
Entwicklung eines leistungsorientierten Prüfregimes für Brückenseilverfüllmittel

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Brücken- und Ingenieurbau Heft B 207

Entwicklung eines leistungsorientierten Prüfregimes für Brückenseilverfüllmittel

von

Jörg Hübscher

Institut für Korrosionsschutz Dresden GmbH, Dresden

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Brücken- und Ingenieurbau Heft B 207

Die Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen (BASt) veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen. 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 BASt, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG bezogen werden. Seit 2015 stehen sie zusätzlich als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung: <https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 2216015
Korrosionsschutz von Brückenseilen

Fachbetreuung:
Sarah Windmann

Referat:
Stahlbau, Brückenausstattung

Herausgeber:
Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion:
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Gestaltungskonzept:
MedienMélange:Kommunikation

Druck, Verlag und Produktsicherheit:
Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 0 | E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9293 | ISBN 978-3-95606-848-5 | <https://doi.org/10.60850/bericht-b207>

Bergisch Gladbach, April 2025

Kurzfassung

Entwicklung eines leistungsorientierten Prüfregimes für Brückenseilverfüllmittel

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts wurden 7 verschiedene Seilverfüllmittel (SVM) von insgesamt 5 Herstellern untersucht. Die Untersuchungen lieferten zusammengefasst die folgenden Erkenntnisse:

1. Ohne äußeres Korrosionsschutzsystem gelangen Wasser und Salze in das Seilinnere, wodurch Korrosionsvorgänge an den Seildrähten initiiert werden.
2. Der Beitrag der SVM zum Korrosionsschutz der Seile wird weniger durch die enthaltenen Pigmente (z.B. Zinkstaub oder Aluminium), dagegen mehr durch ihr Benetzungsvermögen und die Alterungsbeständigkeit bestimmt.
3. Zinkstaubpigmente verringern die Standfestigkeit des SVM, erhöhen die Gefahr der Volumenzunahme bei Wasserzutritt und verringern die Schmierwirkung bei niedrigen Temperaturen und im gealterten Zustand.
4. Bei SVM mit einem LM-Gehalt > 3 % wird sehr wahrscheinlich Lösemittel beim Verseilen in das Seil eingetragen. Lösemittel verringern die Schmierwirkung und können zu einer Beeinträchtigung des äußeren Korrosionsschutzsystems führen.

Aufbauend auf den Untersuchungsergebnissen wurde ein Vorschlag für ein leistungsorientiertes Prüfregime für Seilverfüllmittel aufgestellt. Dabei werden die folgenden Leistungsschwerpunkte berücksichtigt:

- Korrosionsschutzvermögen
- Schmierfähigkeit
- Ausblutverhalten
- Verträglichkeit mit Beschichtungen
- Alterungsbeständigkeit

Abstract

Development of a performance-oriented test regime for bridge rope filling materials

As part of this research project, 7 different rope filling materials (RFM) from a total of 5 manufacturers were examined. The investigations provided the following summarized findings:

- 1) Without an external corrosion protection system, water and salts enter the rope interior, initiating corrosion processes on the rope wires.
- 2) The contribution of the RFM to the corrosion protection of the ropes is determined less by the pigments it contains (e.g. zinc dust or aluminum) and more by its wetting capacity and resistance to ageing.
- 3) Zinc dust pigments reduce the stability of the RFM, increase the risk of volume increase in the event of water ingress and reduce the lubricating effect at low temperatures and when aged.
- 4) In the case of RFM with a solvent content > 3 %, solvents are very likely to be introduced into the rope during stranding. Solvents reduce the lubricating effect and can lead to impairment of the external corrosion protection system.

Based on the test results, a proposal for a performance-oriented testing regime for rope filling materials was drawn up. The following performance priorities were taken into account:

- Corrosion protection capacity
- Lubricity
- Bleeding behavior
- Compatibility with coatings
- Ageing resistance

Summary

Development of a performance-oriented test regime for bridge rope filling materials

The number of rope bridges is constantly growing and at the same time the performance requirements for the load-bearing ropes are increasing due to the increase in traffic volume. Rope filling materials (RFM) are used to protect the inside of the rope from abrasion and corrosion. Until now, there has been no way of realistically estimating the performance of these materials. The aim of this research project was to develop a test regime for the rapid and reliable assessment of the performance of rope filling materials for fully locked coil ropes. The project was supported by working group 2.4.1 "Bridge Ropes" of the German "Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen (BASt)". A systematic investigation of the 7 RFM available on the market was carried out with regard to the following relevant performance parameters:

- Corrosion protection capacity
- Lubricity
- Bleeding behavior
- Compatibility with coatings
- Ageing resistance

The test methods, some of which were newly developed, were then simplified to ensure fast and reliable approval testing. The laboratory results were validated by an outdoor weathering test on Helgoland with fully locked rope samples. The following general trends were derived from the tests.

Outdoor weathering. Three fully locked coil ropes with different types of RFM were stored vertically on the island of Helgoland (corrosivity category C5) for two years without pre-tensioning and then examined for signs of corrosion inside and changes in the RFM contained. It was found that without external corrosion protection, water and salts enter the inside of the rope. In the cavities without RFM, red rust was observed on the edges of the Z-wires of the removed ropes. RFM **2A-1** (no zinc dust, approx. 2% aluminum) was well distributed in the rope, lubricated everywhere, did not adhere and no corrosion was observed inside the rope. In the case of RFM **1A-1** and **1A-2** containing zinc dust, corrosion processes were observed from the outside into the cavity between the third and fourth wire layers. These RFM had aged to varying degrees and **1A-2** had even hardened to below the fourth wire layer.

Corrosion protection capacity. Both RFM-filled wire bundle samples (4 mm round wire with zinc coating) and RFM-coated sheets (hot-dip galvanized steel, swept) were subjected to immersion tests. All RFM have very good resistance to deionized water at 50 °C compared to the unfilled state. After a loading time of 90 days in the wire bundle and 60 days on the coated plate, **3A-1** and **2B-1** were the first to fail. Compared to 5% NaCl solution, the protective effect of the RFM with zinc dust is higher than that of the RFM without zinc dust. However, as this finding contradicts the observations from outdoor weathering, it is recommended that 5% NaCl solution is not used for the performance test.

Bleeding behavior. The volume change and stability were investigated. Increasing the temperature to 60 °C leads to a maximum volume increase of 4%, depending on the RFM. Adding 5% water and heating to 60 °C increases the volume of the RFM containing zinc dust by up to 42%. Up to 80 °C the resistance to sagging of all tested RFM is given. From 100 °C, the first run-off occurs with **1A 1** and from 120 °C with **1A 2**.

Lubricity. The lubricating effect of RFM can be reproducibly derived from the amount of scoring on the core wire of the sample using the oscillating lubrication test presented here. Without RFM, the metallic coating is completely worn away. The two RFM with little (**2A-1**) or no anti-corrosion pigment (**3A 1**) have a very good lubricating effect regardless of temperature and ageing condition. Zinc dust as a pigment reduces the lubricating effect at low temperatures and when aged. The solvent contained in the RFM reduces the lubricating effect.

Ageing resistance. The combination of IR and evaluation of haptics before and after artificial ageing is well suited for estimating the ageing resistance. During artificial ageing, the influencing factors of water, oxygen and temperature should be taken into account as a minimum. **2A-1** and **2B-1** are resistant to ageing without restriction. **1A-1** and **3A-1** are susceptible to ageing when exposed to salt solution. **1B-1** has a strong tendency to cure completely regardless of the ageing variant. **1A-2** forms a skin in air. The better the access of oxygen, the greater the risk of complete curing. **1B-2** is resistant to ageing, but has a tendency to adhere when exposed to oxygen. Complete curing has not been observed with this RFM.

Compatibility with coatings. According to TP KOR-VVS, the compatibility of RFM **2A-1**, **2B-1** and **1B-2** with the tested rope coating system is not given due to the adhesive strength criteria. When the solvent-containing RFM **2B-1** and **1B-2** were applied to the base layer of a rope wrap, an impairment of the bond between butyl rubber and polyethylene was observed. The elasticity of the wrapping is not reduced by RFM exposure.

With regard to the solvents and pigments contained, the following general recommendations for RFM can be derived from the test results.

Solvents. Solvents contained in RFM reduce the viscosity and are therefore included in some RFM to improve workability. In the case of RFM with an LM content > 3 %, solvent is very likely to be introduced into the rope during stranding, which can be deduced from the tests carried out here. When the solvent later evaporates from the finished rope, a reduction in the volume of the RFM is to be expected, which can cause the formation of unfilled cavities in the rope. RFM containing solvents have a lower lubricating effect than solvent-free RFM. In addition, solvents can impair the external corrosion protection system. For these reasons, it is recommended that solvents are not used in rope filling materials unless it can be ensured that they evaporate completely during the stranding process.

Metallic anti-corrosion pigments (zinc dust and aluminum). One of the two metallic anti-corrosion pigments zinc dust and aluminum is contained in most RFM in order to increase the anti-corrosion effect. It can be assumed that such pigments were introduced as a substitute after the ban on red lead. The RFM "linseed oil red lead" was well suited to protect steel cable wires without a zinc coating against corrosion. Zinc dust was often used as an alternative after the ban on red lead in the corrosion protection of steel. However, zinc dust reacts with water to form hydrogen, which can lead to a drastic increase in the volume of the RFM and thus probably to rope bleeding. During the tests, RFM containing zinc dust were also generally observed to have a lower resistance to sagging than zinc dust-free RFM, which also indicates a higher tendency to bleed. This is particularly worrying because zinc dust is also an environmentally hazardous substance that must not be released into the environment. At very low temperatures (20 °C) and in an aged state (under the influence of water), the lubricating

effect of the RFM with zinc dust deteriorates significantly. The use of aluminum pigments instead of zinc dust also does not appear to make sense in view of the significantly poorer resistance to deionized water and 5% NaCl solution. In the outdoor weathering test, the RFM with the lowest metal pigment content (0 % zinc and approx. 2 % aluminum) achieved the best results. In view of the fact that rope wires nowadays have a zinc coating and taking into account the negative effects of metallic pigments on the performance of RFM as described here, a general consideration of the necessity of metallic pigments in RFM for fully locked coil ropes is proposed.

Based on the test results summarized here, a proposal for a performance-oriented testing regime for rope filling agents was drawn up.

Inhalt

1	Einleitung und Zielstellung	10
2	Schadensfälle aus der Praxis	12
3	Untersuchungen	14
3.1	Verwendete Materialien	14
3.2	Stoffliche Charakterisierung der SVM	15
3.2.1	Lösemittel	15
3.2.2	Bindemittel	16
3.2.3	Pigmente	16
3.3	Korrosionsschutzvermögen der SVM	18
3.3.1	Ermittlung relevanter Testparameter	18
3.3.2	Drahtbündelproben	22
3.3.3	Beschichtete Probenplatten	24
3.4	Ausblutverhalten der SVM	27
3.4.1	Vorbetrachtung zur Gefahr des Seilblutens	27
3.4.2	Scherviskosität	27
3.4.3	Standfestigkeit	29
3.4.4	Volumenänderung	32
3.5	Schmierfähigkeit der SVM	34
3.5.1	Versuchsaufbau	34
3.5.2	Ergebnisse und Diskussion	37
3.5.3	VKA-Test nach DIN 51350	40
3.6	Alterungsbeständigkeit der SVM	42
3.6.1	Alterungsszenarien	42
3.6.2	Untersuchungsmethoden	43
3.6.3	Ergebnisse	44
3.6.4	Diskussion	51
3.7	Verträglichkeit der SVM mit äußeren Seilkorrosionsschutzsystemen	52
3.7.1	Seilbeschichtung	52
3.7.2	Seilumwicklung	53

3.8	Freibewitterung	56
3.8.1	Probenherstellung und Auslagerung	56
3.8.2	Probenbewertung während und nach der Auslagerung	57
4	Aufstellung eines Prüfregimes für SVM	62
4.1	Übersicht	62
4.2	Prüfverfahren	65
4.2.1	Nichtflüchtiger Anteil	65
4.2.2	Infrarotspektrometrie	65
4.2.3	Aschegehalt	65
4.2.4	Standfestigkeit	65
4.2.5	Volumenänderung	65
4.2.6	Immersionsversuch	66
4.2.7	VKA-Test	66
4.2.8	Entfernbarkeit	66
4.2.9	IR nach Alterung	67
4.2.10	Verträglichkeit mit Beschichtungen	67
5	Zusammenfassung	68
6	Danksagung	71
	Literatur	72
	Abbildungen	73
	Tabellen	75
	Anlagen	77
	Anlage 1 – Infrarotspektren	78
	Anlage 2 – TGA-Aufnahmen	93
	Anlage 3 – Fotografische Dokumentation der Freilegung äußerer Drahtlagen auf Helgoland freibewitterter Seilproben	100

1 Einleitung und Zielstellung

Seilverfüllmittel (SVM) kommen in allen statischen Seilkonstruktionen zur Anwendung. Dazu zählen in erster Linie Seilbrücken, unterspannte Dachkonstruktionen (z.B. Stadionsdächer) und externe Mast- bzw. Turmabspannungen. Das SVM ist maßgeblich für die Dauerhaftigkeit von Stahlseilen verantwortlich [1]. Dies liegt daran, dass es im Seil die folgenden fundamentalen Aufgaben übernimmt:

- Isolierung des Seilinneren gegenüber eindringenden Medien
- Minimierung des Abriebs der Drahtüberzüge beim Verseilvorgang und im vorgespannten Zustand am Bauwerk
- Korrosionsschutz für die Seildrähte

Für Vollverschlossene Seile (VVS), dem in Deutschland aufgrund der erhöhten Steifigkeit und Dauerfestigkeit dominanten Seiltyp, wurde lange Zeit eine Kombination aus Leinöl und Bleimennige als SVM angewendet. Dieses ist heutzutage jedoch nicht mehr auf dem Markt erhältlich, da das Pigment Bleimennige aufgrund seiner schädlichen Wirkung auf Mensch und Umwelt durch die REACH-Verordnung von 2006 [2] vom Handel ausgeschlossen wurde. Im derzeitigen Herstellungsprozess von Vollverschlossenen Stahlseilen unterscheidet man Schmierstoffe mit Korrosionsschutzeigenschaften und Korrosionsschutzprodukte mit Schmiereigenschaften [3]. Das SVM macht hierbei ca. 2 bis 5 % des Seilgewichts aus, wodurch ein Seilhersteller im Jahr ca. 50 Tonnen SVM verarbeitet [4].

Eine große Varianz an verfügbaren SVM für Vollverschlossene Seile resultiert zum einen aus der Notwendigkeit der Verträglichkeit des Produkts mit dem äußeren Korrosionsschutzsystem gepaart mit dem Umstand, dass es drei technisch grundlegend verschiedene äußere Korrosionsschutzsysteme für Vollverschlossene Seile gibt. Namentlich handelt es sich dabei um Flüssigbeschichtungen, Butylkautschukumwicklungen und HDPE-Umhüllungen. Des Weiteren führen unterschiedliche klimatische Bedingungen der Bauwerksstandorte und damit verbundene Ansprüche an die Beständigkeit und den Eigenschaftserhalt bei hohen oder niedrigen Temperaturen zu einem gewissen Produktspektrum im Bereich der SVM. Dieses Spektrum enthält Stoffe unterschiedlichster Stoffcharakteristika und muss aus diesem Grund performanceorientiert erfassbar gemacht werden.

Mit der Veröffentlichung des Regelwerks TL/TP-VVS im Jahr 2017 [5] wurde erstmals der Versuch unternommen, Prüfungen und Prüfanforderungen für diese neue Generation von SVM für Vollverschlossene Seile aufzustellen. Das im Regelwerk aufgeführte Prüfregime hat jedoch die folgenden gravierenden Mängel:

- 1) Die Prüfanforderungen sind nicht an den Anforderungen, die in der Praxis an SVM gerichtet sind, orientiert. SVM-bedingten Schadensfällen lässt sich somit durch das Regelwerk nicht vorbeugen.
- 2) Die aufgelisteten Prüfungen sind nur auf niedrigviskose Schmierstoffe anwendbar. Aus technischen Gründen lassen sich SVM, die nicht zu dieser Stoffkategorie gehören, dem Prüfregime des Regelwerks nicht unterziehen. Diese einseitige Bevorzugung erschwert die Entwicklung neuer Produkte und hemmt Innovationen des Marktes.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es derzeit verschiedenste SVM für Vollverschlossene Seile gibt, jedoch hierfür keine unabhängige und performanceorientierte Möglichkeit zur Eignungseinschätzung existiert, wodurch es immer wieder zu SVM-bedingten Schadensfällen kommt und die Entwicklung geeigneter SVM erschwert ist.

Das vorliegende Forschungsprojekt hatte die Entwicklung eines Prüfregimes für die schnelle und sichere Einschätzung des Leistungsvermögens von Seilverfüllmitteln für Vollverschlossene Seile zum Ziel. Folgende Parameter wurden dabei berücksichtigt:

- **Zusammensetzung (Fingerprint)**
- **Ausblutverhalten**
- **Korrosionsschutz**
- **Schmierfähigkeit**
- **Verträglichkeit mit äußeren Korrosionsschutzsystemen**
- **Alterungsbeständigkeit**

2 Schadensfälle aus der Praxis

Zum Aufspüren relevanter Schadensbilder, die an stahlseilgetragenen Bauwerken im Zusammenhang mit SVM auftreten können, wurde zunächst eine Schadensfallanalyse durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass SVM-bedingte Schäden an Brückenseilen in der Vergangenheit vorrangig durch Veränderungen des äußeren Korrosionsschutzsystems und/oder durch ausblutendes SVM gekennzeichnet waren. Es existieren Aufzeichnungen zu drei verschiedenen Bauwerken, bei denen es zum Austritt von SVM aus dem Seil gekommen ist, was jeweils mit Schäden des äußeren Korrosionsschutzsystems bzw. des Bauwerks verbunden war (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht der Schadensbilder SVM-bedingter Schadensfälle [1].

Brücke	SVM		Schadensbild
Rheinbrücke Emscher- schnellweg (A42)	Variante 1	<u>im Seilinneren:</u> Cordalen (künstliches Wachs) <u>äußere beiden Drahtlagen:</u> Leinöl-Bleimennige	<ul style="list-style-type: none"> SVM-Austritt (bis zu 45 g/Seil im ersten Jahr; ca. Halbierung in den Folgejahren) Blasenbildung in der Beschichtung bei SVM-Austritt
	Variante 2	<u>im gesamten Seil:</u> Leinöl-Bleimennige	<ul style="list-style-type: none"> SVM-Austritt ab dem zweiten Jahr (ca. 30 g/Seil im ersten Jahr; weniger in den Folgejahren)
Talbrücke Obere Argen (A96)	<u>im Seilinneren:</u> amorphes Polypropylen (A-Fax 600 HLS) <u>äußere Drahtlage:</u> unverfüllt	<ul style="list-style-type: none"> SVM-Austritt bei einem Seil (es wird ein Fertigungsfehler des Seils angenommen) 	
Norderelbe- brücke (A1)	Polyöl-Zinkstaub		<ul style="list-style-type: none"> SVM-Austritt (Menge erheblich, wurde aber nicht bestimmt) Blasenbildung in der Beschichtung

Es zeigt sich, dass das Phänomen „Seilbluten“ nicht pauschal bei bestimmten Arten von SVM (bestimmte Bindemittel oder bestimmte Pigmente) auftritt. Das Seilbluten wurde bei künstlichen Wachsen, amorphem Polypropylen, Leinöl- und Polyöl-basierten SVM beobachtet. Auch waren hier verschiedene Korrosionsschutzpigmente (Zinkstaub, Bleimennige) enthalten. Lediglich die Aussparung der äußeren beiden Drahtlagen bei der Talbrücke Obere Argen hat zu einer signifikanten Verringerung des Seilblutens geführt.

Das Ausbluten des SVM war bei diesen Bauwerken überwiegend mit Beeinträchtigungen des äußeren Korrosionsschutzsystems verbunden. Dabei wurde vor allem Blasenbildung in der Korrosionsschutzbeschichtung beobachtet (siehe Abb. 1).

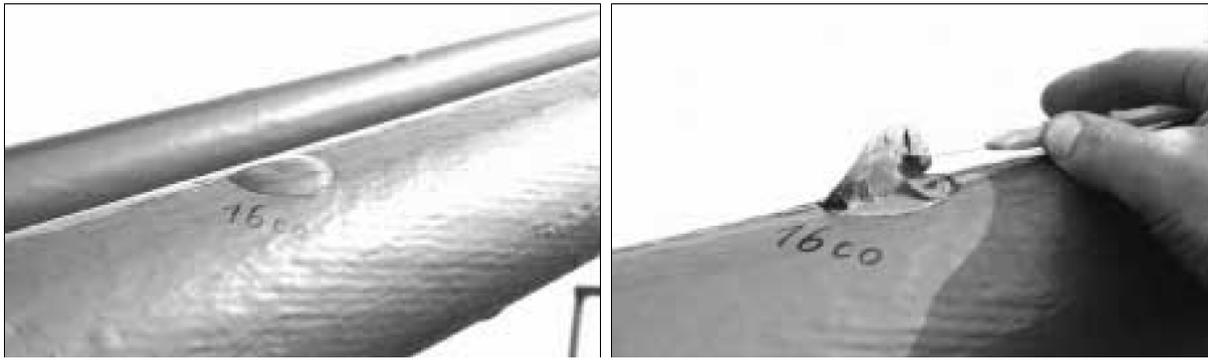


Abb. 1: Blasenbildung in der Beschichtung als Folge von SVM-Austritt bei der Rheinbrücke Emscherschnellweg [6].

Es wurden des Weiteren bereits Untersuchungen bzgl. der Ursachen für den Austritt von Seilverfüllmittel angestellt. Im BAST-Bericht B16 [1] ist eine systematische Studie zu den wichtigsten Einflussgrößen im Zuge der Langzeitbeobachtung ausgewählter Bauwerke abgebildet. Es wurde festgestellt, dass Verkehr und Wind nachweisbar zu mechanischen Schwingungen führen. Der Einfluss dieser Schwingungen auf das Austrittsverhalten ist jedoch gering im Vergleich zum Einfluss von Temperaturschwankungen in der Umgebung des Bauwerks.

Zudem existieren bereits Erfahrungen mit Zinkstaub-haltigen Seilverfüllmitteln und den damit in Verbindung zu bringenden Schäden. Im BAST-Bericht 9.88209F1 [7] werden Untersuchungen zur Hohlraumvariabilität vollverschlossener Seile beschrieben. Es wurde festgestellt, dass das Eindringen von Wasser in das Seil durch Hohlräume, die beim Ausbluten von SVM entstehen, ermöglicht wird. Es wird zudem die Vermutung aufgestellt, dass Zinkstaub-haltige SVM mit Wasser reagieren können, was zu einer Volumenerhöhung führen kann.

Schadensfälle zu den hier untersuchten SVM lagen dem IKS nicht vor.

3 Untersuchungen

3.1 Verwendete Materialien

Es wurden 7 verschiedene SVM von insgesamt 5 verschiedenen Herstellern für die hier vorgestellten Untersuchungen bereitgestellt. Diese unterschieden sich wesentlich hinsichtlich der folgenden Parameter:

- Lösemittelgehalt
- organische Matrix
- Korrosionsschutzpigment

Sie lassen sich somit folgendermaßen klassifizieren und anonymisiert bezeichnen:

Tabelle 2: Anonymisierte Klassifizierung der erhaltenen SVM nach Zusammensetzung

SVM-Klassifizierung		Korrosionsschutzpigment		
		ohne	Zinkstaub	Aluminium
Löse- mittel- anteil	ohne	3A-1	1A-1 1A-2	
	< 3 %	(2A-1)		(2A-1)
	> 3%		1B-1 1B-2	2B-1

Das SVM **2A-1** lässt sich bzgl. enthaltenem Korrosionsschutzpigment den beiden Kategorien „ohne“ und „Aluminium“ zuordnen, da zwar Aluminium in metallischer Form enthalten ist, jedoch nur 2 Masse-%.

Zusätzlich wurden 250 Meter Stahlrunddraht (\varnothing 4 mm) mit Zinküberzug, der für die Herstellung der inneren Lagen vollverschlossener Seile verwendet wird, von einem Seilhersteller bereitgestellt.

Außerdem wurden 3 verschiedene Abschnitte vollverschlossener Seile (je 1 Meter) mit ähnlichem Durchmesser (2x 75 mm, 1x 70 mm) und jeweils verschiedenem SVM für Freibewitterungsversuche (siehe Abschnitt 3.8) von 2 Seilherstellern geliefert.

Darüber hinaus wurde ein komplettes Seilbeschichtungssystem sowie ein Butylkautschukumwicklungssystem für Verträglichkeitsversuche (siehe Abschnitt 3.7) erhalten.

3.2 Stoffliche Charakterisierung der SVM

3.2.1 Lösemittel

Von den 7 bereitgestellten SVM enthalten 4 im Anlieferungszustand unterschiedliche Mengen an Lösemittel. Zur genauen Bestimmung des jeweiligen Lösemittelgehalts wurde zuerst der nicht-flüchtige Anteil (nfA) nach DIN EN ISO 3251 bestimmt (1 g Probe, 50 mm Schale, 3 h Trocknung bei 105 °C).

Zusätzlich wurde das Trocknungsverhalten der SVM in realen Schichtdickenverhältnissen untersucht. Auf Anfrage bei 2 Seilherstellern wurde eine Schichtdicke von 60 µm SVM auf dem Seil zum Verseilzeitpunkt angegeben. Nach Aussage der Seilhersteller bleibt das SVM in der angegebenen Schichtdicke ca. 5 Minuten an der Atmosphäre und wird danach von der nächsten Drahtlage im Seil eingeschlossen. Lösemittel was innerhalb von 5 Minuten nicht verdunstet, darf somit nicht zum Ausbluten führen. Aufbauend auf diesen Aussagen wurden jeweils 3 Aluminiumschalen mit den entsprechenden SVM in einer Schichtdicke von 60 µm versehen und bei 23 °C und 50 % rel. Luftfeuchte gelagert, wobei die Masse der Proben in regelmäßigen Abständen bestimmt wurde. Die Ergebnisse dieser Trocknungsversuche sind in Abb. 2 dargestellt.

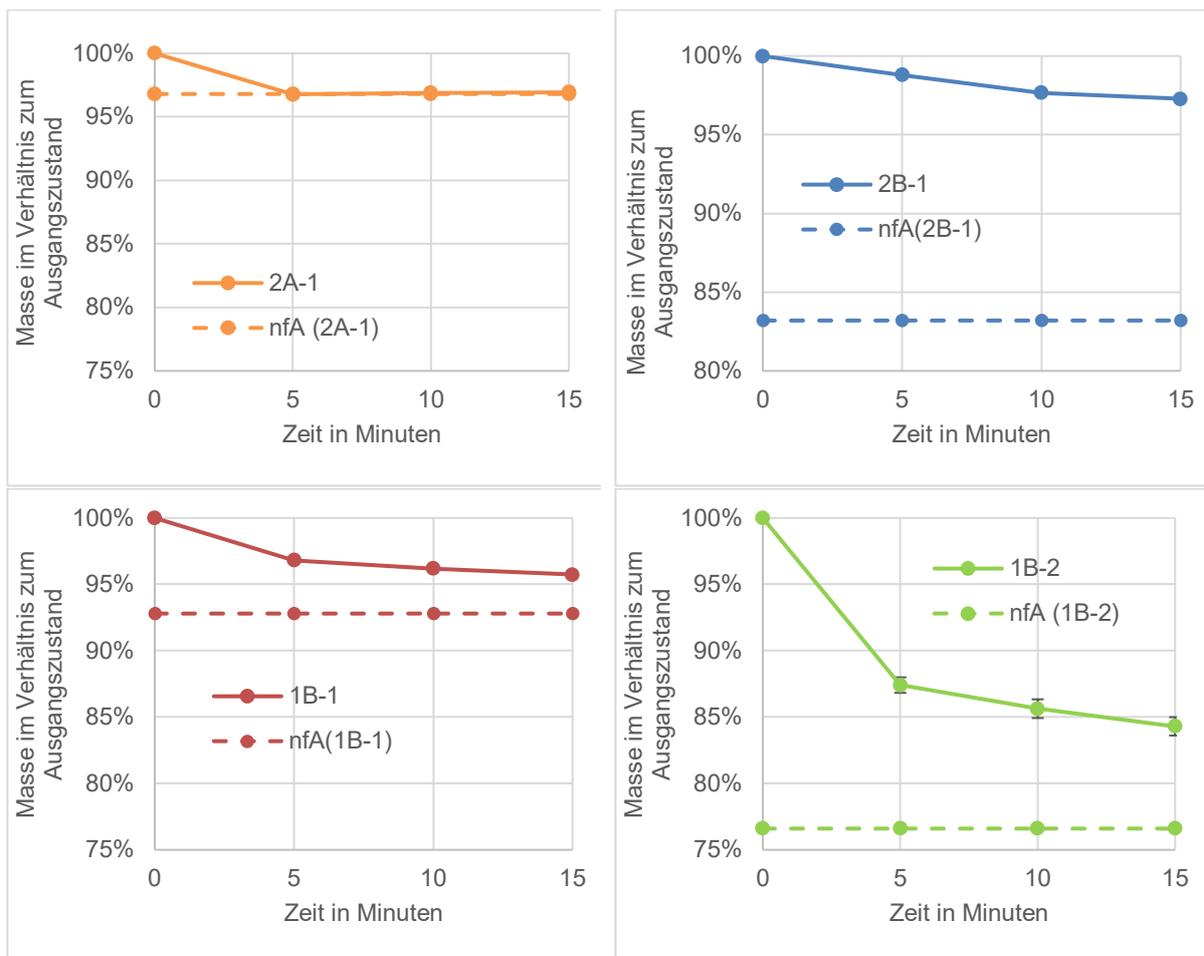


Abb. 2: Massenänderung der lösemittelhaltigen SVM in den ersten 15 Minuten nach der Applikation in einer Schichtdicke von 60 µm (durchgehende Linie) im Vergleich zum jeweiligen nicht-flüchtigen Anteil nach DIN EN ISO 3251 (gestrichelte Linie).

Man kann erkennen, dass lediglich das SVM **2A-1** nach 5 Minuten den nicht-flüchtigen Anteil erreicht hat. Somit trägt es kein Lösemittel in das Seil ein. Der Lösemittelanteil der verbleibenden drei lösemittelhaltigen SVM, also **1B-1**, **1B-2** und **2B-1** nach 5 Minuten wurde als „Seilzustand“ definiert. Diese SVM besitzen auch im Seil noch Lösemittel. Für alle Performance-Tests wurden diese 3 SVM deshalb auf den „Seilzustand“ vorkonditioniert, um den realen Lösemittelgehalt im Seil nachzuempfinden. Die SVM wurden dafür so lange offen bei 60 °C gelagert, bis sich die dem Seilzustand rechnerisch entsprechende Masse eingestellt hatte.

3.2.2 Bindemittel

Zur Charakterisierung der Bindemittel bzw. zur späteren Identifizierung der SVM wurden sowohl Infrarotspektren, als auch thermogravimetrische (TGA-) Analysen angefertigt. Es wurden dabei die folgenden Messparameter eingehalten:

Infrarotspektrometrie (IR):

Messgerät:	Perkin Elmer Frontier FTIR
Messverfahren:	ATR (abgeschwächte Totalreflexion)
Messbereich:	4000 bis 600 cm ⁻¹
Anzahl Scans:	15 Scans
Intervall:	1 cm ⁻¹
Auflösung:	4 cm ⁻¹

Thermogravimetrie (TGA):

Messgerät:	NETZSCH TG 209 F3 Tarsus
Probenmasse:	ca. 20 mg
Temperaturbereich:	35...550 °C
Aufheizrate:	20 K/min

Die somit erhaltenen Infrarotspektren und TGA-Aufzeichnungen sind in den Anlagen 1 und 2 enthalten. Die TGA-Analysen wurden jeweils am SVM im Anlieferungszustand durchgeführt. IR-Spektren wurden ebenfalls im Anlieferungszustand, bei den lösemittelhaltigen SVM jedoch zusätzlich im „Seilzustand“ und im komplett lösemittelfreien Zustand aufgenommen. Eine eindeutige Zuordnung der IR- und TGA-Daten zur genauen Bindemittelzusammensetzung ist in keinem der Fälle möglich.

3.2.3 Pigmente

Zur Bestimmung der Pigmentgehalte wurde das Veraschungsverfahren nach DIN EN ISO 14680-2 angewandt. Dazu wurden jeweils ca. 2 g des entsprechenden SVM bei 800 °C für 2 Stunden verascht. Die Massenänderung wurde dabei gravimetrisch verfolgt. Vom so erhaltenen Glührückstand wurde anschließend die elementare Zusammensetzung mittels REM/EDX ermittelt. In Abb. 3 sind die Pigmentgehalte der SVM nach DIN EN ISO 14680-2 als Balken dargestellt. Der Pigmentgehalt ist jeweils über dem Balken prozentual angegeben. Zusätzlich sind die Balken in die jeweiligen Gehalte an Zink, Aluminium und sonstigen Elementen, welche mittels REM/EDX ermittelt wurden, aufgeteilt.

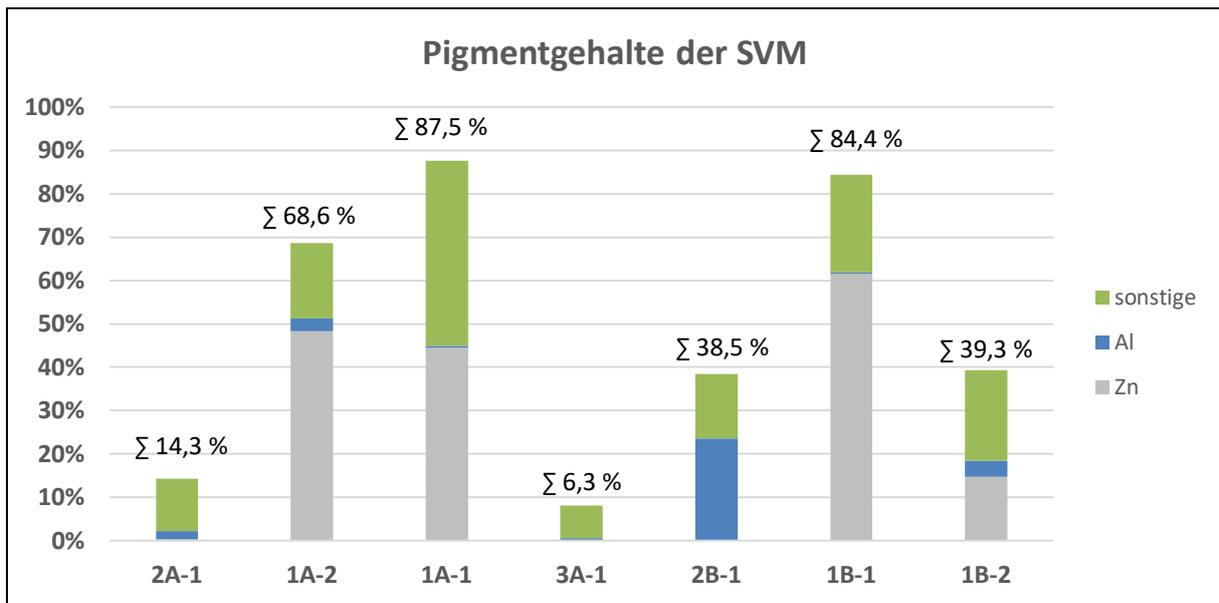


Abb. 3: Zusammensetzung des Glührückstands der SVM aus den jeweiligen Anteilen Zink, Aluminium und sonstigen Elementen. Die Summe über den Balken entspricht dem ermittelten Pigmentgehalt nach DIN EN ISO 14680-2.

Es wird deutlich, dass sich die SVM hinsichtlich der Pigmentgehalte grundlegend unterscheiden. Die zinkstaubhaltigen SVM besitzen dabei sehr hohe und die restlichen eher niedrige Gesamtmengen an Pigmenten. Bei **2A-1** und **3A-1** fällt der Anteil an aktiven Korrosionsschutzpigmenten (Zn, Al) sehr gering aus. **3A-1** besitzt demnach kein Korrosionsschutzpigment und **2A-1** lediglich knapp 2 % Aluminium.

3.3 Korrosionsschutzvermögen der SVM

3.3.1 Ermittlung relevanter Testparameter

Zur Ermittlung relevanter Testparameter für Belastungsversuche wurde der bereitgestellte Seildraht (\varnothing 4 mm, Zinküberzug) auf eine Länge von 15 cm eingekürzt und die beiden Enden mit Polyurethanbeschichtung versehen, um eine korrosive Unterwanderung des Zinküberzugs an den Schnittkanten zu verhindern (siehe Abb. 4).



Abb. 4: Endseitig geschützter Abschnitt eines Seildrahtes mit Zinküberzug.

Die Drahtprobekörper wurden dann bei 50 und 60 °C in den folgenden Medien unterschiedlich lang belastet:

- vollentsalztes (VE)-Wasser
- künstliches Meerwasser nach DIN EN ISO 15711
- 5%ige NaCl-Lsg.

Nach der Belastung wurden im metallographischen Querschliff jeweils die maximale Überzugsdicke und das Ausmaß an Lochfraß im Drahtstahl bestimmt.

Die verschiedenen Immersionsmedien wurden ausgewählt, um den Einfluss eindringender Salze zu untersuchen. Hierbei ist jedoch darauf hinzuweisen, dass es sich bei künstlichem Meerwasser und bei 5%iger NaCl-Lösung um Medien handelt, die sehr viel mehr Salz enthalten, als dies bei in das Seil eindringenden Medien in der Praxis zu erwarten ist. Die Belastungstemperaturen 50 und 60 °C wurden orientiert an bereits vergangenen Auslagerungsversuchen von Seilproben am Standort Madrid abgeleitet. Die Ergebnisse der Temperaturmessung im Inneren dieser Proben über einen Zeitraum von einem Jahr wurden dem IKS freundlicherweise zur Verfügung gestellt (siehe Abb. 5). Das entsprechende Unternehmen möchte jedoch nicht namentlich erwähnt werden. Da sich die maximal aufgezeichnete Temperatur bei 57 °C befindet, wurde für die hier durchzuführenden Versuche eine Belastungstemperatur von 60 °C als geeignet empfunden. Die Überlegung war, möglichst hohe aber realistische Temperaturen auszuwählen, damit die Prüfung schnell zu aussagekräftigen Ergebnissen führt. Da aus der Literatur des Weiteren bekannt ist, dass es ab ca. 60 °C zu Veränderungen der Realpotentialverhältnisse im System Stahl-Zink kommen kann („Potentialumkehr“), wurde die zweite Belastungstemperatur auf 50 °C festgelegt, um gleichzeitig die Verhältnisse ohne Potentialumkehr abzubilden [8].

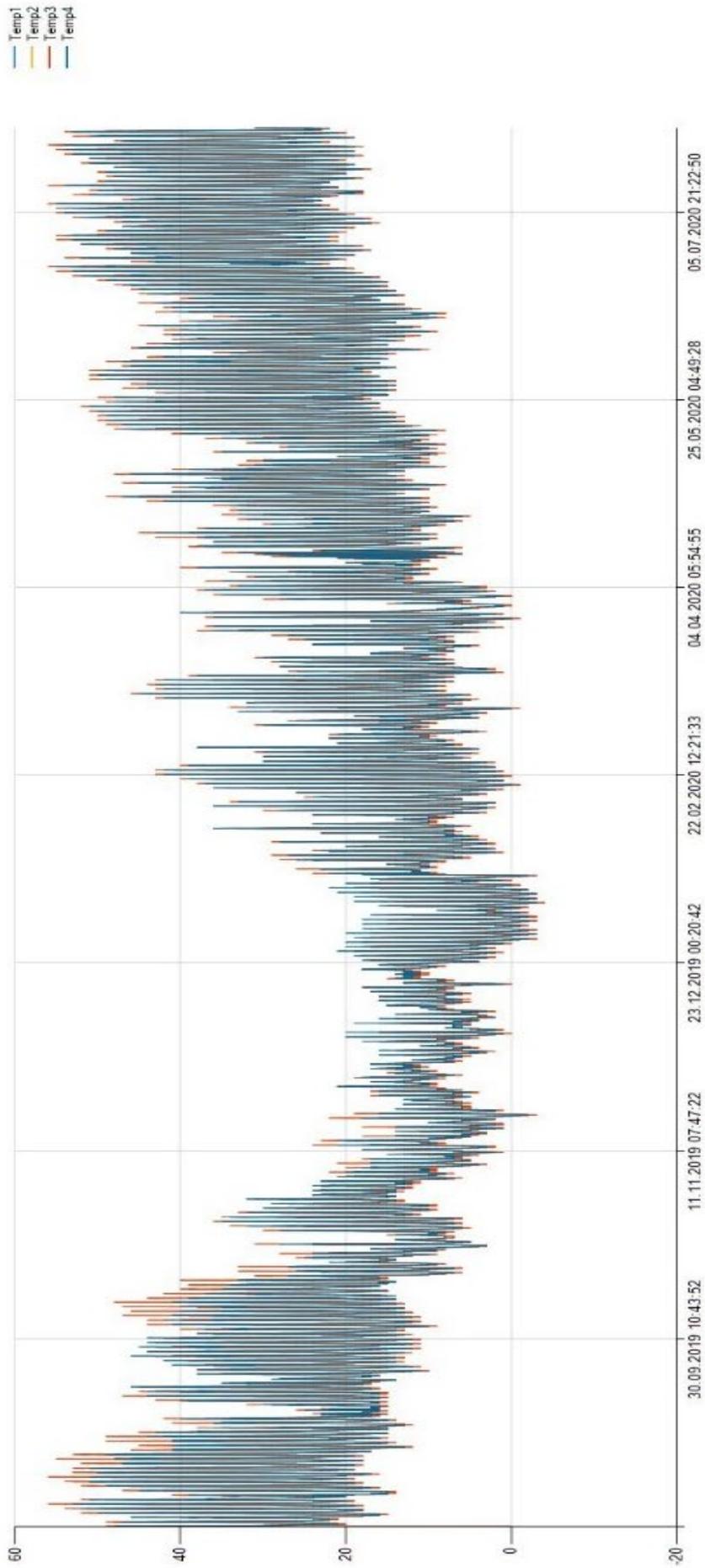


Abb. 5: Ergebnisse der kontinuierlichen Temperaturmessung in Seilproben während der Auslagerung am Standort Madrid im Jahr 2020.

Tatsächlich wird bei der Belastung der Drähte mit Zink-Überzug in VE-Wasser bei 50 °C ein deutlich anderes Korrosionsverhalten festgestellt, als bei 60 °C (siehe Abb. 6).



Abb. 6: Vergleichende photographische Aufnahmen bei 50 und 60 ° belasteter Drähte.

Während es bei 50 °C zu einem gleichmäßigen Abtrag des Zinküberzugs mit steigender Belastungsdauer und einem kontinuierlich ansteigenden Ausmaß an Lochfraß kommt, bleibt die maximale Überzugsdicke bei 60 °C annähernd gleich, wobei der Überzug unregelmäßig durchbrochen wird (siehe Abb. 8). Um dieses Phänomen weiter zu untersuchen, wurden die temperaturabhängigen Ruhepotentiale des Seildrahts mit Zink-Überzug und des entzinkten Seildrahtes in deionisiertem Wasser bestimmt (siehe Abb. 7). Es zeigt sich, dass der Zinküberzug bei 60 °C sehr viel edler ist, als bei 50 °C, was das geringere Ausmaß an Korrosion bei 60 °C erklärt. Der Überzug wird zwischen 50 und 60 °C sogar edler als der Drahtstahl, womit er auch seine kathodische Schutzwirkung gegenüber dem Draht verliert. Dies äußert sich dadurch, dass es an jenen Stellen, wo der Überzug einmal durchbrochen wird, zu deutlichem Lochfraß kommt.

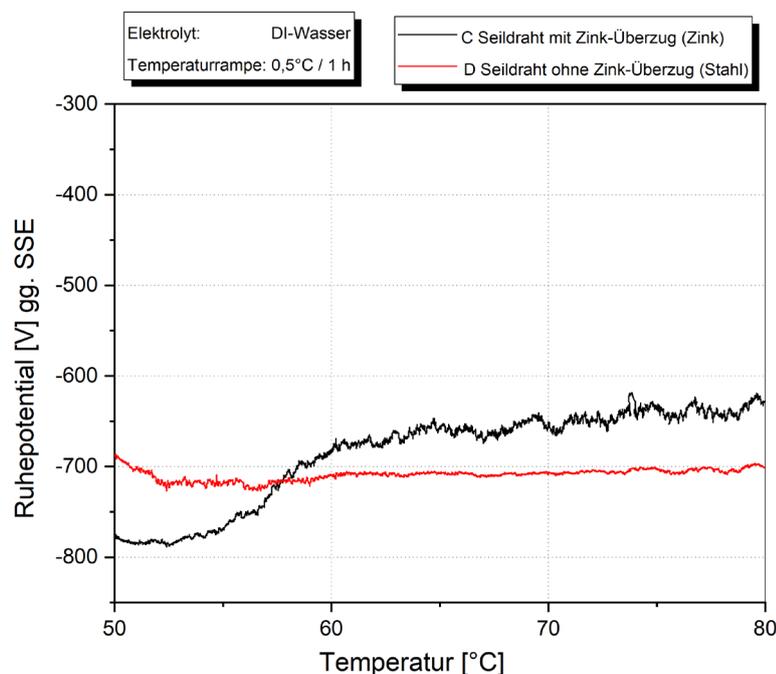


Abb. 7: Ruhepotentiale des verwendeten Seildrahtes mit Zinküberzug und des entzinkten Seildrahtes in deionisiertem Wasser zwischen 50 und 80 °C.

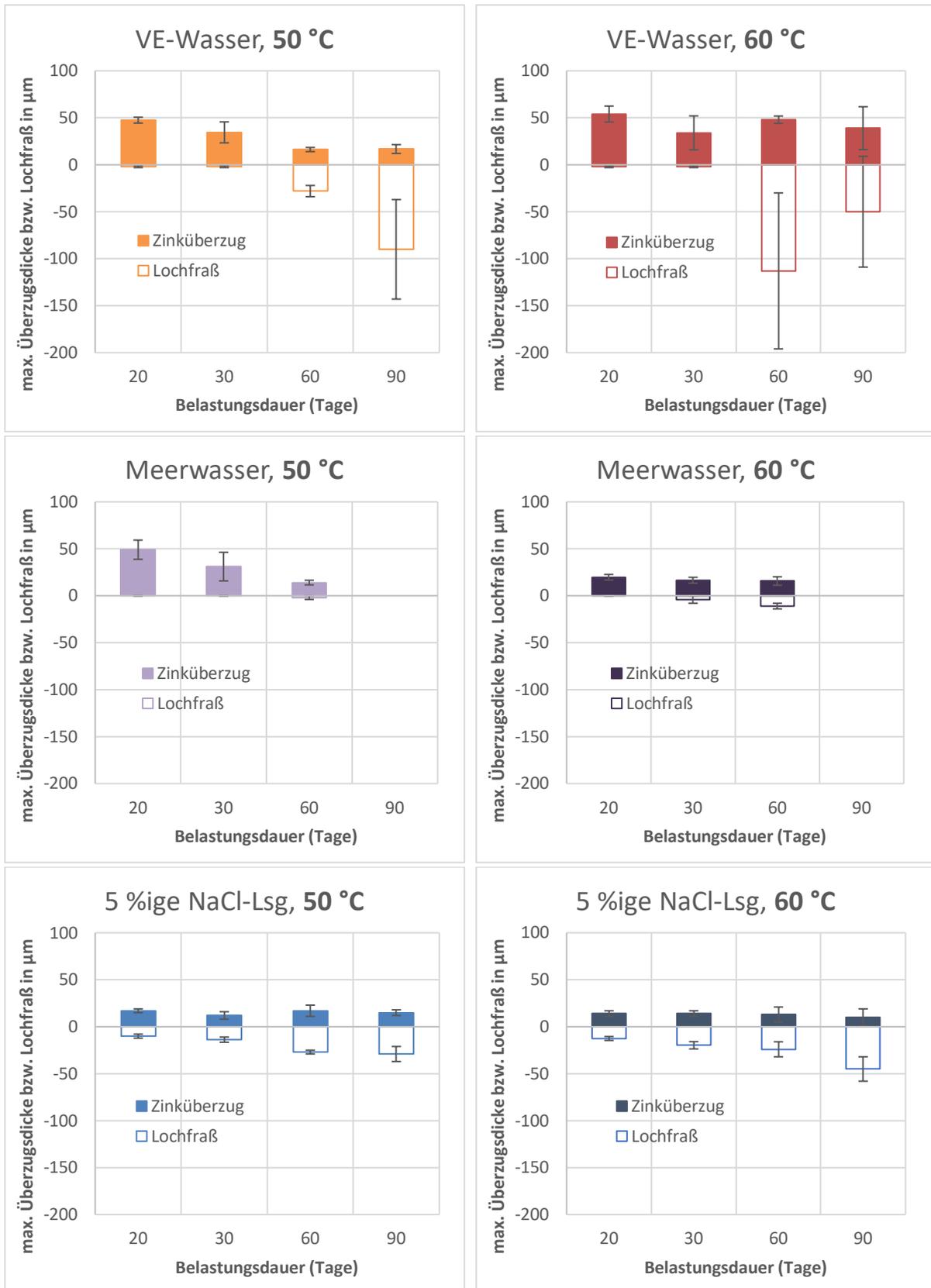


Abb. 8: Grafische Darstellung der im metallographischen Querschliff bestimmten maximalen Überzugsdicke bzw. Lochfraß an Stahlrunddrähten mit Zinküberzug in Abhängigkeit von der Belastungszeit bei Belastungstemperaturen von 50 und 60 °C in VE-Wasser, künstlichem Meerwasser nach DIN EN ISO 15711 und 5%iger wässriger Natriumchloridlösung. Es wurde jeweils der Durchschnitt aus 4 Bestimmungen an unterschiedlichen Drähten gebildet.

Als alternative Belastungsmedien neben VE-Wasser wurden sowohl künstliches Meerwasser nach DIN EN ISO 15711, als auch 5%ige Natriumchloridlösung an Seildrähten mit Zinküberzug getestet. Die Abnahme des Zinküberzugs und die Zunahme der Korrosion des Drahtstahls (Lochfraß) wurde systematisch in den verschiedenen Medien, jeweils bei 50 und bei 60 °C an je 4 Drähten untersucht. Die Ergebnisse sind in Abb. 8 zusammengefasst. Die Ergebnisse der Ruhepotentialmessung werden hierdurch bestätigt, da man in VE-Wasser bei 50 °C eine gleichmäßige Abnahme des Zinküberzugs und Zunahme des Ausmaßes an Lochfraß mit steigender Versuchsdauer beobachten kann. Bei 60 °C sind die Ergebnisse dagegen nicht konsistent, was sich mit der Potentialumkehr erklären lässt. Da die Potentialumkehr nur bei sehr niedrigen Salzkonzentrationen eintritt [8], ist das Korrosionsverhalten in künstlichem Meerwasser nach DIN EN ISO 15711 und in 5%iger NaCl-Lsg. bei 50 und bei 60 °C annähernd gleich, nur unterschiedlich schnell. In künstlichem Meerwasser erfolgt der Durchbruch des Zinküberzugs sehr spät, was an der Ausbildung von sulfatischen Zink-Deckschichten liegen könnte. Künstliches Meerwasser wurde aus diesem Grund für die Untersuchung des Korrosionsschutzvermögens von SVM im Seil nicht weiterverwendet. Bei der Verwendung von 5%iger NaCl-Lsg. kommt es bei 60 °C bereits nach 20 Tagen Versuchsdauer zum Durchbruch des Zinküberzugs und das Ausmaß an Lochfraß nimmt über die Versuchsdauer konstant zu. Abgeleitet von diesen Vorversuchen wurden die folgenden Belastungsbedingungen für die Untersuchung der SVM verwendet:

Kurzbezeichnung:	VE50	NaCl60
Medium:	VE-Wasser	5%ige NaCl-Lsg.
Temperatur:	50 °C	60 °C
Dauer:	30, 60 und 90 Tage	30 und 60 Tage

3.3.2 Drahtbündelproben

Das gelieferte Drahtmaterial (4 mm Runddraht mit Zinküberzug) wurde zur Herstellung von Drahtbündelproben verwendet. Dazu wurde der Draht in Stücken einer Länge von 15 mm zugeschnitten und begradigt. Für eine Drahtbündelprobe wurden 7 Runddrähte (\varnothing 4 mm, Länge 15 cm) im Verbund (6 Außendrähte, 1 Kerndraht) mit einem Schrumpfschlauch (Hersteller: Elkubema, Olefin Typ A, 12,7 mm) fixiert (siehe Abb. 9). Danach wurde der Kerndraht entfernt und das entsprechende SVM mit einer Einwegspritze über die Enden zudosiert. Der Kerndraht wurde dann so nachgeschoben, dass eine gleichmäßige Verteilung des SVM im Probekörper gewährleistet wurde. Die Enden des Probekörpers wurden in Epoxidharz eingebettet, um die Schnittkanten zu schützen. Abschließend wurde der Schrumpfschlauch komplett entfernt. Nach der Belastung im entsprechenden Medium wurden die Probekörper trocken zugesägt. Das mittlere Stück wurde optisch/haptisch und die beiden äußeren Stücken im Querschliff ausgewertet. Die Drahtbündelproben wurden zur Untersuchung des Korrosionsschutzvermögens der verschiedenen SVM in Immersionsversuchen belastet. Dabei wurden die zuvor aufgespürten Belastungsszenarien, wie im Abschnitt 3.3.1 beschrieben, angewandt.

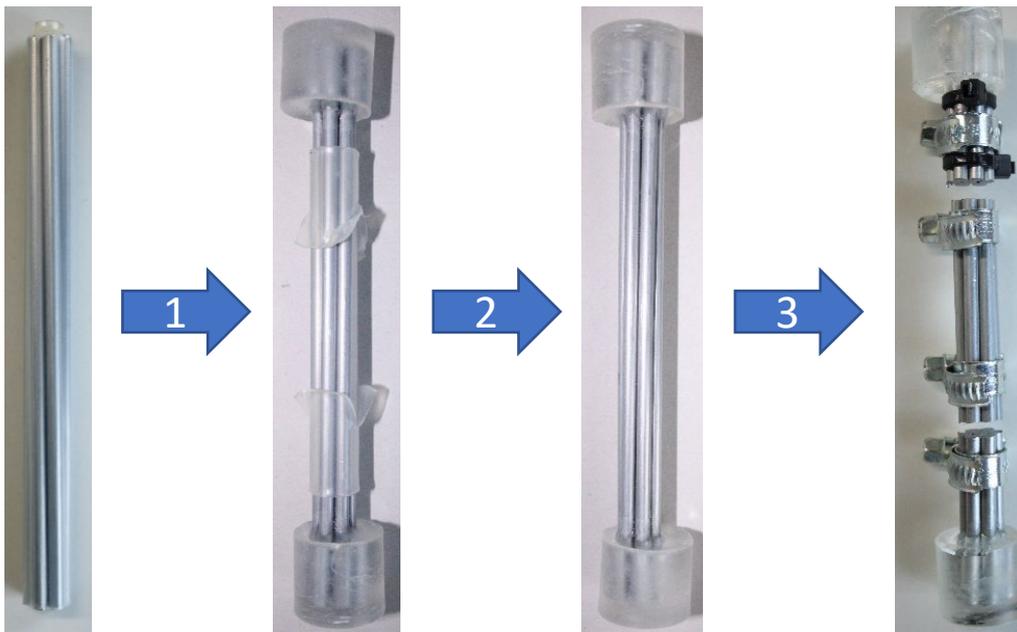


Abb. 9: Teilschritte der Drahtbündelprobenherstellung. 1. Befüllen des Drahtbündels mit SVM und endseitiger Epoxidharzverguss. 2. Entfernung des Schrumpfschlauchs. 3. Belastung im entsprechenden Medium und Zerlegung der Probe.

Nach der Belastung wurden die Proben an je 2 Stellen zersägt. Das mittlere Stück wurde geöffnet und das enthaltene Seilverfüllmittel analysiert. Die Ergebnisse der SVM-Analyse sind im Kapitel 3.6 „Alterungsbeständigkeit“, Abschnitte 3.6.3 und 3.6.4 aufgeführt. Die Schnittflächen wurden metallographisch auf Korrosionserscheinungen untersucht. Hierbei wurden die Restdicke des Zinküberzugs und die Tiefe der Korrosion des Stahls jeweils im Inneren der Probe ausgewertet. Anhand der Ergebnisse wird deutlich, dass alle SVM gegenüber VE-Wasser bei 50 °C im Vergleich zum unverfüllten Zustand eine sehr gute Beständigkeit besitzen (siehe Abb. 10).

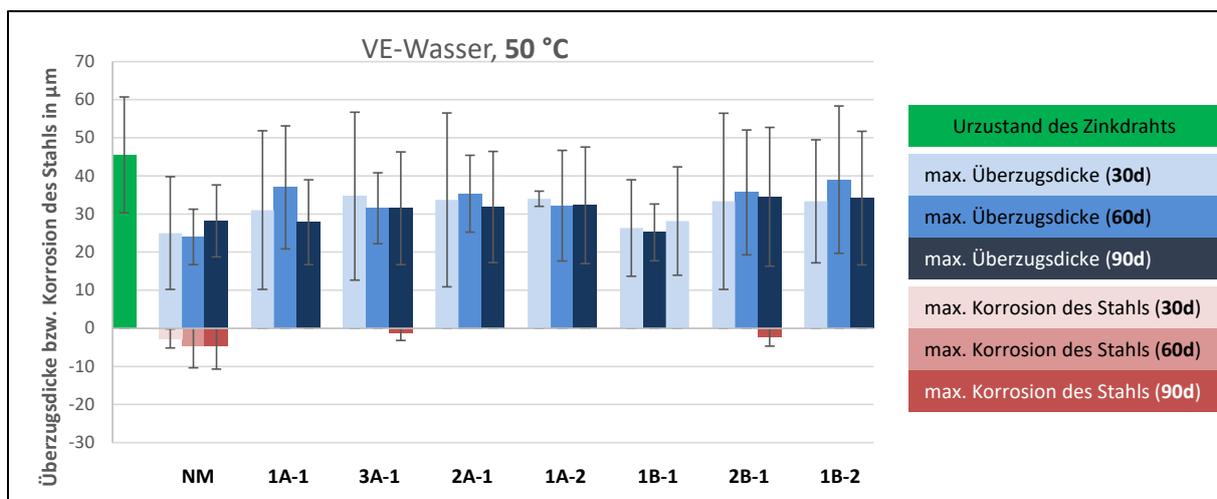


Abb. 10: Ergebnisse der metallographischen Auswertung von Korrosionserscheinungen bei Drahtbündelproben nach der immersiven Belastung in VE-Wasser bei 50 °C.

Es kommt erst nach 90 Tagen bei den SVM **2B-1** und dem Modell-SVM **3A-1** zur geringfügigen punktuellen Korrosion des Stahls. Die Dicke der Zinküberzüge nimmt auch nach 90 Tagen Belastung in allen Fällen nur geringfügig ab.

Gegenüber 5%iger NaCl-Lsg. erhalten alle geprüften SVM ein gutes Schutzniveau bis zu einer Belastungsdauer von 30 Tagen. Erhöht man die Belastungsdauer noch weiter, kommt es bei den SVM ohne Zinkstaub (**3A-1, 2A-1, 2B-1**) zu einem deutlicheren Korrosionsangriff gegenüber den Seildrähten, als bei den SVM mit Zinkstaub (**1A-1, 1A-2, 1B-1, 1B-2**) (siehe Abb. 11).

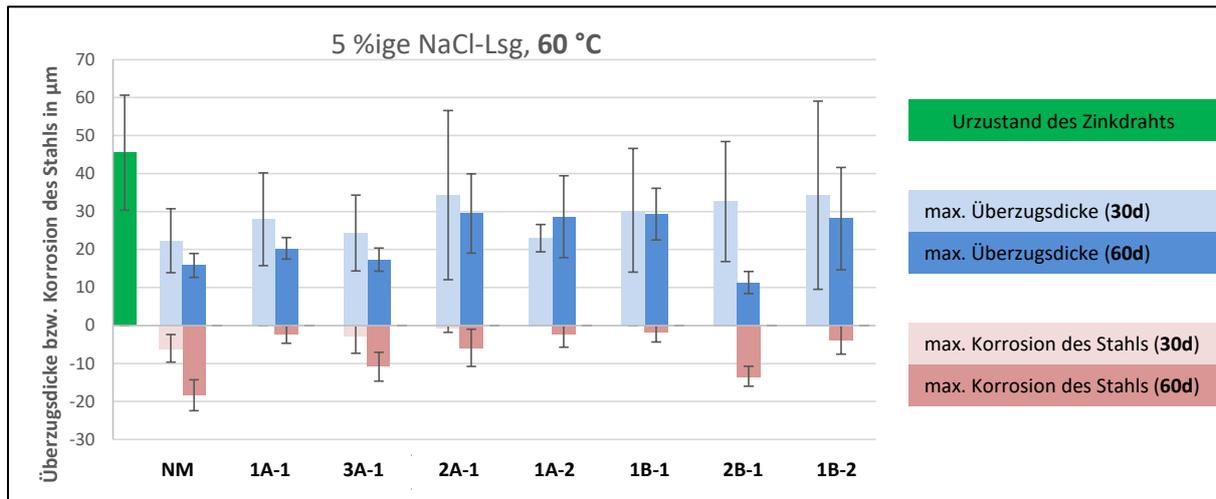


Abb. 11: Ergebnisse der metallographischen Auswertung von Korrosionserscheinungen bei Drahtbündelproben nach der immersiven Belastung in 5%iger NaCl-Lösung bei 60 °C.

Anhand der Versuche wird deutlich, dass mit Aluminiumpigmenten nicht die gleiche Schutzwirkung gegenüber den Seildrähten mit Zinküberzug erreicht wird, wie mit Zinkstaubpigmenten. Das SVM **2B-1** mit ca. 24 % Aluminium besitzt sogar eine geringere Beständigkeit gegenüber VE-Wasser und gegenüber 5%iger NaCl-Lösung, als **2A-1**, welches ca. 2 % Aluminium besitzt.

3.3.3 Beschichtete Probenplatten

Es wurden stückverzinkte Stahlplatten verwendet, welche durch Sweep-Strahlen (Edelkorund, verminderter Druck, Strahlwinkel < 30 °) vorbereitet wurden. Die Applikation des Seilverfüllmittels erfolgte durch spachteln, wobei die Hälfte der Probenplatte abgeklebt wurde. Überschüssiges SVM wurde soweit wie es ging mit dem Spachtel entfernt, sodass im Wesentlichen nur die Rauheitstäler auf der Fläche mit SVM gefüllt waren. Das Klebeband wurde dann wieder entfernt. Die halbseitig beschichteten Probenplatten wurden den Belastungsszenarien aus Abschnitt 3.3.1 mit reduzierter Versuchsdauer ausgesetzt. Anschließend wurde die Bildung von Korrosionsprodukten auf der Probenfläche visuell zu verschiedenen Zeitpunkten (jeweils nach 15 Tagen) ausgewertet (siehe Tabelle 3). Es ergaben sich die folgenden Abstufungen:

- grün: kein bzw. wenig Korrosionsprodukte des Zinks (Weißrost)
- blau: flächige Korrosionsprodukte des Zinks (Weißrost)
- braun: vereinzelte Rotrostpunkte auf der Fläche

Tabelle 3: Visuelle Auswertung von gesweepen feuerverzinkten Stahlplatten, die halbseitig mit Seilverfüllmittel beschichtet und anschließend in verschiedenen Immersionsmedien belastet wurden (WR...Weißrost, RR...Rotrost).

SVM	Belastung	Visuelle Auswertung												
		15 d		30 d		45 d		60 d						
		beschichtete Seite	unbeschichtete Seite	beschichtete Seite	unbeschichtete Seite	beschichtete Seite	unbeschichtete Seite	beschichtete Seite	unbeschichtete Seite					
2A-1	VE-Wasser, 50 °C	WR vereinzelt	WR flächig	WR vereinzelt	WR flächig	WR vereinzelt	WR flächig	WR vereinzelt	WR flächig	WR vereinzelt	WR flächig	WR vereinzelt	WR flächig	
1A-2		WR vereinzelt	WR flächig	WR vereinzelt	WR flächig	WR vereinzelt	WR flächig	WR vereinzelt	WR flächig	WR vereinzelt	WR flächig	WR vereinzelt	WR flächig	
1A-1		WR vereinzelt	WR flächig	WR vereinzelt	WR flächig	WR vereinzelt	WR flächig	WR vereinzelt	WR flächig	WR vereinzelt	WR flächig	WR vereinzelt	WR flächig	
3A-1		WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	RR vereinzelt	RR vereinzelt	RR vereinzelt	
1B-1		i.O.	WR flächig	i.O.	WR flächig	WR flächig	WR vereinzelt	WR flächig	WR vereinzelt	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	
2B-1		WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	RR vereinzelt	RR vereinzelt	
1B-2		WR vereinzelt	WR flächig	WR vereinzelt	WR flächig	WR flächig	WR vereinzelt	WR flächig	WR vereinzelt	WR flächig	WR vereinzelt	WR flächig	WR vereinzelt	WR flächig
2A-1		WR flächig	WR flächig	RR vereinzelt	WR flächig	RR vereinzelt	RR vereinzelt	WR flächig	RR vereinzelt	RR vereinzelt	RR vereinzelt	RR vereinzelt	RR vereinzelt	RR vereinzelt
1A-2	WR flächig	WR flächig	RR vereinzelt	WR flächig	RR vereinzelt	RR vereinzelt	WR flächig	RR vereinzelt	RR vereinzelt	RR vereinzelt	RR vereinzelt	RR vereinzelt	RR vereinzelt	
1A-1	WR flächig	WR flächig	RR vereinzelt	WR flächig	RR vereinzelt	RR vereinzelt	WR flächig	RR vereinzelt	RR vereinzelt	RR vereinzelt	RR vereinzelt	RR vereinzelt	RR vereinzelt	
3A-1	WR flächig	WR flächig	RR vereinzelt	WR flächig	RR vereinzelt	RR vereinzelt	WR flächig	RR vereinzelt	RR vereinzelt	RR vereinzelt	RR vereinzelt	RR vereinzelt	RR vereinzelt	
1B-1	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	
2B-1	WR flächig	WR flächig	RR vereinzelt	WR flächig	RR vereinzelt	RR vereinzelt	WR flächig	RR vereinzelt	RR vereinzelt	RR vereinzelt	RR vereinzelt	RR vereinzelt	RR vereinzelt	
1B-2	WR flächig	WR flächig	RR vereinzelt	WR flächig	RR vereinzelt	RR vereinzelt	WR flächig	RR vereinzelt	RR vereinzelt	RR vereinzelt	RR vereinzelt	RR vereinzelt	RR vereinzelt	
2A-1	5%ige NaCl-Lsg., 60 °C	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	
1A-2		WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	
1A-1		WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	
3A-1		WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	
1B-1		WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	
2B-1		WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	
1B-2		WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	
2A-1		WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	WR flächig	

Man erkennt, dass die Bewertung der Fläche bei der Belastung mit VE-Wasser bei 50 °C eine sehr gute Korrelation mit den Ergebnissen der Drahtbündelproben besitzt. Die ersten flächigen Korrosionserscheinungen des Zinküberzugs ab 15 Tagen Belastung bzw. die ersten Rotrosterscheinungen ab 60 Tagen Belastung wurden bei den SVM **2B-1** und **3A-1** beobachtet. Diese beiden SVM versagten auch in der Drahtbündelprobe bei Belastung mit VE-Wasser als erstes (siehe Abschnitt 3.3.2). Bei allen verbleibenden SVM zeigte die beschichtete Fläche bis zu einer Belastungszeit von 45 Tagen nur vereinzelte Weißrostbildung, während die unbeschichtete Fläche von Anfang an mit Weißrost überzogen war.

Die Belastung mit Natriumchloridlösung führte in allen Fällen bereits nach 15 Tagen Belastung zur flächigen Ausbildung von Weißrost. Bei den zinkstaubhaltigen SVM ist es nicht möglich zu sagen, ob der Weißrost von der Korrosion des Zinküberzugs oder der Zinkstaubpigmente aus dem SVM resultiert. Nach 30 Tagen Belastung kam es dann bei allen Proben, außer bei **1B-1** zur Ausbildung von vereinzeltem Rotrost auf der Probenfläche. Diese Beobachtung entspricht in beschleunigter Form ebenfalls den Ergebnissen der Drahtbündelproben. Dort war die Schutzwirkung durch alle SVM noch bis zu 30 Tagen Belastung gegeben. Ab 60 Tagen Belastung kam es dann in allen Fällen zur Korrosion des Drahtstahls, wobei das Ausmaß an Lochfraß bei **1B-1** am geringsten war.

3.4 Ausblutverhalten der SVM

3.4.1 Vorbetrachtung zur Gefahr des Seilblutens

Bedingt durch die Zusammensetzung der am Markt erhältlichen SVM gepaart mit der natürlichen Temperaturschwankung im Seil (vgl. Abschnitt 3.3.1), sind die in Abb. 12 dargestellten äußeren und inneren Faktoren für die Gefahr des Seilblutens maßgeblich [1]. Die äußeren Faktoren können dabei zusätzlich Einfluss auf die inneren Faktoren nehmen.

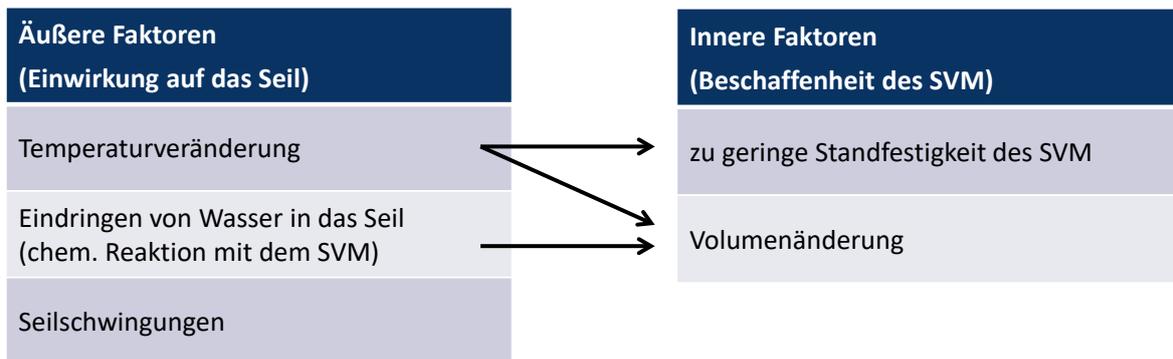


Abb. 12: Vorbetrachtung bezüglich Einflussfaktoren auf die Gefahr des Seilblutens.

Im BAST-Bericht B16 [1] wurden bereits Untersuchungen zum Ausblutverhalten von Seilverfüllmitteln anhand der Beobachtung von Bauwerken über mehrere Jahre durchgeführt. Auch wenn damals die Ursachen nicht eindeutig festgestellt werden konnten, wurde zumindest festgestellt, dass Verkehr und Wind zu nachweisbaren Seilschwingungen führen, die jedoch nur geringe Seildehnungen hervorrufen. Somit sind Seilschwingungen als Einflussparameter für das Seilbluten zu vernachlässigen. Um die inneren Faktoren „Standfestigkeit“ und „Volumenänderung“ einschätzbar zu machen, wurden gezielte Versuche, die in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben sind, durchgeführt.

3.4.2 Scherviskosität

Die Scherviskositäten der SVM mit auf den Seilzustand reduzierten Lösemittelgehalten (siehe Abschnitt 3.2.1) wurden mithilfe eines Rheometers (Rheotec RC20-CPS) unter Einhaltung der folgenden Messbedingungen bei den Messtemperaturen 20, 25, 40, 60 und 80 °C aufgenommen:

1A-1, 1A-2, 1B-1, 1B-2, 2B-1, 3A-1:

Messsystem:	Platte – Platte (P25)
Messspalt:	0,3 mm
Vorscherung:	90 s von 0 s ⁻¹ auf 10 s ⁻¹
Schergeschwindigkeit:	10 s ⁻¹
Messdauer:	300 s

2A-1

Messsystem:	Platte – Platte (P50)
Messspalt:	0,2 mm
Vorscherung:	90 s von 5 s ⁻¹ auf 100 s ⁻¹
Schergeschwindigkeit:	100 s ⁻¹
Messdauer:	300 s

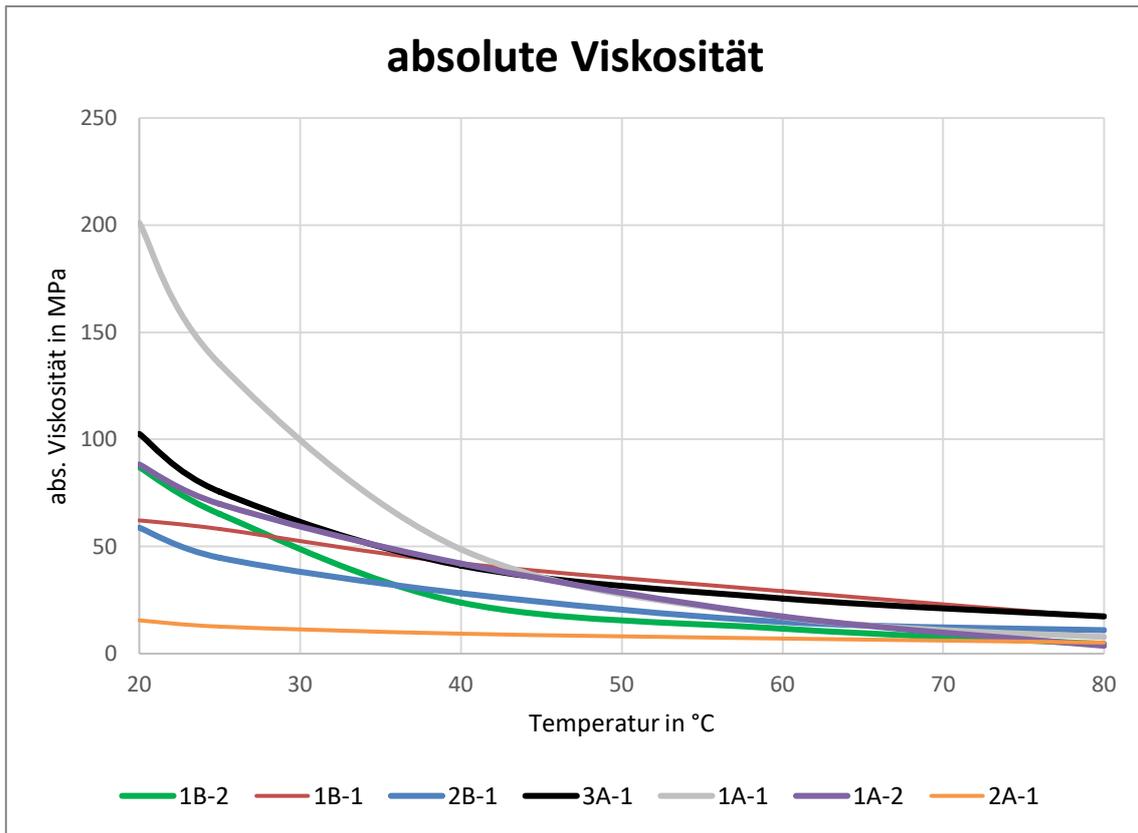


Abb. 13: Absolute Scherviskosität der SVM in Abhängigkeit von der Temperatur.

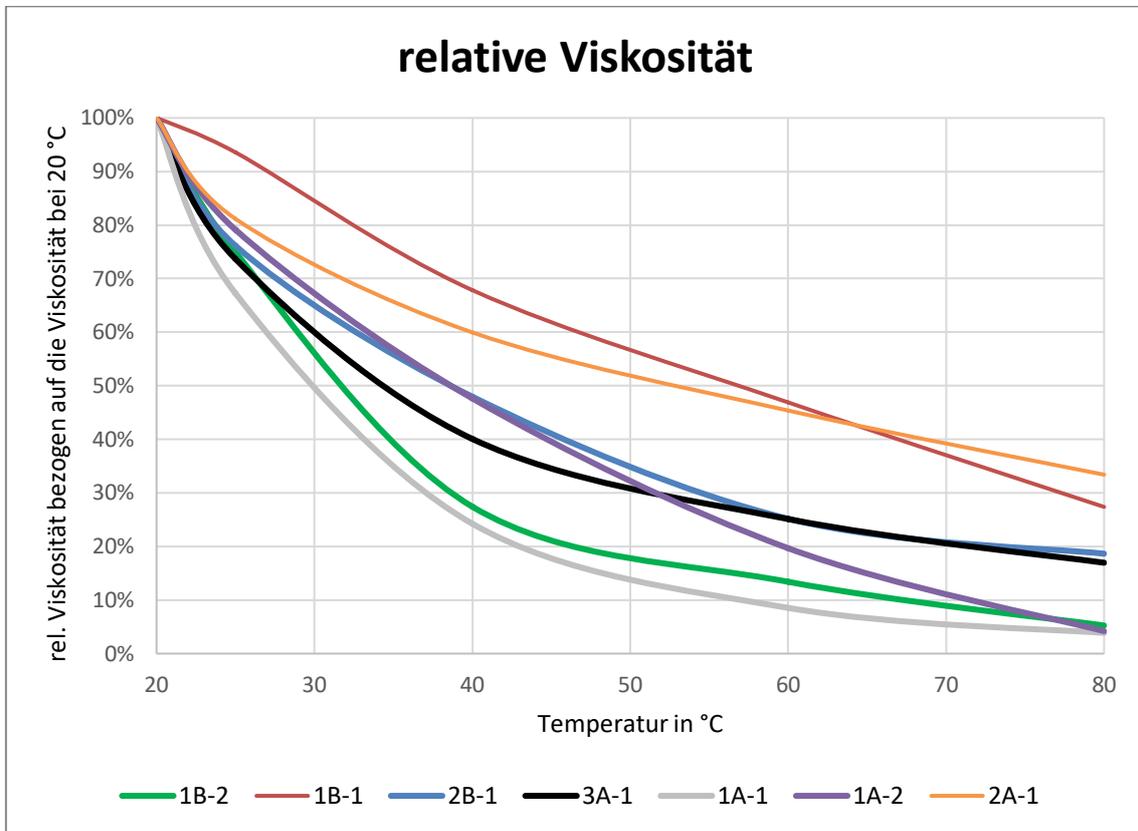


Abb. 14: Relative Scherviskosität der SVM bezogen auf den jeweiligen Absolutwert bei 20 °C.

Trägt man die erhaltenen Werte für die Scherviskosität gegen die Messtemperatur auf, so sieht man zunächst, dass sich die SVM in sehr unterschiedlichen Viskositätsbereichen bewegen (siehe Abb. 13). Mit steigender Temperatur nimmt die Viskosität dann in allen Fällen, jedoch unterschiedlich stark, ab. Dieser Abfall der Viskosität könnte im Zusammenhang mit eventuellen Ausblutvorgängen stehen. Um die Änderung der Viskosität besser zu verdeutlichen, sind in Abb. 14 die jeweiligen Relativwerte (bezogen auf die Viskosität bei 20 °C) aufgeführt. Man erkennt, dass es bei **1A-1**, **1A-2** und **1B-2** zu den drastischsten Viskositätsminderungen im untersuchten Temperaturbereich kommt. Bei 80 °C beträgt die Viskosität bei allen drei SVM nur noch ca. 5 % des Wertes bei 20 °C.

3.4.3 Standfestigkeit

Zur Ermittlung der Standfestigkeit wurden zunächst Abtropfversuche mit Probekörpern aus Seildrahtbündeln analog zu den Proben für Korrosionsschutzuntersuchungen (siehe Abschnitt 3.3.2), jedoch ohne endseitigen Verguss durchgeführt. Die Probekörper wurden senkrecht hängend für eine Stunde bei den Temperaturen 60, 80, 100 und 120 °C im Trockenschrank gelagert (siehe Abb. 15). Es wurde dann das Abtropfen von SVM aus den Probekörpern beurteilt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 aufgeführt. Bei **1A-1** wurde Abtropfen bereits ab einer Temperatur von 100 °C beobachtet. Bei **1A-2** kommt es dagegen erst ab 120 °C zum Abtropfen. Bei allen anderen SVM wurde kein Abtropfen bis 120 °C festgestellt.



Abb. 15: Abtropfversuch mit Seilprobekörpern.

Tabelle 4: Ergebnisse der Abtropfversuche mit Seilprobekörpern. „i.O.“ = kein Abtropfen nach 1 Stunde senkrechter Lagerung bei der angegebenen Temperatur. „n.i.O.“ = Abtropfen.

SVM	60 °C	80 °C	100 °C	120 °C
2A-1	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.
1A-2	i.O.	i.O.	i.O.	n. i. O.
1A-1	i.O.	i.O.	n. i. O.	n. i. O.
3A-1	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.
2B-1	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.
1B-1	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.
1B-2	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.

Zur Vereinfachung der Untersuchung der Standfestigkeit der SVM wurden verschiedene Ablaufneigungsversuche bei Rakelapplikation des entsprechenden SVM auf zuvor gebeizten Stahlblechen mithilfe einer Distanzbodenrakel durchgeführt. Dabei wurde jeweils ein Schichtdickengradient eingestellt. Da der Gradient zwischen 0 und 1000 µm nur eine sehr ungenaue Bestimmung der maximalen Schichtdicke vor dem Abfließen zulässt, wurden jeweils 3 Gradienten (0 – 350 µm, 350 – 650 µm und 650 – 1000 µm) untersucht. Auf den Blechen wurde direkt nach der Applikation eine Trennlinie in Gradientenrichtung mithilfe eines Glasstabs eingebracht und das Blech wurde im Anschluss senkrecht für eine Stunde im jeweils temperierten Trockenschrank aufgestellt, wobei der Schichtdickengradient bzw. die Trennlinie orthogonal zum Boden ausgerichtet waren. Es wurde dann nach 24 Stunden Konditionierung bei 23 °C und 50 % rel. Luftfeuchte jeweils die Schichtdicke, bei der noch kein Abfließen beobachtet wurde, anhand der Position im Gradienten auf 50 µm genau abgeschätzt. Die Ergebnisse sind in Abb. 16 enthalten.

Man erkennt zunächst, dass die Standfestigkeit jener SVM, die einen Lösemittelanteil > 3% haben und Zinkstaub enthalten (**1B-1** und **1B-2**), am geringsten ausfällt. Hierbei kommt es schon bei 60 °C zum Abfließen bei ca. 600 bzw. 650 µm. Die Standfestigkeit aller SVM, außer **2B-1** und **2A-1**, nimmt mit steigender Temperatur ab. Bei **2B-1** ist zu erwähnen, dass dieses in jedem der Versuche auf dem Blech ausgehärtet ist. **2A-1** hat sich hingegen in keinem der Versuche optisch bzw. haptisch verändert.

In Abb. 16 sind zusätzlich die Schichtdicken markiert, welche der notwendigen Standfestigkeit bei den für Brückenseile typischen Runddrahtdurchmessern von 4 und 6 mm entsprechen. Dieser Angabe liegt folgende Überlegung zugrunde. Zunächst wird hierbei davon ausgegangen, dass die Standfestigkeit nur in den Hohlräumen der Runddrähte eine Rolle spielt, da die Hohlräume zwischen den Z-Drähten der äußeren Drahtlagen z.T. unverfüllt sind und zudem im Vergleich zu Runddrähten sehr viel kleiner ausfallen.

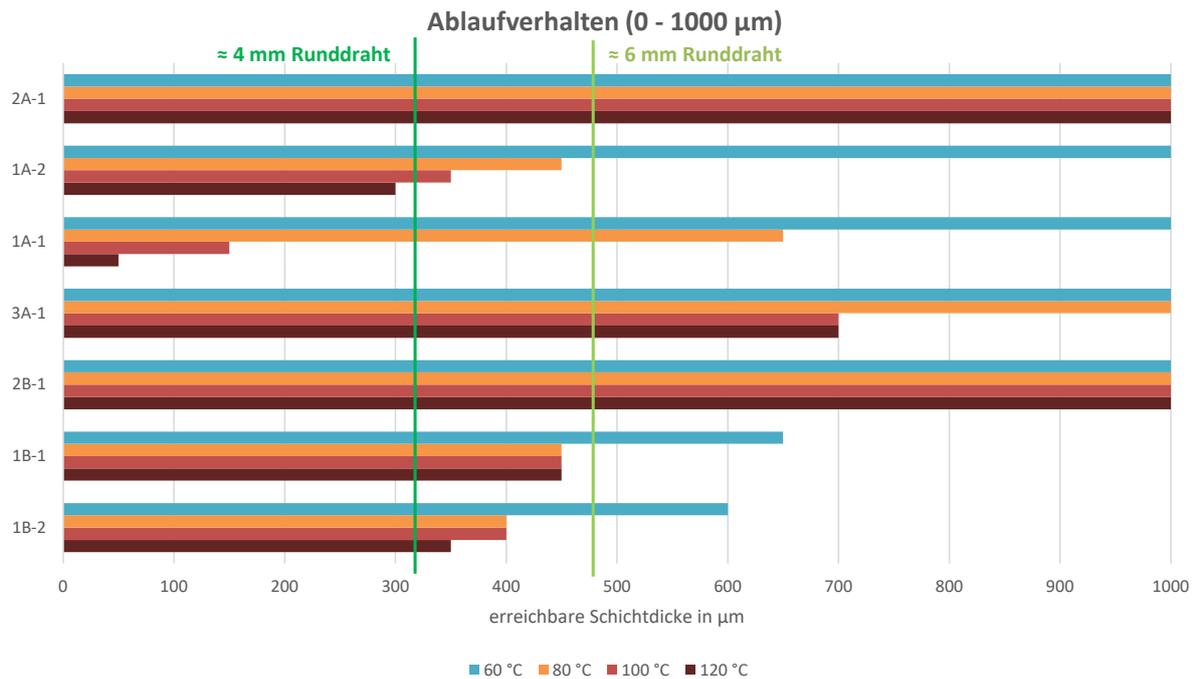


Abb. 16: Ergebnisse der Standfestigkeitsuntersuchungen im Schichtdickenbereich von 0 – 1000 μm bei jeweils 60, 80, 100 und 120 °C.

Des Weiteren wird ein idealer Hohlraum zwischen hexagonal dicht gepackten Kreisen angenommen. In einen solchen Hohlraum lässt sich maximal ein Kreis einbeschreiben, dessen Radius genau um den Faktor 2π gegenüber dem Radius der umliegenden Drähte vermindert ist. Der Radius dieses einbeschriebenen Kreises entspricht genau der Entfernung von der Drahtoberfläche bis zur Hohlraummitte, was wiederum die maximale Schichtdicke des SVM auf dem Seildraht im Hohlraum entspricht (siehe Abb. 17).

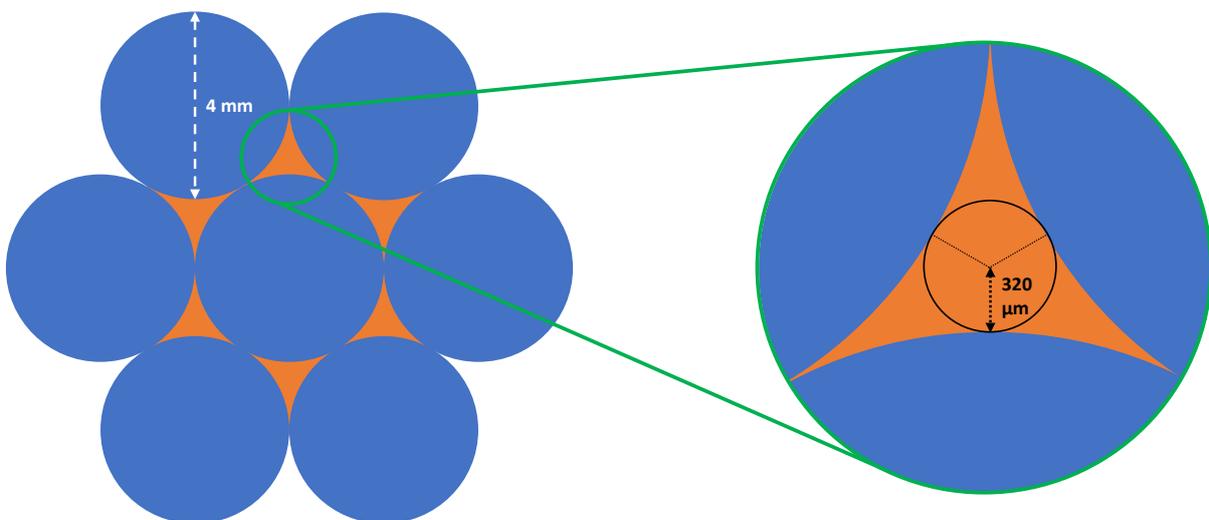


Abb. 17: Theoretische Betrachtung der maximal notwendigen Standfestigkeit in Abhängigkeit vom Drahtdurchmesser im Seil.

Anhand dieser Überlegung ergeben sich ca. **320 µm** erforderliche Schichtdicke für 4 mm Drahtdurchmesser und **480 µm** für 6 mm Drahtdurchmesser. Diese Schichtdicken würden sich als Anforderung für einen Ablaufneigungsversuch anbieten.

Bezieht man diese Überlegung in den Vergleich der Ergebnisse der Ablaufneigung mit jenen des Abtropfversuchs mit ein, lässt sich eine gute Übereinstimmung beider Versuche zeigen.

Da für die Drahtbündelprobenherstellung Drähte mit einem Durchmesser von 4 mm verwendet wurden, würde die maximal zu erreichende Schichtdicke ca. 320 µm betragen. Bei dieser Schichtdicke kommt es bei **1A-2** im Ablaufneigungsversuch bei 120 und bei **1A-1** schon bei 100 °C zum Ablaufen, was auch dem Befund aus dem Abtropfversuch entspricht.

3.4.4 Volumenänderung

Die Volumenänderung wurde indirekt über vergleichende Dichtebestimmungen nach der Bechermethode bestimmt. Dabei wurde das jeweilige SVM blasenfrei in einen Dichtebecher bekannten Volumens überführt und die Masse mithilfe einer Waage bestimmt. Diese Vorgehensweise ist schematisch in Abb. 18 dargestellt.

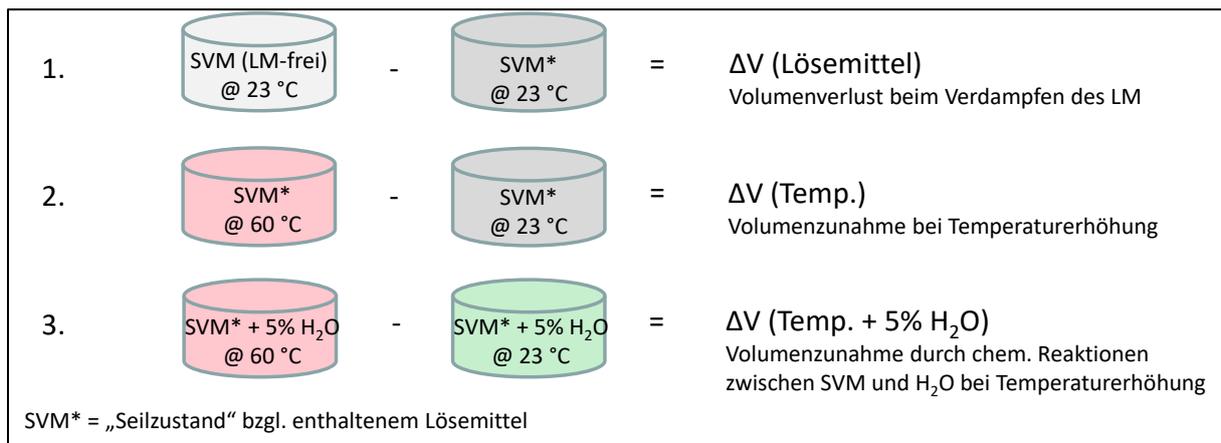


Abb. 18: Schematische Übersicht zur Ermittlung der Volumenänderung der SVM in Abhängigkeit vom Lösemittelgehalt, von der Temperatur und von der enthaltenen Wassermenge mit Hilfe der Pyknometermethode.

Zur Bestimmung der Volumenänderung bei Lösemittelabgabe erfolgte als Subtraktion der Dichte des Seilzustands bei 23 °C und jener des komplett lösemittelfreien Zustands der lösemittelhaltigen SVM (**1B-1**, **1B-2** und **2B-1**). Die Volumenänderung bei Temperaturerhöhung ergab sich aus dem Vergleich der Dichte aller SVM bei 23 °C und jener bei 60 °C. Zusätzlich wurde noch der Einfluss infiltrierenden Wassers durch Zugabe von 5 % VE-Wasser zum jeweiligen SVM und anschließender Homogenisierung abgebildet. Die Dichte dieses SVM-Wasser-Gemischs wurde dann ebenfalls bei 23 und bei 60 °C ermittelt und voneinander subtrahiert. Die Ergebnisse sind an Tabelle 5 enthalten.

Tabelle 5: Ergebnisse der Versuche zur Bestimmung der Volumenänderung der SVM.

SVM	ΔV (Lösemittel) (Seilzustand \rightarrow LM-frei) in %	ΔV (Temp.) (23 \rightarrow 60 °C) in %	ΔV (Temp. + 5% H ₂ O) (23 \rightarrow 60 °C) in %
2A-1	-	+ 2,5	+ 5,7
1A-2		+ 2,2	+ 16,1
1A-1		\pm 0,0	+ 41,7
3A-1		\pm 0,0	+ 5,9
2B-1	- 5,5	+ 4,4	+ 4,9
1B-1	nicht bestimmbar (Aushärtung)	+ 2,0	nicht bestimmbar (Aushärtung)
1B-2	- 10,6	+ 4,0	+ 20,0

Die Ergebnisse zeigen, dass das im „Seilzustand“ enthaltene Lösemittel bei **2B-1** immerhin noch 5,5 % und bei **1B-2** sogar noch 10,6 % des Gesamtvolumens ausmacht. Da es sich bei allen Lösemitteln um flüchtige Verbindungen handelt, besteht die Möglichkeit, dass dieses Volumen über die Nutzungsdauer des Bauwerks aus dem Seilinneren verschwinden und entsprechende Hohlräume hinterlassen kann. In diese Hohlräume könnte später Wasser eindringen. Für das SVM **1B-1** konnte dieser Effekt nicht bestimmt werden, weil sich das SVM aufgrund der Aushärtetendenz nach dem Entfernen des Lösemittels nicht mehr verarbeiten lässt. Das noch enthaltene Lösemittel ist vermutlich auch der Grund dafür, dass es gerade bei den SVM **2B-1** und **1B-2** zur größten Volumenausdehnung bei der Temperaturerhöhung auf 60 °C kommt (jeweils ca. 4 %). Im BAST-Bericht 9.88209F1 [7] wurde bzgl. der Volumenänderung bereits eine Beispielrechnung aufgeführt. Demnach entspricht eine Volumenerhöhung des SVM von 4 % bei einem 100 m langen Vollverschlossenen Seil mit einem Durchmesser von 121 mm und einem draus resultierenden inneren Hohlraum von 130 Litern etwa 5,2 Litern SVM, die aus dem Seil ausbluten würden. Noch drastischer ist die Volumenerhöhung bei den zinkstaubhaltigen SVM wenn Wasser hinzukommt. Bereits bei Zugabe von 5 Masse-% VE-Wasser und anschließender Erwärmung des Gemischs auf 60 °C wurden hierbei Volumenausdehnungen von 16 % (**1A-2**), 20 % (**1B-2**) und sogar 42 % (**1A-1**) bestimmt. Der Zutritt von Wasser muss aus diesem Grund bei zinkstaubhaltigen SVM unbedingt vermieden werden.

3.5 Schmierfähigkeit der SVM

3.5.1 Versuchsaufbau

Zur Einschätzung der Schmierwirkung von SVM existiert derzeit kein Prüfverfahren. Aus diesem Grund musste im Rahmen des vorliegenden Projektes eine möglichst praxisnahe Methode entwickelt werden, um diesbezüglich fundierte Aussagen treffen zu können. Dabei wurde Wert daraufgelegt, das reale Schmiervermögen gegenüber verzinkten Seildrähten bei veränderlichen Temperaturen und auch im gealterten Zustand erfassen zu können. Dazu wurden analoge Drahtbündel, wie für die Untersuchung des Korrosionsschutzvermögens (siehe 3.3.2), jedoch ohne endseitigen Verguss, verwendet. Auch wurde der zur äußeren Fixierung verwendete Schrumpfschlauch nicht entfernt. Der Kerndraht wurde dann in die obere Aufnahme einer Zugprüfmaschine eingespannt, während die äußeren sechs Drähte des Drahtbündels durch zwei Klemmbacken aus Kunststoff mit Halbmantelausparung in der unteren Aufnahme der Zugprüfmaschine arretiert wurden (siehe Abb. 19).

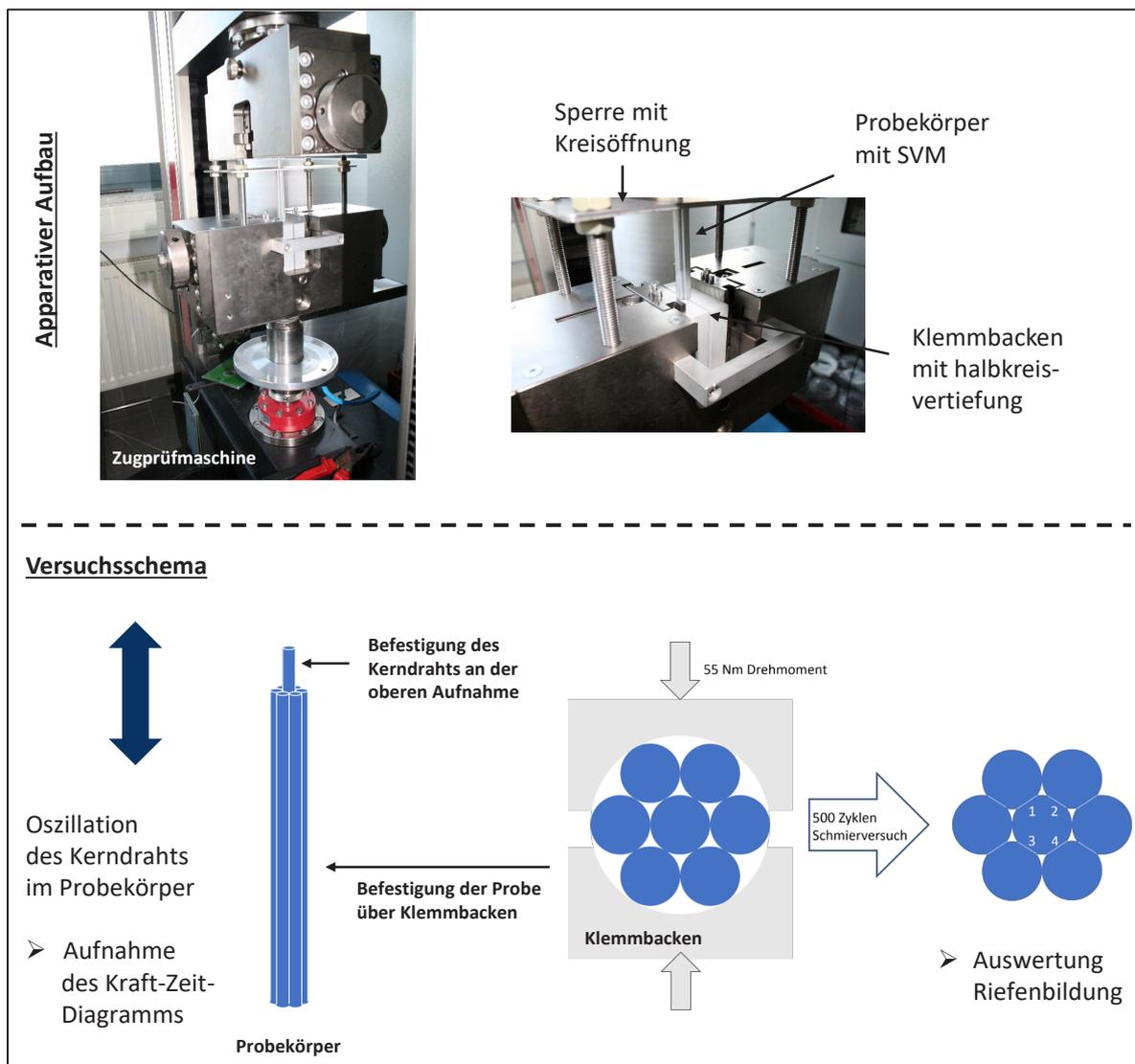


Abb. 19: Apparativer Aufbau und Schema des Schmierversuchs für SVM.

Zusätzlich wurde ein 3 mm dickes Stahlblech mit zentraler Kreisöffnung über Gewindestäbe an der unteren Aufnahme angebracht. Der Kerndraht wurde stets durch die Kreisöffnung geführt, wobei die restlichen Drähte während des Versuchs durch das Blech nach unten gehalten wurden. Der Kerndraht stand zu Beginn des Versuchs 3,0 cm aus der Probe heraus. Zur Verhinderung einer nach unten hin spitz zulaufenden Verjüngung der Probe wurde ein 2 cm langes Drahtstück als Distanzhalter in das untere Ende der Probe eingebracht. Nach vollständiger Fixierung der Probe wurde dann ein oszillierender Schmierversuch nach dem in Abb. 19 dargestellten Schema durchgeführt. Dabei wurden jeweils die folgenden Versuchsbedingungen eingehalten:

Zugprüfmaschine:	Zwick/Roell Z050
Vorspannung der Klemmbanken:	55 Nm
Traversengeschwindigkeit:	3 mm/s
Traversenweg (1 Richtung):	4 mm
Anzahl Zyklen:	500
Anzahl Parallelproben je Versuch:	3

Um die Temperatur- und Alterungsabhängigkeit der Schmierwirkung zu erfassen, wurde der Schmierversuch jeweils bei 3 verschiedenen Temperaturen (externe Temperierung der Zugprüfmaschine) und nach Alterung des SVM auf 2 unterschiedliche Arten durchgeführt. Es ergaben sich die folgenden Versuchsvarianten:

Tabelle 6: Varianten durchgeführter Schmierversuche mit Drahtbündelproben.

Bezeichnung	Versuchstemperatur	Zustand des SVM
RT	23 °C	Originalzustand: <ul style="list-style-type: none"> • bei lösemittelfreien SVM: Anlieferungszustand • bei LM-haltigen SVM: Seilzustand (siehe Abschnitt 3.2.1)
60 °C	60 °C	
-20 °C	-20 °C	
gealtert (40/85)	23 °C	gealtert: Die Probe wurde mit dem SVM im Originalzustand befüllt. Anschließend wurde der Kerndraht entnommen und sowohl Probe als auch Kerndraht für 7 Tage bei 40 °C und 85 % rel. Feuchte gelagert. Der Kerndraht wurde dann wieder eingebracht.
gealtert (5% H ₂ O)	23 °C	gealtert: Die Probe wurde mit einer homogenen Mischung aus SVM und 5 % VE-Wasser befüllt und anschließend für einen Tag bei 60 °C gelagert.

Zum Vergleich wurden auch Drahtbündel ohne SVM (NM...Nullmuster) in allen Versuchsvarianten getestet.

Während des oszillierenden Schmierversuchs wurde die Standardkraft über eine Kraftmessdose an der unteren Aufnahme der Zugprüfmaschine kontinuierlich aufgezeichnet (siehe Abb. 20).

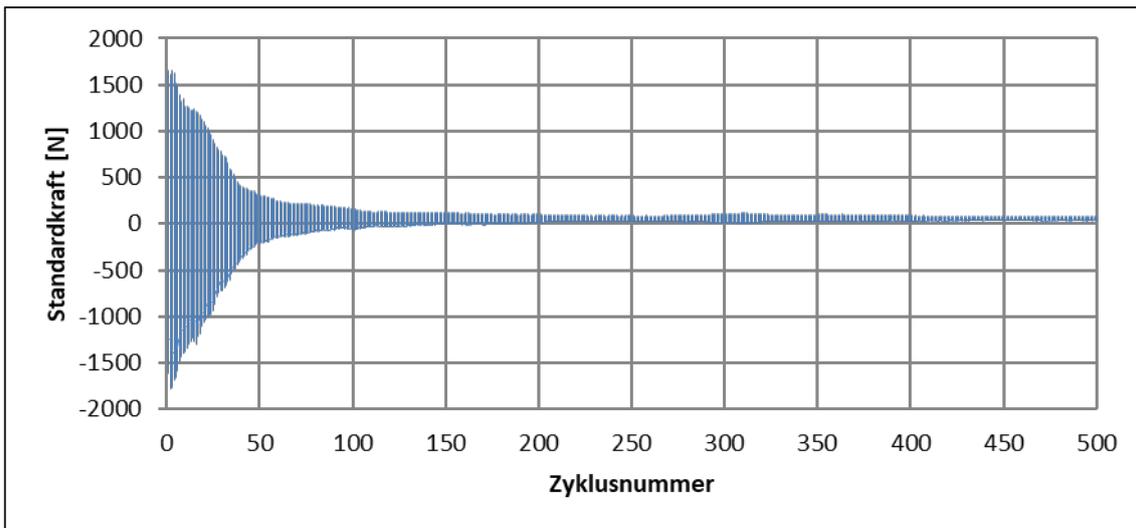


Abb. 20: Typischer Verlauf der Standardkraft über die Dauer eines oszillierenden Schmierversuchs mit Drahtbündelproben.

Da es sich um eine oszillierende Bewegung handelt, ändert die Kraft in jedem Zyklus 2-mal die Richtung. Die sich daraus ergebende Amplitude der Kraft über die Zeit wurde als Differenz zwischen Maximum und Minimum der Standardkraft in jedem Zyklus berechnet. Im Sinne einer übersichtlicheren Darstellung wurde aus den sich somit ergebenden Amplitudenwerten für 3 Proben jeweils der globale arithmetische Mittelwert gebildet. Zusätzlich zur mittleren Kraft während des Versuchs wurde bei den Versuchsvarianten „60 °C“ und „-20 °C“ ein Temperatursensor in den Proben angebracht, wobei die Temperaturänderung während des Versuchs aufgezeichnet werden konnte.

Nach Beendigung jedes Versuchs wurde der Kerndraht aus der jeweiligen Probe entnommen und von verbleibendem SVM gereinigt. Da jede Probe gleichartig so eingespannt war, dass die Klembacken von beiden Seiten je 2 der äußeren Drähte auf den Kerndraht pressen, waren auf dem Kerndraht nach dem Versuch stets 4 Riefen zu sehen (siehe Abb. 21).

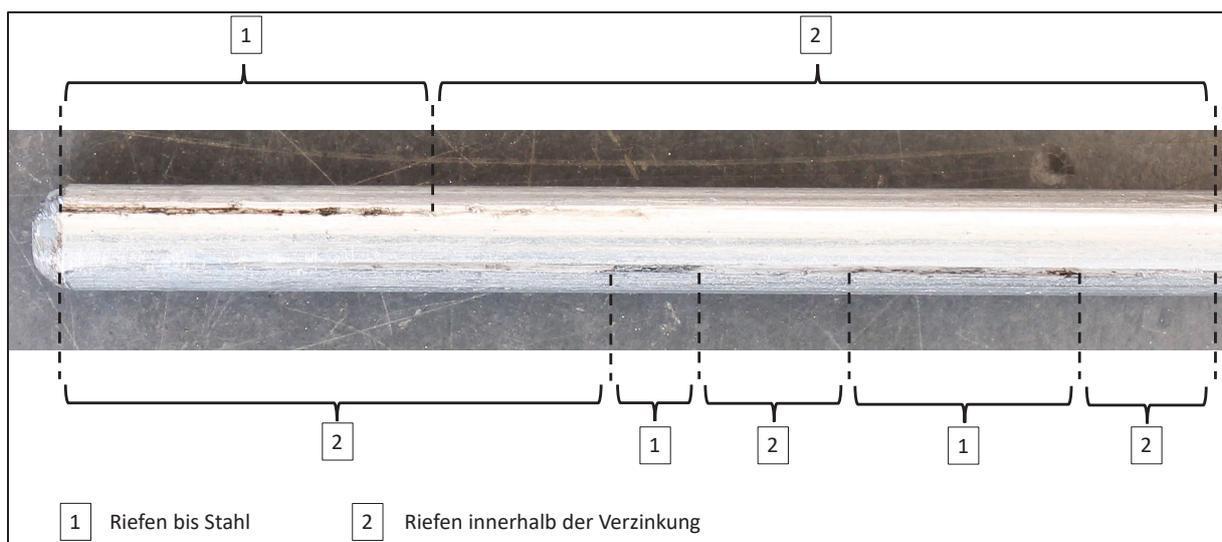


Abb. 21: Typische Riefenbildung auf dem Kerndraht während des oszillierenden Schmierversuchs.

In Abhängigkeit von der Schmierwirkung des SVM war in den Riefen entweder schon der Drahtstahl (dunkel) oder noch der Zinküberzug (hell) zu sehen. Der Längenanteil der Riefen bis auf Stahl wurde jeweils ins Verhältnis zur Gesamtriefenlänge (4 Riefen · 45 mm = 180 mm) gesetzt und auf 10 % gerundet. Aus den 3 Proben wurde auch hier der arithmetische Mittelwert gebildet. Es ergab sich folgende Abstufung:

- 0-10 % Riefen bis Stahl: gute Schmierwirkung (grün)
- 20-30 % Riefen bis Stahl: mäßige Schmierwirkung (gelb)
- 40-100 % Riefen bis Stahl: schlechte Schmierwirkung (rot)

3.5.2 Ergebnisse und Diskussion

Die Auswertung der Riefenbildung auf den Kerndrähten der Drahtbündel nach durchgeführtem Schmierversuch zeigt, dass alle SVM bei Raumtemperatur eine Schmierwirkung besitzen, die besser ist, als jede des Zinküberzugs (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7: Ergebnisse der Riefenauswertung auf dem jeweiligen Kerndraht nach den durchgeführten Schmierversuchen.

SVM	Anteil Riefen bis auf Stahl				
	RT	gealtert (40/85)	gealtert (5% H ₂ O)	60 °C	-20 °C
NM		90 %		90 %	100 %
2A-1	0 %	0 %	0 %	0 %	< 10 %
1A-2	0 %	60 %	40 %	0 %	30 %
1A-1	0 %	40 %	30 %	0 %	30 %
3A-1	< 10 %	0 %	0 %	0 %	< 10 %
2B-1	20 %	< 10 %	20 %	< 10 %	60 %
1B-1	40 %	20 % *	n.b. **	60 %	20 %
1B-2	20 %	60 %	70 %	0 %	50 %

* Das SVM ist während der Konditionierung bei 40 °C und 85 % rel. Feuchte ausgehärtet. Da sich der Kerndraht während der Konditionierung außerhalb der Probe befand, war es anschließend möglich, den Schmierversuch durchzuführen.

** Da es zur Aushärtung des SVM im Zuge der Probekörperherstellung kam, war es nicht möglich den Kerndraht aus dem Probeninneren zu bewegen, ohne Riefen zu erzeugen. Der Versuch wurde deshalb nicht durchgeführt, das Ergebnis jedoch dennoch als „schlechte Schmierwirkung“ interpretiert.

Dabei ist die Schmierwirkung der SVM mit signifikantem Lösemittelanteil (**1B-1**, **2B-1** und **1B-2**) geringer, als jene der lösemittelfreien SVM. Bei einer Erhöhung der Versuchstemperatur auf 60 °C verbessert sich die Schmierwirkung bei **2B-1** und bei **1B-2**, was womöglich am Verdunsten des Lösemittels während des Versuchs liegt. Bei **1B-1** ist dieser Effekt nicht zu erkennen, da es bei diesem SVM zur Aushärtung während des Versuchs kam. Die Schmierwirkung der lösemittelfreien SVM blieb auch bei 60 °C unverändert gut. Bei -20 °C sank die Schmierwirkung bei allen SVM außer bei **1B-1**, was vermutlich dadurch zu erklären ist, dass die Aushärtung des SVM bei dieser tiefen Temperatur verlangsamt wurde. Bei der künstlichen Alterung der SVM durch Auslagerung in feuchter Atmosphäre bzw. durch Zugabe von Wasser und Auslagerung bei 60 °C verschlechtert sich die Schmierwirkung aller zinkstaubhaltigen SVM. Die beiden SVM mit dem geringsten Pigmentanteil (**2A-1** und **3A-1**) behielten dagegen bei allen durchgeführten Versuchsvarianten eine anhaltend gute Schmierwirkung.

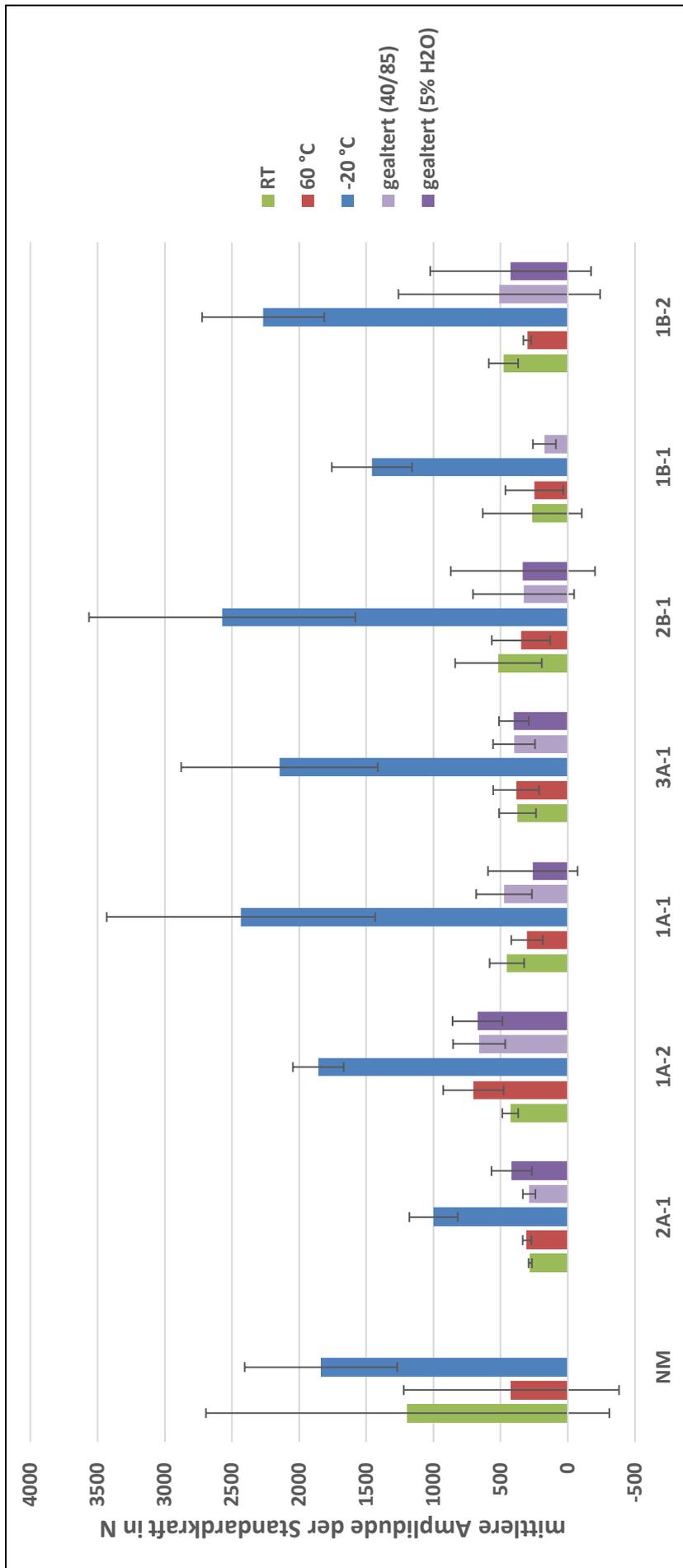


Abb. 22: Mittlere Amplitude der Standardkraft während der durchgeführten Schmierversuche nach unterschiedlichen Varianten.

In Abb. 22 sind die jeweiligen mittleren Amplituden der Standardkraft für die verschiedenen Versuchsvarianten aufgeführt. Man sieht, dass bei tiefer Temperatur (-20 °C) generell mehr Kraft nötig ist, den Kerndraht in der Seilprobe zu bewegen. Es ist jedoch nicht so, dass sich die Ausbildung von Riefen bis auf den Drahtstahl immer auch durch eine höhere mittlere Kraft äußert. Diese mittlere Kraft scheint somit eher im Zusammenhang mit der Viskosität des SVM, als mit der Schmierwirkung zu stehen. Neben der Kraft wurde für die Versuche bei den Temperaturen 60 und -20 °C auch die maximale Temperaturänderung in der Probe ermittelt (siehe Abb. 23).

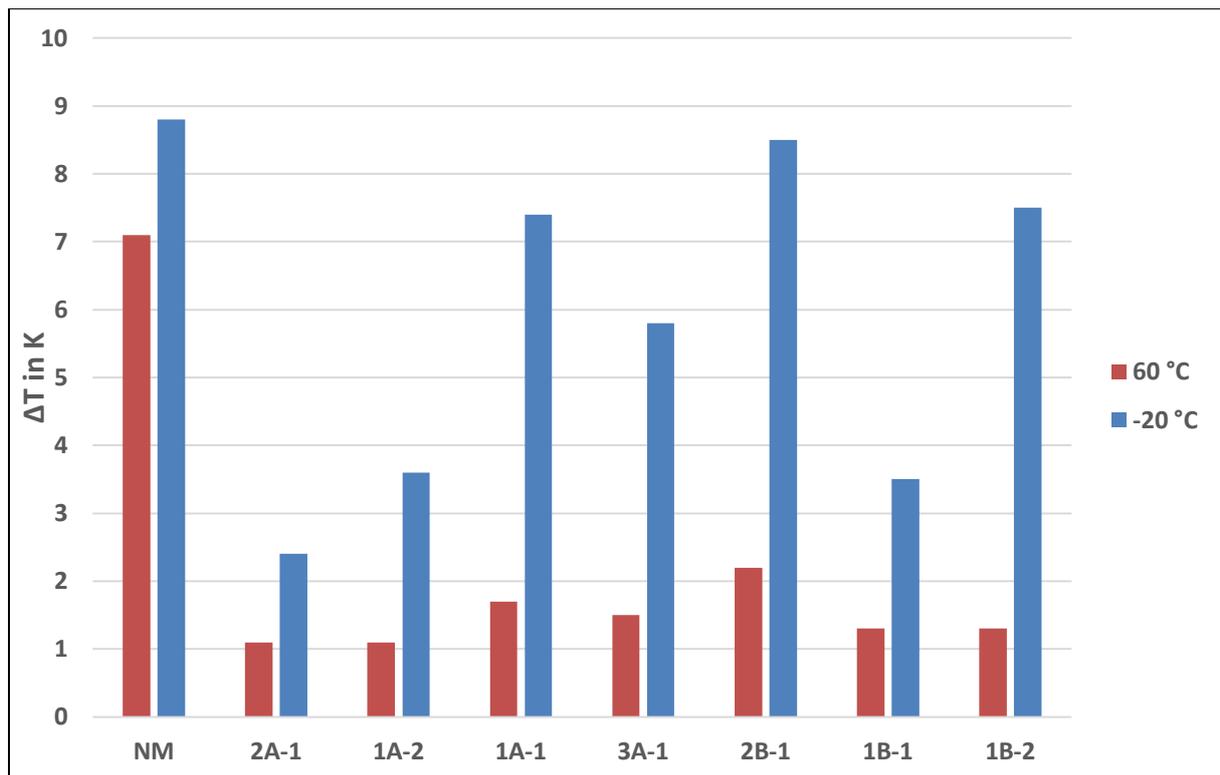


Abb. 23: Maximale Temperaturerhöhung in den Drahtbündelproben während der durchgeführten Schmierversuche bei 60 und bei -20 °C.

Die Temperaturerhöhung ist bei -20 °C deutlich höher, als bei 60 °C (ca. Faktor 2-4). Dies passt auch zu der Beobachtung, dass die Schmierwirkung aller SVM bei -20 °C abnimmt. Die Unterschiede in der maximalen Temperaturerhöhung bei -20 °C zwischen den SVM sind sogar proportional zu den Unterschieden in der mittleren Kraftamplitude. Bei 60 °C beobachtet man bei allen SVM gleichermaßen eine geringere Temperaturerhöhung im Probeninneren im Vergleich zum ungefüllten Nullmuster.

3.5.3 VKA-Test nach DIN 51350

Zur Überprüfung der Eignung des für Schmiermittel bekannten Vier-Kugel-Apparats nach DIN 51350 (VKA-Test) für die Abschätzung der Schmierwirkung der SVM wurden Versuche bei der Elaskon Sachsen GmbH & Co. KG für Spezialschmierstoffe durchgeführt. Beim VKA-Test wird eine Edelstahlkugel mit einer definierten Kraft gegen drei Prüfkugeln aus Edelstahl gepresst und mit einer definierten Drehzahl gedreht (siehe Abb. 24).

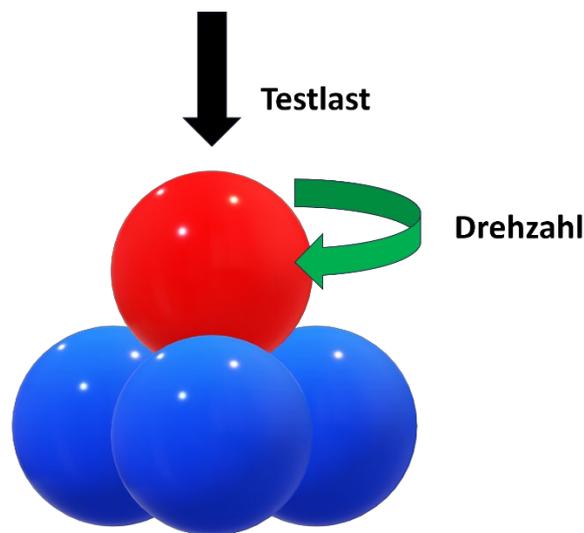


Abb. 24: Schematische Darstellung der Krafteinwirkung beim VKA-Test.

Das Schmiermittel umgibt dabei alle Kugeln sowie die Kontaktflächen. Nach einer definierten Versuchsdauer wird die Breite der an den drei Prüfkugeln durch die Reibung erzeugten ringförmigen Schleifkalotten mikroskopisch bestimmt. Der VKA-Test wurde mit den folgenden Testparametern an allen 7 SVM durchgeführt:

Drehzahl:	1500 U/min
Versuchsdauer:	1 min
Test-Last:	500 N

Zum Vergleich wurde auch ein Versuch ohne SVM durchgeführt. Die Ergebnisse der Versuche sind in Abb. 25 dargestellt. Im Gegensatz zum Versuch ohne Schmiermittel führen alle SVM zur Verkleinerung der Schleifkalotte. Der Unterschied fällt bei **1A-2** am geringsten aus, was wahrscheinlich an der Überlagerung des Materials liegt. Es lag zum Testzeitpunkt sehr inhomogen vor. Prinzipiell zeigen die Ergebnisse jedoch, dass der VKA-Test geeignet ist, eine Schmierwirkung der SVM nachzuweisen. Die reduzierte Schmierwirkung, welche durch enthaltene Lösemittel resultiert, wird im VKA-Test im Vergleich zum oszillierenden Schmierversuch (Vgl. Abschnitt 3.5.2) nicht abgebildet.

Eine Reduktion der Kalottenbreite um mind. 50 % unter Anwendung der oben aufgeführten Testparameter könnte jedoch als Prüfkriterium zum Nachweis der Schmierwirkung herangezogen werden.

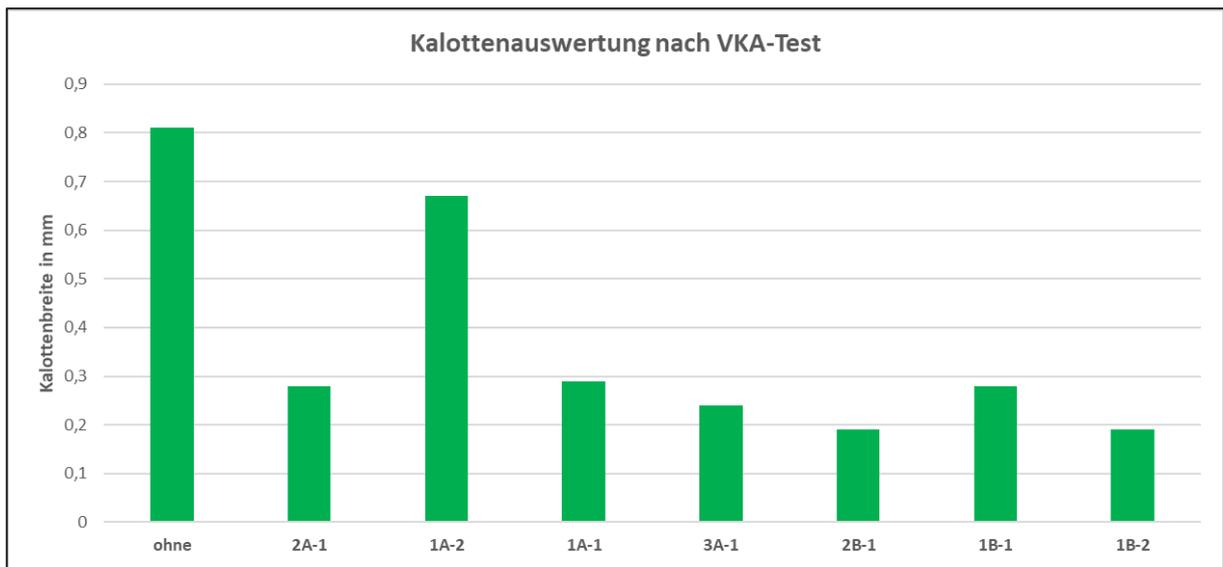


Abb. 25: Ergebnisse des VKA-Tests.

3.6 Alterungsbeständigkeit der SVM

3.6.1 Alterungsszenarien

Zur Abschätzung der Alterungsbeständigkeit wurden zunächst Methoden zur künstlichen Alterung der SVM gesucht. Es wurde die Annahme getroffen, dass in der Praxis vor allem die folgenden Faktoren zur Alterung der SVM führen können:

- Sauerstoff
- Wasser / Salz
- Temperatur
- Zeit

Es wurden daher Alterungsszenarien ausgewählt, die diese Alterungsfaktoren in unterschiedlicher Gewichtung berücksichtigen (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8: Alterungsszenarien für SVM

Bezeichnung	Probe	Alterungsszenario
Original	-	Keine Alterung (Anlieferungszustand)
Zyklus	verschleißbare Blechdose	Zyklische Alterung nach TP KOR-VVS, Abschnitt 5.3.9 (36 Zyklen Wechsellagerung. 1 Zyklus = 1 h bei - 25 °C und 1 h bei 50 °C)
300 µm 7d 23/50	300 µm Rakelaufzug des SVM im Originalzustand auf gebeiztes Stahlblech	7 Tage Lagerung bei 23 °C und 50 % rel. Feuchte
300 µm (+H ₂ O) 7d 60°C	300 µm Rakelaufzug einer Mischung aus SVM und 5 % VE-Wasser auf gebeiztes Stahlblech	7 Tage Lagerung bei 60 °C
Drahtbündel 30d VE50	Drahtbündelprobe (siehe Abschnitt 3.3.2)	60 Tage Lagerung in VE-Wasser bei 50 °C
Drahtbündel 30d NaCl60	Drahtbündelprobe (siehe Abschnitt 3.3.2)	60 Tage Lagerung in 5%iger NaCl-Lösung bei 60 °C
Helgoland Hohlraum 1...3	Seilprobe (siehe Abschnitt 3.8.1)	2 Jahre vertikale Auslagerung auf der Insel Helgoland
LM-frei	Aluminiumschale	Konditionierung bei 60 °C bis zur vollständigen Verdampfung des enthaltenen Lösemittels

Die entsprechend gealterten SVM wurden dann mithilfe der in Abschnitt 3.6.2 beschriebenen Methoden auf Veränderungen im Vergleich zum Ausgangszustand untersucht.

3.6.2 Untersuchungsmethoden

Thermogravimetrische Analyse (TGA). Bei dieser Analysenmethode wird eine Probe kontinuierlich aufgeheizt, wobei die Massenänderung aufgezeichnet wird. Die angewandten Messparameter sind in Abschnitt 3.2.2 aufgeführt. Die Massenänderung der SVM verläuft bei konstanter Aufheizrate in charakteristischen Stufen, die sich aus der ersten Ableitung des Massenverlaufs über die Zeit ergeben. Die jeweiligen Minima dieser ersten Ableitung wurden zur Auswertung der Übersichtlichkeit halber den Zersetzungsstufen 0 bis 3 zugeordnet. Die Zersetzungsstufe 0 entspricht dann jeweils dem flüchtigen Anteil (Lösemittel oder Wasser), während die restlichen Zersetzungsstufen dazu geeignet sind, Veränderungen im SVM anzuzeigen. Veränderungen äußern sich in abweichender Zersetzungstemperatur gegenüber dem Ausgangszustand.

Infrarotspektrometrie (IR). Die Infrarotspektrometrie erfasst ebenfalls eine stoffspezifische Charakteristik, die sensibel gegenüber chemischen Veränderungen des SVM ist. Bestimmte chemische Bindungen der enthaltenen Inhaltsstoffe werden dabei mittels einfallender Infrarotstrahlung zu Schwingungen angeregt, die im IR-Spektrum als charakteristische Banden ablesbar sind. Auch wenn die genaue Zuordnung dieser Banden aufgrund mangelnder Informationen über die Rezepturen der SVM nicht möglich ist, gibt die Korrelation zweier Spektren großen Aufschluss darüber, ob es sich um den gleichen Stoff handelt bzw. inwieweit sich der Stoff verändert hat. Es wurden die in Abschnitt 3.2.2 aufgeführten Messparameter angewandt. Die Korrelation der Spektren wurde dann mithilfe der PerkinElmer-Software „Spectrum“ (Version 10.4.2) durchgeführt. Der Übersichtlichkeit halber sind im Abschnitt 3.6.3 keine Einzelspektren, sondern nur die Ergebnisse der Korrelation angegeben. Korrelationswerte von 95-100 % wurden dabei grün eingefärbt, da in diesem Fall von einer sehr hohen Übereinstimmung bzw. zu vernachlässigenden Veränderungen gegenüber dem Ausgangszustand ausgegangen werden kann. Korrelationswerte zwischen 80 und 95 % zeigen stoffliche Veränderungen an und wurden gelb eingefärbt. Alles unter 80 % ist rot eingefärbt, da hierbei von einer deutlichen Veränderung des IR-aktiven Anteils des SVM gegenüber dem Ausgangszustand ausgegangen werden muss. Da Änderungen im Lösemittelanteil auch zu einer Veränderung des IR-Spektrums führen, wurde die Korrelation bei den lösemittelhaltigen SVM jeweils im Vergleich zum Originalzustand, zum Seilzustand (= LM-Anteil im Seil laut Hersteller) und zum vollständig lösemittelfreien Zustand ermittelt.

Haptische Eigenschaften. Zu guter Letzt wurden die Eigenschaften „Entfernbarkeit“ und „Schmierfähigkeit“ als haptischer Gesamteindruck erfasst. Zur Einschätzung der „Entfernbarkeit“ wurde versucht, das SVM vollständig vom jeweiligen Substrat (Seildraht oder Probenplatte) zu entfernen. Dabei ergaben sich die folgenden Abstufungen:

- ja = ohne Kraftaufwand entfernbar
- anhaftend = nur mit hohem Kraftaufwand entfernbar
- nein = ausgehärtet / nicht entfernbar

Die „Schmierfähigkeit“ wurde händisch überprüft. Dabei wurde jeweils versucht, das SVM nach dem Entfernen auf einem glatten Untergrund breitzuziehen, wobei der Ausgangszustand jeweils als Referenz gesehen wurde. Dabei ergaben sich die folgenden Abstufungen:

- ja = nach wie vor schmierfähig
- mäßig = höhere Zähigkeit gegenüber dem Ausgangszustand
- nein = ausgehärtet / nicht mehr schmierfähig

3.6.3 Ergebnisse

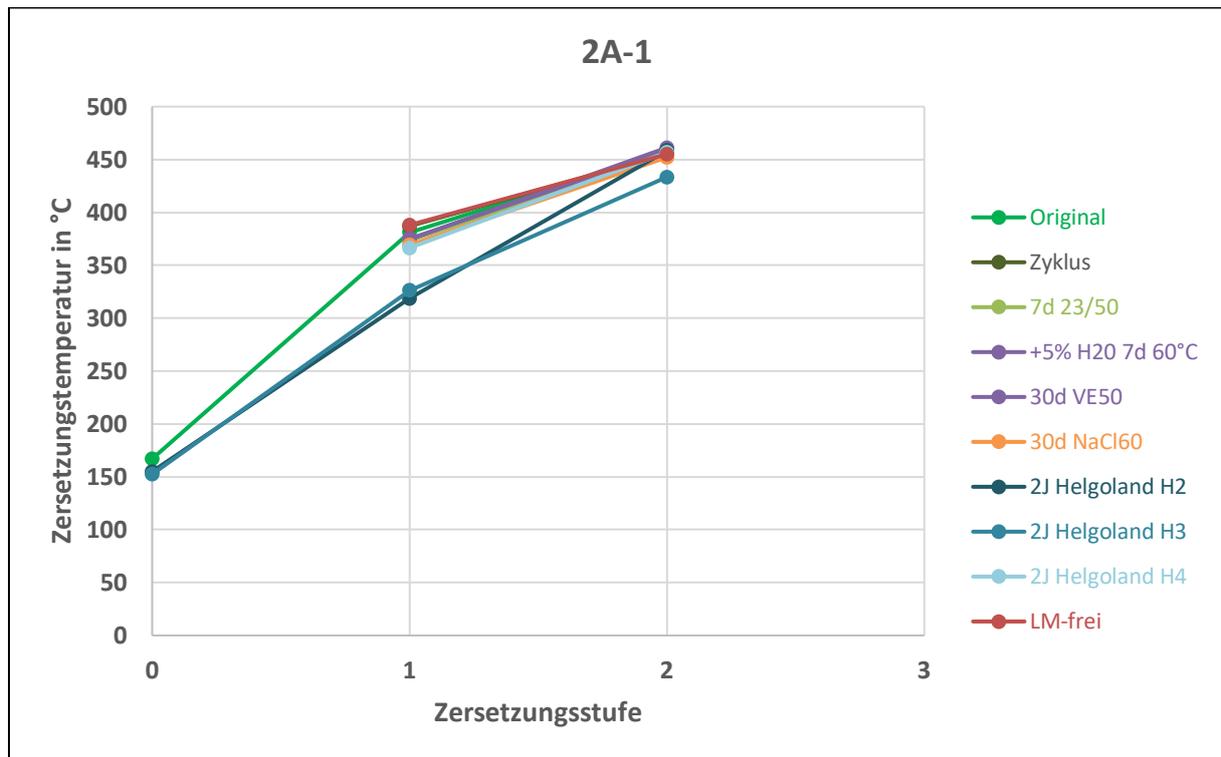


Abb. 26: Thermogravimetrisch bestimmte Zersetzungsstufen von 2A-1 in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterungsvariante.

Tabelle 9: Ergebnisse der Untersuchung auf haptische Veränderungen sowie auf Änderungen der Infrarotcharakteristika von 2A-1 in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterungsvariante.

2A-1	entfernbar?	schmierfähig?	IR-Korrelation	
			Original	Seilzustand = LM-frei
Zyklus	kein Substrat	ja	100 %	100%
300 µm 7d 23/50	ja	ja	100%	100%
300 µm 7d 60°C (+5% H ₂ O)	ja	ja	96%	97%
Drahtbündel 30d VE50	ja	ja	99%	100%
Drahtbündel 30d NaCl60	ja	ja	99%	99%
Helgoland Hohlraum 2	ja	ja	98%	98%
Helgoland Hohlraum 3	ja	ja	97%	97%
Helgoland Hohlraum 4	ja	ja	99%	99%

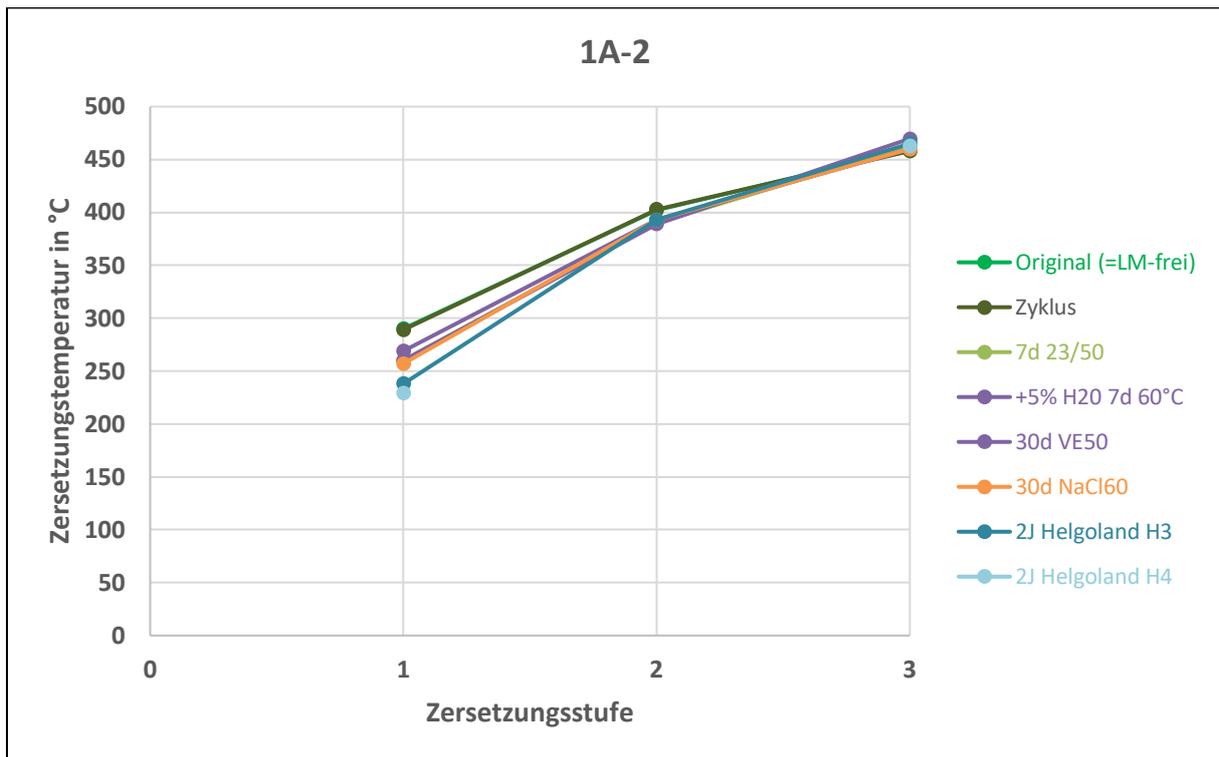


Abb. 27: Thermogravimetrisch bestimmte Zersetzungsstufen von 1A-2 in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterungsvariante.

Tabelle 10: Ergebnisse der Untersuchung auf haptische Veränderungen sowie auf Änderungen der Infrarotcharakteristika von 1A-2 in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterungsvariante.

1A-2	entfernbar?	schmierfähig?	IR-Korrelation
			Original = Seilzustand = LM-frei
Zyklus	kein Substrat	ja	100%
300 µm 7d 23/50	anhaftend	mäßig	98%
300 µm 7d 60°C (+5% H ₂ O)	nein	nein	94%
Drahtbündel 30d VE50	ja	ja	94%
Drahtbündel 30d NaCl60	ja	ja	94%
Helgoland Hohlraum 2	-		
Helgoland Hohlraum 3	nein	nein	97%
Helgoland Hohlraum 4	nein	nein	96%

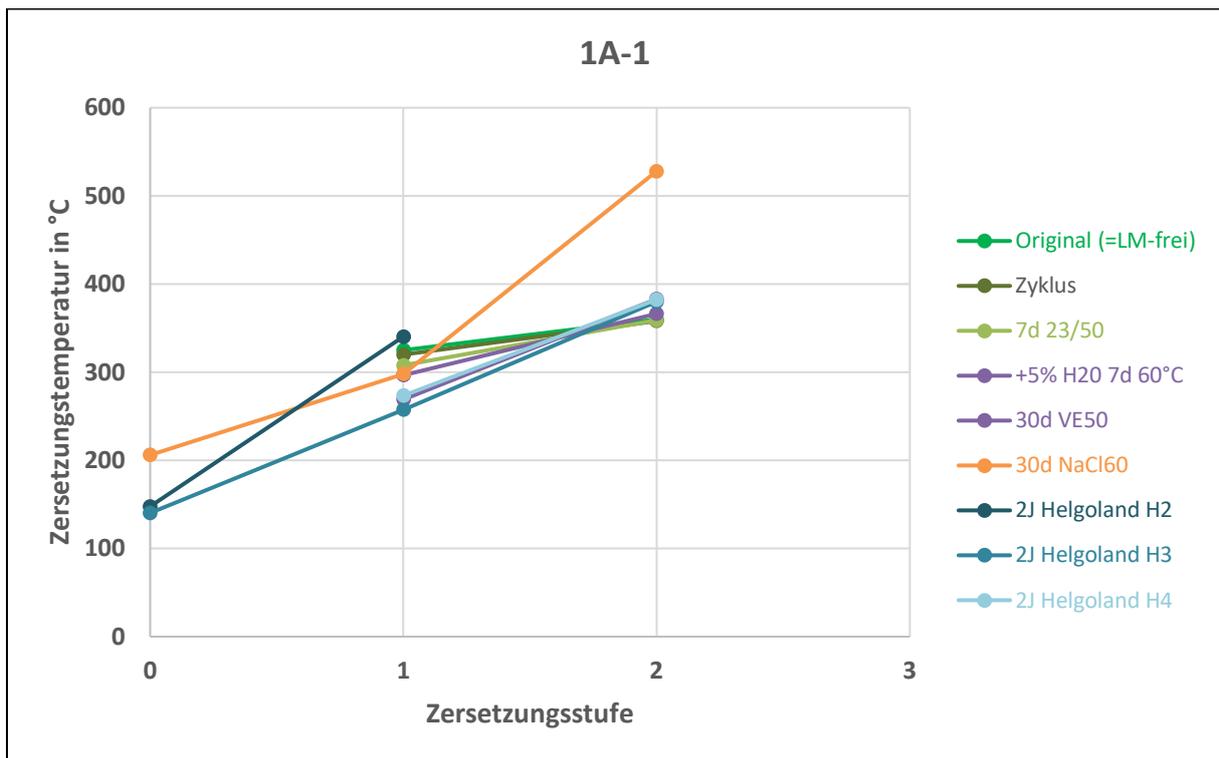


Abb. 28: Thermogravimetrisch bestimmte Zersetzungsstufen von 1A-1 in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterungsvariante.

Tabelle 11: Ergebnisse der Untersuchung auf haptische Veränderungen sowie auf Änderungen der Infrarotcharakteristika von 1A-1 in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterungsvariante.

1A-1	entfernbar?	schmierfähig?	IR-Korrelation
			Original = Seilzustand = LM-frei
Zyklus	kein Substrat	ja	100%
300 µm 7d 23/50	ja	ja	100%
300 µm 7d 60°C (+5% H ₂ O)	ja	mäßig	100%
Drahtbündel 30d VE50	ja	ja	95%
Drahtbündel 30d NaCl60	nein	nein	87%
Helgoland Hohlraum 2			-
Helgoland Hohlraum 3	ja	mäßig	96%
Helgoland Hohlraum 4	ja	mäßig	100%

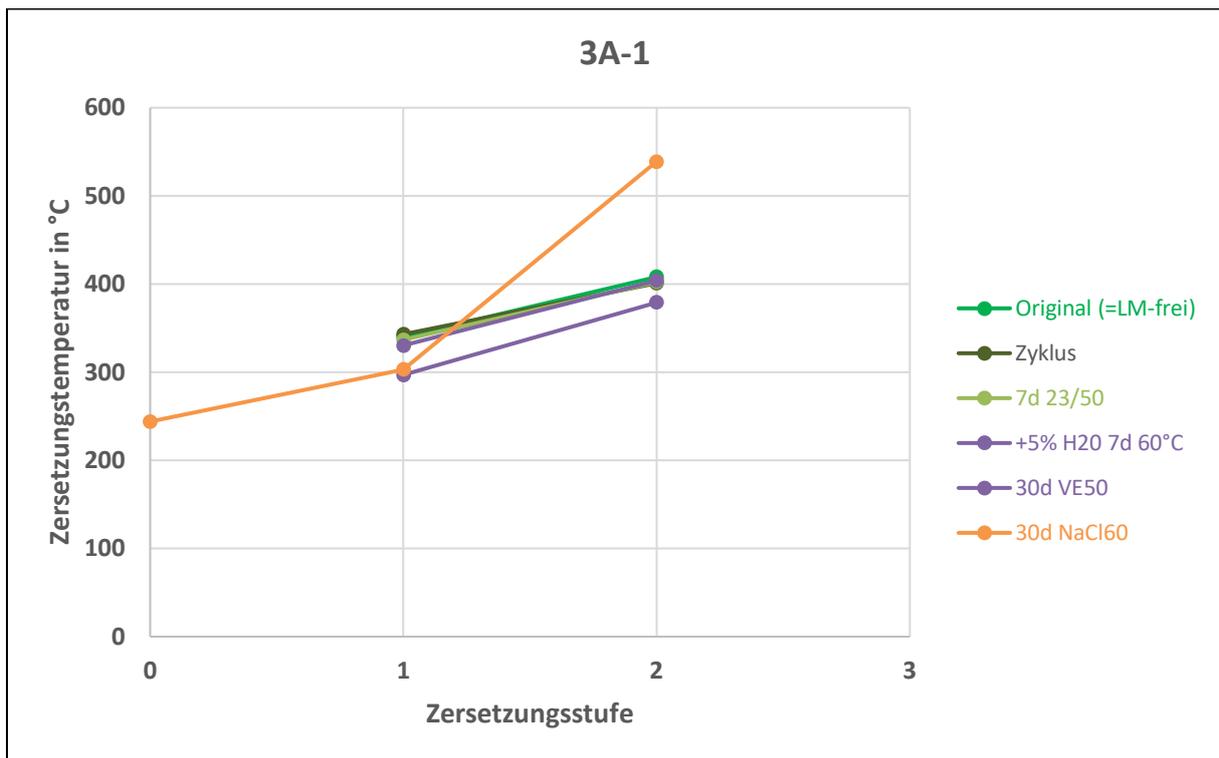


Abb. 29: Thermogravimetrisch bestimmte Zersetzungsstufen von 3A-1 in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterungsvariante.

Tabelle 12: Ergebnisse der Untersuchung auf haptische Veränderungen sowie auf Änderungen der Infrarotcharakteristika von 3A-1 in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterungsvariante.

3A-1	entfernbar?	schmierfähig?	IR-Korrelation
			Original = Seilzustand = LM-frei
Zyklus	kein Substrat	ja	100%
300 µm 7d 23/50	ja	ja	100%
300 µm 7d 60°C (+5% H ₂ O)	ja	ja	100%
Drahtbündel 30d VE50	ja	ja	98%
Drahtbündel 30d NaCl60	anhaftend	mäßig	90%



Abb. 30: Thermogravimetrisch bestimmte Zersetzungsstufen von 2B-1 in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterungsvariante.

Tabelle 13: Ergebnisse der Untersuchung auf haptische Veränderungen sowie auf Änderungen der Infrarotcharakteristika von 2B-1 in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterungsvariante.

2B-1	entfernbar?	schmierfähig?	IR-Korrelation		
			Original	Seilzustand	LM-frei
Zyklus	kein Substrat	ja	100%	100%	100%
300 µm 7d 23/50	ja	ja	99%	98%	100%
300 µm 7d 60°C (+5% H ₂ O)	ja	ja	99%	98%	100%
Drahtbündel 30d VE50	ja	ja	99%	98%	100%
Drahtbündel 30d NaCl60	ja	ja	99%	98%	99%

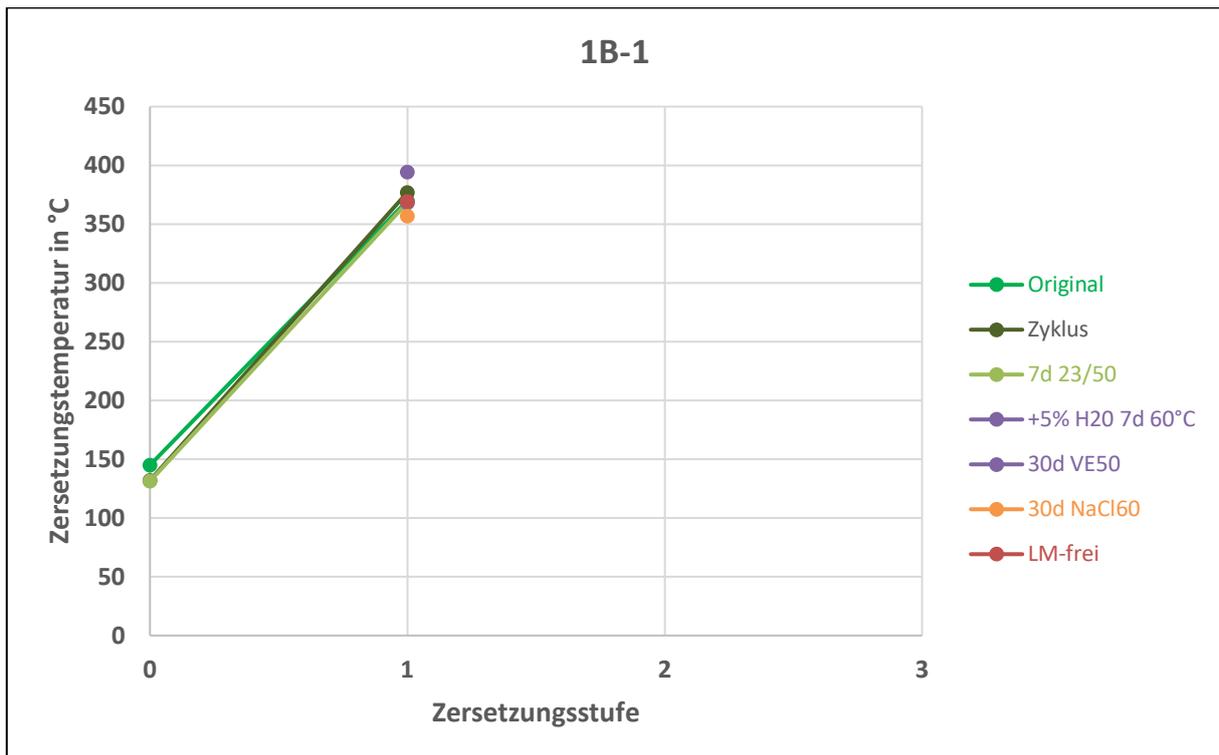


Abb. 31: Thermogravimetrisch bestimmte Zersetzungsstufen von 1B-1 in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterungsvariante.

Tabelle 14: Ergebnisse der Untersuchung auf haptische Veränderungen sowie auf Änderungen der Infrarotcharakteristika von 1B-1 in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterungsvariante.

1B-1	entfernbar?	schmierfähig?	IR-Korrelation		
			Original	Seilzustand	LM-frei
Zyklus	kein Substrat	ja	93%		
300 µm 7d 23/50	nein	nein	78%	79%	76%
300 µm 7d 60°C (+5% H ₂ O)	nein	nein	72%	75%	73%
Drahtbündel 30d VE50	nein	nein	48%	53%	85%
Drahtbündel 30d NaCl60	nein	nein	33%	38%	95%

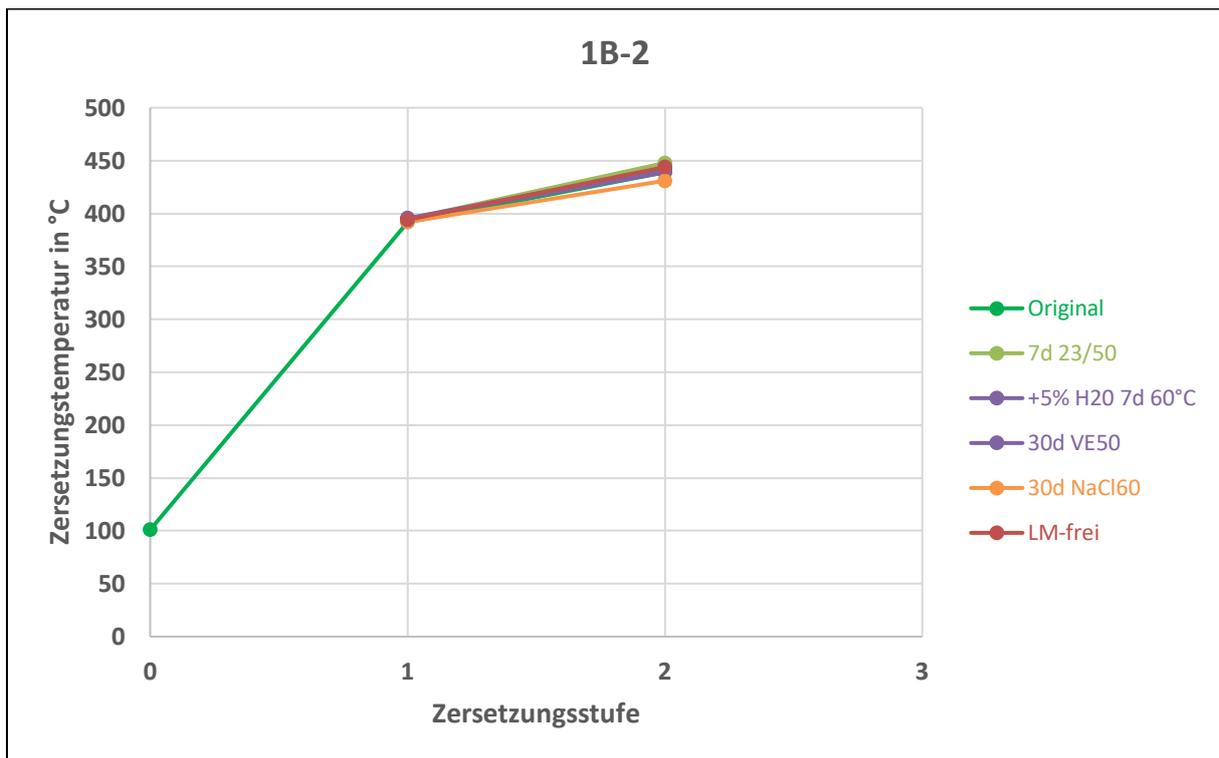


Abb. 32: Thermogravimetrisch bestimmte Zersetzungsstufen von 1B-2 in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterungsvariante.

Tabelle 15: Ergebnisse der Untersuchung auf haptische Veränderungen sowie auf Änderungen der Infrarotcharakteristika von 1B-2 in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterungsvariante.

1B-2	entfernbar?	schmierfähig?	IR-Korrelation		
			Original	Seilzustand	LM-frei
300 µm 7d 23/50	anhaftend	mäßig	92%	91%	99%
300 µm 7d 60°C (+5% H ₂ O)	anhaftend	mäßig	92%	93%	100%
Drahtbündel 30d VE50	ja	ja	92%	91%	99%
Drahtbündel 30d NaCl60	ja	ja	92%	93%	100%

3.6.4 Diskussion

Die Alterung in den Seilproben auf Helgoland hat bei allen drei untersuchten SVM (**2A-1**, **1A-1** und **1A-2**) zu einer Verlagerung der Zersetzungsstufen in der TGA geführt. Bei **2A-1** kam in den äußeren beiden Hohlräumen des Seils die Zersetzungsstufe 0, welche im Ausgangszustand dem enthaltenen Lösemittel entspricht, hinzu. Da dies jedoch im Inneren des Seils (Hohlraum 4) nicht mehr gefunden wurde, ist davon auszugehen, dass es sich dabei um eingedrungenes und im SVM gebundenes Wasser handelt. Gleiches wurde auch bei dem lösemittelfreien SVM **1A-1** beobachtet. Inwieweit die Verlagerung der restlichen Zersetzungsstufen wirklich eine Alterung der SVM anzeigen ist nicht sicher, da die Seile ohne äußere Hülle der Witterung ausgesetzt waren und mit eindringendem Wasser auch diverse Verunreinigungen ihren Weg in die äußeren Hohlräume der Seile gefunden haben können. Verunreinigungen können die Zersetzungsstufen im TGA ebenfalls beeinflussen. Dafür spricht zudem, dass im IR in allen drei Fällen jeweils eine sehr hohe Korrelation mit dem Ausgangszustand gefunden wurde. Die Haptik von **2A-1** hat sich nicht verändert, während bei den zinkstaubhaltigen SVM **1A-1** und **1A-2** eine unterschiedlich ausgeprägte Veränderung der Schmierfähigkeit beobachtet wurde. Eine Ursache hierfür könnte im Eindringen von Wasser und damit verbundenen chemischen Reaktionen mit dem Zinkstaubpigment zu suchen sein. Derartige chemische Veränderungen sind leider weder im TGA, noch im IR sichtbar. Bei **1A-2** würde diese Vermutung auch die Aushärtung des SVM auf den Seildrähten erklären.

Unabhängig von der Alterungsvariante kommt es bei dem SVM **1B-1** stets zur Aushärtung und zum Verlust der Schmierfähigkeit. Diese Veränderung geht z.T. auch mit Abweichungen im IR einher, ist jedoch im TGA nicht nachvollziehbar. Es wird vermutet, dass das SVM so konzipiert ist, dass es mit Sauerstoff eine Haut bildet, die sich beim Ausbluten bilden und so weiteres Ausbluten verhindern soll. Jedoch ist diese Tendenz zur Aushärtung so stark, dass immer das komplette SVM durchhärtet, sobald das Lösemittel verdampft, oder es der Atmosphäre bzw. Medien ausgesetzt ist.

Eine Tendenz zur oberflächlichen Aushärtung (Hautbildung) kann man auch bei dem SVM **1A-2** beobachten. Diese ist jedoch wirklich nur auf die Oberfläche begrenzt und erfordert auf jeden Fall Sauerstoff. Aus diesem Grund kam es zur Aushärtung in den äußeren Hohlräumen des Seils auf Helgoland und auch die Rakelaufzüge härteten oberflächlich aus. Beim Einrühren von Wasser (welches gelösten Sauerstoff enthält), härtet der Rakelaufzug dann vollkommen aus. Bei der Einwirkung von VE-Wasser bzw. NaCl-Lsg. auf das SVM im Drahtbündel kam es nicht zur Aushärtung im Inneren der Proben. Die Medien besitzen bei den eingesetzten Temperaturen eine geringe Löslichkeit für Sauerstoff und wurden während der Versuchsdauer nicht mit zusätzlichem Sauerstoff gespeist.

Die Rolle eindringender Medien (Wasser, Salz) wird durch die Gesamtheit der Versuche ebenfalls deutlich. Es ist zunächst kein direkter Zusammenhang zwischen der Anwesenheit von Zinkstaub im SVM und Veränderungen der SVM-Haptik bei eindringenden Medien in das Seil erkennbar. Bei **1A-2** und **1B-2** kommt es im Drahtbündel nach der Medieneinwirkung weder zur Aushärtung, noch zur Veränderung der Schmierwirkung. Da **1B-1** generell schnell aushärtet, lässt sich hierbei kein Einfluss des Zinkstaubs ableiten. Bei **1A-1** kommt es im Drahtbündel bei einwirkendem VE-Wasser nicht, wohl aber bei einwirkender NaCl-Lsg. zur Aushärtung und zum Verlust der Schmierfähigkeit. Da dieses Verhalten tendenziell auch bei **3A-1**, was **1A-1** ohne Zinkstaub entspricht, zu beobachten ist, muss die Ursache hierfür wohl eher beim Bindemittel gesucht werden.

Die SVM **2B-1** und **1B-2** bringen sehr viel Lösemittel in das Seil ein (**1B-2**: ca. 11%, **2B-1**: ca. 16%), was bereits anhand der Versuche zur Flüchtigkeit enthaltenen Lösemittels deutlich wird (siehe Abschnitt 3.2.1). Die TG- und IR-Analysen dieser beiden SVM nach den Alterungsversuchen zeigen nun, dass das Lösemittel bei **1B-2** stets verschwunden ist, während bei **2B-1** immer noch ein Rest Lösemittel in der Probe zu finden ist (ca. 2-3 %).

3.7 Verträglichkeit der SVM mit äußeren Seilkorrosionsschutzsystemen

3.7.1 Seilbeschichtung

Zur Einschätzung der Verträglichkeit von SVM mit Flüssigbeschichtungssystemen wurde die im Regelwerk TP KOR-VVS, Abschnitt 5.2.17 [9] beschriebene Verträglichkeitsprüfung mit allen vorliegenden SVM durchgeführt. Hierfür wurde ein bei der BAST nach TL KOR-VVS gelistetes Seilbeschichtungssystem verwendet. Die Probenherstellung wurde wie folgt realisiert:

Substrat:	Stahlblech (150x100x3 mm), feuerverzinkt
Oberflächenvorbereitung:	entfetten, sweep-strahlen nach DIN EN ISO 12944-4
Applikation des SVM:	spachteln (überschüssiges SVM soweit es geht mit dem Spachtel entfernen)
Konditionierung:	14 Tage bei 23 °C und 50 % rel. Luftfeuchte
Beschichtung:	1x 50 µm Grundbeschichtung 1x 150 µm Zwischenbeschichtung 1x 60 µm Deckbeschichtung
Konditionierung:	20 Tage bei 23 °C und 50 % rel. Luftfeuchte

Nach der abschließenden Konditionierung wurden die Proben dann sowohl visuelle auf Unverträglichkeiten überprüft, als auch der Kreuzschnittprüfung nach DIN EN ISO 16276-2 und der Stempelabreißprüfung nach DIN EN ISO 4624 unterzogen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 16 enthalten. Grün markiert sind alle Ergebnisse, die den Anforderungen nach TP KOR-VVS entsprechen bzw. rot jene, die den Anforderungen nicht entsprechen.

Es zeigt sich, dass die SVM **2A-1**, **2B-1** und **1B-2** nach dem Prüfverfahren eine ungenügende Verträglichkeit mit dem Beschichtungssystem aufweisen. Dies liegt daran, dass die Anforderungen nach TP KOR-VVS sowohl Verträglichkeitsaspekte, als auch die Haftfestigkeit der Beschichtung auf SVM-kontaminiertem Substrat einbeziehen.

Tabelle 16: Ergebnisse der Verträglichkeit mit Flüssigbeschichtungen nach TP KOR-VVS

SVM	Probe	visuell sichtbare Unverträglichkeit (Blasen, Krater, Ausschwimmen)	Kreuzschnitt-Kennwert	Stempelabreißversuch	
				Abreißfestigkeit in MPa	Anteil SVM-Bruch
-	1	keine	0	10	0%
	2		0	8	0%
	3		0	9	0%
2A-1	1	keine	5	0	100%
	2		5	0	100%
	3		5	0	100%
1A-2	1	keine	0	6	100%
	2		1	6	60%
	3		0	6	100%
1A-1	1	keine	0	7	0%
	2		1	6	0%
	3		0	6	0%
3A-1	1	keine	0	4	0%
	2		0	7	0%
	3		0	5	0%
2B-1	1	keine	5	1	100%
	2		5	1	100%
	3		5	0	100%
1B-1	1	keine	0	7	0%
	2		1	5	0%
	3		0	5	0%
1B-2	1	keine	5	1	100%
	2		5	1	100%
	3		5	1	100%

Die Forderung nach 5 MPa Haftfestigkeit und einem Kreuzschnittkennwert von max. 1 bedingt, dass die Beschichtung auf dem SVM annähernd genauso gut haften muss, wie auf dem gestrahlten Substrat. Die SVM **2A-1**, **2B-1** und **1B-2** scheinen hierbei jedoch wie ein Trennfilm zu wirken, was durch die sehr schlechten Haftfestigkeitsergebnisse deutlich wird. Eine Diskussion dieser Ergebnisse im Rahmen einer Sitzung der BAST Arbeitsgruppe 2.4.1 „Brückenseile“ (16.01.2024) ergab, dass die Anforderungen an die Haftfestigkeit im Rahmen dieser Prüfung erhalten bleiben müssen, da die Praxis eine gewisse Toleranz bzgl. verbleibendem SVM auf der Seiloberfläche fordert. Die Beschichtung muss somit auf dem Seilverfüllmittel haften.

3.7.2 Seilumwicklung

Die Seilumwicklung hat im Vergleich zur Seilbeschichtung ein geringfügig anderes Wirkprinzip, soll jedoch ebenso als Barriere gegenüber dem Eindringen von Korrosionsstimulatoren von außen in das Seilinnere fungieren. Die Seilumwicklung besteht aus einer Basislage, die durch eine Polyethylenschicht, welche zu beiden Seiten mit koextrudiertem Butylkautschuk verbunden ist, gebildet

wird und einer Decklage, welche ebenfalls eine Kombination aus Polyethylen und Butylkautschuk ist (siehe Abb. 33).

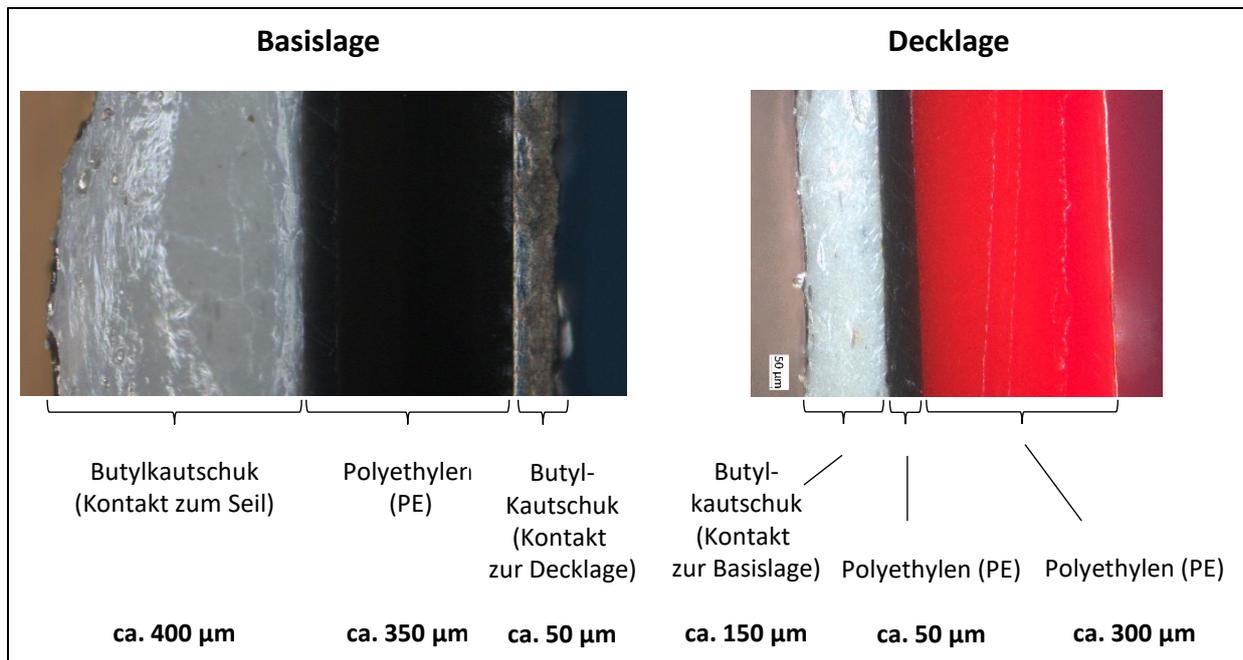


Abb. 33: Aufbau der Seilumwicklung (Basislage links, Decklage rechts) im Querschnitt.

Der Kontakt zum Seil und die Verbindung der Lagen untereinander wird durch den Butylkautschuk realisiert. Zur Überprüfung einer etwaigen Beeinträchtigung der Seilumwicklung durch SVM wurden Streifen der Basislage (200x50 mm) in einem geschlossenen Behälter in das entsprechende SVM eingetaucht und darin für 7 Tage sowohl bei 23 °C, als auch bei 60 °C gelagert. Bei den lösemittelhaltigen SVM wurde hierbei jeweils der Seilzustand (siehe Abschnitt 3.2.1) verwendet. Nach der Lagerung wurde das SVM soweit möglich, mit einem Kunststoffspatel von der Basislage der Seilumwicklung entfernt. Dabei wurde zunächst bewertet, ob sich der Butylkautschuk von der Polyethylenschicht abgelöst hat. Die Ergebnisse sind in Tabelle 17 aufgeführt. Bei den lösemittelhaltigen SVM **2B-1** und **1B-2** kam es zur teilweisen Ablösung des Butylkautschuks vom darunterliegenden Polyethylen. Bei **2B-1** wurde dies nur bei 60 °C, bei **1B-2** jedoch auch bei 23 °C beobachtet. Beim ebenfalls lösemittelhaltigen SVM **1B-1** wurde keine Ablösung des Butylkautschuks vom Polyethylen beobachtet, jedoch war die Auswertung hierbei dadurch erschwert, dass das SVM auf dem Umwicklungsband aufgehärtet ist. Das Ergebnis könnte durch die Aushärtung verfälscht sein. Es ist jedoch auch möglich, dass der vergleichsweise geringe Anteil an durch das SVM eingebrachtem Lösemittel (4 %) nicht zu einer Schädigung der Umwicklung führt. Bei keinem der übrigen SVM wurde eine Beeinträchtigung des Verbunds zwischen Butylkautschuk und Polyethylen in der Basislage der Seilumwicklung beobachtet. Die Proben wurden nach der visuellen Bewertung mithilfe einer Zugprüfmaschine bei einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit von 100 mm/min gedehnt, um die Reißdehnung nach DIN EN 12068 [10] zu bestimmen. Unterschiede in der Reißdehnung wären geeignet, um chemische Beeinträchtigungen der Polyethylenschicht nachzuweisen. In keinem der untersuchten Fälle kam es jedoch zum Zerreißen der Basislage trotz einer Dehnung der Probe um das 10-fache der ursprünglichen Länge. Dieser Befund zeigt, dass die Einwirkung keines einzigen der SVM die Dehnbarkeit der Polyethylenschicht negativ beeinflusst.

Tabelle 17: Ergebnisse der visuellen Auswertung SVM-kontaminierter Streifen der Basislage einer Butylkautschukumwicklung. Die fotografischen Aufnahmen wurden nach der Dehnung der Basislage um ca. das 10-fache der ursprünglichen Länge gemacht.

SVM	23 °C		60 °C	
-		i.O.		i.O.
2A-1		i.O.		i.O.
1A-2		i.O.		i.O.
1A-1		i.O.*		i.O.*
3A-1		i.O.*		i.O.*
2B-1		i.O.		Butylkautschuk z.T. abgelöst
1B-1		i.O.		i.O.
1B-2		Butylkautschuk z.T. abgelöst		Butylkautschuk z.T. abgelöst

* Die dunkle Verfärbung der Proben bei **1A-1** und **3A-1** resultiert aus verbleibendem SVM, das sich nicht vollständig entfernen ließ.

3.8 Freibewitterung

3.8.1 Probenherstellung und Auslagerung

Die drei angelieferten Abschnitte vollverschlossener Brückenseile (siehe Abschnitt 3.1) wurden jeweils mit Schellen gesichert und trocken in je zwei Teile zu 45 cm und 10 cm zersägt. Die insgesamt 3 resultierenden 45 cm langen Stücke wurden dann an beiden Enden in einer Kunststoffkappe in Epoxidharz eingebettet und für die Freibewitterung vorbereitet (siehe Abb. 34). Die 3 verbleibenden 10 cm langen Abschnitte werden als Nullmuster zurückbehalten und bei der Auswertung des Versuchs zum Vergleich hinzugezogen.



Abb. 34: Herstellung der Seilproben für Freibewitterungsversuche. Oben: Anlieferungszustand. Mitte links: 45 cm Abschnitt für die Freibewitterung (zunächst ohne Kunststoffkappe). Mitte rechts: 10 cm Abschnitt (Nullmuster). Unten links: Probenende beim Einbetten in EP. Unten rechts: fertiger Probekörper.

Die Proben wurden senkrecht stehend ohne Vorspannung auf der Insel Helgoland (Korrosivitätskategorie C5) ausgelagert (siehe Abb. 35).

Daten zur Freibewitterung:

Auslagerungsort: Freibewitterungsstand Helgoland (in der Nähe des Juliusturms)

Auslagerungsstart: 17.09.2020

Auslagerungsende: 28.09.2022



Abb. 35: Seilproben während der Freibewitterung auf Helgoland.

3.8.2 Probenbewertung während und nach der Auslagerung

Die Proben wurden während der 2-jährigen Freibewitterung halbjährlich visuell hinsichtlich ausblutendem SVM und äußerlichen Korrosionserscheinungen beurteilt. Erste Korrosionserscheinungen des Zinküberzugs auf der äußeren Drahtlage waren bereits nach 6 Monaten sichtbar, was sich über die 2 Jahre Auslagerungszeit jedoch nicht deutlich veränderte. Austretendes SVM wurde in keinem der 3 Fälle beobachtet.

Nach Abschluss der Freibewitterung wurden die Proben wieder an das IKS nach Dresden transportiert und dort zunächst äußerlich visuell beurteilt. Anschließend wurde je ein zentrales Segment (ca. 4 cm lang) des gesamten Seilumfangs entnommen und für die Querschliffanalyse in Epoxidharz eingebettet (siehe Abb. 36).

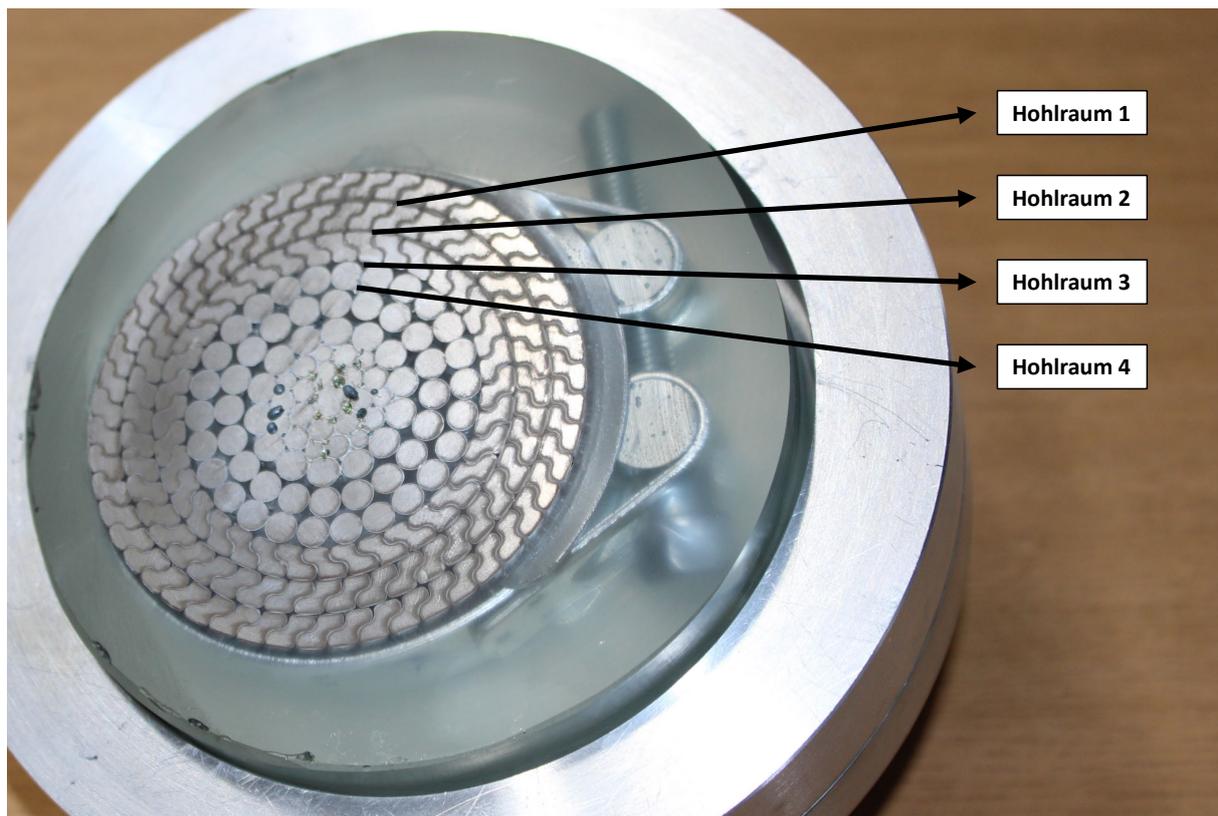


Abb. 36: Zentrales Seilsegment, dass für die Querschliffanalyse in Epoxidharz eingebettet wurde.

Zusätzlich wurden die Drahtlagen bei je einem der beiden verbleibenden Endstücken (ca. 20 cm lang) jeweils Lage für Lage bis zum vierten umlaufenden Hohlraum von außen (= Hohlraum 4) herausgesägt und der jeweils freigelegte Hohlraum dann umlaufend beurteilt. Dabei wurden Korrosionserscheinungen der den Hohlraum umgebenden Seildrähte sowie die Haptik des enthaltenen SVM in die Bewertung einbezogen. Die Ergebnisse der Auswertung sind in Tabelle 18 aufgeführt. Zusätzlich sind fotografische Aufnahmen der einzelnen Drahtlagen in Anlage 3 enthalten. Bei allen drei Seilen war der Hohlraum zwischen den beiden äußersten Drahtlagen nicht verfüllt. Das SVM ist in allen drei Fällen weder nach außen getreten, noch ausgeblutet. Aufgrund der geringen Länge der Proben im Vergleich zum Bauwerk, ist dies jedoch kein Beweis für eine geringe Tendenz der SVM zum Ausbluten. Bei allen drei Seilen zeigte die äußerste Drahtlage auf der Außenseite (Seiloberfläche) nur leichte Korrosionserscheinungen des Drahtüberzugs (Weißrost). Jedoch kamen nach dem Entfernen der ersten Drahtlage in allen drei Fällen flächige Korrosionserscheinungen des metallischen Überzugs im Hohlraum 1 zum Vorschein. Da dieser äußere Hohlraum stets unverfüllt war, liegt die Vermutung nahe, dass Wasser und Salze eindringen und zur Korrosion führen konnten. Da das Wasser vermutlich aus dem Hohlraum auch nur schwer wieder abtrocknen konnte, war die Korrosionsreaktion dort stärker als auf der Seiloberfläche. In diesem Bereich wurden bei den Seilen S2V und S3V z.T. Rotrosterscheinungen an den Kanten der Z-Drähte beobachtet (siehe Abb. 37 mittig und rechts).

Tabelle 18: Ergebnisse der Auswertung von Seilproben, die ohne äußeren Korrosionsschutz 2 Jahre auf Helgoland ausgelagert wurden.

Probe		S1V	S2V	S3V
SVM		2A-1	1A-2	1A-1
Oberfläche	visuell	WR vereinzelt	WR vereinzelt	WR vereinzelt
	Querschliff	Überzug angegriffen	Überzug angegriffen	Überzug angegriffen
	SVM (Haptik)	kein SVM vorhanden	kein SVM vorhanden	kein SVM vorhanden
Hohlraum 1	visuell	WR flächig	WR flächig, vereinzelt Rotrost an Z-Kanten	WR flächig, vereinzelt Rotrost an Z-Kanten
	Querschliff	Überzug angegriffen	Überzug z.T. verbraucht + Drahtangriff	Überzug angegriffen
	SVM entfernbar?	ja (in Zwickeln)	kein SVM vorhanden	kein SVM vorhanden
	SVM schmierfähig?	ja (in Zwickeln)		
Hohlraum 2	visuell	i.O.	WR flächig	WR flächig, vereinzelt Rotrost an Z-Kanten
	Querschliff	i.O.	Überzug z.T. verbraucht + Drahtangriff	Überzug angegriffen
	SVM entfernbar?	ja	ausgehärtet	anhaftend
	SVM schmierfähig?	ja	ausgehärtet	mäßig
Hohlraum 3	visuell	i.O.	WR flächig	WR flächig
	Querschliff	i.O.	Überzug angegriffen	Überzug angegriffen
	SVM entfernbar?	ja	ausgehärtet	anhaftend
	SVM schmierfähig?	ja	ausgehärtet	mäßig
Hohlraum 4	visuell	i.O.	i.O.	i.O.
	Querschliff	i.O.	i.O.	i.O.
	SVM entfernbar?	ja	ausgehärtet	ja
	SVM schmierfähig?	ja	ausgehärtet	ja

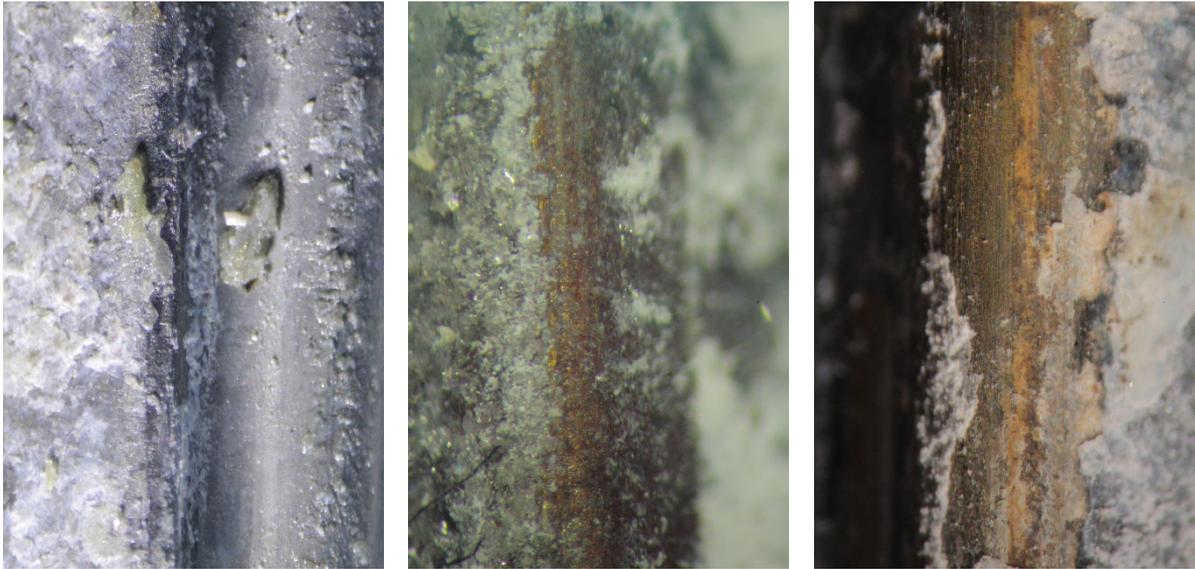


Abb. 37: Mikroskopaufnahmen von Kanten der Z-Drähte im Hohlraum 1 (zwischen äußerer und darunterliegender Drahtlage) bei den Seilen S1V, S2V und S3V (von links nach rechts).

Im Gegensatz dazu wurden bei S1V auf den Z-Drähten dieses Hohlraums Kanten mit freigelegtem Stahl vorgefunden, welche generell keinen Rotrost aufwiesen. Diese Kanten waren gut sichtbar mit dem SVM 2A-1 benetzt (siehe Abb. 37 links), was durch die Zwickel aus dem Inneren herausgedrückt wurde. Die Benetzung könnte als Grund für den Schutz der Kanten anzusehen sein.



IKS Dresden 1976.20A Z-Draht eines VVS mit Zn95Al5-Überzug

500 µm

Abb. 38: Exemplarische Querschliffaufnahme eines Z-Drahtes mit Zn95Al5-Überzug.

Die Kanten der Z-Drähte sind sehr anfällig für Korrosion des Stahls, da dort die Schichtdicke des schützenden metallischen Überzugs bereits im unbelasteten Zustand stark herabgesetzt ist. Sehr gut erkennbar ist dies im metallographischen Querschliff dieser Drähte (siehe Abb. 38). Die Abbildung zeigt einen Z-Draht, der einem unbelasteten Seil entnommen wurde.

Die verbleibenden Hohlräume (2-4) der Seile waren in allen 3 Fällen mit SVM gefüllt, welche sich in ihrer Beschaffenheit stark unterschieden. Während das SVM **2A-1** in Hohlraum 2 nahezu im Urzustand vorgefunden wurde, war das SVM **1A-2** nicht mehr schmierfähig. **1A-1** wurde dagegen mit verminderter Schmierfähigkeit vorgefunden. Der Grund für die Unterschiede könnte in der chemischen Reaktion der zinkstaubhaltigen SVM **1A-2** und **1A-1** liegen. Die Veränderung der Haptik des Hohlraumfüllenden SVM scheint auch Einfluss auf die Korrosionsschutzwirkung zu haben. Im Hohlraum 2 wurden bei den SVM **1A-2** und **1A-1** immer noch Korrosionserscheinungen des Drahtstahls beobachtet, was auf den Zutritt von Korrosionsstimulatoren hinweist.

Das SVM **2A-1**, welches keinen Zinkstaub enthält, erzielte somit im Rahmen der Freibewitterung das beste Ergebnis hinsichtlich Alterungsbeständigkeit (Erhalt der Schmierfähigkeit) und Korrosionsschutz. Die abgestufte Veränderung der Schmierfähigkeit wurde bei diesen SVM auch im Zuge der Untersuchung der Alterungsbeständigkeit beobachtet (siehe Abschnitt 3.6.3). Bei der Untersuchung des Korrosionsschutzvermögens in Immersionsversuchen (siehe Abschnitt 3.3) wurde jedoch eine höhere Beständigkeit der zinkstaubhaltigen SVM gegenüber 5%iger NaCl-Lösung festgestellt. Die im Zuge der Freibewitterung erzielten Ergebnisse stellen somit die Eignung 5%iger NaCl-Lösung in Frage.

4 Aufstellung eines Prüfregimes für SVM

4.1 Übersicht

Nach der umfassenden Untersuchung aller SVM in allen relevanten Leistungsbereichen, sollen nun einfach durchzuführende Prüfmethode aufgestellt werden, die eine schnelle Abschätzung des Leistungsvermögens von SVM ermöglichen. Diese Methoden sollen die folgenden Aspekte und Anforderungsbereiche beinhalten:

- Fingerprint
- Schmierwirkung
- Alterungsbeständigkeit
- Korrosionsschutz
- Ausblutverhalten

In Tabelle 19 ist der Entwurf eines Prüfregimes für SVM enthalten. Details zur Prüfdurchführung sind im Abschnitt 4.2 beschrieben.

Die hier aufgestellten Prüfparameter wurden vor dem Hintergrund der im Projekt erzielten Untersuchungsergebnisse in der AG 2.4.1 „Brückenseile“ der Bundesanstalt für Straßenwesen aufgestellt und könnten z.B. als Vorlage für das Regelwerk TL/TP-VVS [5] dienen.

Die Anwendung der Leistungsprüfkriterien aus Tabelle 19 führt bei den hier untersuchten SVM zum jetzigen Zeitpunkt zu den in Tabelle 20 dargestellten Ergebnissen.

Tabelle 19: Entwurf für den Umfang einer möglichen Grund- und Wiederholungsprüfung für SVM.

	Nr.	Prüfung	Anforderungen
Fingerprint	1.1	Nichtflüchtiger Anteil (nfA) nach Abschnitt 4.2.1	≥ 97 %
	1.2	IR-Spektrum nach Abschnitt 4.2.2	≥ 95 % Übereinstimmung mit der letzten Prüfung
	1.3	Aschegehalt nach Abschnitt 4.2.3	± 3 % im Vergleich zur letzten Prüfung
Leistungsprüfung	2.1	Seilbluten (Standfestigkeit bei 80 °C nach Abschnitt 4.2.4) 400 µm	kein Ablaufen
	2.2	Seilbluten (Volumenänderung nach Abschnitt 4.2.5) 23 → 60 °C	≤ 4 %
	2.3	Korrosionsschutz (Immersionsversuch nach Abschnitt 4.2.6) verzinkter Stahl, gesweept 720 h VE-Wasserlagerung bei 50 °C	kein Rotrost auf der Probenfläche
	2.4	Schmierfähigkeit (VKA-Test nach Abschnitt 4.2.7)	keine Erhöhung der Kalottenbreite durch das SVM im Vergleich zur Prüfung ohne SVM
	2.5	Alterungsbeständigkeit (Entfernbarkeit nach 4.2.8) 300 µm Rakelaufzug, 7d 23/50	verlustfrei entfernbar
	2.6	Alterungsbeständigkeit (IR nach Alterung nach Abschnitt 4.2.9) 7d Lagerung bei 60 °C	≥ 95 % Übereinstimmung der IR-Spektren vor und nach Alterung
	2.7	Verträglichkeit mit Beschichtungen nach Abschnitt 3.7.1	Kreuzschnittkennwert ≤ 1 Abreißfestigkeit ≥ 5 MPa

Tabelle 20: Voraussichtliche Ergebnisse der Grundprüfung aller SVM nach den in Tabelle 19 aufgeführten Leistungsprüfungen.

Voraussichtliche Ergebnisse	Nr.	Prüfung	Komplettes Prüfprogramm								
			2A-1	1A-2	1A-1	3A-1	2B-1	1B-1	1B-2		
Leistungsprüfung	2.1	Seilbluten (Standfestigkeit bei 80 °C nach Abschnitt 4.2.4) 400 µm									
	2.2	Seilbluten (Volumenänderung nach Abschnitt 4.2.5) 23 → 60 °C									
	2.3	Korrosionsschutz (Immersionsversuch nach Abschnitt 4.2.6) verzinkter Stahl, gesweept 720 h VE-Wasserlagerung bei 50 °C									
	2.4	Schmierfähigkeit (VKA-Test nach Abschnitt 4.2.7)									
	2.5	Alterungsbeständigkeit (Entfernbarkeit nach Abschnitt 4.2.8) 300 µm Rakelaufzug, 7d 23/50									
	2.6	Alterungsbeständigkeit (IR nach Alterung nach Abschnitt 4.2.9) 7d Lagerung bei 60 °C									LM
	2.7	Verträglichkeit mit Beschichtungen nach Abschnitt 3.7.1									

4.2 Prüfverfahren

4.2.1 Nichtflüchtiger Anteil

Die Ermittlung des nichtflüchtigen Anteils erfolgt nach DIN EN ISO 3251. Dazu wird 1 g des Seilverfüllmittels gleichmäßig in einer Aluminiumschale (\varnothing 5 cm) verteilt und für 3 h bei 105 °C gelagert. Die Ermittlung der Massenänderung erfolgt gravimetrisch. Es wird eine Doppelbestimmung durchgeführt.

4.2.2 Infrarotspektrometrie

Das Infrarotspektrum des Seilverfüllmittels ist mittels ATR-Methode unter Einhaltung der folgenden Messparametern aufzunehmen:

Messverfahren:	ATR (abgeschwächte Totalreflexion)
Messbereich:	4000 bis 600 cm^{-1}
Anzahl Scans:	15 Scans
Intervall:	1 cm^{-1}
Auflösung:	4 cm^{-1}

4.2.3 Aschegehalt

Die Bestimmung des Aschegehalts erfolgt nach DIN EN ISO 14680-2 unter folgenden Bedingungen:

Veraschungstemperatur:	800 °C
Veraschungszeit:	2 Stunden

4.2.4 Standfestigkeit

Das Seilverfüllmittel wird mit einer Rakel in einer Schichtdicke von 400 μm auf je eine blanke (frei von Walzhaut, Zunder, Fetten, Ölen, Überzügen, Beschichtungen und anderen Verunreinigungen), nichtgestrahlte, waagrecht gelagerte Probenplatte aufgetragen. Mittels eines Glasstabes wird eine Grenzlinie durch den Rakelaufzug gezogen. Die Probenplatten werden anschließend für 1 Stunde bei 80 °C senkrecht gestellt, sodass die Grenzlinie waagrecht steht. Es wird beurteilt, ob die Grenzlinie überlaufen wird, oder sonstige Ablauferscheinungen (Läufer, Tränen, Gardinen) auftreten. Es wird jeweils eine Einzelbestimmung vorgenommen.

4.2.5 Volumenänderung

Die Dichte des Seilverfüllmittels wird nach DIN EN ISO 2811-1 sowohl bei 23 °C, als auch bei 60 °C in einer Doppelbestimmung ermittelt. Die Volumenänderung wird nach Formel (4) berechnet.

$$(4) \quad \Delta V = \frac{\delta_{60}}{\delta_{23}} * 100\%$$

ΔV ...Volumenänderung in %

δ_{60} ...Dichte bei 60 °C

δ_{23} ...Dichte bei 23 °C

4.2.6 Immersionsversuch

Probenplatten:

Substrat:	unbewittertes, stückverzinktes, nicht behandeltes Stahlblech nach DIN EN ISO 1461 (Qualität „t Zn k“), 150 x 100 x 3 mm
Oberflächenvorbereitung:	Sweep-Strahlen nach DIN EN ISO 12944-4 (Edelkorund, verminderter Druck, Strahlwinkel < 30 °)
Applikation des SVM:	spachteln (überschüssiges SVM wird soweit möglich mit dem Spachtel entfernt)
Konditionierung:	7 Tage bei 23 °C und 50 % rel. Luftfeuchte

Belastung der Probenplatten:

3 Probenplatten werden gemäß DIN EN ISO 2812-2 in VE-Wasser bei 50 °C gelagert. Die Belastungsdauer beträgt 720 Stunden.

Bewertung der Probenplatten:

Es wird die Bildung von Korrosionsprodukten des Stahls (Rotrost) auf der Probenfläche sofort nach Belastungsende visuell gemäß DIN EN ISO 4628-3 bewertet.

4.2.7 VKA-Test

Der VKA-Test wird nach DIN 51350 sowohl an der Luft, als auch mit dem SVM als Prüfmedium durchgeführt. Das SVM wird im Seilzustand geprüft. Es werden die folgenden Testparameter angewandt:

Drehzahl:	1500 U/min
Versuchsdauer:	1 min
Test-Last:	500 N

Im Anschluss wird die Breite der Schleifkalotte nach DIN 51350-5 an allen drei Prüfkugeln bestimmt. Es erfolgt eine Doppelbestimmung. Die Mittelwerte der Bestimmung mit und ohne SVM werden ins Verhältnis zu einander gesetzt.

4.2.8 Entfernbarekeit

Das Seilverfüllmittel wird mit einer Rakel in einer Schichtdicke von 300 µm auf je eine blanke (frei von Walzhaut, Zunder, Fetten, Ölen, Überzügen, Beschichtungen und anderen Verunreinigungen), nichtgestrahlte, waagrecht gelagerte Probenplatte aufgetragen und für 7 Tage bei 23 °C und 50 % rel. Luftfeuchte gelagert. Anschließend wird das SVM mittels eines Spachtels unter Anwendung moderaten Drucks wieder vom Blech entfernt. Es wird beurteilt, ob sich das SVM entfernen lässt oder ausgehärtet ist.

4.2.9 IR nach Alterung

100 g des Seilverfüllmittels werden in einer verschließbaren Aluminium-Blechdose für 7 Tage bei 60 °C gelagert. Nach anschließender Rekonditionierung für 24 Stunden bei 23 °C wird die Probe homogenisiert und ca. 0,5 g der Probe für die Aufnahme eines IR-Spektrums nach Abschnitt 4.2.2 entnommen. Es ist ein Spektrenvergleich (Compare) mit dem Originalzustand des SVM durchzuführen.

4.2.10 Verträglichkeit mit Beschichtungen

Probenplatten:

Substrat:	Stahlblech (150x100x3 mm), feuerverzinkt
Oberflächenvorbereitung:	entfetten, sweep-strahlen nach DIN EN ISO 12944-4
Applikation des SVM:	spachteln (überschüssiges SVM soweit es geht mit dem Spachtel entfernen)
Konditionierung:	14 Tage bei 23 °C und 50 % rel. Luftfeuchte
Beschichtung:	1x 50 µm Grundbeschichtung 1x 150 µm Zwischenbeschichtung 1x 60 µm Deckbeschichtung
Konditionierung:	20 Tage bei 23 °C und 50 % rel. Luftfeuchte

Nach der abschließenden Konditionierung werden die Proben dann sowohl visuell auf Unverträglichkeiten überprüft, als auch der Kreuzschnittprüfung nach DIN EN ISO 16276-2 und der Stempelabreißprüfung nach DIN EN ISO 4624 unterzogen.

5 Zusammenfassung

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts wurden 7 verschiedene Seilverfüllmittel (SVM) von insgesamt 5 Herstellern untersucht. Die Untersuchungen lieferten zusammengefasst die folgenden Erkenntnisse.

Freibewitterung. Drei verschiedenartig verfüllte Vollverschlossene Seile wurden ohne Vorspannung für zwei Jahre vertikal auf der Insel Helgoland (Korrosivitätskategorie C5) ausgelagert und anschließend auf Korrosionserscheinungen im Inneren und Veränderungen des enthaltenen SVM untersucht. Es zeigte sich, dass ohne äußeren Korrosionsschutz Wasser und Salze in das Seilinnere gelangen. In den Hohlräumen ohne SVM wurde bei den ausgelagerten Seilen Rotrost an den Kanten der Z-Drähte beobachtet. **2A-1** (kein Zinkstaub, ca. 2% Aluminium) war im Seil gut verteilt, überall schmierfähig, nicht anhaftend und es wurde keine Korrosion im Seilinneren beobachtet. Bei den zinkstaubhaltigen SVM **1A-1** und **1A-2** wurden Korrosionsvorgänge bis in den Hohlraum zwischen dritter und vierter Drahtlage von außen beobachtet. Diese SVM waren unterschiedlich stark gealtert bzw. **1A-2** sogar bis unter die vierte Drahtlage ausgehärtet.

Korrosionsschutzvermögen. Sowohl SVM-gefüllte Drahtbündelproben (4 mm Seilrunddraht mit Zinküberzug), als auch SVM-beschichtete Platten (feuerverzinkter Stahl, gesweept) wurden in Immersionsversuchen belastet. Alle SVM besitzen gegenüber VE-Wasser bei 50 °C im Vergleich zum unverfüllten Zustand eine sehr gute Beständigkeit. Nach einer Belastungszeit von 90 Tagen im Drahtbündel bzw. 60 Tagen auf der beschichteten Platte versagen **3A-1** und **2B-1** als erstes. Gegenüber 5%iger NaCl-Lsg. ist die Schutzwirkung der SVM mit Zinkstaub höher, als jene der SVM ohne Zinkstaub. Da dieser Befund jedoch den Beobachtungen aus der Freibewitterung widerspricht, wird empfohlen für die Leistungsprüfung auf 5%iger NaCl-Lsg. zu verzichten.

Ausblutverhalten. Es wurden die Volumenänderung und die Standfestigkeit untersucht. Die Erhöhung der Temperatur auf 60 °C führt abhängig vom SVM zu einer Volumenerhöhung von max. 4%. Bei Zugabe von 5% Wasser und Erwärmung auf 60 °C erhöht sich das Volumen der zinkstaubhaltigen SVM um bis zu 42%. Bis 80 °C ist die Standfestigkeit aller untersuchten SVM gegeben. Ab 100 °C kommt es zum ersten Abfließen bei **1A-1** bzw. ab 120 °C bei **1A-2**.

Schmierfähigkeit. Die Schmierwirkung der SVM lässt sich mittels des hier vorgestellten oszillierenden Schmierversuchs reproduzierbar von der Riefenbildung auf dem Kerndraht der Probe ableiten. Ohne SVM wird der metallische Überzug komplett zerrieben. Die beiden SVM mit wenig (**2A-1**) bzw. gar keinem Korrosionsschutzpigment (**3A-1**) besitzen eine sehr gute Schmierwirkung unabhängig von Temperatur und Alterungszustand. Zinkstaub als Pigment verringert die Schmierwirkung bei niedrigen Temperaturen und im gealterten Zustand. Im SVM enthaltenes Lösemittel verringert die Schmierwirkung.

Alterungsbeständigkeit. Die Kombination aus IR und Bewertung der Haptik vor und nach künstlicher Alterung ist gut geeignet um die Alterungsbeständigkeit abzuschätzen. Bei der künstlichen Alterung sollten mindestens die Einflussfaktoren Wasser, Sauerstoff und Temperatur berücksichtigt werden. **2A-1** und **2B-1** sind uneingeschränkt alterungsbeständig. **1A-1** und **3A-1** sind alterungsanfällig beim Zutritt von Salzlösung. **1B-1** besitzt eine starke Tendenz zur vollständigen Aushärtung unabhängig von

der Alterungsvariante. **1A-2** bildet an Luft eine Haut. Je besser der Zutritt von Sauerstoff ist, desto größer ist die Gefahr der vollständigen Aushärtung. **1B-2** ist alterungsbeständig, besitzt aber eine Tendenz zur Anhaftung bei Sauerstoffzutritt. Eine vollständige Aushärtung wurde bei diesem SVM nicht beobachtet.

Verträglichkeit. Nach TP KOR-VVS ist die Verträglichkeit der SVM **2A-1**, **2B-1** und **1B-2** mit dem geprüften Seilbeschichtungssystem aufgrund der Haftfestigkeitskriterien nicht gegeben. Bei Einwirkung der lösemittelhaltigen SVM **2B-1** und **1B-2** auf die Basislage einer Seilumwicklung wurde eine Beeinträchtigung des Verbunds zwischen Butylkautschuk und Polyethylen beobachtet. Die Dehnbarkeit der Umwicklung wird durch SVM-Einwirkung nicht vermindert.

Bezüglich enthaltener Lösemittel und Pigmente lassen sich aus den Untersuchungsergebnissen die folgenden allgemeinen Empfehlungen für SVM ableiten.

Lösemittel. Im SVM enthaltenes Lösemittel verringert die Viskosität und ist aus diesem Grund in manchen SVM zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit enthalten. Bei SVM mit einem LM-Gehalt > 3 % wird sehr wahrscheinlich Lösemittel beim Verseilen in das Seil eingetragen, was sich aus den hier durchgeführten Versuchen ableiten lässt. Beim späteren Verdampfen des Lösemittels aus dem fertigen Seil ist mit einer Volumenverringerung des SVM zu rechnen, welche die Bildung von unverfüllten Hohlräumen im Seil verursachen kann. Lösemittelhaltige SVM besitzen eine geringere Schmierwirkung, als lösemittelfreie. Zudem kann es durch Lösemittel zu einer Beeinträchtigung des äußeren Korrosionsschutzsystems kommen. Aus den genannten Gründen ist zu empfehlen, auf Lösemittel in Seilverfüllmitteln zu verzichten, sofern nicht sichergestellt werden kann, dass diese beim Verseilen vollständig verdampfen.

Metallische Korrosionsschutzpigmente (Zinkstaub und Aluminium). Eines der beiden metallischen Korrosionsschutzpigmente Zinkstaub und Aluminium ist in den meisten SVM enthalten, um die Korrosionsschutzwirkung zu erhöhen. Es ist zu vermuten, dass derartige Pigmente nach dem Verbot von Bleimennige als Ersatz eingeführt wurden. Das SVM „Leinöl-Bleimennige“ war gut geeignet, um Seildrähte aus Stahl ohne Zinküberzug vor Korrosion zu schützen. Zinkstaub galt nach dem Verbot von Bleimennige im Korrosionsschutz von Stahl oft als Alternative. Zinkstaub reagiert jedoch mit Wasser unter Wasserstoffentwicklung, was zu einer drastischen Volumenerhöhung des SVM und damit wahrscheinlich zum Seilbluten führen kann. Bei zinkstaubhaltigen SVM wurde im Rahmen der Versuche außerdem generell eine geringere Standfestigkeit, als bei zinkstaub-freien SVM beobachtet, was ebenfalls für eine höhere Tendenz zum Ausbluten spricht. Dies ist vor allem deshalb bedenklich, weil es sich bei Zinkstaub auch um eine umweltgefährdende Substanz handelt, die nicht in die Umwelt gelangen darf¹. Bei sehr niedrigen Temperaturen (-20 °C) und im gealterten Zustand (unter Wassereinwirkung) verschlechtert sich die Schmierwirkung der SVM mit Zinkstaub deutlich. Auch die Verwendung von Aluminiumpigmenten anstatt Zinkstaub erscheint vor dem Hintergrund einer deutlich schlechteren Beständigkeit gegenüber VE-Wasser und 5%iger NaCl-Lösung nicht sinnvoll. Im Freibewitterungsversuch erzielte das SVM mit dem geringsten Metallpigmentanteil (0 % Zink und ca. 2 % Aluminium) die besten Ergebnisse. In Anbetracht der Tatsache, dass Seildrähte heutzutage einen

¹ Gefahren- und Sicherheitshinweise für Zinkstaub nach Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 (CLP):
H410 ... Sehr giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung
P273 ... Freisetzung in die Umwelt vermeiden

Zinküberzug tragen und unter Berücksichtigung der hier dargelegten negativen Auswirkungen metallischer Pigmente auf das Leistungsvermögen der SVM wird eine allgemeine Überlegung bzgl. der Notwendigkeit metallischer Pigmente in SVM für Vollverschlossene Seile vorgeschlagen.

Aufbauend auf den hier zusammengefassten Untersuchungsergebnissen wurde ein Vorschlag für ein leistungsorientiertes Prüfregime für Seilverfüllmittel aufgestellt (siehe Abschnitt 4).

Das Projektziel wurde erreicht.

6 Danksagung

Unser Dank gilt dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) sowie der EURONORM GmbH, welche das vorliegende Projekt gefördert (49MF190162) und eine Bearbeitung am Institut für Korrosionsschutz Dresden ermöglicht haben.

Wir bedanken uns außerdem bei den entsprechenden Herstellern für Seilverfüllmittel sowie den Seilherstellern, welche durch die Bereitstellung des Probenmaterials zur Förderung des Projekts beigetragen haben.

Des Weiteren gilt unser Dank der AG 2.4.1 „Brückenseile“ der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) für die Begleitung des Forschungsprojektes im Rahmen der regelmäßigen AG-Sitzungen.

Literatur

- [1] M. Eilers, A. Hemmert-Halswick, „Seilverfüllmittel – Mechanische Randbedingungen für Brückenseile“, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft B16, Bergisch-Gladbach, **1997**.
- [2] REACH-Verordnung (EG) Nr. 1907/**2006** Anhang XVII.
- [3] H. Friedrich, „Korrosionsschutz von Brückenseilen“, Vortrag zum Seminar „Weiterbildung für Beschichtungsinspektoren“, Institut für Korrosionsschutz Dresden GmbH, Dresden, **27.03.2019**.
- [4] Einschätzung der Fa. Bridon Bekaert auf Anfrage im Rahmen einer Sitzung der AG Brückenseile der Bundesanstalt für Straßenwesen, Dresden, **19.03.2019**.
- [5] *Technische Lieferbedingungen und Technische Prüfvorschriften für Ingenieurbauten*, Teil 4, Abschnitt 4, *Technische Lieferbedingungen und Technische Prüfvorschriften für vollverschlossene Seile*, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch-Gladbach, **2017**. (TL/TP-VVS)
- [6] A. Hemmert-Halswick, „Erfahrungssammlungen: Schäden an Stahlbrücken – wetterfeste Stähle – Seile“, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft B45, Bergisch-Gladbach, **2004**.
- [7] W. Höhle, Schlussbericht über das Forschungsvorhaben „*Untersuchungen an Seilverfüllmitteln zur Feststellung des Materialverhaltens*“, Vertragsnummer der Bundesanstalt für Straßenwesen: 9.88209F1, Bochum, **1995**.
- [8] Zhang, X. G., *Corrosion and Electrochemistry of Zinc*, Springer Science + Business Media, New York, 1. Aufl., **1996**, ISBN 978-1-4757-9879-1.
- [9] *Technische Prüfvorschriften für Beschichtungs-, Dicht- und Injizierstoffe für den Korrosionsschutz von vollverschlossenen Seilen*, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch-Gladbach, **2017**. (TP KOR-VVS)
- [10] DIN EN 12068: *Organische Umhüllungen für den Korrosionsschutz in Böden und Wässern verlegten Stahlrohrleitungen im Zusammenwirken mit kathodischem Korrosionsschutz – Bänder und schrumpfende Materialien*, Beuth Verlag, **1999**.

Abbildungen

- Abb. 1:** Blasenbildung in der Beschichtung als Folge von SVM-Austritt bei der Rheinbrücke Emscherschnellweg.
- Abb. 2:** Massenänderung der lösemittelhaltigen SVM in den ersten 15 Minuten nach der Applikation in einer Schichtdicke von 60 μm (durchgehende Linie) im Vergleich zum jeweiligen nicht-flüchtigen Anteil nach DIN EN ISO 3251 (gestrichelte Linie).
- Abb. 3:** Zusammensetzung des Glührückstands der SVM aus den jeweiligen Anteilen Zink, Aluminium und sonstigen Elementen. Die Summe über den Balken entspricht dem ermittelten Pigmentgehalt nach DIN EN ISO 14680-2.
- Abb. 4:** Endseitig geschützter Abschnitt eines Seildrahtes mit Zinküberzug.
- Abb. 5:** Ergebnisse der kontinuierlichen Temperaturmessung in Seilproben während der Auslagerung am Standort Madrid im Jahr 2020.
- Abb. 6:** Vergleichende fotografische Aufnahmen bei 50 und 60 ° belasteter Drähte.
- Abb. 7:** Ruhepotentiale des verwendeten Seildrahtes mit Zinküberzug und des entzinkten Seildrahtes in deionisiertem Wasser zwischen 50 und 80 °C.
- Abb. 8:** Grafische Darstellung der im metallographischen Querschliff bestimmten maximalen Überzugsdicke bzw. Lochfraß an Stahlrunddrähten mit Zinküberzug in Abhängigkeit von der Belastungszeit bei Belastungstemperaturen von 50 und 60 °C in VE-Wasser, künstlichem Meerwasser nach DIN EN ISO 15711 und 5%iger wässriger Natriumchloridlösung. Es wurde jeweils der Durchschnitt aus 4 Bestimmungen an unterschiedlichen Drähten gebildet.
- Abb. 9:** Teilschritte der Drahtbündelprobenherstellung. 1. Befüllen des Drahtbündels mit SVM und endseitiger Epoxidharzverguss. 2. Entfernung des Schrumpfschlauchs. 3. Belastung im entsprechenden Medium und Zerlegung der Probe.
- Abb. 10:** Ergebnisse der metallographischen Auswertung von Korrosionserscheinungen bei Drahtbündelproben nach der immersiven Belastung in VE-Wasser bei 50 °C.
- Abb. 11:** Ergebnisse der metallographischen Auswertung von Korrosionserscheinungen bei Drahtbündelproben nach der immersiven Belastung in 5%iger NaCl-Lösung bei 60 °C.
- Abb. 12:** Vorbetrachtung bezüglich Einflussfaktoren auf die Gefahr des Seilblutens.
- Abb. 13:** Absolute Scherviskosität der SVM in Abhängigkeit von der Temperatur.
- Abb. 14:** Relative Scherviskosität der SVM bezogen auf den jeweiligen Absolutwert bei 20 °C.
- Abb. 15:** Abtropfversuch mit Seilprobekörpern.
- Abb. 16:** Ergebnisse der Standfestigkeitsuntersuchungen im Schichtdickenbereich von 0 – 1000 μm bei jeweils 60, 80, 100 und 120 °C.
- Abb. 17:** Theoretische Betrachtung der maximal notwendigen Standfestigkeit in Abhängigkeit vom Drahtdurchmesser im Seil.
- Abb. 18:** Schematische Übersicht zur Ermittlung der Volumenänderung der SVM in Abhängigkeit vom Lösemittelgehalt, von der Temperatur und von der enthaltenen Wassermenge mit Hilfe der Pyknometermethode.
- Abb. 19:** Apparativer Aufbau und Schema des Schmierversuchs für SVM.

- Abb. 20:** Typischer Verlauf der Standardkraft über die Dauer eines oszillierenden Schmierversuchs mit Drahtbündelproben.
- Abb. 21:** Typische Riefenbildung auf dem Kerndraht während des oszillierenden Schmierversuchs.
- Abb. 22:** Mittlere Amplitude der Standardkraft während der durchgeführten Schmierversuche nach unterschiedlichen Varianten.
- Abb. 23:** Maximale Temperaturerhöhung in den Drahtbündelproben während der durchgeführten Schmierversuche bei 60 und bei -20 °C.
- Abb. 24:** Schematische Darstellung der Krafteinwirkung beim VKA-Test.
- Abb. 25:** Ergebnisse des VKA-Tests.
- Abb. 26:** Thermogravimetrisch bestimmte Zersetzungsstufen von 2A-1 in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterungsvariante.
- Abb. 27:** Thermogravimetrisch bestimmte Zersetzungsstufen von 1A-2 in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterungsvariante.
- Abb. 28:** Thermogravimetrisch bestimmte Zersetzungsstufen von 1A-1 in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterungsvariante.
- Abb. 29:** Thermogravimetrisch bestimmte Zersetzungsstufen von 3A-1 in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterungsvariante.
- Abb. 30:** Thermogravimetrisch bestimmte Zersetzungsstufen von 2B-1 in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterungsvariante.
- Abb. 31:** Thermogravimetrisch bestimmte Zersetzungsstufen von 1B-1 in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterungsvariante.
- Abb. 32:** Thermogravimetrisch bestimmte Zersetzungsstufen von 1B-2 in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterungsvariante.
- Abb. 33:** Aufbau der Seilumwicklung (Basislage links, Decklage rechts) im Querschnitt.
- Abb. 34:** Herstellung der Seilproben für Freibewitterungsversuche. Oben: Anlieferungszustand. Mitte links: 45 cm Abschnitt für die Freibewitterung (zunächst ohne Kunststoffkappe). Mitte rechts: 10 cm Abschnitt (Nullmuster). Unten links: Probenende beim Einbetten in EP. Unten rechts: fertiger Probekörper.
- Abb. 35:** Seilproben während der Freibewitterung auf Helgoland.
- Abb. 36:** Zentrales Seilsegment, das für die Querschlifffanalyse in Epoxidharz eingebettet wurde.
- Abb. 37:** Mikroskopaufnahmen von Kanten der Z-Drähte im Hohlraum 1 (zwischen äußerer und darunterliegender Drahtlage) bei den Seilen S1V, S2V und S3V (von links nach rechts).
- Abb. 38:** Exemplarische Querschlifffaufnahme eines Z-Drahtes mit Zn95Al5-Überzug.

Tabellen

- Tabelle 1:** Übersicht der Schadensbilder SVM-bedingter Schadensfälle
- Tabelle 2:** Anonymisierte Klassifizierung der erhaltenen SVM nach Zusammensetzung
- Tabelle 3:** Visuelle Auswertung von gesweepen feuerverzinkten Stahlplatten, die halbseitig mit Seilverfüllmittel beschichtet und anschließend in verschiedenen Immersions-medien belastet wurden (WR...Weißrost, RR...Rotrost).
- Tabelle 4:** Ergebnisse der Abtropfversuche mit Seilprobekörpern. „i.O.“ = kein Abtropfen nach 1 Stunde senkrechter Lagerung bei der angegebenen Temperatur. „n.i.O.“ = Abtropfen.
- Tabelle 5:** Ergebnisse der Versuche zur Bestimmung der Volumenänderung der SVM.
- Tabelle 6:** Varianten durchgeführter Schmierversuche mit Drahtbündelproben.
- Tabelle 7:** Ergebnisse der Riefenauswertung auf dem jeweiligen Kerndraht nach den durchgeführten Schmierversuchen.
- Tabelle 8:** Alterungsszenarien für SVM
- Tabelle 9:** Ergebnisse der Untersuchung auf haptische Veränderungen sowie auf Änderungen der Infrarotcharakteristika von 2A-1 in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterungs-variante.
- Tabelle 10:** Ergebnisse der Untersuchung auf haptische Veränderungen sowie auf Änderungen der Infrarotcharakteristika von 1A-2 in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterungs-variante.
- Tabelle 11:** Ergebnisse der Untersuchung auf haptische Veränderungen sowie auf Änderungen der Infrarotcharakteristika von 1A-1 in Abhängigkeit von der jeweiligen Alterungs-variante.

- Tabelle 12:** Ergebnisse der Untersuchung auf haptische Veränderungen sowie auf Änderungen der Infrarotcharakteristika von 3A-1 in Abhängigkeit von der jeweiligen Altersvariante.
- Tabelle 13:** Ergebnisse der Untersuchung auf haptische Veränderungen sowie auf Änderungen der Infrarotcharakteristika von 2B-1 in Abhängigkeit von der jeweiligen Altersvariante.
- Tabelle 14:** Ergebnisse der Untersuchung auf haptische Veränderungen sowie auf Änderungen der Infrarotcharakteristika von 1B-1 in Abhängigkeit von der jeweiligen Altersvariante.
- Tabelle 15:** Ergebnisse der Untersuchung auf haptische Veränderungen sowie auf Änderungen der Infrarotcharakteristika von 1B-2 in Abhängigkeit von der jeweiligen Altersvariante.
- Tabelle 16:** Ergebnisse der Verträglichkeit mit Flüssigbeschichtungen nach TP KOR-VVS
- Tabelle 17:** Ergebnisse der visuellen Auswertung SVM-kontaminierter Streifen der Basislage einer Butylkautschukumwicklung. Die fotografischen Aufnahmen wurden nach der Dehnung der Basislage um ca. das 10-fache der ursprünglichen Länge gemacht.
- Tabelle 18:** Ergebnisse der Auswertung von Seilproben, die ohne äußeren Korrosionsschutz 2 Jahre auf Helgoland ausgelagert wurden.
- Tabelle 19:** Entwurf für den Umfang einer möglichen Grund- und Wiederholungsprüfung für SVM.
- Tabelle 20:** Voraussichtliche Ergebnisse der Grundprüfung aller SVM nach den in Tabelle 19 aufgeführten Leistungsprüfungen.

Anlagen

Anlage 1 – Infrarotspektren

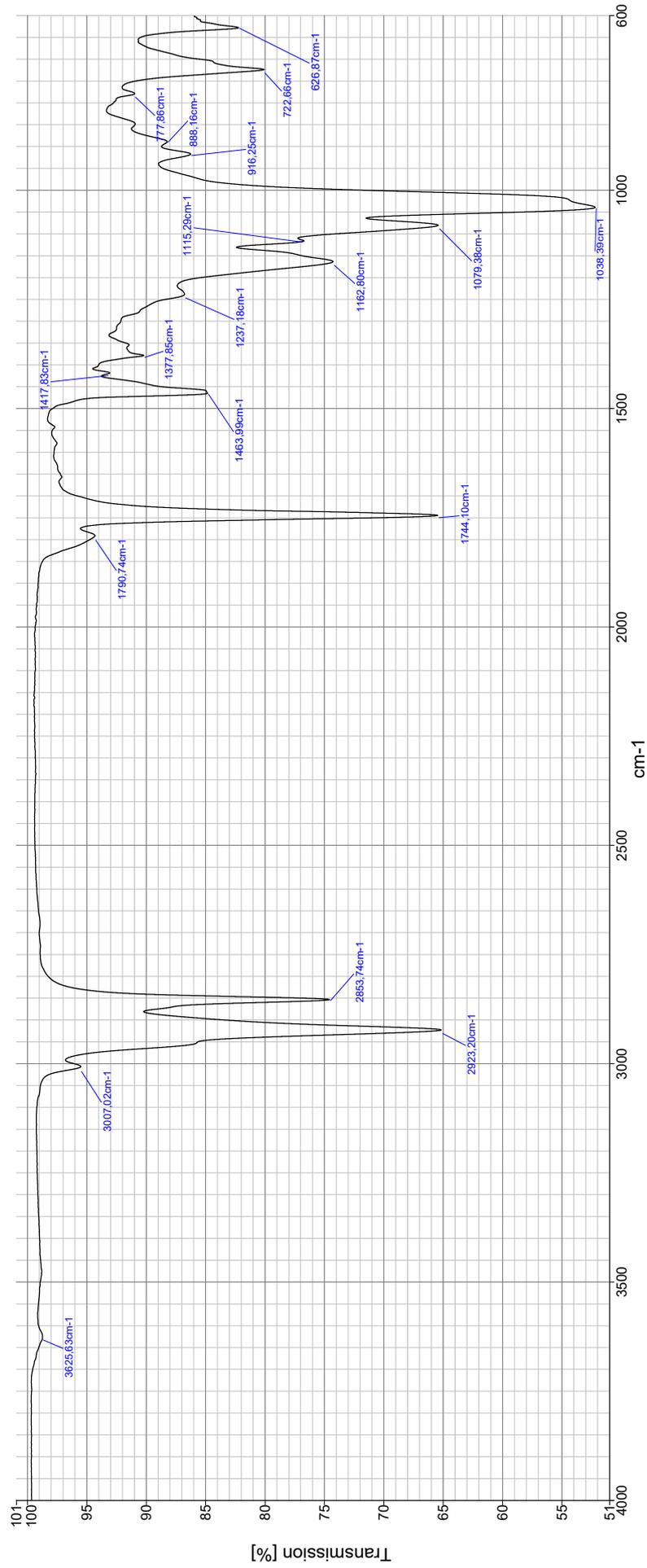
Anlage 2 – TGA-Aufnahmen

Anlage 3 – Fotografische Dokumentation der Freilegung äußerer Drahtlagen auf Helgoland freibewitterter Seilproben

Anlage 1 zum Abschlussbericht
Infrarotspektren

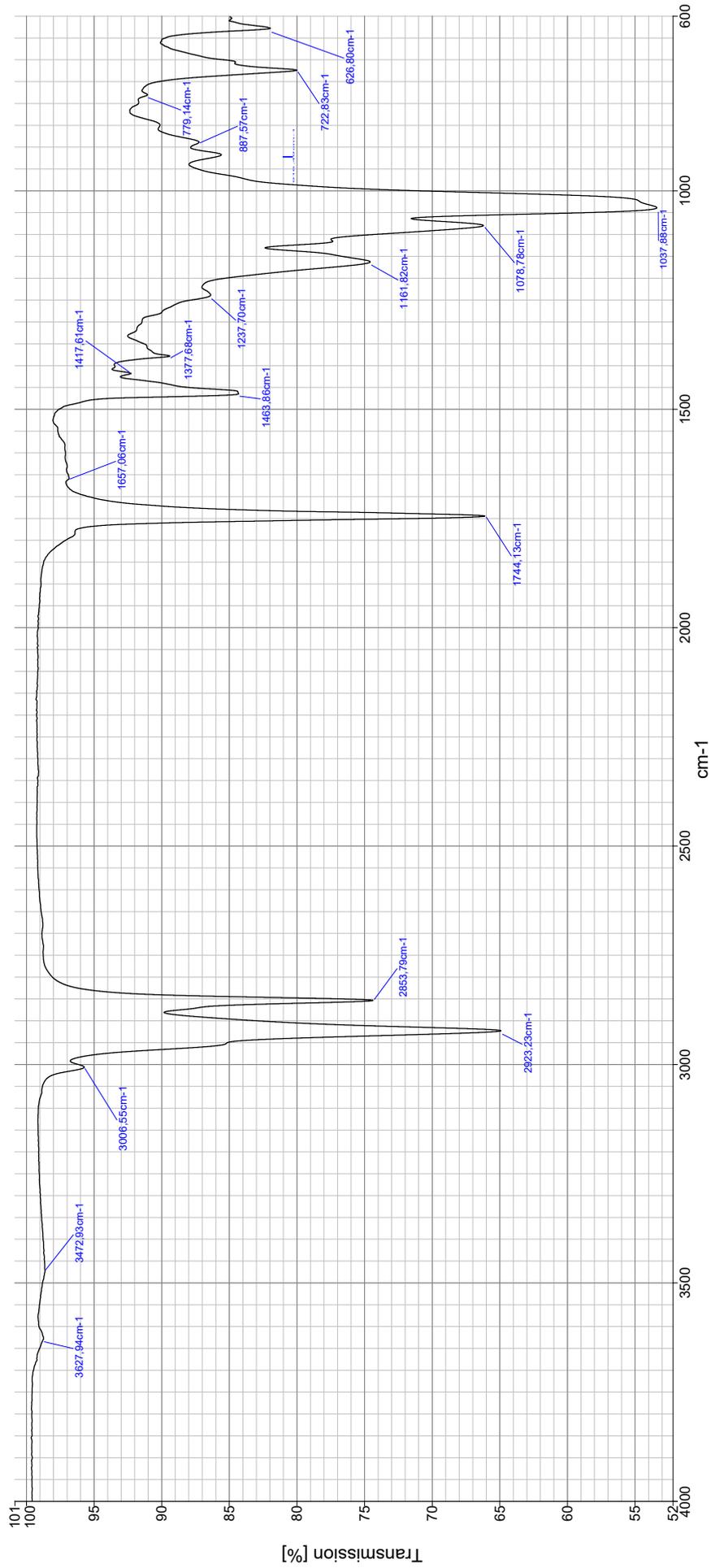
2A-1 - Originalzustand

Spektrum: 5-14620-1_HR



2A-1 – Seilzustand (= lösemittelfrei)

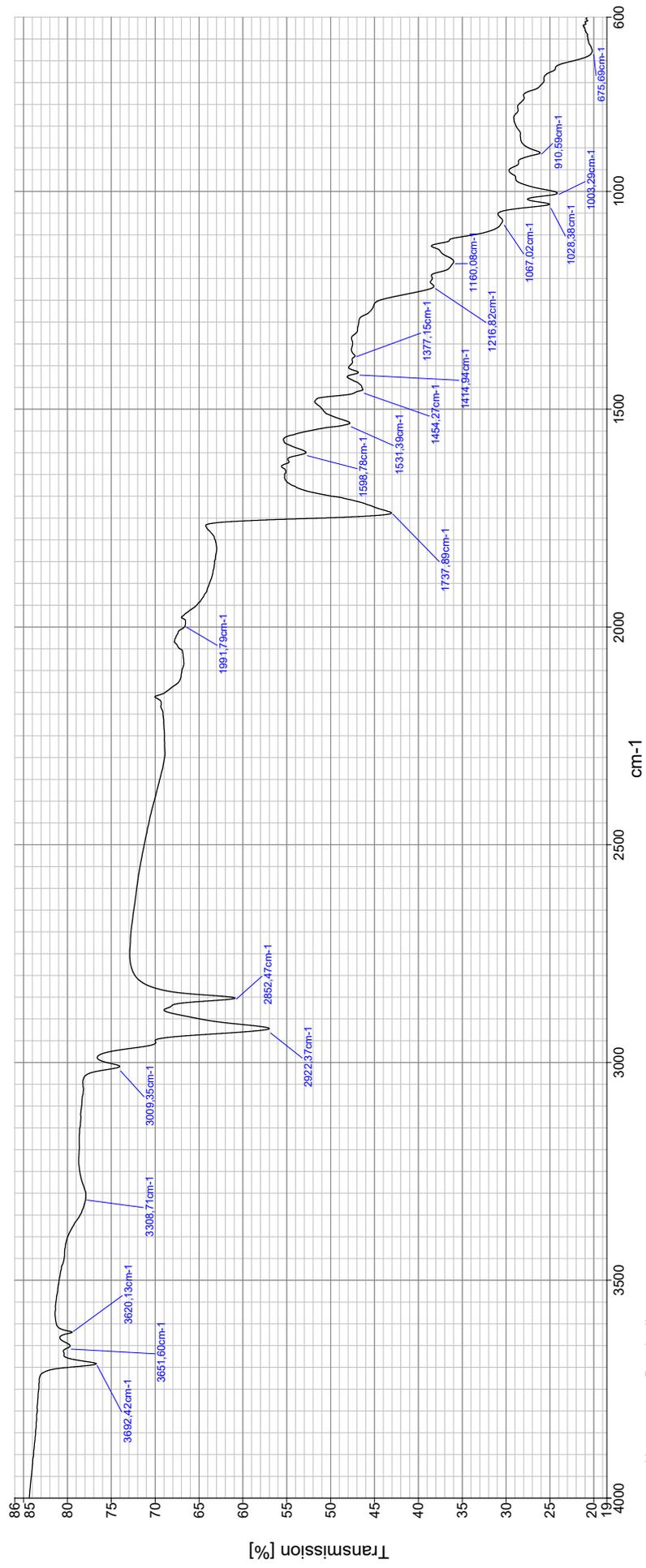
Spektrum: 5-12521-2



1A-2 – Originalzustand

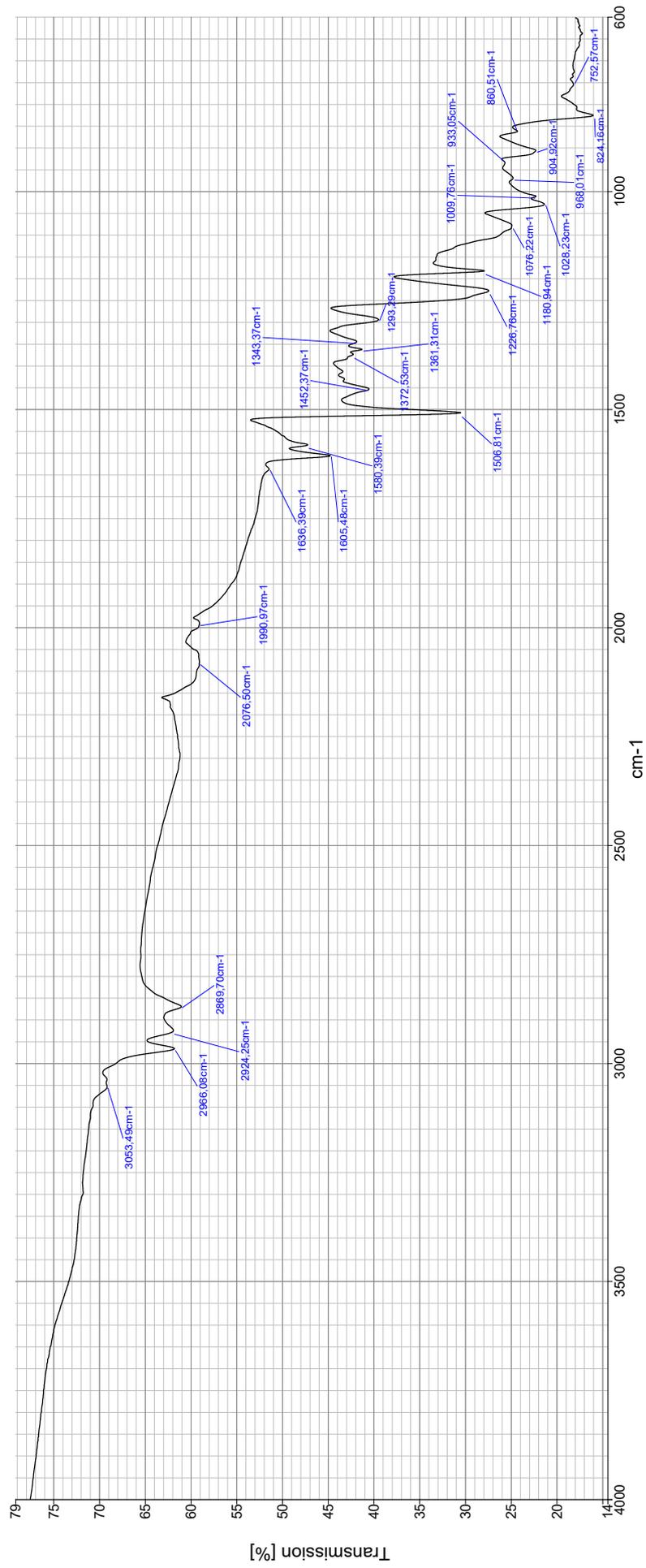
81

Spektrum: 5-14620-2_HR



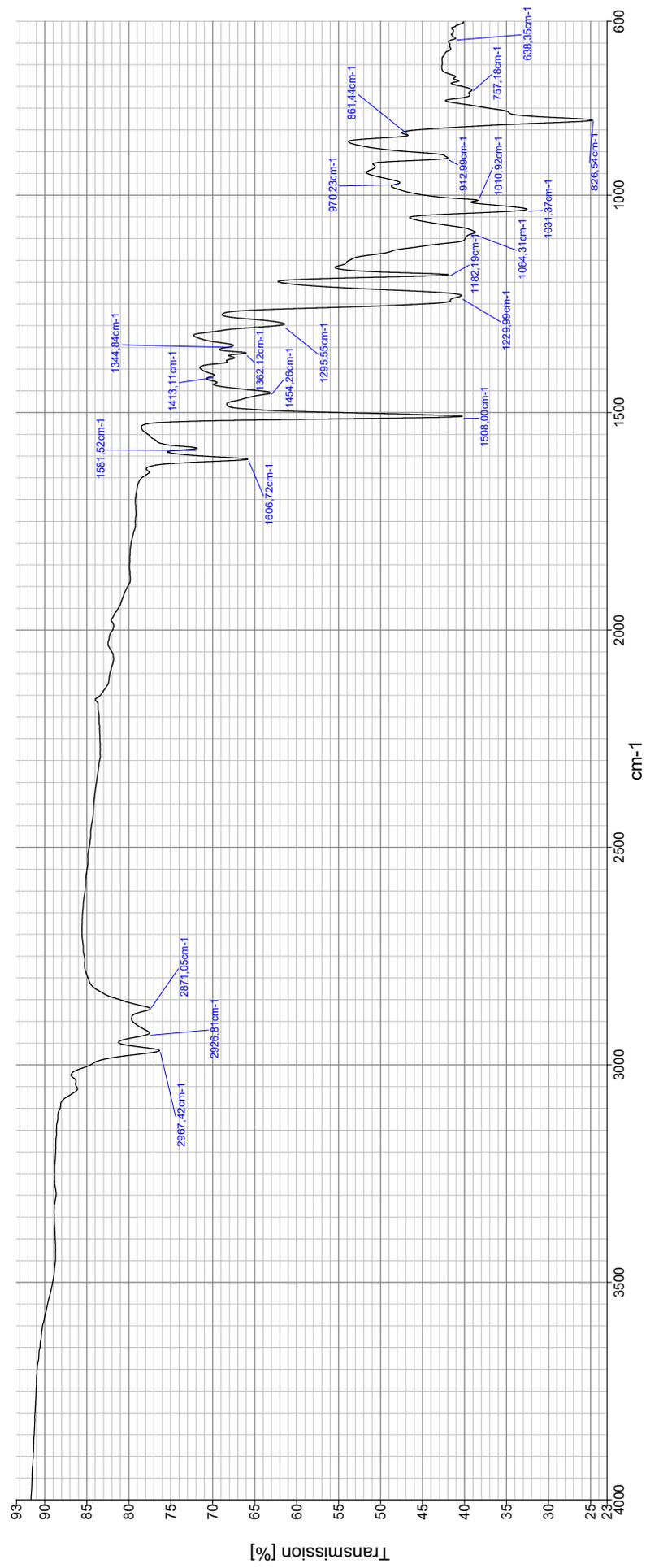
1A-1 - Originalzustand

Spektrum: 5-14620-3_HR



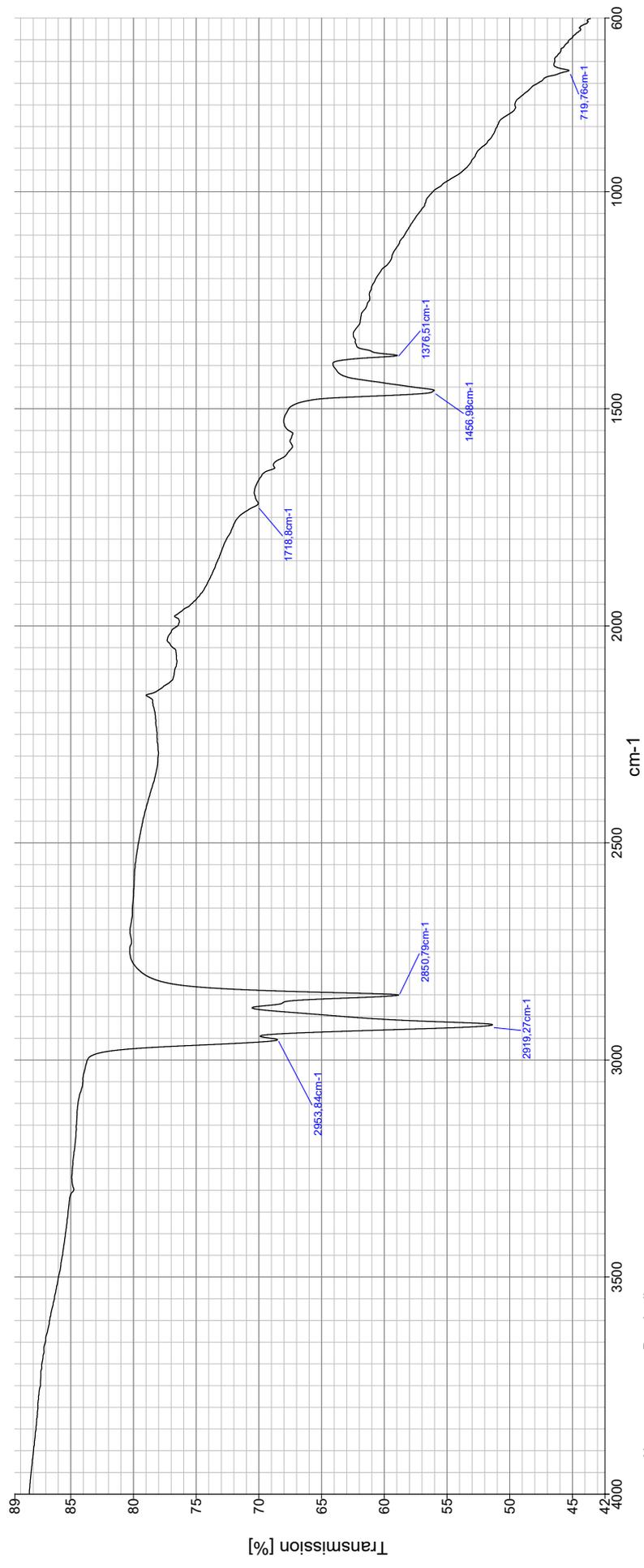
3A-1 – Originalzustand

Spektrum: 5-14620-4_HR



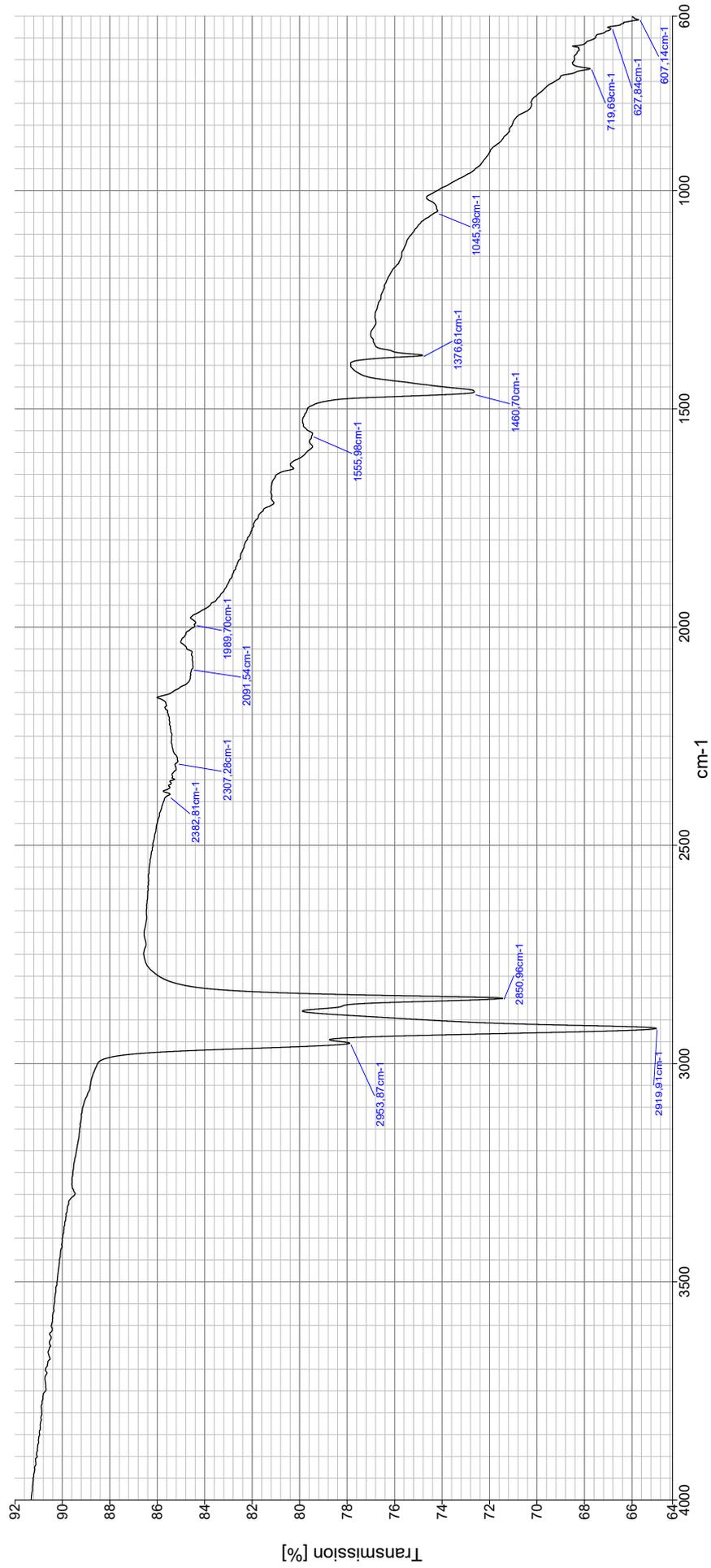
2B-1 – Originalzustand (17 % Lösemittel)

Spektrum: 5-14620-6



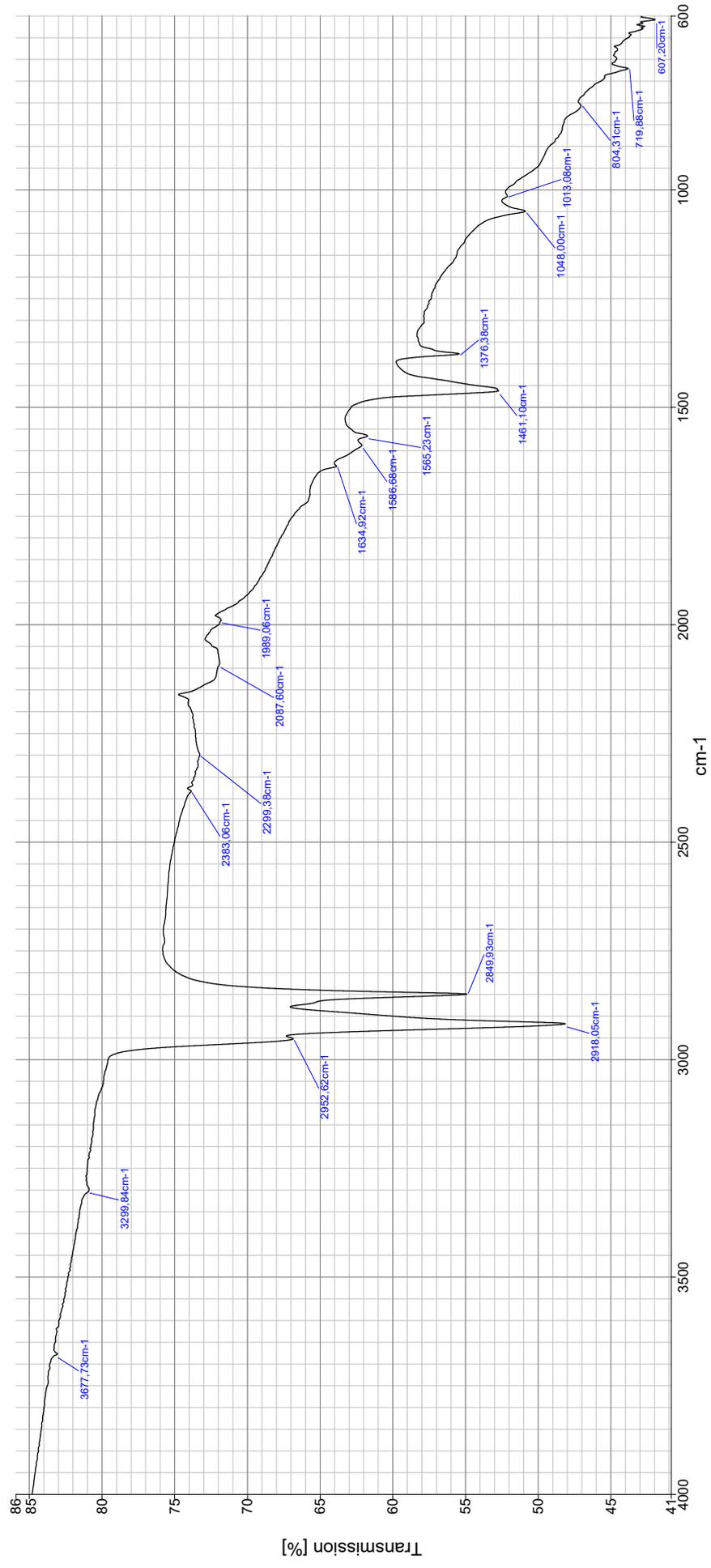
2B-1 – Seilzustand (16 % Lösemittel)

Spektrum: 5-12521-6



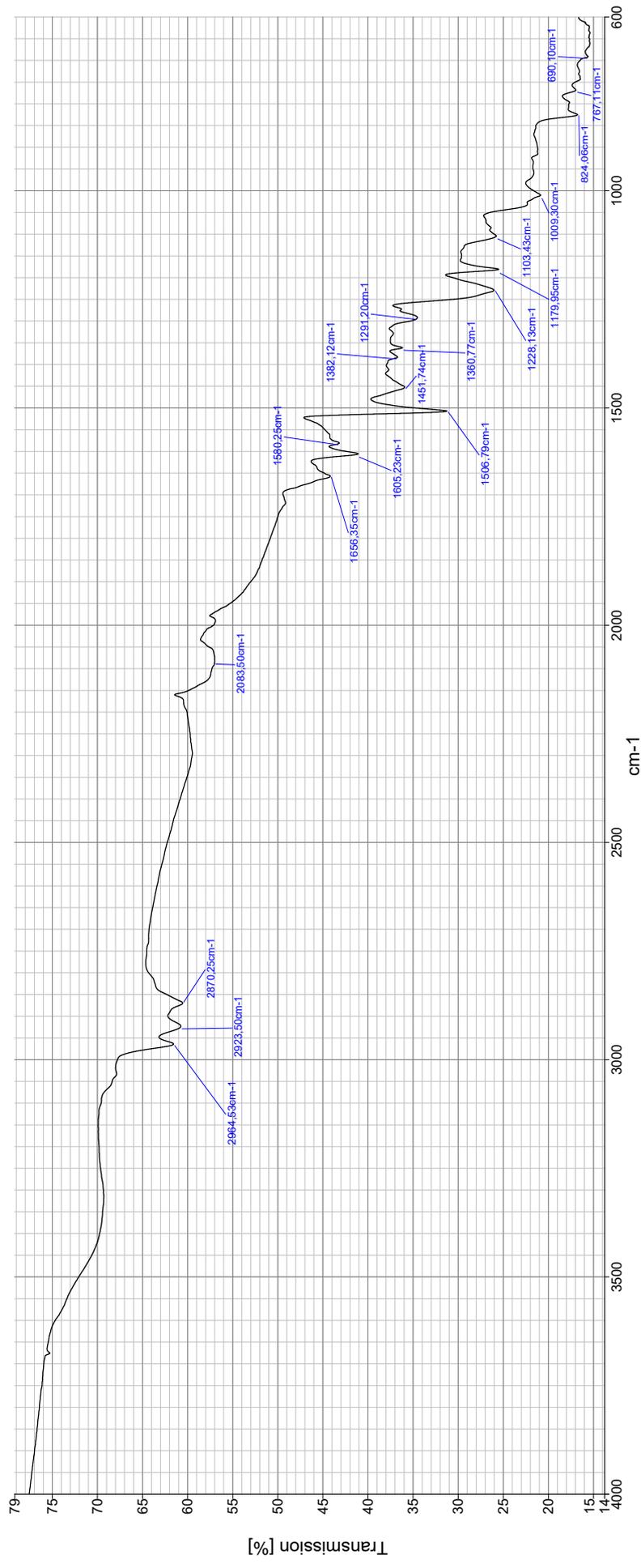
2B-1 – lösemittelfrei

Spektrum: 5-12521-7



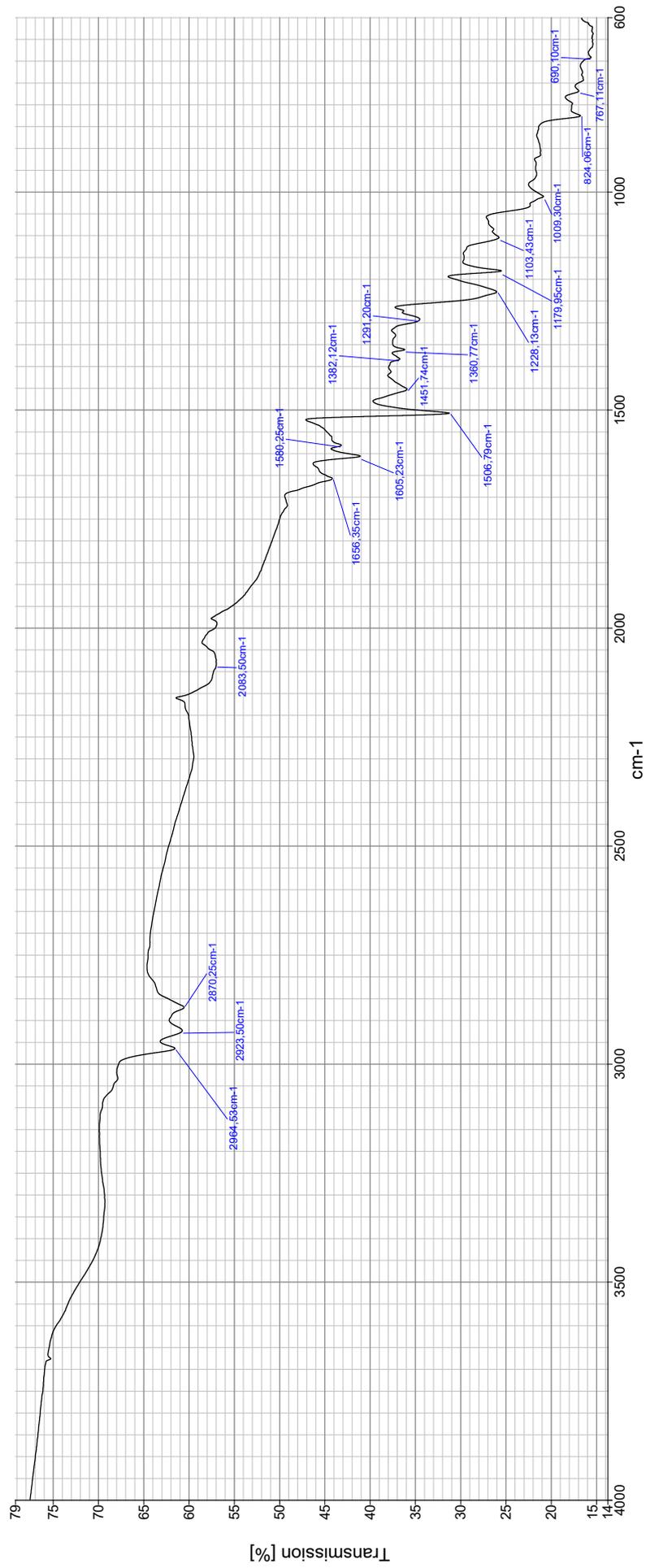
1B-1 – Originalzustand (7 % Lösemittel)

Spektrum: 4-146-20-5_HR

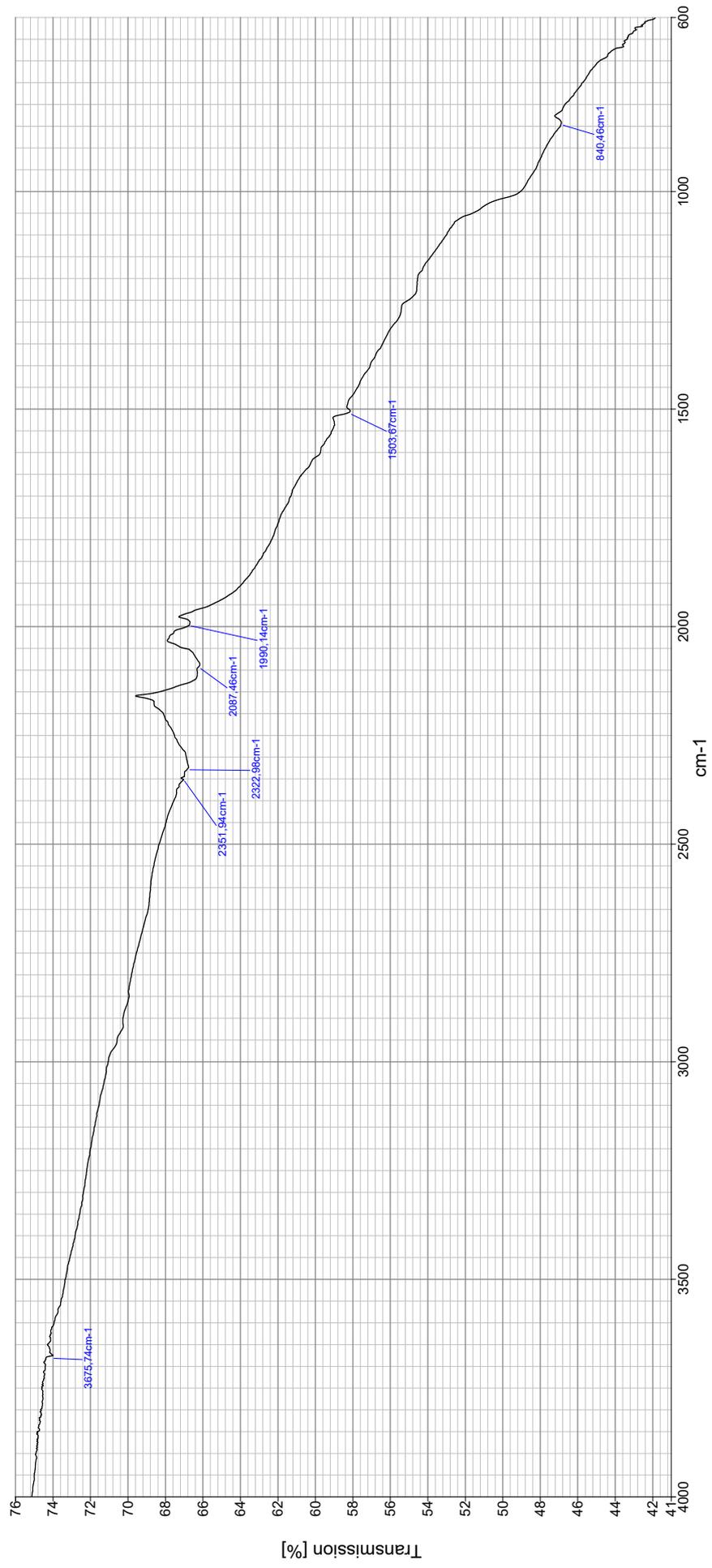


1B-1 – Seilzustand (4% Lösemittel)

Spektrum: 5-146-20-5

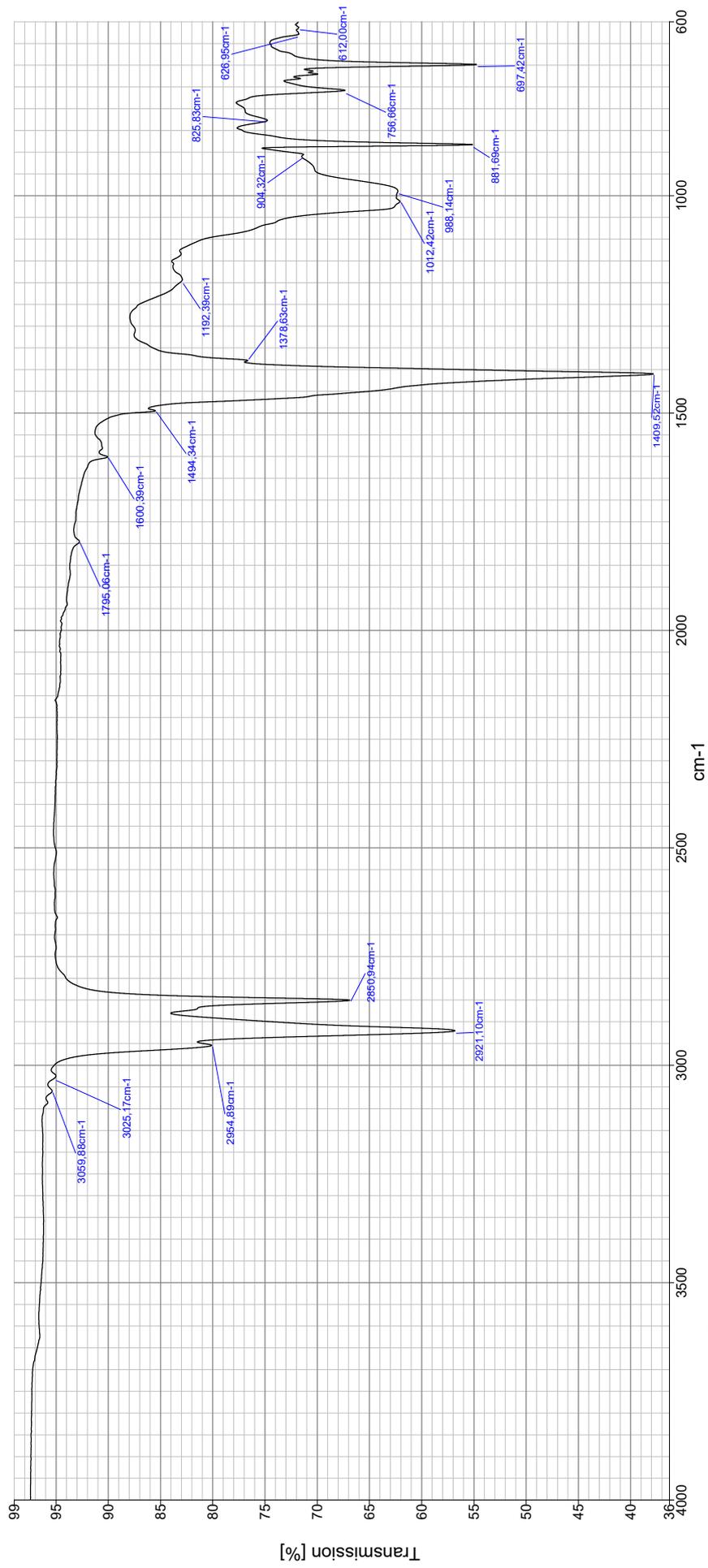


Spektrum: 5-12521-4.1



1B-2 – Originalzustand (23 % Lösemittel)

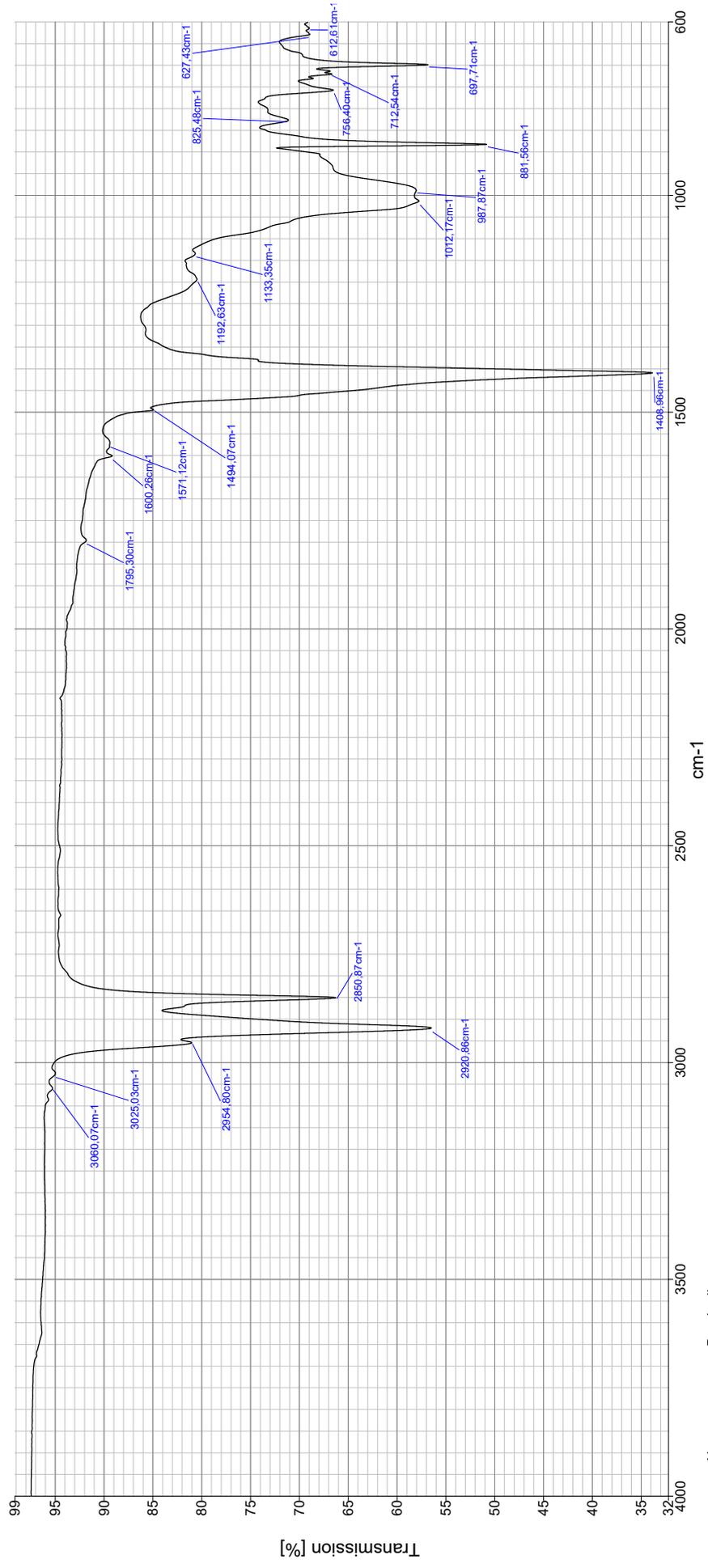
Spektrum: 5-12521-8



1B-2 – Seilzustand (11 % Lösemittel)

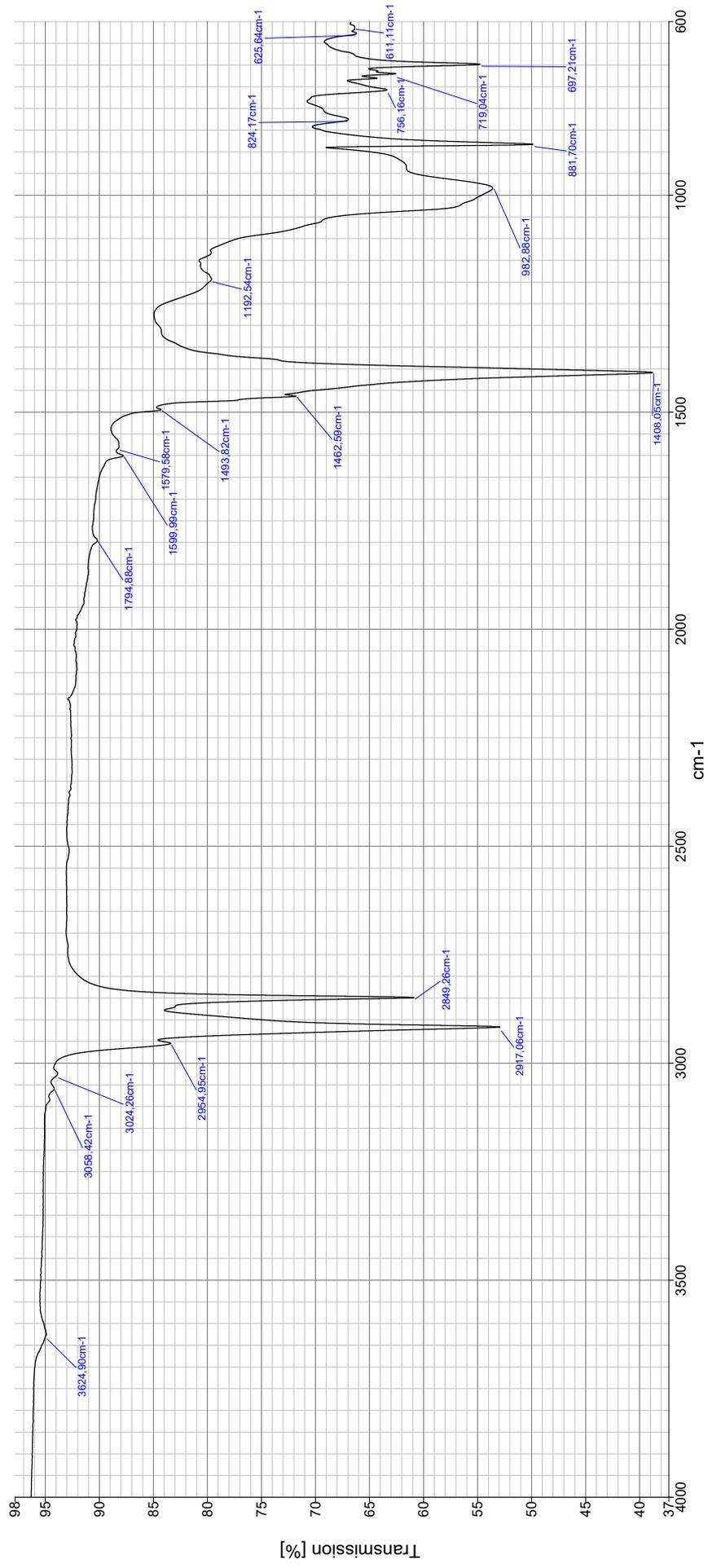
91

Spektrum: 5-12521-9



1B-2 -lösemittelfrei

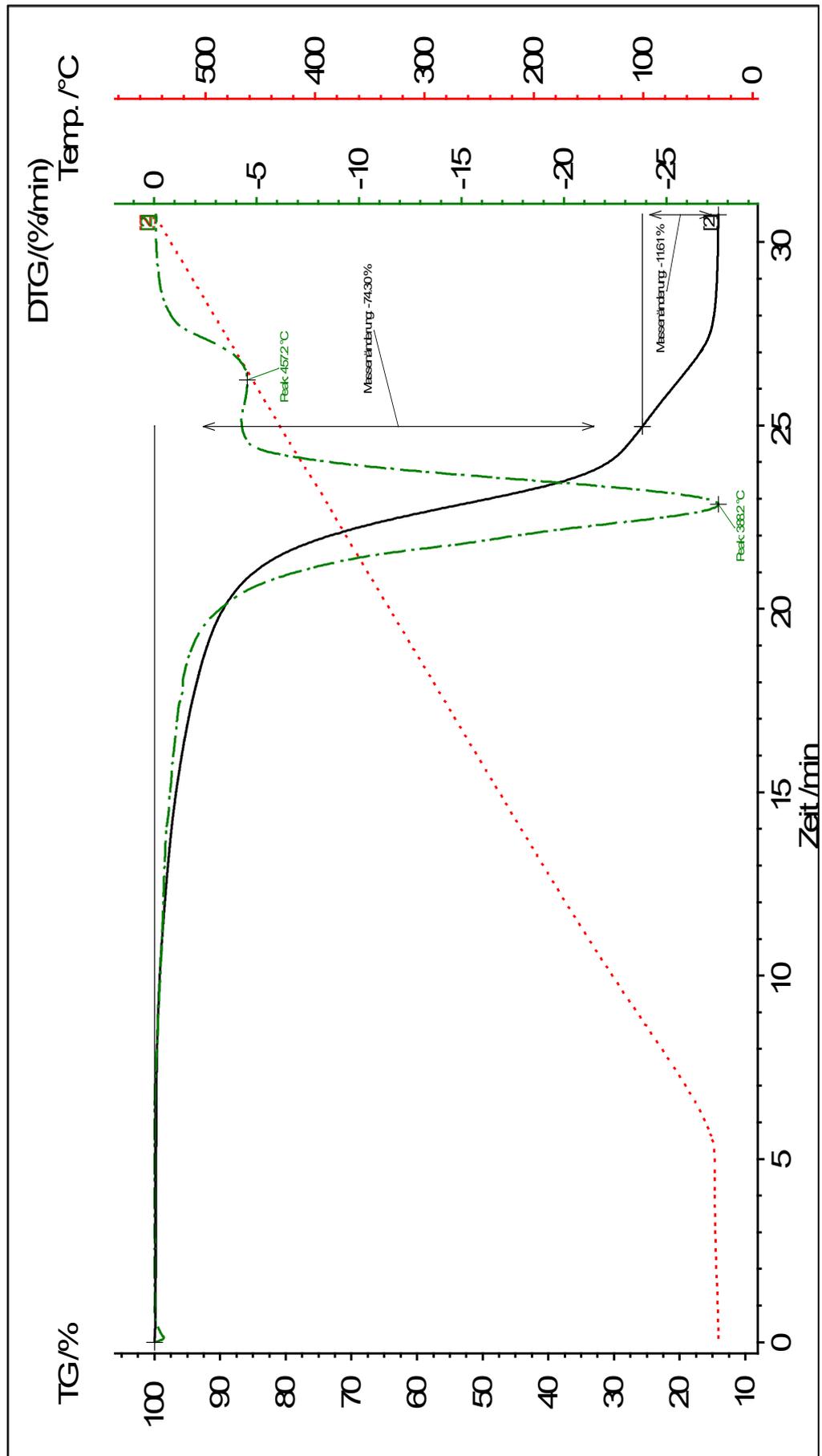
Spektrum: 5-12521-10



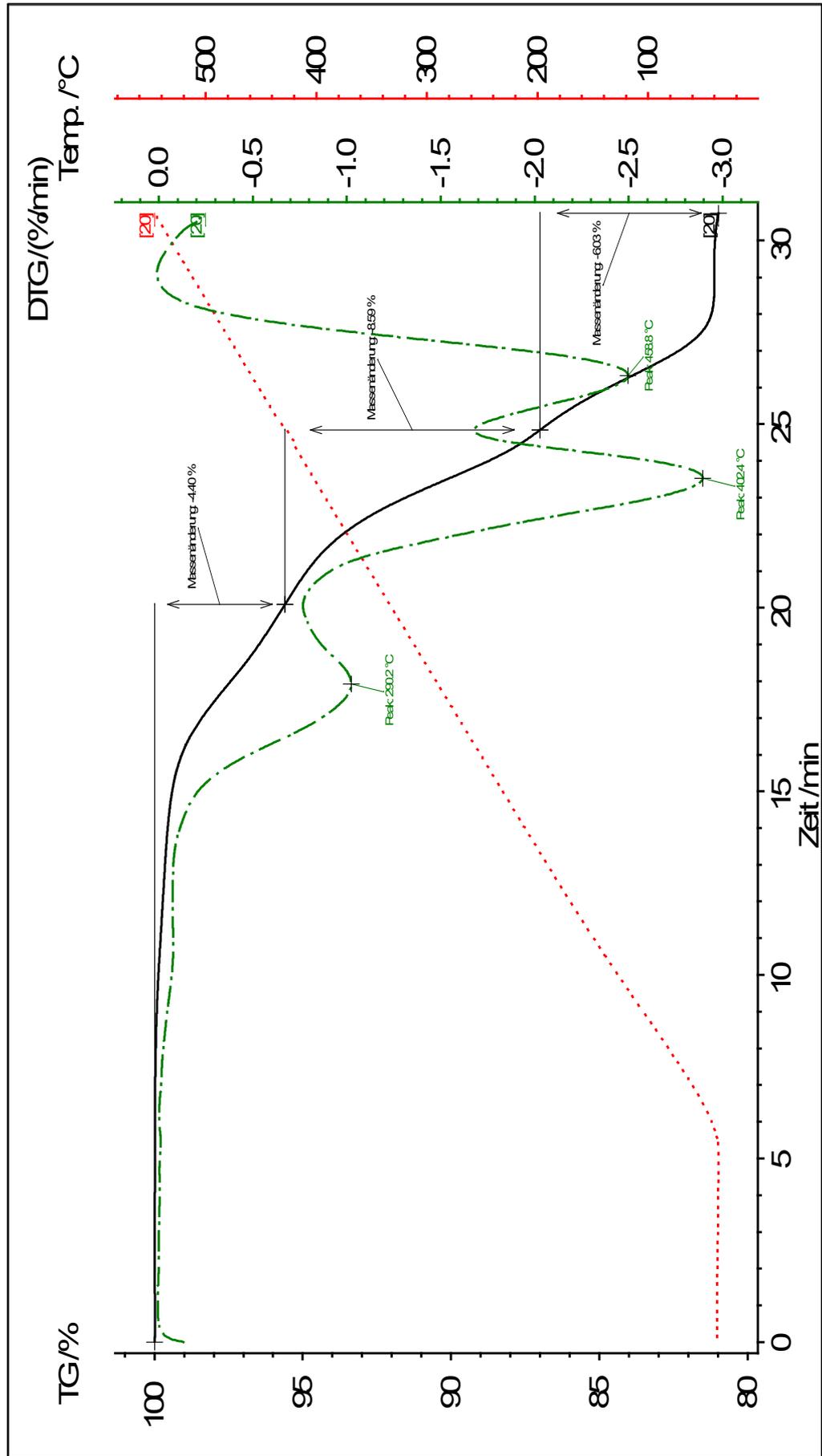
Anlage 2 zum Abschlussbericht

TGA-Aufnahmen

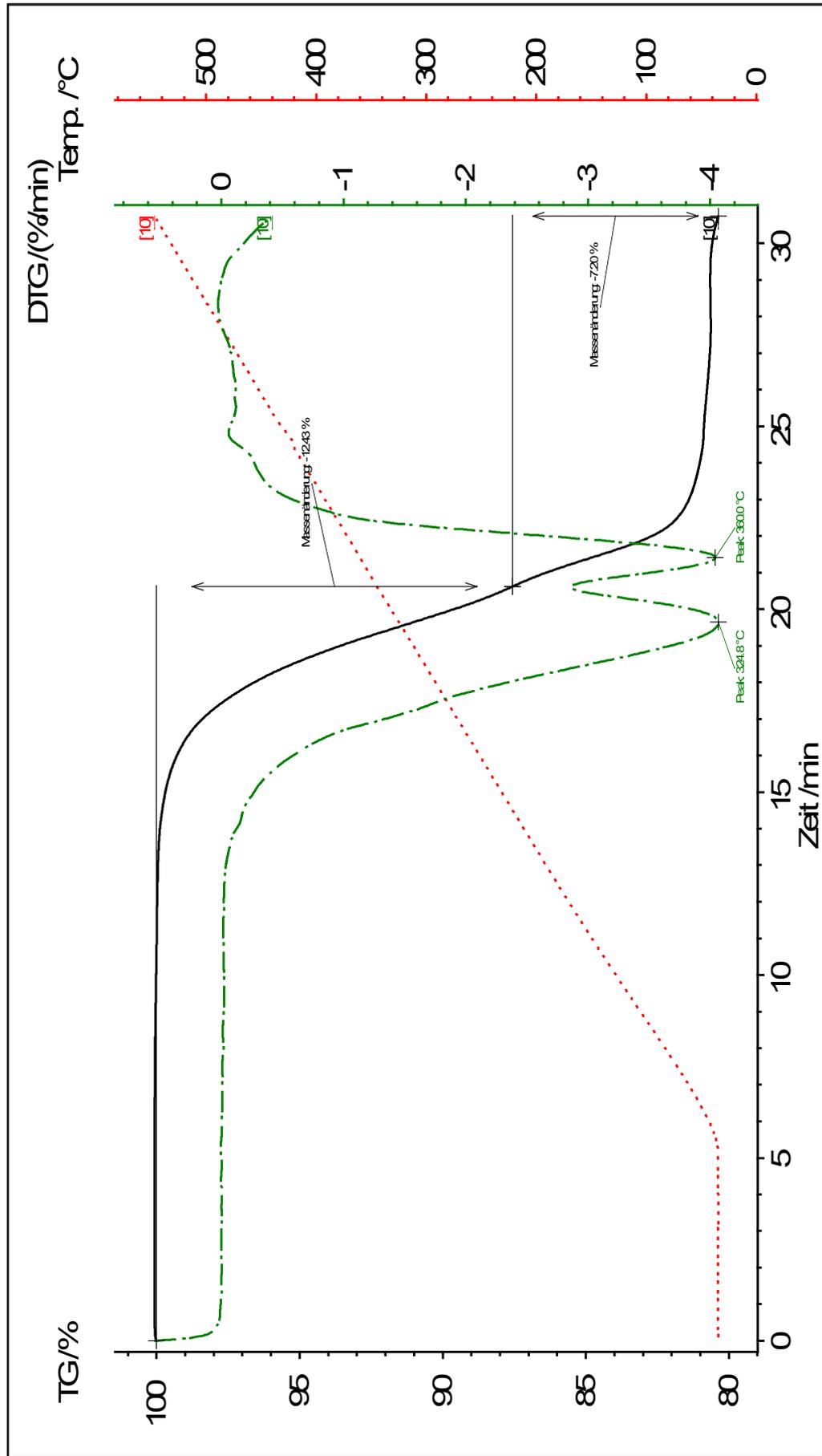
2A-1 – Originalzustand

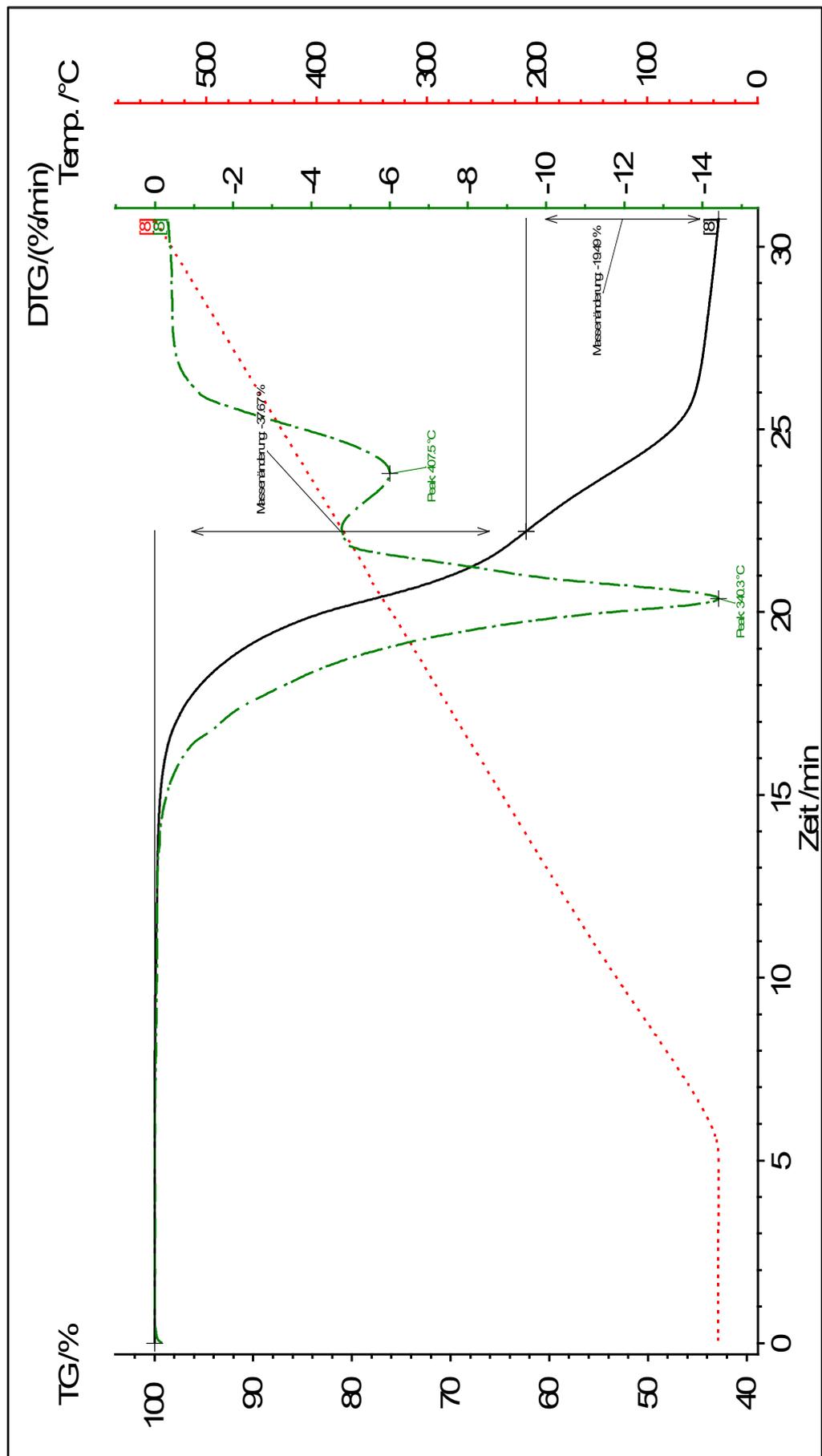


1A-2 – Originalzustand

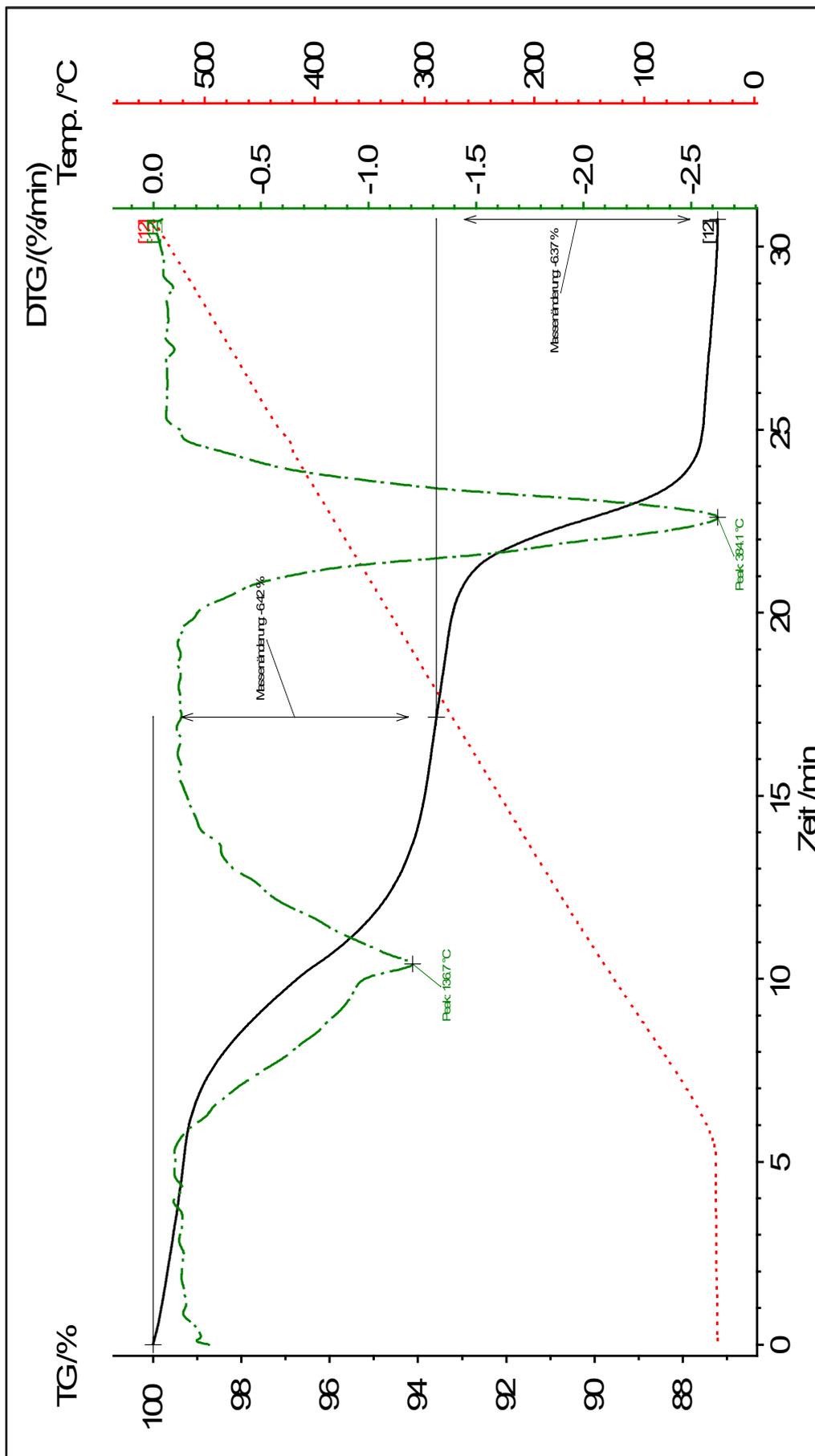


1A-1 - Originalzustand

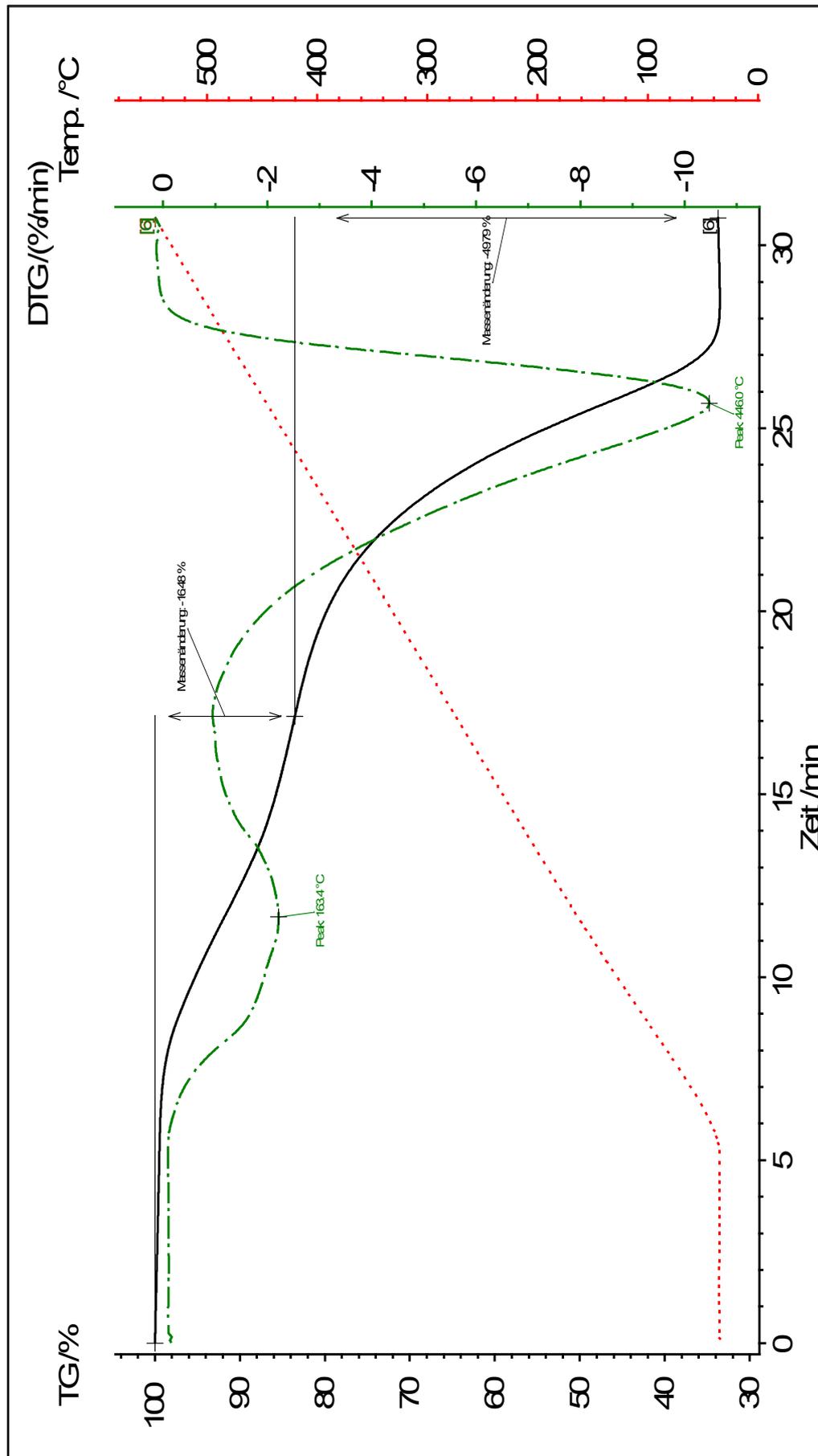




1B-1 – Originalzustand



2B-1 - Originalzustand



Anlage 3 zum Abschlussbericht

Fotographische Dokumentation der Freilegung äußerer Drahtlagen auf
Helgoland freibewitterter Seilproben

Seiloberfläche

S1V



S2V

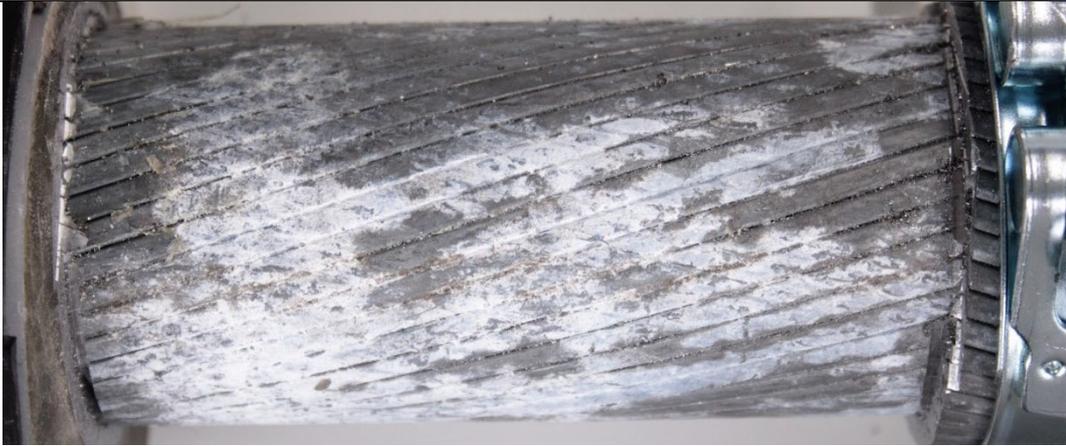


S3V

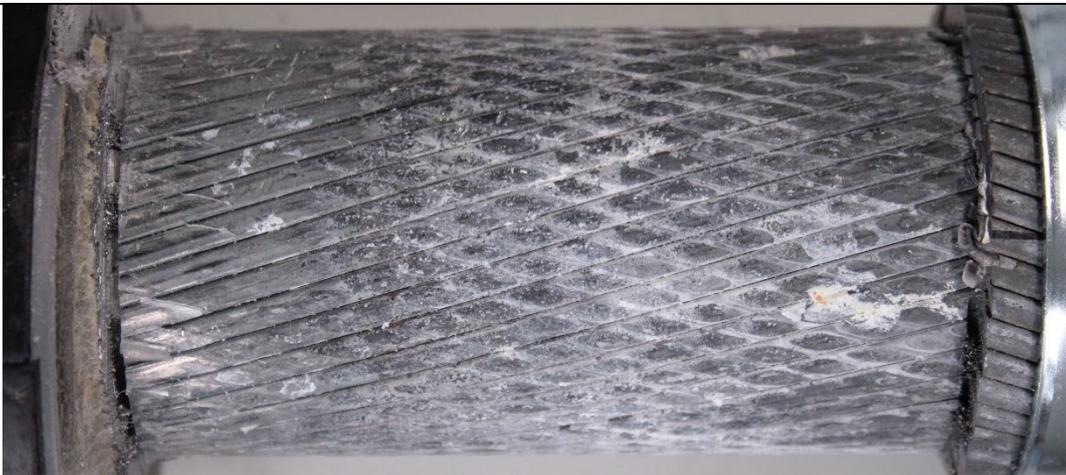


Hohlraum 1 (komplett freigelegt)

S1V



S2V



S3V



Hohlraum 2 (komplett freigelegt)

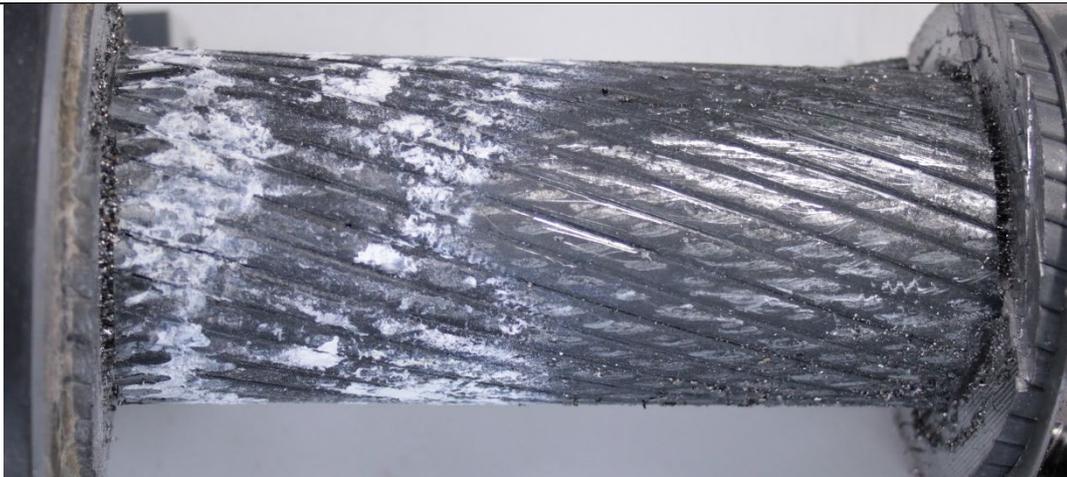
S1V



S2V



S3V



Hohlraum 3 (komplett freigelegt)

S1V



S2V



S3V



Hohlraum 4 (teilweise freigelegt)

S1V



S2V



S3V



Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2023

B 186: Integration der Handlungsanweisungen Spannungsrisskorrosion und Koppelfugen in die Nachrechnungsrichtlinie

Zilch, Kriechbaum, Maurer, Heinrich, Weiher, Runtemund

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 187: Verstärkung des Deckblechs orthotroper Fahrbahnplatten durch Aufkleben von Stahlblechen

Friedrich

€ 18,00

B 188: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Untersuchungsprogramm

Butz, Rill, Freundt, Böning, Werner, Fischer, Lau

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 189: Weiterentwicklung der Nachrechnungsrichtlinie – Validierung erweiterter Nachweisformate zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit bestehender Spannbetonbrücken

Fischer, Thoma, Hegger, Schmidt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 190: Potenziale von Monitoringdaten in einem Lebenszyklusmanagement für Brücken

Morgenthal, Rau, Hallermann, Schellenberg, Martín-Sanz, Schubert, Kübler

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 191: Building Information Modeling (BIM) im Tunnelbau

Thewes, Vollmann, Wahl, König, Stepien, Riepe, Weißbrod

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 192: Optimierung und Weiterentwicklung von Handlungshilfen zur Resilienzbewertung der Verkehrsinfrastruktur

Lindström, Zulauf, Rothenfluh, Bruns, Brunner, Roth, Caminada, Graf, Dahl

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 193: Konzepte für das Datenmanagement der Intelligenen Brücke

Empelmann, Javidmehr, Rathgen, Hellenbrand, Ulbricht, Wagner, Kessel, Sietas

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 194: Möglichkeiten und Grenzen der zukünftigen Anwendung von ZfP-Verfahren an Brücken- und Tunnelbauwerken

Taffe, Vonk

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 195: Zukunftssicherheit der Ermüdungslastmodelle nach DIN EN 1991-2

Geißler, Kraus, Freundt, Böning

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2024

B 196: Zukünftige Einwicklung eines Tools für ein indikatorengestütztes, verkehrsträgerübergreifendes Lebenszyklusmanagement von Infrastrukturbauwerken

Hajdin, Schiffmann, Blumenfeld, Tanasić

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 197: Erfahrungssammlung Monitoring für Brückenbauwerke – Dokumentation 2021

Novák, Stein, Farouk, Thomas, Reinhard, Zeller, Koster

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 198: Erprobung einer geothermischen Bergwassernutzung am Grenztunnel Füssen

Moormann, Kugler

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 199: Zuverlässigkeitsbasierte Bauwerksprüfung – Feinkonzept

Hajdin, Fastrich

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 200: Konzeption zur Bestimmung von Lage und Anzahl asbesthaltiger Abstandhalter in Betonbrücken – Handlungsanweisung für den Umgang mit asbesthaltigen Hilfsbauteilen in Brückenbauwerken aus Stahlbeton

Hönig, Bossemeyer, Sanio, Thome

€ 16,00

B 201: Blockhinterlegung und Verpressverfahren zur Abdichtung von Tunnelinnenschalen

Thiener, Kessler, Brummermann, Tintelnot, Matsini, Handke, Lis, Schmidt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 202: 10. BAST-Tunnelsymposium

€ 19,00

2025

B 203: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Querkraft- und Torsionstragfähigkeit von Betonbrücken im Bestand

Hegger, Domes, Adam, Fischer, Lamatsch, Thoma, Maurer, Lavrentyev, Stakalies, Kerkeni, Teworte, Sharei, Stettner, Zilch(+), Tecusan

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 204: Erarbeitung eines Prüfverfahrens zur Feststellung der inneren Standsicherheit von Gabionen aus punktgeschweißten Drahtgittern

Heimbecher, Lengers, Thünemann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 205: Einfluss des Pannenbuchtenabstands auf die Tunnelsicherheit

Mayer, Brennerberger, Haack, Zimmermann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 206: Erfahrungsbericht zur Innenbeschichtung nach TL-Blatt 50 an der Brücke über den Petersdorfer See

Rüters, Schröder, Windmann, Lebelt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 207: Entwicklung eines leistungsorientierten Prüfregimes für Brückenseilverfüllmittel

Hübscher

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG

Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen

Telefon (04 21) 3 69 03 - 0 · E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.

ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-95606-848-5
<https://doi.org/10.60850/bericht-b207>

www.bast.de