Die im Vorhaben untersuchten geotextilen Schutzschichten würden die Anforderungen nach TL/TP SD nicht erfüllen.

Die im Vorhaben untersuchten KDB-Proben aus dem Wattkopf- und Saukopf tunnel zeigen die stärksten Verformungen am Material, die nicht durch die Ausbaumaßnahmen zu erklären sind. Zur genaueren Charakterisierung der permanenten Verformungen in der KDB wurden mikroskopische Aufnahmen an diesen Stellen durchgeführt.

Das Ergebnis dieser Untersuchungen wurde in Bild 22 zusammengefasst. Aus den fotografischen Aufnahmen wird ersichtlich, dass es sich nicht um Risse handelt, sondern eher wie ein Abdruck des Schutzvliesstoffes aussieht. In den mikroskopischen Aufnahmen sind die Fasern des Vliesstoffes gut erkennbar.

Als Folge der nicht ausreichenden Schutzwirksamkeit der Vliesstoffe sind deutliche Veränderungen am Produkt (nach dem Ausbau) erkennbar. Diese deutlichen Materialschädigungen wurden an einem Material genauer untersucht und in Anlehnung an DIN EN 13719 [22] ausgewertet. An 10 Messpunkten wurde die örtliche Dehnung nach Gleichung 10 bestimmt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 26 zusammengefasst.

Der Durchschnittswert der örtlichen Dehnung beträgt $0,9 \% \pm 0,2$. Die örtliche Dehnung in der KDB

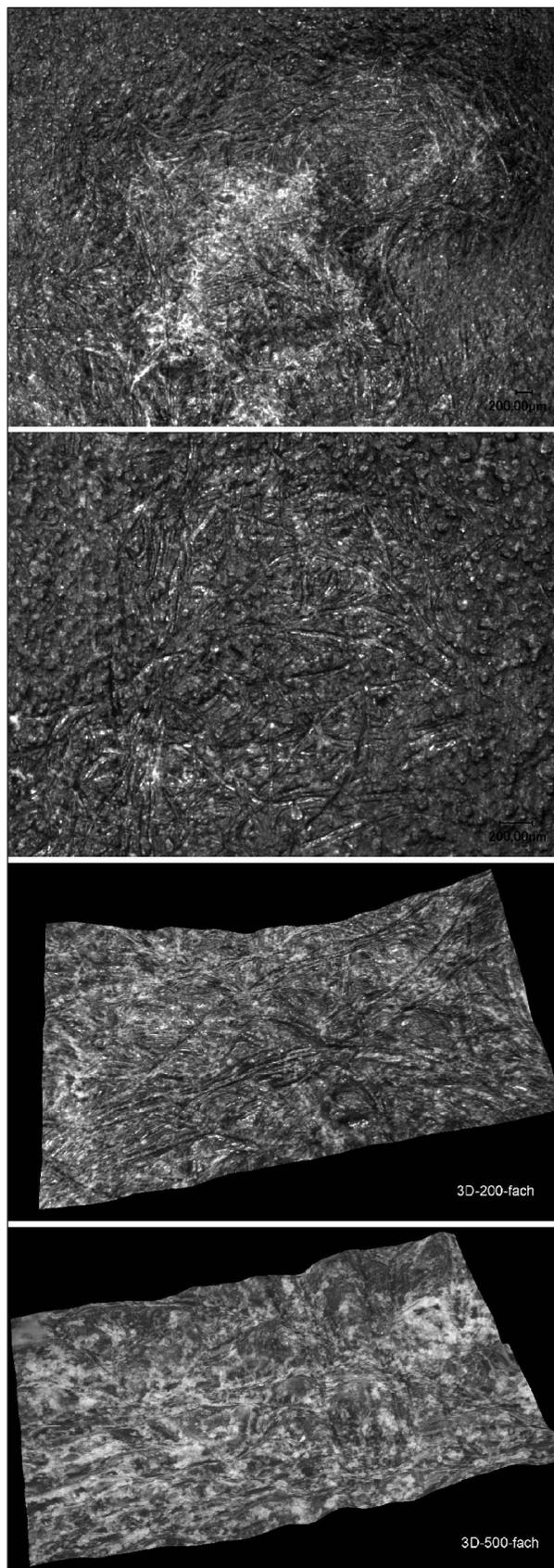


Bild 22: Mikroskopische Aufnahmen der geschädigten Bereiche der KDB aus dem Wattkopftunnel, 50fache Vergrößerung, 200fache Vergrößerung, 3D-Bild 200fache Vergrößerung und 3D-Bild 500fache Vergrößerung

erfolgt aufgrund der Ein-/Abdrücke der Spritzbetonschale auf der Gebirgsseite. Eine Richtlinie zur Bewertung oder Grenzwerte für die örtliche Dehnung gibt es im Bereich der KDB für Straßentunnel bislang nicht.

Die örtliche Dehnung der KDB geht mit einer Verringerung der KDB-Dicke einher. Die Ergebnisse in der Tabelle 27 bestätigen diese Aussage.

Der Schutzeffekt einer geotextilen Schutzschicht ist ausreichend, wenn die Kraftverteilung in der geotextilen Schutzschicht gleichmäßig erfolgt, sodass keine bzw. nur geringe Eindrücke in die KDB erfolgen. Eine mangelhafte geotextile Schutzschicht führt zu massiven Eindrücken und Abdrücken in der Dichtungsbahn. Wenn das passiert, führt das zu biaxialen Zugspannungs- und Druckbeanspruchungen im Material. Diese Beanspruchungen führen zu Schädigungen in der Mikrostruktur (kristallinen Bereich des Polymers) und können zu einem späteren

Messpunkt	Örtliche Dehnung/ %
M1	1,21
M2	1,16
M3	1,11
M4	0,91
M5	0,89
M6	0,84
M7	0,82
M8	0,75
M9	0,72
M10	0,60
Mittelwert	0,90
Standardabweichung	0,2

Tab. 26: Ergebnisse zur Untersuchung der Schutzwirksamkeit von geotextilen Schutzschichten in Anlehnung an DIN EN 13719

Nr.	Tunnel/Ort	Dicke (geschädigt)/ mm	Dicke (geschädigt/ ungeschädigt)/ %
1	Tunnel Füssen	1,81	98
2	Saukopftunnel/QS5	1,72	94,4
5	Ditschhardtunnel	2,87	97,8

Tab. 27: Ergebnisse zur Veränderungen der KDB-Dicke in dem geschädigten Bereich

Zeitpunkt makroskopisch zur Spannungsrissbildung führen.

Die nicht ausreichende Schutzwirksamkeit der verwendeten geotextilen Schutzschichten wurde durch folgende Untersuchungen nachgewiesen:

- Dicke der geotextilen Schutzschichten entspricht nicht den heutigen Anforderungen (Kapitel 8.1),
- Flächenbezogene Masse entspricht nicht den heutigen Anforderungen (Kapitel 8.3),
- Schutzwirksamkeit der geotextilen Schutzschicht ist nicht ausreichend. Folge: zu hohe örtliche Dehnungen der KDB.

8.6 Stabilisierungszustand der ausgebauten KDB-Produkte mittels ICOT-Methode (Initiated Cumene Oxidation Test)

Die mit der ICOT-Methode ermittelten Stabilisatorgehalte sind in Tabelle 28 zusammenfassend angegeben. Mit dieser Methode kann man den Gehalt an sterisch gehinderten Phenolstabilisatoren quantitativ bestimmen. Eine genauere Beschreibung der Methode erfolgte in Kapitel 6.6.

Die mit dieser Methode erhaltenen Ergebnisse zum Stabilisatorgehalt korrelieren gut mit den gemessenen OIT-Werten und den resultierenden Oxidationsstabilitäten der KDB-Proben. Die KDB-Materialien aus dem Wattkopf- und Saukopftunnel besitzen einen relativ hohen Gehalt an Stabilisatoren im Vergleich zu den restlichen untersuchten KDB-Materialien.

Nr.	Tunnel/Entnahme	Anteil Irganox 1010/ %
1	Tunnel Füssen	0,15*
2	Wattkopftunnel/QS5	0,46
3	Saukopftunnel/QS3	0,40
4	Staufertunnel/QS _{west}	0,013
4a	Staufertunnel/QS _{ost}	0,018
5	Ditschhardtunnel	0,17*
* direkte Messung mittels HPLC Analytik bestimmt		

Tab. 28: Stabilisatorgehalt von Irganox 1010 der untersuchten KDB-Produkte

9 Ergebnisse zur Oxidationsbeständigkeit

9.1 Autoklaventest nach DIN EN ISO 13438

9.1.1 Autoklaventest – Einfluss von Metallionen im Prüfmedium auf die Oxidationsbeständigkeit

Im Zuge der Datenrecherche zum Gehalt an Metallionen im vorherrschenden Bergwasser hat sich gezeigt, dass der Einfluss von Metallionen nicht zu vernachlässigen ist. Aus diesem Grund wurde die Zusammensetzung des Prüfmediums nach Standardbedingungen verändert, um den Einfluss der Metallionen auf die oxidative Beständigkeit genauer zu untersuchen. Auf Grundlage der vorliegenden Daten der Bergwasseranalysen wurde eine Metallsalzkonzentration von 10^{-3} mol/l für das modifizierte Prüfmedium im Autoklaven festgelegt.

Die Metallionen werden dem Prüfmedium in Form von Metall(II)salzen zugesetzt. Dabei werden Eisen als Eisen(II)sulfat, Kupfer als Kupfer(II)sulfat und Mangan als Mangan(II)sulfat dem Prüfmedium zugefügt. Durch Zugabe der Metallsalze wird unter anderem der pH-Wert des Prüfmediums beeinflusst. In der Tabelle 29 sind die wichtigsten Kennparameter des Prüfmediums und der dazugehörige pH-Wert, der sich aus der Zusammensetzung des Prüfmediums ergibt, angegeben.

Der Autoklavenversuch an sich ist schon ein sehr komplexes System, das durch unterschiedliche Parameter (T, p) beeinflusst werden kann. Um den Einfluss der Metallionen genauer zu untersuchen und die Ergebnisse mit einer Kontrollprobe zu vergleichen, wurde der erste Autoklavenversuch unter Standardbedingungen (80 °C, 50 bar O_2) und im Standardmedium (0,01 M Natriumhydrogencarbonat-Lösung bei pH 10) unter Zugabe von Eisen(II)sulfat mit einer Konzentration von 10^{-3} mol/l durchgeführt.

Das Standardprüfmedium besteht an sich schon aus einer 0,01-M-Natriumhydrogencarbonat-Lösung, die durch Zugabe von Natronlauge auf einen pH-Wert von 10 eingestellt wird. Wenn man sich vorstellt, dass dieser Lösung noch Eisen(II)sulfat zugesetzt wird, werden unweigerlich unter den Bedingungen im Autoklaven schon Reaktionen (z. B. Ausfällen von Eisenhydroxidverbindungen mit rotbraunem Niederschlag) stattfinden. Als Schlussfol-

Nr.	Metallionen-konzentration/mol/l	Prüfmedium im Autoklav	pH-Wert
1	10^{-3} (Fe)	0,01 M $NaHCO_3$ (+NaOH)	10
2	10^{-3} (Fe)	0,01 M $NaHCO_3$	6,3
3	10^{-3} (Fe)	Wasser	3,14
4	10^{-3} (Cu)	0,01 M $NaHCO_3$	7,1
5	10^{-3} (Mn)	0,01 M $NaHCO_3$	9,8

Tab. 29: Zusammenfassung der Kennparameter des modifizierten Prüfmediums des Autoklaventests

gerung wurden nun in den folgenden Autoklavenlagerungen die Bestandteile des Prüfmediums sukzessiv reduziert (Tabelle 29: Versuche 1 bis 3).

Die Reaktionen der Metallionen, die in Lösung stattfinden können, sind nicht zu vernachlässigen, da sich die Oxidationsstufen der Metallionen ändern und dadurch auch die Reaktivität. Diese Frage abschließend innerhalb dieses Projektes zu klären ist aus zeitlichen Gründen nicht möglich gewesen. Hierfür sind noch weiterführende Untersuchungen bei unterschiedlichen Konzentrationen, evtl. auch Kombinationen verschiedener Metallsalze, notwendig.

Neben Eisen(II)sulfat wurden auch Kupfer(II)sulfat sowie Mangan(II)sulfat-Varianten im Autoklavenversuch eingesetzt, um deren oxidationsunterstützenden Eigenschaften zu untersuchen.

Die Autoklavenversuche, wie sie in Tabelle 29 aufgelistet sind, wurden an einem mehrfach untersuchten KDB-Produkt (FE 15.499/2007/ERB, Produkt II) durchgeführt. An diesem Produkt wurden bereits umfangreiche Untersuchungen zur oxidativen Langzeitstabilität durchgeführt und auch ein Extrapolationsverfahren auf Basis eines modifizierten Arrheniusansatzes getestet. Die experimentelle Grundlage hierfür sind fünf Autoklavenlagerungen bei unterschiedlichen Temperaturen und Sauerstoffdrücken.

Die ersten Ergebnisse, d. h. die Betrachtung eines definierten Abbaugrads, der bisher durchgeführten Autoklaventests mit Metallionen im Vergleich zu einem Kontrollversuch ohne Zugabe von Metallionen sind in Tabelle 30 zusammengefasst. Aus der Tabelle lässt sich deutlich ein Einfluss von Metallionen auf die oxidative Beständigkeit erkennen. Dies ist nicht nur eine Frage nach der Art und Konzentration der Metallionen, sondern auch abhängig vom pH-Wert. Je geringer der pH-Wert, desto größer war in den Versuchen der Einfluss der Metallionen auf den oxidativen Abbau der KDB.

Nr.	Prüfbedingungen Medium	pH-Wert	Abbaugrad	
			τ_{80}/d	τ_{50}/d
Kontrollprobe	Standard nach DIN EN ISO 13438 (0,01M NaHCO ₃ /NaOH)	10	41,5	51,5
1	Standard nach DIN EN ISO 13438 (0,01M NaHCO ₃ /NaOH) + 10 ⁻³ mol/l Eisensulfat-Lösung	10	38,8	45,3
2	0,01M NaHCO ₃ + 10 ⁻³ mol/l Eisensulfat-Lösung	6,3	32,2	37,4
3	10 ⁻³ mol/l Eisensulfat-Lösung/Wasser	3,14	32,9	
4	0,01M NaHCO ₃ + 10 ⁻³ mol/l Kupfersulfat-Lösung	7,1	22,7	29,7
5	0,01M NaHCO ₃ + 10 ⁻³ mol/l Mangansulfat-Lösung	9,8	21,8	29,2

Tab. 30: Abnahme der mechanischen Eigenschaften der KDB (Produkt II (FE 15.449/2007/ERB)) nach Autoklavenlagerung in Abhängigkeit von unterschiedlichen Metallionen (Fe, Cu, Mn) im Prüfmedium

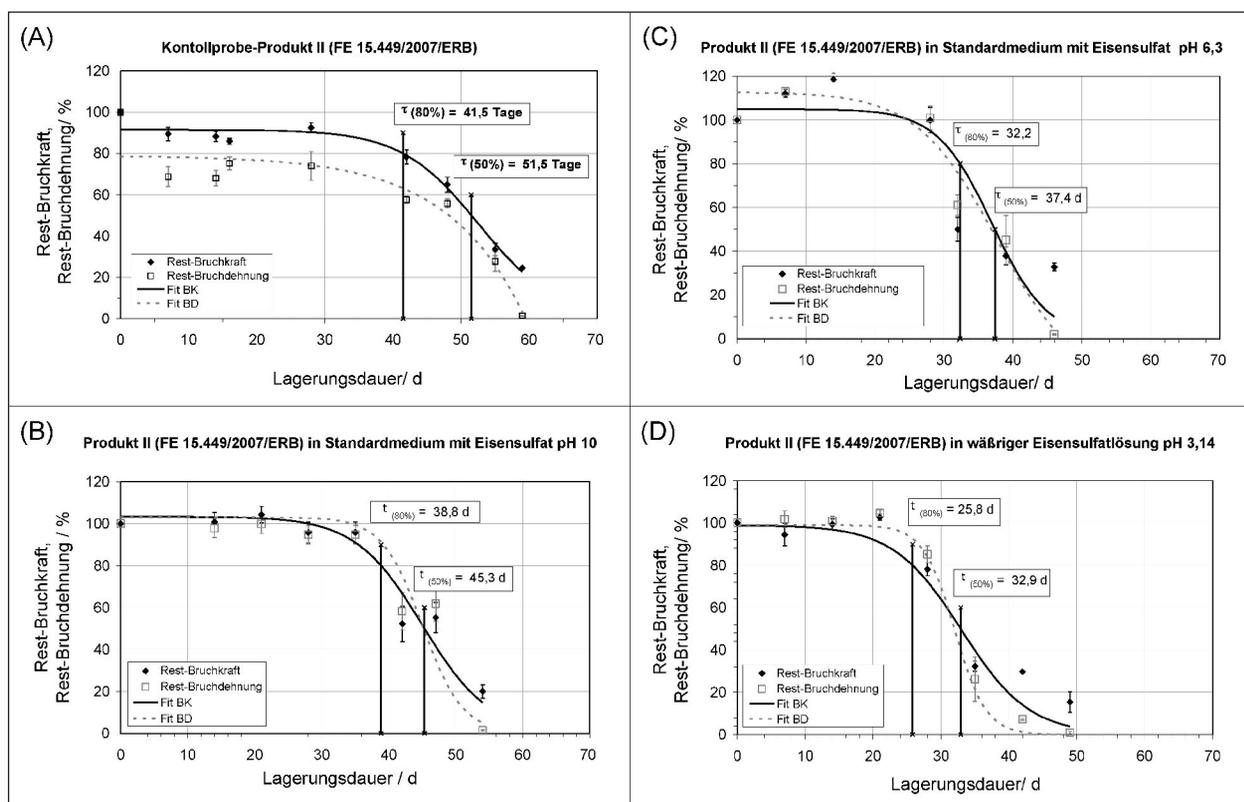


Bild 23: Darstellung der Ergebnisse der Autoklavenversuche von Produkt II (FE 15.449/2007/ERB) mit Eisen(II)sulfat modifiziertem Prüfmedium im Vergleich zu einer Kontrollprobe unter Standardbedingungen

In den Bildern 24 und 25 sind die Ergebnisse der Autoklaventests dargestellt. In den Abbildungen wird die Abnahme der mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit der Lagerdauer dargestellt. Aus der Fitkurve, die an die einzelnen Messpunkte angelegt wurde, lassen sich dann die charakteristischen Kennwerte berechnen und anhand dieser Werte eine Aussage zum Einfluss

der Metallionen auf die Oxidationsbeständigkeit treffen.

In Bild 23 (A)-(D) sind die Ergebnisse der Autoklaventests unter Einfluss von Eisen(II)salzen im Vergleich zur Kontrollprobe dargestellt.

Die Eisenkonzentration in den Versuchen 1 bis 3 beträgt 10⁻³ mol/l, aber die Zusammensetzung des

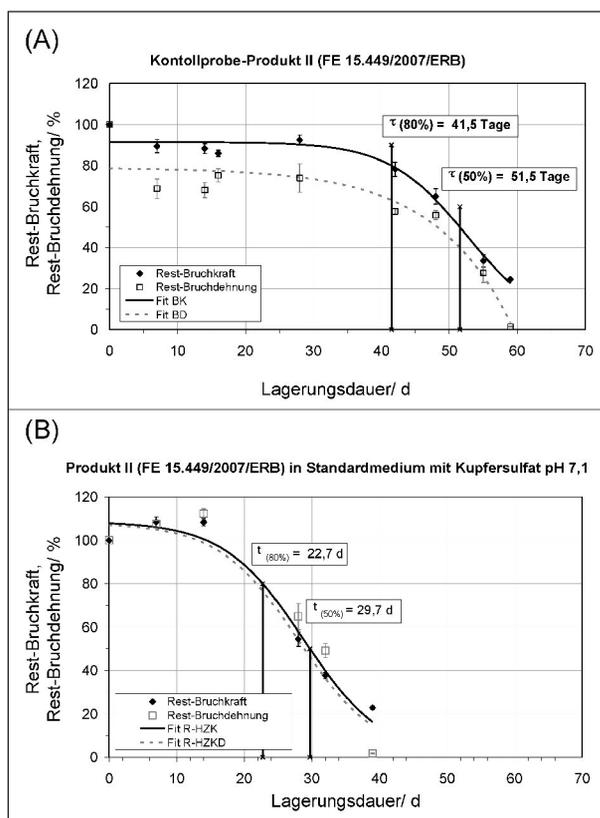


Bild 24: Darstellung der Ergebnisse der Autoklavenversuche von Produkt II (FE 15.449/2007/ERB) mit Kupfer(II)-sulfat modifiziertem Prüfmedium im Vergleich zu einer Kontrollprobe unter Standardbedingungen

Prüfmediums ist unterschiedlich, wie Tabelle 29 zeigt. Daraus ergeben sich unterschiedliche pH-Werte. Trotz gleicher Eisenkonzentration in den Prüfmedien werden unterschiedliche Ergebnisse für das Schädigungsniveau τ_{50} ermittelt.

Unter den Prüfbedingungen im Autoklaven nach Versuch 1 in Tabelle 29 ergibt sich ein τ_{50} -Wert von 45,3 Tagen mit einem Beschleunigungsfaktor im Vergleich zur Kontrollprobe von 1,1. Im Versuch 2 (pH-Wert von 6,3) ergibt sich ein τ_{50} -Wert von 37,4 Tagen mit einem Beschleunigungsfaktor im Vergleich zur Kontrollprobe von 1,3. Unter den Bedingungen im Versuch 3 (pH-Wert von 3,14) wurde ein τ_{50} -Wert von 33,8 Tagen mit einem Beschleunigungsfaktor im Vergleich zur Kontrollprobe von 1,5 berechnet.

In Bild 24 sind die Ergebnisse der Autoklavenversuche unter Einfluss von Kupfer(II)salzen im Vergleich zur Kontrollprobe grafisch dargestellt. Die Kupferkonzentration im Versuch 4 beträgt 10^{-3} mol/l, und das Prüfmedium besteht aus einer Natriumhydrogencarbonatlösung bei pH 7,1 (Tabelle 29). Unter den Bedingungen im Versuch 4 wurde ein τ_{50} -Wert von

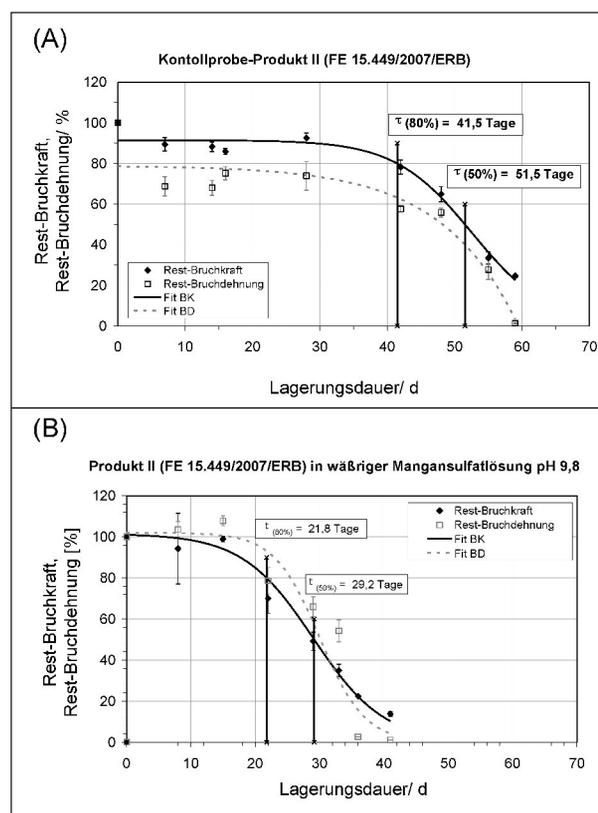


Bild 25: Darstellung der Ergebnisse der Autoklavenversuche von Produkt II (FE 15.449/2007/ERB) mit Mangan(II)-sulfat (B) modifiziertem Prüfmedium im Vergleich zu einer Kontrollprobe (A) unter Standardbedingungen

29,7 Tagen mit einem Beschleunigungsfaktor von 1,7 im Vergleich zur Kontrollprobe berechnet.

In Bild 25 sind die Ergebnisse der Autoklavenversuche unter Einfluss von Mangan(II)salzen im Vergleich zur Kontrollprobe grafisch dargestellt. Die Kupferkonzentration im Versuch 5 beträgt 10^{-3} mol/l, und das Prüfmedium besteht aus einer Natriumhydrogencarbonatlösung bei pH 9,8 (Tabelle 29). Unter den Bedingungen im Versuch 5 wurde ein τ_{50} -Wert von 28 Tagen mit einem Beschleunigungsfaktor von 1,8 im Vergleich zur Kontrollprobe berechnet.

Auf der Grundlage der hier vorliegenden Ergebnisse der Zugprüfung im Anschluss der Autoklavenbeanspruchung kann man festhalten, dass bei Anwesenheit von Eisen-, Kupfer- und Mangan(II)salzen der oxidative Abbau beschleunigt wird. Trotz gleicher Konzentration an Metallionen im Prüfmedium wurden unterschiedliche Zeiten für das Schädigungsniveau τ_{50} bestimmt, d. h., der oxidative Abbau wird metallspezifisch beschleunigt.

Im folgenden Kapitel werden auch die unterschiedlichen Schädigungsbilder in Abhängigkeit der

Metallionen beschrieben und die fotografischen Aufnahmen dazu ausgewertet. Anhand der Bilder wird deutlich, dass zwischen zwei Schadensbildern unterschieden wird. Die vorrangig im Eisen-Me-

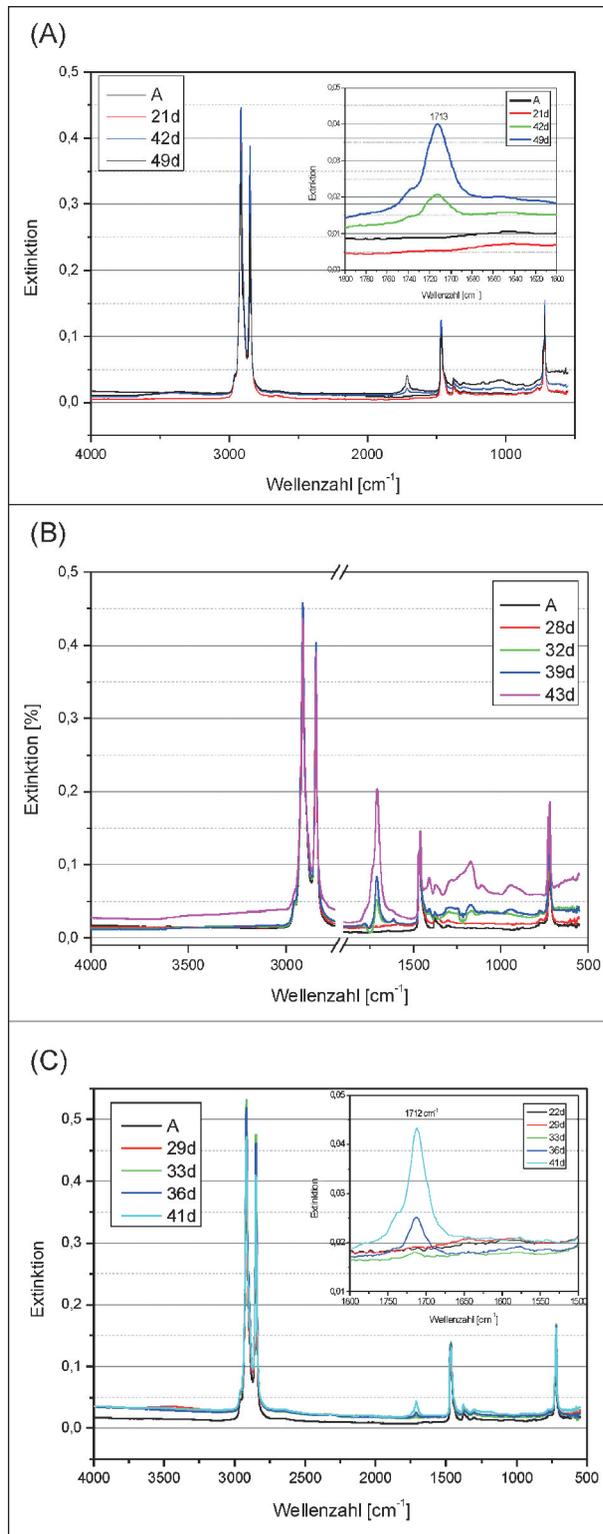


Bild 26: Zusammenfassung der ATR-IR-Spektren der im modifizierten Prüfmedium (Autoklav) gealterten KDB-Proben: (A) Eisen(II)sulfat (B) Kupfer(II)sulfat und (C) Mangan(II)sulfat

dium gelagerten Proben zeigen typische Bläschenbildung, die schon an anderen Materialien unter Standardbedingungen im Autoklaven beobachtet wurden. Abweichend von diesem Schadensbild wurden bei Anwesenheit von Kupfer und Mangan verstärkte Rissbildung bis hin zum Herausbrechen von Probenstücken aus dem Probenmaterial beobachtet.

Zur Charakterisierung der Schädigung im Material wurden an den Proben ATR-Spektren aufgenommen (IR-Spektroskopie). Durch die Absorption von IR-Strahlung werden Molekülschwingungen und -rotationen angeregt. Die Anregung der funktionellen Gruppen erfolgt energiespezifisch und ermöglicht Rückschlüsse auf die Struktur der zu untersuchenden Polymerkomponente. Über die Entstehung von neuen Banden bzw. das Verschwinden oder Verschieben von bereits bestehenden Banden werden Strukturveränderungen nach dem Alterungsprozess sichtbar gemacht.

Der oxidative Abbau von Polyethylen und Propylen erfolgt durch chemische Reaktionen im Wesentlichen unter Bildung von Hydroxyl-, Carbonyl- und Vinylgruppen. Neben Aldehyden (1.730 cm^{-1}) und Keton (1.715 cm^{-1} bis 1.720 cm^{-1}) als Carbonylgruppen entstehen bei der Oxidation also vor allem Carbonsäuregruppen (1.705 cm^{-1} bis 1.710 cm^{-1}) und im geringen Umfang Ester (1.735 cm^{-1} bis 1.740 cm^{-1}) und γ -Lactongruppen (1.777 cm^{-1}).

In Bild 26 sind die IR-Spektren der Proben nach der Autoklavenbeanspruchung mit unterschiedlichen Prüfmedien (Eisen-, Kupfer- und Mangan(II)sulfat) zusammenfassend dargestellt. Der Abbaugrad der Proben wurde anhand der Molekülschwingung der Carbonsäuregruppe (1.705 cm^{-1} bis 1.710 cm^{-1}) miteinander verglichen, da die bei allen Proben und in ausreichender Intensität vorkam.

Nach bisheriger Auswertung wurde durch das Vorhandensein von Kupfer die größte Schädigung im Polymer hervorgerufen.

9.1.2 Autoklaventest nach DIN EN ISO 13438 an ausgebauten KDB-Proben

Der Autoklavenversuch zur Untersuchung der oxidativen Beständigkeit wurde an der CHD-Tunnelbahn Carbofol aus dem Staufertunnel ($Q_{S_{west}}$ = Querschlag west) durchgeführt. Hierbei handelt es sich um eine PE-S3/S2-Carbofol-Dichtungsbahn der Firma Hüls Troisdorf AG. Der Autoklaventest

erfolgte unter Standardbedingungen nach DIN EN ISO 13438, Methode C. Für diesen Autoklavenversuch wurden wöchentliche Entnahmezeitpunkte geplant (1, 7, 14, 21 und 28 Tage). In der Schlussphase werden dann die Entnahmezeitpunkte dem Abbaugrad des Materials angepasst. Nach jeder Entnahme wurde der Zustand der Probe mittels fotografischer Aufnahme dokumentiert. Ein Teil der Aufnahmen ist in Kapitel 12.9, Bild 38 zusammengestellt. Diese Aufnahmen zeigen deutlich, dass sich im Zuge der Autoklavenlagerung eine vermehrte Blasenbildung einstellt. Trotz dieses Schadensbilds sind die Ergebnisse der Zugversuche auswertbar. In Bild 27 ist ein Querschnitt einer Blase mittels Mikroskopie vergrößert dargestellt.

Bild 28 zeigt die Ergebnisse aus der Autoklavenlagerung. Der Abfall der mechanischen Eigenschaften setzt nach einer 14-tägigen Induktionsphase

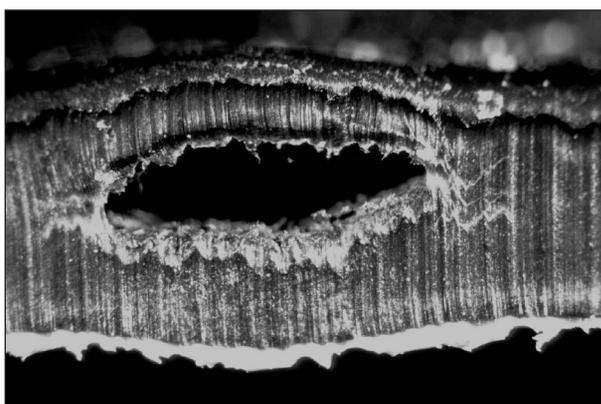


Bild 27: Mikroskopische Aufnahme eines Blasen-Querschnitts in der Grundbahn mit 6,5facher Vergrößerung (Carbofol-CHD-Tunnelbahn aus dem Staufertunnel QS_{west})

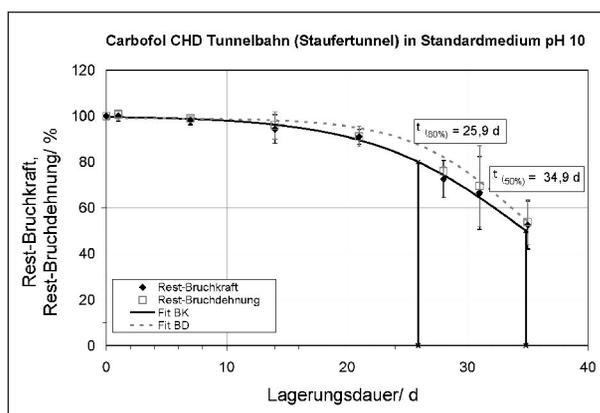


Bild 28: Ergebnisse der beschleunigten Alterung mittels Autoklavenmethode unter Standardbedingungen nach DIN EN ISO 13438, Methode C

ein. Aus Bild 28 wird deutlich, dass kein drastischer Abfall der Bruchkraft und -dehnung erfolgt, sondern eine kontinuierliche Abnahme über einen Zeitraum von ca. 40 Tagen. Für die charakteristischen Kennwerte τ_{80} und τ_{50} wurde ein Wert von ca. 26 bzw. 35 Tagen bestimmt. Nach heutigem Stand der Technik muss die KDB die Oxidationsbeständigkeit mit einem Autoklaventest bzw. Ofentest nachweisen. Die Beanspruchungsbedingungen im Autoklavenversuch (DIN EN ISO 13438) und die Anforderungen zum Bestehen der Tests nach TL/TP KDB sind wie folgt festgelegt:

- 80 °C/50 bar Sauerstoffdruck,
- 14 d Lagerungsdauer,
- Änderung der Reißfestigkeit und -dehnung gegenüber dem Ausgangswert ≤ 50 %.

Die untersuchte KDB-Probe aus dem Staufertunnel hätte diese Anforderungen erfüllt und hätte die Prüfung im Zuge der Baustoffeingangskontrolle bestanden. Nach den Versuchsbedingungen nach DIN EN ISO 13438 sind aber nur Nutzungsdauern von 25 Jahren abgedeckt.

Nach bisherigen Erfahrungen in der BAM bei der Untersuchung der Oxidationsbeständigkeit von KDB-Produkten mittels Autoklaventest ist das Kriterium zum Bestehen des Test deutlich zu niedrig angesetzt und kann nicht die gewünschte Nutzungsdauer von 100 Jahren für diese Produkte gewährleisten. Diese Schlussfolgerung wird durch das Ergebnis der Lebensdauerabschätzung auf Basis von Autoklaventests, wie sie im Vorhaben FE 15.449/2007/ERB an einem Produkt exemplarisch durchgeführt wurde, untermauert. Für dieses Produkt wurden unter Standardbedingungen im Autoklavenversuch (80 °C/50 bar Sauerstoff) charakteristische Kennwert für τ_{80} und τ_{50} von ca. 42 bzw. 52 Tagen erhalten. Der Wert von τ_{50} ist um 17 Tage länger als der des KDB-Produkts aus dem Staufertunnel.

Die KDB-Probe aus dem Wattkopftunnel konnte nicht weiter mit dem Autoklav untersucht werden, da bereits nach einem Tag signifikante Schädigungen durch Blasenbildung zu beobachten waren. Diese Schädigungen sind in Bild 29 dargestellt.

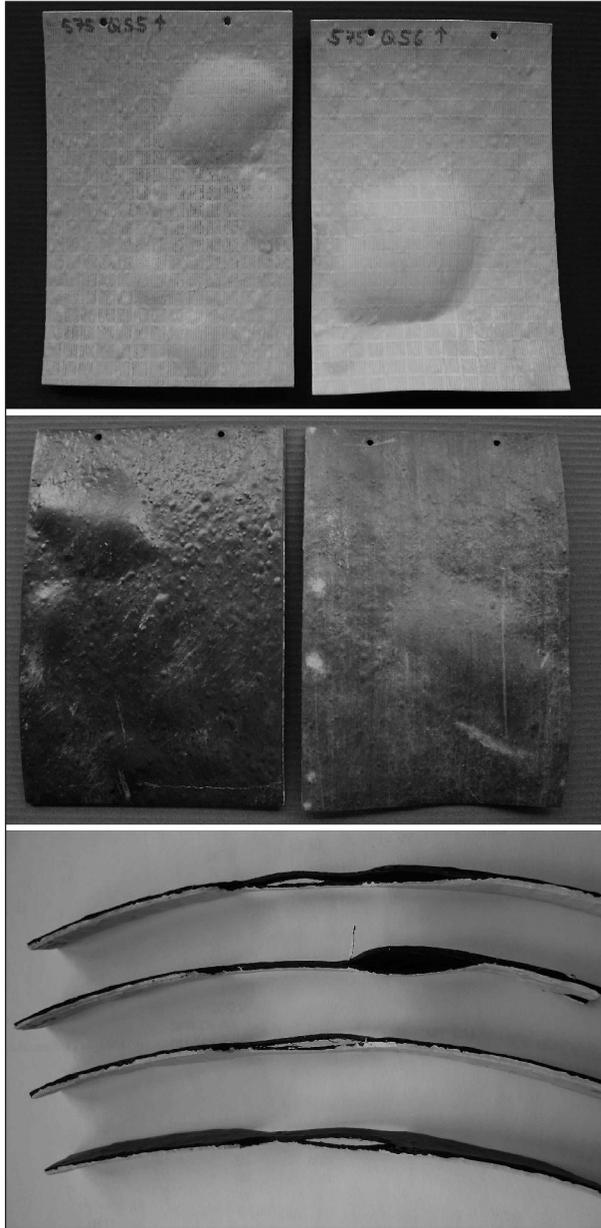


Bild 29: Darstellung des Probenmaterials nach einem Tag Autoklav unter Standardbedingungen bei 80 °C und 50 bar Sauerstoffdruck. Darstellung der Signalschicht (oben), der Grundbahn (Mitte) und der ausgestanzten Prüfkörper Typ 5A (unten)

9.2 Ofentest nach DIN EN 14575

Die Probenkörper wurden nach DIN EN 14575 für 90 Tage bei 85 °C im Ofen gelagert und anschließend die Reißfestigkeit und -dehnung im Vergleich zu einer Kontrollprobe bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 31 dargestellt.

Nach heutigem Stand der Technik (TL/TP KDB) muss die KDB die Oxidationsbeständigkeit durch einen Ofentest nachweisen. Die Beanspruchungsbedingungen im Ofenversuch und die Anforderun-

	Ofenlagerung nach DIN EN 14575			
	Kontrollprobe		Nach 90 Tagen	
Tunnel	BK _{max} /N	BD _{max} /%	BK _{max} /N	BD _{max} /%
Wattkopftunnel	141,93	614,1	166,18	667,3
Staufertunnel	121,76	432,25	135,47	402,7

Tab. 31: Zusammenfassung der Ergebnisse der Zugversuche nach DIN EN ISO 527 nach erfolgter Ofenlagerung nach DIN EN 14575

gen zum Bestehen der Tests sind wie folgt festgelegt:

- 85 °C,
- 90 d Lagerungsdauer,
- Änderung der Reißfestigkeit und -dehnung gegenüber dem Ausgangswert ≤ 20 %.

Die untersuchten KDB-Proben hätten diese Anforderungen erfüllt und hätten die Prüfung im Zuge der Baustoffeingangskontrolle bestanden.

10 Schlussfolgerungen

Im Forschungsvorhaben wurde untersucht, inwieweit sich die Materialeigenschaften von Kunststoffdichtungsbahnen über einen gewissen Zeitraum unter den gegebenen Beanspruchungsbedingungen im Tunnelbauwerk verändert haben. Für das Vorhaben wurden von Seiten der BAST aus fünf bestehenden Straßentunneln KDB-Proben und wenn vorhanden die zugehörigen geotextilen Schutzschichten zur Verfügung gestellt. Nach den vorliegenden Produktdatenblättern der KDB-Produkte handelt es sich dabei um drei unterschiedliche CHD-Carbofo-Dichtungsbahnen der Firma HT Troplast AG und HÜLS Troisdorf AG sowie um die Produkte Sarnafil MP 910-20/30 B2 der Firma Sarnafil AG.

Der Zustand der ausgebauten KDB-Proben nach erster visueller Prüfung war sehr unterschiedlich und reicht von sehr gut bis stark beschädigt. Inwieweit die Schädigungen der KDB-Proben vom Ausbau herrühren, konnte abschließend nicht geklärt werden, da der Ausbau nicht fotografisch dokumentiert wurde. Die genaue Dokumentation von Probenentnahmen für Forschungsvorhaben sollte bei Folgeprojekten deutlich verbessert werden.

10.1 Erkenntnisse aus der Materialcharakterisierung

Für die Materialcharakterisierung der ausgebauten KDB-Proben wurden produktspezifische Parameter wie die KDB-Dicke, das Verhältnis der Dicke der Signalschicht zur Dicke der Grundbahn, die Dichte, das Schmelz- und Kristallisationsverhalten (DSC), die Oxidationsstabilität (Std.-OIT) und das mechanische Verhalten (Reißfestigkeit und -dehnung) der KDB und der Fügenähte (Scher- und Schälversuche) bestimmt. Des Weiteren wurden an einer KDB-Probe die Berstdruckfestigkeit durch Bestimmung der Wölbbogendehnung in einem mehrachsigen Zugversuch und die Wasserdurchlässigkeit untersucht und die Ergebnisse mit den Anforderungen aus der TL/TP KDB bewertet.

Die produktspezifischen Parameter sollten dann mit Rückstellmustern der Hersteller verglichen werden. Im Zuge der Materialcharakterisierung der ausgebauten KDB-Proben und der Rückstellmuster, die von der Herstellerfirma zur Verfügung gestellt wurden, konnte keine eindeutige Korrelation zwischen den ausgebauten KDB-Proben und den Rückstellmustern hergestellt werden. Um dies zu gewährleisten, wird empfohlen, eine bessere Dokumentation über die eingebauten Produkte (Rollnummer und dazugehörige Bauabschnitte) durchzuführen. Diese Informationen müssen dann über die entsprechende Nutzungsdauer der KDB-Produkte archiviert werden. Parallel dazu ist dem Bauherrn bzw. Tunnelbetreiber die Entnahme von Rückstellmustern (direkt auf der Baustelle) anzuraten, die unter definierten Bedingungen eingelagert werden.

Einige KDB-Proben wiesen deutliche Schädigungen in der Kunststoffdichtungsbahn auf, die nicht durch den Ausbau aus dem Tunnel zu erklären waren. Aus diesem Grund wurden weitere Prüfungen sowohl an der KDB als auch an den geotextilen Schutzschichten durchgeführt. Hierfür wurden die geschädigten Bereiche der KDB mittels Mikroskopie (s. Kapitel 8.5.5) genauer betrachtet. Als Ergebnis der Untersuchung ist festzustellen, dass es sich um Abdrücke der felsseitigen Spritzbetonschale handelt. Diese Art von Schädigungen wurde wahrscheinlich schon während der Einbauphase verursacht, da die geotextilen Schutzschichten keinen ausreichenden Schutz gewährleisteten. Um diesen Zustand genauer zu untersuchen, wurden zusätzliche Untersuchungen, d. h. die Bestimmung der flächenbezogenen Masse und der Dicke unter 2 kPa und 20 kPa Normalspannung, an der geo-

textilen Schutzschicht durchgeführt. Die zum damaligen Zeitpunkt eingesetzten Produkte erfüllen den heutigen Standard nicht.

Für die Charakterisierung von KDB-Produkten (Polyolefinbasis), die im Zuge von Nachrüstungsarbeiten aus Tunnelbauwerken entnommen werden, empfehlen wir folgende Methoden:

- IR-Spektroskopie (Identifikation Polymerkomponente),
- DSC-Analyse (Identifikation Polymerkomponente, thermische Eigenschaften),
- Dicke der KDB und Signalschicht und deren Verhältnis zueinander,
- Dichte der KDB,
- Reißfestigkeit- und -dehnung,
- Verhalten der Fügenaht (Schäl- und Scherversuch),
- Betrachtung der geotextilen Schutzschicht,
- Mikroskopie zur Schadensanalyse,
- Oxidationsbeständigkeit.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass alle ausgebauten KDB die Funktion als Abdichtungssystem erfüllen. Die Anforderungen an KDB-Produkte haben sich im Zuge der Zeit deutlich erhöht und spiegeln sich in den aktuellen Regelwerken und Richtlinien Ril 853 (Deutsche Bahn AG) und TL/TP KDB (BMVBS/BASt) wider.

10.2 Erkenntnisse zur Oxidationsbeständigkeit

Für die Beurteilung der Oxidationsbeständigkeit unter Einfluss von Metall(II)salzen wie Eisen, Kupfer und Mangan wurden mit dem Autoklaventest erste Untersuchungen an einem KDB-Produkt (Produkt II aus dem FE 15.449/2007/ERB) durchgeführt. Die Versuche wurden in Anlehnung an die DIN EN ISO 13438 (Methode C) unter Standardbedingungen bei 80 °C und 50 bar Sauerstoffdruck mit einem modifizierten Prüfmedium durchgeführt. Der Alterungszustand der Proben wurde mittels Zugversuch nach DIN EN ISO 527 und ATR-IR-Spektroskopie charakterisiert. Anhand der ersten Ergebnisse ist der Einfluss von Metallsalzen im Bergwassermedium nicht zu vernachlässigen.

Im Vorhaben wurden zunächst Untersuchungen im Autoklaven bei einer konstanten Metallsalzkonzen-

tration von 10^{-3} mol/l durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass durch Anwesenheit von Metallsalzen im Prüfmedium durchaus die Oxidationsbeständigkeit des KDB-Produktes herabgesetzt wird. Bei den Autoklavenversuchen wurden metallspezifische Unterschiede in der Abnahme der Induktionsphase festgestellt. Die Induktionsphase im mit Mangan und Kupfer modifizierten Prüfmedium beträgt ca. 14 Tage. In Anwesenheit von Eisenionen wird die Induktionsphase in Abhängigkeit vom pH-Wert des Prüfmediums auf ca. 21-28 Tage verkürzt. Im Vergleich dazu besitzt die Kontrollprobe eine Induktionsphase von ca. 35 Tagen.

Auf Basis der vorliegenden Ergebnisse zur Untersuchung der Oxidationsbeständigkeit in Anwesenheit von Metallionen wird empfohlen, im Zuge einer Erstprüfung eines KDB-Produktes neben dem Standard-Autoklavenversuch auch einen Versuch im Autoklaven mit Metallionen im Prüfmedium durchzuführen. Die Parameter des Prüfmediums kann man an die Ergebnisse der Bewässerungsanalysen koppeln.

Im Rahmen des Vorhabens wurde eine 17 Jahre alte ausgebaute KDB-Probe (Staufertunnel) auf ihre Oxidationsstabilität mittels Autoklaventest nach DIN EN ISO 13438 (Methode C) und Ofentest nach DIN EN 14575 untersucht.

Bei dieser KDB-Probe handelt es sich um eine CHD-Carbofol-2,00-mm-Dichtungsbahn für den Tunnelbau. Die Ergebnisse des Autoklaventests sind in Kapitel 9.1.2 zusammengestellt. Für dieses Produkt wurde ein charakteristischer Kennwert für τ_{50} von rund 35 Tagen ermittelt. Nach den bisherigen Erfahrungen ist dieser Wert für eine geplante Funktionsdauer der KDB von 100 Jahren als kritisch anzusehen. Das Produkt erfüllt formal die Anforderungen nach TL/TP KDB. Diese Anforderungen gewährleisten aber zum jetzigen Zeitpunkt nur eine Funktionsdauer der KDB-Produkte von 25 Jahren.

Im vorherigen Vorhaben 15.449/2007/ERB wurde an einem Produkt exemplarisch eine Nutzungsdauerbestimmung durchgeführt. Als Ergebnis dieser Untersuchung wurde ein Nutzungsdauerparameter von 106 ± 44 Jahre berechnet. Für dieses Produkt wurde ein charakteristischer Kennwert für τ_{50} von rund 52 Tagen ermittelt. Würde dieser Wert als Grenzwert festgelegt werden, zeigt sich, dass der ermittelte Wert τ_{50} von ca. 35 Tagen am gealterten Produkt diese Anforderungen nicht erfüllt.

Die Anforderungen in der TL/TP KDB sollten für die Eigenschaft Oxidationsbeständigkeit für KDB-Produkte mit einer Nutzungsdauer von 100 Jahren

deutlich erhöht werden. Zum jetzigen Zeitpunkt ist hier nur der Indextest (Einpunktmessung) mit einer Versuchsdauer von 14 Tagen verankert. Für eine genauere Betrachtung des Oxidationsverhaltens ist es auf jeden Fall notwendig, den zeitabhängigen Verlauf des oxidativen Abbaus zu betrachten und ein definiertes Schädigungsniveau (z. B. 50 % Restfestigkeit) festzulegen.

11 Empfehlungen

11.1 Dokumentation und Identifikation

Beim Einbau von KDB-Dichtungssystemen wird den Bauherren empfohlen, für die Beständigkeit relevante Daten der KDB inkl. der geotextilen Schutzschicht besser zu dokumentieren und außerdem gut gekennzeichnete Rückstellproben (z. B. mit der Rollennummer) zu entnehmen und die gesamten Informationen über einen definierten Zeitraum (Nutzungsdauer des Bauwerks) aufzubewahren. Dabei sollten folgende Hinweise beachtet werden:

Dokumentation von produktrelevanten Daten der Geotextilen in der Einbauphase:

- Hersteller und/oder Lieferant,
- Produktnahme,
- Produkttyp,
- Identifikation der Liefereinheit (z. B. Rollennummer),
- Abmessungen der Liefereinheit (Rollenware: Länge x Breite (m), Gewicht),
- Produktbeschreibung nach ISO 10318 [33],
- Polymerkomponenten (z. B. Blends-Gewichtsanteile der jeweiligen Polymere),
- Entnahme und Aufbewahrung von Rückstellmustern von einer unabhängigen Stelle.
- Als Rückstellmuster sollte mindestens eine 50 cm breite Probe über die gesamte Breite der KDB (Kennzeichnung der Maschinenrichtung) entnommen und unter geeigneten Lagerbedingungen (keine UV-Strahlung, konstante Temperatur und Luftfeuchtigkeit) archiviert werden.
- Dokumentation der eingebauten Produkte durch Aufzeichnung der Rollennummer,
- Dokumentation der nachzuweisenden Produkteigenschaften nach TL/TP KDB für Dichtungs-

bahnen und TL/TP SD für Schutz- und Drän-schichten,

- Einführung einer Produktkennzeichnung über die gesamte Produktlänge.

Dokumentationen von produktrelevanten Daten der Geotextilien in der Ausbauphase:

- Identifikation und Beschreibung des Bauwerkes,
- Beschreibung der Umgebung der Geotextilien (KDB, geotextile Schutzschicht),
- fotografische Dokumentation vor und nach der Entnahme,
- mechanische Beschädigungen bei der Probenentnahme durch geeignete Verfahren minimieren,
- Kennzeichnung (MD-, CMD-Richtung; Entnahmeort und Baustelle) der Probe vor dem Ausbau aus dem Tunnel,
- Zusammenstellung und Archivierung der Daten an geeigneter Stelle.

Dokumentation der Umgebungsbedingungen in der Ausbauphase der Geotextilien:

- Temperatur,
- Wasserentnahme und -analysen eventuell Dokumentation von geologischen Auffälligkeiten,
- Besonderheiten, z. B. Versinterung.

Identifikation der KDB

Das Produkt muss auch ohne Verpackungseinheit auf der Baustelle während des Einbaus zu identifizieren sein. Das bedeutet, dass der Produktnahme und/oder Produkttyp gut lesbar in definierten Abständen über das gesamte KDB-Produkt aufgebracht werden muss (z. B. durch Aufdrucke). Aufgrund dieser Kennzeichnung wäre eine spätere Identifikation deutlich einfacher durchzuführen.

Die Probenentnahme und Identifikation der KDB und geotextilen Schutzschicht sollten für zukünftige Projekte unter einheitlichen Bedingungen erfolgen und gut dokumentiert werden. Um diesen Vorgang zu vereinheitlichen, ist die Verwendung von bereits bestehenden Normen von Vorteil. Die aufgeführten Normen geben wichtige Hinweise für die Produktidentifikation von Geotextilien auf der Baustelle und eine Anleitung zum Verfahren zum Ausgraben von Proben, inklusive einem Formular zur Identifizie-

rung des Bauwerks, der Umgebung und des Geotextils.

- DIN EN ISO 13437 [34] „Verfahren zum Einbau und Ausgraben von Proben und Prüfung von Messproben im Labor“ von Geotextilien und geotextilverwandte Produkte),
- DIN EN ISO 10320 [35] „Geotextilien und geotextilverwandte Produktidentifikation auf der Baustelle“.

11.2 Empfehlungen für die Überarbeitung der TL/TP KDB

Auf Grundlage der Ergebnisse der Forschungsvorhaben FE 15.449/2007/ERB und 15.461/2008/ERB werden folgende Überarbeitungen empfohlen.

Empfehlungen zur Überarbeitung der TL/TP KDB Kapitel 4.4:

- (1) Die KDB sowie die zugehörigen Profilländer sind auf Basis von Polyethylen oder Polyvinylchlorid herzustellen.
- (2) „Die Profilländer sollen die gleiche Formmassenzusammensetzung wie die KDB aufweisen. Geringfügige Rezepturabweichungen zur Verbesserung der Herstellbarkeit sind zulässig“, müssen aber deklariert werden und dürfen die Langzeitbeständigkeit der Fugenländer nicht beeinflussen. (neu).

Empfehlungen zur Überarbeitung der TL/TP KDB (Tabelle 1):

- Lfd. Nr. 1: Deklaration des Polymerrohstoffs (PE, PP) und bei Polymerblends den prozentualen Anteil der Polymerkomponenten, z. B. Polyethylen mit 5 % EVA-Anteil.
- Lfd. Nr. 5: Häufigkeit und Methode für die Messung der Signalschicht festlegen.
- Lfd. Nr. 10: Die Norm DIN EN 14151 zur Bestimmung der Berstdruckfestigkeit/Wölbdehnung im mehrachsigen Zugversuch wurde durch die DIN 61551:2008 ersetzt.
- Lfd. Nr. 15: Oxidationsbeständigkeit: Nachweis durch Ofentest (DIN EN 14575) und Autoklaventest (DIN EN ISO 13438); Anpassung der Prüfbedingungen für die jeweilige Nutzungsdauer (25, 50 bzw. 100 Jahre) siehe Überarbeitung des Annex B der DIN EN 13491.

12 Dokumentationen

12.1 Dokumentation des Ausbauszustands der KDB-Proben

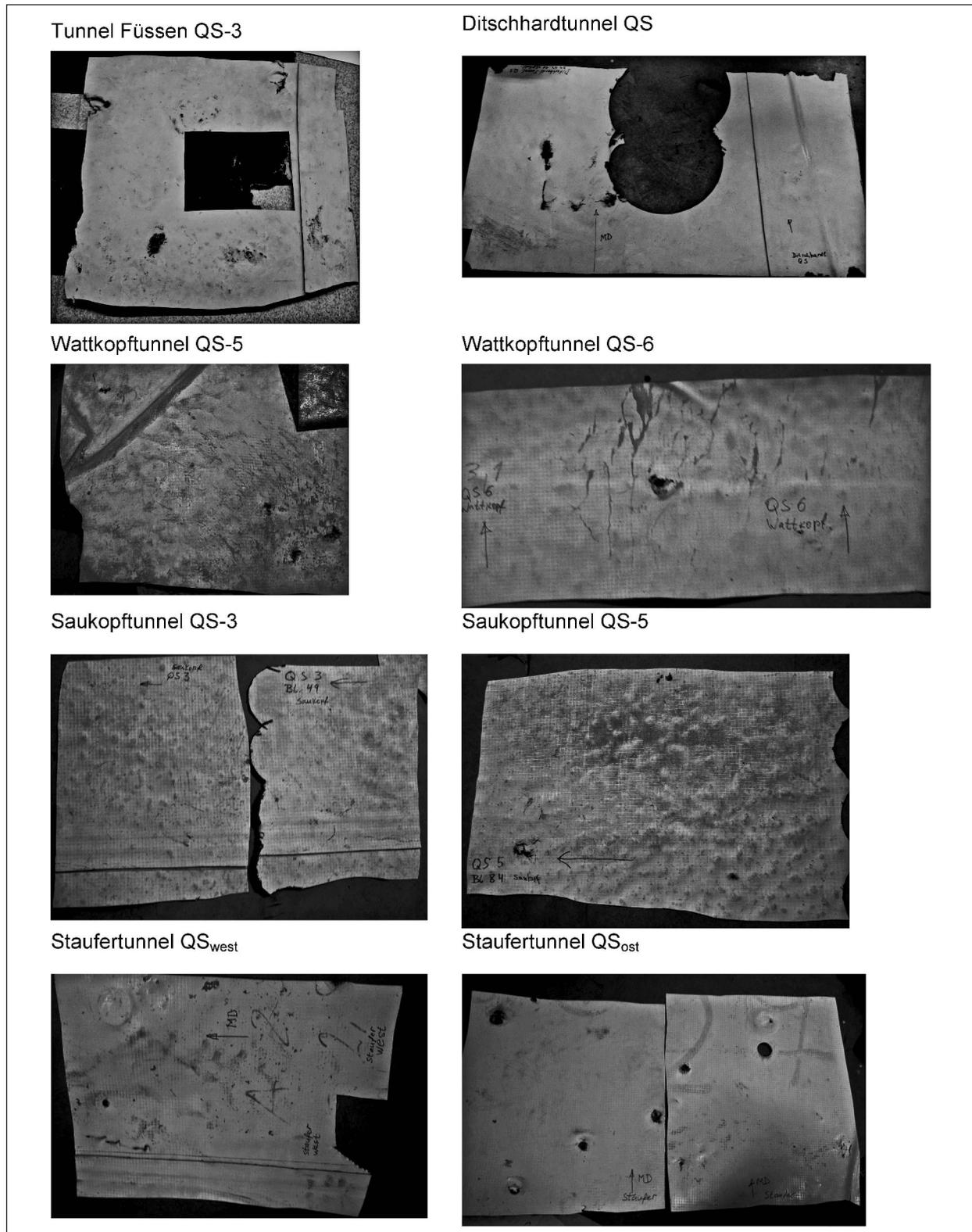


Bild 30: Dokumentation des Ausbauszustands der KDB-Proben

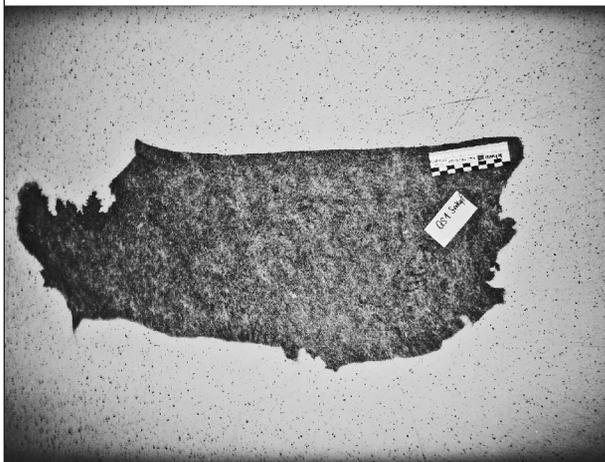
12.2 Dokumentation des Ausbaus - stands der geotextilen Schutz- schicht



Wattkopftunnel QS5



Staufertunnel QS_{west}



Saukopftunnel QS1



Staufertunnel QS_{ost}

Bild 31: Dokumentation des Ausbauszustands der entnommenen geotextilen Schutzschichten

12.3 Dokumentation der Vorschädigungen im Material

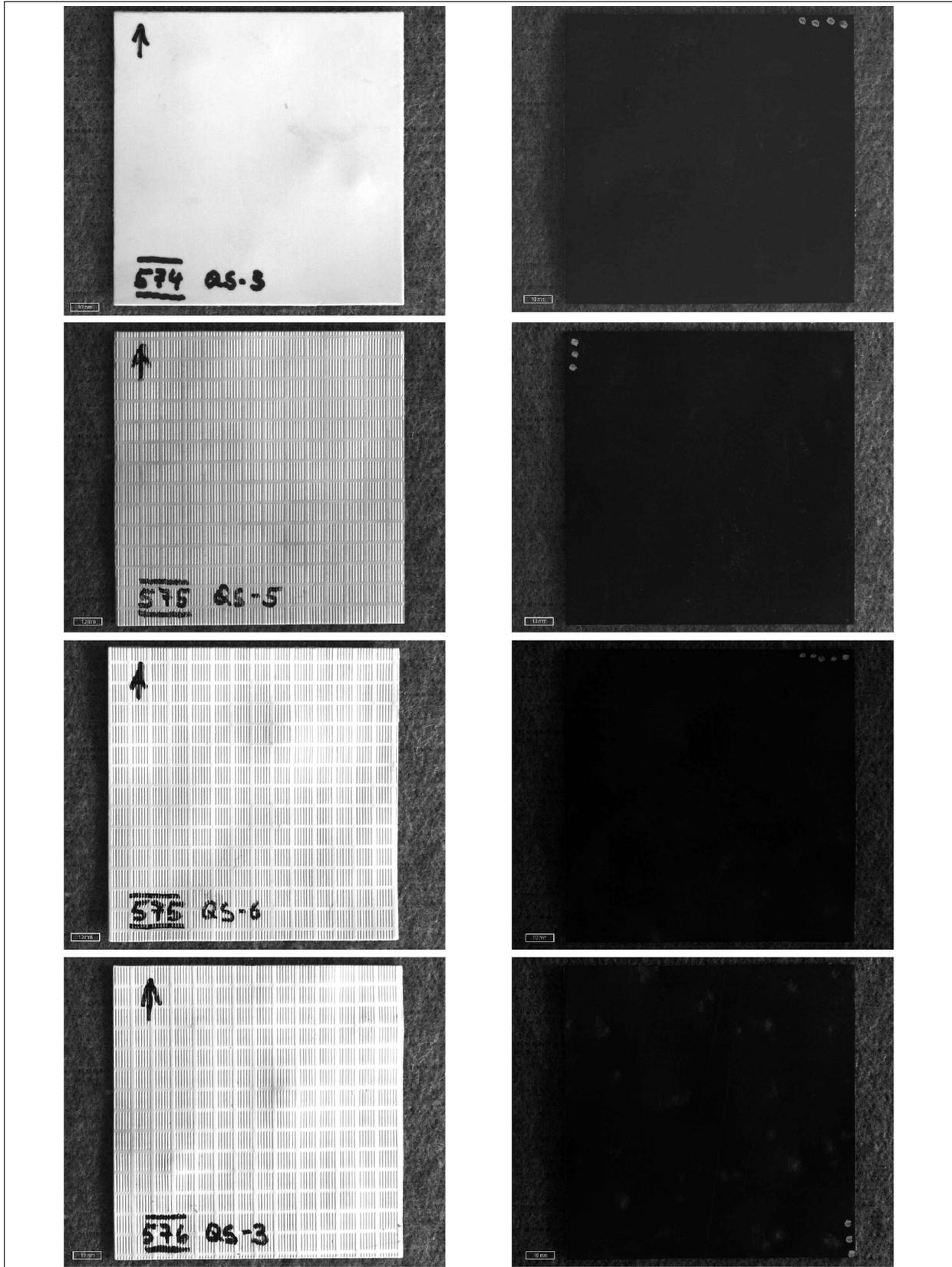


Bild 32: Dokumentation des Schädigungszustands der ausgebauten KDB-Produkte nach erfolgter Reinigung;
574 = Tunnel Füßen; 575 = Wattkopftunnel; 576 = Saugkopftunnel; 577 = Staufertunnel; 578 = Ditschhardtunnel

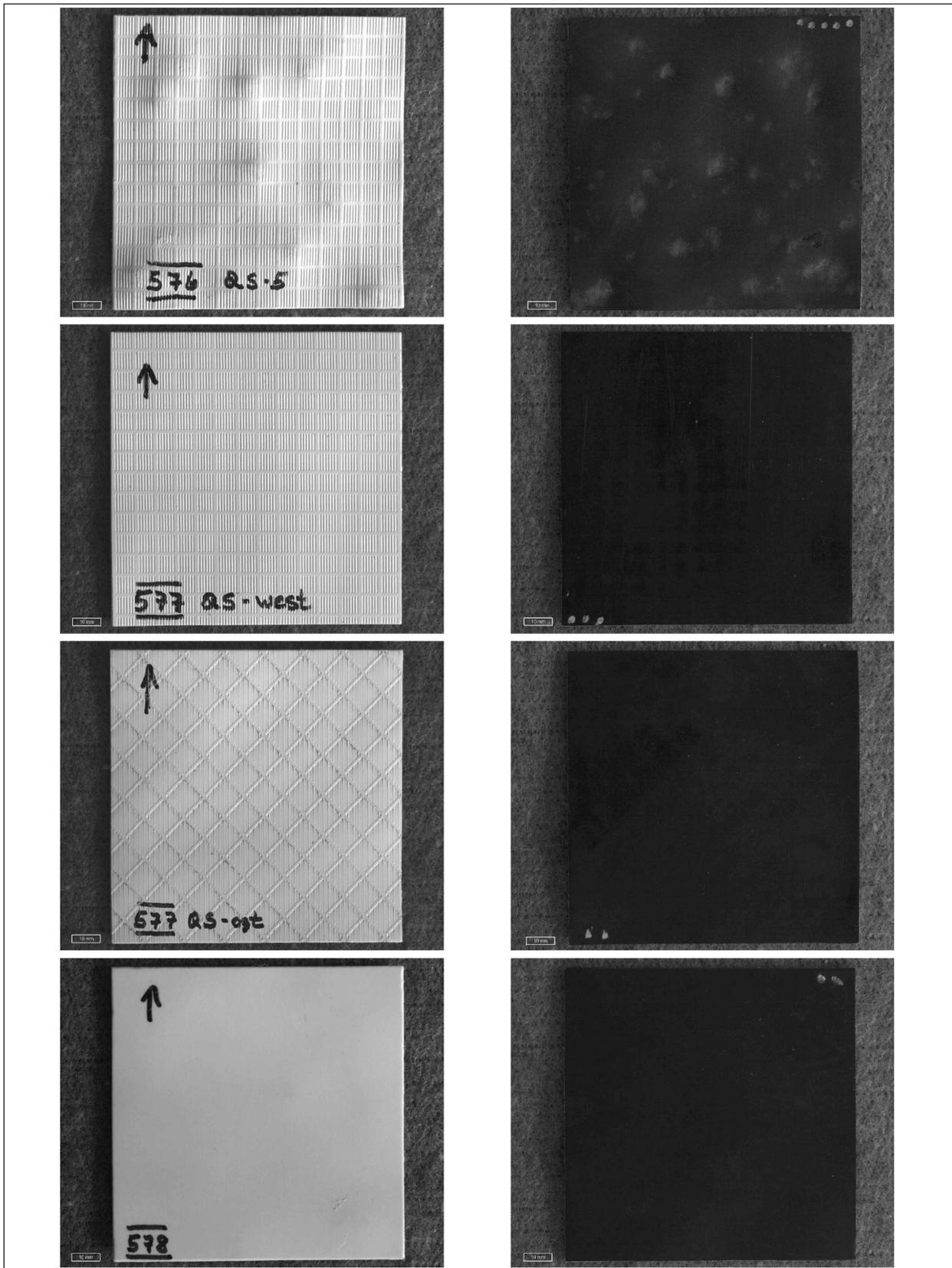


Bild 32: Fortsetzung

12.4 Dokumentation der Materialschädigung während der Autoklavenlagerung (10^{-3} mol/l Eisensulfat im Standardmedium bei pH 10)

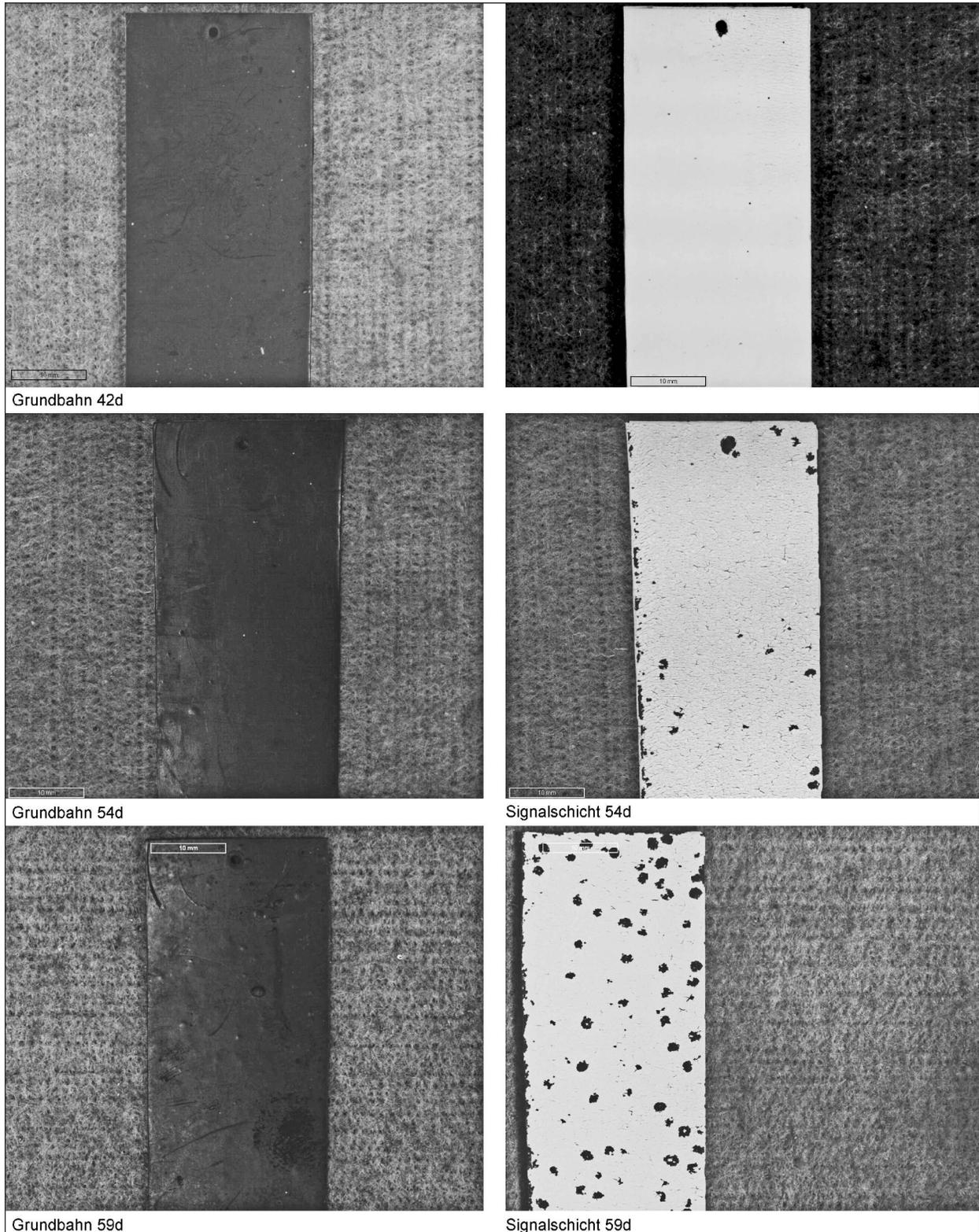
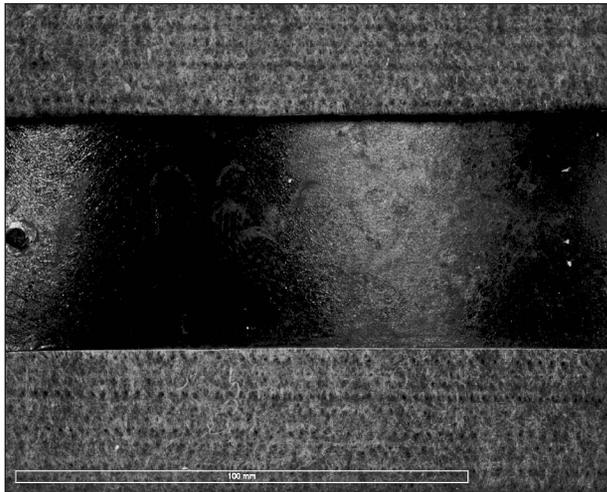
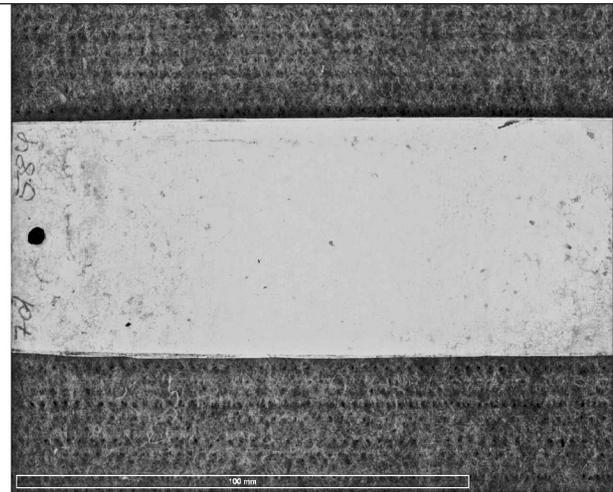


Bild 33: Schadensbilder nach der Entnahme aus dem Autoklaven (Standardmedium und 10^{-3} mol/l Eisen(II)sulfat (pH 10))

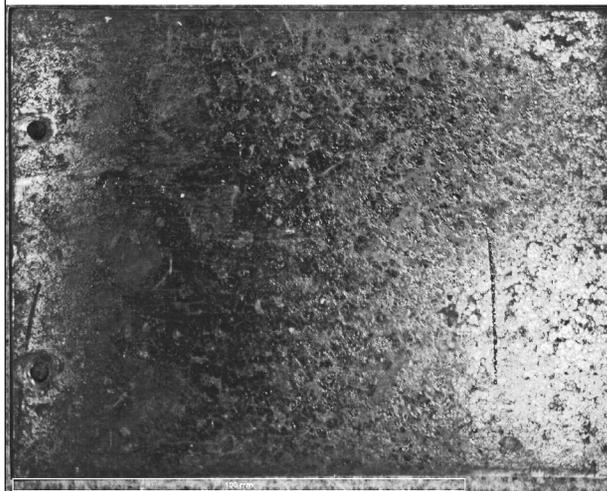
**12.5 Dokumentation der Materialschädigung während der Autoklaven -
lagerung (10^{-3} mol/l Eisensulfat im
Standardmedium bei pH 6,3)**



Grundbahn 7d



Signalschicht 7d



Grundbahn 28d



Signalschicht 28d



Grundbahn 32d



Signalschicht 32d

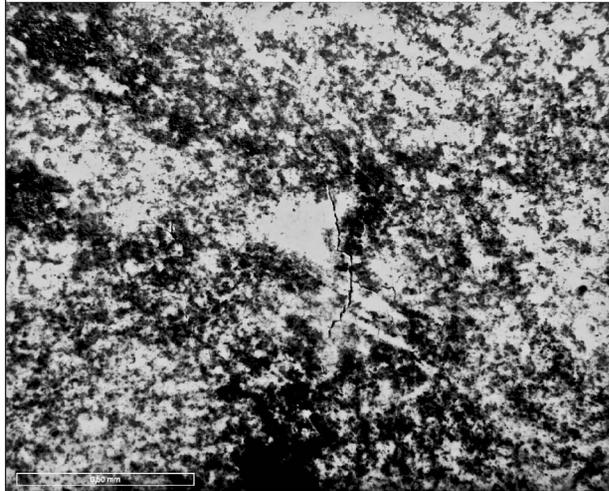
Bild 34: Schadensbilder nach der Entnahme aus dem Autoklaven (Standardmedium und 10^{-3} mol/l Eisen(II)sulfat (pH 6,3))



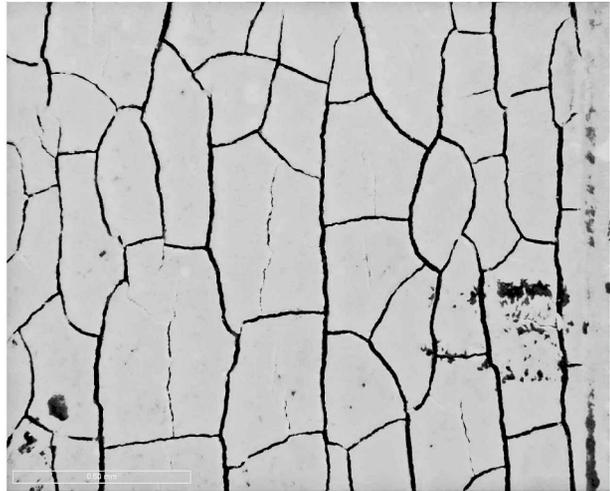
Grundbahn 39d



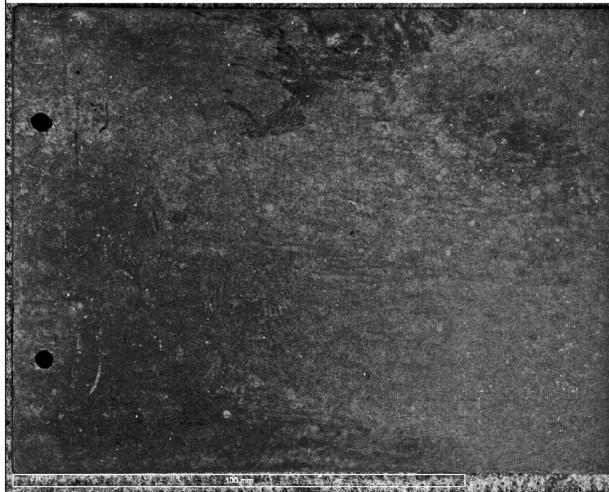
Signalschicht 39d



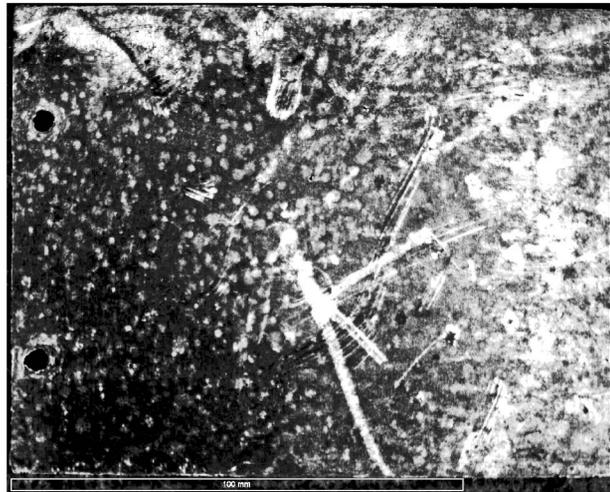
Grundbahn 39d; 50-fache Vergrößerung



Signalschicht 39d; 50-fache Vergrößerung

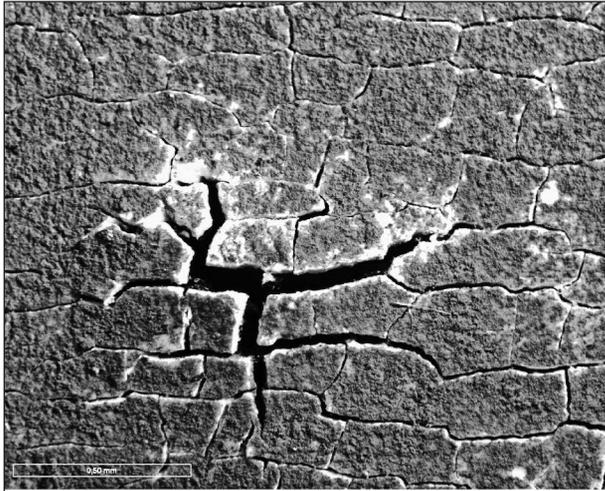


Grundbahn 46d

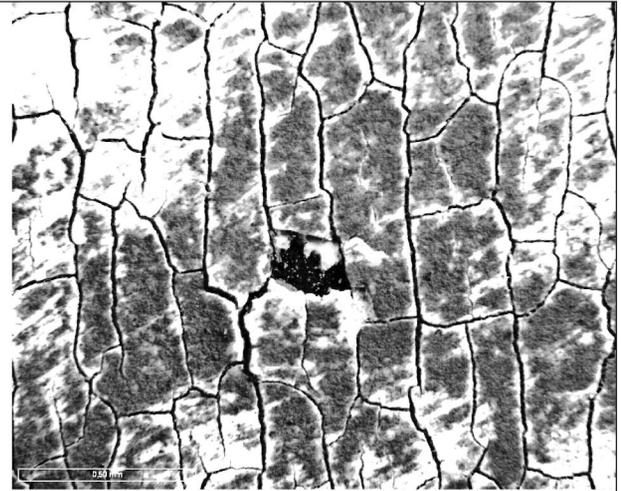


Signalschicht 46d

Bild 34: Fortsetzung



Signalschicht 46d; 50-fache Vergrößerung



Signalschicht 46d; 50-fache Vergrößerung

Bild 34: Fortsetzung

12.6 Dokumentation der Materialschädigung während der Autoklavenlagerung (10^{-3} mol/l Eisensulfat in Wasser bei pH 3,14)

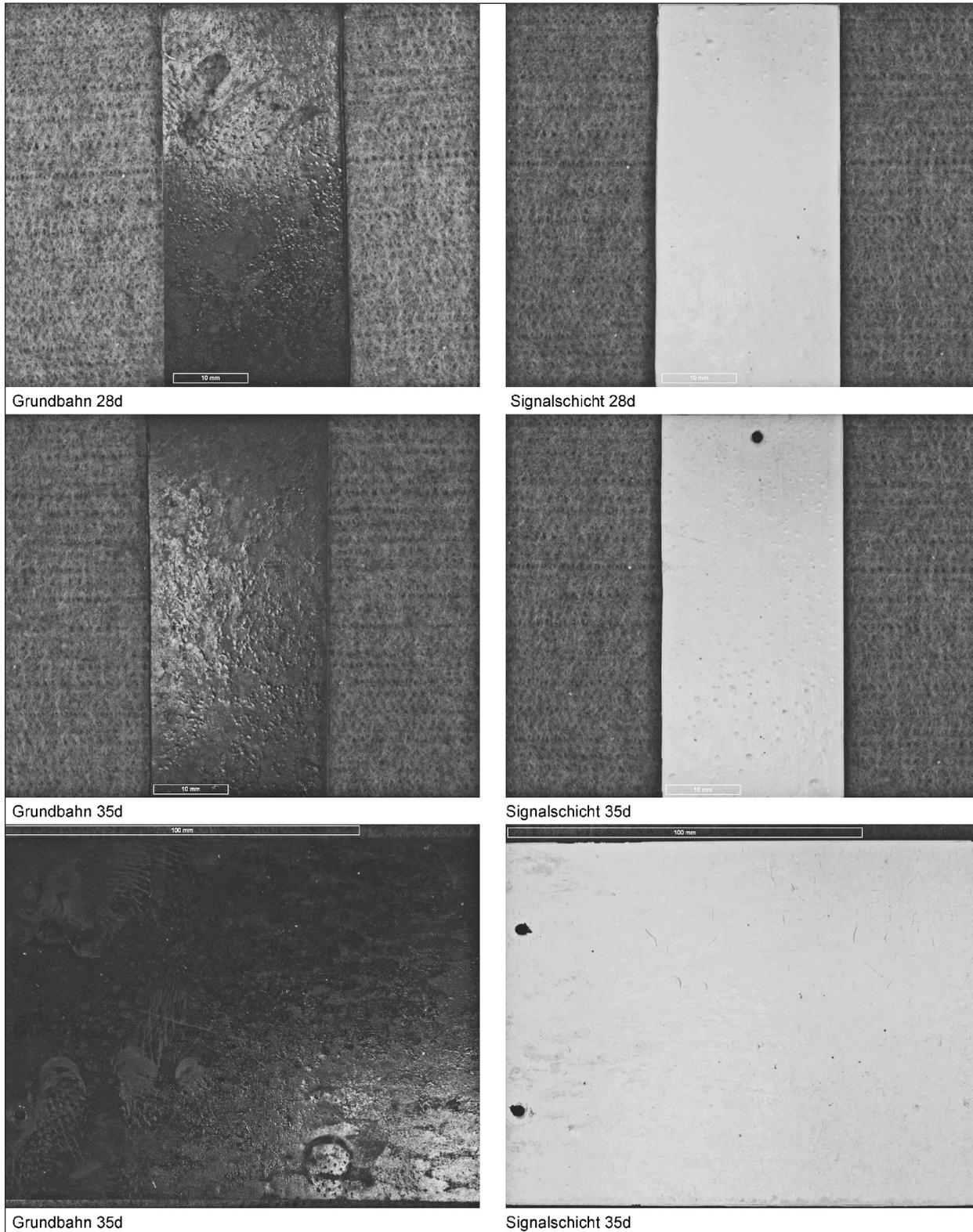


Bild 35: Schadensbilder nach der Entnahme aus dem Autoklaven (Standardmedium und 10^{-3} mol/l Eisen(II)sulfat (pH 3,14))

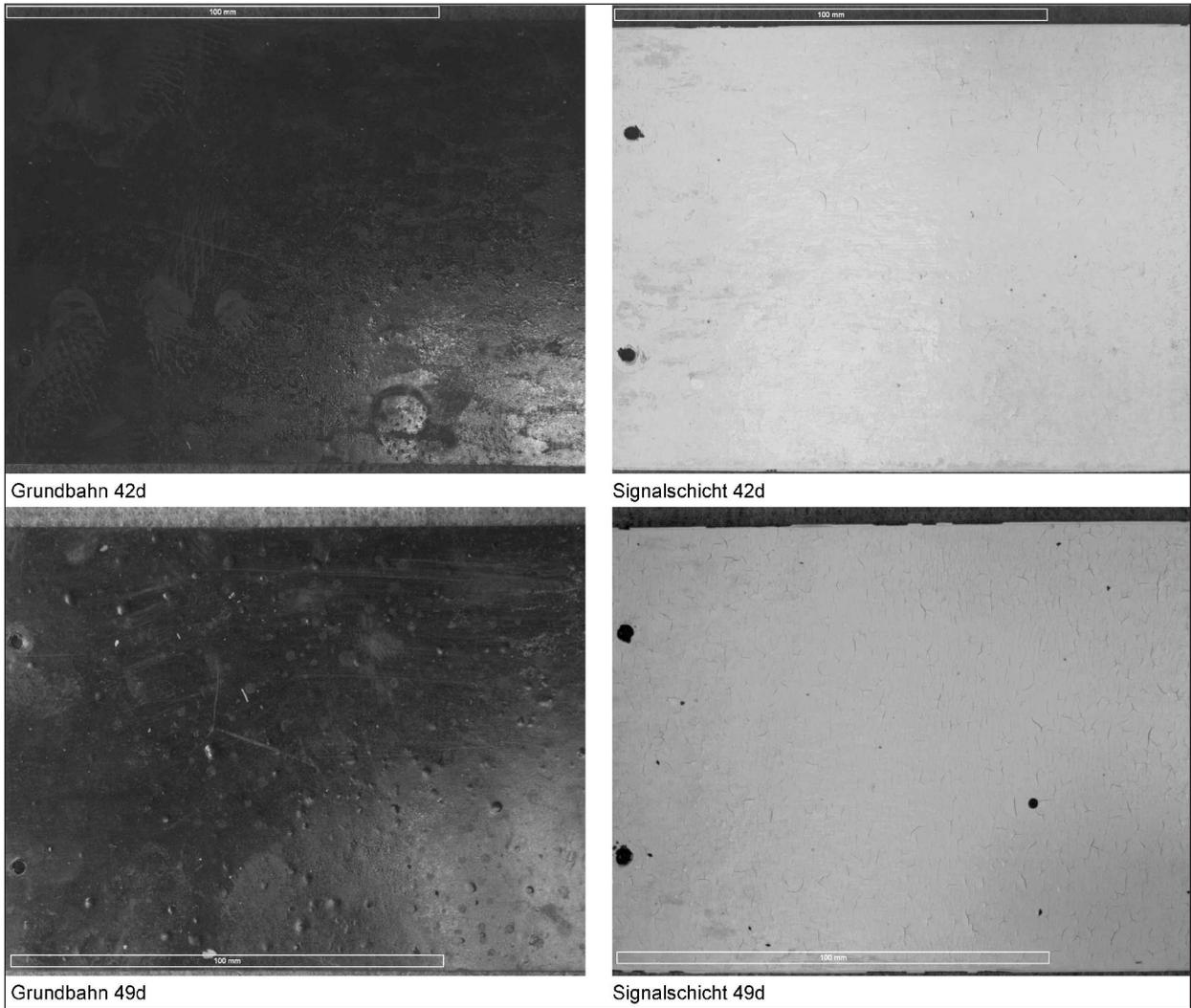


Bild 35: Fortsetzung

12.7 Dokumentation der Materialschädigung während der Autoklavenlagerung (10^{-3} mol/l Kupfersulfat im Standardmedium bei pH 7,1)

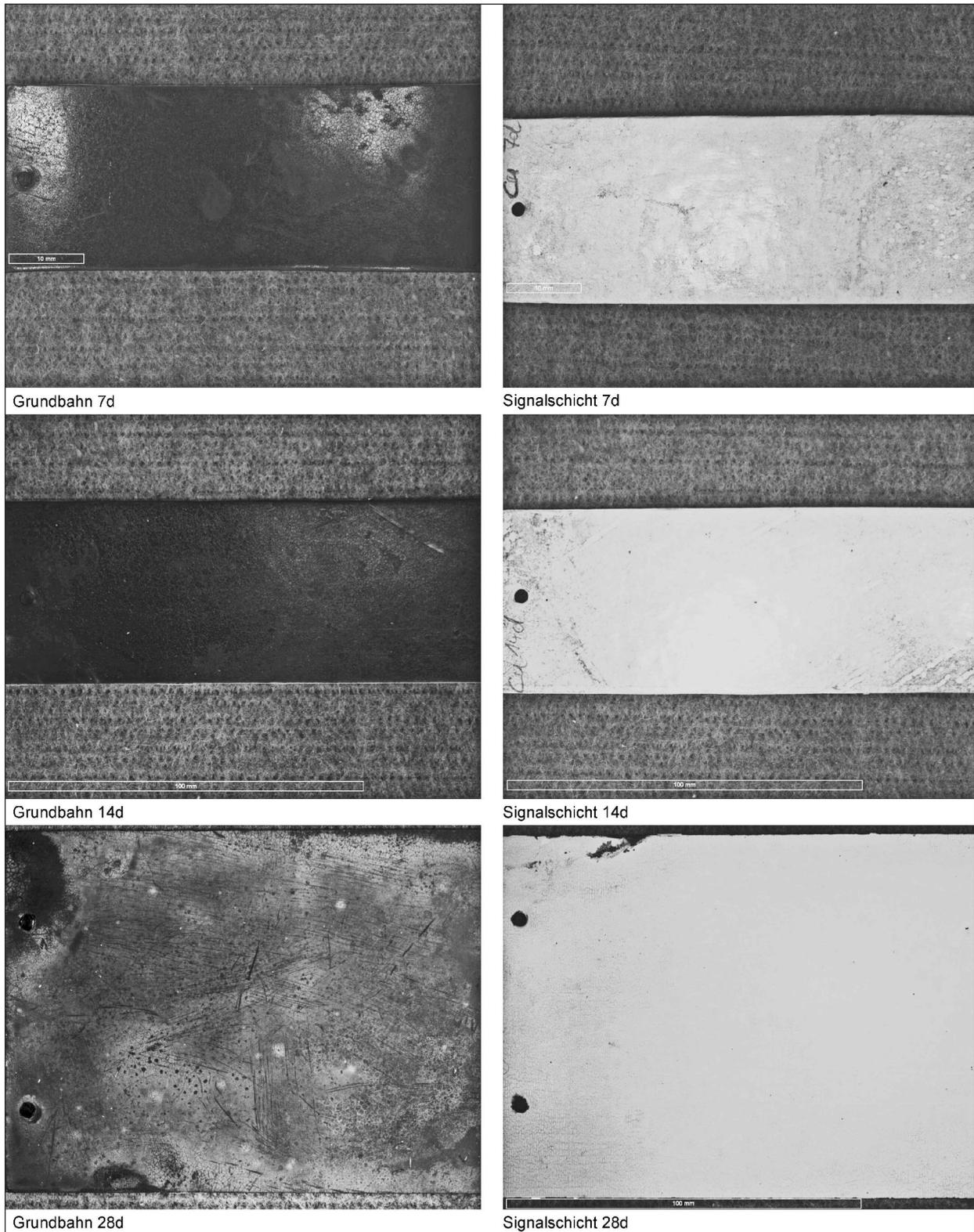
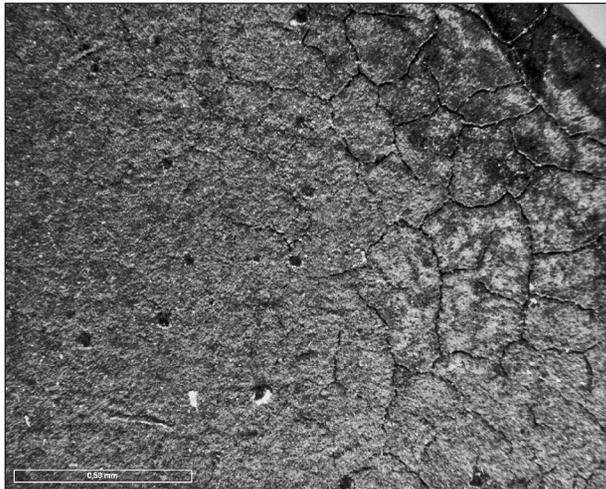
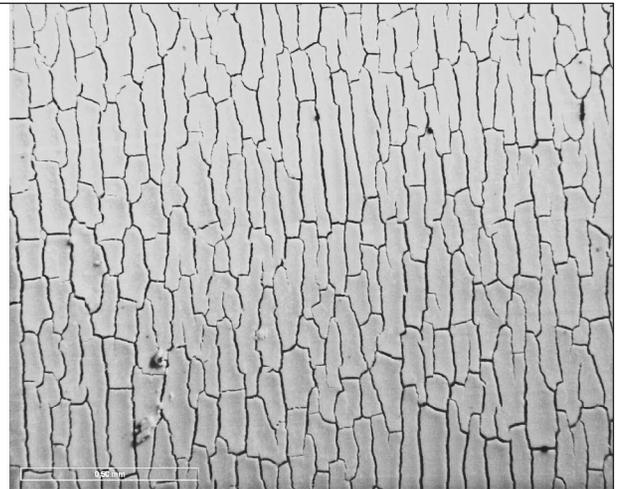


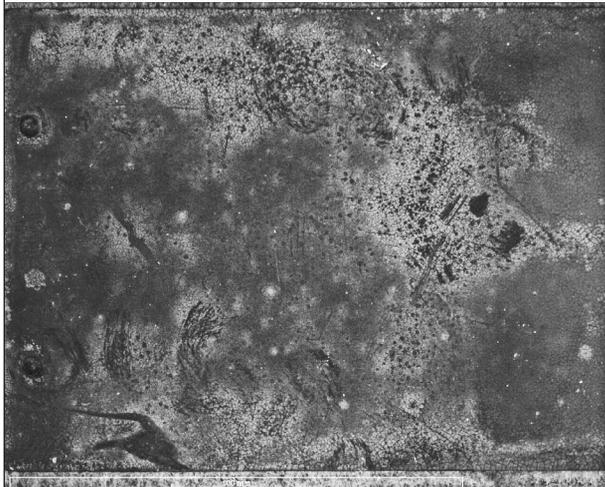
Bild 36: Schadensbilder nach der Entnahme aus dem Autoklaven (Standardmedium und 10^{-3} mol/l Kupfer(II)sulfat (pH 7,1))



Grundbahn 28d / Randbereich, 50-fache Vergrößerung



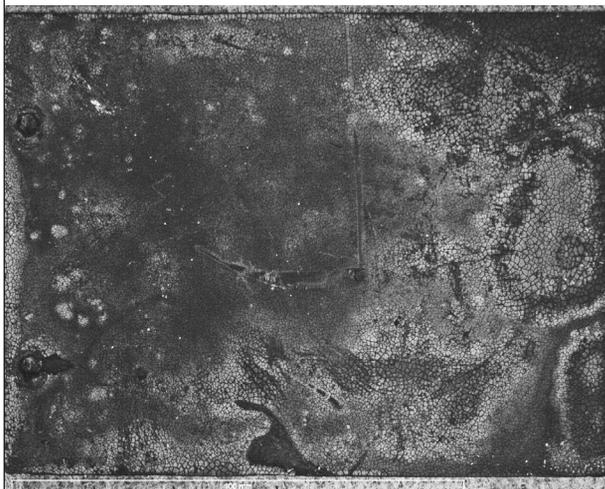
Signalschicht 28d / Randbereich, 50-fache Vergrößerung



Grundbahn 32d



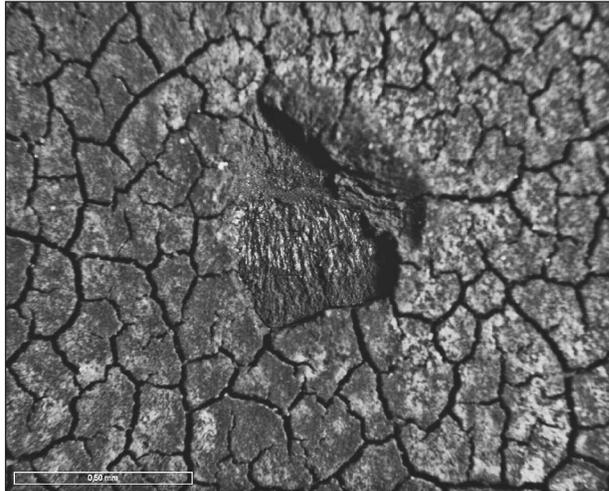
Signalschicht 32d



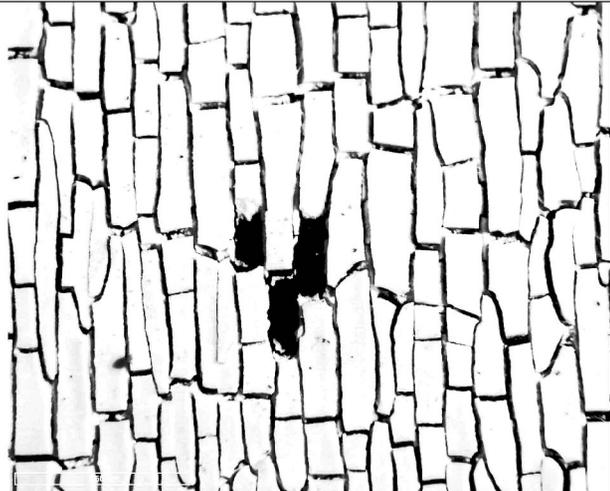
Grundbahn 39d



Signalschicht 39d



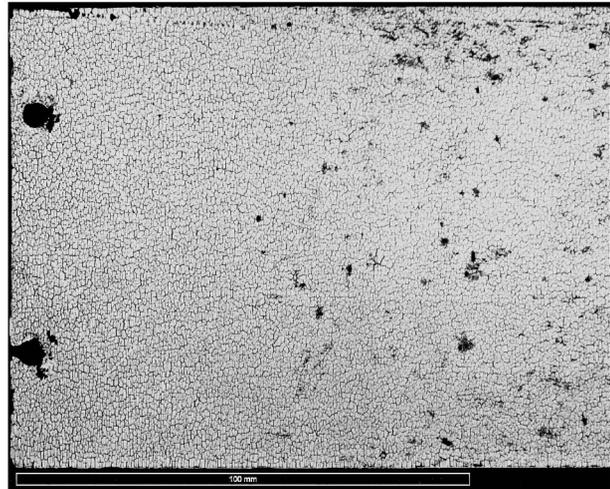
Grundbahn 39d; 50-fache Vergrößerung



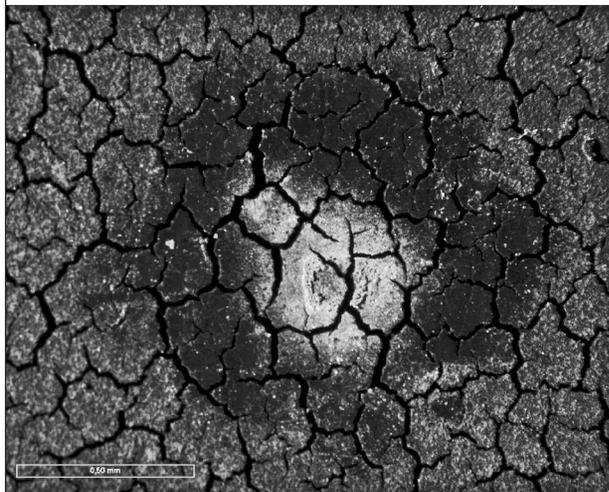
Signalschicht 39d; 50-fache Vergrößerung



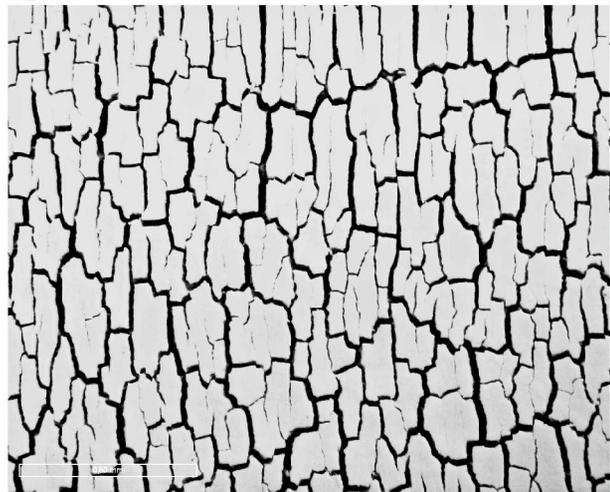
Grundbahn 43d



Signalschicht 42d



Grundbahn 43d; 50-fache Vergrößerung



Signalschicht 43d; 50-fache Vergrößerung

Bild 36: Fortsetzung

12.8 Dokumentation der Materialschädigung während der Autoklavenerlagerung (10^{-3} mol/l Mangansulfat in Wasser bei pH 9,8)

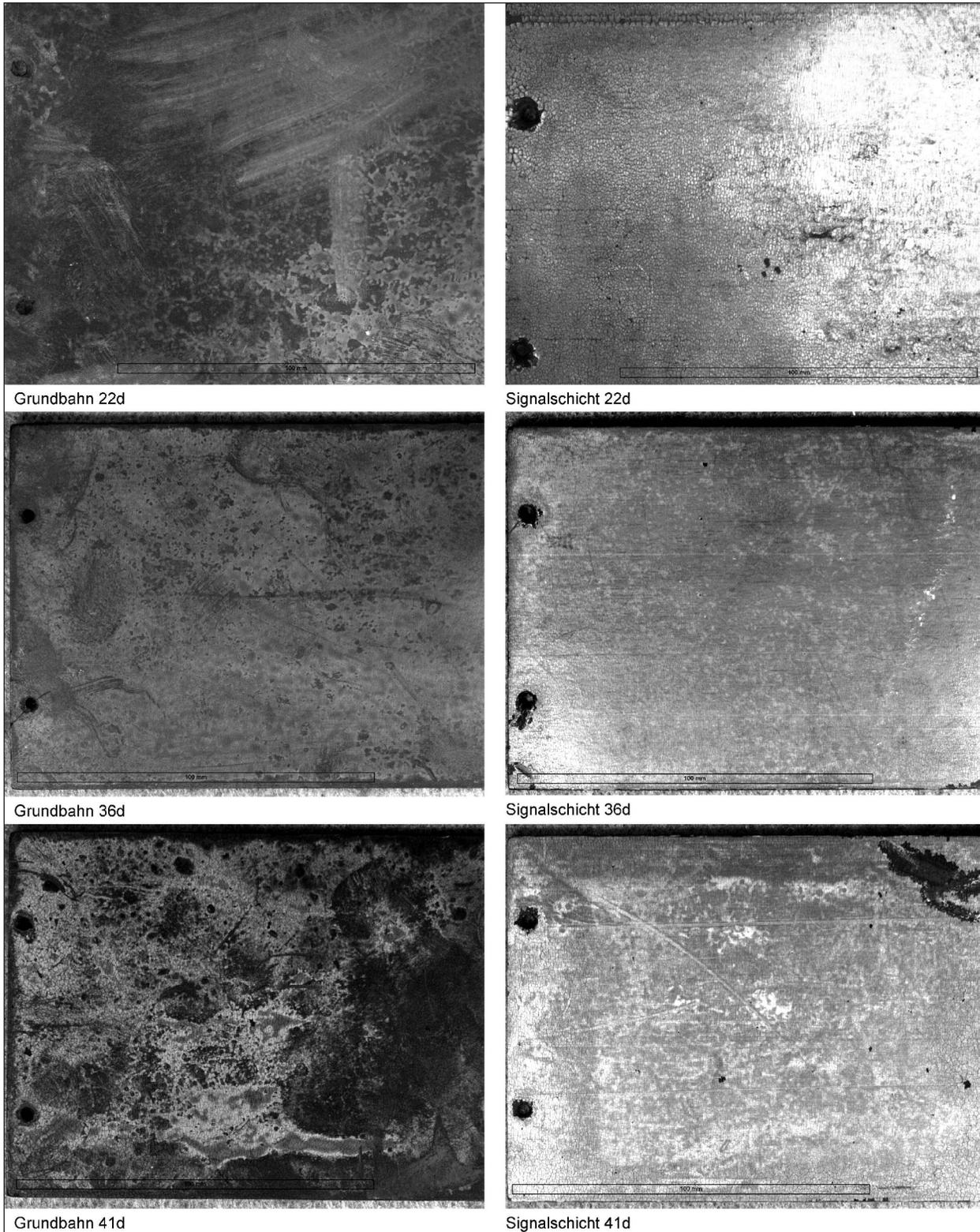


Bild 37: Schadensbilder nach der Entnahme aus dem Autoklaven (Standardmedium und 10^{-3} mol/l Mangansulfat; pH 9,8)

12.9 Dokumentation der Materialschädigung während der Autoklavenlagerung (Material aus dem Staufertunnel/QS_{west})

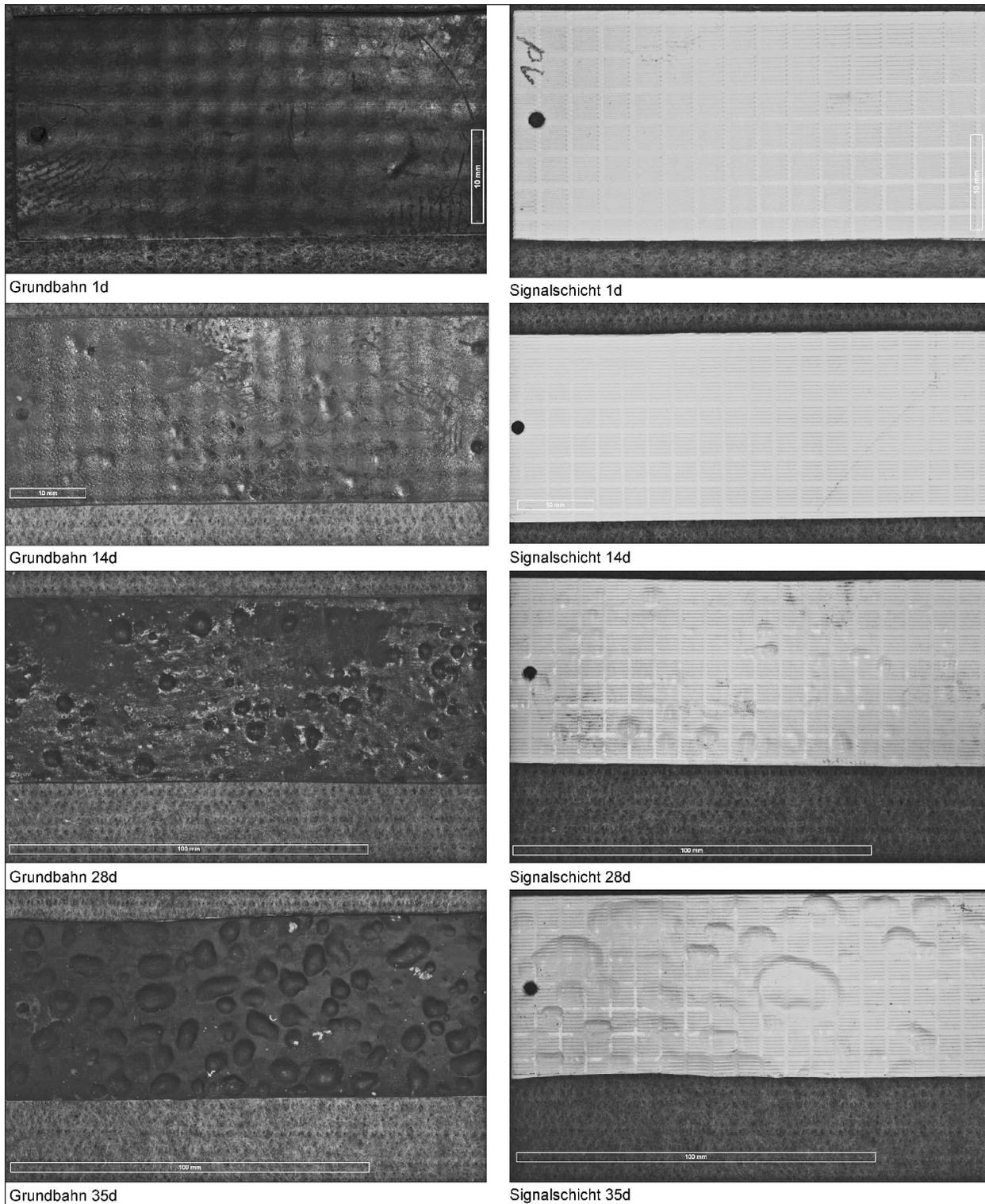


Bild 38: Schadensbilder nach der Entnahme aus dem Autoklaven

Literatur

- [1] EOTA Guidelines: Assumption of working life of construction products in Guidelines for European Technical Approval, European Technical Approvals and Harmonized Standards, 1999
- [2] DGGT (2005): Empfehlungen zu Dichtungssystemen im Tunnelbau (EAG-EDT), VGE Verlag Essen
- [3] BAST (Auftraggeber): Forschungsbericht zum Vorhaben FE 15.449/2007/ERB, „Prüfverfahren zur Beurteilung der Lebensdauer von Kunststoffdichtungsbahnen (KDB) für Straßentunnel“
- [4] DIN EN ISO 13438:2005: Geotextilien und geotextilverwandte Produkte – Auswahlprüfverfahren zur Bestimmung der Oxidationsbeständigkeit
- [5] BRUMMERMANN, K., BLÜMEL, W., HAACK, A., SCHREYER, J., BEYER, S.: Forschungsvorhaben FE 89.029/1997/B3 „Untersuchungen der Schutzwirksamkeit von Geotextilien bei Tunnelabdichtungen aus Kunststoffdichtungsbahnen“ im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE) und Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e. V., (STUVA), 1999
- [6] HAACK, A., SCHREYER, J., BEYER, S., BRUMMERMANN, K., LOHAUS, L.: FE 89.081/2000/B3 „Erweiterte Untersuchungen zum Nachweis der Schutzwirksamkeit von Schutzschichten für Kunststoffdichtungen im Tunnelbau“ im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) und von Geotextil- und Kunststoffdichtungsbahnproduzenten in Zusammenarbeit mit der Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e. V., 2001
- [7] DIN EN ISO 463:2006: Geometrische Produktspezifikationen – Längenmessgeräte – Konstruktionsmerkmale und messtechnische Merkmale für mechanische Messuhren
- [8] DIN EN 9863-1:2005: Geokunststoffe – Bestimmung der Dicke unter festgelegten Drücken – Teil 1: Einzellagen
- [9] DIN EN ISO 1183-1:2004: Kunststoffe – Verfahren zur Bestimmung der Dichte von nicht verschäumten Kunststoffen – Teil 1: Eintauchverfahren, Verfahren mit Flüssigkeitspyknometer und Titrationsverfahren
- [10] EN ISO 9864:005: Geokunststoffe – Prüfverfahren zur Bestimmung der flächenbezogenen Masse von Geotextilien und geotextilverwandten Produkte
- [11] DIN EN ISO 11357-1: Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) – Teil 1: Allgemeine Grundlagen
- [12] DIN EN ISO 11357-6: Plastics – Differential Scanning Calorimetry, Part 6: Determination of Oxidation Induction Time
- [13] DIN EN 12316-2:2001: Abdichtungsbahnen – Bestimmung des Schälwiderstandes der Fügenähte – Teil 2: Kunststoff- und Elastomerbahnen für Dachabdichtungen
- [14] DIN EN 12317-2:2010: Abdichtungsbahnen – Bestimmung des Scherwiderstandes der Fügenähte – Teil 2: Kunststoff- und Elastomerbahnen für Dachabdichtungen
- [15] DIN EN ISO 527-1:2012: Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 1: Allgemeine Grundsätze
- [16] DIN EN ISO 527-2:2012: Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 2: Prüfbedingungen für Form und Extrusionsmassen
- [17] DIN EN ISO 527-3:2012: Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 2: Prüfbedingungen für Folien und Tafeln
- [18] GRELLMANN, W., SEIDEL, S.: Kunststoffprüfung, Hanser Verlag München, Berlin, 2005, S. 119 ff.
- [19] GRELLMANN, W., SEIDEL, S.: Kunststoffprüfung, Hanser Verlag München, Berlin, 2005, S. 122 ff.
- [20] GRELLMANN, W., SEIDEL, S.: Kunststoffprüfung, Hanser Verlag München, Berlin, 2005, S. 123 ff.
- [21] DIN 61551:2008: Geokunststoffe – Bestimmung der Berstdruckfestigkeit
- [22] DIN EN 13719:2002: Bestimmung der langfristigen Schutzwirksamkeit von Geotextilien im Kontakt mit geosynthetischen Dichtungsbahnen

- [23] DIN EN 13256: 2008: Geotextilien und geotextilverwandte Produkte – Geforderte Eigenschaften für die Anwendung im Tunnelbau und Tiefbau
- [24] DGGT 2005: Empfehlungen zu Dichtungssystemen im Tunnelbau (EAG-EDT)
- [25] DIN-Fachbericht 86: Geotextilien und geotextilverwandte Produkte – Leitfaden zur Beständigkeit, CEN-Bericht 13434, 2000
- [26] DIN EN 14575:2005: Geosynthetische Dichtungsbahnen – Orientierungsprüfung zur Bestimmung der Oxidationsbeständigkeit
- [27] TL/TP KDB der ZTV-ING:12/2007: Technische Lieferbedingungen und Technische Prüfvorschriften für Kunststoffdichtungsbahnen und zugehöriger Profilbänder
- [28] DS 853:1998 der Deutschen Bahn AG: Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten – Abdichtung und Entwässerung
- [29] ZTV-Tunnel: Zusätzliche Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Straßentunneln, Teil 1/95 (Ausgabe 1995), Verkehrsblatt-Verlag, Dokument Nr. B 5330
- [30] TL/TP SD der ZTV-ING:12/2007: Technische Lieferbedingungen und Technische Prüfvorschriften für Schutz- und Dränageschichten
- [31] DOMININGHAUS, H.: Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, S. 108, 1998
- [32] DIN EN 14150:2006: Geosynthetische Dichtungsbahnen – Bestimmung der Flüssigkeitsdurchlässigkeit
- [33] DIN EN ISO 10318:2006: Geokunststoffe – Begriffe
- [34] DIN EN ISO 13437:1998: Für Geotextilien und geotextilverwandte Produkte – Verfahren zum Einbau und Ausgraben von Proben und Prüfung von Messproben im Labor
- [35] DIN EN ISO 10320:1999: Geotextilien und geotextilverwandte Produkte – Identifikation auf der Baustelle

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2007

B 55: Überprüfung des Georadarverfahrens in Kombination mit magnetischen Verfahren zur Zustandsbewertung von Brückenfahrbahnplatten aus Beton mit Belagsaufbau

Krause, Rath, Sawade, Dumat

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 14,50

B 56: Entwicklung eines Prüfverfahrens für Beton in der Expositions-kategorie XF2

Setzer, Keck, Palecki, Schießl, Brandes

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 19,50

B 57: Brandversuche in Straßentunneln – Vereinheitlichung der Durchführung und Auswertung

Steinauer, Mayer, Kündig

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 26,50

B 58: Quantitative Risikoanalysen für Straßentunnel

Sistenich

€ 14,50

2008

B 59: Bandverzinkte Schutzplankenholme

Schröder

€ 12,50

B 60: Instandhaltung des Korrosionsschutzes durch Teilerneuerung – Bewehrung

Schröder

€ 13,50

B 61: Untersuchung von Korrosion an Fußplatten von Schutzplankenpfosten

Schröder, Staack

€ 13,00

B 62: Bewährungsnachweis von Fugenfüllungen ohne Unterfüllstoff

Eilers

€ 12,00

B 63: Selbstverdichtender Beton (SVB) im Straßentunnelbau

Heunisch, Hoepfner, Pierson (†), Dehn, Orgass, Sint

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 17,50

B 64: Tiefenabhängige Feuchte- und Temperaturmessung an einer Brückendecke der Expositions-kategorie XF4

Bramshuber, Spörel, Warkus

€ 12,50

2009

B 65: Zerstörungsfreie Untersuchungen am Brückenbauwerk A1 Hagen/Schwerte

Friese, Taffe, Wöstmann, Zoega

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 14,50

B 66: Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Zulauf, Locher, Steinauer, Mayer, Zimmermann,

Baltzer, Riepe, Kündig

€ 14,00

B 67: Brandkurven für den baulichen Brandschutz von Straßentunneln

Blosfeld

€ 17,50

B 68: Auswirkungen des Schwerlastverkehrs auf die Brücken der Bundesfernstraßen – Teile 1-4

Kaschner, Buschmeyer, Schnellenbach-Held, Lubasch, Grünberg, Hansen, Liebig, Geißler

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 29,50

B 69: Berücksichtigung der Belange behinderter Personen bei Ausstattung und Betrieb von Straßentunneln

Wagener, Grossmann, Hintzke, Sieger

€ 18,50

B 70: Frost-Tausalz-Widerstand von Beton in Brücken und Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen

Tauscher

€ 14,50

2010

B 71: Empfehlungen für geschweißte KK-Knoten im Straßenbrückenbau

Kuhlmann, Euler

€ 22,50

B 72: Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von permanenten Anti-Graffiti-Systemen

Weschpennig, Kropf, von Witzhausen

€ 13,50

B 73: Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln

Dehn, Nause, Juknat, Orgass, König

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 21,00

B 74: Verwendung von Anti-Graffiti-Systemen auf Mauerwerk

Müller

€ 14,00

B 75: Sachstand Verstärkungsverfahren – Verstärken von Betonbrücken im Bestand

Schnellenbach-Held, Peeters, Scherbaum

€ 13,50

2011

B 76: Instandsetzung und Verstärkung von Stahlbrücken unter Berücksichtigung des Belagssystems

Sedlacek, Paschen, Feldmann, Geßler, Möller,

Steinauer, Scharnigg

€ 17,00

B 77: Anpassung von DIN-Fachberichten „Brücken“ an Eurocodes

Teil 1: DIN-FB 101 „Einwirkung auf Brücken“

Teil 2: DIN-FB 102 „Betonbrücken“

Teil 3: DIN-FB 103 „Stahlbrücken“

Teil 4: DIN-FB 104 „Verbundbrücken“

Freundt, Böning, Maurer, Arnold, Gedwien, Müller,

Schrack, Tappe, Kuhlmann, Rasche, Froschmeier,

Euler, Hanswille, Brauer, Bergmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 29,50

B 78: Bemessung von Wellstahlbauwerken – Vergleich nach den bisherigen und den neuen Richtlinien

Kuhlmann, Günther, Krauss

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 18,50

B 79: Untersuchungen zur Querkraftbemessung von Spannbetonbalken mit girlandenförmiger Spanngliedführung

Maurer, Kiziltan, Zilch, Dunkelberg, Fitik

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 15,50

B 80: Lautsprecheranlagen und akustische Signalisierung in Straßentunneln

Mayer, Reimann, Löwer, Brettschneider, Los

€ 16,00

B 81: Quantifizierung der Lebensdauer von Betonbrücken mit den Methoden der Systemanalyse

Müller, Vogel, Neumann

€ 14,50

B 82: Verkehrslastmodelle für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand
Freundt, Böning € 16,00

B 83: Konzeption zur Nachrechnung bestehender Straßenbrücken
Maurer, Kolodziejczyk, Zilch, Dunkelberg € 16,00

B 84: Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2)
Gehlen, Lowke, Milachowski € 15,00

B 85: Entwicklung von Verfahren einer zuverlässigkeitsbasierten Bauwerksprüfung
Zilch, Straub, Dier, Fischer € 19,50

B 86: Untersuchungen an Bauwerken aus hochfesten Beton
Nguyen, Freitag € 13,50

2012

B 87: Vermeidung von Glättebildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie
Feldmann, Döring, Hellberg, Kuhnhenne, Pak, Mangerig, Beucher, Hess, Steinauer, Kemper, Scharnigg € 17,00

B 88: Anpralllasten an Schutzeinrichtungen auf Brücken – Anpassung der DIN-Fachberichte „Stahlbrücken“ und „Verbundbrücken“ an endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsrechnungen
Kuhlmann, Zizza, Günther € 15,50

B 89: Nachrechnung von Betonbrücken zur Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Bauwerke
Maurer, Heeke, Kiziltan, Kolodziejczyk, Zilch, Dunkelberg, Fitik € 19,50

B 90: Fugenbewegung an der Ruhrtalbrücke Mintard
Eilers, Quaas, Staeck € 14,00

2013

B 91: Priorisierung und Nachrechnung von Brücken im Bereich der Bundesfernstraßen – Einfluss der Einwirkungen aus Verkehr unter besonderer Berücksichtigung von Restnutzungsdauer und Verkehrsentwicklung
Freundt, Böning € 15,00

B 92: Kriterien für die Anwendung von unbewehrten Innenschalen für Straßentunnel
Kaundinya € 14,00

B 93: Querkrafttragfähigkeit von Fahrbahnplatten – Anpassung des DIN-Fachberichtes „Betonbrücken“ an die endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsrechnungen
Hegger, Reiß € 17,50

B 94: Baulicher Brandschutz für Tunnel in offener Bauweise – Rechnerischer Nachweis
Peter, Knief, Schreyer, Piazzola
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 95: Erfahrungen mit selbstverdichtendem und hochfestem Beton im Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen
Tauscher € 17,00

B 96: Geothermischen Anlagen bei Grund- und Tunnelbauwerken
Adam € 17,00

B 97: Einfluss der veränderten Verkehrsführung bei Ertüchtigungsmaßnahmen auf die Bauwerksbeanspruchungen
Freundt, Böning € 15,00

2014

B 98: Brückenseile – Gegenüberstellung von vollverschlossenen Seilen und Litzenbündelseilen
Friedrich
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 99: Intelligente Brücke – Zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Inspektions- und Überwachungsergebnissen
Fischer, Schneider, Thöns, Rücker, Straub
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 100: Roadtraffic Management System (RTMS)
Freundt, Vogt, Böning, Pierson, Ehrle € 15,00

B 101: Adaptive Spannbetonstruktur mit lernfähigem Fuzzy-Regelungssystem
Schnellenbach-Held, Fakhouri, Steiner, Kühn € 18,50

B 102: Adaptive ‚Tube-in-Tube‘-Brücken
Empelmann, Busse, Hamm, Zedler, Girmscheid € 18,00

B 103: Umsetzung des Eurocode 7 bei der Bemessung von Grund- und Tunnelbauwerken
Briebrecher, Städing € 14,00

B 104: Intelligente Brücke – Konzeption eines modular aufgebauten Brückenmodells und Systemanalyse
Borrmann, Fischer, Dori, Wild
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 105: Intelligente Brücke – Machbarkeitsstudie für ein System zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke
Schnellenbach-Held, Karczewski, Kühn
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 106: Einsatz von Monitoringsystemen zur Bewertung des Schädigungszustands von Brückenbauwerken
Freundt, Vogt, Böning, Michael, Könke, Beinersdorf € 17,00

B 107: Materialeigenschaften von Kunststoffdichtungsbahnen bestehender Straßentunnel
Robertson, Bronstein, Brummermann € 16,00

Alle Berichte sind zu beziehen im:

Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7
28195 Bremen
Tel. (0421) 3 69 03-53
Fax (0421) 3 69 03-48
www.schuenemann-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.