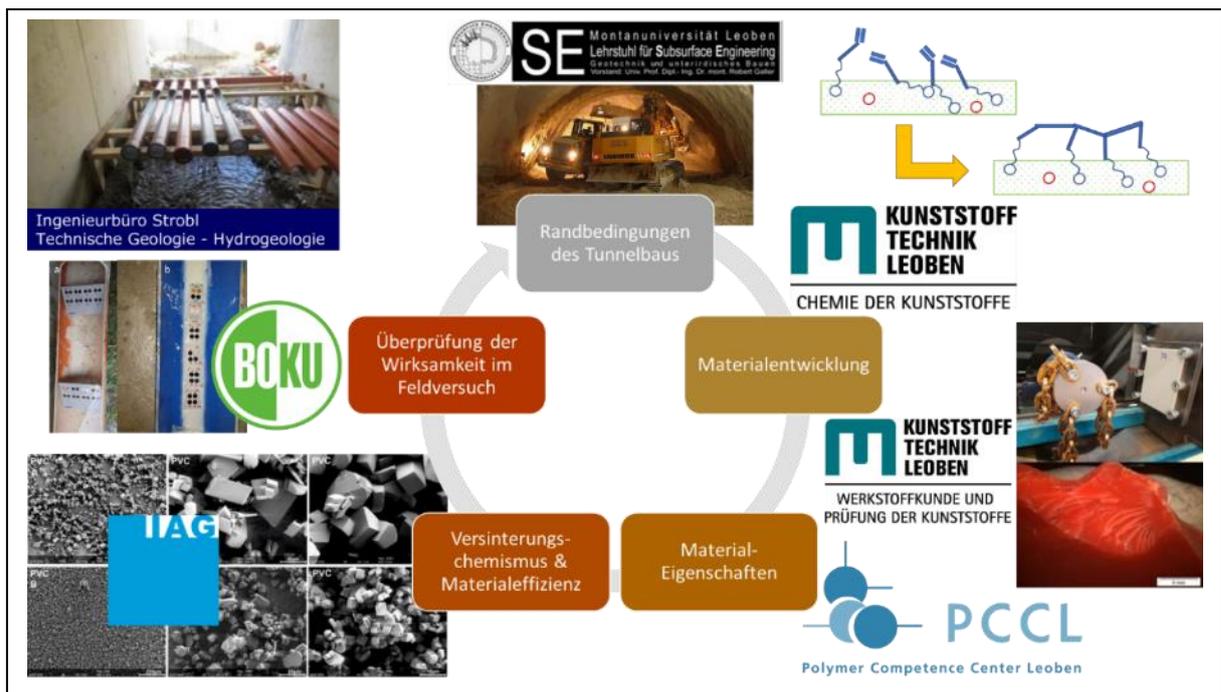


# Optimierte Polymer-Rohrwerkstoffe für effiziente Drainagesysteme in Tunnelbauwerken PolyDrain

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung 2016  
(VIF 2016)

November 2020



## Impressum:

### Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Klimaschutz  
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien  
Radetzkystraße 2  
1030 Wien

 Bundesministerium  
Klimaschutz, Umwelt,  
Energie, Mobilität,  
Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG  
Praterstern 3  
1020 Wien



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



### Für den Inhalt verantwortlich:

Montanuniversität Leoben  
Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe  
Otto-Glöckel-Str. 2  
8700 Leoben



[WWW.KUNSTSTOFFTECHNIK.AT](http://WWW.KUNSTSTOFFTECHNIK.AT)

### Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH  
Thematische Programme  
Sensengasse 1  
1090 Wien

 **FFG**  
Forschung wirkt.

# **Optimierte Polymer-Rohrwerkstoffe für effiziente Drainagesysteme in Tunnelbauwerken PolyDrain**

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung  
(VIF2016)

**AutorInnen:**

**DI Dr.mont. Florian ARBEITER**

**Ass.Prof. Dipl.-Chem. Dr.rer.nat. Gisbert RIESS**

**Univ.-Prof. Dr.mont. Dipl.-Ing. Robert GALLER**

**DI Robert WENIGHOFER**

**Univ.-Prof. Dipl.-Min. Dr.rer.nat.habil Martin DIETZEL**

**Stefanie EICHINGER, MSc.**

**Priv.-Doz. Mag.phil. Mag.rer.nat. Dr.rer.nat. Ronny BOCH**

**DDDI Dr.nat.techn. Michale STUR**

**DI Dr.mont. Andreas HAUSBERGER**

**Mag. Dr. Elmar STROBL**

**Auftraggeber:**

Bundesministerium für Klimaschutz

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

**Auftragnehmer:**

Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Prüfung der  
Kunststoffe, Lehrstuhl für Kunststoffchemie & Lehrstuhl für Subsurface Engineering

Technische Universität Graz, Institut für Angewandte Geowissenschaften

Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Angewandte Geologie (IAG)

Polymer Competence Center Leoben GmbH

Ingenieurbüro Strobl

# 1 INHALTSVERZEICHNIS

1	Inhaltsverzeichnis.....	5
2	Ausgangssituation & Zielsetzung .....	8
2.1	Versinterungen in Drainagerohren .....	8
2.2	Auswirkung der Versinterungen auf Drainagerohre und Tunnelbauwerke .....	9
2.3	Möglichkeiten zur Verringerung von Versinterung.....	11
2.3.1	Kontinuierliche Reinigung .....	11
2.3.2	Beeinflussung des Wasserchemismus .....	11
2.3.3	Alternative Methoden.....	12
2.4	Gewählter Ansatz - PolyDrain .....	12
3	Projektbeschreibung .....	14
3.1	Geplante Inhalte und Ziele .....	14
3.1.2	Methode und wissenschaftlicher Lösungsansatz.....	15
3.2	Projekt-Konsortium.....	18
3.2.1	Montanuniversität Leoben .....	18
3.2.2	Technische Universität Graz.....	20
3.2.3	Universität für Bodenkultur Wien, .....	20
3.2.4	Polymer Competence Center Leoben GmbH .....	21
3.2.5	Ingenieurbüro Strobl .....	21
3.3	Interaktion der beteiligten Institutionen.....	22
4	Durchgeführte Arbeiten .....	23
4.1	Arbeitspaket 1 – Projektverwaltung.....	23
4.1.1	Publikationen .....	23
4.2	Arbeitspaket 2 – Bestandsaufnahme.....	26
4.2.1	Arbeitspaket 2a – Beurteilung kommerzieller Werkstoffe .....	26
4.2.2	Arbeitspaket 2b – Erhebung problematischer Bauwerke .....	31
1.1.1	Umfahrungstunnel Grünburg .....	42
1.1.2	Tunnel Reinertshof .....	50
4.2.3	Arbeitspaket 2c – Versinterungsstudie Halbschalen.....	58
4.3	Arbeitspaket 3 – Methodenentwicklung.....	60
4.3.1	Arbeitspaket 3a – Entwicklung Verschleißprüfstand.....	60
4.3.2	Arbeitspaket 3b – Entwicklung Versinterungsprüfstand.....	62
4.3.3	Arbeitspaket 3c – Entwicklung Drainage-Schlitz Prüfstand .....	65
4.4	Arbeitspaket 4 – Materialentwicklung & Validierung.....	69
4.4.1	Arbeitspaket 4a – Entwicklung Kunststoffe.....	69

4.4.2	Arbeitspaket 4b – Verschleißwiderstand.....	70
4.4.3	Arbeitspaket 4c – Versinterungsneigung .....	72
4.5	Arbeitspaket 5 – Alterungsbeständigkeit .....	90
4.6	Arbeitspaket 6 – Demonstrator-Konzept .....	94
4.6.1	Herstellung .....	94
4.6.2	Aufstellungsort.....	94
5	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	97
5.1	Status Quo und Bauwerkserhebung .....	97
5.2	Ergebnisse der durchgeführten Versinterungsstudien.....	98
5.2.1	Dynamische Versuche.....	98
5.2.2	Stationäre Versuche .....	100
5.2.3	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	101
6	Ausblick und weiterführende Arbeiten.....	103
6.1	Weiterführende Aktivitäten .....	103
6.1.1	„Up-scaling“ auf reale Rohre und Formteile.....	103
6.1.2	Validierungsversuche an realen Bauteilen.....	103
6.1.3	Anpassung der Richtlinie Tunnelentwässerung.....	103
6.1.4	Generell weiterführende Schritte und Tätigkeiten .....	104
7	Abbildungsverzeichnis.....	106
8	Tabellenverzeichnis .....	111
9	Anhänge.....	112
9.1	Publikationen.....	112
9.1.1	Geomechanics and Tunneling – Research on pipe materials for tunnel drainage by the ÖBB Task Force Drainage.....	112
9.1.2	Berg und Hüttenmännische Monatshefte – Optimierte Polymer-Rohrwerkstoffe für effiziente Drainagesysteme in Tunnelbauwerken - PolyDrain 113	
9.1.3	Berg und Hüttenmännische Monatshefte – Optimierte Polymer-Rohrwerkstoffe für effiziente Drainagesysteme in Tunnelbauwerken – PolyDrain Part II 114	
9.1.4	MinPET 2019 – Affecting Carbonate Scaling by Tailored Drainage Materials – An Experimental Approach .....	115
10	Literaturverzeichnis .....	116

Formale Vorgaben:

<b>Einrichtung der Seite</b>	<b>Abstand in cm</b>
Oben:	3,5
Unten:	3
Links:	3
Rechts:	2,5

<b>Formatvorlage</b>	<b>Schriftart</b>	<b>Schriftgröße</b>
Überschriften von Verzeichnissen	Arial, fett, Großbuchstaben	13pt
Fußnotenzeichen	Arial, hochgestellt	10pt
Fußnotentext	Arial	10pt
Untertitel von Tabellen und Abbildungen	Arial, fett	10pt
Quelle von Tabellen und Abbildungen	Arial	8pt
Seitennummerierung	Arial, zentriert, Seitenende	10pt

## 2 AUSGANGSSITUATION & ZIELSETZUNG

### 2.1 Versinterungen in Drainagerohren

Drainagerohre dienen in druckentlasteten Tunnelbauwerken der permanenten konzentrierten Ableitung des anfallenden Bergwassers. Dadurch wird sichergestellt, dass die Tunnelschalen keiner Wasserdruckbelastung ausgesetzt werden, womit Drainagerohre ein wesentliches Element zur Sicherstellung der Betriebssicherheit darstellen. Üblicherweise wird anfallendes Bergwasser zwischen der Innen- und Außenschale eines Tunnels bis zu den seitlichen Fußpunkten abgeleitet und fließt dort über eine Filterschicht in die Drainageleitungen (Abbildung 1a). Grundsätzlich dient das Entwässerungssystem zur Ableitung der Bergwässer sowohl im Tunnelquerschnitt als auch in Tunnellängsrichtung und besteht daher neben den Ulmendrainagen aus Rohrleitungen für Quersammler und Bergwassersammelleitungen sowie den zugehörigen Kontroll- und Putzschächten, welche für Instandhaltungsmaßnahmen entsprechend gut zugänglich sein müssen.

Durch chemisch-physikalische Prozesse kommt es in Drainagen zu Ausfällungen, die erhebliche und sehr kostenintensive Probleme in der Instandhaltung und der Gebrauchstauglichkeit verursachen können (Abbildung 1b). Versinterungen haben ihren Ursprung in komplexen Gesamtsystemen und etwaige Ursachenbehebungen stellen vielschichtige Herausforderungen dar (z.B. [1,2]). Zum einen hat die Zusammensetzung der Gesteine im Aquifer Auswirkungen auf den Grundwasserchemismus. Zusätzlich beeinflusst die Geohydraulik den Weg des Wassers im Untergrund und damit die Kontaktzeit zum Gestein im Aquifer. Je länger diese Kontaktzeit, desto größer ist der Einfluss auf den Wasserchemismus. Im Beton und Zement finden sich etliche Zementphasen, die das Porenwasser und dessen Chemismus prägen. Intensiver Kontakt von Wasser mit zementösen Materialien verändert die Eigenschaften des Wassers wesentlich und kann dadurch zu einem erhöhten Versinterungspotential in den Tunnel drainagen führen. Neben der Geohydraulik spielen in den Drainagen auch die Mischwasserbildungen und Strömungseigenschaften eine wichtige Rolle. Turbulenzen, Mischwässer, laminare und turbulente Strömung beeinflussen die Versinterungseigenschaften des Drainagewassers. Diese Faktoren verändern den CO<sub>2</sub>-Gehalt, den pH-Wert und die Temperatur, was zu verstärkter Sinterbildung führen kann. Um Versinterungen möglichst hintanhalten zu können, sollen Drainagerohre mit einem Gefälle >0,5% und möglichst geradlinig, soweit möglich, ohne Richtungsänderungen verlegt werden. Unvermeidliche Verziehnungen in der Lage der Drainagen sind im Regelfall mit 15°, in Ausnahmefällen max. 30°, mit Formstücken zu je 15° herzustellen. Die Versinterungsneigung kann durch gleichmäßigen, hindernisfreien, möglichst schnellen und absturz- bzw.

aufstaufreien Abfluss mit guter Rohrführung physikalisch minimal gehalten werden. Um dies zu erreichen, sollte das Entwässerungssystem mit gut ausgeformten Fließwegen des Drainagewassers unter möglichstem Verzicht auf Achssprünge und Querausleitungen konzeptioniert werden. Die Ableitung sollte mit zügiger Strömung, ohne Fallstrecken oder Verwirbelungen in möglichst gut gefüllten Rohren mit durchgängig gleichgerichtetem Gefälle erfolgen.

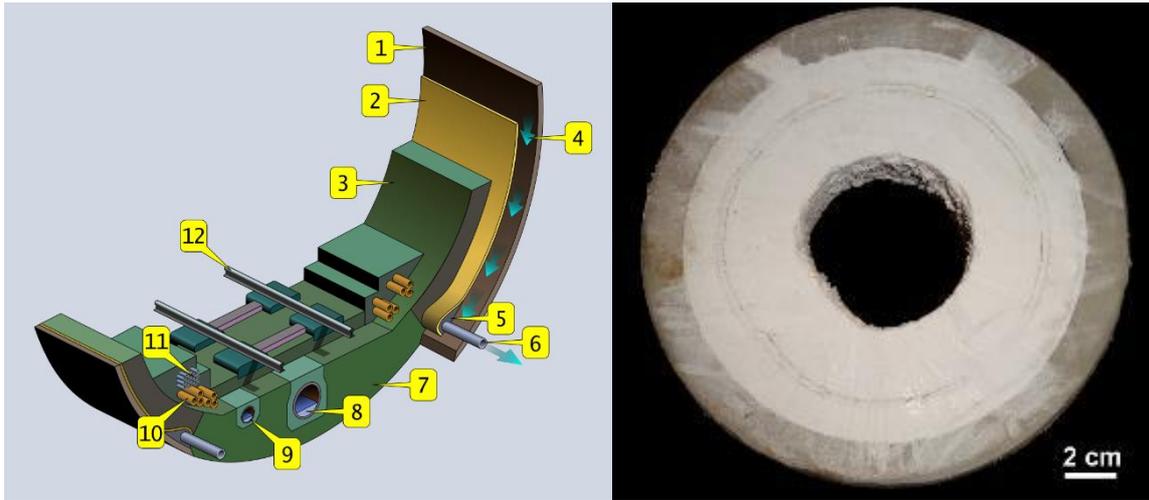


Abbildung 1: (a) Ausbildung des Drainage-Systems des Gotthard Basistunnel [3] (b) Versinterung eines Kunststoffrohres innerhalb weniger Monate

Die angeführte Mischwasserbildung erschwert in den meisten Tunnelbauwerken das Verständnis des Gesamtsystems, da die Eigenschaften eines Mischwassers vielfältiger als die Summe der Eigenschaften der Ursprungswässer sein können. Die Versinterungen selbst können sehr komplex aufgebaut sein. Calcit (Calciumcarbonat) ist zumeist die Hauptkomponente und kommt in einer großen Vielfalt an Erscheinungsformen vor. Hinzu kommt noch das Vorhandensein weiterer Minerale wie z.B. Aragonit ( $\text{CaCO}_3$  Modifikation), Brucit ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ), Goethit ( $\text{FeOOH}$ ) oder vielfältige Silikate in Versinterungen, wodurch zur chemischen auch noch eine mineralogische Variabilität kommt. Um trotz ausfallender Versinterungen die Funktionstüchtigkeit von Drainageleitungen aufrecht zu erhalten, ist es unerlässlich Reinigungs- und Instandhaltungsmaßnahmen zu treffen.

## 2.2 Auswirkung der Versinterungen auf Drainagerohre und Tunnelbauwerke

Gemäß der Richtlinie „Tunnelentwässerung“ der Österreichischen Vereinigung für Beton- und Bautechnik [4] gibt es prinzipiell mehrere Arten von Maßnahmen zur Reduktion von Versinterungen, bzw. um diese zu entfernen. Bei **hydraulischen Reinigungsverfahren** werden Wassermengen im Bereich von 300 l/min bis 400 l/min mit Drücken von 120 bar bis

zu max. 150 bar durch Spüldüsen gepresst, was ein Ablösen und Ausschwemmen der Versinterungen bewirkt. Natürlich ist diesem Verfahren eine Grenze im Bereich der Härte und Menge der Versinterungen gesetzt. Die Reinigungswirkung erfolgt ausschließlich durch Wasserstrahlen, welche durch verschiedene Bauarten der Spüldüsen unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Eine große Liste an Bauarten verschiedener Düsen und dazu verschiedener Düsen-einsätze (welche die Eigenschaft des Wasserstrahles noch zusätzlich verändern) ist im Bereich der Rohr- und Kanalreinigung zu finden [4]. Zusätzlich zur hydraulisch wirksamen Komponente kommt bei **hydromechanischen Reinigungsverfahren** noch die mechanische hinzu. Entweder durch Vibrationen oder durch Gleiten werden Versinterungen mit hoher bis sehr hoher Festigkeit entfernt, wobei auch hier mit unterschiedlichen Drücken, Düsenwinkeln und Pumpleistungen gearbeitet wird. Um sehr harte Versinterungen und auch ausgehärteten Zementleim aus den Drainageleitungen zu entfernen, werden **mechanische Reinigungsverfahren** angewendet. Bei diesen Verfahren wirken hohe Kräfte auf die Innenwandung der Drainagerohre, welche immer wieder zu Schäden führen. Dennoch sind abschnittsweise solche hohen Kräfte notwendig, um die Rohre von Versinterungen zu befreien. Verschiedene Bauarten und Varianten sind derzeit auf dem Markt in Verwendung (z.B: Kettenschleudern, Seilschleudern, Fräsen bzw. Schlagbohrfräsen).

Da es bis 2003 keine einheitlichen Anforderungen an das Rohrmaterial von Bauwerksdrainagen gab [5], wurden im überwiegenden Fall dünnwandige Rohre aus uPVC („Hart-PVC“) verwendet. Ab 2003 wurden Anforderungen in einer Richtlinie zur „Ausbildung von Tunnelentwässerungen“ geregelt [5], die 2010 fortgeschrieben wurde [4]. Gemäß dieser Richtlinie ist der Einsatz von Drainagerohren aus den Materialien uPVC, PE-HD und PP möglich, sofern diese die angeführten normativen Anforderungen erfüllen. Zusätzlich müssen die Drainagerohre noch Prüfungen bezüglich der Hochdruckreinigungsbeständigkeit und der Widerstandsfähigkeit gegenüber einer Kettenschleuderspülung unterzogen werden. Damit gibt es prinzipiell zwei große Gruppen an derzeit verbauten Rohren. Jene die vor und jene die nach Erscheinen Richtlinie verbaut wurden [6].

Bei der Instandhaltung von in der Vergangenheit eingebauten uPVC-Rohren kann es durch intensive oder mangelhafte Reinigungsarbeiten immer wieder zu Rohrbrüchen und herausgeschlagenen, Handflächen-großen Stücken kommen, die zum einen die aktuelle Instandhaltungstätigkeit erschweren und zum anderen in Zukunft umfangreiche Instandsetzungsmaßnahmen bedingen werden.



**Abbildung 2: Ausgeschlagene Teilstücke der Drainagerohre im Tunnel Sieberg [6]**

Aufgrund dieser Erfahrungen mit uPVC-Rohren wurden beim Bau neuerer ÖBB-Tunnels seit 2013 Drainagerohre aus PP und PE-HD – anstelle der bedeutend günstigeren PVC-Rohre - eingesetzt.

## **2.3 Möglichkeiten zur Verringerung von Versinterung**

Die vorangehend beschriebenen Versinterungen führen zu massivem Mehraufwand für die Betreiber der Tunnelbauwerke. Dieser Aufwand ist einerseits durch hohe Reinigungskosten, bzw. im Fall von beschädigten Drainagen durch sehr hohe Kosten für die Sanierung bedingt. Daher wird intensiv nach Möglichkeiten zur Verringerung von Versinterungen in Tunnel drainagen gesucht.

### **2.3.1 Kontinuierliche Reinigung**

Abgesehen von baulichen Maßnahmen in der Planungsphase [7], ist eine Möglichkeit zur Verhinderung von Ablagerungen ist natürlich die Durchführung kontinuierlicher Reinigungsarbeiten. Da die meisten Tunnelbauwerke jedoch nicht, bzw. nur eingeschränkt, bei gleichzeitigem Betrieb gereinigt werden können, ziehen diese Reinigungsarbeiten hohe Kosten aufgrund von Tunnelsperren mit sich. Zusätzlich kann es wie ebenfalls bereits erwähnt durch zu häufige Reinigung vor allem bei dünnwandigen und älteren Drainagerohren zu Schäden kommen [6]. Daher wird wie bereits erwähnt nach Alternativen gesucht.

### **2.3.2 Beeinflussung des Wasserchemismus**

Eine Möglichkeit zur Verringerung von Versinterungen in Drainagerohren stellt der Eingriff in den Wasserchemismus dar. Mit Hilfe sogenannter Härtestabilisatoren, die kontrolliert in das Bergwasser zudosiert werden, kann verhindert werden, dass sich massive Ablagerungen bilden. Diese Art der Verminderung von Versinterungen wird bereits breitflächig eingesetzt und kann gute Ergebnisse erzielen. Ein Nachteil dieser Methode ist jedoch, dass die Mittel regelmäßig überprüft und nachgefüllt werden müssen. Zusätzlich ist darauf zu achten, dass die Dosierungsanlagen vor eventuell trotzdem stattfindenden Reinigungsprozessen sicher entfernt werden, damit diese nicht beschädigt werden.

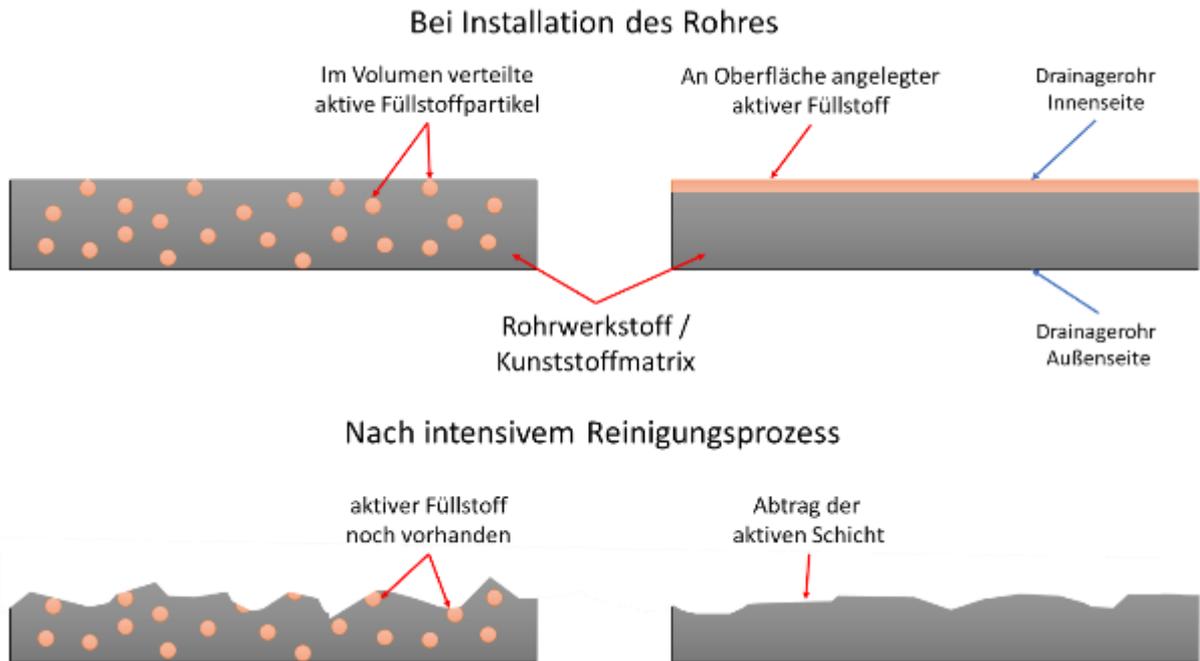
### **2.3.3 Alternative Methoden**

Eine alternative Möglichkeit zur Beeinflussung des Wasserchemismus, wäre die Einbringung aktiv wirkende Stoffe, die jedoch nicht in das Wasser zudosiert werden müssen, sondern bereits direkt im Material der Drainagerohre selbst verbaut sind. Vorhandene Studien in der Literatur lassen darauf schließen, dass dieser Ansatz ebenfalls erfolgreich sein könnte [8–10]. Daher wurde dieser Ansatz im gegenwärtigen Projekt „PolyDrain“ verfolgt.

## **2.4 Gewählter Ansatz - PolyDrain**

Kunststoffrohre können durch den Einsatz verschiedener Stoffe additiviert, bzw. modifiziert werden. Je nach Art des eingesetzten Stoffes, können so Eigenschaften gezielt beeinflusst werden. Ein klassischer Anwendungsfall in Kunststoffen ist dabei der Einsatz von mineralischen Füllstoffen wie Kreide, Kaolin, oder der Einsatz von Fasern zu Steigerung der mechanischen Eigenschaften. Durch den Einsatz chemisch, oder physikalisch aktiver Wirkstoffe, können jedoch auch andere Eigenschaften, wie Oberflächenpolarität, thermische, oder elektrische Leitfähigkeit beeinflusst werden. Im gegenständlichen Projekt war es das Ziel einen Wirkstoff zu finden, der gezielt das Potential zur Ablagerung von Versinterungen an der Rohroberfläche reduziert.

In Hinsicht auf die Verteilung des Füllstoffes in einer Rohrwand kann zwischen im Volumen verteilten und an der Oberfläche abgelagerten Füllstoffen unterschieden werden. Wie in Abbildung 3 gezeigt, haben beide Arten Vor- und Nachteile. Bei der Anreicherung des Wirkstoffes an der Oberfläche können mehr aktive Teile die Versinterung beeinflussen, als wenn der Wirkstoff im gesamten Volumen der Rohrwand verteilt ist. Sollte es jedoch im späteren Einsatz trotzdem zu Reinigungsvorgängen im Drainagerohr kommen, könnte es sein, dass die Wirkstoffe ausgespült, bzw. abgetragen werden und nicht mehr wirksam sind. Im Gegensatz dazu, stellen im Volumen verteilte Wirkstoffe eine sicherere Variante dar, die jedoch aufgrund der geringeren Konzentration an der Rohroberfläche vermutlich weniger wirksam sind. Zum Vergleich beider Methoden, wurden im gegenständlichen Projekt Wirkstoffe beider Gruppen untersucht.



**Abbildung 3: Darstellung der unterschiedlichen Möglichkeiten (Füllstoffe im Volumen, oder an der Oberfläche) zur Modifizierung von Kunststoffen in Drainagerohren [11]**

### **3 PROJEKTBE SCHREIBUNG**

#### **3.1 Geplante Inhalte und Ziele**

Um Kunststoffe hinsichtlich ihres Potentials für den Einsatz in Drainagerohren exakt zu untersuchen, bedarf es der Entwicklung spezieller Methoden. Die Eigenschaft der Grenzfläche zwischen dem wässrigen Medium und dem Feststoffmaterial, an welcher Kristalle gebildet oder auf- oder weiterwachsen bzw. suspendierte Partikel aus der Lösung sedimentiert werden oder anhaften können, stellt einen wesentlichen Parameter für die Entwicklung einer Rohr-Inkrustierung dar. Diese Aspekte sind zwar grundsätzlich zumeist gut bekannt, werden aber bei der vorliegenden Thematik von Drainagerohren bisher nur unzureichend berücksichtigt. Hierzu werden in diesem Projekt Versuche sowohl direkt in Tunnel drainagen durchgeführt als auch ein Prüfstand im Labormaßstab entwickelt, in welchem unter gut definierten Bedingungen die Faktoren zur Versinterungsbildung an unterschiedlichen Kunststoffoberflächen systematisch untersucht werden können.

Dazu werden neu entwickelte Kunststoffe, bzw. -Compounds, in Halbschalen ausgelagert. Diese Schalen werden zur Simulation eines Gerinne-Vorgangs in einer Drainageleitung verwendet. Durch kontrolliertes Einbringen ausgewählter Lösungen, der Kontrolle der aufwachsenden Versinterungen und der Untersuchung der wieder ausfließenden Restbestandteile, sowie der Untersuchung der Kunststoffoberfläche von Proben selbst, können so einzelne Prozesse der Interaktion aufgeschlüsselt werden, was aufgrund der Komplexität im realen Tunnelbauwerk nur schwer möglich ist. Somit können erstmals Versinterungsvorgänge mit Rücksichtnahme auf den eingesetzten Polymerwerkstoffe genau analysiert werden. In den Versuchen werden moderne analytische Verfahren zur Charakterisierung der Lösungszusammensetzung (z.B. IC, ICP-OES/MS) und der Festphasen (z.B. optische und Elektronen Mikroskopie, Mikrosonde, Röntgendiffraktometrie), insbesondere deren Oberflächen, sowie geochemische und hydrochemische Modellierungstools (z.B. PHREEQC) eingesetzt.

Da wie bereits mehrfach erwähnt nicht nur die Versinterungsneigung an sich, sondern auch die Widerstandsfähigkeit gegenüber Reinigungsprozessen ein wichtiges Kriterium darstellt, soll hier ebenfalls eine Methode entwickelt werden, um diese basierend auf aussagekräftigen Unterscheidungsmerkmalen untersuchen zu können. Die bisherigen Vorgaben der Richtlinie zur Tunnelentwässerung sehen in Bezug auf diesen Punkt (RL Kapitel 8.7 [5]) bisher nur eine qualitative Sichtkontrolle der Rohrrinnenwandoberfläche nach 50 simulierten Reinigungs-Zyklen, bzw. einer kontinuierlichen Belastung für 2 Minuten vor. Dadurch ist jedoch nur möglich festzustellen, ob ein Material diese Anforderung erfüllt oder nicht. Eine quantitative Aussage bezüglich der Widerstandsfähigkeit der Materialien ist jedoch nicht möglich. Um die Widerstandsfähigkeit gegenüber den Reinigungsverfahren zu bestimmen, sollen sowohl kommerziell erhältliche als auch die entwickelten Kunststoffproben mittels „Impact-Wear“ Versuchen untersucht werden. Zur qualitativen und quantitativen Untersuchung der geschädigten Oberflächen können hier optische Analyseverfahren (Lichtmikroskopie,

Konfokal-Mikroskopie) eingesetzt werden. Durch die Entwicklung dieser zwei Prüfstände bzw. Methoden ist es nicht nur möglich, die allgemeine Versinterungsneigung von Kunststoffproben, sondern auch den Einfluss zusätzlich gezielt eingebrachter Vorschädigungen zu untersuchen. Somit ist es möglich nicht nur die Kunststoffe in ihrem Ausgangszustand zu beurteilen, sondern auch in Hinblick auf ihre Belastungs(=Reinigungs)vorgeschichte und deren Einfluss auf Versinterungen zu bewerten.

### **3.1.1.1 Entwicklung von Kunststoffen mit optimierten Eigenschaften in Hinblick auf Verschleiß und Versinterungsneigung**

Konkret können zur Optimierung der Eigenschaften zwei potentielle Wege verfolgt werden. Zum einen können Kunststoffe durch Zu-Compoundieren (mischen in der Schmelze) gezielte Eigenschaftsprofile erreichen. Eine Zugabe mineralischer Füllstoffe kann zum Beispiel zu einer enormen Steigerung der Steifigkeit [12] und des Langzeitkriechmoduls führen. Andere Füllstoffe können zu einer besseren Eigenschmierung in Lageranwendungen [13,14] führen, oder flammhemmende Eigenschaften [15] verbessern. Da bereits, wie in 2.3.3 erwähnt, erste Erfolge zur Verminderung von Calcit-Bildung durch das Zumischen von Additiven in Polymere erreicht wurden, soll in diesem Projekt untersucht werden, ob Verstärkungstoffe gefunden werden können, die die generelle Anhaftung von Versinterungen reduzieren, verlangsamen oder gar verhindern können.

### **3.1.2 Methode und wissenschaftlicher Lösungsansatz**

Zur Bearbeitung der oben beschriebenen Vorhaben ist es von äußerster Wichtigkeit einen interdisziplinären Lösungsansatz zu finden. Da es um die Bearbeitung von Fragestellungen aus tunnelbaulicher-, geologischer-, wasserchemischer-, polymer chemischer-, polymer physikalischer und tribologischer Sicht geht, wurde daher ein Konsortium aus mehreren spezialisierten Einrichtungen zusammengestellt. Um trotz der Anzahl der beteiligten Institutionen eine reibungslose Abarbeitung der Themenstellungen zu garantieren, wird mit Hilfe von modernen Methoden des Informations- und Verwaltungsmanagements (**AP1**) eine klare Struktur zur Abarbeitung der einzelnen Arbeitspunkte, bzw. –pakete vorgegeben.

Zu Beginn des Projektes werden die Vorerfahrungen und Projekte der beteiligten Partner bezüglich Relevanz für das gegenständliche Vorhaben evaluiert und zusammengetragen. Aufgrund der hohen Interdisziplinarität des angestrebten Projektes ist es wichtig, die einzelnen Fachbereiche und Spezialisierungen der Partner zu verknüpfen. Dazu werden gesammelte Erfahrungen, Literaturkenntnisse und Vorstudien zu fachlich relevanten Themen in gemeinsamen Work-Shops diskutiert und aus den unterschiedlichen fachlichen Blickpunkten hinsichtlich Relevanz des gegenständlichen Vorhabens beurteilt. Diese interdisziplinäre Beurteilung ist von größter Wichtigkeit, um systematische Fehler aufgrund fehlenden Spezialwissens bei der Durchführung der Arbeiten zu vermeiden (**AP2**).

Der nächste Schritt im Projekt ist die Beurteilung kommerziell verfügbarer und bereits eingesetzter Kunststoffe für Drainage-Rohre in Tunnelbauwerken. Dazu wird basierend auf bereits durchgeführten Untersuchungen und Vorerfahrungen zu der gegenwärtigen

Fragestellung eine Vorauswahl von später zu untersuchenden Polymer-Grundtypen durchgeführt. Parameter für die Vorauswahl sind dabei vor allem an Kennwerte wie minimal notwendige Schlagzähigkeit (Kettenschleuder-Reinigung), erreichbare Ringsteifigkeit, Oberflächenrauigkeit, etc. angelehnt. Dies dient ebenfalls der Reduktion der später zu untersuchenden Proben, um den Projektrahmen einhalten zu können (**AP2a**).

Gleichzeitig wird durch die Experten des Lehrstuhls für Subsurface Engineering eine Erhebung kritischer Bauwerke in Hinblick auf die Versinterungsneigung der Drainagerohre, inklusive Lokalaugenschein, durchgeführt (**AP2b**). Diese Erhebung, in deren Rahmen auch geplant ist, die Bauunterlagen dieser Tunnel zusammenzutragen, dient neben der Lokalisierung kritischer Bauwerke auch dazu, um festzustellen, ob neben den vorliegenden wasserchemischen Begebenheiten auch bauliche Parameter zur Versinterungsproblematik maßgeblich beitragen können. Um die Materialeinschränkungen, die in **AP2a** auf Basis klassischer Materialkennwerte getroffen werden, auch real-getreu zu untermauern, werden in kritischen Bauwerken, definiert gemäß **AP2b** bzw. Vorwissen, parallel kommerzielle Kunststoffe in Form von Halbschalen in, bzw. nahe Drainage-Leitungen installiert und in regelmäßigen Abständen hinsichtlich aufwachsender Versinterungen untersucht (**AP2c**).

Zeitgleich werden Methoden zur Charakterisierung und vor Allem wissenschaftlich fundierten Quantifizierung der zwei wichtigsten Kenngrößen für Kunststoffmaterialien in Drainagerohranwendungen entwickelt (**AP3**). Dabei handelt es sich in erster Linie um die Charakterisierung der Widerstandsfähigkeit gegenüber Reinigungsvorgängen (**AP3a**), und der generellen Versinterungsneigung (**AP3b**) der Materialien. Diese Methodenentwicklung ist unerlässlich, um Aussagen treffen zu können, ob neu entwickelte Materialien im Gegensatz zu kommerziell bereits verfügbaren Materialien eine Besserung in einer, oder idealerweise beider Eigenschaften zeigen.

Die mechanische Schädigung der Kunststoffrohrmaterialien durch Reinigungsprozesse in Drainagerohren kann prinzipiell als eine Mischung aus Schlagbelastung und Abrieb des Materials gesehen werden. Teilweise findet sich diese Mischung aus Belastungsvorgängen in der Literatur unter dem Begriff „Impact Wear“ und ist z.B. von Schmiedehämmern bekannt. Da diese Art der Belastung für Kunststoffe jedoch noch relativ unerforscht ist, muss hier vor einer Beurteilung der Kunststoffmaterialien, eine fundierte Methode entwickelt werden (**AP3a**), die auch das Versagensverhalten im realen Fall nachstellt.

Die Versinterung von Drainagerohren umfasst komplexe Reaktionsmechanismen und ist von vielen Faktoren abhängig. In experimentellen Untersuchungen soll im Labormaßstab der Einfluss der steuernden Parameter, wie pH und Übersättigungsgrad an Karbonatmineralen (im Folgenden beispielhaft für Calcit), auf die Versinterungsneigung unterschiedlicher Rohrmaterialien (Kunststoffauswahl in **AP2**) unter gut definierten Randbedingungen untersucht werden. Das experimentelle Setup basiert auf einer Durchströmungsapparatur, die mit einer Versuchslösung konstanter (physiko)chemischer Zusammensetzung (Sättigungsindex an Calcit; pH; Temperatur) gespeist wird. Letztere wird fortlaufend über die

Mischung von zwei Stammlösungen (I:  $\text{NaHCO}_3/\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{CO}_3$ ; II:  $\text{CaCl}_2$  dotiert mit  $\text{SrCl}_2$ ) generiert, welche kurz vor der Einleitung der Versuchslösung über Kunststoffproben mit konstantem Volumenverhältnis gemischt werden. Die kontrollierte Einleitung der Lösungen erfolgt über gekoppelte Schlauchpumpen, sodass Parallelexperimente bei gleichen Bedingungen durchgeführt werden können (**AP3.b**). Die pH Werte der eingespeisten Versuchslösungen liegen zwischen 8 und 12 und werden über die Zusammensetzung der Stammlösungen I und II sowie über die Volumenmischungen eingestellt. Diesbezügliche Vorgaben sind über hydrochemische Modellrechnungen mittels des Computercodes PHREEQC zu ermitteln. Die initialen Versuchslösungen und die finalen Lösungen am Ende der Versuchsstrecke werden als Funktion der Reaktionszeit in Menge und Konzentrationen an Lösungsinhaltstoffen erfasst bzw. gemessen, um entsprechende Kenngrößen im Kalk-Kohlensäure System und chemische Bilanzierungen der abgeschiedenen Festphasen zu ermitteln. Die Proben werden nach Abschluss der Versuche in Hinblick auf anhaftende Festphasen mineralogisch, chemisch und elektronenoptisch untersucht. Ziel ist es, die Effekte der eingesetzten unterschiedlichen Kunststoff-Materialien auf die Abscheidungskinetik und den Fällungsmechanismus bezüglich der Interaktion Kunststoff-Lösungen zu dechiffrieren. Als Meilenstein werden die Ergebnisse in spezifischen Kategorien für Kunststoffe mit Verzögerungsgrad der Calciumcarbonat-Abscheidung, Art der Anhaftung bzw. Grad der Ausspülung angegeben. In einer erweiterten Versuchsserie werden Calciumcarbonat Suspensionen (sogenannte slurries als initiale Versuchslösung eingesetzt; keine Mischung von Lösungen) in einem analogen Versuchsaufbau eingesetzt, um die Art der Anhaftung bzw. Grad der Ausspülung separat von der Abscheidung zu untersuchen und diese Effekte voneinander trennen zu können. Zusätzlich kann auch der Einfluss gemäß **AP2a** vorgeschädigter Oberflächen auf das Versinterungsverhalten unter kontrollierten Randbedingungen ermittelt werden. Anhand der in **AP3** entwickelten Methoden können in **AP4** generierte Kunststoffmaterialien (**AP4a**) hinsichtlich ihrer wichtigsten Eigenschaften für den Einsatz in Drainagerohren charakterisiert werden. Zur Herstellung verschiedener Kunststoffmaterialien wird die erwähnte Methode des Compoundierens zum Einsatz gebracht. Im Bereich des Compoundierens werden dabei Materialproben im Kleinmaßstab (ca. 150 g) mit Hilfe eines Kneters hergestellt. In diesem werden unterschiedliche Kunststoffe und Additive, bzw. aktive Füllstoffe knapp über der Schmelztemperatur vermischt. Anschließend werden mittels Plattenpressen (je nach Dicke mit oder ohne Tauchkantenwerkzeug) Platten hergestellt. Diese Platten können anschließend sowohl für die Charakterisierungen des „Impact wear“ Widerstands (**AP4.b**), als auch die Beurteilung der Versinterungsneigung (**AP4.c**) verwendet werden.

Neben der generellen Wirksamkeit der zugefügten Stoffe, stellt sich auch die Frage der Langzeiteigenschaften. Konkret soll untersucht werden, ob die beigemengten Stoffe auch mehrmalig verwendet werden können, bzw. Wirkung zeigen. (**AP5**). Ausgewählte Kunststoffe, die sich gemäß

Als abschließender Punkt des gegenständlichen Projekts ist es geplant, ein Konzept für einen Demonstrator zu entwickeln (**AP6**). Dabei liegt das Hauptaugenmerk vor allem auf der Untersuchung der prinzipiellen Möglichkeit, die entwickelten Materialien für den großindustriellen Einsatz „upscalen“ zu können. Dazu soll eine Studie zur Extrudierbarkeit, dem Verfahren zur Herstellung von Kunststoffrohren, der entwickelten Materialien durchgeführt werden. Dazu können Rohrstücke kleineren Durchmessers (ca. 50 mm) hergestellt werden. Sollte sich zeigen, dass im Laufe des Projekts vielversprechende Materialien entwickelt wurden und diese auch extrudierbar sind, wäre in einem weiteren Schritt nach Abschluss des Projekts in Zusammenarbeit mit industriellen Partnern die Herstellung größerer Rohre erstrebenswert. Derartige Rohre könnten anschließend in Tunnelbauwerken hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit untersucht werden. Eine Möglichkeit im forschungsnahen Umfeld wäre dabei eine Inbetriebnahme einer derartigen Drainageleitung im Zentrum am Berg (Erklärung ZaB in der Beschreibung der Partner).

## **3.2 Projekt-Konsortium**

Für die Bearbeitung der gegenwärtigen Fragestellung wurde ein interdisziplinäres Team, bestehend aus Materialwissenschaftlern, Chemikern, Geologen, Mineralogen, und Tunnelbauern zusammengestellt. Die teilnehmenden Partner und Institutionen sind nachfolgend gelistet.

### **3.2.1 Montanuniversität Leoben**

#### **3.2.1.1 Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe**

Der Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe beschäftigt sich bereits seit über 30 Jahren mit der Charakterisierung von polymeren Rohrwerkstoffen in Hinblick auf ihre Langzeit- und Versagenseigenschaften.

Univ.-Prof. Dr. Gerald Pinter beschäftigt sich seit Beginn seiner wissenschaftlichen Karriere mit der Beurteilung und Charakterisierung von polymeren Werkstoffen für den Einsatz in strukturell beanspruchten Bauteilen. Bisher wurden dabei mehr als 100 Artikel in einschlägigen Fachjournalen veröffentlicht.

Dr. Florian Arbeiter ist seit 2010 am MUL-WPK tätig und beschäftigt sich mit der bruchmechanischen Charakterisierung von Langzeiteigenschaften polymerer Werkstoffe. Die Anwendungsgebiete reichen dabei von Rohrwerkstoffen, additive Fertigung bis Kunststoffe in der Medizintechnik.

#### **3.2.1.2 Lehrstuhl für Chemie der Kunststoffe**

Der Lehrstuhl für Chemie der Kunststoffe (MUL-KC) befasst sich u.a. mit der Synthese, Funktionalisierung und Vernetzung von Polymeren, licht- und strahlungsinduzierten Reaktionen in Polymeren, Techniken zur Modifizierung von anorganischen oder organischen

Oberflächen, sowie mit der physikalisch-chemischen Charakterisierung von Polymeren im Allgemeinen.

Univ.-Prof. Dr. Wolfgang Kern ist seit 2007 an der Montanuniversität Leoben tätig, und leitet dort den Lehrstuhl für Chemie der Kunststoffe. Seit 2008 ist Prof. W. Kern auch wissenschaftlicher Leiter des PCCL (Polymer Competence Center Leoben GmbH). Die Hauptarbeitsgebiete von Prof. W. Kern sind Polymer-Chemie, Oberflächenfunktionalisierung von Kunststoffen, Chemie von reaktiven molekularen Beschichtungen auf anorganischen Oberflächen und strahlungsinduzierte Reaktionen – vorwiegend Photochemie.

Ass.-Prof. Dr. Gisbert Rieß ist seit 2001 an der Montanuniversität Leoben, Institut bzw. Lehrstuhl für Chemie der Kunststoffe (MUL-KC) als Assistenzprofessor tätig. Seine Forschungstätigkeit umfasst die Materialentwicklung von Polymercompounds, Polymeranalytik v.a. durch Spektroskopie, die Funktionalisierung von anorganischen Füllstoffen für die Kunststofftechnik und die Entwicklung von Barrierschichten. Seit 2009 ist er als Senior Researcher in die Aktivitäten der Polymer Competence Center Leoben GmbH (PCCL) eingebunden, derzeit ist er Projektleiter in mehreren Projekten.

### **3.2.1.3 Lehrstuhl für Subsurface Engineering**

Der Lehrstuhl für Subsurface Engineering forscht vorwiegend praxisbezogen auf dem Gebiet der Geotechnik und des unterirdischen Bauens. Themenfelder sind unter anderem Langzeitverhalten von unterirdischen Infrastrukturen, Stabilitätsanalysen und geologisch-hydrogeologisch-geotechnische Datenerfassungen, Materialverhalten von Geomaterialien sowie Beton und Spritzbeton, Monitoringsysteme, die Weiterentwicklung der Stützmittel und Gebirgsverbesserungsmaßnahmen im Hohlraumbau.

Univ.-Prof. Dr. Robert Galler ist Leiter des Lehrstuhls für Subsurface Engineering – Geotechnik und Untertagebau, sowie Departmentleiter des Untertage - Forschungs- Entwicklungs-, Trainings- und Ausbildungszentrum ZAB – Zentrum am Berg. Außerdem ist Prof. Galler Vorsitzender des internationalen Committee on Education and Training der International Tunneling Association (ITA-CET), wo auch Fragen der Tunnelentwässerung regelmäßig in internationalen Seminaren behandelt werden. Neben Prof. Galler werden ein Dissertant sowie studentische Mitarbeiter am Projekt beteiligt sein.

Durch ein von 2008 bis 2016 durchgeführtes Forschungsprojekt auf dem Gebiet der Langzeitstabilität von Tunnelbauwerken existiert Vorwissen im Bereich des Langzeitverhaltens von unterirdischen Infrastrukturen.

Da Prof. Galler vor seiner Berufung an die Montanuniversität Leoben Projektleiter von Tunnelbauwerken entlang der Hochgeschwindigkeitstrasse Köln-Rhein/Main, der

Unterinntaltrasse, des Semmering Basistunnels (in seiner alten Trassierung), des Brenner Basistunnels und auch kleinerer Projekte war, kann Prof. Galler auf Kenntnisse der Planung, Ausschreibung und Ausführung von Drainagesystemen verweisen.

### **3.2.2 Technische Universität Graz**

#### **3.2.2.1 Institut für Angewandte Geowissenschaften**

Die wissenschaftlichen Mitarbeiter zeichnen sich durch weitreichende Erfahrung in geochemischen und isotopengeochemischen Fragestellungen aus. Dies beinhaltet Themen aus Natur und Technik. Projekte sind somit sowohl über grundlagenorientierte als auch angewandte Aspekte (z.B. Scalings in Geothermieranlagen und Tunnel drainagen) geprägt. Spezieller Fokus liegt auf der Kristallisation von Mineralen und deren Verwitterungseigenschaften (z.B. Karbonate und Silikate) und Anwendung und Weiterentwicklung von sogenannten Proxies (Mikrostruktur-, Element- oder Isotopensignaturen). Die Forschungsleistungen sind aus dem Ausschnitt an Veröffentlichungen in den CVs in diesem Bereich nachzuvollziehen.

Im Rahmen der bisherigen Arbeiten wurden z.B. Vorgaben für die Reduzierung der Versinterung in Tunnelsystemen gegeben, die auf die kausalen Wechselwirkungen von Grundwässern mit natürlichen Gesteinen und Zementphasen (z.B. Patent: WO2009092353 A1; Publikationsliste unter: [www.egam.tugraz.at](http://www.egam.tugraz.at)) beziehen. Ferner sind umfangreiche Erfahrung auf dem Gebiet der Karbonatbildung in Höhlen, Karbonatgeochemie und Rekonstruktion von Paleobildungsumfeldern vorhanden.

### **3.2.3 Universität für Bodenkultur Wien,**

#### **3.2.3.1 Institut für Angewandte Geologie (IAG)**

Die Angewandte Geologie beschäftigt sich mit den praktischen Implikationen der erdwissenschaftlichen Forschung für Fragen der Nutzung, Gefährdung und Sicherung des Lebensraumes. Sie hat somit die Aufgabe, die Erkenntnisse, Methoden und Fortschritte der Geowissenschaften für eine interdisziplinäre Bearbeitung von Fragen bzw. Lösung von Problemen im Rahmen der komplexen Beziehungen zwischen der Geosphäre einerseits und der Tätigkeit des Menschen andererseits nutzbar zu machen. Die typischen Anwendungsfelder liegen in den Bereichen der - Geotechnik (Ingenieur-, Baugeologie), - Hydrologie (Hydrogeologie, Geohydrologie), - Umweltwissenschaften und -technik (Altlasten und Deponien, Global Change), - Naturgefahren (Massenbewegungen, Erdbeben, Vulkanismus), - Rohstoffe (Rohstoffgeologie und Prospektion), - Paläoklimatologie und Quartärgeologie (Climate Change).

DI DI DI Dr. Michael STUR hat mehrjährige Erfahrung mit der Thematik der Versinterungserscheinungen in Tunnel drainagen. Ergänzend dazu verfügt Herr Dr. STUR über mehrjährige Erfahrung aus der Privatwirtschaft zur Thematik der Hydrogeologie und Tunnelentwässerung.

Erfahrungen in der Beratung von Planern, ÖBA und PL bei Neubaustrecken, Instandsetzungsmaßnahmen von Tunnel drainagen bei erheblichen Versinterungen und weitreichende Probenahmeerfahrung kombiniert mit etlichen Analyseleistungen runden das Erfahrungsspektrum ab. Ergänzend liegt ein fundiertes Wissen zur Zementchemie und Geopolymeren vor, welches für die Versinterungsthematik relevant ist. Erfahrung mit Überwachungssystemen – sowohl „in situ offline“ als auch „in situ online“ im Zusammenhang mit hydrochemischen Parametern und Dokumentationsarbeiten zu Versinterungen vervollständigen das projektrelevante Know-how.

### **3.2.4 Polymer Competence Center Leoben GmbH**

Das PCCL ist eine führende außeruniversitäre Forschungseinrichtung auf dem Gebiet der Kunststoffe in Österreich mit Spezialisierungen auf dem Gebiet der Charakterisierung von mechanischen und tribologischen Eigenschaften sowie der Beurteilung von Langzeiteigenschaften polymerer Rohrwerkstoffe. Die für dieses Projekt notwendigen Kompetenzen werden wie folgt aufgeteilt:

Dr. Andreas Hausberger beschäftigt sich seit seiner Einstellung an der Polymer Competence Leoben GmbH (2006) speziell im Bereich der Werkstoffcharakterisierung und Weiterentwicklung von Prüfmethode n zur Beurteilung von Festkörper- und Oberflächeneigenschaften tribologisch beanspruchter Kunststoffe.

### **3.2.5 Ingenieurbüro Strobl**

Mag. Dr. Elmar Strobl: Projektleiter/-bearbeiter von geologischen, ingenieur geologischen und hydrogeologischen Projekten, u.a. Bearbeitung von hydrogeologischen Aspekten im Tunnelbau (CV im Anhang).

Die fachliche Kompetenz auf dem Gebiet der Geologie, Ingenieurgeologie, Hydrogeologie, Hydrologie, Hydrochemie und Geochemie ermöglicht die Funktion als Bindeglied zwischen überwiegend wissenschaftlich ausgerichteten Fachkollegen und den Anwendern auf der „Baustelle“ und gewährleistet so eine praxisorientierte Methoden- bzw. Anwendungsweiterentwicklungen.

Die Erfahrungen als „Feldgeologe“ aus zahlreichen Projekten vor allem hinsichtlich Messbarmachung von Wasservorkommen für die manuelle bzw. selbstregistrierende Datengewinnung können in das gegenständliche Projekt eingebracht werden.

### 3.3 Interaktion der beteiligten Institutionen

Durch die beteiligten Institutionen kann wie in Abbildung XYZ gezeigt ein geschlossener Kreislauf zwischen Anforderungen und Begebenheiten im Tunnelbau, Materialentwicklung und Prüfung hinsichtlich mechanischer Eigenschaften, der Beurteilung Charakterisierung von Versinterungsneigung, sowohl im Labor- sowie auch im Feldversuch abgebildet werden. Durch diesen interdisziplinären Ansatz ist es möglich das komplexe Thema des gegenständlichen Projekts von stark unterschiedlichen Blickrichtungen zu betrachten und zum Erfolg zu führen.



Abbildung 4: Darstellung der Interaktion aller beteiligter Projektpartner im Projekt PolyDrain

## 4 DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN

Nachfolgend werden die inhaltlich durchgeführten Arbeiten im Detail dargestellt. Die Darstellung der Ergebnisse orientiert sich dabei an der in Arbeitspaketen strukturierten Projektabwicklung.

### 4.1 Arbeitspaket 1 – Projektverwaltung

Arbeitspaket 1 wurde primär zur Verwaltung des Projektfortschritts, dem Abhalten von Meetings und der gemeinsamen Disseminationstätigkeit genutzt. Während die abgehaltenen Projektmeetings in Tabelle 1 aufgelistet sind, so wird für die entstandenen Publikationen und Disseminationstätigkeiten auf Kapitel 4.1.1 verwiesen.

**Tabelle 1: Abgehaltene Projektmeetings**

Nr.	Datum	Veranstaltungsort
1	15.09.2017	Leoben
2	28.11.2017	TU-Graz
3	15.04.2018	Zentrum am Berg
4	02.10.2018	Leoben
5	13.02.2019	TU-Graz
6	18.06.2019	Leoben
7	28.10.2019	Leoben
8	11.03.2020	Zentrum am Berg
9	22.06.2020	WebEx
10	09.09.2020	WebEx
11	23.11.2020	WebEx - Abschlussmeeting

#### 4.1.1 Publikationen

Im Rahmen des Projektes konnten einige Projektergebnisse bereits in Publikationen veröffentlicht werden. In der nachfolgenden Tabelle 2 sind die Publikationstätigkeiten in Hinsicht auf Art und Zeitpunkt dargestellt. Die Publikationen sind im Anhang (Kapitel 9) des Berichts ebenfalls abgebildet.

**Tabelle 2: Publikations- und Disseminationstätigkeiten**

Nr.	Typ	Veranstaltung / Journal	Titel	Datum	Status
1	Vortrag	ÖGG Kolloquium 2019	Forschung der ÖBB-Task Force Drainage zu Rohrmaterialien der Tunnelentwässerung	10.10.2019	abgehalten
2	Vortrag	PlasticPipesXX	Plastic pipes for water drainage in rail- and motorway tunnels – a major challenge	<del>09/2020</del> □ 09/2021	Verschieben auf Grund von Covid-19
3	Artikel	Geomechanik und Tunnelbau	Forschung der ÖBB-Task Force Drainage zu Rohrmaterialien der Tunnelentwässerung <a href="https://doi.org/10.1002/geot.201900022">https://doi.org/10.1002/geot.201900022</a>	10.10.2019	Veröffentlicht
4	Artikel	Berg- und Hüttenmännische Monatshefte	Optimierte Polymer-Rohrwerkstoffe für effiziente Drainagesysteme in Tunnelbauwerken – PolyDrain <a href="https://doi.org/10.1007/s00501-019-00918-6">https://doi.org/10.1007/s00501-019-00918-6</a>	12/2019	veröffentlicht
5	Artikel	Berg- und Hüttenmännische Monatshefte	Optimierte Polymer-Rohrwerkstoffe für effiziente Drainagesysteme in Tunnelbauwerken – PolyDrain Part 2 <a href="https://doi.org/10.1007/s00501-020-01045-3">https://doi.org/10.1007/s00501-020-01045-3</a>	12/2020	veröffentlicht
6	Poster	MinPET2019	Influencing carbonate scaling by tailored drainage materials in tunnels - an experimental approach	04.09.2019	veröffentlicht
7	Workshop	Versinterung 2020	Verschieben auf Juli 2021 auf Grund von Covid-19		

Zusätzlich zu den aufgelisteten Publikationen wurden auch akademische Arbeiten zur Gänze, bzw. zum Teil begleitend durchgeführt. Diese sind nachfolgend in Tabelle 3 gelistet.

**Tabelle 3: Akademische Arbeiten mit Bezug zu PolyDrain**

Nr.	Typ	Autor	Titel	Universität	Status
1	Bachelorarbeit	Karl Zeilhofer	Mobiler Datendecoder für Kraftsensoren	JKU-Linz	Laufend
2	Masterarbeit	Felix Sturmbauer	SPÜLVERFAHREN IN TUNNELENTWÄSSERUNGSSYSTEMEN Evaluierung gängiger Spülverfahren hinsichtlich der Spülkräfte auf das Drainagerohr und der Ermittlung von Schadensbildern	BOKU-Wien	Laufend
3	Dissertation	Stefanie Eichinger	“Carbonate formation in aquatic systems – monitoring, reaction mechanisms and kinetics”	TU-Graz	Laufend
4	Bachelorarbeit	Lukas Riepler	Bauwerke als Ursache für Versinterungen	MUL	abgeschlossen
5	Masterarbeit	David Gusenbauer	Entwicklung der Entwässerungssysteme in Eisenbahntunneln in Österreich	MUL	abgeschlossen
6	Masterarbeit	Stephan Felber	Problematik der Tunneldrainagesysteme Österreichs	MUL	abgeschlossen
7	Masterarbeit	Mariusz Czerniak	Bestandserhebung des Wartungsaufwandes von Drainagesystemen von Verkehrstunnel	MUL	laufend

Alle öffentlich zugänglichen Arbeiten, sowohl Publikationen als auch wissenschaftliche Arbeiten sind im Anhang für weiterführende Studien der Thematik abgebildet.

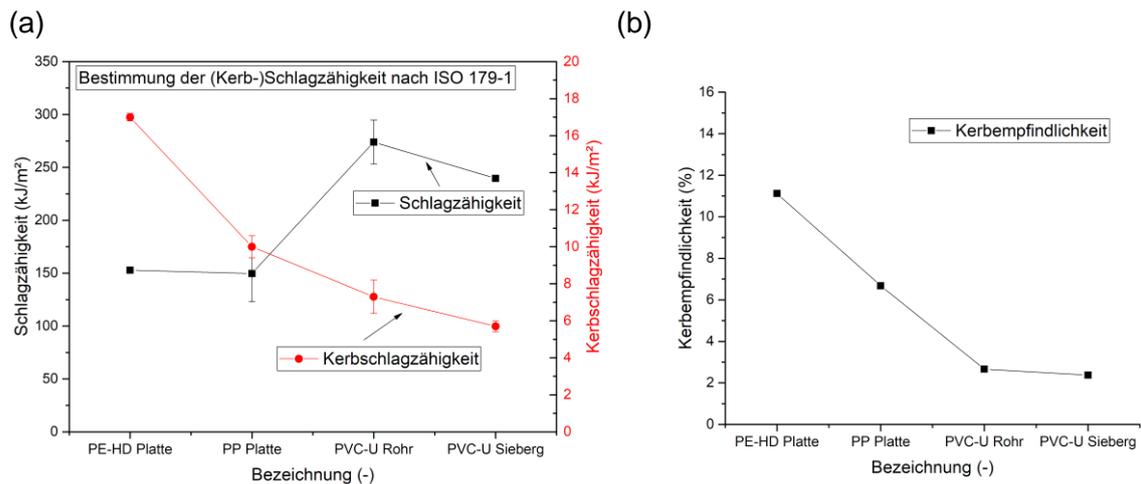
## 4.2 Arbeitspaket 2 – Bestandsaufnahme

Arbeitspaket 2 unterteilt sich in drei Unterpakete, die allesamt in Bezug zur Bestandsaufnahme vorhandener Systeme stehen. AP2a beschäftigt sich mit der Untersuchung derzeit gängiger Materialien in Kunststoffdrainagerohren. Primärer Fokus liegt dabei auf der Untersuchung mechanischer Eigenschaften. Diese Untersuchungen dienen primär dazu, die Unterschiede in bereits verbauten Materialien aufzuzeigen, bzw. etwaige bereits auftretende Schadensbilder in Drainagerohren genauer zu beleuchten. Nachfolgend beschäftigt sich AP2b mit der Erhebung und detaillierten Beschreibung von Tunnelbauwerken und AP2c mit der Untersuchung der Versinterungsneigung derzeit gängiger Drainagerohrmaterialien.

### 4.2.1 Arbeitspaket 2a – Beurteilung kommerzieller Werkstoffe

Wie in der Einleitung bereits erwähnt, ist es durch intensive Reinigungsarbeiten in der Vergangenheit bereits zu Beschädigungen von Drainagerohren aus Kunststoff gekommen. Im nachfolgenden Kapitel wurden daher früher eingesetzte, bzw. derzeit eingesetzte Werkstoffe hinsichtlich ihrer mechanischen Widerstandsfähigkeit gegenüber schlagenden Belastungen, wie sie bei der Reinigung auftreten können, untersucht.

Zur Beurteilung des Widerstandsverhaltens gegenüber schlagender Beanspruchung wurden die derzeit kommerziell verwendeten Kunststoffe PVC-U, PE und PP mittels Schlag- und Kerbschlagzähigkeitsversuchen gemäß ISO 179-1 untersucht. Dazu wurden verschiedene Proben aus Platten, Alt- und Neurohren entnommen. Die Ergebnisse der bisher untersuchten Werkstoffe sind in Abbildung 5, Abbildung 6 und Tabelle 4 dargestellt.



**Abbildung 5: Ergebnis der (Kerb-)Schlagzähigkeitsuntersuchung (a) und Kerbempfindlichkeit (b) ausgewählter Werkstoffe [6]**



**Abbildung 6: Übersichtsbild der untersuchten Schlag- und Kerbschlagversuche an Material aus Platten, sowie direkt aus den Bruchstücken der Rohrwand der Drainagerohe im Tunnel Sieberg entnommen.**

**Tabelle 4: Liste der untersuchten Werkstoffe mittels Schlag- und Kerbschlagzähigkeit**

Werkstoff	Ursprung	Schlagzähigkeit	Kerbschlagzähigkeit	Kerbempfindlichkeit
[-]	[-]	[kJ/m <sup>2</sup> ]	[kJ/m <sup>2</sup> ]	[%]
PE-HD	Extrudierte Platte	152,9 (±2,9)	17,0 (±0,2)	11,1
PP	Extrudierte Platte	149,7 (±26,7)	10,0 (±0,6)	6,7
PVC-U	Kanalrohr	273,9(±20,7)	7,3 (±0,9)	2,7
PVC-U	Drainagerohr – <b>Tunnel Sieberg</b>	239,64 (-)	5,7 (±0,3)	2,4

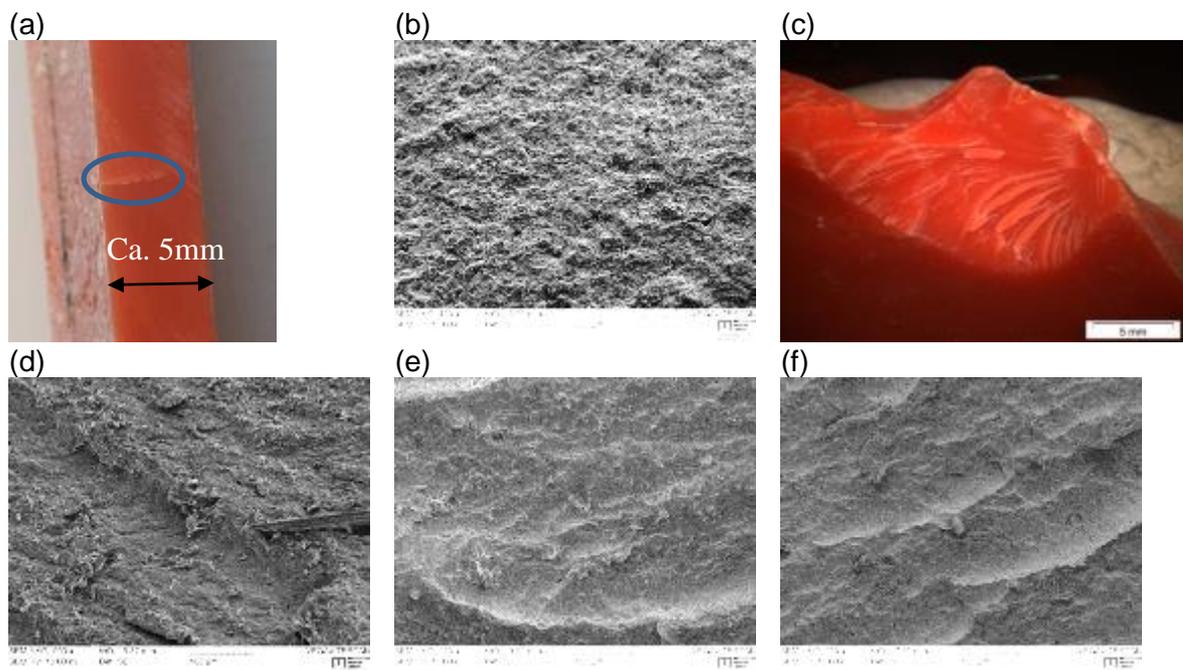
\* ... derzeit in Drainageanwendungen in Tunneln verwendete Rohrtypen

Ersichtlich ist, dass im ungekerbten Zustand alle bisher geprüften Werkstoffe sehr hohe Schlagzähigkeiten aufweisen. Zusätzlich ist zu vermerken, dass es bei den ungekerbten Proben meist nur zu einer Deformation, aber nicht zum Bruch der Proben gekommen ist. Daher sind die Werte in der Spalte Schlagzähigkeit mit Vorsicht zu betrachten. Die gekerbten Proben weisen im Vergleich zu den ungekerbten Proben eine stark reduzierte Kerbschlagzähigkeit auf. Je nach untersuchtem Material kommt es dabei zu einer Verringerung (100%-Kerbempfindlichkeit) der Schlagzähigkeit von 88,9 bis 97,6%. Da bei Drainageröhren, sowohl gewollt (Drainageschlitz) als auch ungewollt (Beschädigung der Rohre beim Einbau, Reinigung,...), Kerben vorhanden sind, sollten vor allem Kerbschlagzähigkeitswerte in Relation zur Wandstärke bei der Materialauswahl berücksichtigt werden.

Das in Tabelle 4 erwähnte Rohrstück, das bei Reinigungsarbeiten im Sieberg Tunnel ausgebrochen ist, wurde zusätzlich mikroskopisch auf die Art des Versagens untersucht. Ziel dieser Untersuchungen ist es festzustellen, wie es zu dem Versagen der Rohrwand gekommen ist. Bei der Entnahme von Probestücken konnten an einigen Stellen der Schnittkante bereits ins Material vorgedrungene Risse, die aber noch zu keinem Versagen geführt haben, gefunden werden (Abbildung 7a). Die Probe wurde an dieser Stelle mittels kryo-Bruch geöffnet und im REM (b) untersucht. Zusätzlich wurden Bruchflächen an tatsächlich versagten Stellen im REM hinsichtlich ihres Erscheinungsbildes untersucht. Abbildung 7c zeigt dabei exemplarisch eine der Bruchstellen. Der eingewachsene Riss (a) und die Bruchflächen

an anderen Stellen zeigen im REM unterschiedliche Erscheinungsformen. Die Mikrostruktur auf den Flächen des eingewachsenen Risses (b) und die Bruchstelle in (d) zeigen Anzeichen von Mikroduktilität. Diese Erscheinungsform deutet bei Kunststoffen normalerweise auf eher geringe Belastungsgeschwindigkeiten bzw. statische Lasten, oder eventuell Ermüdungslasten hin. Die Bruchflächen in Abbildung 7: e und f zeigen hingegen sehr spröde Bruchflächen, was eher auf ein Versagen aufgrund schneller bzw. schlagartiger Belastung hinweist. Dies ist insofern von Interesse, da die Bruchstellen innerhalb von 10 cm zueinander liegen. Weiters sind die Kerbschlagzähigkeiten aus obiger Tabelle zu beachten. Dabei ist zu sehen, dass das Material des ausgebrochenen Stücks aus dem Tunnel kaum schlechtere Werte als ein neuwertiges Rohr aufweist, was darauf hinweisen könnte, dass keine merkliche Materialalterung vorliegt.

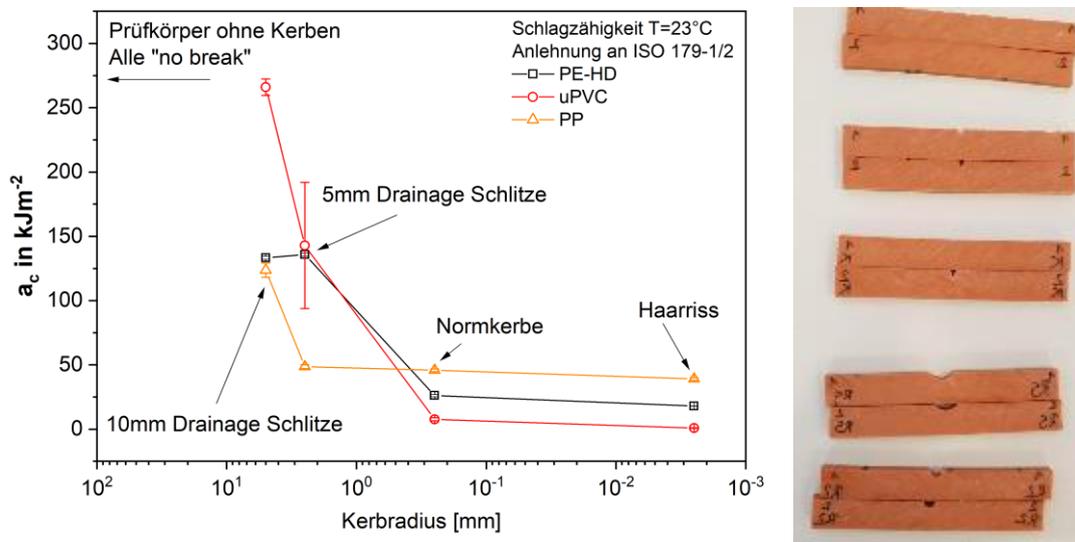
Ergo könnte dies darauf hinweisen, dass die Rohrwand über längere Zeit hinweg mechanisch vorgeschädigt wurde und dann aufgrund einer schnellen schlagartigen Belastung versagt hat. Eine Validierung dieser Vermutung würde jedoch eine weitaus umfassendere Untersuchung bedingen, die nicht Teil des gegenständlichen Projekts ist.



**Abbildung 7: Mikroskopische Untersuchung der Rohrwand-Bruchstücke aus dem Sieberg-Tunnel: (a) ins Material eingewachsene Risse, (b) REM-Aufnahme des in die Rohrwand eingewachsenen Risses, (c) beispielhafte Bruchstelle 1, (d) REM-Aufnahme mit Anzeichen von mikro-Duktilität in Bruchstelle 1, (e) & (f) REM-Aufnahmen mit relativ spröden Bruchflächen; REM-Aufnahmen mit 400x Vergrößerung**

Ergänzend zu den dargestellten Untersuchungen wurden aus derzeit für Drainageanwendungen verwendeten Rohren [5] (PE, PP und uPVC - DN250) Prüfkörper direkt

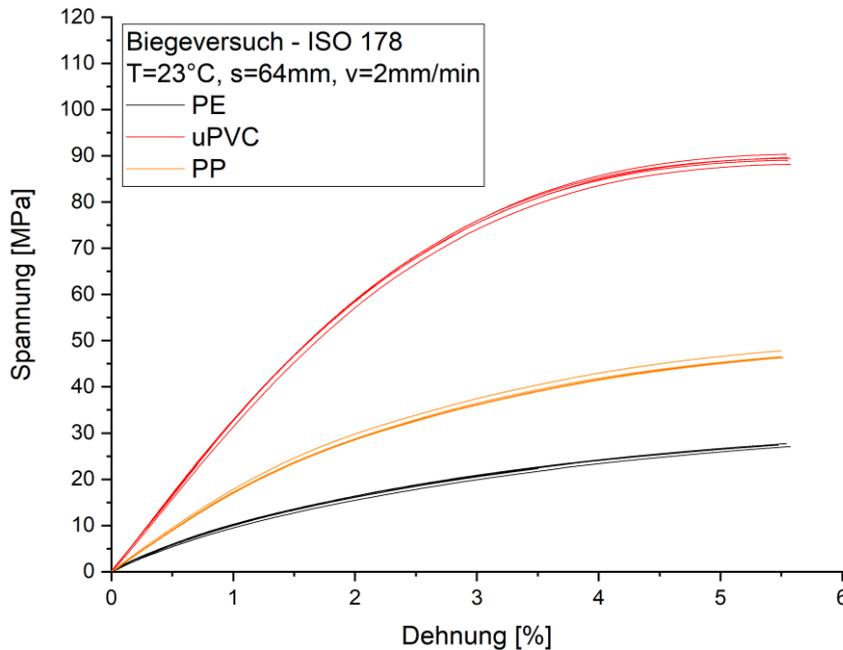
aus den Rohrwänden entnommen. Diese wurden hinsichtlich Beständigkeit gegenüber schlagenden Belastungen in Abhängigkeit von lokalen Spannungskonzentrationen untersucht. Dazu wurden die Prüfkörper unterschiedlich präpariert. Neben den ungekerbten Prüfkörpern wurden ebenfalls unterschiedliche Kerbradien untersucht. Die ausgewählten Kerbradien entsprechen dabei herkömmlichen 5 und 10mm breiten Drainageschlitzten, einer Normkerbe (ISO 179-1) und einer scharfen Kerbe (Kerbradius  $<10\mu\text{m}$ ), um Haarrisse, die bei unsachgemäßen Kerbvorgängen entstehen können, zu simulieren. Die Ergebnisse sind nachfolgend in Abbildung 8 dargestellt.



**Abbildung 8: Ergebnis der Schlagzähigkeitsuntersuchung derzeit verwendeter Rohrmaterialien (direkt aus Rohrwand DN250 Rohr entnommen) in Abhängigkeit des Kerbradius**

Wie aus Abbildung 8 ersichtlich ist, zeigen alle drei Materialien (PE-HD, PP und uPVC) im ungekerbten Zustand sehr hohe Energiewerte und konnten im klassischen Charpy-Versuchsaufbau nicht zum Bruch gebracht werden. Die Prüfkörper mit eingebrachten Kerben hingegen konnten bei allen drei Materialien zum Bruch gebracht werden. Bei Radien von 5 mm, was der Geometrie von rund-gefrästen 10 mm breiten Drainageschlitzten entspricht, weisen alle 3 Materialien Energien  $> 100 \text{ kJ/m}^2$  auf, wobei in diesem Bereich das Ranking  $\text{uPVC} > \text{PE} > \text{PP}$  ist. Bei den nächst kleineren Radien von 2.5 mm (=5 mm Drainageschlitzte) ergibt sich ein Ranking von  $\text{uPVC} = \text{PE} > \text{PP}$ . Da in der Fertigung von Drainageschlitzten jedoch auch kleinere Radien (Mikrokerben, Haarrisse, etc.) entstehen können, wurden auch noch Radien von 0.25 mm (entspr. ISO 179-1) und 0.005 mm geprüft. In diesem Bereich zeigt sich, dass sich der Trend dreht und die Schlagzähigkeit ein Ranking der Materialien  $\text{PP} > \text{PE} > \text{uPVC}$

ergibt. Ausgehend von diesen Ergebnissen, sieht es so aus, dass v.A. in Hinsicht auf nicht perfekt gefräste Drainageschlitze PP im Vergleich zu PE und uPVC mehr Sicherheit bietet. Zum Vergleich der klassischen mechanischen Eigenschaften wurden auch Biegeversuche an den drei Rohrmaterialien durchgeführt. Dabei ergaben sich die Kurven in Abbildung 9. Erwartungsgemäß kam es bei keinem der drei Materialien zum Bruch, und die Steifigkeiten ergeben ein Ranking von uPVC>PP>PE.



**Abbildung 9: Biegeeigenschaften derzeit verwendeter Rohrmaterialien (direkt aus Rohrwand DN250 Rohr entnommen).**

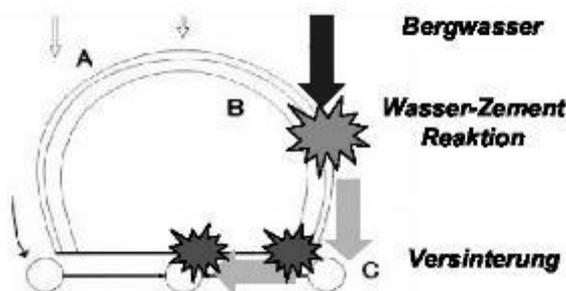
Als letzter Versuche wurden die Materialien mittels eigens entwickeltem Kettenschleuderprüfstand (Arbeitspaket 3) untersucht. Dabei wurden alle drei Materialien jeweils bei drei unterschiedlichen Zeitdauern (30, 60 und 120 s) und drei unterschiedlichen Kettenüberständen (1, 2 und 5 mm) geprüft. In Abbildung 10 sind exemplarisch jeweils die Ergebnisse der Untersuchungen mit 30 s und 2 mm Kettenüberstand abgebildet. Wie in den Abbildungen ersichtlich ist, kommt es bei allen drei Materialien zu ähnlichen Verschleißerscheinungen der Materialoberfläche durch die schlagende Belastung mittels Stahlgliederkette. Bei keinem der Materialien kam es zu einem Absplittern von Material.



**Abbildung 10: Kettenschleuderbeständigkeit derzeit verwendeter Rohrmaterialien (direkt aus Rohrwand DN250 Rohr entnommen): schwarz PE, rot uPVC und orange PP.**

#### 4.2.2 Arbeitspaket 2b – Erhebung problematischer Bauwerke

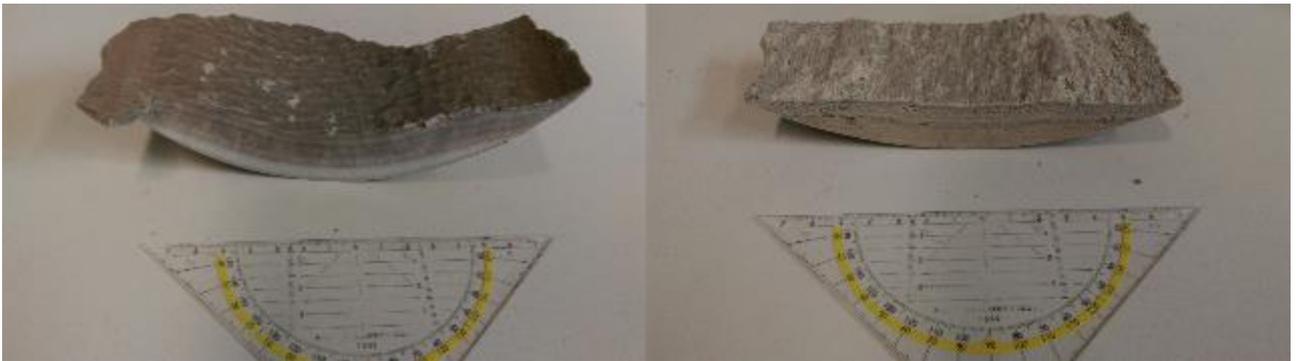
Das Vorliegen der Richtlinie für Tunnelentwässerung seitens der Österreichischen Vereinigung für Beton- und Bautechnik [5] bekräftigt die Relevanz der Entwässerungssysteme in der Tunnelinfrastruktur. Die Richtlinie ist für die Entwässerung von Tunneln geschlossener Bauweise gültig, die konventionell vorgetrieben wurden, jedoch sinngemäß auch für jene mit kontinuierlichem Vortrieb, und sieht die Trennung und Ableitung der Fahrbahn- und der Bergwässer in unterschiedlichen Entwässerungssystemen vor. Um die damit einhergehende potenzielle Absenkung des Bergwasserspiegels zu vermeiden, werden auch druckwasserhaltende Ausbausysteme eingesetzt. Allfällig eindringende Bergwässer werden mittels Leckwasserleitungen entwässert.



**Abbildung 11: Reaktionszonen des Bergwassers mit zementgebundenen Baustoffen [2].**

Die Erstellung der Richtlinie Tunnelentwässerung verfolgt die Hochverfügbarkeit der untertägigen Infrastruktur, die Optimierung von Betriebs- und Instandhaltungskosten, einfache Wartung und den Einsatz dauerhafter Materialien. Aus dem Kontakt zementgebundener Baustoffe und des Bergwassers entstehen Reaktionszonen, wie Abbildung 11 zeigt. Abbildung 11 veranschaulicht den üblichen Weg des Bergwassers in Bezug auf den Tunnelausbau bis zum Entwässerungssystem. Die Versinterung führt zu hauptsächlich aus dem Mineral Kalzit bestehenden Ablagerungen, das nach Entgasung von CO<sub>2</sub> infolge eines überhöhten CO<sub>2</sub>-Partialdrucks und einer Kalk-Übersättigung (Sättigungsindex > 1) aus dem Bergwasser ausfällt

[2]. Dies bestätigen bei der Drainagespülungen entnommene Proben des Achrain Tunnels in Vorarlberg und des Tunnels Reinertshof in Bayern. Abbildung 12 demonstriert den Maßstab fester Versinterungen und den Rohrdurchmesser der Drainage. In Tabelle 5 dokumentiert eine röntgendiffraktometrische Analyse den hohen Anteil des Minerals Kalzit in Gewichtsprozent an der Sinterprobe.



**Abbildung 12: Versinterungen des Achrain-Tunnels in Vorarlberg (links) und des Tunnels Reinertshof in Bayern (rechts).**

**Tabelle 5: Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie der Sinterproben in Abbildung 12. Weitere Minerale wie z.B. Dolomit etc. waren nicht detektierbar.**

	CaCO <sub>3</sub> (Gewichtsprozent)	SiO <sub>2</sub> (Gewichtsprozent)
Achrain Tunnel	99,7	0,3
Tunnel Reinertshof	99,8	0,2

Die Arbeiten an dem Projekt „Polydrain“ werden zu einem Teil im Rahmen von Bachelor- und Masterarbeiten durchgeführt. Diese sind in Tabelle 3 aufgelistet. In der ersten Abschlussarbeit (Riepler, 2017) [16] werden die Einflussparameter der Versinterungen im Zusammenhang mit dem Bauwerk und die Darstellungsform der Ergebnisse festgelegt. Der zufolge findet die Ergebnisdarstellung in Übersichtslängenschnitten statt, in denen die Einflussfaktoren entlang der Stationierung des Tunnelbauwerks aufgetragen sind. Zu diesen gehören angetroffene geologische Verhältnisse wie das Gebirge, Bergwasser samt den baugelogeologischen Aspekten, die Bauweise, Stützmittel, das Entwässerungsschema und die Wartungsintensität des Drainagesystems [16].

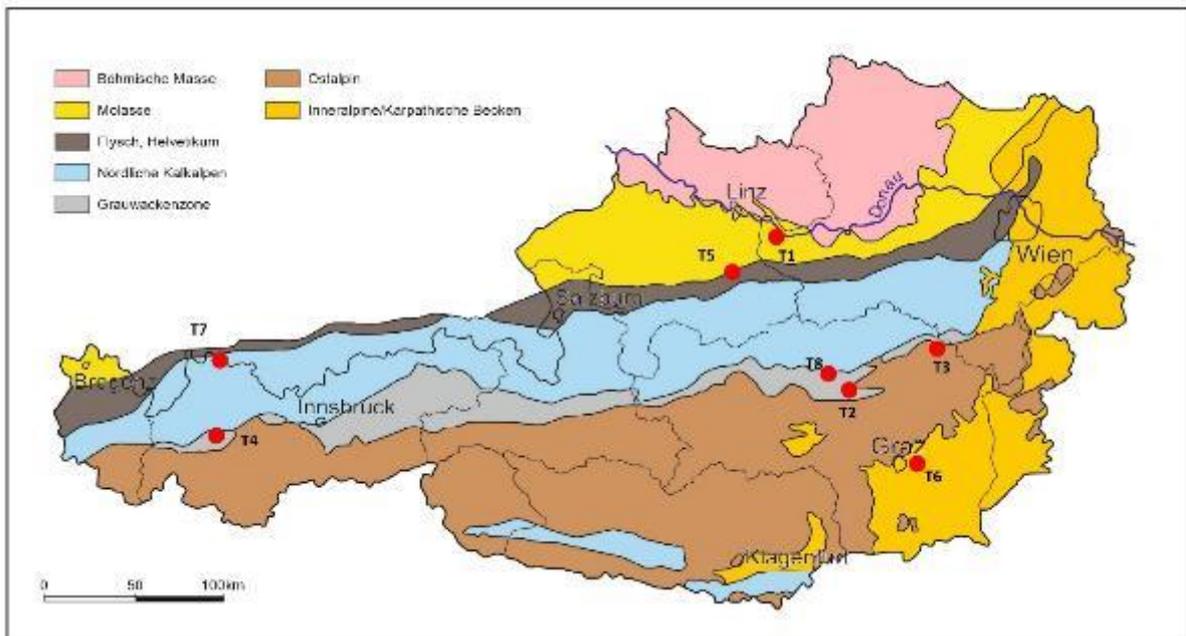
#### **4.2.2.1 Tunnelbauwerke und ihr Versinterungspotenzial**

Die Erhebungen der Daten von Tunnelbauwerken bezwecken die Erstellung eines umfassenderen Bildes von den Entwässerungssystemen, dem Zustand und den Problematiken der Drainagesysteme österreichischer Tunnelbauwerke. Dazu gehört, die nötigen Bauunterlagen auszuheben, was teils bei den österreichischen Planungsunternehmen des Untertagebaus IL – Ingenieurbüro Laabmayr & Partner ZT GesmbH, Geoconsult Holding ZT GmbH und die IGT Geotechnik und Tunnelbau Ziviltechniker Gesellschaft m.b.H., teils bei

den Infrastrukturbereitstellern ÖBB, ASFINAG, dem Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung 18B, Straßeninfrastruktur-Bau und dem Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Abteilung Brücken- und Tunnelbau sowie dem Staatsarchiv durchgeführt wurde. Für die Erhebungen von Spülzeiten und Begehungen vor Ort waren Anlagentechniker in Befragungen eingebunden.

Die Erhebungen führten zu einem Operat von Plänen mit versinterungsrelevanten Inhalten wie Geologie, Bauweise, Stützmittel, Regelquerschnitten, Entwässerungsschema, Detailplänen von Elementen des Drainagesystems und Spülprotokollen von rund 90 Eisenbahntunneln und rund 30 Straßentunneln. Unter ihnen ist bei nur wenigen der Datenbestand so ausreichend, der die gesamthafte Darstellung der Tunnel in aussagekräftigen Übersichtslängenschnitten im Hinblick auf das Versinterungspotenzial erlaubt.

Dies führt zu einer Auswahl von Tunnelbauwerken, an denen konzentrierte Erhebungen durchgeführt werden. Die Auswahl fällt dabei auf Tunnelbauwerke, die von den Projektpartnern ASFINAG und ÖBB als relevant eingestuft werden und die entsprechend Erkundigungen bei nicht dem Projektkonsortium angehörigen Infrastrukturbetreibern wie Amt der Oberösterreichischen Landesregierung oder Steiermärkischen Landesregierung Versinterungspotenzial aufweisen. Die Auswahl ist dabei auf das ganze Bundesgebiet mit Ausnahme des Tunnels Reinertshof ausgebreitet, der vier Kilometer jenseits der österreichischen Grenze in Bayern liegt. Abbildung 13 zeigt die geografische Lage der erhobenen Tunnelbauwerke an. Da die Geologie zu den Einflussparametern des Versinterungspotenzials zählt, kennzeichnet Abbildung 13 ihre Verteilung in Bezug auf die unterschiedlichen geologischen Einheiten.



**Abbildung 13: Übersichtskarte erhobener Tunnel bezogen auf die großgeologischen Einheiten Österreichs nach [17] (T1-Siebertunnel, T2-Galgenbergtunnel, T3-Tunnel Steinhaus, T4-Zammer Tunnel, T5-Umfahrungstunnel Grünburg, T6-Tunnel Himmelreich, T7-Tunnel Reinertshof, T8-Zentrum am Berg)**

Die Unterlagen für die zuvor angeführte einheitliche Ergebnisdarstellung bilden geologische Übersichtslängenschnitte, Tunnelbänder, die geotechnischen Rahmenpläne, die baugelogeische Dokumentation sowie das Entwässerungsschema des Tunnels. Somit liegt in Längenschnitten eine Dokumentation möglicher geogener Einflüsse vor und die Tunnelbänder geben den Stützmitteleinsatz wieder. Die Erhebung beider Unterlagen ermöglichen die Unterscheidung bautechnischer und geogener Parameter. Die Entwässerungsschemata legen das Drainagesystem dar. Während die zuvor genannten Unterlagen der Bauphase des Tunnels entstammen, gehen Aufzeichnungen der Drainageräinigungen auf die Betriebsphase zurück. Sie liefern bei entsprechender Qualität eine starke Indikation des Versinterungspotenzials im Tunnelbauwerk [16].

#### 4.2.2.1.1 Siebert Tunnel

Der Siebert-Tunnel ist ein Teil der neuen Eisenbahnhochleistungsstrecke Wien-Salzburg mit dem Errichtungszeitraum 1997-2001 und einer Länge von 6480 m. Die Geologie besteht zum Großteil aus dem Miozän- sowie dem teilweise quellfähigen Oligozänschlier. Dieser erstreckt sich auf eine Länge von ca. 800 m. Der Vortrieb erfolgt in offener und Deckelbauweise und zyklisch.

Das Entwässerungssystem besteht aus zwei Ulmendrainagen und einer Sohl drainage mit Drainageröhren aus PVC, einem Durchmesser von 250 bis 350 mm und einer Wandstärke

von lediglich 3-4 mm. Das Entwässerungssystem weist wegen 90° Abzweigungen nicht reinigbare Leitungen von der Ulmendrainage zur Sohlrainage auf sowie Fallstrecken (Abbildung 14), die starke Verwirbelungen der Drainagewässer verursachen. Die Putzschächte des Entwässerungssystems liegen in Abständen von 50 m, von denen die Drainageleitungen gereinigt werden. Die Drainageleitungen erhalten den Bergwasserzufluss durch zementgebundene Drainagekörper [16].

### **Verwendete Werkzeuge**

Die Reinigung des Entwässerungssystems wird mit hydraulischen, hydraulischmechanischen Werkzeugen wie einer Vibrationsdüse mit ca. 100 bar Druck an der Wasseraustrittsposition durchgeführt. In Bereichen ohne zu harte Versinterungen werden Vibrations- und Rotierdüsen eingesetzt. Für die Entfernung von Versinterungen in Abschnitten mit hohem mechanischem Widerstand und schon starker Einschnürung des Querschnitts erfolgt der Einsatz von Fräsrobotern mit Meißeln, Fräsen und Kettenschleudern. Infolge dieser hohen mechanischen Beanspruchung liegen bereits Beschädigungen der Drainagerohre vor, welche durch Einziehen eines Inliners behoben werden und womit das Bergwasser nicht mit zementgebundenen Baustoffen in Kontakt kommt [16].

### **Härtestabilisatoren**

Beim Siebertunnel finden flüssige und feste Härtestabilisatoren Einsatz. Die festen Härtestabilisatoren werden in Netzen in den Putzschächten zur Verhinderung eines Ausschwemmens befestigt. Die Erfahrungen mit ihnen sind im Tunnel Sieberg nicht zufriedenstellend. Zwar unterbinden die festen Härtestabilisatoren örtlich die Versinterung, aber werden mit der Zeit selbst von einer Versinterung überzogen.

Ein Langzeitversuch wird zur Zeit der Erstellung der Bachelorarbeit mit flüssigen Härtestabilisatoren durchgeführt. Sie zeitigen eine positive Wirkung im Hinblick auf die Entfernung der Versinterungen vor allem in Bereichen, wo zuvor harte Versinterungen vorlagen, jedoch verursachen sie gleichzeitig einen starken Bakterienbewuchs in den Drainageleitungen [16].

### **Reinigungsaufwand**

Das Reinigungsintervall der Drainageleitungen im Sieberg Tunnel beträgt ca. 1 Jahr. Die Wartungsarbeiten unterliegen starken zeitlichen Einschränkungen aus dem Betrieb. Sie sind an maximal 30 Nächten pro Jahr in den Zeiten von 22:30 bis 5:00 möglich, zusätzlich sind in diesem Zeitfenster die Rüstzeiten sowie An- und Abfahrt zu inkludieren, um eine Nettospülzeit ableiten zu können. Die Nettospülzeiten können für einzelne Abschnitte zwischen den Putzschichten nicht ermittelt werden. Sie werden jenem Bereich zugeordnet, der im jeweiligen

Jahr gereinigt wurde. Diese Bereiche nehmen im jeweiligen Jahr Längen von wenigen 100 m und mehreren 1000 m ein. Um ein Reinigen speziell problematischer Bereiche des Drainagesystems angesichts des Zeitfensters zu gewährleisten, ist deren Kenntnis seitens der Anlagentechniker eine Voraussetzung. Die Spülgeschwindigkeiten und die Intervalle zwischen den Spülungen der jeweiligen Abschnitte der einzelnen Drainagen (zwei Ulmendrainagen, eine Sohl drainage) geben einen guten Rückschluss auf das Versinterungspotenzial des jeweiligen Abschnittes [16].

### **Versinterungspotenzial des Tunnels**

Aus der Untersuchung des Übersichtslängenschnitts ergeben sich drei Bereiche mit erhöhtem Versinterungspotenzial:

Im Abschnitt km 154.019 bis km 154.883 kommen eine bemerkenswerte Verringerung der Spülgeschwindigkeiten vor (2008 mit 93,33 m/h und 2015 mit 26,96 m/h) und ein deutlich erhöhter Spülaufwand, der beide Ulmendrainagen des einröhrigen Tunnels gleichermaßen betrifft. Der gesteigerte Spülaufwand wird auf den Übergang von Deckelbauweise zu zyklischem Vortrieb, die wachsende Ankeranzahl je Tunnellaufmeter, eine dickere Spritzbetonschale und vermutete Injektionen für die Errichtung von Notausstiegen in dieser Sektion zurückgeführt [16].

Im Abschnitt km 155.338 bis km 156.030 liegen erhöhte Spülaufwände vor, die aus den unterschiedlichen Bauweisen im Zuge eines Zwischenangriffs und aus einem Bergwasserzutritt der lokalen Kieslagen hergeleitet werden. Damit wird in dieser Sektion ein geogenes Versinterungspotenzial gefolgert.

Das erhöhte Versinterungspotenzial im Abschnitt km 157.773 bis km 158.985 fällt mit den Fallstrecken (Abbildung 14) der Ausleitungen der Ulmendrainagen in die Sammelleitungen zusammen, die starke Verwirbelungen verursachen [16].



**Abbildung 14: Einleitung der Ulmendrainage in die Sohl drainage mit Fallstrecke des Wassers [16].**

#### **4.2.2.1.2 Galgenbergtunnel**

Der Bau des Galgenbergtunnels mit 5460 m Länge fällt in den Errichtungszeitraum 1993-1998. Der Vortrieb erfolgt im Altkristallin und der Grauwackenzone mit Gneisen, Quarziten, Phylliten, Grünschiefern, Kalk- bzw. Dolomitmarmor, 400 m mächtigen Großstörungen und stark druckhaftem Gebirgsverhalten. Die Überdeckung beträgt teils über 200 m. Der Vortrieb erfolgt in offener Bauweise und zyklisch. Für die gesamte Länge des Tunnelbauwerkes ist die gleiche Spritzbetonzusammensetzung vermerkt.

Das Entwässerungssystem weist einen Abstand zwischen den Schächten von 50 m auf. Die Drainagerohre sind aus PVC, haben ein Tunnelprofil, die Einlässe in die Rohre wurden geschnitten. Bei den Einleitungen aus dem primären in das sekundäre Entwässerungssystem kann man ein erhöhtes Versinterungspotential erkennen. Die Zugänglichkeit zu den Drainagen ist durch eine verwinkelte Konstruktion im Bereich der Schächte erschwert [16].

#### **Verwendete Werkzeuge**

Der Tunnel wird zur Zeit der Erstellung der Bachelorarbeit mit Hochdruckreinigung gespült. Eine Kamerabefahrung des Entwässerungssystems ist über die gesamte Länge möglich [16].

#### **Härtestabilisatoren**

Die relativ einfache Instandhaltung wird unter anderem auf die Anwendung flüssiger Härtestabilisatoren unmittelbar nach der Inbetriebnahme zurückgeführt. Die Zugabe der flüssigen Härtestabilisatoren erfolgt jeweils in einem Zeitraum von jeweils 6 Monaten. Es wurden ebenso Härtestabilisatoren in fester Form (UCM) verwendet. Zur Beseitigung möglicher Versinterungen spülte die Baufirma die Drainagen vor der Übergabe des Bauwerkes, was ebenfalls einen positiven Einfluss hatte [16].

#### **Reinigungsaufwand**

Es wurden bislang keine Instandsetzungsarbeiten am Entwässerungssystem (z.B. ein Einziehen von Inlinern) durchgeführt, der Zustand des Entwässerungssystems wird unter den Anlagentechnikern als gut erachtet. Der Aufwand der Reinigung wird als konstant beobachtet, sie ist lediglich in den Jahren 2013 und 2014 durchgeführt worden. Eine Änderung der Spülzeiten ist aus diesen beiden Einsätzen nicht ableitbar. Für Drainagereinigungen ist der Zeitraum zwischen 22.00 und 5.00 seitens des Betriebs freigegeben. Zur Ermittlung der Spülgeschwindigkeiten werden je Arbeitstag 90 Minuten für An-, Abfahrts- und Rüstzeit kalkuliert. Die Spülgeschwindigkeiten können für einzelne Sektionen mit 75 m bis 2463 m Länge errechnet werden, eine Zuordnung von Spülgeschwindigkeiten an Bereiche zwischen einzelnen Putzschächten kann aus den Aufzeichnungen nicht vorgenommen werden, jedoch gibt es einen Bereich zwischen TM 2400 und TM 3790, in dem vergleichsweise geringe Spülgeschwindigkeiten bekannt sind. Aus dem betreffenden Übersichtslängenschnitt können

die Zusammenhänge für die Ursachen der niedrigen Spülgeschwindigkeiten nicht eindeutig geschlossen werden [16].

#### **4.2.2.1.3 Steinhaustunnel**

Der Steinhaustunnel ist Teil der S6, der Semmering Schnellstraße. Mit der Eröffnung 2004 steht für den Autoverkehr ein zweiröhriger Tunnel mit einer Länge von ca. 1870 m zur Verfügung. Der Tunnel Steinhaus befindet sich überwiegend in metamorphen Gesteinsserien aus großteils dünnschiefrigen, meist tonig mylonitisierten Phylliten, mächtigen Karbonatgesteinskörpern (Kalkmarmoren bis Kalkschiefer) und Quarziten. Das Gebirge liegt stark zerklüftet und zum Teil verwittert vor. Die anfallenden während des Vortriebs dokumentierten Bergwässer belaufen sich auf Wasserzutritte von 0,1 bis 5 l/s mit kurzfristigen maximalen Spitzenwerten von 10 l/s [18].

Der Steinhaustunnel mit einer Überlagerung zwischen 30 bis 50 m wurde im zyklischen Vortrieb aufgeföhren. Auf Grund der Klüfte und Verwitterung wurde der Vortrieb großteils mittels Hydraulikbagger bewerkstelligt. Ein Sprengvortrieb blieb ein Ausnahmefall. Aufgrund fehlender Daten bezüglich der tatsächlich verbauten Stützmittel lässt sich behelfsweise die Stützmittelzahl (2.Ordnungszahl der VKL) in Abhängigkeit von der Vortriebsmethode als Beurteilungsgrundlage heranziehen, in welchen Bereichen tendenziell mehr Stützmittel eingebracht wurden [19].

Den Semmering-Scheitel Tunnel, Tunnel Spital und Tunnel Steinhaus eint dasselbe Konzept des Entwässerungssystems infolge des gleichen Realisierungszeitraumes und der Projektzusammengehörigkeit. Die anfallenden Bergwässer werden über zwei Ulmendrainagen aus PVC, mit einem Tunnelprofil (geschlitzt, 120°) und einem Durchmesser von jeweils 200 mm (PVC DN 200) abgeleitet. Das Vorhandensein einer ungebundenen oder gebundenen Sickerpackung ist nicht bekannt. In Abständen von 60 m befinden sich Querausleitungen in eine unter der linken Fahrspur befindliche Sammelleitung (DN 350, PVC, Vollrohr). Das Bergwasser wird in die Sammelleitung mit einem 90° Winkel eingeleitet und überwindet dabei eine senkrechte Fallstrecke von 20 - 40 cm, womit starke Verwirbelungen des Bergwassers erzeugt werden. Für die Reinigung der Ulmendrainagen sind Putznischen im Abstand von 30 m vorhanden. Die Schächte zur Reinigung der Sammelleitung sind im Abstand von 60 m angeordnet [19].

#### **Verwendete Werkzeuge**

Für die Reinigung des Drainagesystems wird eine Rotationsspüldüse eingesetzt. Infolge verfestigter Versinterungen müssen bereichsweise Schlagdüsen eingesetzt werden, an deren Einsatz sich Beschädigungen der Drainageleitungen angeknüpft haben. Die Durchgängigkeit des Entwässerungssystems ist für eine Kamerabeföhren in allen Teilen gegeben [19].



**Abbildung 15: Rotationsspüldüse im Steinhaustunnel [20]**

### **Härtestabilisatoren**

Gemäß Auskunft der Autobahnmeisterei Mürzzuschlag wurden bis dato im Steinhaustunnel keine Härtestabilisatoren im Entwässerungssystem eingesetzt. Auf Grund starker Versinterung werden zur Reduktion der Ablagerungsbildung derzeit von der Firma JR-AquaConSol Versuche durchgeführt, um eine geeignete Dosierung von Härtestabilisatoren zu erreichen. Dafür sind Sinterwächter zum Monitoring von Wasserparametern (elektrische Leitfähigkeit und pH-Wert) installiert. Sie sind in Fahrtrichtung Wien – nach Osten – ansteigend nummeriert [19].

### **Reinigungsaufwand**

Für die Reinigung des Entwässerungssystems ist derzeit ein Quartalsintervall vorgesehen. Dieser Zeiplan ist auf Grund der Versinterungen erschwert einhaltbar. Die Zeitaufwände für die Drainagespülung sind bis zur Zeit der Erstellung der Masterarbeit (Felber, 2019) [19] nicht dokumentiert. Der Rückschluss auf die Versinterung wird daher anhand der von Firma JR-AquaConSol installierten Sinterwächter vorgenommen [19].

### **Versinterungspotenzial des Tunnels**

Tabelle 6 stellt in kondensierter Weise den Übersichtslängenschnitt in tabellarischer Form dar. In ihr sind die im Vortrieb im Bereich des jeweiligen Sinterwächters (SW1-SW8) angetroffenen geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse und die bei den Sinterwächtern aufgetretenen Versinterungsgrade von Ulmendränage und Sammelleitung gegenübergestellt. An SW7 liegen keine Daten vor. Aus der Stützmittelzahl der Vortriebsklassen (VKL) rechts des Schrägstrichs in der Zeile „Vortrieb“ ist in Tabelle 6 der Grad verbauter Stützmittel ablesbar. Aus einer höheren 2. Ordnungszahl lässt sich ein größeres Ausmaß verbauter Stützmittel schlussfolgern. Die Gegenüberstellung zeigt, dass in der Sammelleitung in den Bereichen von SW5 und SW6 eine hohe Versinterung vorliegt, wo verhältnismäßig hohe Stützmittelzahlen

auftreten. Mit den zunehmenden Mischwassermengen in Richtung des westlichen Portals (fallende Nummerierung der Sinterwächter) nimmt die Versinterung ab [19].

	Sinterwächter			
	SW 1	SW 2	SW 3	SW 4
Tunnelmeter	80 bis 120	220 bis 280	440 bis 480	680 bis 720
Geologie	Kataklasit, Quarzit und Quarzitschiefer mit tonige Zwischenlagen	Wechsellagerung von verlehnten Kalkmarmor und Kalkschiefer	Kalkmarmor mit vereinzelt Kalkschieferübergängen und graphitischen Einschaltungen	plattig tafelige Kalkmarmore teils wechsellagernd mit Kalkschiefern, in wechselnder Intensität verschuppt mit graphitischen Phylliten
Zerlegungsgrad:	mittel bis strak	stark bis intensiv	mittel bis strak	mittel bis strak
Verwitterungsgrad:	keine bis gering	keine bis gering	keine bis gering	keine
Verbandsfestigkeit:	mittel bis schlecht	gut bis mittel	gut bis mittel	gut
Wasserempfindlichkeit:	leicht veränderlich	unveränderlich	unveränderlich	unveränderlich
Bergwasser	generell bergfeucht; tropfende bis schwach rinnende, punktuelle Wasserzutritte;	trocken	vereinzelt bergfeucht bis lokal schwach rinnende Wasserzutritte	sehr geringe Wasserführung bis generell trockene Gebirgsverhältnisse
Vortrieb	Sprengvortrieb VKL 5/5,16	Sprengen, Bagger/Sprengen VKL 5/5,16	Sprengen VKL 5/03,44	Sprengen 5/5,16
Entwässerungssystem	keine Besonderheiten			
Verwitterungsgrad				
Ulmendrainage R / L	gering / gering	gering / gering	gering / gering	gering / gering
Sammelleitung	gering	mittelmäßig	mittelmäßig	mittelmäßig

	SW 5	SW 6	SW 7	SW8
Tunnelmeter	860 bis 900	1100 bis 1140	1280 bis 1320	1660 bis 1700
Geologie	Quarzitkataklasite und Phyllonite des Bunten Keupers, intensiv zerschert	aus dem Firstbereich kommend Einlagerungen von Kalkmarmorschollen in stark verwitterter phyllonitischer Matrix	größtenteils intensiv zerlegte und teils entfestigte Rauhdecken, bereichsweise reliktsche härtere Schollen, grusig verlehmt mit guter Kohäsion bzw. innerer Verspannung	
Zerlegungsgrad:	intensiv	intensiv	intensiv	
Verwitterungsgrad:	keine	mittel bis stark	stark	
Verbandsfestigkeit:	sehr schlecht	sehr schlecht	schlecht bis mittel	
Wasserempfindlichkeit:	leicht veränderlich	leicht veränderlich	unveränderlich	
Bergwasser	durchwegs wechselhaft bergfeucht mit örtlichen geringfügigen Tropf- und selten Rinnstellen. Drainagewirkung durch die Radialankerbohrungen. Wasserzutritte rinnen größtenteils aus	stark durchfeuchtetes Gebirge	-	keine Daten vorhanden
Vortrieb	Bagger 7/12,30	Bagger VKL 7/12,30 ; 7/16,50	Sprengen , Bagger VKL 5/5,47	
Entwässerungssystem	keine Besonderheiten			
Verwitterungsgrad				
Ulmendrainage R / L	gering / gering	gering / mittel	keine / keine	stark / mittel
Sammelleitung	stark	stark	keine	mittel

Tabelle 6: Tunnel Steinhaus, Gegenüberstellung geologischer und hydrogeologischer Verhältnisse und der Versinterungsgrade an den Installationsorten der Sinterwächter (SW) [19]

#### 4.2.2.1.4 Zammertunnel

Der Zammertunnel bei Zams in Tirol ist 1999 fertiggestellt worden und ist als Teil der Arlbergbahn zirka 2335 m lang. Das durchörterte Gebirge setzt sich zu zirka einem Viertel aus dem Hauptdolomit beginnend am Ostportal und einem Rest aus Phylliten der Landecker

Phyllitzone zusammen. Die Landecker Phyllitzone besitzt Einschaltungen stark aufgelockerter Gebirgsbereiche. Am Westportal liegen fluviatile Ablagerungen des Zammer Mühlbaches vor. Im Entwässerungssystem sind Drainagerohre (PVC-MZ DN250) in der Ulmendrainage verbaut, die die Bergwässer zum Ostportal ableiten. Derselbe Rohrtyp ist auch für die Sohl drainage verbaut. Die Sohl drainage und die Ulmendrainage sind in Sicherheitsnischen via Putzschächte für Spülarbeiten zugänglich, die 48 m Abstand voneinander haben. Die Ulmendrainagen sind oberhalb von Filterbeton, seitlich von Beton und unterhalb von einem Mörtelbett umgeben [21]. Die Dokumentation von Reinigungsarbeiten weist eingedrückte Drainagerohre als Baumängel aus. Der Ausbau besteht aus einer Außenschale aus Spritzbeton, nach innen schließen eine Regenschirmabdichtung und eine Ortbeton-Innenschale an [22].

### **Verwendete Werkzeuge und Härtestabilisatoren**

Die Dokumentation des Spüleinsatzes (2016) verfügt über den Hinweis, dass der Einsatz von Härtestabilisatoren auf UCM-Tabs-Basis sehr mangelhafte Resultate zeitigte. Dies ist eine Beobachtung der Jahre von 2000 bis 2006. Über verwendete Werkzeuge auf dem ÖBB-Spülzug gibt es keine Informationen [23].

### **Reinigungsaufwand**

Mit den Spüleinsätzen sind die Firmen Häusle und DAWI beauftragt. Die Reinigungsaufwände sind erheblich wegen Verklausungen infolge der harten Ablagerungen beziehungsweise ist das Reinigungsergebnis nach Spüleinsätzen gering. Die harten Ablagerungen sind in Abbildung 16: Zeugnis harter Ablagerungen von Sinter im Zammer Tunnel [23]. sichtbar [23].



**Abbildung 16: Zeugnis harter Ablagerungen von Sinter im Zammer Tunnel [23].**

### **Versinterungspotenzial des Tunnels**

Im Übersichtslängenschnitt treten als „deutlich erkennbar“ dokumentierte Versinterungen in den nachbrüchigen bis gebrächen Bereichen der Landecker Phyllitzone auf. Sie erstrecken sich über diesen Bereich bis in die Nähe des Westportals, wo sedimentäre Ablagerungen als Überdeckung des Tunnels vorkommen. Ein Tunnelband liegt zur Zeit der Erstellung des Übersichtslängenschnitts nicht vor, weshalb keine Aufstellung der Mengen eingebrachter Stützmittel bereitliegt.

#### **4.2.2.1.5 Umfahrungstunnel Grünburg**

Der Umfahrungstunnel Grünburg ist ein 1.165m langer, zweispuriger Straßentunnel der Umfahrung von Grünburg, Oberösterreich, der B140 Steyrtal Straße. Er wurde 2008 in Betrieb genommen und wird von der Tunnelbetriebsleitung Gmunden betreut. Das Nordportal befindet sich im nördlichen Ortsgebiet Grünburgs, das Südportal im südlichen Ortsgebiet nahe der Abzweigung der Landesstraße nach Oberschlierbach.

Der Tunnel unterfährt den Harbach und das Terrassenplateau im westlichen Ortsgebiet von Grünburg mit einer Überlagerung von 10 bis 30 m. Das Gebirge setzt sich aus Flysch-Wechselfolgen mit Ton-, Mergel-, Sand- und Kalksandsteinen zusammen. In den Ausbruchsquerschnitt reichen zusätzlich Lockergesteine wie fluvioglaziale und glazigene Ablagerungen bzw. Terrassenschotter bei der Unterquerung des Harbach. Die minimale Firstüberlagerung mit 6,4 m liegt im Bereich der Harbachunterquerung bei Tunnelmeter (TM) 410 bis 415.

Der bergmännisch aufgefahrene Tunnel erstreckt sich auf eine Länge von 1.104,8 m, die restlichen ca. 60m Tunnel entfallen auf die Luftbogenstrecken an den Portalen bzw. werden in offener Bauweise hergestellt. Der Tunnel weist ein Gefälle von 1,7% nach Norden auf.

Zwischen TM 226,07 und TM 268,47 befindet sich die Abstellnische 1 mit einer südseitigen Ausbuchtung und einem Tunnelquerschnitt von 144 m<sup>2</sup>. Die Abstellnische 2 liegt zwischen TM 635,39 und TM 678,09. Diese weist westseitig eine Ausbuchtung auf.

Von beiden Abstellnischen zweigen jeweils die Fluchtbauwerke 1 und 2 ab. Diese bestehen jeweils aus einem Fluchtquerschlag. Im Norden (Fluchtbauwerk 1) erreicht der Querschlag eine Länge von ca. 16 m, im Süden (Fluchtbauwerk 2) beträgt die Länge ca. 36 m.

Am Ende der Querschläge befindet sich jeweils ein Schachtbauwerk, das eine Gesamttiefe von ca. 15,6 m (Schacht 1) bzw. ca. 17,7 m (Schacht 2) erreicht. Die Schächte besitzen jeweils einen Durchmesser von 7,5 m. Über diese Schächte ist der Tunnel mit der Oberfläche im Bereich des westlichen Ortsgebietes (Schacht 1) bzw. nahe dem Harbach (Schacht 2) über einen Zufahrtsweg verbunden [Baugeologische Dokumentation – Umfahrung Grünburg, Schlussbericht].

Die Entwässerung des Tunnels erfolgt zum Einen über Ulmendrainagen zum Anderen über die Hauptentwässerung. Um anstauendem Grundwasser entgegenzuwirken, wurden im Ulmenbereich in einem Abstand von 1,0 m Entlastungsbohrungen mit einem Durchmesser von 30 mm über die gesamte Tunnellänge durchgeführt [24].

Das Entwässerungssystem besteht in den Ulmendrainagen aus Teilsickerrohren (TSR) aus PVC DN 200 mm. Sie sind über Fertigteilschächte in den darin befindlichen Revisionsnischen (RN) erreichbar. Diese sind im mittleren Bereich des Tunnels in Abständen von ca. 58 – 62 m angeordnet. In Portalnähe betragen die Abstände 35 – 48 m. Die Ulmendrainagen sind nicht mit der Hauptentwässerung des Tunnels verbunden, sondern getrennt voneinander am Nordportal in die Vorflut eingeleitet. Lediglich der Bereich ab TM 1126,66 wird südseitig ausgeleitet, wo sich die Revisionsnischen (RN) 21 E und RN 21 W befinden. Dieser Bereich wurde in offener Bauweise hergestellt [24].

Die im Bereich der Abstellnischen 1 und 2 durch Querschläge erreichbaren Fluchtbauwerke sind druckwasserdicht gebaut. In den Querschlägen wurde der Spritzbeton zweimal aufgebracht und dazwischen eine Abdichtung installiert, weswegen in diesen Bereichen keine Entwässerung vorhanden ist. Das Grundwasser fließt bis zu der Ulmendrainage des Tunnels, wo es gefasst und in weiterer Folge ausgeleitet wird. Im Ulmenbereich der Ausbuchtungen sind wiederum Ulmendrainagen verlegt. Diese werden in die jeweilige Entwässerungsleitung der Ulmen über Teilsickerrohre übergeführt. Die Hauptentwässerung des Tunnels beginnt am Südportal bei TM 1163,75 und befindet sich östlich der Tunnelachse. Sie verläuft auf dieser Seite der Tunnelachse bis TM 222,55, wo sie auf die westliche Seite der Tunnelachse wechselt. Auf dieser Seite verläuft sie bis zum Ende des Tunnels, bis sie in die Gewässerschutzanlage (GSA) mündet. Diese befindet sich auf der westlichen Seite des Nordportals. Die Hauptentwässerung des Grünburgtunnels ist eine Tragschichtdrainage. Ausgeführt ist sie durch ein Mehrzweckrohr (MZR) mit einem Durchmesser von 200 mm. Erreichbar ist die Hauptentwässerung über Fertigteilschächte in der Fahrbahn, die sich jeweils auf gleicher Höhe wie die Revisionsnischen befinden. Über diese Fertigteilschächte ist auch die Fahrbahnenentwässerung zu erreichen, deren Entwässerungsleitung aus PVC besteht und einen Durchmesser von 300 mm aufweist [24].

### **Verwendete Werkzeuge**

Die Durchführung der Spülung erfolgt mit Unterstützung durch eine Fremdfirma. Zum Einsatz kommen zwei Spülfahrzeuge jeweils mit einem Mitarbeiter bemannt. Ein Spülfahrzeug wird von der Straßenmeisterei Gmunden gestellt und bedient. Die Spülung erfolgt mit Vibrationsdüsen und einem Wasserdruck von etwa 150 bar. Ein Wechsel der Düsen ist über

den gesamten Spülprozess nicht notwendig. Gespült wird von Haltung zu Haltung, dem Fertigteilschacht mit Halbschalen in den Revisionsnischen.

Um den Abfluss des anfallenden Bergwassers bzw. Grundwassers zu gewährleisten, wurden im März 2018 Fräsungen mit Kugelfräsköpfen in nachfolgenden Bereichen durchgeführt. Diese liegen an der Westulme des Tunnels zwischen TM 0,00 und TM 635,50 und an der Ostulme zwischen TM 0,00 und TM 231,77. Beide Bereiche verlaufen somit vom Nordportal beginnend bis zu den jeweiligen Abstellnischen 1 + 2 mit den dazugehörigen Querschlägen, welche das Tunnelbauwerk mit den beiden Fluchtbauwerken 1 + 2 verbinden [24].

### **Härtestabilisatoren**

Ab dem Jahr 2011 wurde der Einsatz von festen Härtestabilisatoren festgelegt. Hierbei wurden nach jeder Spülung in die Halbschalen der Fertigteilschächte eine entsprechende Menge an Härtestabilisatoren eingelegt. Die tabsförmigen Härtestabilisatoren sind in ca. 500 g Netzen verpackt. Die Dosierung erfolgt der Erfahrung gemäß. Bei jeder nachfolgenden Spülung der Ulmendrainagen wurde der Auflösungsgrad der Härtestabilisatoren festgestellt und aufgrund dessen eine Adaptierung der Dosierung festgelegt. In den folgenden Jahren wurde beobachtet, dass es nur noch zu einem mäßigen Versinterungszuwachs gekommen ist. Eine Loslösung der Versinterungen von der Drainagerohrwandung konnte nicht erreicht werden. Nach erfolgreicher Beseitigung der festen Versinterungen in den Ulmendrainagen wurde im Herbst 2018 ein interner Test zur Entscheidungsfindung über den weiteren Einsatz fester Härtestabilisatoren durchgeführt. Dabei wurden an der Ostulme zwischen TM 0,00 und TM 231,77 Netze mit Härtestabilisatoren in die Drainagerohr-Halbschalen der Revisionsnischen eingelegt. Als Vergleichsstrecke diente die Westulme im Bereich TM 0,00 und TM 635,50. Der Test dauerte bis zum nächsten Wartungsintervall im März 2019. Nach Ende des Tests wurde die Entscheidung getroffen, auf den weiteren Einsatz fester Härtestabilisatoren zu verzichten und Spülungen im März, Juli und November eines jeden Jahres durchzuführen [24].

### **Reinigungsaufwand**

Der Spülvorgang umfasst die Vorreinigung des Fertigteilschachtes mittels eines Hochdruckreinigers, dann das Einhängen der Spüldüse in die Drainageleitung sowie das Einhängen des Absaugschlauches. Die Geschwindigkeit des Vorschubs der Düse wird über eine Bremseinrichtung geregelt. Durch das langsame Einziehen der Spüldüse erfolgt die Drainagespülung. Anhand der optischen Kontrolle des Restwassers wird über den Spülerfolg entschieden. Ein Spülprotokoll wird nicht erstellt. Die Spülungen werden aufgrund zwischenzeitlich notwendigen Wassernachtankens unterbrochen. Der zeitliche Aufwand bewegt sich hierfür zwischen 15 und 20 min. Eine weitere Kontrolle des Spülerfolges bzw. des

Versinterungszustandes der ulmenseitigen Drainagerohre erfolgt per Kamerabefahrung mit einer Kabellänge von 60 m, sodass eine Kontrolle des gesamten Entwässerungssystems im Tunnel gegeben ist. Um eine mögliche Vergleichbarkeit zwischen dem Versinterungspotenzial und der Spüldauer von Haltung zu Haltung zukünftig zu erzielen, wird ein Spülprotokoll (Abbildung 17) angefertigt. Die Abbildung 17 kennzeichnet die Sektionen des Grünburgtunnels mit höherem Versinterungspotenzial infolge der dort nötigen zweifachen Spülungen deren es trotz einer nur vier Monate davor vorgenommenen Spülung bedarf [24].

		Nordportal						
OSTSEITE	Ulmendrainage ostseitig	RN01	RN02	RN03	RN04	RN05	RN06	RN07
	Straßenkilometer [m]	0+582,98	0+630,78	0+666,63	0+714,43	0+778,8	0+829,16	0+887,08
	Tunnelmeter [m]	26,73	74,53	110,38	158,18	222,55	272,91	330,83
	Blocknummer (BN)	3	3	10	14	20	25	30
	Spülung von - bis	RN01-RN02	RN02-RN03	RN03-RN04	RN04-RN05	RN05-RN06	RN06-RN07	RN07-RN08
	Spüllänge [m]*	47,80	35,55	47,80	64,37	50,36	57,92	59,74
	Spülzeit [min]**	7	8	7	6	3	4	3
	Spülgeschwindigkeit [m/min]	6,83	4,48	6,83	10,73	16,79	14,48	19,91
		RN08	RN09	RN10	RN11	RN12	RN13	RN14
		0+946,82	1+006,56	1+054,43	1+114,00	1+174,95	1+239,95	1+299,28
		390,57	450,31	498,15	557,72	619,67	683,67	743,00
		35	40	45	50	55	60	55
		RN08-RN09	RN09-RN10	RN10-RN11	RN11-RN12	RN12-RN13	RN13-RN14	RN14-RN15
		59,74	47,84	59,57	60,95	65,00	59,33	59,80
		4	4	4	3	3	3	4
		14,94	11,96	14,89	20,32	21,67	19,78	14,95
		RN15	RN16	RN17	RN18	RN19	RN20	RN21
		1+359,08	1+418,88	1+478,68	1+538,39	1+600,53	1+653,49	1+682,91
		802,80	862,60	922,40	982,11	1044,25	1097,20	1126,62
		70	75	80	85	90	95	97
		RN15-RN16	RN16-RN17	RN17-RN18	RN18-RN19	RN19-RN20	RN20-RN21	RN21-Ende
		59,80	59,80	59,71	62,14	52,95	29,42	38,00
		3	3	4	3	3	2	2
		19,93	19,93	14,93	20,71	17,65	14,71	19,00
								Südportal
		Nordportal						
WESTSEITE	Ulmendrainage westseitig	RN01	RN02	RN03	RN04	RN05	RN06	RN07
	Straßenkilometer [m]	0+582,98	0+630,78	0+666,63	0+714,43	0+778,8	0+829,16	0+887,08
	Tunnelmeter [m]	26,73	74,53	110,38	158,18	222,55	272,91	330,83
	Blocknummer (BN)	3	3	10	14	20	25	30
	Spülung von - bis	RN01-RN02	RN02-RN03	RN03-RN04	RN04-RN05	RN05-RN06	RN06-RN07	RN07-RN08
	Spüllänge [m]*	47,80	35,85	47,80	64,37	50,36	57,92	59,74
	Spülzeit [min]**	7	7	8	9	6	7	6
	Spülgeschwindigkeit [m/min]	6,83	5,12	5,98	7,15	8,39	8,27	9,96

RN08	RN09	RN10	RN11	RN12	RN13	RN14
0+946,02	1+006,56	1+054,43	1+114,00	1+174,95	1+239,95	1+299,26
390,57	450,31	498,15	557,72	618,67	683,67	743,00
35	40	45	50	55	60	65
RN08-RN09	RN09-RN10	RN10-RN11	RN11-RN12	RN12-RN13	RN13-RN14	RN14-RN15
59,74	47,84	59,57	60,95	65,00	59,33	59,80
0	7	0	7	7	3	3
<b>7,47</b>	<b>6,83</b>	<b>9,93</b>	<b>8,71</b>	<b>9,29</b>	<b>19,78</b>	<b>19,93</b>

RN15	RN16	RN17	RN18	RN19	RN20	RN21
1+359,08	1+418,88	1+478,68	1+538,39	1+600,53	1+653,49	1+682,91
802,80	862,60	922,40	982,11	1044,25	1097,20	1126,62
70	75	80	85	90	95	97
RN15-RN16	RN16-RN17	RN17-RN18	RN18-RN19	RN19-RN20	RN20-RN21	RN21-Ende
59,80	59,80	59,71	62,14	52,95	29,42	38,00
3	3	3	3	3	4	3
<b>19,93</b>	<b>19,93</b>	<b>19,90</b>	<b>20,71</b>	<b>17,65</b>	<b>7,36</b>	<b>12,67</b>

**Südportal**

\* Abstand von Haltung zu Haltung bzw. bis Ende Drainageleitung

\*\* auf ganze Minuten gerundet

RN... Revisionsnische mit Fertigteilschacht

**Abbildung 17: Spülgeschwindigkeiten des Grünburgtunnels. Die Abschnitte mit höherem Versinterungspotenzial treten infolge verringerter Spülgeschwindigkeiten hervor [24].**



**Abbildung 18: links: Revisionsnische (RN 05 E) vor der Reinigung; rechts: Mischwasserbildung, Drainagen vor der Reinigung mit und ohne Versinterungen. Der blaue Pfeil signalisiert die Flussrichtung.**

### Versinterungspotenzial des Tunnels

Mit der Inbetriebnahme des Tunnels im Jahre 2008 ist festgelegt worden, dass zweimal im Jahr eine Spülung der Entwässerungssysteme durchgeführt wird. Nach zwei Jahren Betrieb wurde eine Zunahme der Versinterungen in den Ulmendrainagen festgestellt. Auffallend sind die Bereiche, in denen wiederholt eine Zunahme der Versinterungen beobachtet werden konnte, die bis heute andauern. Sie sind jene an der Ostulme zwischen TM 0,00 und TM 231,77 und an der Westulme TM 0,00 und TM 635,50. Die Versinterung weist eine lose, mithin spülbare Konsistenz auf [24].

Aufgrund der zunehmenden Versinterungen wurde das Spülintervall auf drei Mal im Jahr erhöht. Trotz dieser Maßnahme konnten die bereits vorhandenen festen und an den Rohrwandungen der Drainageleitungen festgesetzten Versinterungen durch Spülungen nicht beseitigt werden.

Im Grünburgtunnel kann die Wirkung der Mischwasserbildung sehr gut beobachtet werden. Die Mischwasserbildung zeugt davon, dass das Versinterungspotenzial im Tunnelbauwerk sehr kleinräumig variieren kann. Am ostseitigen Ulm bewirkt sie (Abbildung 18 rechts) im Bereich des Fluchtbauwerks 1 ein Ausbleiben der Versinterungen in der Revisionsnische (RN 05E) in der Fließrichtung (Abbildung 18 links). In diesem Bereich ist kein zweifaches Spülen nötig (Abbildung 17). Wasserproben vor und nach dem Zusammenfluss dieser Mischwasserbildung konnten am Institut für Angewandte Geowissenschaften der TU Graz für die Evaluierung einer Simulation des Versinterungspotenzials genutzt werden.

#### **4.2.2.1.6 Tunnel Himmelreich**

Der Tunnel Himmelreich an der B73 bildet die Ortsumfahrung von Hausmannstätten (Steiermark). Der Tunnel befindet sich in der Verwaltung des Landes Steiermark, besitzt eine Länge von 1045 m und eine Überlagerung von bis zu 50 m aus Tonen, Schluffen und Sanden bzw. Ton-, Schluff- und Sandsteinen. Der Vortrieb wurde am Ostportal mit offener Bauweise, über die restliche Länge mit der NÖT durchgeführt und ein zum Teil vorhandener Erkundungsstollen zum endgültigen Regelquerschnitt aufgeweitet. Das Tunnelbauwerk entwässert in zwei Ulmendrängen mit Teilsickerrohren (PP DN 250) nach Nordosten in Fahrtrichtung Graz. Sie liegen auf einem Mörtelbett überdeckt mit einer gebundenen Sickerpackung. Im Bereich der offenen Bauweise befinden sie sich außerhalb des Tunnelquerschnitts. Beide Ulmendrängen sind via Putznischen zugänglich, die im Abstand von rund 72 m angeordnet sind. Im Bereich des Querschlags sind auf beiden Ulmenseiten TSR verlegt. Diese enden kurz vor dem Entlüftungsschacht. Etwaiges durchsickerndes Bergwasser aus dem Bereich des Schachtes wird über Entwässerungsrinnen und eine Querausleitung in die Ulmendrainage weitergeleitet. Für die Fahrbahntwässerung sind PP Rohre (DN400) installiert. Das Gefälle führt die Fahrbahnwässer zum Westportal in Fahrtrichtung Graz. Eine Frostkofferdrainageleitung aus PP (DN150) ist über die gesamte Tunnellänge verlegt. Sie verläuft parallel und leicht erhöht gegenüber der Fahrbahntwässerung. Bei TM30,45 im PS01 wird sie mit der Fahrbahntwässerung zusammengeführt. Das anfallende Wasser landet so in der GSA. Die Frostkofferdrainage wie auch die Fahrbahntwässerung sind über Putzschächte erreichbar. Sie sind in Fertigteilbauweise ausgeführt [24].

#### **Verwendete Werkzeuge**

Die Drainagespülung wird mit einem Fahrzeug der Straßenmeisterei Graz-Süd vorgenommen. Die Spülung wird mit einer Bombendüse unter Hochdruck bei 130 bis 140 bar am Spülfahrzeug beim Vorschub bzw. Zurückziehen gereinigt (Abbildung 19). Für die Steuerung der Geschwindigkeit der Bombendüse beim Vorschub von zirka 1 m/s steht eine Bremseinrichtung am Spülfahrzeug bereit. Beim Zurückziehen liegt die Geschwindigkeit zirka bei einem halben Meter je Sekunde. Die Spülzeiten wurden bei der Reinigung am 10. und 11.04.2019 jeweils für mit Versinterung belastete und unbelastete Abschnitte zwischen den dort befindlichen Putznischen aufgenommen (Abbildung 20) [24].

### **Härtestabilisatoren**

Im Tunnel Himmelreich werden zum Zeitpunkt der am 11. und 12. April 2019 durchgeführten und begleiteten Drainagereinigung schon seit 4 Jahren Baypure-Tabs-Härtestabilisatoren verwendet. Der Einsatz dieser Härtestabilisatoren wurde infolge zunehmender, an den Drainagerohren anhaftender Versinterungen initiiert. Mit ihnen ist eine Verbesserung der Situation rund um feste Sinterablagerungen gelungen, sodass Versinterungen lose, mithin spülbare Konsistenz aufweisen.

### **Reinigungsaufwand**

Das Spülen des Entwässerungssystems folgt einem jährlichen Intervall. Ein Abschnitt mit erhöhter Versinterung liegt beispielsweise ab dem Querschlag zum Entlüftungsschacht von zirka TM 500 bis zum Nordportal am südwestlichen Ulm vor. Das Vorhandensein von Versinterungen wird in den Spülgeschwindigkeiten angedeutet (siehe Abbildung 20).

Die Reinigung von Haltung zu Haltung begleiten ein Vor- und Nachreinigen des Putzschachtes mit dem Hochdruckreiniger sowie ein Entnehmen etwaiger Reste der in Netzen verlegten Härtestabilisatoren. Durch das langsamere Einziehen der Spüldüse erfolgt die Drainagespülung. Anhand der optischen Kontrolle des Restwassers (siehe Abbildung 19) wird über den Spülerfolg entschieden. Die Anfertigung eines Spülprotokolls unterbleibt üblicherweise [22].



**Abbildung 19: Putzschaft im Tunnel Himmelreich mit verunreinigtem Restwasser bei der Drainagereinigung.**

		Westportal								
		Gefälle der Drainageleitung								
NORDSEITE	Ulmendrainage nordseitig	PN01	PN02	PN03	PN04	PN05	PN06	PN07		
		10+139,45	10+211,45	10+283,45	10+355,45	10+427,45	10+499,45	10+571,45		
		69,45	141,45	213,45	285,45	357,45	429,45	501,45		
		6	12	18	24	30	36	42		
		PN01-FN02	PN02-FN03	FN03-FN04	PN04-FN05	FN05-FN06	PN06-FN07	FN07-FN08		
		82,00	82,00	82,00	82,00	82,00	82,00	82,00		
		5	5	5	5	5	5	5		
		16,40	16,40	16,40	16,40	16,40	16,40	16,40		
									Ostportal	
		PN08	PN09	PN10	PN11	PN12	PN13	PN14		
	10+643,45	10+715,45	10+787,45	10+859,45	10+931,45	11+003,45	11+063,45			
	573,45	645,45	717,45	789,45	861,45	933,45	993,45			
	46	54	60	66	72	78	83			
	PN08-FN09	FN09-FN10	FN10-FN11	PN11-FN12	FN12-FN13	PN13-FN14	FN14-Ende			
	82,00	82,00	82,00	82,00	82,00	70,00	52,00			
	5	5	5	5	5	5	4			
	16,40	16,40	16,40	16,40	16,40	14,00	13,00			

		Westportal									
SÜDSEITE	Ulmendrainage südseitig	PN01	PN02	PN03	PN04	PN05	PN06	PN07	PS07_1(QS)	PS07_2(QS)	
		10+139,45	10+211,45	10+283,45	10+355,45	10+427,45	10+499,45	10+556,00	10+577,87	10+584,13	
		69,45	141,45	213,45	285,45	357,45	429,45	486,00	464,13	507,87	
		6	12	18	24	30	36	41	-	-	
		PN01-FN02	PN02-FN03	FN03-FN04	PN04-FN05	FN05-FN06	PN06-FN07	FN07-FN08	PN07-PS07_1	PS07-PS07_2	
		82,00	82,00	82,00	82,00	82,00	82,00	82,00	30,00	30,00	
		7	7	8	8	7	7	5	4	4	
		11,71	11,71	10,25	10,25	11,71	11,71	13,67	7,50	7,50	
									Ostportal		
		PN08	PN09	PN10	PN11	PN12	PN13	PN14			
	10+643,45	10+715,45	10+787,45	10+859,45	10+931,45	11+003,45	11+063,45				
	573,45	645,45	717,45	789,45	861,45	933,45	993,45				
	48	54	60	66	72	76	83				
	PN08-FN09	FN09-FN10	FN10-FN11	PN11-FN12	FN12-FN13	PN13-FN14	FN14-Ende				
	82,00	82,00	82,00	82,00	82,00	70,00	52,00				
	5	5	5	6	5	5	3				
	16,40	16,40	16,40	13,67	16,40	14,00	17,33				

\* Abstand von Haltung zu Haltung + ca. 10m bzw. bis Ende Drainageleitung  
 \*\* auf ganze Minuten gerundet

PN... Putznische mit Fertigteilschaft  
 QS... Querschlag mit Putzschaft für Ulmendrainage  
 PS... Putzschaft

**Abbildung 20: Spülzeiten des Tunnels Himmelreich. Die Abschnitte mit höherem Versinterungspotenzial zeigen sich anhand langsamerer Spülgeschwindigkeiten [22].**

**Versinterungspotenzial des Tunnels**

Abbildung 20 stellt die Spülgeschwindigkeiten entlang der nord- und südseitigen (blau und grün) Ulmendrainage dar, in Übereinstimmung mit den Schilderungen seitens der Techniker vor Ort kennzeichnet sie einen Bereich mit höherem Versinterungspotenzial ab dem Querschlag. Dieser liegt südseitig in Fließrichtung ab dem Querschlag (siehe QS), in dem bei der Drainagespülung auch feste Versinterungen auftreten (Abbildung 21) [22].



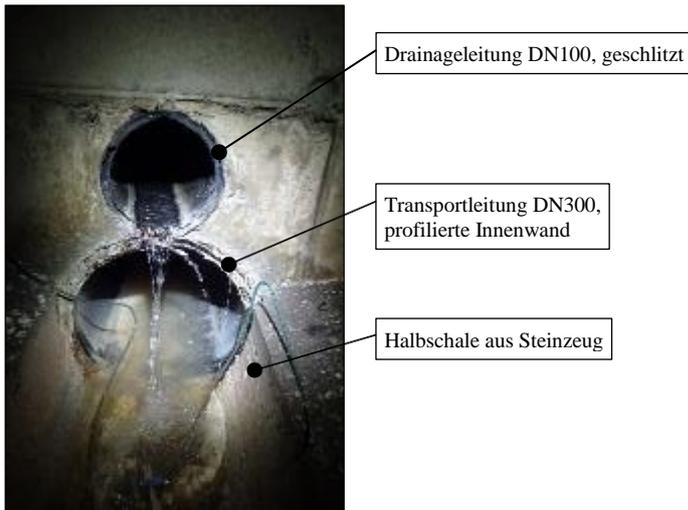
**Abbildung 21: Feste Versinterungsprobe aus der südlichen Ulmendrainage auf 1 x 1 cm Raster [24].**

#### **4.2.2.1.7 Tunnel Reinertshof**

Der Tunnel Reinertshof ist ein 645m langer, nord-süd-ausgerichteter, zweiröhriger Straßentunnel in Bayern 5 km jenseits der österreichischen Staatsgrenze, Teil der deutschen A7 und Europastraße 532 zwischen Tirol und Bayern. Er ist 2008 fertiggestellt und auf die ganze Länge in offener Bauweise erbaut worden. Die Instandhaltung des Tunnels erfolgt seitens der Autobahndirektion Südbayern.

Der Regelquerschnitt weist für jede Fahrtrichtung ein kastenförmiges Profil auf. Beide Profile sind aneinandergelagert. Infolge der Grundwasserverhältnisse wurde das Bauwerk auf Streifenfundamenten gegründet. Zur Vorbeugung gegen Auftriebskräfte wurden entlang beiden Röhren zwei Reihen von jeweils 15 Überlaufbrunnen (Durchmesser von 300 mm) im Abstand von 48 m hergestellt.

Das Entwässerungsschema des Tunnels Reinertshof weist ulmseitige Drainagen, eine Tragschichtdrainage, eine Transportleitung für das Grundwasser, eine Streckenentwässerung im westlichen Querschnitt und eine Fahrbahntwässerung via Hohlborddrinnen auf. Beiderseits des Tunnels anfallendes Sickerwasser wird über Teilsickerrohre aus PVC mit einem Durchmesser von 355 mm und einer Schlitzbreite von 1,2 mm gefasst. Beide Drainageleitungen verlaufen entlang dem ost- und westseitigen Ulm in Richtung Nordportal. Die zur Fassung des Grundwassers dienlichen Brunnen sind über Brunnenschächte von der Fahrbahn zugänglich. Das überlaufende Grundwasser läuft über ein leichtes Gefälle in die aus Steinzeug hergestellten Halbschalen, welche an eine sogenannte Transportleitung im Durchmesser von 300mm anschließen. Diese Leitung weist eine Innenprofilierung auf. Gleich oberhalb der Transportleitung befindet sich die geschlitzte Tragschichtdrainage mit einem Durchmesser von 100mm (Abbildung 22) [24].



**Abbildung 22: Transport- und Drainageleitung der Oströhre im Zugangsschacht ausgeführt in Ortbetonbauweise im Tunnel Reinertshof [24].**

### Verwendete Werkzeuge

Für die Reinigung in den Drainagen der Oströhre wird eine Granat-Bomben-Düse mit 8 Rückstrahldüsen eingesetzt. In den in stark versinternten Bereichen der Weströhre wird eine Rotations-/Vibrationsdüse benutzt. Sie befindet sich auch im Einsatz in der Transportleitung zum Aufbrechen der innenliegenden Versinterungsplatten [24].

### Härtestabilisatoren

Baypure-Tabs-Härtestabilisatoren werden seit 2014 verwendet. Sie werden in den Brunnen sowie in der Transportleitung eingehängt. Abbildung 23 veranschaulicht ihre Anwendung in dem Überlaufbrunnen und der Transportleitung des Tunnels Reinertshof [24].



**Abbildung 23: Nachbestückte Härtestabilisatoren, 8x500g in Transportleitung, 6x500g im Überlaufbrunnen [24].**

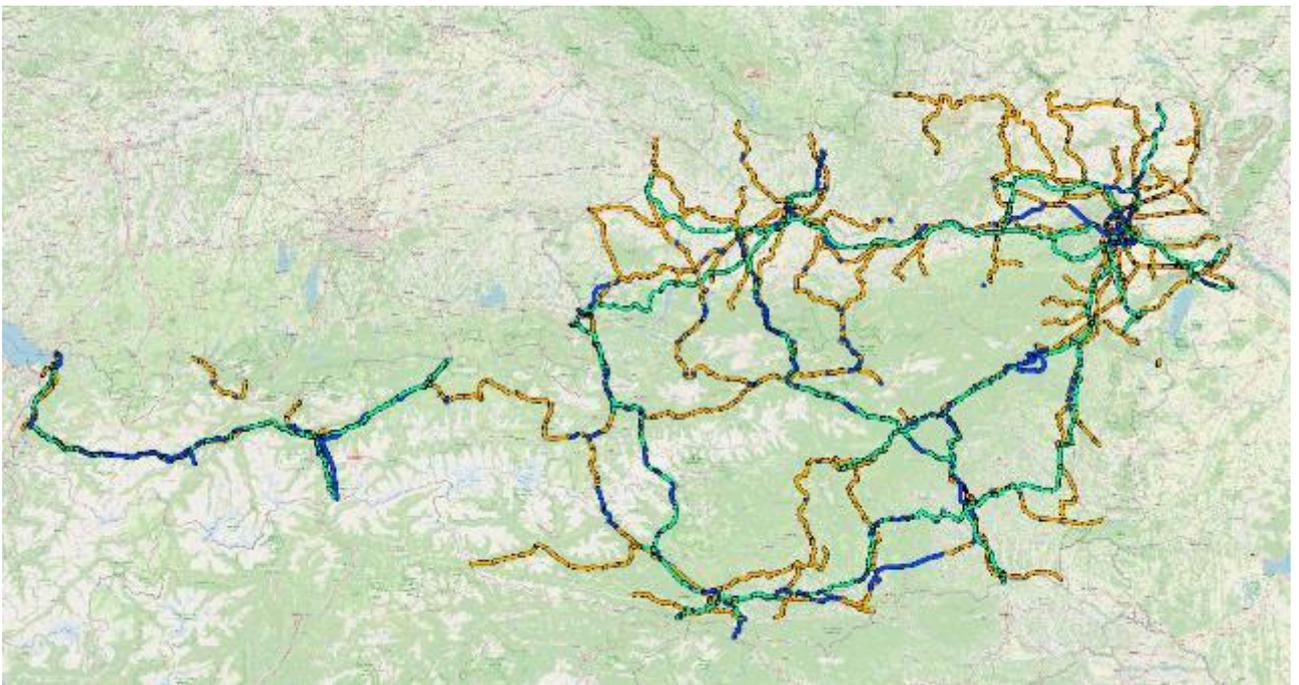
### Reinigungsaufwand

Die Drainagespülungen werden halbjährlich durchgeführt, im Mai und September üblicherweise, wo am 06.05.2019 teilgenommen wurde. Es werden dazu generell keine Spülprotokolle erstellt.

Für die Reinigung der ulmseitigen Drainageleitung genügt einmaliges Spülen. Die Spülung der Tragsichtdrainage erfolgt zwei Mal. In der Transportleitung zum Entwässern des Grundwassers wird oft drei Mal die Spülung wiederholt. Zusätzliche Zeitverzögerungen ergeben sich, wenn die Spüldüse in gebrochenen, groben, sich im Rohr verklausenden Versinterungen feststeckt und ein Düsenwechsel von der Granat-Bomben-Düse zur Rotations-/Vibrationsdüse nötig wird [24].

### **Versinterungspotenzial des Tunnels**

Das Versinterungspotenzial des Tunnels Reinertshof konzentriert sich auf die Transportleitung, in der das aus den Brunnen überlaufende Grundwasser aufgenommen wird. Eine exemplarische Versinterungsprobe des Tunnels ist in Abbildung 12 rechts ersichtlich. Solcherlei Versinterungen verursachen die erheblichen Mehraufwände bei der Reinigung der Transportleitung [24].



**Abbildung 24: Übersicht Österreichs des ÖBB-Schienennetzes (orange), des ASFINAG Straßennetzes (grün) und der Tunnelbauwerke (blau).**

#### **4.2.2.2 Datenhaltung im Hinblick auf Versinterungspotenzial**

Um die Aussagekraft der aus den Betriebsdaten und der Bestandsdokumentation der Tunnelerrichtung zu erhöhen, werden verschiedene Optionen der digitalen Erfassung der versinterungsrelevanten Parameter evaluiert. Für die Evaluierung wird die Software QGIS (Version 3.14) genutzt, eine Open Source Software, in der eine geografische Karte (basemap, OpenStreetMap, GoogleMaps) und zusätzliche geografische Darstellungen (z.B. Geologielayer) hinterlegt werden können. Die geografische Lage und die Geometrie der

Tunnels für Straße und Eisenbahn werden dabei mit einer Abfrage von Shapefiles auf der Internetseite „<https://overpass-turbo.eu/>“ effizient samt Metadaten wie Länge, Betreiber, Bundesland etc. extrahiert, um eine Weiterverarbeitbarkeit in QGIS als eigene QGIS-Entities auf einem eigenen Layer sicherzustellen. Abbildung 24 veranschaulicht orange das Schienennetz der ÖBB und grün das Verkehrsnetz der ASFINAG. Tunnelbauwerke sind blau als QGIS-Entities markiert. Diese einzelnen Entities lassen sich mit Metadaten wie Spezifikationen verwendeter Rohre des Entwässerungssystems verknüpfen sowie auch mit Links zu Plandarstellungen wie Regelquerschnitten (Abbildung 25). Die exemplarische Darstellung von Metadaten des Wiltener Tunnels in Innsbruck zeigt mit blauer Schrift Verlinkungen zu planlichen Dokumenten. Die Metadaten lassen sich unaufwändig mit dem Hinzufügen neuer Spalten in einer Excel-Tabelle adaptierbaren, in dem QGIS Projekt neu laden und aktualisieren. Die hier dargestellte Option einer GIS-Nutzung führt gewissermaßen zu einem geografisch abfragbaren Projektordner des Tunnels zur raschen Auffindung versinterungsrelevanter einzelner Dokumente.

Die digitale Zusammenführung der versinterungsrelevanten Parameter in Übersichtslängenschnitten beginnt hingegen beinahe regelmäßig bei der zeitaufwändigen Redigitalisierung analog vorliegender geologischer Längenschnitte, Tunnelbänder usw. Angesichts dessen empfiehlt sich eine verbesserte Integration der Bestandsdokumentation aus dem Bau für das Betriebsmanagement sowie eine digitale Datenhaltung versinterungsrelevanter Parameter aus dem Betrieb. Dies erfordert ein digitales Datenmodell, in dem die Stationierung ein zentraler Abfrageparameter sein kann, damit eine Gegenüberstellung wie in den Übersichtslängenschnitten gelingt und keine Bindung an lizenzpflichtige Software wie die hier genutzten Autodesk-Lizenzen entsteht, wenn beispielsweise Spülzeiten und -aufwände im Betrieb durch die Anlagentechniker vor Ort nachgeführt werden müssen.



**Abbildung 25: Darstellung optionaler Metadaten des Wiltener Tunnels (A12 in Innsbruck) mit QGIS.**

#### 4.2.2.3 Erhebungen im Staatsarchiv

Das Österreichische Staatsarchiv besteht aus den Abteilungen Allgemeines Verwaltungsarchiv (AVA), Archiv der Republik (AdR), Finanz- und Hofkammerarchiv, Haus-, Hof- und Staatsarchiv und dem Kriegsarchiv. Bei Erhebungen im Staatsarchiv ist zu beachten, dass eine von heute zurückgerechnet 30-jährige Archivsperrfrist gilt, in der keine Akten ausgehoben werden dürfen. Mittels Antrags kann diese Sperrfrist auf 20 Jahre reduziert werden. In der Abteilung AVA befindet sich unter anderen die Bestandsgruppe „Verkehr“ (Vk), die sich wiederum in mehrere Bestände gliedert. Auch das AdR besitzt eine Bestandsgruppe „Verkehr“ (Vk). Beide Bestandsgruppen „Verkehr“ sind im Hinblick auf Erhebungen wichtig, die sich auf die für das Versinterungspotenzial relevanten Parameter wie Gebirge, Stützmittel und Entwässerungssystem konzentrieren. Das Staatsarchiv enthält Planmaterial der Entwässerungsschemen der untersuchten nachfolgenden Tunnels und diese sind im Literaturverzeichnis [22] referenziert. Aus Längenschnitten gehen die Fließrichtung sowie die angetroffene Geologie des Vortriebs hervor. Die verwendeten Ausbaumaterialien können aus Tunnelquerschnitten ersehen werden. Rückschlüsse auf die Mengen anfallenden Bergwassers während des Vortriebs lassen sich aus den Unterlagen kaum herleiten. Auf eine Dokumentation vorkommender Versinterungen oder Versinterungsgrade in den Tunnelbauwerken gibt es in den Archivmaterialien keinen Hinweis [22].

##### 4.2.2.3.1 Semmering Haupttunnel

Der Vortrieb des Semmering Haupttunnels erfolgt mittels mehrerer Angriffe, wobei im Längenschnitt 10 Durchschläge vermerkt sind. Das zudringende Bergwasser wird via Schächte abgefördert. Im am Staatsarchiv aufliegenden Kartenmaterial und Planoperat wird das Bergwasser durch einen gemauerten, in der Mitte der Tunnelsohle liegenden Sohlenkanal

abgeleitet. Dieser ist mit einer Abdeckplatte versehen (o.V.: Façade am Semmering-Haupttunnel, 1853, in: ÖStA, AVA, Vk, IX, D67, Kt.-Nr. 76).

#### **4.2.2.3.2 Neuer Semmeringtunnel**

Der Neue Semmeringtunnel ist mit der belgischen Bauweise als eingleisiger Paralleltunnel errichtet worden. Nach Fertigstellung ist der Alte Semmering Haupttunnel mit einem Betoninnengewölbe versehen worden. Auf die Innenlaibung des Gewölbebetons ist eine Isolierung angebracht und anschließend eine Granitverkleidung gemauert worden. Drainagerohre (D=10cm) führen in die seitlichen Sohlenkanäle (ÖBB (Hrsg.): Der neue Semmeringtunnel. Der größte Investitionsbau der Nachkriegszeit, Wien, Verlag Ployer & Co, 1952). Zur Entwässerung kamen neben den Entwässerungsbohrlöchern auch Oberhasli-Ableitungen zum Einsatz, die mittels aus kurzen Schläuchen und Zement hergestellter Hohlräume die zutretenden Bergwasser ableiten. Der Name stammt von einem Kraftwerksanlagenbetreiber Oberhasli AG in der Schweiz (ARGE Semmeringtunnel (Hrsg.): Umbau Alter Semmeringtunnel. Typenblatt für Entwässerungsarbeiten, 1953, in: ÖStA, AdR, Vk, PldUG, Kt.-Nr. alt M587).

#### **4.2.2.3.3 Arlbergtunnel**

Für die Größe des Ausbruchs war die Wasserableitung im Arlbergtunnel eine wesentliche Komponente, da in einer Steinschichtung die Abführung des Bergwassers erfolgt und diese zusätzliche Fläche im Ausbruchsquerschnitt braucht. Der von St. Anton nach Langen mit einer Tunnellänge von 10.247,5 m führende Arlbergtunnel verfügt über einen mittigen, gemauerten Sohlenkanal. Der Arlbergtunnel wird 2006 sicherheitstechnisch nachgerüstet und dabei eine Spritzbetonversiegelung aufgetragen. Die Bergwasserzutritte werden beim bestehenden Mauerwerk durch streifenförmige Flächendrains (Breite jeweils max. 1 m) in Tunnelquerrichtung gefasst und zu den Ringfugen geleitet. Dort wird ein Schlitz im Mauerwerk (B/H min. = 20/10 cm) hergestellt, durch den das Bergwasser in ein Vollrohr (DN 100 mm) fließt, das das Bergwasser in das Mehrzweckrohr (DN 250 mm) des Sohlkanals zuleitet.

#### **4.2.2.3.4 Tauerntunnel**

Der Tauerntunnel weist eine Länge von 8526,30 m auf. Zur Entwässerung dient ein mittiger, gemauerter Sohlenkanal. Für die Ableitung des Bergwassers gibt es zum Teil eigens vorgetriebene Entwässerungstollen, die zur Wasserfassung als First- und Sohlstollen vorgetrieben sind und mehrere Meter Länge aufweisen. Im Tauerntunnel kommen zusätzlich die Entwässerungselemente Trockenschichtung, Wellblechabdeckungen und Entwässerungsschlitze (alle 2 m) vor (K.k. Eisenbahnbaudirektion (Hrsg.): Entwässerungsanlagen im Schuttkegel des Hierkaarbaches, 1904, in: ÖStA, AdR, Vk, GluVM, LBT 19, 27029, 36.ad).

#### 4.2.2.3.5 Kaponigtunnel

Im Zuge des zweigleisigen Ausbaus der Tauernbahn ist auf der Südrampe der Kaponigtunnel hergestellt worden. Die Ausbruchslaibung wird mit Spritzbeton gesichert. Bei Herstellung des Innenausbaus wird nach der Betonage des Widerlagers die Ulmendrainage (DN 250mm) beiderseitig verlegt, auf einem Mörtelbett gebettet und der Bereich darüber mit Filterbeton aufgefüllt. Im Füllbeton oberhalb des Sohlengewölbes befinden sich die Sohl drainage (DN 250mm), ein PVC-Rohr (DN 250 mm) und ein Sohlkanal (DN 250 mm). Für die Ulmendrainage werden in der Spritzbetonaußenschale Entspannungslöcher gebohrt (1 Stk./lfm) (ÖBB (Hrsg.): Projekt zweigleisiger Ausbau der Tauernbahn. Kaponigtunnel. Ausführungsprojekt. Mallnitz – Lindisch. 47.000 – 53.766. Regelquerschnitt mit Sohlgewölbe. 124/2.02, 1996, in: Lehrstuhl für Subsurface Engineering, MU Leoben).

Die Tabelle 7 zeigt den bei den Erhebungen im Staatsarchiv vorgefundenen chronologischen Verlauf der verwendeten Entwässerungssysteme und Stützmittel von Eisenbahntunneln auf. In ihr lässt sich der Übergang verwendeter Stützmittel von Ziegeln/Bruchsteinen zu Spritzbeton erkennen. Entsprechend den Inhalten des Staatsarchivs liegt darin keine Dokumentation von Versinterungen auf. Eine geringere Versinterungsbildung bei Tunneln mit gemauertem Ausbau gegenüber jenem mit Spritzbeton ist in [16] anhand ausschließlich des Sonnsteintunnels dokumentiert.

**Tabelle 7: Chronologischer Vergleich von Stützmitteln und Elementen des Entwässerungssystems in Eisenbahntunneln [22].**

Alter Semmering-Haupttunnel	Arlbergtunnel	Tauerntunnel	Neuer Semmering-tunnel	Kaponigtunnel	Zammertunnel
Jahr ca. 1853	Jahr ca. 1880	Jahr ca. 1908	Jahr ca. 1952	Jahr ca. 1996	Jahr ca. 1999
Länge 1430 m	Länge 10.248 m	Länge 8.526 m	Länge 1512 m	Länge 5.096 m	Länge 2.335 m
mittiger Sohlenkanal mit Abdeckplatte	mittiger Sohlenkanal mit Abdeckplatte	mittiger Sohlenkanal mit Abdeckplatte	seitlicher Entwässerungskanal mit Abdeckplatte	Ulmendrainage beiderseitig, Sohl drainage beiderseitig	Ulmendrainage beiderseitig
Baustoffe Bruchstein, Ziegel	Baustoffe Bruchstein, Ziegel, Steinschichtung	Baustoffe Bruchstein, Ziegel, Steinschichtung	Baustoffe Beton, Granitsteine	Baustoffe Spritzbeton, Sicherungselemente aus Stahl, Zementsuspension,	Baustoffe Spritzbeton, Sicherungselemente aus Stahl, Zementsuspension,

				Ortbeton, Kunststoffe, Bewehrung	Ortbeton, Kunststoffe, Bewehrung
keine Abdichtung	keine Abdichtung	Wellblechabdec- kungen	Isolierung	Regenschirm- abdichtung aus Folie und Vlies	Regenschirm- abdichtung aus Folie und Vlies
keine Entwässerungs- stollen	seitliche Entwässerungs- stollen	seitliche Entwässerungs- stollen	keine Entwässerungs- stollen	keine Entwässerungs- stollen	keine Entwässerungs- stollen

#### 4.2.2.4 Auswahl geeigneter Auslagerungsplätze zur Untersuchung der Materialwirksamkeit

Basierend auf den Erkenntnissen der Bauwerkserhebungen, können für die Auslagerung von neuartig entwickelten Kunststoffmaterialien mehrere Bauwerke vorgeschlagen werden. Als besonders interessant werden hierbei der Lainzer-Tunnel, der Tunnel Steinhaus und das Zentrum am Berg (ZaB) in Eisenerz genannt.

#### 4.2.3 Arbeitspaket 2c – Versinterungsstudie Halbschalen

Dieses Arbeitspaket zielt darauf ab, kommerzielle Kunststoffe in Form von Halbschalen unter realen Bedingungen zu untersuchen. Die Kunststoffe sollen in Hinsicht auf Unterschiede in der Versinterungsneigung kommerziell verfügbarer Kunststoffe ausgewählt und für die Versuchsanordnung vorbereitet werden. Da in Tunnelbauwerken erfahrungsgemäß primär Drainagerohre aus PVC-U, PP und PE verbaut sind, wurden diese drei Werkstoffe für die Versuche ausgewählt.

Seitens der ÖBB Infrastruktur AG wurde aufgrund langjähriger Erfahrungen mit dem Drainagesystem und dort anfallenden Versinterungen der Lainzer Tunnel ausgewählt. Die dort befindlichen Fluchtstollen (Notausstiege) weisen jeweils ein sehr unterschiedliches Versinterungsverhalten auf, wobei die folgenden beiden Notausstiege ausgewählt wurden:

- NA Nikolaitor
- NA Markwardstiege

Nachdem sich die Teststrecken auf die Fluchtstollen begrenzen, ist eine uneingeschränkte Zugänglichkeit der Teststrecken möglich. Beide Fluchtstollen verfügen über zwei Ulmendrainagen mit einem Innendurchmesser von 160mm. Sowohl vor dem Einlegen der Halbschalen in die Drainagen (Abbildung 26), als auch bei den Kontrollterminen wurden die Vor-Ort-Parameter gemessen (vgl. Tabelle 8).

**Tabelle 8: Vor-Ort-Parameter der im Lainzer Tunnel gewählten Notausstiege für die Auslagerung der Halbschalen**

Parameter	NA Nikolaitor	NA Markwardstiege
06.06.2018		
Temperatur [°C]	13,5	13,2
pH-Wert	8,1	8,4
elektr. Leitfähigkeit [µS/cm]	780	1.334
03.08.2018		
Temperatur [°C]	14,2	13,4
pH-Wert	8,1	8,5
elektr. Leitfähigkeit [µS/cm]	810	1.401

(a)



(b)



**Abbildung 26: Ulmendrainage des Notausstiegs Markwardstiege vor (a) und nach (b) dem Einlegen und Fixieren der Halbschalen**

Die Proben wurden in den Tunnel ausgelagert und in regelmäßigen Abständen begutachtet. Aufgrund der zum Zeitpunkt der Auslagerung vorherrschenden Wettersituation, weisen beide Ulmendrainagen einen äußerst geringen Wasserandrang auf (rd. 20-30 ml/s).

Im Laufe der folgenden Monate wurde das Versinterungsverhalten der eingelegten Halbschalen beobachtet und dokumentiert.

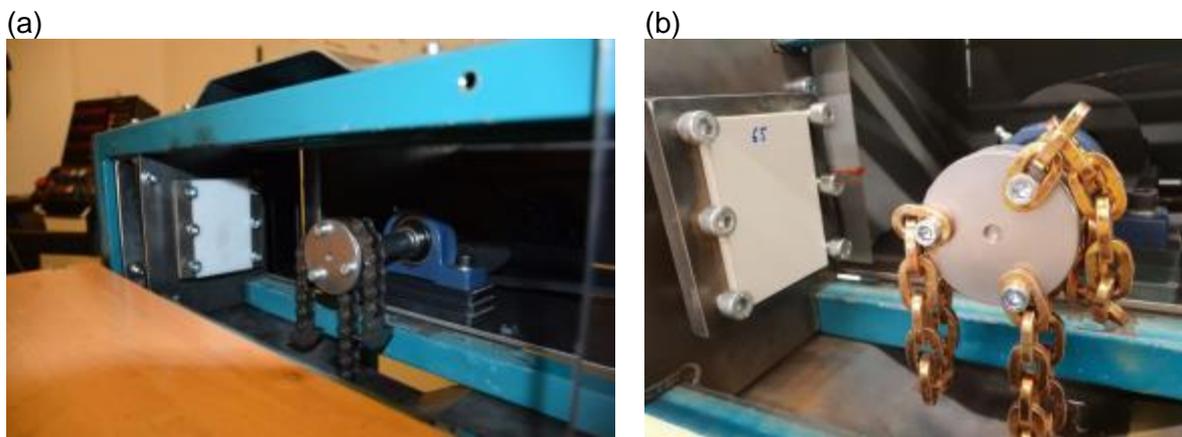
Neben dem Lainzer Tunnel (Bearbeitung BOKU) wurde der von der ASFINAG betriebene Tunnel Steinhaus (Bearbeitung IB Strobl) ausgewählt, um kommerzielle Kunststoffe unter realen Bedingungen zu untersuchen. Im Tunnel Steinhaus sind Probleme mit Versinterungen in den Drainagerohren aus der Vergangenheit und aktuell bekannt (siehe 4.2.2.1.3). Zur Beurteilung wurde ein Versinterungsprüfstand mit Rohren installiert. Eine genauere Beschreibung dazu ist in Kapitel 4.3.3 (AP 3c) zu finden.

### 4.3 Arbeitspaket 3 – Methodenentwicklung

Arbeitspaket 3 dient wie eingangs erwähnt der Entwicklung, Konzeptionierung und Inbetriebnahme von projektspezifischen Prüfständen. Konkret wurden drei unterschiedliche Prüfstände im Projekt PolyDrain entwickelt. In Arbeitspaket 3a, wird ein Prüfstand zur beschleunigten Überprüfung der Kettenschleuderbeständigkeit entwickelt. Arbeitspaket 3b dient der Entwicklung eines Prüfstandes zur kontrollierten Einbringung und Untersuchung von Versinterungen im Laborbetrieb. In Arbeitspaket 3c wurde ein Prüfstand zur Untersuchung des Einflusses von Schlitzern in kommerziellen Rohrwerkstoffen entwickelt.

#### 4.3.1 Arbeitspaket 3a – Entwicklung Verschleißprüfstand

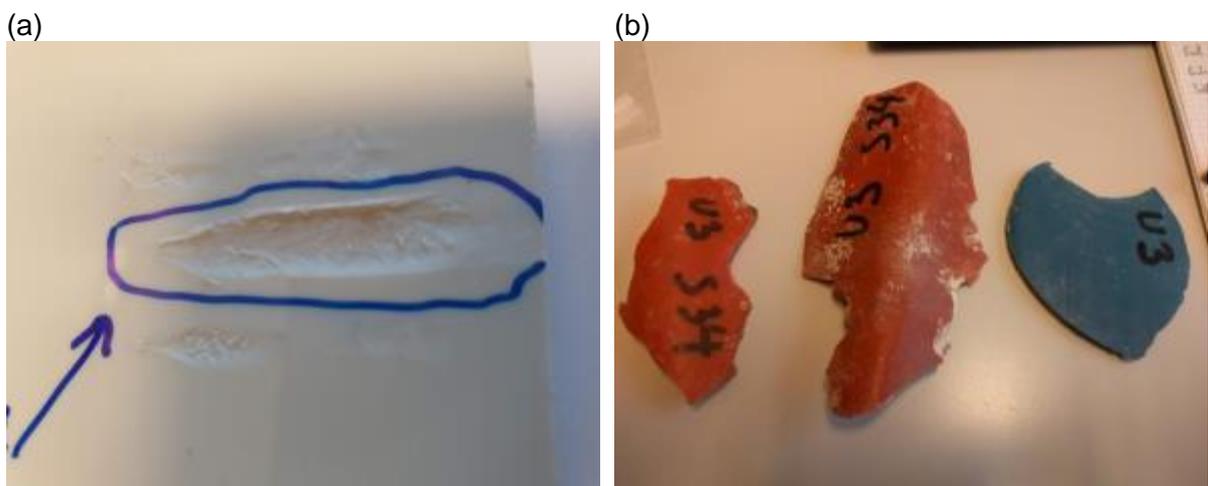
Die Feststellung der Beständigkeit gegenüber einer Kettenschleuderbelastung von Drainagerohren aus Kunststoffen ist in der Richtlinie Tunnelentwässerung mit einem Feldversuch an Rohren festgelegt [4]. Da sich diese Art von „Full-scale test“, bei der ganze Rohre benötigt werden, nicht zur Materialentwicklung eignet, wird im Rahmen des Projekts ein Prüfstand zur Nachstellung der Kettenschleuderbelastung im Labormaßstab angefertigt (Abbildung 27). Wie nachfolgend gezeigt, können mit dem Prüfstand kommerziell erhältliche Stahlglieder- oder Gelenksbolzenketten verwendet werden. Im konkreten Fall wurden Produkte der Firma ENZ Technik AG verbaut.



**Abbildung 27: Prüfstand zur Bestimmung der Kettenschleuderbeständigkeit mit (a) Gelenkbolzen- oder (b) Gliederketten**

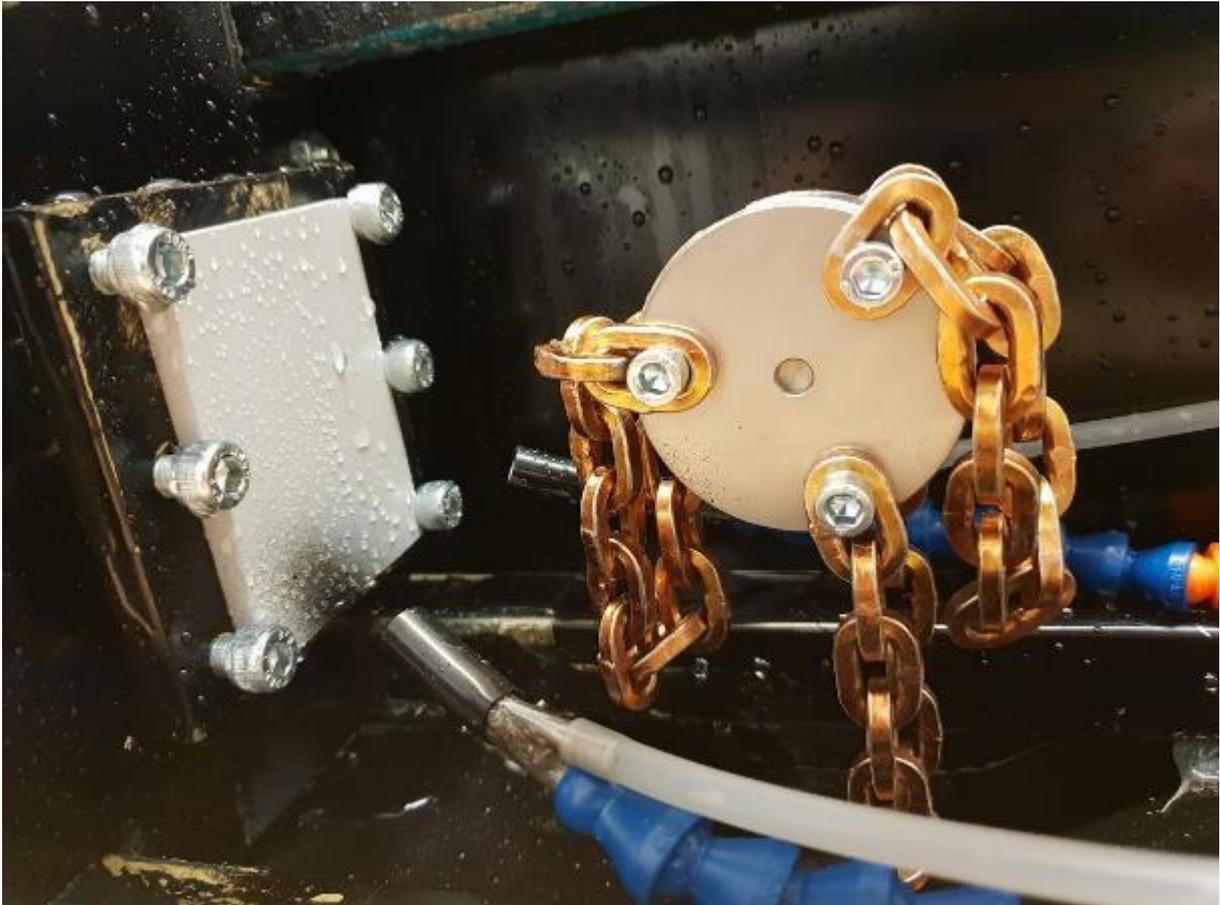
Die Kettenschleuder des Prüfstands wird dabei von einem Elektromotor mit variabel einstellbarer Drehzahl (0-3000 U/min) angetrieben. Die maximale Drehzahl von 3000 U/min wurde dabei in Absprache mit Herstellern konventioneller Kettenschleudern festgelegt. Nach Anlaufen der Kettenschleuder kann die zu prüfende Kunststoffprobe (ca. 68x80 mm<sup>2</sup>) seitlich zugestellt werden. Gleichzeitig können die durch den Aufprall der Kettenschleuder entstehenden Kräfte mittels piezo-elektrischer Kraftmessdose aufgezeichnet werden. Erste

Versuche an konventionellen Kunststoffen, die für Drainagerohre verwendet werden (PE & PP), wurden für eine „feasibility“ Studie bereits durchgeführt. Vermutlich bedingt durch die fehlende Kühlwirkung, die in der Realität in Form der Hochdruckspülung vorhanden ist, kam es bei Versuchen mit hohen Drehzahlen jedoch zu einer anderen Versagensart als es in der Realität beobachtet wird. Wie in Abbildung 28a dargestellt, werden die Proben mehr aufgeschmolzen als oberflächlich spröde geschädigt oder gar in Scherben zerschlagen, wie es in der Realität (Abbildung 28 b) vorkommen kann. Daher wurde eine nachträgliche Kühlung mittels Sprühnebeldüsen (Abbildung 29) eingebaut.



**Abbildung 28: Versagensart von Proben im Kettenschleuder-Versuch (a) im Gegensatz zum realen Versagensbild (b) bei Tunnelreinigungen [6]**

Um die reale Versagensart besser nachstellen zu können, wird der Prüfstand dahingehend mittels einer Wasserkühlung der Proben adaptiert.



**Abbildung 29: Prüfstand zur Bestimmung der Kettenschleuderbeständigkeit mit (a) Gelenkbolzen- oder (b) Gliederketten**

#### **4.3.2 Arbeitspaket 3b – Entwicklung Versinterungsprüfstand**

Der an der TU Graz (IAG) entwickelte Versuchsaufbau für das Arbeitspaket 3b (Entwicklung Prüfstand Versinterungen im Labor) für das Projekt Polydrain simuliert im Labormaßstab die Abscheidung von Kalziumkarbonat-Mineralen aus einer an diesen Mineralen übersättigten Lösung. Der Fokus der Untersuchungen liegt auf der Kristallisation von Kalziumkarbonat-Mineralen an der Oberfläche individueller Kunststoffe. Die chemische Zusammensetzung, Temperatur und Fließrate der Versuchslösung sind dabei so gewählt, dass karbonatische Ausfällungen innerhalb von Minuten bis zu einigen Tagen auftreten. Hierfür wird ein Versuchswasser kontinuierlich über die Mischung einer z. B. 10 molaren  $\text{CaCl}_2$  + 0,1 molaren  $\text{SrCl}_2$  Stammlösung mit einer 10 molaren  $\text{NaHCO}_3$  haltigen Stammlösung generiert und diese gemischte Reaktionslösung über eine 2 Meter lange Fließstrecke über laminares Fließen drainiert, wobei die Durchflussgeschwindigkeit etwa 9 ml/min beträgt (siehe Abbildung 30). Die Experimentdauer betrug in diesem Ansatz 10 Tage bei einer konstanten Wassertemperatur von  $20^\circ\text{C}$  und einem initialen pH Wert von  $8.0 \pm 0.1$ . In diesem labordesignten Teststand

werden die praxisrelevanten Parameter, wie pH-Wert, Lösungsinhaltstoffe und Temperatur, sowie die räumlich-zeitliche Entwicklung der Zusammensetzung des Wassers und der karbonatischen Abscheidungen an den Kunststoffoberflächen entlang der Fließstrecke in-situ und über verteilte Probennahmen und anschließende hydro- und materialchemische Analysen untersucht. Die zu testenden Kunststoffe sind hierbei jeweils am Anfang und am Ende von zwei parallel aufgebauten Fließstrecken in speziell hierfür angefertigten Halterungen in die Lösung eingebracht worden. Letztere erlauben eine Differenzierung zwischen Mineral-Aufwachsen und Mineral-Aufwachsen mit Mineral-Sedimentation (heterogene versus homogene Kristallnukleation). Während die Abscheidungen an der Oberseite der individuellen Kunststoffe in der Lösung auch durch Mineral-Sedimentation durch in Suspension befindliche Kristalle entstanden sein könnten, sind die gebildeten Präzipitate auf der Unterseite der individuellen Kunststoffe ausschließlich an den einzelnen Kunststoffen aufgewachsen. Die Beurteilung des Abscheidungsverhaltens von Mineralen und deren Bildungsrate erfolgt über hydrochemische Computer-Modellierungen. Die auf den individuellen Kunststoffen gebildeten Abscheidungen werden mineralogisch und chemisch charakterisiert und mittels bildgebender Verfahren, wie räumlich hochauflösender elektronenoptischer Analytik, untersucht. Erste Versuchsserien zeigen, dass in dem bisher gewählten Ansatz, die Ausfällungen – gleichartig zu Versinterungen in realen Tunnelbauwerken – überwiegend aus dem Mineral Kalzit bestehen (siehe Abbildung 31).

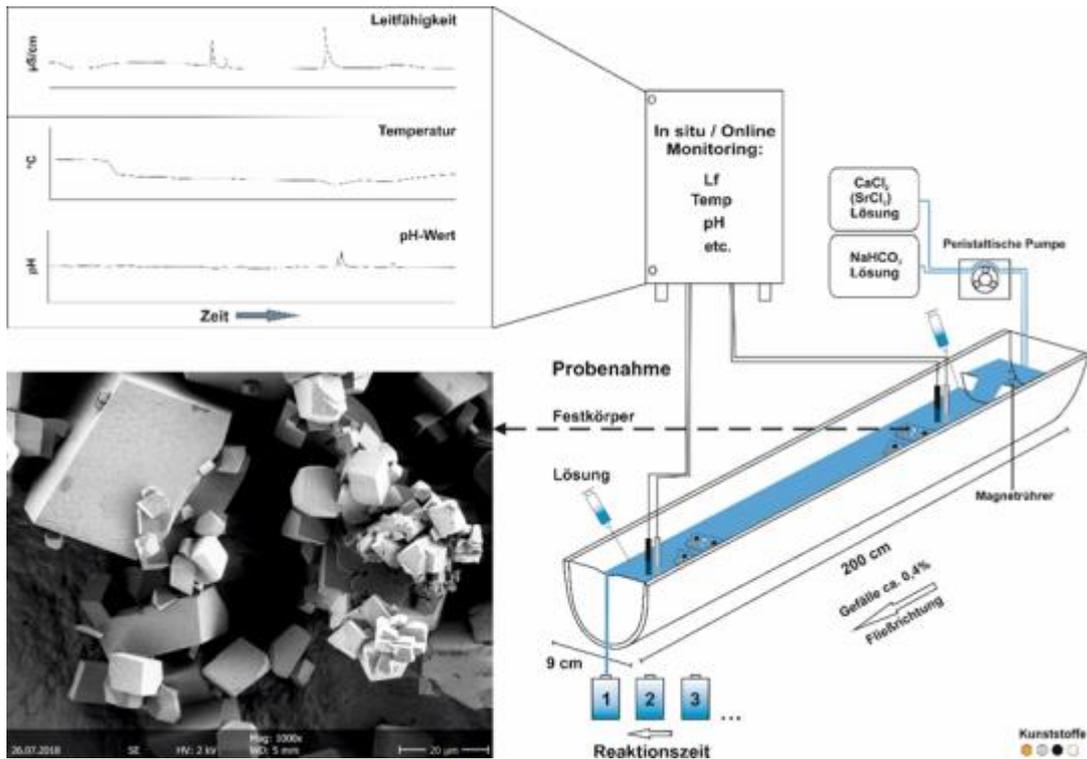


Abbildung 30: Neu entwickelter Versuchsaufbau für das Arbeitspaket 3b. Im Labormaßstab werden Abscheidungen von Kalziumkarbonat-Mineralen aus einer übersättigten Lösung simuliert und mittels bildgebender Verfahren im Detail analysiert [25,26].

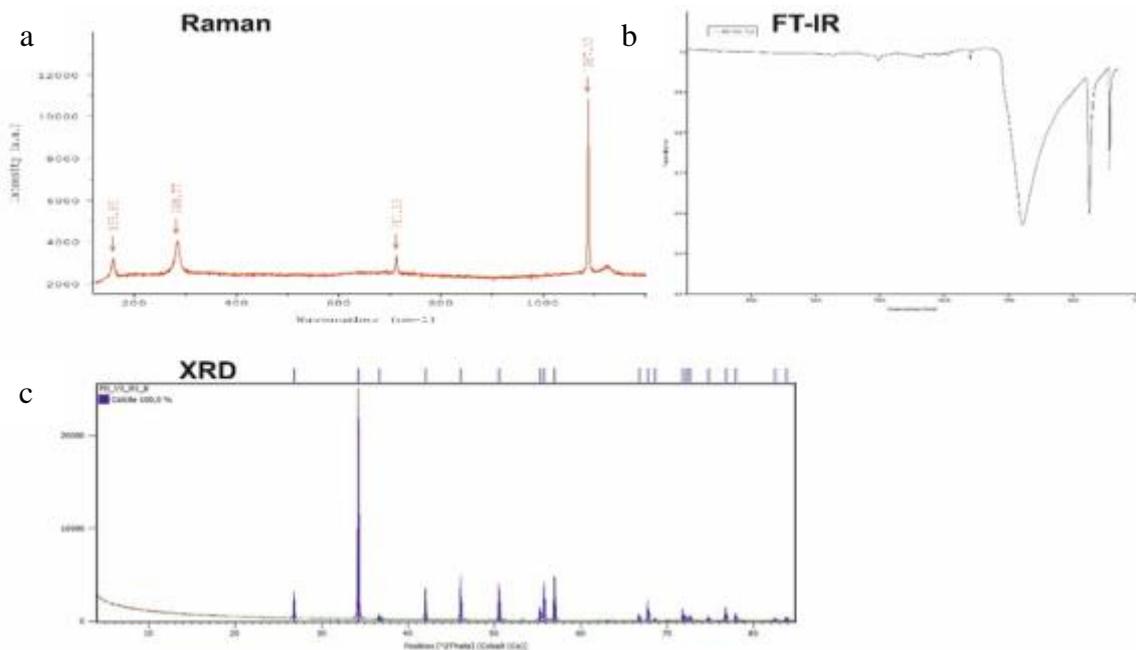


Abbildung 31: Mineralogische Analytik mittels Raman-Spektren (a), Infrarotspektroskopie (FT-IR) (b) und Röntgendiffraktometrie (XRD) (c) eines neu gebildeten Präzipitats an der Kunststoffoberfläche von PVC. Die Spektren zeigen das Mineral Kalzit an und sind unter den derzeit gewählten repräsentativ für die Ausfällungen auf den verschiedenen Kunststoffoberflächen.

#### 4.3.3 Arbeitspaket 3c – Entwicklung Drainage-Schlitz Prüfstand

Nach Erhebung der Randbedingungen für die Konzeption des Prüfstandes wurde der Prüfstand nach teilweiser Vorfertigung in der Werkstatt des IB Strobl am 16.02.2018 vor Ort installiert (Abbildung 32). Für die Prüfung von Rohrstücken mit 2 Metern Länge und Durchmessern von 100 mm wurden sechs Anschlussstellen hergestellt. Es wurde ein jeweils 2 Meter langes PP-Rohr (bräunlich mit weißer Innenbeschichtung), ein PE-Rohr (schwarz) und ein PVC-Rohr (orange) angeschlossen. Weiters wurden zwei PP-Rohre mit unterschiedlichen Filter-Schlitz-Typen (gebohrt, geschnitten: nicht entgratet; gebohrt, geschnitten: entgratet) angeschlossen.

(a)



(b)



**Abbildung 32: Inbetriebnahme des Drainage-Schlitz-Prüfstands durch IB-Strobl (a) und Einbringung unterschiedlicher Drainage-Schlitz Geometrien (b)**

Im Beobachtungszeitraum Februar 2018 bis Juli 2018 konnten an allen eingebauten Rohrtypen Versinterungen in Form von mm-starken Belägen an den Rohrwandungen beobachtet werden. Die Filter-Slitze beider Versuchsrohre waren ab Juni 2018 fast vollkommen versintert – also nicht mehr funktionstüchtig (Abbildung 33).

(a)

(b)



**Abbildung 33: Versinterung der Drainageschlitz (a) und Ablagerung von Versinterungsschichten innerhalb der ersten 4 Monate.**

Auf Grundlage einer visuellen Beurteilung der Sinteraktivität in den eingebauten Rohren kann den PVC-Rohren die stärkste und den PE-Rohren die geringste Sinterkrustenbildung zugeordnet werden.

Der bei der Konzeption des Prüfstandes vorgesehene und bei der Inbetriebnahme am 16.02.2018 eingebaute Spritzbeton wurde am 25.06.2018 ausgebaut, da dieser bereits so stark versintert war, dass der Wasserdurchfluss zu den Testrohren behindert wurde. Die mit Sinter zementierten Spritzbetonkomponenten (Abbildung 34) wurden dem Institut für Angewandte Geowissenschaften der TU Graz zur weiteren Bearbeitung übergeben.



**Abbildung 34: Ausbau des Spritzbetons aus dem Drainage-Prüfstand aufgrund starker Zementation durch karbonatische Versinterung**

Auffallend war, dass sich nach den Wintermonaten 2018/2019 in allen Testrohren aus kommerziellen Kunststoffen die Sinterkrusten von den Rohrwandungen lösten (vermutlich auf unterschiedliche thermische Ausdehnung zurückzuführen) und auf den Rohrböden ansammelten (Abbildung 35). Bei der Spülung (Erhöhung der Fließgeschwindigkeit durch Entfernung der Durchfluss Drosselung) der Rohre im April wurden diese Krusten ausgeschwemmt.



**Abbildung 35: Abgeplatzte Sinterkrusten in der Drainage-Teststrecke des Tunnels Steinhaus**

Im April 2019 wurden im Zustrom-Bereich zu den Testrohren aus kommerziellen Kunststoffen Probenträger mit sowohl neu entwickelten Kunststoffmischungen (Abbildung 36a), als auch kommerziellen Kunststoffen (Abbildung 36b) eingebaut.



**Abbildung 36: Einbau der neu entwickelten Kunststoffmischungen als gestanzte Proben (Durchmesser 10mm) in Stahlhalterung (a) und verschiedener kommerzieller Kunststoffe (b) am Drainageausgang des Tunnels Steinhaus**

Am 12.08.2019 wurden die teils stark mit mineralischen Ablagerungen überzogenen Proben­träger wieder ausgebaut und der TU Graz zur weiteren Bearbeitung übergeben. In Folge einer offensichtlich zwischen 06.06.2019 und 12.08.2019 durchgeführten Drainage­reinigung/-spülung im Tunnel Steinhaus kam es zu einem starken Sedimentaustrag aus der Tunnel­drainage und in Folge zur Sedimentation in den Halbschalen der Messstelle, sodass die Proben­träger mit diesem allochthon eingetragenen Material vollständig zusedimentiert waren.

## 4.4 Arbeitspaket 4 – Materialentwicklung & Validierung

### 4.4.1 Arbeitspaket 4a – Entwicklung Kunststoffe

Ziel des Arbeitspakets 4 ist es, Kunststoffe mit verminderter Versinterungsneigung zu entwickeln, die hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften jedoch ebenfalls den Anforderungen eines Rohrwerkstoffes für Drainage-Rohranwendungen in Tunnel entsprechen.

Arbeitspaket 4a dient der Entwicklung der Kunststoffcompounds, bei denen eingearbeitete Stoffe zu einer verminderten Versinterungsneigung führen sollen. Nachfolgend sind die bisher entwickelten Compounds aufgelistet. Als Basismaterial wurde Polyethylen verwendet, da in der gegenwärtig verfügbaren Fachliteratur mit modifizierten PE-Typen bereits erste Erfolge in der Verminderung von Versinterungen erreicht wurden

Zur Herstellung wurde für alle Compounds das gleiche Ausgangsmaterial (PE-HD, Extrusionstyp (für Rohre geeignet) in Granulat-Form) verwendet. Für die Mischungen 2-6 wurde dieses mit den jeweiligen Additiven vermischt und zur Homogenisierung und zum Aufschmelzen bei 190°C 6 Minuten lang in einem Messknetzer (Fa. Brabender) geknetet. Anschließend wurden die so hergestellten Schmelzekuchen mittels Plattenpresse in Form gebracht. Die verwendeten Pressparameter sind in Tabelle 9: Prozessparameter beim Pressvorgang: dargestellt.

Die bisher hergestellten Modifizierungen sind in

Tabelle 10 dargestellt. Die Auswahl der Füllstoffe wurde einerseits in Hinsicht auf das Potential hinsichtlich einer Veränderung der Versinterungen und andererseits in Hinsicht auf die großtechnische Verfügbarkeit durchgeführt.

**Tabelle 9: Prozessparameter beim Pressvorgang:**

<b>Temperatur</b>	190	190	190	30
<b>Druck</b>	1	70	120	120
<b>Zeit (min)</b>	9	3	2	10

Da bei Probe 5 „PE + 4% Silan + 0,5% Peroxid“ eine Vernetzungsreaktion stattfinden soll, wurde dieses Material bei 80°C für 4 Tage ausgelagert und vernetzt. Aus den gepressten Platten wurden kreisrunde Probekörper mit 10 mm Durchmesser und 3 mm Dicke ausgestanzt und für Untersuchungen hinsichtlich der Versinterungsneigung an das IAG der TU-Graz übermittelt.

**Tabelle 10: Bisher entwickelte und untersuchte Material-Rezepturen**

Rezeptur	Material

Nr.	Kunststoff + Füllstoff
1	PE (rein)
2	PE + 4% Silan + 0.5% Peroxid
3	PE + 4% PEG
4	PE + 4% Natriumstearat
5	PE + 4% Ammoniumpolyphosphat
6	PE + 4% Stearinsäure
7	PE + 4% Zeolith
8	PE + 4% Mg(OH) <sub>2</sub>

#### 4.4.2 Arbeitspaket 4b – Verschleißwiderstand

Analog zu den Untersuchungen aus Kapitel 4.2.1 können auch die neu entwickelten Compounds hinsichtlich ihres Verschleißwiderstands mit dem entwickelten Prüfstand untersucht werden. Aufgrund bisheriger Beobachtungen hinsichtlich der Abnutzung der Oberfläche durch mechanische Reinigungsverfahren (vgl. Abbildung 10: ) ist es aus derzeitiger Sicht zielführender, im Volumen wirkende Füllstoffe, anstelle von aktiven Oberflächenschichten zu verwenden (Abbildung 37).

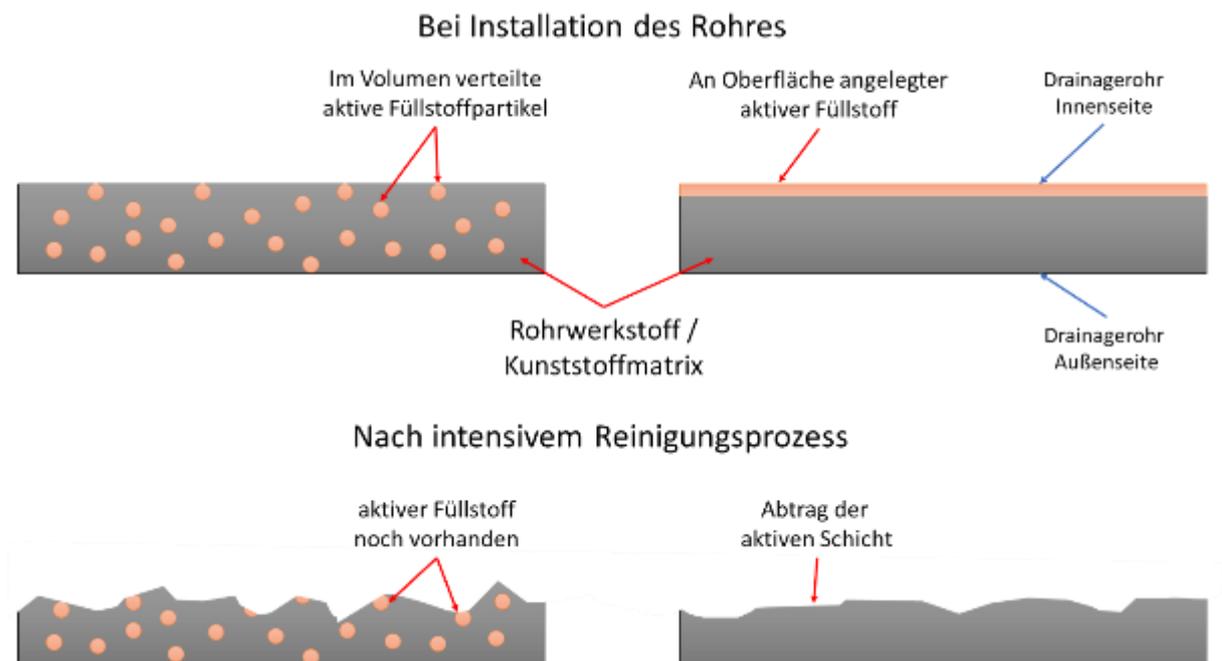


Abbildung 37: Schematische Darstellung der Vor- und Nachteile der Füllstoffverteilung in einer Rohrwand [11]

Da erste Untersuchungen an Proben ergaben, dass der Verschleißwiderstand gegenüber Kettenschleuderreinigung durch die verwendeten Füllstoffe nicht merklich beeinflusst wird, wurden keine weitergehenden Untersuchungen diesbezüglich durchgeführt. Um anderweitige

Einflüsse auf die mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe zu untersuchen, wurden ebenfalls klassische Methoden gewählt. In **Abbildung 38** sind die Ergebnisse von Biegeversuchen gemäß ISO 178 dargestellt. Wie aus den Kurven ersichtlich, gibt es keine signifikante Veränderung der Eigenschaften durch die Verwendung der eingesetzten Zusatzstoffe bei einer Konzentration von 4%.

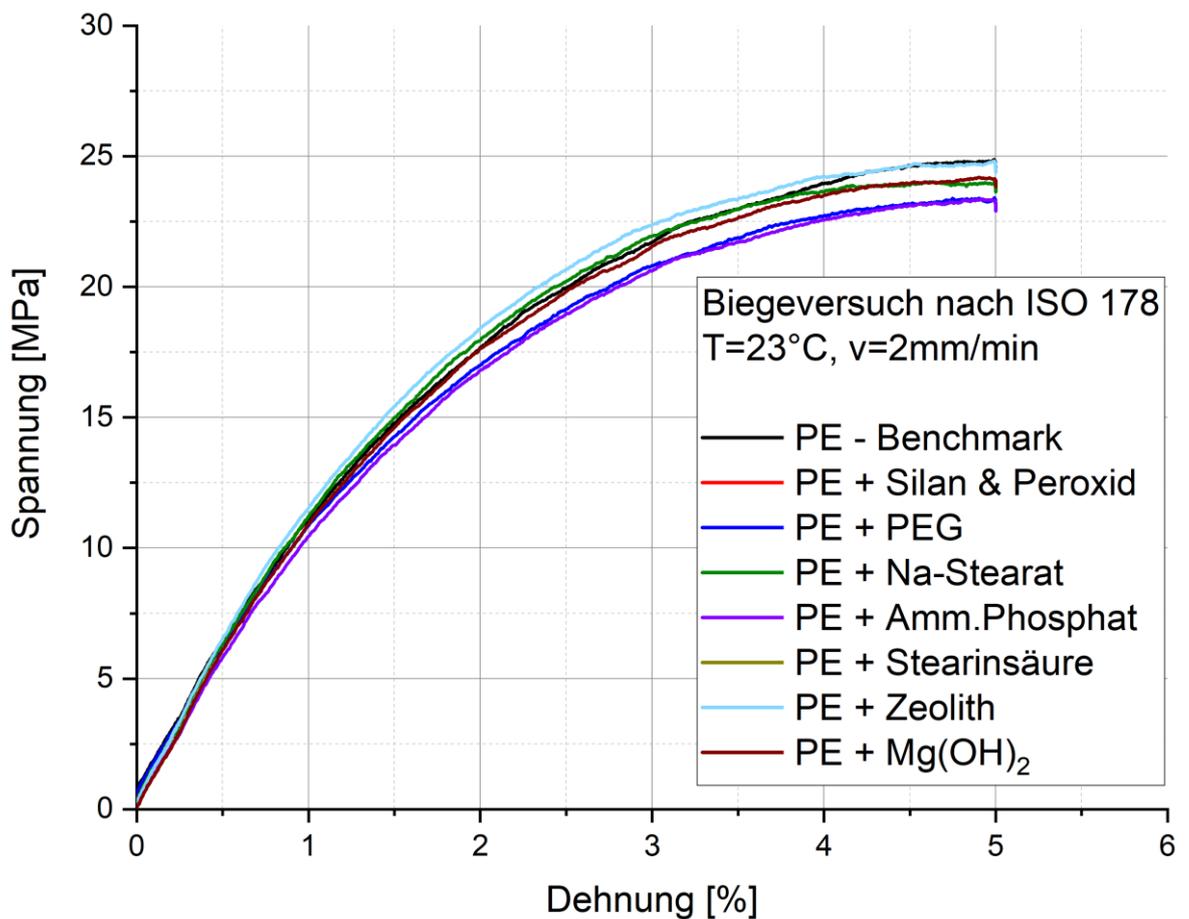


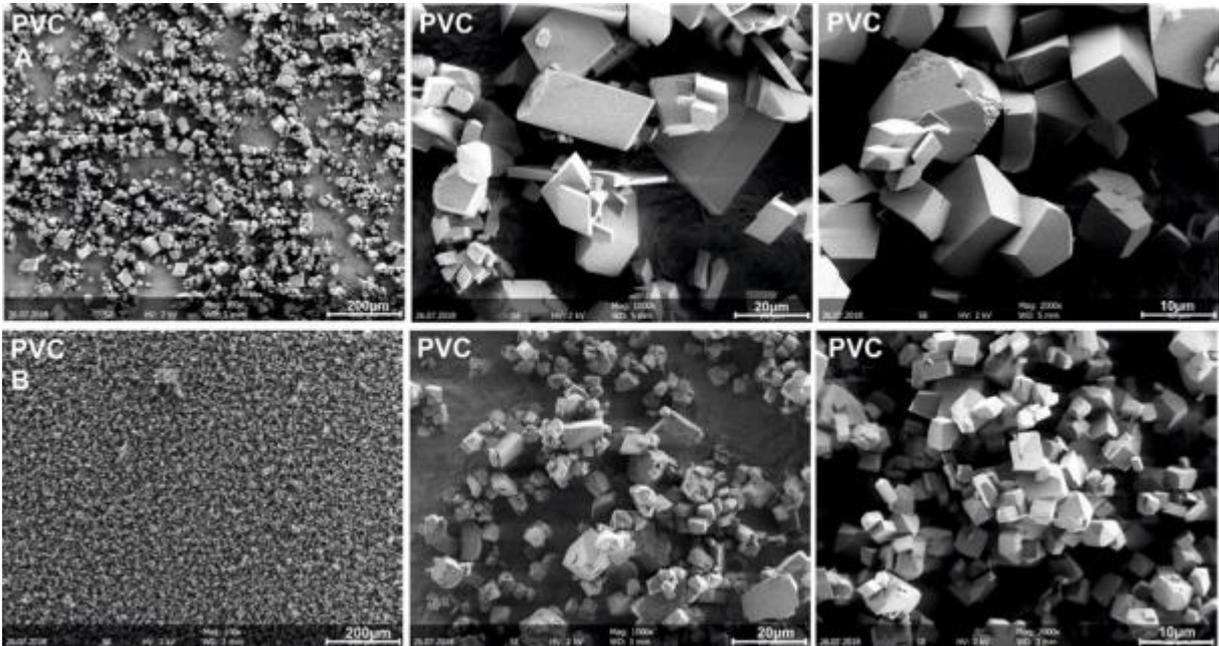
Abbildung 38: Untersuchung des mechanischen Verhaltens unter Biegebelastung, gemäß ISO 178.

#### 4.4.3 Arbeitspaket 4c – Versinterungsneigung

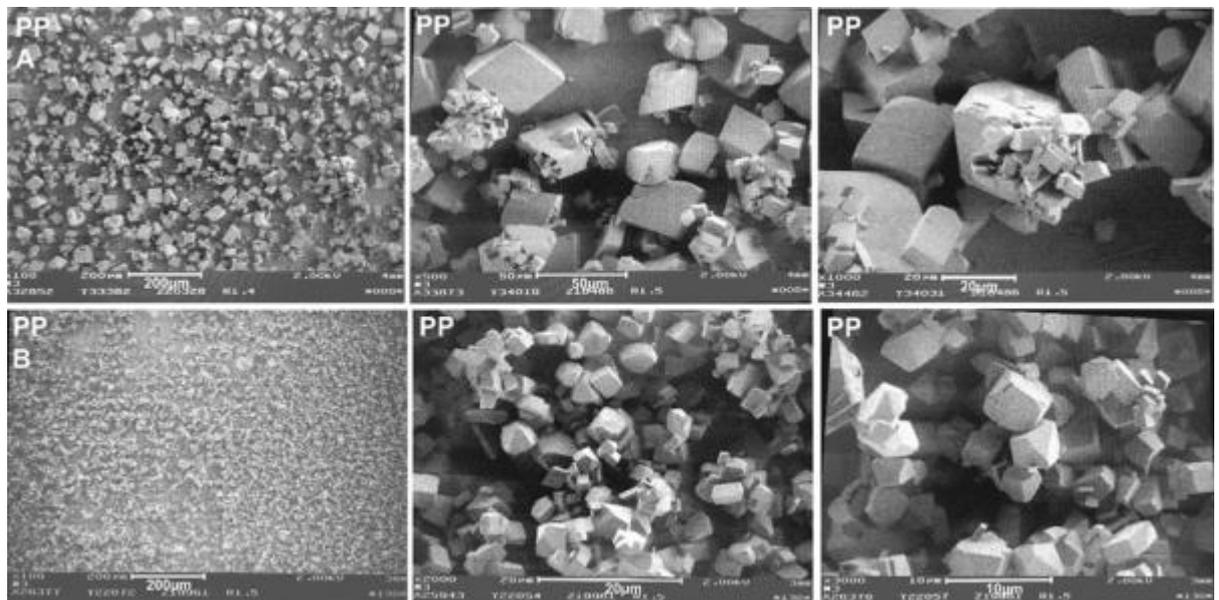
Zur Validierung des Prüfstandes und weiteren Untersuchung kommerzieller und vielerorts eingesetzter Werkstoffe wurden in einem ersten Schritt die Werkstoffe PVC, PP, PE, und PFA untersucht. Während es sich bei PVC, PP und PE um sehr bekannte und häufig eingesetzte Materialien in Drainagerohren handelt, wurde der Werkstoff PFA (Perfluoralkoxy) mituntersucht, da er aufgrund seiner chemischen Verwandtschaft zu Teflon (PTFE, Polytetrafluorethylen) ein zusätzlich interessanter Kandidat sein könnte.

Die karbonatischen Abscheidungen unterscheiden sich auf den individuellen Kunststoffoberflächen entlang der Fließstrecke. Die Kunststoffe, die am Anfang der Rinne in der Lösung eingelagert sind, zeigen deutlich größer ausgebildete Kristalle an ihrer Oberfläche als die Kunststoffe, die am Ende der Rinne in die Lösung eingebracht sind. Dies ist in der abnehmenden Übersättigung der Lösung an Kalzit im Verlauf der Fließstrecke begründet. Erste Rasterelektronenmikroskop (REM) Bilder zeigen die Kristallausbildungen in verschiedenen Auflösungen auf den getesteten Kunststoffen PVC, PP, PE und PFA jeweils am Anfang und am Ende der Fließstrecke. Die auf den individuellen Kunststoffoberflächen gebildeten Präzipitate zeigen generell ein ähnliches äußeres Erscheinungsbild bzw. einen vergleichbaren Habitus. Die in diesem ersten Versuchsansatz gebildeten Kalzit-Kristalle zeigen auf allen getesteten Kunststoffen eine typisch ausgeprägte Kristallgestalt (idiomorph) und sind hinsichtlich Kristallsystem und Kristallflächen rhomboedrisch ausgebildet. Auffällig ist, dass die an der Kunststoffoberfläche von PVC und PE gebildeten Abscheidungen im Vergleich zu den anderen getesteten Kunststoffen neben den größeren Kristallen auch kleinere Einzelkristalle direkt an der Kunststoffoberfläche aufweisen, insbesondere an der PVC Oberfläche (siehe Abbildung 39 und Abbildung 41). Bei den Materialien PFA und PP ist hingegen ein Aufwachsen von kleineren Kristallen auf größeren Kalzit-Kristallen zu beobachten, wobei die PFA Oberfläche deutlich mehr von derartigen verzweigten Kristallaggregaten besitzt als PP (siehe Abbildung 40 und Abbildung 42). Solche detaillierten Beobachtungen und die sich daraus ergebenden Mechanismen der Karbonat-Kristallnukleation und des weiteren Kristallwachstums haben eine wesentliche Bedeutung für die daraus resultierenden Gefüge und Konsistenzen der sich entwickelnden Ablagerungen in Tunnel drainagen. Vereinfacht können die Kunststoffe PFA und PP, sowie auch die Materialien PVC und PE - basierend auf den ersten Versuchsreihen - über die räumliche Verteilung und Anordnung der Kalzitkristalle an der Materialoberfläche charakterisiert werden. In weiteren Versuchen sollen materialspezifische Unterschiede und Abhängigkeiten auch in Hinsicht auf die potentielle Bildung von  $\text{CaCO}_3$  Polymorphe, deren Bildungsraten und Verteilung sowie auf

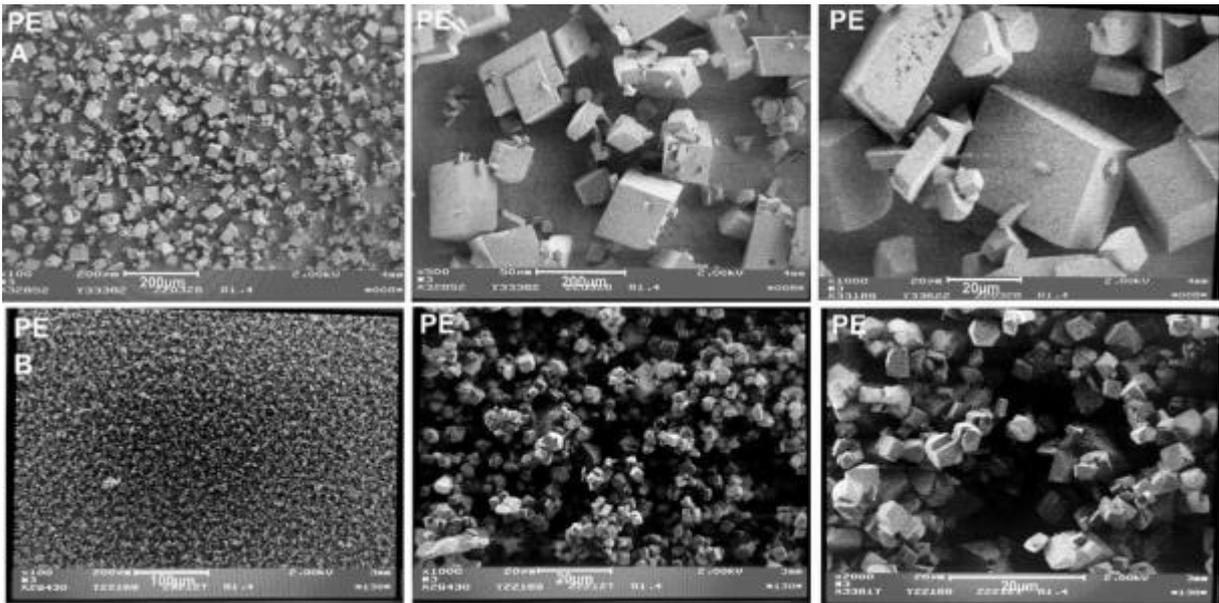
individuelle Kristallgestalt und räumliche Anordnung der Minerale zueinander experimentell evaluiert werden.



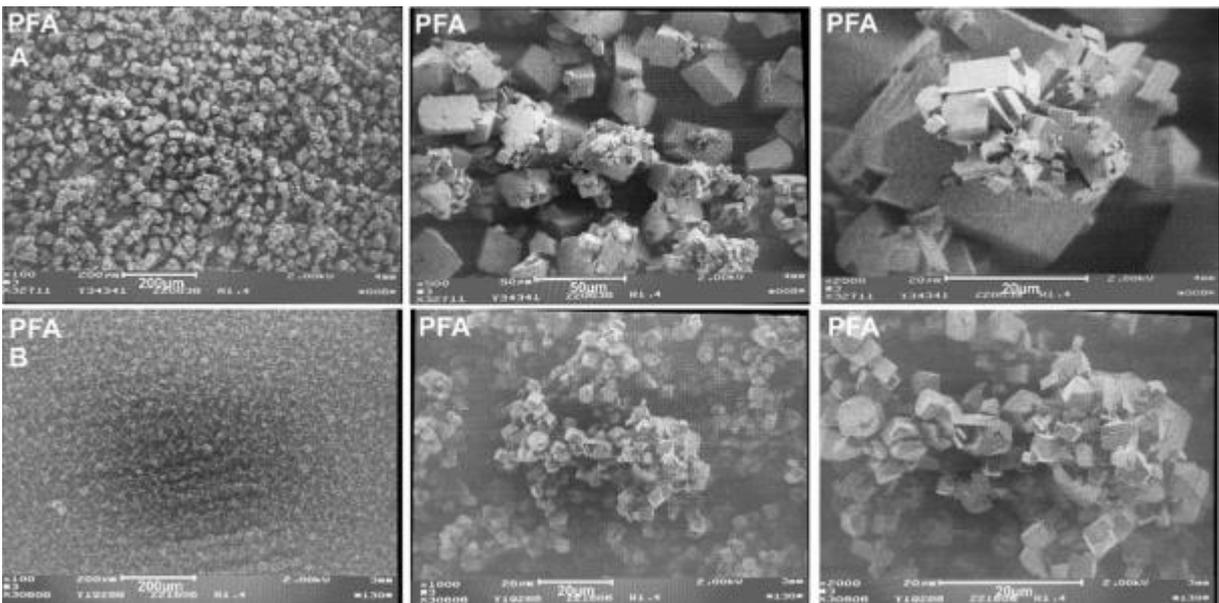
**Abbildung 39:** Übersichtsbild und Detailaufnahmen der neu gebildeten Kalzite an der Kunststoffoberfläche von PVC-U. Die obere Bildreihe (A) zeigt die ausgefallenen Kalzit-Kristalle an der Kunststoffoberfläche von PVC-U am Anfang der Rinne, während die unteren 3 Bilder (B) die aufgewachsenen Kristalle an der PVC-U-Oberfläche am Ende der Rinne darstellen.



**Abbildung 40:** Übersichtsbild und Detailaufnahmen der neu gebildeten Kalzite an der Kunststoffoberfläche von PP. Die obere Bildreihe (A) zeigt die ausgefallenen Kalzit-Kristalle an der Kunststoffoberfläche von PP am Anfang der Rinne, während die unteren 3 Bilder (B) die aufgewachsenen Kristalle an der PP-Oberfläche am Ende der Rinne darstellen.



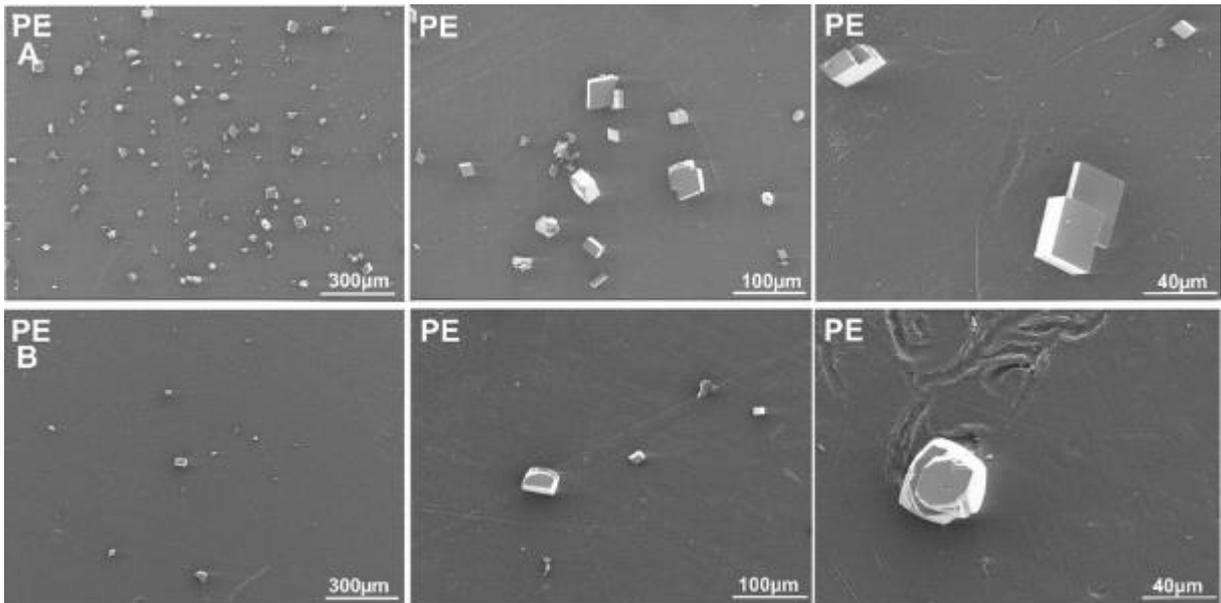
**Abbildung 41:** Übersichtsbild und Detailaufnahmen der neu gebildeten Kalzite an der Kunststoffoberfläche von PE. Die obere Bildreihe (A) zeigt die ausgefallenen Kalzit-Kristalle an der Kunststoffoberfläche von PE am Anfang der Rinne, während die unteren 3 Bilder (B) die aufgewachsenen Kristalle an der PE-Oberfläche am Ende der Rinne darstellen.



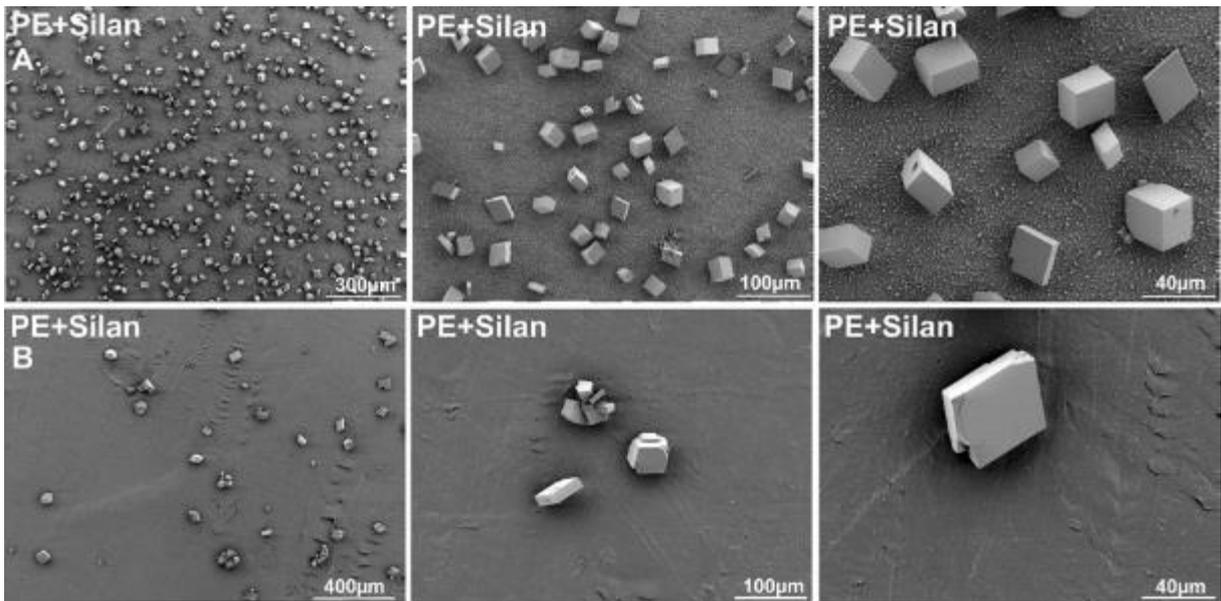
**Abbildung 42:** Übersichtsbild und Detailaufnahmen der neu gebildeten Kalzite an der Kunststoffoberfläche von PFA. Die obere Bildreihe (A) zeigt die ausgefallenen Kalzit-Kristalle an der Kunststoffoberfläche von PFA am Anfang der Rinne, während die unteren 3 Bilder (B) die aufgewachsenen Kristalle an der PFA-Oberfläche am Ende der Rinne darstellen.

Die in AP 4a neu entwickelten Kunststoff-Compounds wurden unter denselben Bedingungen im eigens dafür angefertigten Laborprüfstand (AP3b) getestet, wie die kommerziell verfügbaren Werkstoffe (PVC, PE, PP und PFA) in den Experimenten zuvor. Die karbonatischen Abscheidungen unterscheiden sich auf den individuellen

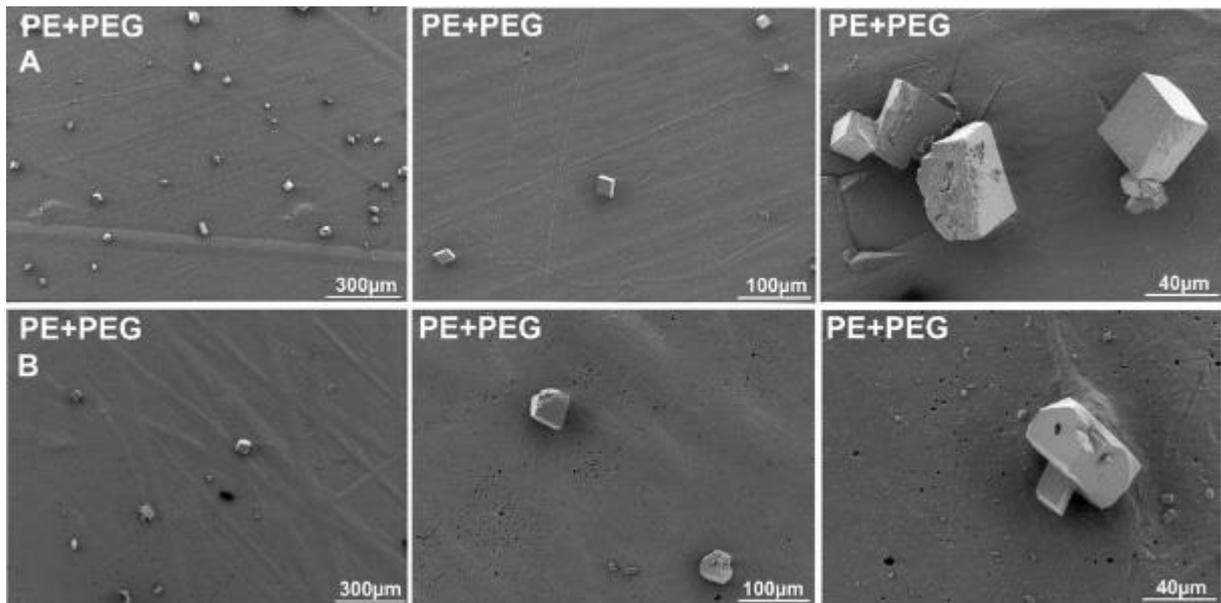
Kunststoffoberflächen entlang der Fließstrecke. Die Kunststoffe, die am Anfang der Rinne in der Lösung eingelagert sind, zeigen systematisch deutlich größer ausgebildete Kristalle an ihrer Oberfläche als die Kunststoffe, die am Ende der Rinne in die Lösung eingebracht sind. Dies ist in der abnehmenden Übersättigung der Lösung an Kalzit im Verlauf der Fließstrecke begründet. Erste Rasterelektronenmikroskop-Bilder (REM) der neu getesteten Kunststoffe PE (rein), PE mit 4% Silan + 0.5% Peroxid, PE mit 4 % Ammoniumpolyphosphat, PE mit 4 % Natriumstearat, PE mit 4 % Stearinsäure, PE mit 4 % Polyethylenglycol-co-Polyethylen und PE mit Zeolith stellen die Kristallausbildungen in verschiedenen Auflösungen jeweils am Anfang und am Ende der Fließstrecke dar. Der Kunststoff PE mit  $Mg(OH)_2$  befindet sich zum Zeitpunkt der Berichterstellung noch in der analytischen Auswertung. Die auf den individuellen Kunststoffoberflächen gebildeten Präzipitate zeigen generell ein ähnliches äußeres Erscheinungsbild bzw. einen vergleichbaren Kristall-Habitus. Die in diesem Versuchsaufbau gebildeten Kalzit-Kristalle besitzen auf allen getesteten Kunststoffen eine typisch ausgeprägte Kristallgestalt (idiomorph) und sind hinsichtlich Kristallsystem und Kristallflächen rhomboedrisch ausgebildet. Neben der elektronenoptischen Darstellung der Abscheidungen wurden quantitative Analysen mittels Säureaufschluss (6%ige  $HNO_3$ ) über die auf den jeweiligen Kunststoffoberflächen gebildeten Präzipitate durchgeführt, um so ein Ranking der getesteten Kunststoffmaterialien in Bezug auf die Tendenz zur Karbonat-Ablagerung zu erstellen. Erste Ergebnisse zeigen, dass es deutliche Unterschiede in der Nukleation/Keimbildung (Kristallithäufigkeit und Größe) und in den Gesamtmengen der gebildeten Kristalle auf den verschiedenen Kunststoffen gibt. Die Kunststoffe, die bei den Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen wenige Kristalle zeigen, weisen bei der quantitativen Analyse vergleichsweise hohe Abscheidungsmengen auf. Die Kunststoffe, welche bereits auf den REM-Bildern visuell am meisten Präzipitate auf ihren Oberflächen zeigen, liegen auch bei der quantitativen Klassifizierung im Bereich höchster Abscheidungsmengen. Die vorläufige Klassifizierung der Kunststoffe zeigt, dass gängige Materialien für Entwässerungssysteme (hauptsächlich PVC, PE und PP) vergleichsweise hohe Abscheidungsraten an ihren Oberflächen aufweisen, wohingegen die maßgeschneiderten Kunststoffe, insbesondere in den dynamischen Labortests, deutlich geringere Abscheidungsraten zeigen. Durch Analysen weiterer eingelagerter Kunststoffe in unterschiedlichen Settings (Labor vs. Tunnel drainage) wird diese erste und vorläufige Klassifizierung vervollständigt und verifiziert.



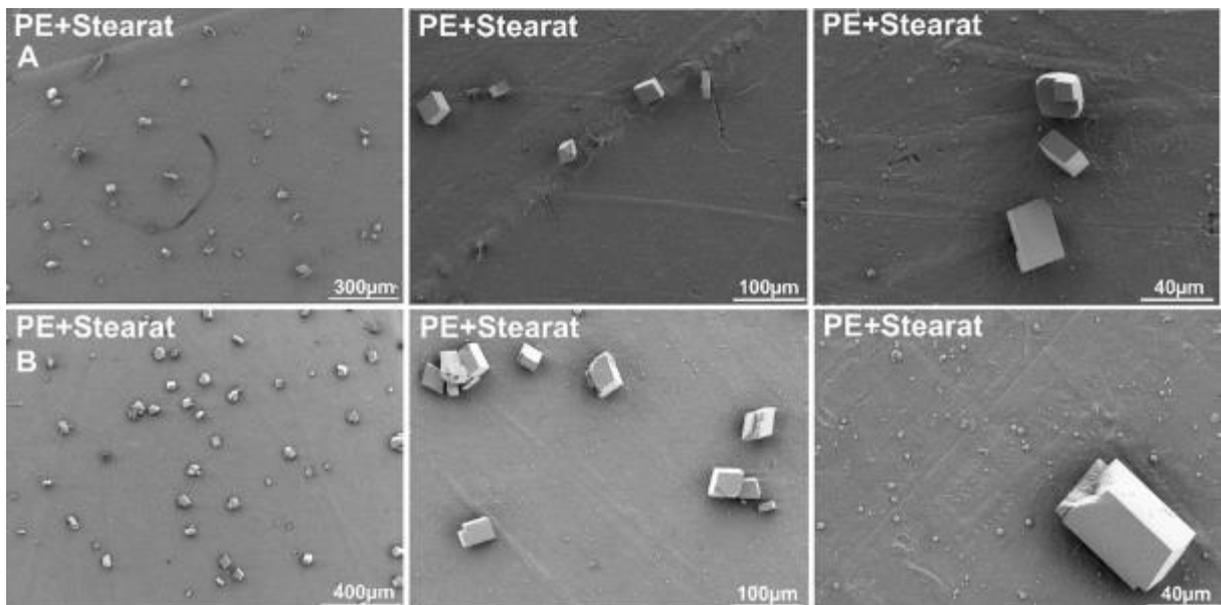
**Abbildung 43: Übersichtsbild und Detailaufnahme der neu gebildeten Kalzite an der Kunststoffoberfläche von reinem PE. Die obere Bildreihe (A) zeigt die ausgefallenen Kalzit-Kristalle an der Kunststoffoberfläche von PE am Anfang der Rinne, während die unteren 3 Bilder (B) die aufgewachsenen Kristalle an der PE Oberfläche am Ende der Rinne darstellen.**



**Abbildung 44: Übersichtsbild und Detailaufnahme der neu gebildeten Kalzite an der Kunststoffoberfläche von PE mit 4% Silan + 0,5% Peroxid. Die obere Bildreihe (A) zeigt die ausgefallenen Kalzit-Kristalle an der Kunststoffoberfläche von PE mit 4% Silan + 0,5% Peroxid am Anfang der Rinne, während die unteren 3 Bilder (B) die aufgewachsenen Kristalle an der PE mit 4% Silan + 0,5% Peroxid Oberfläche am Ende der Rinne darstellen.**



**Abbildung 45: Übersichtsbild und Detailaufnahme der neu gebildeten Kalzite an der Kunststoffoberfläche von PE mit 4 % Polyethylenglycol-co-Polyethylen. Die obere Bildreihe (A) zeigt die ausgefallenen Kalzit-Kristalle an der Kunststoffoberfläche von PE mit 4 % Polyethylenglycol-co-Polyethylen am Anfang der Rinne, während die unteren 3 Bilder (B) die aufgewachsenen Kristalle an der PE mit 4 % Polyethylenglycol-co-Polyethylen Oberfläche am Ende der Rinne darstellen.**



**Abbildung 46: Übersichtsbild und Detailaufnahme der neu gebildeten Kalzite an der Kunststoffoberfläche von PE mit 4 % Natriumstearat. Die obere Bildreihe (A) zeigt die ausgefallenen Kalzit-Kristalle an der Kunststoffoberfläche von PE mit 4 % Natriumstearat am Anfang der Rinne, während die unteren 3 Bilder (B) die aufgewachsenen Kristalle an der PE mit 4 % Natriumstearat Oberfläche am Ende der Rinne darstellen.**

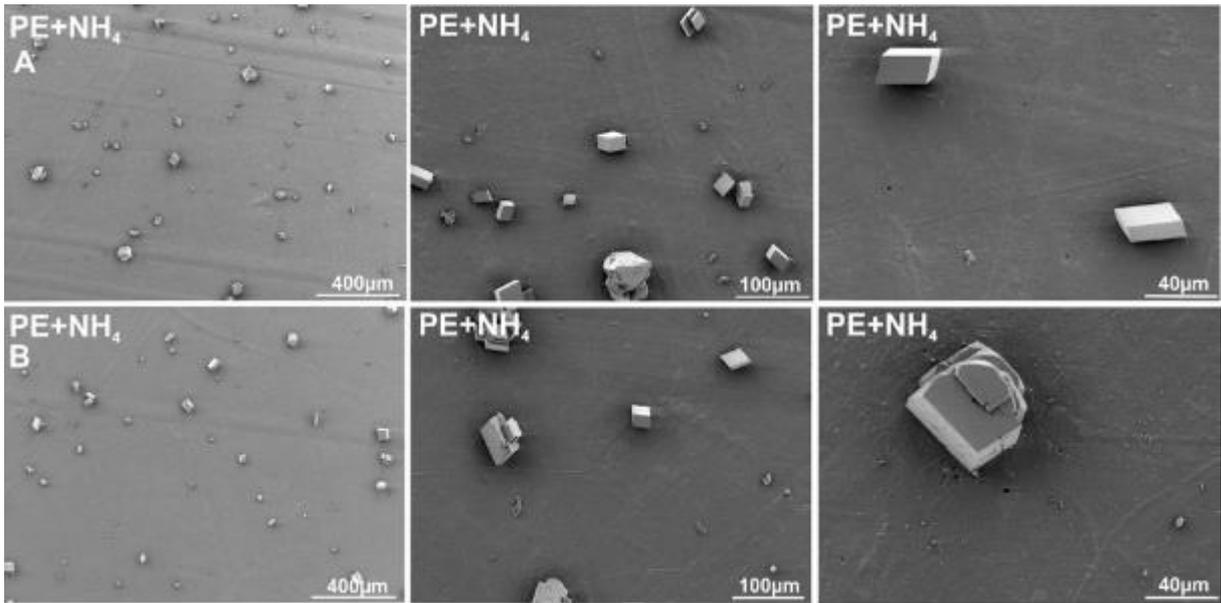


Abbildung 47: Übersichtsbild und Detailaufnahme der neu gebildeten Kalzite an der Kunststoffoberfläche von PE mit 4 % Ammoniumpolyphosphat. Die obere Bildreihe (A) zeigt die ausgefallenen Kalzit-Kristalle an der Kunststoffoberfläche von PE mit 4 % Ammoniumpolyphosphat am Anfang der Rinne, während die unteren 3 Bilder (B) die aufgewachsenen Kristalle an der PE mit 4 % Ammoniumpolyphosphat Oberfläche am Ende der Rinne darstellen.

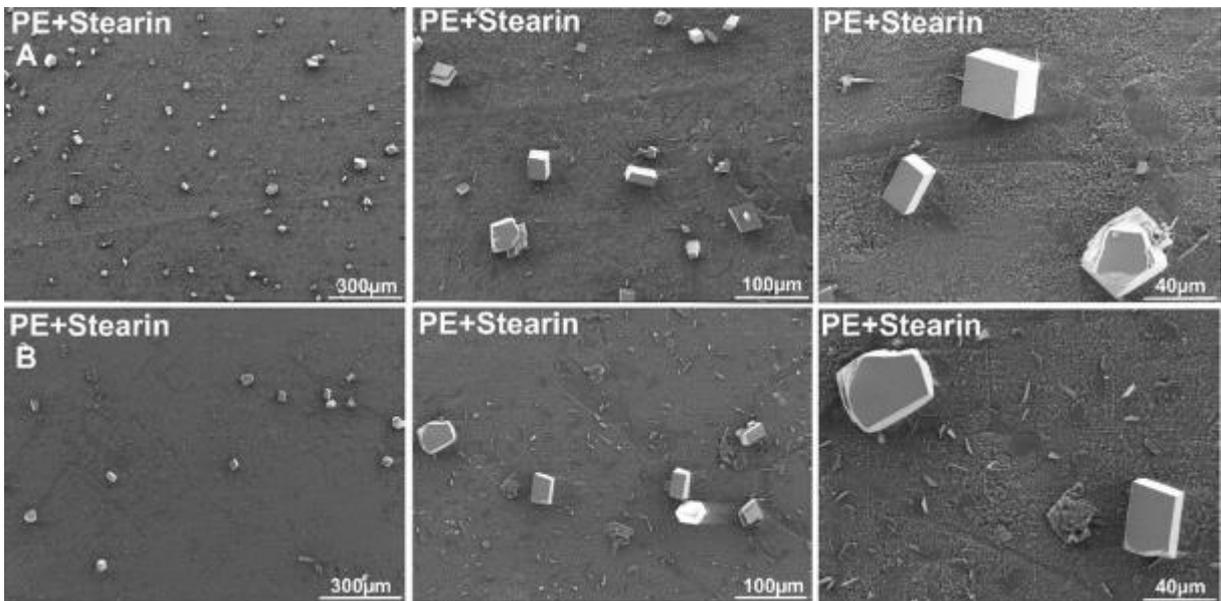
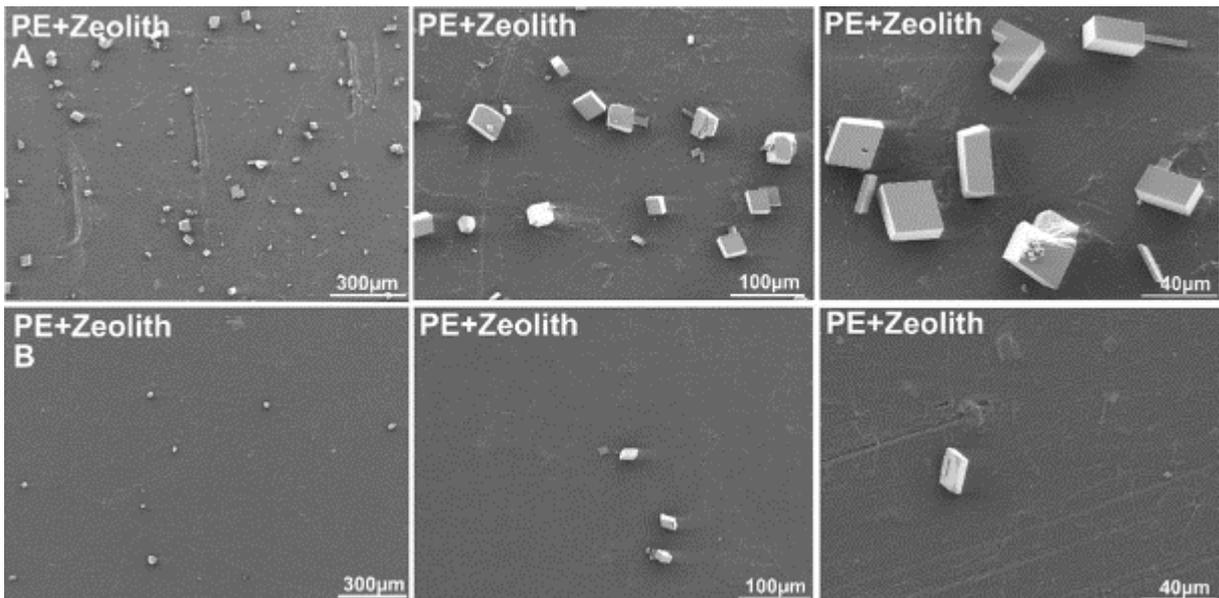


Abbildung 48: Übersichtsbild und Detailaufnahme der neu gebildeten Kalzite an der Kunststoffoberfläche von PE mit 4 % Stearinsäure. Die obere Bildreihe (A) zeigt die ausgefallenen Kalzit-Kristalle an der Kunststoffoberfläche von PE mit 4 % Stearinsäure am Anfang der Rinne, während die unteren 3 Bilder (B) die aufgewachsenen Kristalle an der PE mit 4 % Stearinsäure Oberfläche am Ende der Rinne darstellen.



**Abbildung 49:** Übersichtsbild und Detailaufnahme der neu gebildeten Kalzite an der Kunststoffoberfläche von PE mit Zeolith. Die obere Bildreihe (A) zeigt die ausgefallenen Kalzit-Kristalle an der Kunststoffoberfläche von PE mit Zeolith am Anfang der Rinne, während die unteren 3 Bilder (B) die aufgewachsenen Kristalle an der PE mit Zeolith Oberfläche am Ende der Rinne darstellen.

Zur Beurteilung der Wirksamkeit der entwickelten Kunststoffcompounds wurden quantitative Analysen durchgeführt. Einerseits wurden mittels Säureaufschluss (6%ige HNO<sub>3</sub>) und Bestimmung der Kalziumkonzentration bzw –menge (mg/l; mittels ICP-OES Analyse) die an der jeweiligen Kunststoffoberfläche gebildeten Kalziumkarbonat-Präzipitate analysiert. Zusätzlich wurden Mikroskopie-basierte Bilder der Kunststoffoberflächen aufgenommen und mittels einer angepassten Bildanalyse-Prozedur (Abbildung 50) untersucht. Bei der Bildanalyse wurden für jeden Kunststoff die kumulierten Flächen der Kalzit-Kristallpartikel ins Verhältnis zum untersuchten Bildausschnitt gesetzt. Zur besseren Vergleichbarkeit der beiden Methoden wurden die Ergebnisse jeweils auf die Ergebnisse des reinen Polyethylens normiert. Dadurch ergibt sich, dass alle Werte unter 100% eine Reduktion der Versinterungsneigung im Vergleich zu Polyethylen und Werte >100% eine Erhöhung der Versinterungsneigung gegenüber dem Kunststoff bedeuten. Die Ergebnisse sind in Tabelle 11 dargestellt.

**Tabelle 11: Ranking der getesteten neu entwickelten Kunststoffe anhand ihrer Versinterungsneigung gemäß Ergebnissen aus Säureaufschluss und Bildanalyse**

Rezeptur	Material	Säureaufschluss		Bildanalyse: % bedeckt	
		Ca mg/l	mg/cm <sup>2</sup> CaCO <sub>3</sub>	threshold: 155	threshold: 180
Nr.	Kunststoff + Füllstoff	normalized	normalized	normalized	normalized
		%	%	%	%
		<b>1</b>	<b>PE (rein)</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
<b>2</b>	<b>PE + 4% Silan + 0,5% Peroxid</b>	104	108	101	82
<b>3</b>	<b>PE + 4% PEG</b>	79	85	18	15
<b>4</b>	<b>PE + 4% Natriumstearat</b>	46	46	32	22
<b>5</b>	<b>PE + 4% Ammoniumpolyphosphat</b>	60	62	15	15
<b>6</b>	<b>PE + 4% Stearinsäure</b>	155	162	147	155
<b>7</b>	<b>PE + 4% Zeolith</b>	46	46	85	86
<b>8</b>	<b>PE + 4% Mg(OH)<sub>2</sub></b>				

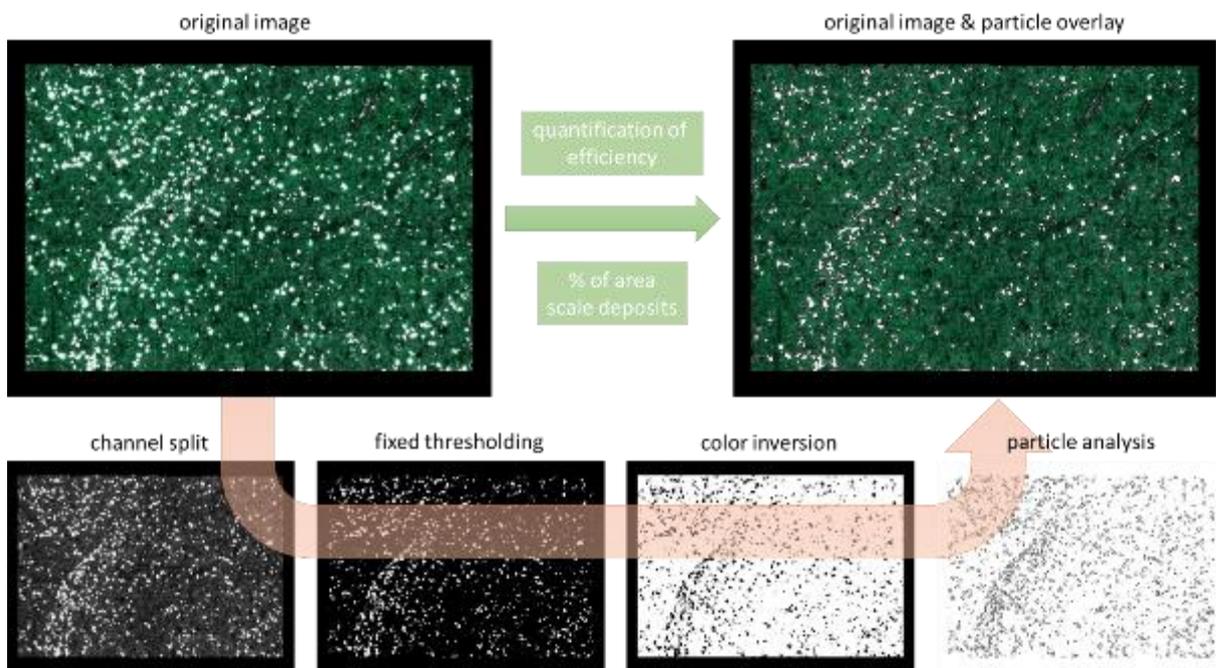
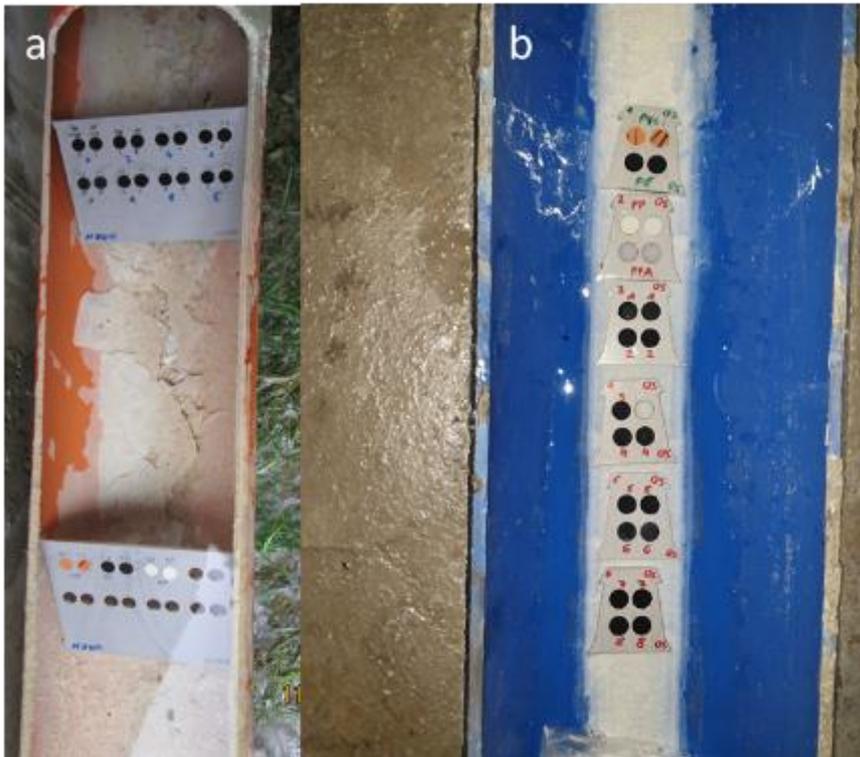


Abbildung 50: Darstellung der Auswerteprozedur mittels Bildanalyse zur Quantifizierung der Effektivität der entwickelten Kunststoffcompounds [25].

Beide Auswertemethoden zeigen relativ vergleichbare Ergebnisse. Lediglich bei der Bewertung der Materialien PE+PEG und PE+Zeolith unterschieden sich die Bewertungen. Daher werden zur Absicherung der bisherigen Ergebnisse weitere Versuche in verschiedenen Wässern untersucht. Neben den bereits erwähnten Auslagerungen am Drainageausgang des Tunnels Steinhaus und im Lainzer Tunnel (Abbildung 51), wurden zusätzlich in Absprache zwischen IAG der TU Graz und dem Lehrstuhl für Subsurface Engineering zwei Auslagerungsstellen am Zentrum am Berg ausgewählt.



**Abbildung 51: Auslagerung der entwickelten Kunststoffcompounds am Drainageausgang des Tunnels Steinhaus (a) und im Lainzer-Tunnel (b) [11].**

Im Entwässerungssystem ZaB (Abbildung 52) herrschen dank der kürzlich abgeschlossenen Vortriebsphase (Dezember, 2018) und einfachen Zugänglichkeit gute Voraussetzungen vor, um Voruntersuchungen für einen Demonstrator durchzuführen. Das Layout des ZaB umfasst jeweils mehrere 100 m lange Tunnel des Querschnitts Gleinalmtunnel (in Abbildung 52 rot: Straßentunnel Nord und Süd) und des Semmering-Basis-Tunnels (in Abbildung 52 grün: Eisenbahntunnel Ost und West). Das Entwässerungssystem leitet die Bergwässer des gesamten Tunnelsystems an das Portal des Eisenbahntunnels West ausgenommen das Bergwasser des Eisenbahntunnels Ost. Das Entwässerungssystem der Bergwässer setzt sich aus Ulmendrainagen (TSR DN/OD 250) in Teilen der Anlage mit Innenschale und mittigen Bergwassersammelleitungen (MZR PP SN8 DN/OD 315) in Teilen der Anlage ohne Innenschale zusammen. Letztere entwässern den gesamten Straßentunnel Süd, Eisenbahntunnel West und teils den Straßentunnel Nord. Die Bergwasserschächte PS04 (an der Kreuzung Straßentunnel Nord und Eisenbahntunnel West) und PS07 (an der Kreuzung Straßentunnel Süd und Eisenbahntunnel West) ermöglichen Drainageinspektionen und -reinigungen der Bergwassersammelleitungen. pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit und Temperatur des Bergwassers sind in PS04 und PS07 gemonitort worden. Die in den Bergwasserschächten gewonnenen Messwerte sind in Abbildung 53 im zeitlichen Verlauf ersichtlich. Der Bergwasserschacht PS07 verfügt über vier Werte, da er im Kreuzungsbereich

von Straßentunnel Süd und Eisenbahntunnel West liegend drei Zuleitungen und eine Ableitung besitzt. Die Abbildung 53 Abbildung 52 deutet das unterschiedliche Versinterungspotenzial von PS04 und PS07 an. In PS04 sind deutlich höhere pH-Werte und elektrische Leitfähigkeit erkennbar.

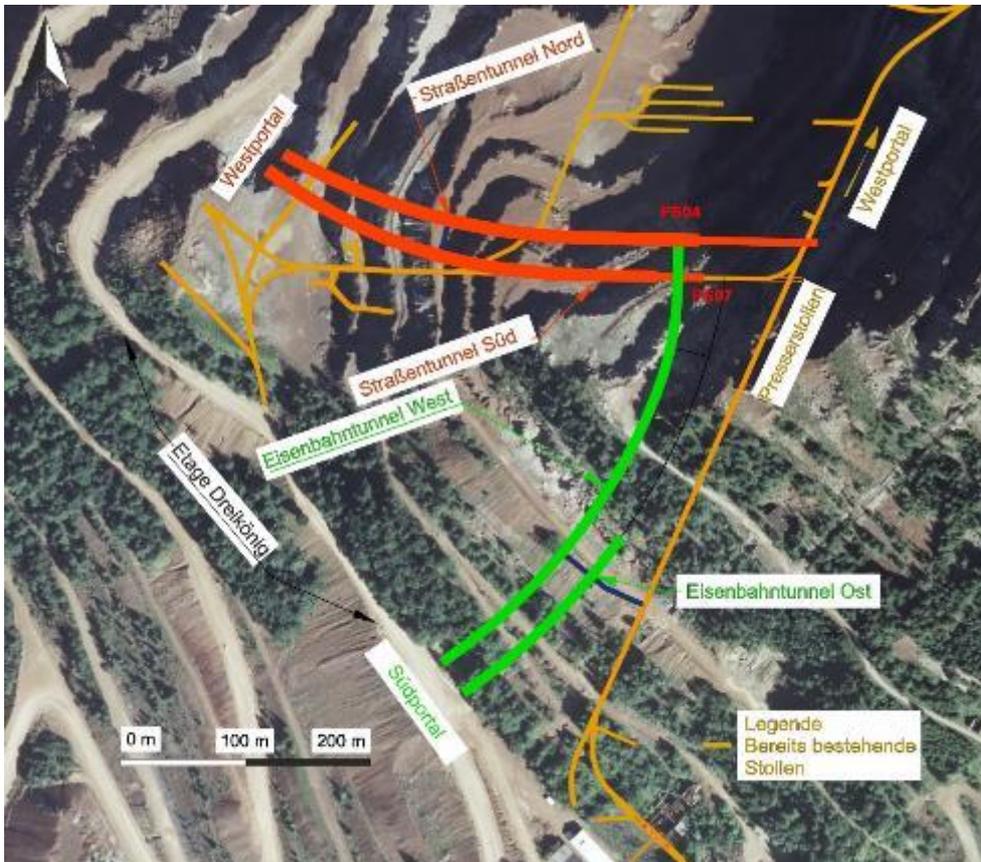
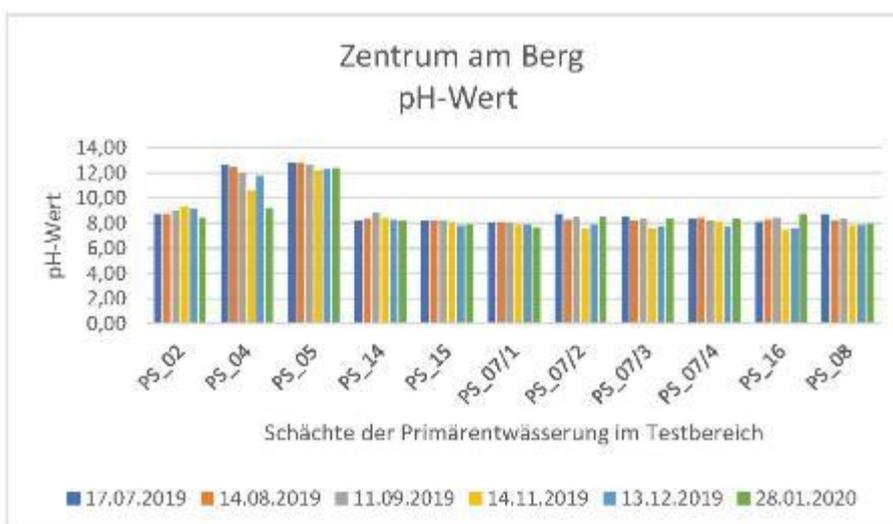
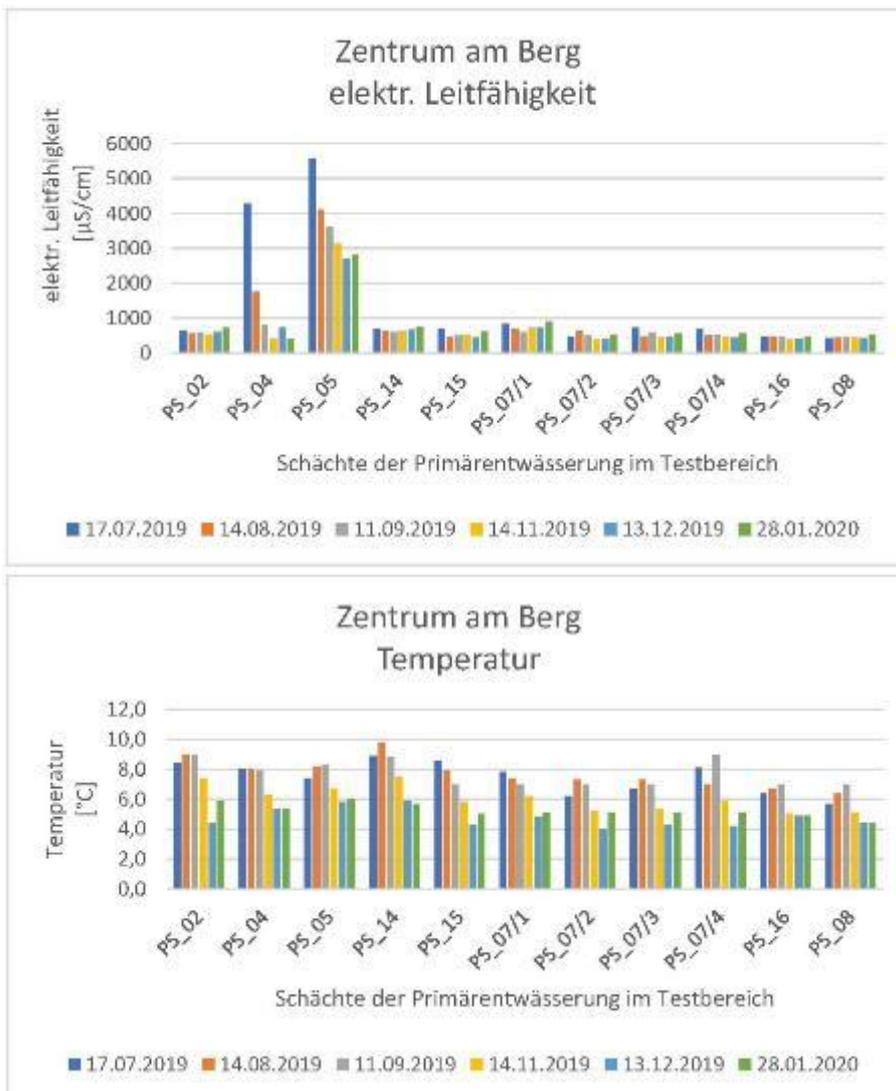


Abbildung 52: Layout des ZaB (Zentrum am Berg) mit eingetragenen Bergwasserschächten PS04 und PS07 der Probenrägerauslage.





**Abbildung 53: Monitoring des Bergwassers in den Schächten der Sammelleitung mit Datumsangabe der Messung. Oben: pH-Wert. Mitte: Elektrische Leitfähigkeit. Unten: Temperatur. Lage von PS04 und PS07 siehe Abbildung 52.**



**Abbildung 54: Links: Probenräger in PS04; Mitte: Probenräger in PS07; Rechts: Probenrägerauslage in PS07 mit Zu- und Ableitungen.**

Im Zuge der Vorbereitungsmaßnahmen des Demonstrators werden Rohmaterialien/Probepättchen aus modifizierten Kunststoffen gepresst in einen metallenen Probenräger in den Bergwasserschächten PS04 und PS07 ausgelagert (Abbildung 54). Die Auslagerung folgt einer Oben-Unten-Vorgabe, sodass lediglich die während der Auslagerung nach unten weisende Oberfläche anher analysiert wird, um von oben aufsedimentierte anwachsende Kristalle nicht mitzuzählen. Auf das unterschiedliche pH-Milieu weist bereits Abbildung 53 hin. Die milchige Trübung in Abbildung 54 links bei pH-Wert von rund 11 stellt den pH-Wert-Unterschied zusätzlich heraus. Über die Dauer der Auslagerungen in PS07 herrscht ein pH-Wert von ungefähr 8 bei einer Wassermenge von zirka 5 l/s vor. Der Probenräger ist in der Abbildung 54 mittig und rechts sichtbar. Für die Auslagerung wird Bedacht auf eine gute Unterströmung der mit modifizierten Kunststoffen versehenen Metallräger genommen, weswegen die Probenräger erhöht mit Steinen unterlegt platziert werden.

Zusätzlich zu den Versuchen in der Labor-Fließstrecke und den Auslagerungen in realen Bauwerken wurden weitere Experimente mit den Materialien an der TU-Graz in Labor basierten Reaktoren geplant. Basierend auf den bisherigen Ergebnissen können bereits erste Materialien von den weiteren Untersuchungen ausgeschlossen werden. Die Silan-Modifizierung konnte keine Verbesserung der Versinterungsneigung erreichen und wird daher nicht weiterverfolgt. Ebenso kann die Modifizierung mittels Stearinsäure ausgeschlossen werden, da diese neben einer unvorteilhaften Änderung der Kristallform und des sich daraus bildenden Sintergefüges zusätzlich eine Erhöhung der Versinterungsneigung ergab. Aufgrund der chemischen Nähe des Natriumstearats zur Stearinsäure, wird diese Materialmodifizierung ebenfalls nicht weiterverfolgt, da es je nach pH-Wert zu einer chemischen Umwandlung des einen in den andern Stoff kommen könnte.

Diese, in den Reaktoren geprüften Kunststoff-Compounds sind mit 4cm x 2.5cm rechteckig (entspricht 10 cm<sup>2</sup> Basisoberfläche) und in ihrer Oberflächendimension etwa 12-mal größer als die vormalig runden Compounds (Durchmesser: 1cm; entspricht 0.8 cm<sup>2</sup>). Größere Compounds ermöglichen eine höhere Auflösung bei der Oberflächenanalyse vor und nach den Versuchen mittels optischer Mikroskopie. Der Versuchsaufbau war in der chemischen Zusammensetzung gleich konzipiert, wie in den Experimenten zuvor, um eine Vergleichbarkeit der einzelnen Versuche zu gewährleisten. Die Versinterungsneigung der Kunststoffe wurde diesmal lediglich unter stationären Bedingungen (anstelle von dynamischen Bedingungen in der Fließstrecke) untersucht. Unter stationären Bedingungen werden die rechteckigen

Kunststoffe mittels Nie-Roster Schrauben befestigt, um das Aufschwimmen in der Wassersäule in einem 1 Liter-Reaktor zu verhindern. Pro Reaktor waren 4 Kunststoffe für unterschiedlichste Analysen (optische Mikroskopie, Säureaufschluss, etc...) exponiert. Ein Magnetrührer mit Rührstäbchen (400rpm) sorgte für ein moderate Wasserzirkulation im Reaktor (Vergleich Abbildung 55). Die Versuchsdauer betrug 7 Tage. In diesem Versuchsansatz wurden die Kunststoffe PE (rein), PE + 4% Zeolith, PE mit 4 % Ammoniumpolyphosphat, PE mit 4 % Natriumstearat, PE mit 4 % Polyethylenglycol-co-Polyethylen und PE mit 4 % Mg(OH)<sub>2</sub> untersucht, wobei ein Versuch ohne Kunststoffe (Blank) als Kontrolle experiment fungierte. Nach Ende der Experimente wurden die auf den Kunststoffoberflächen gebildeten Präzipitate quantitativ mittels Säureaufschluss analysiert, um ein Ranking der getesteten Kunststoffmaterialien in Bezug auf die Tendenz zur Karbonat-Ablagerung zu erstellen. Die Ergebnisse des statischen Versuchs sind in Tabelle 12 dargestellt.



**Abbildung 55: Versuchsaufbau der stationären Versuche mit den neu entwickelten Kunststoffen. Die Kunststoffe wurden an Schrauben befestigt, um ein Aufschwimmen in der Wassersäule zu vermeiden [25]**

**Tabelle 12: Ergebnisse der getesteten, neu entwickelten Kunststoffe anhand ihrer quantitativen Analyse mittels Säureaufschluss (6%ige HNO<sub>3</sub>) der an der jeweiligen Kunststoffoberfläche gebildeten Kalziumkarbonat-Präzipitate aus dem ersten statischen Versuch.**

Kunststoff	Ca(mg/l)	mg/cm <sup>2</sup> CaCO <sub>3</sub>
PE_rein	45.5	0.046
PE+Zeolith	12.6	0.013
PE+Ammoniumpolyphosphat	23.8	0.024
Na-Stearat	44.5	0.044
PEG (6min)	11.7	0.012
PEG(11min)	46.2	0.046
Mg(OH) <sub>2</sub>	99.8	0.100

Weiters erfolgte eine quantitative Analyse mittels Säureaufschluss (6%ige HNO<sub>3</sub>) der an der jeweiligen Oberfläche gebildeten Kalziumkarbonat-Präzipitate auf den einzelnen Kunststoffen aus dem Lainzer-Tunnel, sowie aus 2 unterschiedlichen Drainagen (Nord und West) vom Zentrum am Berg (Erzberg;

**Tabelle 13 bis Tabelle 15).**

**Tabelle 13: Ergebnisse der getesteten neu entwickelten Kunststoffe anhand ihrer quantitativen Analyse mittels Säureaufschluss (6%ige HNO<sub>3</sub>) der an der jeweiligen Kunststoffoberfläche gebildeten Kalziumkarbonat-Präzipitate aus dem Lainzer-Tunnel.**

Kunststoff	Ca mg/l	mg/cm <sup>2</sup> CaCO <sub>3</sub>
PE+Silan	1.3	0.012
PE+NaStearat	0.8	0.008
PE+Ammoniumpolyphosphat	1.2	0.011
PE+Stearinsäure	1.6	0.016
PE+Zeolith	0.9	0.008
PE+Mg(OH) <sub>2</sub>	0.7	0.006
PVC	1.0	0.009
PE	1.7	0.017
PP	6.0	0.057
PFA	6.1	0.058

**Tabelle 14: Ergebnisse der getesteten, neu entwickelten Kunststoffe anhand ihrer quantitativen Analyse mittels Säureaufschluss (6%ige HNO<sub>3</sub>) der an der jeweiligen Kunststoffoberfläche gebildeten Kalziumkarbonat-Präzipitate aus der Nord-Drainage der Anlage Zentrum am Berg.**

Kunststoff	Ca(mg/l)	mg/cm <sup>2</sup> CaCO <sub>3</sub>
PE	92.0	0.542
PE+PEG	240.9	1.419
PE+NaStearat	184.0	1.084
PE+Ammoniumpolyphosphat	242.8	1.430
PE+Zeolith	183.7	1.082
PE+Mg(OH) <sub>2</sub>	376.6	2.218
PP	257.1	1.514
PVC	263.9	1.555

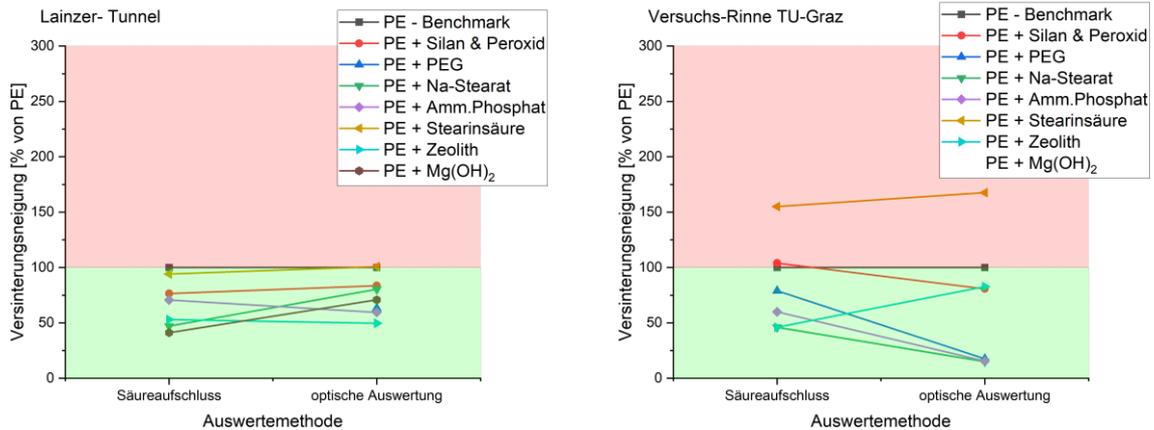
**Tabelle 15: Ergebnisse der getesteten, neu entwickelten Kunststoffe anhand ihrer quantitativen Analyse mittels Säureaufschluss (6%ige HNO<sub>3</sub>) der an der jeweiligen Kunststoffoberfläche gebildeten Kalziumkarbonat-Präzipitate aus der West-Drainage der Anlage Zentrum am Berg.**

Kunststoff	Ca(mg/l)	mg/cm <sup>2</sup> CaCO <sub>3</sub>
PE	0.7	0.007
PE+PEG	1.1	0.011
PE+NaStearat	0.8	0.008
PE+Ammoniumpolyphosphat	0.7	0.006
PE+Stearinsäure	4.5	0.043
PE+Zeolith	0.6	0.006
PE+Mg(OH) <sub>2</sub>	0.8	0.008
PVC	1.1	0.011
PP	0.6	0.006

Zusätzlich zur Untersuchung der Versinterungsneigung mittels Säureaufschluss, wurden die exponierten Kunststoffe auch mittels optischer Analyse (Vergleich mit Abbildung 50) untersucht. Dazu wurden mittels Stereomikroskop Bilder der Oberflächen, inklusive Ablagerungen aufgenommen und mittels Computer-Software evaluiert. Konkret wurde untersucht, wie viele Prozent der fotografierten Oberfläche von Versinterungen belegt sind.

Um unterschiedliche Versuchsreihen miteinander vergleichbar zu machen, wurden die Ergebnisse jedes Versuchs auf die des reinen Polymers, die als Vergleichsprobe mituntersucht wurden, normiert. Analog können auch die Ergebnisse des Säureaufschlusses auf das jeweils mituntersuchte Reinmaterial normiert werden. Dadurch können Ergebnisse relativ einfach bewertet werden. Ergebnisse <100% bedeuten, dass der eingesetzte Wirkstoff eine Verringerung des Versinterungspotentials aufweist. Ergebnisse >100% hingegen deuten auf eine Verschlechterung, in Form von vermehrter Versinterungsablagerung hin. Zusätzlich ermöglicht dies auch die zwei angewandten Methoden miteinander zu vergleichen.

Wie in **Abbildung 56**, für die Ergebnisse der Auslagerung im Lainzer-Tunnel, bzw. der Versuchsrinne im Labor der TU Graz gezeigt, stimmen die zwei unterschiedlichen quantitativen Auswertemethoden nicht immer zu 100% überein, zeichnen in Summe - hinsichtlich der Wirksamkeit der eingesetzten Modifikationen gegen Versinterungen - aber das gleiche Bild.



**Abbildung 56: Vergleich der Ergebnisse der unterschiedlichen Auswertemethoden: Säureaufschluss & optische Analyse [25].**

Basierend auf beiden Auswertemethoden, wurde ein Ranking der Ergebnisse aller Auslagerungsversuche erstellt und in **Tabelle 16** zusammengefasst. Als Zusatzinformation wurde der durchschnittliche pH-Wert typischer Wässer des jeweiligen Bauwerks eingefügt.

**Tabelle 16: Zusammenfassung der Ergebnisse der Auslagerungsversuche in verschiedenen Bauwerken [25]**

Bauwerk / Bezeichnung	Auswertemethode	1. Platz	2. Platz	3. Platz	pH
<b>dynamische Versuche</b>					
Rinne	Optisch	PE+Am.-Phosphat	PE+NaStearat	PE+PEG	7.8-8.1
	Säureaufschluss	PE+Zeolith	PE+NaStearat	PE+Am.-Phosphat	
Lainzer Tunnel	Optisch	PE+Zeolith	PE+Am.-Phosphat	PE+PEG	8.1-8.5
	Säureaufschluss	PE+Mg(OH) <sub>2</sub>	PE+NaStearat	PE+Zeolith	
ZaB Süd	Optisch	PE+Zeolith	PE+PEG	PE+Silan	8.5
	Säureaufschluss	PE+Zeolith	PE+Am.-Phosphat	PE	
ZaB Nord	Optisch	PE+PEG	PE	PE+Silan	11.5
	Säureaufschluss	PE	PE+Zeolith	PE+NaStearat	
<b>statische Versuche</b>					
Statischer Versuch 1	Optisch	PE+Am.-Phosphat	PE+Mg(OH) <sub>2</sub>	PE+PEG	7.7-8.1
	Säureaufschluss	PE+PEG	PE+Zeolith	PE+Am.-Phosphat	
Statischer Versuch 2	Optisch	PE+Zeolith	PE+PEG	PE+Am.-Phosphat	7.7-8.1
	Säureaufschluss	PE+Zeolith	PE+NaStearat	PE+Mg(OH) <sub>2</sub>	

Basierend auf den in **Tabelle 16** gezeigten Ergebnissen, scheinen vor allem die Rezepturen mit Zeolith, PEG und Ammoniumphosphat sehr vielversprechend. Zusätzlich ist auffallend, dass vor allem in Bauwerken mit extrem hohen pH-Werten (ZaB Nord mit 11.5. und ZaB West mit 8.5) auch das nicht modifizierte PE-Material in den Top3 des Rankings vertreten ist. Dies könnte ein Indiz dafür sein, dass vor allem bei extrem hohen pH-Werten die eingesetzten

Füllstoffe nur bedingt wirksam sind, d.h. kein Unterschied zum reinen Kunststoff hinsichtlich Versinterungsneigung feststellbar ist.

In einem weiteren Schritt gilt es nun, die Beständigkeit der Modifikationen zu überprüfen. Dazu werden ausgewählte Versuche mit denselben Proben mehrfach wiederholt.

## 4.5 Arbeitspaket 5 – Alterungsbeständigkeit

Ausgehend von den in Arbeitspaket 4 durchgeführten Arbeiten, soll in einem nächsten Schritt überprüft werden, ob die Wirkung der eingearbeiteten Füllstoffe nach einer ersten Auslagerung weiterhin vorhanden ist. Dazu wurden die in AP4 beschriebenen Proben (sowohl runde Probekörper, als auch die eckigen Proben) nach der ersten Auslagerung gereinigt und für eine erneute Auslagerung vorbereitet.

Aus Tabelle 17 gehen die jeweiligen dreiwöchigen Auslagerungen der Probenträger in PS07 hervor. Nach Einlagerung wird das Mineralwachstum analysiert und die Probepfättchen für die nächste Auslagerung gereinigt. Für die Auslagerungen in PS04 erweist sich angesichts des dortigen pH-Wertmilieus eine Dauer von vier Tagen als vorteilhaft, sie ist einmalig erfolgt. Bei längeren Auslagerungen in PS04 sind die Rohrmaterialien des Probenträgers mit Mineralwachstum von Versinterungen überdeckt, sodass kein Unterschied an den modifizierten Kunststoffen mehr erkennbar und keine differenzierende Beurteilung der modifizierten Kunststoffe möglich ist. Tabelle 17 legt zudem unter der Spalte „Bemerkung“ die möglichen Einwirkungen des Bau- und Kursbetriebs am Zentrum am Berg auf das Bergwasser und dessen Versinterungspotenzial in Schacht PS07 dar.

**Tabelle 17: Auslagerungszeitpunkte und der jeweilige Bergwasserschacht.**

Auslagerung (von-bis)		Schacht	Bemerkung
Auslagerung 1	Von 23.11.2019 bis 13.12.2019	PS07	
Auslagerung 2	Von 10.03.2020 bis 31.03.2020	PS07	Herstellen von Rohrleitungen an der Schachtoberseite
Auslagerung 3	Von 20.05.2020 bis 10.06.2020	PS07	
Auslagerung 4	Von 31.07.2020 bis 21.08.2020	PS07	
Auslagerung 5	Von 08.09.2020 bis 29.09.2020	PS07	Spritzbetonführerkurs im Zuge des Kursbetriebs in unmittelbarer Nähe

Die mehrmaligen Auslagerungen dienen zur Erhebung, ob die Probepfättchen mit den unterschiedlich modifizierten Kunststoffen über Perioden gleicher Länge die gleiche Versinterungsneigung halten und dies sich nicht nach der nötigen mehrmaligen Reinigung ändert.

Die runden Proben wurden wie in **Abbildung 57** gezeigt, am ZaB ausgelagert. Diese Proben wurden im Schnitt für drei Wochen gegenüber dem Bergwasser exponiert und anschließend untersucht, gereinigt und wieder ausgelagert. Dieser Vorgang wurde in Summe fünfmal wiederholt. Die Ergebnisse der so durchgeführten Untersuchungen sind nachfolgend in **Abbildung 58** dargestellt.



**Abbildung 57: Auslagerung der modifizierten Kunststoffe am ZaB [25]**

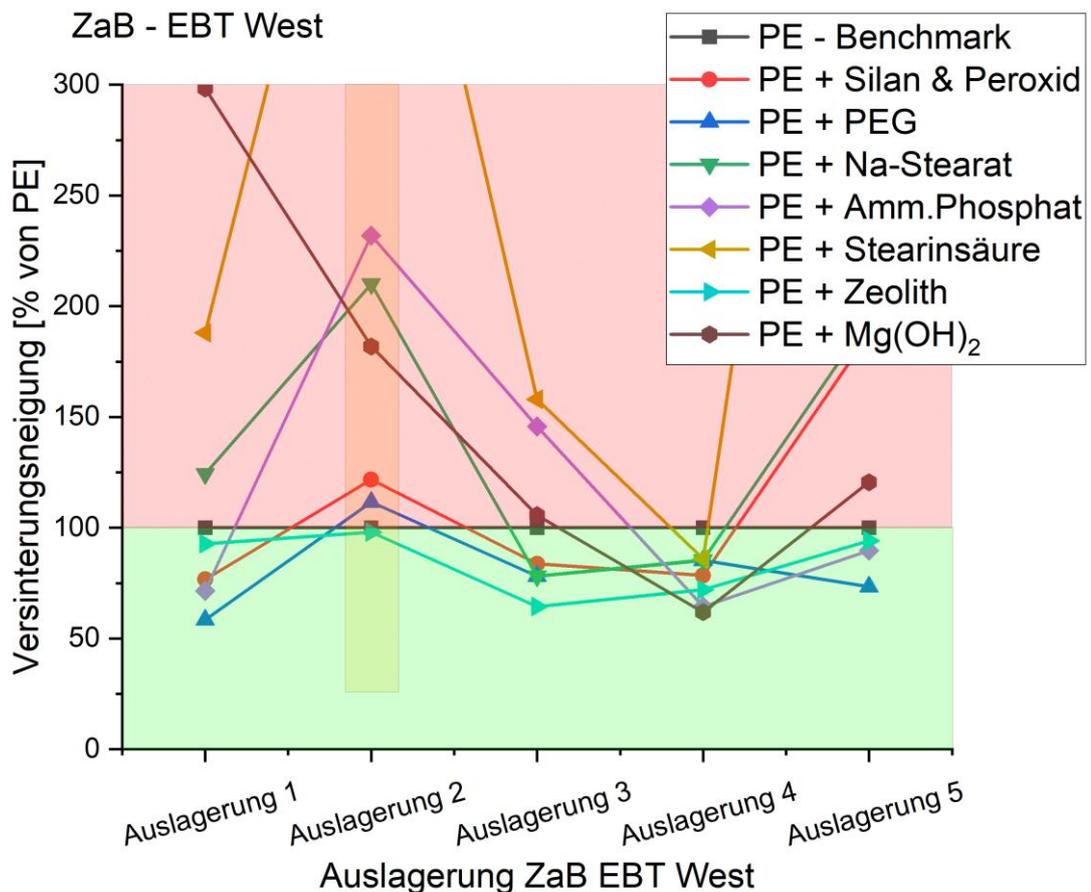
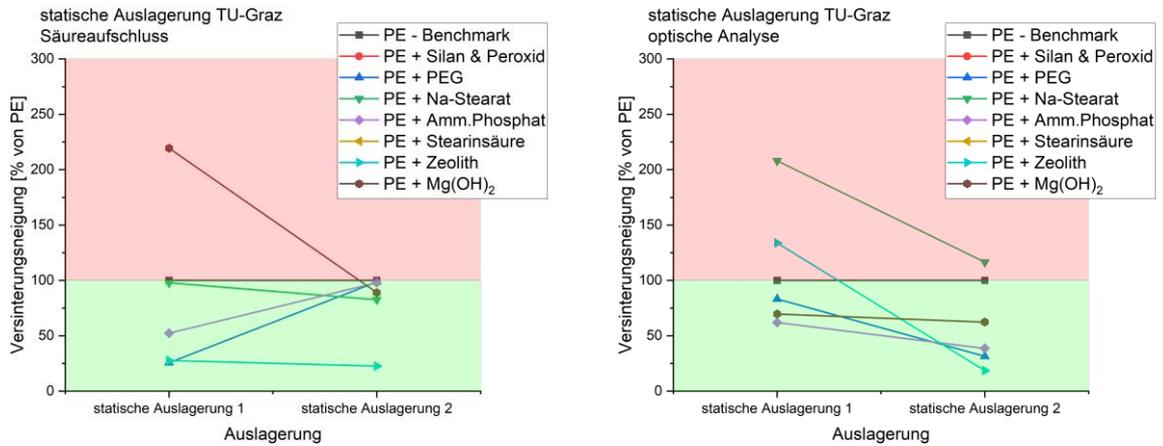


Abbildung 58: Ergebnisse der wiederholten Auslagerung der Kunststoffe im ZaB - West [25]

Wie in **Abbildung 58** zu sehen ist, ergeben die Wiederholungsmessungen übergeordnet einen ähnlichen Trend wie die erste Messung. Mit Ausnahme der 2. Wiederholungsmessung, sind die erzielten Effektivitäten gegen Versinterung über die Dauer der mehrmaligen Auslagerung relativ konstant. Die hohe Änderung der Wirksamkeiten während der zweiten Auslagerungen wird zum derzeitigen Stand mit den durchgeführten Arbeiten, wie in Tabelle 17 gelistet, erklärt. Analog dazu, können die erneuten Änderungen während der fünften Auslagerung erklärt werden. Dadurch ergibt sich, dass die in Kapitel 4.4.3 (AP4c) gefundenen Ergebnisse auch auf längere Sicht, bzw. mehrmalige Verwendung der dotierten Kunststoffe übertragbar scheinen.

Der statische Versuch (vgl. **Abbildung 55**) mit den größeren Plättchen wurde in Summe zweimal an der TU-Graz durchgeführt. Beide Versuchsreihen wurden sowohl mittels Säureaufschluss, als auch optisch (Mikroskopie und Bildanalyse) ausgewertet. Die Ergebnisse dazu sind nachfolgend in **Abbildung 59** abgebildet.



**Abbildung 59: Auslagerung der modifizierten Kunststoffe im statischen Versuchsstand der TU-Graz [25]**

Ausgehend von den Ergebnissen in AP4c und AP5, scheinen hinsichtlich der Unterdrückung von Versinterung vor allem die Materialkombinationen PE+PEG und PE+Zeolith äußerst vielversprechend. Daher werden diese zwei Kombinationen auch für AP6 – die Entwicklung eines Demonstratorkonzepts verwendet.

## 4.6 Arbeitspaket 6 – Demonstrator-Konzept

### 4.6.1 Herstellung

Gemäß ursprünglicher Planung wäre für die Erstellung eines Demonstrators die Extrusion kleiner Rohre (ca. DN50) der abschließende Schritt im Projekt gewesen, um zu zeigen, dass die gefundenen Rezepturen auch mittels Extrusion verarbeitbar sind. Da beide gefundenen Rezepturen gängige Materialien beinhalten, die regelmäßig mittels Extrusion verarbeitet werden, ist dieser Schritt nicht notwendig.

Alternativ wird gerade mit Rohrherstellern über die Möglichkeit zur Herstellung von Rohren in realer Größe (DN200 oder größer) gesprochen. Die Umsetzung der Herstellung der Rohre wird voraussichtlich erst nach dem offiziellen Projektende möglich sein, da dies nur auf Entgegenkommen der Rohrfirmen, die nicht im Projekt beteiligt sind, stattfinden kann.

### 4.6.2 Aufstellungsort

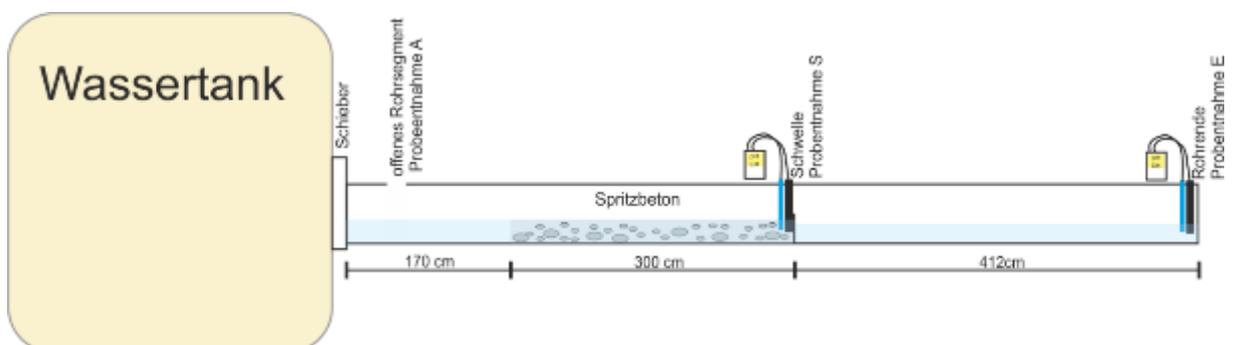


**Abbildung 60: Links: Auslagerung der Spritzbetonbruchstücke; Mitte: In-situ Messung nach der Schwelle; Rechts: Foto der Sinterstrecke [27].**

Im Rahmen des Projekts wurde die frühere KAT3 Versuchsstrecke des Koralm Tunnels ans Zentrum am Berg geliefert. Diese wurde Anfang März 2020 fertig aufgebaut und an eine Wasserversorgung der Anlage angebunden (Abbildung 60 rechts). Sie eignet sich als Versuchsstrecke für den Einbau eines Demonstrators. Nach erfolgter Herstellung der modifizierten Rohre bzw. Formteile nach Rücksprache mit dem Lehrstuhl für Subsurface Engineering am Zentrum am Berg können sie in die KAT3 Versuchsstrecke integriert werden. Die KAT3 Versuchsstrecke wird in Zusammenhang mit der Masterarbeit „Reales Versinterungspotential von optimierten Spritzbetonmischungen“ von Silvio Videtta [27] in Betrieb genommen. Wie in Abbildung 60 gezeigt, besteht die Versuchstrecke aus einem Wasserspeicher mit 4000 l Fassungsvermögen, sowie vier angebauten Rohrleitungen der Geometrie DN200. Der Wasserzufluss in die Rohrleitungen kann mit Schiebern gesteuert werden. Für den Demonstrator ergibt sich die Möglichkeit entweder Rohre der Geometrie

DN200, oder gerade Formteile, wie Überschubmuffen derselben Geometrie für die Versuche zu verwenden. Der Speicher ist über eine verlegte Leitung direkt mit realem Bergwasser aus dem ZaB füllbar. Mit Verlegung der Leitung aus der Wasserversorgung des ZaB sind für Versuche zur Versinterung geeignete Wassermengen bereitgestellt worden. Das vorhandene Bergwasser hat Trinkwasserqualität und fällt nach der Einteilung nach Furtak & Langguth in den Bereich überwiegend hydrogenkarbonatisch normal erdalkalischer Wässer. Im Messzeitraum beträgt der pH-Wert des Bergwassers 8.6 und die elektrische Leitfähigkeit ~380  $\mu\text{S}$  bei einer durchschnittlichen Wassertemperatur von 5°C [27]. Je nach Versuchsaufbau kann die Wassermenge individuell eingestellt werden, um unterschiedliche Einflüsse auf das Versinterungspotenzial zu testen wie z.B. die Auslaugung von Spritzbeton oder den Einsatz von Versinterungshemmstoffen etc..

In [27] wurden ~26 kg der Betonmischung in der Sinterstrecke hinter der eigens installierten Schwelle (Abbildung 60 links und Mitte) über eine Länge von 3 m für 3 Wochen ausgelagert. Der Beton ist eine optimierte Mischung folgender Bindemittelzusammensetzung: 62% CEM I SR0, 26% Hüttensand, 6% feinem Kalksteinmehl, 3% Mikrosilika und 3% Metakaolin. Die Betonmischung wird nach Entfernen der durch die Atmosphäre beeinflussten Oberflächen mittels Brechens zerkleinert. Dabei wird der Grad der Auslaugung des Betons durch das Bergwasser untersucht und beobachtet, inwieweit dadurch über die restliche Rohrstrecke es zur Interaktion mit der Atmosphäre und zu möglichen Ausfällungen kommt. Dafür werden zu Beginn, nach 1 Woche und nach 3 Wochen Wasserproben jeweils am Rohranfang (A), nach der Schwelle (S) und am Ende der Röhre (E) entnommen (Abbildung 61). Auch der Durchfluss wird zu diesen drei Zeitpunkten bestimmt und variiert zwischen 0.05 und 0.14 l/s. An den Positionen S und E werden über die gesamte Auslagerungszeit der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit gemessen [27]. Die Wasseranalytik wird mit Messinstrumenten permanent gemonitort, die aus dem Netz des ZaB mit Strom versorgt werden.



**Abbildung 61: Schema des Versuchsaufbaues entlang der Sinteranlage [27].**

Nach erfolgter Herstellung können die modifizierten Rohre, bzw. Formteile nach Rücksprache mit dem Lehrstuhl für Subsurface Engineering, am Zentrum am Berg implementiert werden.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE

### 5.1 Status Quo und Bauwerkserhebung

Gemäß Richtlinie Tunnelentwässerung werden derzeit drei Materialien bevorzugt verbaut: Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) und Polyvinylchlorid ohne Weichmacher (PVC-u). Für die Untersuchung hinsichtlich der Versinterungsneigung der drei Materialien wurden im Rahmen des Projekts Versuche an Rohren (4.3.3) und an Halbschalen (4.2.3), sowie kleinen Probekörpern (4.4.3) im Labormaßstab durchgeführt. Dabei zeigte sich in allen drei Untersuchungen für PVC-u eine leicht höhere Tendenz zur Bildung von Sinterkrusten als in PE und PP. In Kombination mit der höheren Kerbempfindlichkeit von PVC, v.a. unter schlagender Belastung (4.2.1), wurden alle weiteren Untersuchungen primär an PE und PP durchgeführt.

Für die Untersuchung des Versinterungspotenzials eines Tunnelbauwerks liegt ein Rahmen vor, welche die Einflussparameter des Versinterungspotenzials in einer fasslichen Form sprich in einem Übersichtslängenschnitt aufbereiten. Der Übersichtslängenschnitt weist dabei Informationen über Bergwasser, Gebirge, verbrauchte Stützmittel, Entwässerungsschema und Spülaufwände auf. Die Aufbereitung der Informationen ist in der Regel mit der Redigitalisierung unterschiedlicher Datenquellen wie baugeologischer Dokumentationen, Tunnelbänder, Spülberichte etc. verbunden. Im Rahmen der Erhebungen von Tunnelbauwerken wurden bei verschiedenen Quellen Dokumente von rund 90 Eisenbahntunneln und rund 30 Straßentunneln erhoben, die als Ausgangsbasis der Erstellung der Übersichtslängenschnitte dienen können, jedoch nicht alle erforderlichen Datenkategorien derselben umfassen. Acht Tunnel wurden näher untersucht, die in unterschiedlichen geologischen Einheiten liegen und ein unterschiedliches Versinterungspotenzial besitzen. Das Versinterungspotenzial ist zum Teil beträchtlich, weswegen aus den Reinigungsmaßnahmen Beschädigungen des Drainagesystems (Zammer Tunnel, Tunnel Steinhaus) entstanden sind. Die Erhebungen und Begehungen der Tunnelbauwerke mit Befragungen der Anlagentechniker führen auf Bereiche, in denen intensiver Stützmitteleinbau und Fluchtbauwerke mit erhöhtem Versinterungspotenzial (Sieberg Tunnel, Tunnel Steinhaus, Grünburg Tunnel, Tunnel Himmelreich) zusammenfallen. Zur Steigerung des Versinterungspotenzials und der Reinigungsaufwände von Tunnel drainagen tragen auch Fallstrecken und folglich die damit verbundenen Wasserverwirbelungen bei. Den Versinterungen werden flüssige sowie feste Härtestabilisatoren entgegengesetzt. Aus den Erhebungen der Tunnelbauwerke lässt sich keine eindeutige Präferenz flüssiger oder fester herleiten.

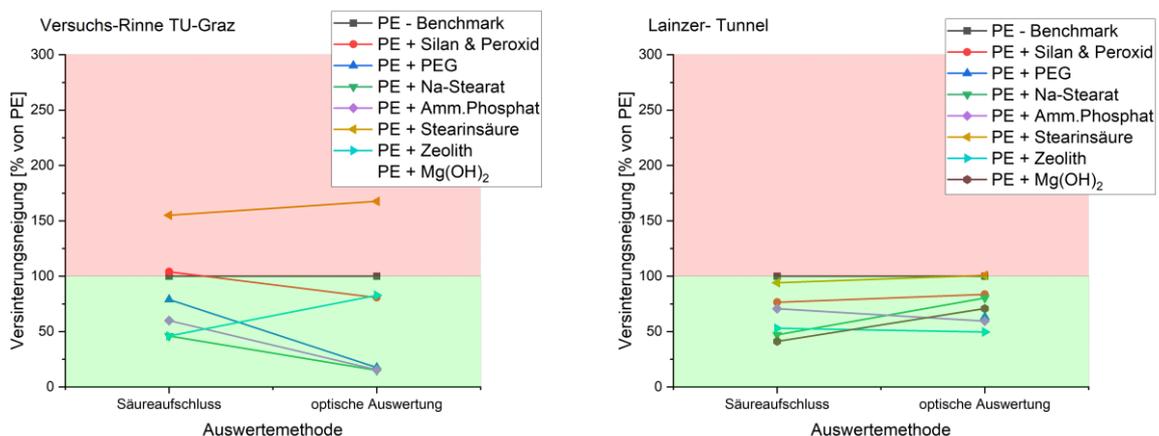
Zur Einschätzung des Versinterungspotenzials erweisen sich Spülprotokolle und -aufzeichnungen als gute Beurteilungsgrundlage, die sich im Staatsarchiv nicht wiederfinden. Aus ihnen lassen sich bereichsweise Spülgeschwindigkeiten folgern, umgekehrt lässt sich anhand der erhobenen Tunnelbauwerke wie Grünburg Tunnel und Zentrum am Berg ersehen, dass das Versinterungspotenzial lokal sehr variieren kann, sodass bei den Tunneln Grünburg und Himmelreich der Spülvorgang mit der Rotationsspüldüse von Haltung zu Haltung aufgezeichnet wurde. Dies ermöglicht den Vergleich von Spülintervall zu Spülintervall sprich ein Monitoring über längere Zeit und die genaue Lokalisierung des Zutrittsorts jener Bergwässer, deren Eintreten in das Entwässerungssystem die Versinterung auslöst und in dieser Reaktionszone die Kalkausfällung begünstigt.

## 5.2 Ergebnisse der durchgeführten Versinterungsstudien

Zusammenfassend sind nachfolgend die Ergebnisse der durchgeführten Auslagerungsversuche dargestellt. Die Ergebnisse beinhalten sowohl die dynamischen Versuche (sowohl Labor- als auch Feldversuch), so wie auch die stationären Versuche im Reaktor. Zusätzlich werden auch die Ergebnisse der wiederholten Auslagerungen (dynamisch am ZaB, bzw. stationär im Reaktor) gezeigt. Diese Untersuchungen dienen primär dazu zu untersuchen, ob die gewünschten Effekte auch nach mehrmaliger Reinigung noch auftreten.

### 5.2.1 Dynamische Versuche

Bei der Durchführung der ersten dynamischen Versuche im Laborprüfstand der TU-Graz wurden 6 verschiedene Compounds untersucht, da der Wirkstoff  $Mg(OH)_2$  erst im späteren Projektverlauf mitaufgenommen wurde. Sowohl in der optischen Analyse als auch im Säureaufschluss wurden die besten Ergebnisse (wenig Versinterung) mit den Compounds bestehend aus PE+PEG, PE+Zeolith, PE+Ammoniumphosphat und PE+Na-Stearat erzielt (vgl. Abbildung 62).

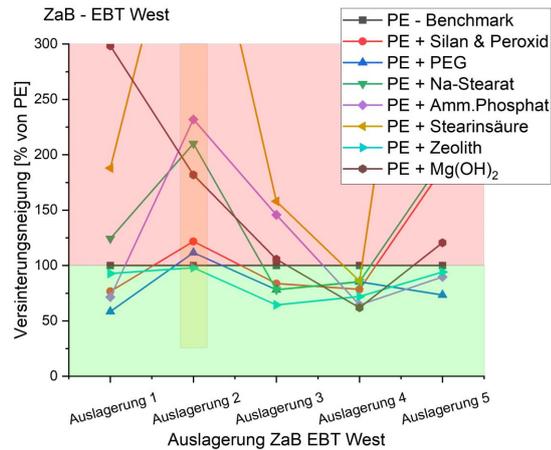


**Abbildung 62: Zusammenfassende Darstellung der Wirksamkeit der entwickelten Materialien zur Verringerung von Versinterungen im Laborversuch, sowie bei Auslagerungen im Lainzer-Tunnel [25].**

Ebenfalls in Abbildung 62 dargestellt sind die Ergebnisse der Proben aus dem Lainzer-Tunnel. Abermals fanden sich vor allem PE+PEG, PE+Zeolith, PE+Ammoniumphosphat und PE+Na-Stearat unter den besten der untersuchten Wirkstoffe. Die Proben, die am Drainageausgang des Tunnels Steinhaus platziert waren, wurden bei einer Tunnelspülung leider beschädigt und konnten nicht ausgewertet werden.

Die letzten Proben in dynamischen Systemen wurden am Zentrum am Berg in Eisenerz ausgelagert. Die Proben wurden dabei in Schächte des Straßentunnels STR Nord, bzw. des Eisenbahntunnels EBT West eingebracht und für eine, bzw. drei Wochen ausgelagert. Bemerkenswert ist dabei der Unterschied, bzw. generell die Höhe der pH-Werte der Gewässer (Nord; pH=11,5 und Süd pH=8,5). Bei einem sehr hohen pH-Wert von 11,5 entstanden auf den ausgelagerten Versuchsproben bereits nach einer Woche starke Versinterungen. Interessanterweise, schaffte es hier das nicht modifizierte Matrixmaterial (PE) in die Top 3 des Rankings (Tabelle 18). Dies könnte eine Indikation dafür sein, dass bei derart hohen pH-Werten die gewählten Modifikationen im Vergleich zu moderateren Milieus nicht wirksam sind. Bei den Proben, die an der Kreuzung Süd und einem gemäßigten pH-Wert von ~8,5 ausgelagert wurden, zeigte sich hingegen primär wieder die gewohnte Reihenfolge.

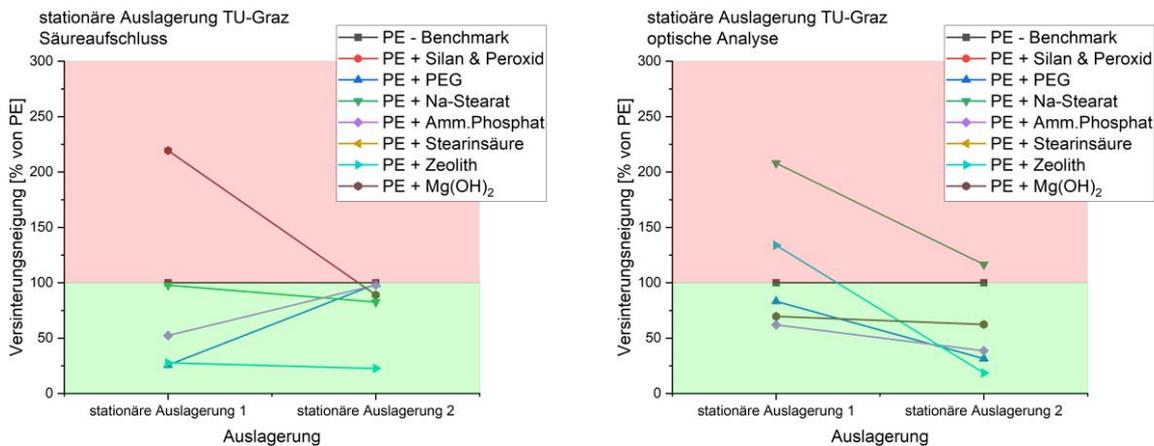
Um zu überprüfen, ob die aufgetretenen Effekte der untersuchten Compounds nur einmalig, oder auch mehrmals wirksam sind, wurden dieselben Proben mehrmals in der Auslagerungsstelle ZaB EBT West ausgelagert, ausgewertet und gereinigt. Dieser Vorgang wurde, wie in Abbildung 63 gezeigt in Summe fünf Mal wiederholt. Mit Ausnahme der zweiten Messung, bei der die Werte nach oben versetzt sind, zeigten die Messungen 1, 3, 4 und 5 ähnliche Trends und vor allem die Compounds mit PEG und Zeolith zeigten konstant gute Ergebnisse. Die Analyseergebnisse der zweiten Messung lassen sich durch die Einleitung von Bergwasser über zusätzliche Rohrleitungen erklären, wofür der Schacht für Rohre angebohrt werden musste und von einer kurzzeitig erhöhten Mobilisierung von Stoffen ausgegangen werden kann, die die Versinterungsneigung steigerte. Darauf kann auch der abfallende Trend der Versinterungsneigung bei den Auslagerungen 2 bis 4 gründen.



**Abbildung 63: Wirksamkeit der entwickelten Kunststoffe bei mehrmaliger Auslagerung [25]**

### 5.2.2 Stationäre Versuche

Wie eingangs erwähnt, wurden neben den dynamischen Versuchen auch stationäre Versuche durchgeführt. Der primäre Unterschied dabei ist, dass die angesetzten Lösungen im Reaktor nicht wie bei fließenden Gewässern ausgetauscht (erneuert) werden. Analog zu den Wiederholungsmessungen im ZaB EBT West wurden die Proben dieser Versuche ebenfalls nach den ersten Untersuchungen gereinigt und abermals ausgelagert. Die Ergebnisse zu den stationären Versuchen sind nachfolgend in Abbildung 64 dargestellt. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Compounds mit Silan und Stearinsäure in diesen zusätzlichen Versuchen basierend auf den wenig aussichtsreichen Ergebnissen der vorangehenden Untersuchungen nicht weiter untersucht wurden.



**Abbildung 64: Ergebnis der wiederholten Auslagerung im stationären Versuchsreaktor an der TU-Graz – Auswertung mittels Säureaufschluss und optischer Analyse der Oberfläche [25].**

Wie ersichtlich, sind auch im stationären Versuch vor allem wieder PE mit PEG, Zeolith und Polyphosphat unter den besonders effizienten Materialien vertreten.

### 5.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Zur übersichtlichen Darstellung wurden die drei hinsichtlich reduzierter Versinterungsneigung jeweils aussichtsreichsten Kunststoff-Compounds aller Auslagerungsversuche nachfolgend in Tabelle 18 zusammengefasst. Durch diese Form der Darstellung ist es möglich, relativ schnell grundsätzliche Aussagen über die generelle Wirksamkeit der Compounds zu treffen. Die Farben dienen nur zur vereinfachten Wahrnehmung der jeweils gleichen Compounds, haben aber keine Bedeutung hinsichtlich der Wirksamkeit o.ä. Ausgehend von dieser Tabelle und den Platzierungen, scheint das PE-Compound mit Zeolith unter den gegebenen Auslagerungsbedingungen am besten gegen Versinterung zu wirken. Auf dem zweiten Platz, mit annähernd gleicher Effizienz, folgen die Compounds mit Polyethylen-Glykol, sowie Ammonium-Polyphosphat.

**Tabelle 18: Zusammenfassung und Wertung aller Untersuchungen hinsichtlich der Versinterungsneigung der verwendeten PE-Kunststoffe mit Zusatzstoffen [25]**

Bauwerk / Bezeichnung	Auswertemethode	1. Platz	2. Platz	3. Platz	pH
<b>dynamische Versuche</b>					
Rinne	Optisch	PE+Amm.Phosphat	PE+Na-Stearat	PE+PEG	7.8-8.1
	Säureaufschluss	PE+Zeolith	PE+Na-Stearat	PE+Amm.Phosphat	
Lainzer Tunnel	Optisch	PE+Zeolith	PE+Amm.Phosphat	PE+PEG	8.1-8.5
	Säureaufschluss	PE+Mg(OH) <sub>2</sub>	PE+Na-Stearat	PE+Zeolith	
ZaB Süd	Optisch	PE+Zeolith	PE+PEG	PE+Silan	8.5
	Säureaufschluss	PE+Zeolith	PE+Amm.Phosphat	PE	
ZaB Nord	Optisch	PE+PEG	PE	PE+Silan	11.5
	Säureaufschluss	PE	PE+Zeolith	PE+Na-Stearat	
<b>statische Versuche</b>					
Statischer Versuch 1	Optisch	PE+Amm.Phosphat	PE+Mg(OH) <sub>2</sub>	PE+PEG	7.7-8.1
	Säureaufschluss	PE+PEG	PE+Zeolith	PE+Amm.Phosphat	
Statischer Versuch 2	Optisch	PE+Zeolith	PE+PEG	PE+Amm.Phosphat	7.7-8.1
	Säureaufschluss	PE+Zeolith	PE+Na-Stearat	PE+Mg(OH) <sub>2</sub>	

Basierend auf den in dieser Studie erhaltenen Ergebnissen scheinen die Kunststoff-Compounds mit Zeolith, Polyethylen-Glykol und Ammoniumphosphat das Versinterungsverhalten positiv, im Sinne einer geringeren Neigung zur Sinterbildung, zu beeinflussen. Bei sehr hohen pH-Werten (>>9) führen jedoch extrem hohe Übersättigungen an CaCO<sub>3</sub> Mineralen zu sehr raschen Versinterungen auf den exponierten Kunststoff-Oberflächen, welches die Effizienz der Wirkstoffe deutlich begrenzen kann. Daher sollten die gefundenen Ergebnisse in Bauwerken mit sehr hohen pH-Werten mit Vorsicht betrachtet werden. Nichtsdestoweniger, ist als logischer nächster Schritt ein „upscaling“ der gefundenen Compounds auf reale Rohrgeometrien, mit anschließender Versuchsreihe in Bauwerken, anzusetzen. Dazu wird derzeit mit Rohrherstellern an einer Umsetzung gearbeitet. Als erster

Aufstellungsort für Versuche mit realen Rohrgeometrien, wäre der Aufbau am Zentrum am Berg geplant (siehe 4.6.2). Dabei können vier Rohrstrecken DN200 mit realem Bergwasser gespeist und hinsichtlich der Versinterungsneigung untersucht werden.

## **6 AUSBLICK UND WEITERFÜHRENDE ARBEITEN**

### **6.1 Weiterführende Aktivitäten**

Nachfolgend sind einige weitere Schritte beschrieben, die aus derzeitiger Sicht notwendig wären, um eine Umsetzung der gefundenen Ergebnisse zu ermöglichen.

#### **6.1.1 „Up-scaling“ auf reale Rohre und Formteile**

##### **6.1.1.1 Firmenpartner & Material-Akquise**

Einer der herausforderndsten Punkte ist mit Sicherheit darin zu sehen, einen geeigneten Firmenpartner für die Umsetzung im industriellen Maßstab zu finden. Da es ein relativ komplexer Prozess ist, Materialrezepturen bei der Herstellung von Rohren zu verändern, ist dies auch mit dementsprechendem Aufwand und Kosten beim Hersteller verbunden. Aus diesem Grund werden derartige Versuche nur nach sorgfältiger Abwägung in Betracht gezogen.

Da das potentielle Anwendungsgebiet von Drainagerohren im Tunnelbau im Vergleich zum Kanal- und Kommunalbau relativ klein ist, sollte hierbei aktiv auf potentielle Hersteller zugegangen werden.

#### **6.1.2 Validierungsversuche an realen Bauteilen**

##### **6.1.2.1 Hochdruckreinigung & Kettenschleuder-Beständigkeit**

Obwohl die verwendeten Matrixmaterialien regelmäßig hinsichtlich ihrer Beständigkeit gegenüber Hochdruckreinigung und Kettenschleuder getestet werden und die verwendeten Rezepturen keine signifikanten Eigenschaftsänderungen im Vergleich zu den Reinmaterialien zeigen, sollten erste hergestellte Produkte zur Absicherung die klassischen Prüfungen durchlaufen.

#### **6.1.3 Anpassung der Richtlinie Tunnelentwässerung**

##### **6.1.3.1 Zulassung verstärkter Rohre**

Derzeit werden gemäß Richtlinie Tunnelentwässerung keine Rohre mit Verstärkungs- oder Füllstoffen zugelassen. Da die entwickelten Rezepturen jedoch Füllstoffe beinhalten, müsste dafür eine Ausnahme in den bestehenden Regularien deklariert werden.

##### **6.1.3.2 Verweis auf bestehende Normen**

Ähnlich zum vorangehenden Punkt, müsste hinsichtlich der prinzipiellen Voraussetzungen der verwendeten Rohre eine Veränderung der Richtlinie implementiert werden. Derzeit werden die erlaubten Rohre durch Verweis auf vorhandene Normen im Kanalbereich beschrieben. Diese beinhalten jedoch, mit Ausnahme von Mehrschichtrohren, meist keine Kriterien hinsichtlich verstärkter bzw. modifizierter Rohre.

## **6.1.4 Generell weiterführende Schritte und Tätigkeiten**

### **6.1.4.1 Bauwerkserfassung**

Im Rahmen des Projekts beschäftigte sich der Lehrstuhl für Subsurface Engineering der Montanuniversität ausgiebig mit der Erfassung und Katalogisierung verschiedener Tunnelbauwerke, mit speziellem Fokus auf die darin verbauten Drainage-Systeme. Die so gewonnenen Daten werden auch nach Projektlaufzeit weiterhin gesammelt und ausgewertet, um ein umfassendes Verständnis für die Möglichkeiten und Hindernisse im Tunnelbau, mit Bezug auf die Drainagesysteme, aufzubauen.

### **6.1.4.2 MA Sturmbauer – Beständigkeit von Rohren gegenüber Hochdruckspülung**

Da sich während der Projektlaufzeit immer wieder herausstellte, dass nicht nur die Versinterung, bzw. Versinterungsneigung selbst, sondern vor allem auch die anschließenden Reinigungsprozesse sich stark auf die Drainagesysteme auswirken, wird derzeit in einer Masterarbeit (Felix Sturmbauer), betreut durch die BOKU Wien (Betreuer: Michael Stur) an der Entwicklung eines Vorgabekatalogs gearbeitet, mit dem es später möglich sein soll, klare Vorgaben hinsichtlich der Drainagen Spülung, vor allem in Hinsicht auf lokale Begebenheiten vor Ort (welche Rohre sind verbaut, wie alt sind die Rohre, gibt es Vorschäden, etc.) machen zu können.

Im Rahmen dieser Arbeit (Unterstützung für die Messtechnik durch eine Bachelorarbeit an der JKU Linz unter Prof. Zagar in Abstimmung mit Michael Stur) wurde bereits ein Prüfstand entwickelt (siehe **Abbildung 65**), mit dessen Hilfe Rohre realitätsgetreu gespült werden können – während auftretende Kräfte gemessen und analysiert werden.



**Abbildung 65: Entwickler Prüfstand zur Bestimmung der auftretenden Kräfte bei Spülvorgängen in Drainagerohren**

#### **6.1.4.3 Bauwerks-Sanierung**

Wie im vorangehenden Kapitel bereits angedeutet, stellte sich im Projektverlauf heraus, dass neben der Versinterungsneigung neuer Rohrwerkstoffe für zukünftige Bauwerke, vor allem auch die Sanierung bestehender Bauwerke in naher Zukunft in den Fokus rücken wird. Ausgehend vom gewonnenen Wissen des Projekts PolyDrain, formierte sich ein neues Konsortium, bestehend aus Materialwissenschaftler, Tunnelbauer und Sanierungsexperten, das sich im zwischenzeitlich genehmigten Projekt „DrainRepair“ (VIF2019) mit dieser Thematik näher befassen wird.

## 7 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: (a) Ausbildung des Drainage-Systems des Gotthard Basistunnel (System Tunnelndrainage, Ehrbar, ATG, 2009) (b) Versinterung eines Kunststoffrohres innerhalb weniger Monate .....	9
Abbildung 2: Ausgeschlagene Teilstücke der Drainagerohre im Tunnel Sieberg [5].	11
Abbildung 3: Darstellung der unterschiedlichen Möglichkeiten (Füllstoffe im Volumen, oder an der Oberfläche) zur Modifizierung von Kunststoffen in Drainagerohren [10]	13
Abbildung 4: Darstellung der Interaktion aller beteiligter Projektpartner im Projekt PolyDrain.....	22
Abbildung 5: Ergebnis der (Kerb-)Schlagzähigkeitsuntersuchung (a) und Kerbempfindlichkeit (b) ausgewählter Werkstoffe [5] .....	26
Abbildung 6: Übersichtsbild der untersuchten Schlag- und Kerbschlagversuche an Material aus Platten, sowie direkt aus den Bruchstücken der Rohrwand der Drainagerohre im Tunnel Sieberg entnommen.....	27
Abbildung 7: Mikroskopische Untersuchung der Rohrwand-Bruchstücke aus dem Sieberg-Tunnel: (a) ins Material eingewachsene Risse, (b) REM-Aufnahme des in die Rohrwand eingewachsenen Risses, (c) beispielhafte Bruchstelle 1, (d) REM-Aufnahme mit Anzeichen von mikro-Duktilität in Bruchstelle 1, (e) & (f) REM-Aufnahmen mit relativ spröden Bruchflächen; REM-Aufnahmen mit 400x Vergrößerung .....	28
Abbildung 8: Ergebnis der Schlagzähigkeitsuntersuchung derzeit verwendeter Rohrmaterialien (direkt aus Rohrwand DN250 Rohr entnommen) in Abhängigkeit des Kerbradius .....	29
Abbildung 9: Biegeeigenschaften derzeit verwendeter Rohrmaterialien (direkt aus Rohrwand DN250 Rohr entnommen). .....	30
Abbildung 10: Kettenschleuderbeständigkeit derzeit verwendeter Rohrmaterialien (direkt aus Rohrwand DN250 Rohr entnommen): schwarz PE, rot uPVC und orange PP. ....	31
Abbildung 11: Reaktionszonen des Bergwassers mit zementgebundenen Baustoffen [2]. .....	31
Abbildung 12: Versinterungen des Achrain-Tunnels in Vorarlberg (links) und des Tunnels Reinertshof in Bayern (rechts). .....	32
Abbildung 13: Übersichtskarte erhobener Tunnel bezogen auf die großgeologischen Einheiten Österreichs nach [16] (T1-Siebertunnel, T2-Galgenbergtunnel Tunnel, T3-Tunnel Steinhaus, T4-Zammer Tunnel, T5-Umfahrungstunnel Grünburg, T6-Tunnel Himmelreich, T7-Tunnel Reinertshof, T8-Zentrum am Berg).....	34
Abbildung 14: Einleitung der Ulmendrainage in die Sohlndrainage mit Fallstrecke des Wassers [15]. .....	36
Abbildung 15: Rotationsspüldüse im Steinhaustunnel [19].....	39
Abbildung 16: Zeugnis harter Ablagerungen von Sinter im Zammer Tunnel [22]. ....	41
Abbildung 17: Spülgeschwindigkeiten des Grünburgtunnels. Die Abschnitte mit höherem Versinterungspotenzial treten infolge verringerter Spülgeschwindigkeiten hervor [23]. .....	46
Abbildung 18: links: Revisionsnische (RN 05 E) vor der Reinigung; rechts: Mischwasserbildung, Drainagen vor der Reinigung mit und ohne Versinterungen. Der blaue Pfeil signalisiert die Flussrichtung.....	46

Abbildung 19: Putzschacht im Tunnel Himmelreich mit verunreinigtem Restwasser bei der Drainagereinigung. ....	49
Abbildung 20: Spülzeiten des Tunnels Himmelreich. Die Abschnitte mit höherem Versinterungspotenzial zeigen sich anhand langsamerer Spülgeschwindigkeiten [21]. ....	49
Abbildung 21: Feste Versinterungsprobe aus der südlichen Ulmendrainage auf 1 x 1 cm Raster [23]. ....	50
Abbildung 22: Transport- und Drainageleitung der Oströhre im Zugangsschacht ausgeführt in Ortbetonbauweise im Tunnel Reinertshof [23]. ....	51
Abbildung 23: Nachbestückte Härtestabilisatoren, 8x500g in Transportleitung, 6x500g im Überlaufbrunnen [23]. ....	51
Abbildung 24: Übersicht Österreichs des ÖBB-Schienennetzes (orange), des ASFINAG Straßennetzes (grün) und der Tunnelbauwerke (blau). ....	52
Abbildung 25: Darstellung optionaler Metadaten des Wiltener Tunnels (A12 in Innsbruck) mit QGIS. ....	54
Abbildung 26: Ulmendrainage des Notausstiegs Markwardstiege vor (a) und nach (b) dem Einlegen und Fixieren der Halbschalen. ....	58
Abbildung 27: Prüfstand zur Bestimmung der Kettenschleuderbeständigkeit mit (a) Gelenkbolzen- oder (b) Gliederketten. ....	60
Abbildung 28: Versagensart von Proben im Kettenschleuder-Versuch (a) im Gegensatz zum realen Versagensbild (b) bei Tunnelreinigungen [5]. ....	61
Abbildung 29: Prüfstand zur Bestimmung der Kettenschleuderbeständigkeit mit (a) Gelenkbolzen- oder (b) Gliederketten. ....	62
Abbildung 30: Neu entwickelter Versuchsaufbau für das Arbeitspaket 3b. Im Labormaßstab werden Abscheidungen von Kalziumkarbonat-Mineralen aus einer übersättigten Lösung simuliert und mittels bildgebender Verfahren im Detail analysiert [24,25]. ....	64
Abbildung 31: Mineralogische Analytik mittels Raman-Spektren (a), Infrarotspektroskopie (FT-IR) (b) und Röntgendiffraktometrie (XRD) (C) eines neu gebildeten Präzipitats an der Kunststoffoberfläche von PVC. Die Spektren zeigen das Mineral Kalzit an und sind unter den derzeit gewählten repräsentativ für die Ausfällungen auf den verschiedenen Kunststoffoberflächen. ....	64
Abbildung 32: Inbetriebnahme des Drainage-Schlitz-Prüfstands durch IB-Strobl (a) und Einbringung unterschiedlicher Drainage-Schlitz Geometrien (b). ....	65
Abbildung 33: Versinterung der Drainageschlitze (a) und Ablagerung von Versinterungsschichten innerhalb der ersten 4 Monate. ....	66
Abbildung 34: Ausbau des Spritzbetons aus dem Drainage-Prüfstand aufgrund starker Zementation durch karbonatische Versinterung. ....	66
Abbildung 35: Abgeplatzte Sinterkrusten in der Drainage-Teststrecke des Tunnels Steinhaus. ....	67
Abbildung 36: Einbau der neu entwickelten Kunststoffmischungen als gestanzte Proben (Durchmesser 10mm) in Stahlhalterung (a) und verschiedener kommerzieller Kunststoffe (b) am Drainageausgang des Tunnels Steinhaus. ....	67
Abbildung 37: Schematische Darstellung der Vor- und Nachteile der Füllstoffverteilung in einer Rohrwand [10]. ....	70
Abbildung 38: Untersuchung des mechanischen Verhaltens unter Biegebelastung, gemäß ISO 178. ....	71

Abbildung 39: Übersichtsbild und Detailaufnahmen der neu gebildeten Kalzite an der Kunststoffoberfläche von PVC-U. Die obere Bildreihe (A) zeigt die ausgefallenen Kalzit-Kristalle an der Kunststoffoberfläche von PVC-U am Anfang der Rinne, während die unteren 3 Bilder (B) die aufgewachsenen Kristalle an der PVC-U-Oberfläche am Ende der Rinne darstellen. ....	73
Abbildung 40: Übersichtsbild und Detailaufnahmen der neu gebildeten Kalzite an der Kunststoffoberfläche von PP. Die obere Bildreihe (A) zeigt die ausgefallenen Kalzit-Kristalle an der Kunststoffoberfläche von PP am Anfang der Rinne, während die unteren 3 Bilder (B) die aufgewachsenen Kristalle an der PP-Oberfläche am Ende der Rinne darstellen. ....	73
Abbildung 41: Übersichtsbild und Detailaufnahmen der neu gebildeten Kalzite an der Kunststoffoberfläche von PE. Die obere Bildreihe (A) zeigt die ausgefallenen Kalzit-Kristalle an der Kunststoffoberfläche von PE am Anfang der Rinne, während die unteren 3 Bilder (B) die aufgewachsenen Kristalle an der PE-Oberfläche am Ende der Rinne darstellen. ....	74
Abbildung 42: Übersichtsbild und Detailaufnahmen der neu gebildeten Kalzite an der Kunststoffoberfläche von PFA. Die obere Bildreihe (A) zeigt die ausgefallenen Kalzit-Kristalle an der Kunststoffoberfläche von PFA am Anfang der Rinne, während die unteren 3 Bilder (B) die aufgewachsenen Kristalle an der PFA-Oberfläche am Ende der Rinne darstellen. ....	74
Abbildung 43: Übersichtsbild und Detailaufnahme der neu gebildeten Kalzite an der Kunststoffoberfläche von reinem PE. Die obere Bildreihe (A) zeigt die ausgefallenen Kalzit-Kristalle an der Kunststoffoberfläche von PE am Anfang der Rinne, während die unteren 3 Bilder (B) die aufgewachsenen Kristalle an der PE Oberfläche am Ende der Rinne darstellen. ....	76
Abbildung 44: Übersichtsbild und Detailaufnahme der neu gebildeten Kalzite an der Kunststoffoberfläche von PE mit 4% Silan + 0,5% Peroxid. Die obere Bildreihe (A) zeigt die ausgefallenen Kalzit-Kristalle an der Kunststoffoberfläche von PE mit 4% Silan + 0,5% Peroxid am Anfang der Rinne, während die unteren 3 Bilder (B) die aufgewachsenen Kristalle an der PE mit 4% Silan + 0,5% Peroxid Oberfläche am Ende der Rinne darstellen. ....	76
Abbildung 45: Übersichtsbild und Detailaufnahme der neu gebildeten Kalzite an der Kunststoffoberfläche von PE mit 4 % Polyethylenglycol-co-Polyethylen. Die obere Bildreihe (A) zeigt die ausgefallenen Kalzit-Kristalle an der Kunststoffoberfläche von PE mit 4 % Polyethylenglycol-co-Polyethylen am Anfang der Rinne, während die unteren 3 Bilder (B) die aufgewachsenen Kristalle an der PE mit 4 % Polyethylenglycol-co-Polyethylen Oberfläche am Ende der Rinne darstellen. ....	77
Abbildung 46: Übersichtsbild und Detailaufnahme der neu gebildeten Kalzite an der Kunststoffoberfläche von PE mit 4 % Natriumstearat. Die obere Bildreihe (A) zeigt die ausgefallenen Kalzit-Kristalle an der Kunststoffoberfläche von PE mit 4 % Natriumstearat am Anfang der Rinne, während die unteren 3 Bilder (B) die aufgewachsenen Kristalle an der PE mit 4 % Natriumstearat Oberfläche am Ende der Rinne darstellen. ....	77
Abbildung 47: Übersichtsbild und Detailaufnahme der neu gebildeten Kalzite an der Kunststoffoberfläche von PE mit 4 % Ammoniumpolyphosphat. Die obere Bildreihe (A) zeigt die ausgefallenen Kalzit-Kristalle an der Kunststoffoberfläche von PE mit 4 % Ammoniumpolyphosphat am Anfang der Rinne, während die unteren 3 Bilder (B)	

die aufgewachsenen Kristalle an der PE mit 4 % Ammoniumpolyphosphat Oberfläche am Ende der Rinne darstellen. ....	78
Abbildung 48: Übersichtsbild und Detailaufnahme der neu gebildeten Kalzite an der Kunststoffoberfläche von PE mit 4 % Stearinsäure. Die obere Bildreihe (A) zeigt die ausgefallenen Kalzit-Kristalle an der Kunststoffoberfläche von PE mit 4 % Stearinsäure am Anfang der Rinne, während die unteren 3 Bilder (B) die aufgewachsenen Kristalle an der PE mit 4 % Stearinsäure Oberfläche am Ende der Rinne darstellen. ....	78
Abbildung 49: Übersichtsbild und Detailaufnahme der neu gebildeten Kalzite an der Kunststoffoberfläche von PE mit Zeolith. Die obere Bildreihe (A) zeigt die ausgefallenen Kalzit-Kristalle an der Kunststoffoberfläche von PE mit Zeolith am Anfang der Rinne, während die unteren 3 Bilder (B) die aufgewachsenen Kristalle an der PE mit Zeolith Oberfläche am Ende der Rinne darstellen. ....	79
Abbildung 50: Darstellung der Auswerteprozedur mittels Bildanalyse zur Quantifizierung der Effektivität der entwickelten Kunststoffcompounds [24]. ....	80
Abbildung 51: Auslagerung der entwickelten Kunststoffcompounds am Drainageausgang des Tunnels Steinhaus (a) und im Lainzer-Tunnel (b) [10]. ....	81
Abbildung 52: Layout des ZaB (Zentrum am Berg) mit eingetragenen Bergwasserschächten PS04 und PS07 der Probenrägerauslage. ....	82
Abbildung 53: Monitoring des Bergwassers in den Schächten der Sammelleitung mit Datumsangabe der Messung. Oben: pH-Wert. Mitte: Elektrische Leitfähigkeit. Unten: Temperatur. Lage von PS04 und PS07 siehe Abbildung 52. ....	83
Abbildung 54: Links: Probenräger in PS04; Mitte: Probenräger in PS07; Rechts: Probenrägerauslage in PS07 mit Zu- und Ableitungen. ....	84
Abbildung 55: Versuchsaufbau der stationären Versuche mit den neu entwickelten Kunststoffen. Die Kunststoffe wurden an Schrauben befestigt, um ein Aufschwimmen in der Wassersäule zu vermeiden [24] ....	85
Abbildung 56: Vergleich der Ergebnisse der unterschiedlichen Auswertemethoden: Säureaufschluss & optische Analyse [24]. ....	88
Abbildung 57: Auslagerung der modifizierten Kunststoffe am ZaB [24].....	91
Abbildung 58: Ergebnisse der wiederholten Auslagerung der Kunststoffe im ZaB - West [24].....	92
Abbildung 59: Auslagerung der modifizierten Kunststoffe im statischen Versuchsstand der TU-Graz [24].....	93
Abbildung 60: Links: Auslagerung der Spritzbetonbruchstücke; Mitte: In-situ Messung nach der Schwelle; Rechts: Foto der Sinterstrecke [26]. ....	94
Abbildung 61: Schema des Versuchsaufbaues entlang der Sinteranlage [26]. ....	95
Abbildung 62: Zusammenfassende Darstellung der Wirksamkeit der entwickelten Materialien zur Verringerung von Versinterungen im Laborversuch, sowie bei Auslagerungen im Lainzer-Tunnel [24].....	99
Abbildung 63: Wirksamkeit der entwickelten Kunststoffe bei mehrmaliger Auslagerung [24] ....	100
Abbildung 64: Ergebnis der wiederholten Auslagerung im stationären Versuchsreaktor an der TU-Graz – Auswertung mittels Säureaufschluss und optischer Analyse der Oberfläche [24]. ....	100
Abbildung 65: Entwickelter Prüfstand zur Bestimmung der auftretenden Kräfte bei Spülvorgängen in Drainagerohren.....	105



## 8 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Abgehaltene Projektmeetings .....	23
Tabelle 2: Publikations- und Disseminationstätigkeiten.....	24
Tabelle 3: Akademische Arbeiten mit Bezug zu PolyDrain.....	25
Tabelle 4: Liste der untersuchten Werkstoffe mittels Schlag- und Kerbschlagzähigkeit .....	27
Tabelle 5: Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie der Sinterproben in Abbildung 12. Weitere Minerale wie z.B. Dolomit etc. waren nicht detektierbar.....	32
Tabelle 6: Tunnel Steinhaus, Gegenüberstellung geologischer und hydrogeologischer Verhältnisse und der Versinterungsgrade an den Installationsorten der Sinterwächter (SW) [18] .....	40
Tabelle 7: Chronologischer Vergleich von Stützmitteln und Elementen des Entwässerungssystems in Eisenbahntunneln [21]. .....	56
Tabelle 8: Vor-Ort-Parameter der im Lainzer Tunnel gewählten Notausstiege für die Auslagerung der Halbschalen .....	58
Tabelle 9: Prozessparameter beim Pressvorgang:.....	69
Tabelle 10: Bisher entwickelte und untersuchte Material-Rezepturen.....	69
Tabelle 11: Ranking der getesteten neu entwickelten Kunststoffe anhand ihrer Versinterungsneigung gemäß Ergebnissen aus Säureaufschluss und Bildanalyse ..	79
Tabelle 12: Ergebnisse der getesteten, neu entwickelten Kunststoffe anhand ihrer quantitativen Analyse mittels Säureaufschluss (6%ige HNO <sub>3</sub> ) der an der jeweiligen Kunststoffoberfläche gebildeten Kalziumkarbonat-Präzipitate aus dem ersten statischen Versuch. ....	85
Tabelle 13: Ergebnisse der getesteten neu entwickelten Kunststoffe anhand ihrer quantitativen Analyse mittels Säureaufschluss (6%ige HNO <sub>3</sub> ) der an der jeweiligen Kunststoffoberfläche gebildeten Kalziumkarbonat-Präzipitate aus dem Lainzer-Tunnel. ....	86
Tabelle 14: Ergebnisse der getesteten, neu entwickelten Kunststoffe anhand ihrer quantitativen Analyse mittels Säureaufschluss (6%ige HNO <sub>3</sub> ) der an der jeweiligen Kunststoffoberfläche gebildeten Kalziumkarbonat-Präzipitate aus der Nord-Drainage der Anlage Zentrum am Berg. ....	86
Tabelle 15: Ergebnisse der getesteten, neu entwickelten Kunststoffe anhand ihrer quantitativen Analyse mittels Säureaufschluss (6%ige HNO <sub>3</sub> ) der an der jeweiligen Kunststoffoberfläche gebildeten Kalziumkarbonat-Präzipitate aus der West-Drainage der Anlage Zentrum am Berg. ....	87
Tabelle 16: Zusammenfassung der Ergebnisse der Auslagerungsversuche in verschiedenen Bauwerken [24] .....	88
Tabelle 17: Auslagerungszeitpunkte und der jeweilige Bergwasserschacht. ....	90
Tabelle 18: Zusammenfassung und Wertung aller Untersuchungen hinsichtlich der Versinterungsneigung der verwendeten PE-Kunststoffe mit Zusatzstoffen [24].....	101

## 9 ANHÄNGE

### 9.1 Publikationen

#### 9.1.1 Geomechanics and Tunneling – Research on pipe materials for tunnel drainage by the ÖBB Task Force Drainage

Tobias Schachinger  
 Florian Arbeiter

Stefanie Eichinger  
 Florian Saliger

Topics

DOI: 10.1002/geot.201900022

### Research on pipe materials for tunnel drainage by the ÖBB Task Force Drainage

#### Forschung der ÖBB-Task Force Drainage zu Rohrmaterialien der Tunnelentwässerung

Due to the additional tunnels that are currently under design or construction, drainage maintenance costs are expected to rise significantly over the next few years. An increased amount of maintenance will also be necessary due to older drainage pipes damaged during intensive cleaning and flushing. To counter these problems, an internal task force for drainage pipes has been installed within the ÖBB. Together with research institutions from several fields of science, projects are being carried out to find ways to decrease the overall maintenance effort. Topics include screening of possible rehabilitation methods for damaged pipes, and investigation of currently used materials with regard to their mechanical suitability. A multi-disciplinary research topic has also been initiated to investigate the potential of material modifications with the goal to decrease overall precipitation in drainage pipes and associated maintenance. First results on modified materials already show potential to decrease calcite precipitation.

Aufgrund der aktuell in Bau befindlichen Tunnelbauwerke wird sich der Aufwand für die Instandhaltung von Bauwerksdrainagen bei der ÖBB innerhalb der nächsten Jahre vervielfachen. Ein weiteres Problem stellen ältere Tunneldrainagen dar, die durch intensive Reinigung beschädigt werden und einen zusätzlichen Instandhaltungsaufwand bedeuten. Ausgehend von diesen Problemstellungen wurde innerhalb der ÖBB die Task Force Drainage gegründet. Gemeinsam mit Forschungspartnern aus verschiedenen Fachdisziplinen wird derzeit untersucht, wie die Instandhaltung optimiert werden kann. Dabei werden sowohl potenzielle Möglichkeiten zur Instandsetzung als auch die Materialeignung der derzeit verbauten Drainagen untersucht. Zusätzlich wird versucht in einem Disziplinen-übergreifenden Projekt neue Materialien mit verringertem Versinterungspotenzial und einhergehender Reduktion des Reinigungsaufwands zu entwickeln. Erste Untersuchungen zeigen dabei bereits auf, dass Potenzial hinsichtlich Materialoptimierung gegeben ist.

#### 1 Introduction – Drainage pipes in tunnel drainage systems

Austrian Railways ÖBB currently has to maintain about 420 km of drainage (drainage pipes and invert drainage channels) in tunnels, which are water pressure – relieved. On completion of the tunnel projects that are currently under construction (Semmering Base Tunnel, Koralmtunnel, Brenner Base Tunnel), it is foreseeable that in 2026 a total of about 1,081 km of drainage pipes will be installed in Austrian railway tunnels, which will also have to be constantly maintained. The current costs for personnel, equipment for flushing drainage will therefore be multiplied.

Since 2016 the ÖBB Task Force Drainage (TFD) has initiated projects [1] in order to reduce future maintenance measures for drainage as much as possible. One essential part of these projects was to investigate the material of tunnel drainage pipes.

Since there were no uniform requirements for the material of drainage pipes in tunnels until 2003, thin-walled pipes of uPVC (unplasticized PVC) were mostly used. From 2003, the requirements were specified in a guideline for the "detailing of tunnel drainage systems" [2], which was revised in 2010 [3]. According to this guideline, the use of drainage pipes of the materials uPVC, PE-HD and PP is possible as long as they comply with the normative requirements. Drainage pipes must however be subjected to additional testing of their resistance to high-pressure jetting and to cleaning with chain scrapers [3].

#### 1 Einleitung – Drainagerohre in Tunnelentwässerungssystemen

Die ÖBB hat derzeit circa 420 km Bauwerksdrainagen (Drainagerohrleitungen und Sohlkanäle) in Tunnelbauwerken, die druckwasserentlastet ausgeführt sind, instand zu halten. Nach Abschluss der aktuell in Bau befindlichen Tunnelprojekte (Semmering-Basistunnel, Koralmtunnel, Brenner Basistunnel) werden aus derzeitiger Sicht ab 2026 etwa 1.081 km Drainagerohre in österreichischen Eisenbahntunneln verbaut sein, die ebenfalls laufend instand zu halten sind. Die aktuell für Drainagespülungen vorgesehenen Aufwendungen hinsichtlich Personal, Gerätschaften und Kosten werden sich dabei vervielfachen.

Daher wurden ab 2016 von der ÖBB – Task Force Drainage (TFD) Projekte ins Leben gerufen [1], um auch die zukünftig anfallenden Instandhaltungsmaßnahmen für Drainagen so gering wie möglich zu halten. Ein wesentlicher strategischer Bestandteil dieser Projekte war das Rohrmaterial der Bauwerksdrainagen.

Da es bis 2003 keine einheitlichen Anforderungen an das Rohrmaterial von Bauwerksdrainagen gab, wurden im überwiegenden Fall dünnwandige Rohre aus uPVC (Hart-PVC) verwendet. Ab 2003 wurden Anforderungen in einer Richtlinie zur „Ausbildung von Tunnelentwässerungen“ geregelt [2], die 2010 fortgeschrieben wurde [3]. Gemäß dieser Richtlinie ist der Einsatz von Drainagerohren aus den Materialien uPVC, PE-HD und PP möglich, sofern die

## 9.1.2 Berg und Hüttenmännische Monatshefte – Optimierte Polymer-Rohrwerkstoffe für effiziente Drainagesysteme in Tunnelbauwerken - PolyDrain



Berg Huettenmaenn Monatsh (2019) Vol. 164 (12): 545–551  
<https://doi.org/10.1007/s00501-019-00918-6>  
 © Der/die Autor(en) 2019



### Optimierte Polymer-Rohrwerkstoffe für effiziente Drainagesysteme in Tunnelbauwerken – PolyDrain

Florian Arbeiter<sup>1</sup>, Stefanie Eichinger<sup>2</sup>, Gisbert Rieß<sup>3</sup>, Tobias Schachinger<sup>4</sup>, Ronny Boch<sup>5</sup>, Robert Wenighofer<sup>6</sup>, Robert Galler<sup>7</sup>, Andreas Hausberger<sup>8</sup>, Elmar Strob<sup>9</sup>, Michael Stur<sup>9</sup>, Florian Saliger<sup>9</sup>, Michael Steiner<sup>9</sup>, Martin Dietzel<sup>9</sup> und Gerald Pinter<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich  
<sup>2</sup>Institut für Angewandte Geowissenschaften, Technische Universität Graz, Graz, Österreich  
<sup>3</sup>Lehrstuhl für Chemie der Kunststoffe, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich  
<sup>4</sup>Österreichische Bundesbahnen ÖBB Infrastruktur AG, Wien, Österreich  
<sup>5</sup>Lehrstuhl für Subsurface Engineering, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich  
<sup>6</sup>Polymer Competence Center Leoben GmbH, Leoben, Österreich  
<sup>7</sup>Ingenieurbüro Strob, Strobl, Österreich  
<sup>8</sup>Institut für Angewandte Geologie, Universität für Bodenkultur Wien, Wien, Österreich  
<sup>9</sup>Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft ASFINAG, Wien, Österreich

Eingegangen 15. Oktober 2019; angenommen 18. Oktober 2019; online publiziert 18. November 2019

**Zusammenfassung:** Ausgehend von der Problematik aufwändiger Instandhaltungsarbeiten für die Funktionstüchtigkeit von Drainagerohren in Tunnelbauwerken wurde das interdisziplinäre Forschungsprojekt „PolyDrain“ initiiert. Im Rahmen des Forschungsprojekts werden diesbezüglich kritische Bauwerke in Österreich erhoben und vielversprechende Methoden zur Verringerung von zumeist karbonatischen Versinterungen in Drainagerohren untersucht. Durch gezielte Materialmodifikationen der Drainagerohre soll der Instandhaltungsaufwand zukünftiger oder zu sanzierender Tunnelbauwerke reduziert werden, indem Reinigungsintervalle gestreckt und/oder Reinigungen rascher durchgeführt werden können. Der gewählte Ansatz umfasst die maßgeschneiderte Modifizierung von Kunststoff-Drainagerohrmaterialien. Dadurch ist es möglich, mechanisch widerstandsfähigere Rohre zu erzeugen und/oder das Versinterungsverhalten im Drainagerohr, inklusive der Drainageschlitzte, zu reduzieren. Bevor eine Umsetzung im großtechnischen Maßstab möglich ist, ist es allerdings wichtig, nicht nur die kurzzeitige Wirksamkeit – im Projekt auch im Labor – zu untersuchen.

**Schlüsselwörter:** Drainagerohr, Tunnelbau, Versinterung, Materialentwicklung

Dipl.-Ing. Dr. mont. F. Arbeiter (✉)  
 Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe,  
 Montanuniversität Leoben,  
 Otto Glöckel-Strasse 29,  
 8700 Leoben, Österreich  
 Florian.Arbeiter@unileoben.ac.at

**Optimized Polymer Pipe Materials for Efficient Drainage Systems in Tunneling Applications – PolyDrain**

**Abstract:** Keeping tunnel drainage systems operational requires to deploy less expensive and time-consuming maintenance procedures. Therefore, the inter-disciplinary research project “PolyDrain” was initiated. This project comprises conducting a survey of critical tunnels in Austria as well as developing methods to decrease scale deposits in drainage pipes. The chosen approach is based on modifying the polymer matrix of drainage pipes by adding active fillers to obtain a final composite material. Accordingly, the durability of pipes can be increased and/or the precipitation can be reduced in the drainage, including areas of drainage slits. However, before these findings can be applied in large scale reality, further long-term evaluations – also in the lab – are necessary.

**Keywords:** Drainage pipes, Tunneling, Scale deposits, Material development

#### 1. Einleitung – Drainagerohre im Tunnelbau

Drainagesysteme dienen in druckwasserentlasteten Tunnelbauwerken der permanenten konzentrierten Ableitung

## 9.1.3 Berg und Hüttenmännische Monatshefte – Optimierte Polymer-Rohrwerkstoffe für effiziente Drainagesysteme in Tunnelbauwerken – PolyDrain Part II



Berg Huettenmaenn Monatsht  
<https://doi.org/10.1007/s00501-020-01045-3>  
© Der/die Autor(en) 2020

**BHM** Berg und Hüttenmännische Monatshefte

### Optimierte Polymer-Rohrwerkstoffe für effiziente Drainagesysteme in Tunnelbauwerken – PolyDrain Teil II

Florian Arbeiter<sup>1</sup>, Stefanie Eichinger<sup>2</sup>, Gisbert Rieß<sup>3</sup>, Tobias Schachinger<sup>4</sup>, Ronny Boch<sup>5,6</sup>, Robert Wenighofer<sup>7</sup>, Robert Galler<sup>8</sup>, Andreas Hausberger<sup>9</sup>, Elmar Strob<sup>9</sup>, Michael Stur<sup>9</sup>, Florian Saliger<sup>9</sup>, Michael Steiner<sup>9</sup>, Martin Dietze<sup>9</sup> und Gerald Pinter<sup>9</sup>

<sup>1</sup>Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich  
<sup>2</sup>Institut für Angewandte Geowissenschaften, Technische Universität Graz, Graz, Österreich  
<sup>3</sup>Lehrstuhl für Chemie der Kunststoffe, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich  
<sup>4</sup>Österreichische Bundesbahnen ÖBB Infrastruktur AG, Wien, Österreich  
<sup>5</sup>Geoconsult ZT GmbH, Wissenspark Salzburg Urstein, Puch bei Hallein, Österreich  
<sup>6</sup>Lehrstuhl für Subsurface Engineering, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich  
<sup>7</sup>Polymer Competence Center Leoben GmbH, Leoben, Österreich  
<sup>8</sup>Ingenieurbüro Strob, Kumberg, Österreich  
<sup>9</sup>Institut für Angewandte Geologie, Universität für Bodenkultur Wien, Wien, Österreich  
<sup>10</sup>Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft ASFINAG, Wien, Österreich

Eingegangen 14. Oktober 2020; angenommen 19. Oktober 2020

**Zusammenfassung:** Um notwendige Reinigungsarbeiten zur Aufrechterhaltung der Drainagewirkung von Drainageröhren in Tunneln zu minimieren, wurden im gegenständlichen Projekt Kunststoffe mit verschiedenen aktiven Wirkstoffen modifiziert, welche die Versinterungsneigung an den Rohroberflächen reduzieren sollen. Ausgehend von dieser praktischen Fragestellung wurden sieben verschiedene Rezepturen hinsichtlich ihres Potentials zur Verringerung der karbonatischen Versinterungen und zur industriellen Verarbeitbarkeit bewertet. Die hergestellten Compounds aus Matrix-Kunststoff, einem kommerziell verfügbaren Polyethylen-Rohr Typ und dem jeweiligen Wirkstoff sind zu Prüfkörpern verarbeitet und sowohl in Labors als auch in Feldversuchen in realen Tunnelbauwerken ausgelagert worden. Anschließend fand die Beurteilung der Probekörper hinsichtlich der aufgewachsenen Versinterungen mittels chemischem Säureaufschluss, sowie optischen Analyseverfahren statt. Hinsichtlich der Verringerung der Versinterung zeigten das Polyethylen-Glykol Copolymer sowie das Compound mit Zeolith die besten Effekte.

**Schlüsselwörter:** Tunnelbau, Drainagerohr, Versinterung, Feldversuche, Kunststoffrohr

**Optimized Polymer Pipe Materials for Efficient Drainage Systems in Tunnelling Applications – PolyDrain Part II**

**Abstract:** Aim of this project was to develop modified polymers which can reduce the precipitation of scale deposits in tunnel drainage pipes. This is necessary to reduce the maintenance costs for cleaning and flushing of the pipes. Based on this issue, 7 different compounds, consisting of a polyethylene base polymer and active fillers were developed. Selection of the fillers was based on their potential to reduce precipitations of scale deposits as well as large-scale processability. The developed compounds were processed into specimens and exposed to drainage-waters both in laboratory as well as field tests in actual tunnels. Subsequently, CaCO<sub>3</sub> precipitations on the materials were analyzed using chemical and optical methods. Regarding the efficacy, especially the compounds with polyethylene-glycol and zeolite proved to be very promising.

**Keywords:** Tunneling, Drainage pipe, Scale deposits, Field experiments, Polymer pipe

Dr. F. Arbeiter (✉)  
Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe,  
Montanuniversität Leoben,  
Franz-Josef-Str. 18,  
8700 Leoben, Österreich  
florian.arbeiter@unileoben.ac.at

Berg Huettenmaenn Monatsht

© Der/die Autor(en)

## 9.1.4 MinPET 2019 – Affecting Carbonate Scaling by Tailored Drainage Materials – An Experimental Approach

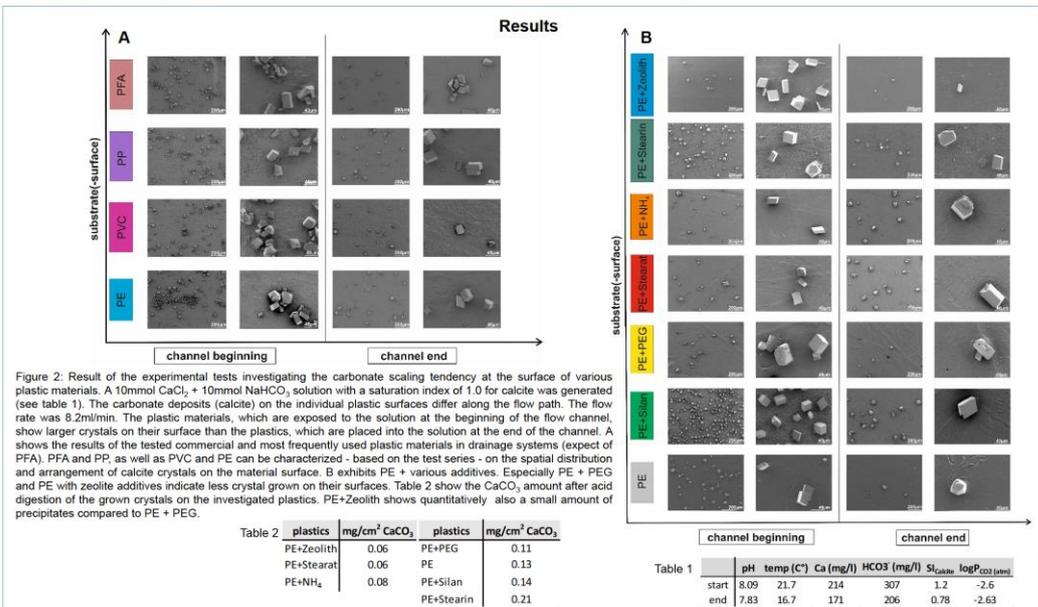
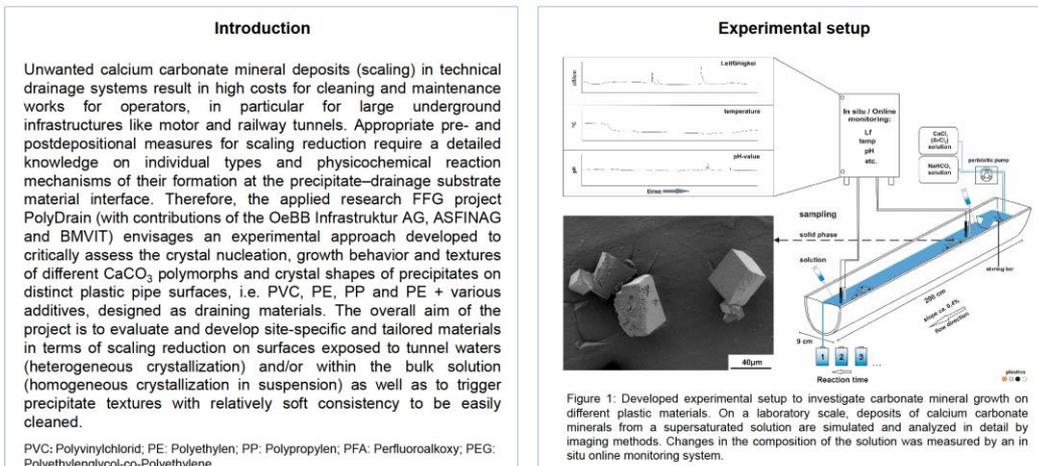
### Affecting Carbonate Scaling by Tailored Drainage Materials - An Experimental Approach

Stefanie Eichinger<sup>1</sup>, Florian Arbeiter<sup>2</sup>, Ronny Boch<sup>1</sup>, Tobias Schachinger<sup>3</sup> & Martin Dietzel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Applied Geosciences, Graz University of Technology, Rechbauerstraße 12, 8010 Graz, Austria

<sup>2</sup>Institute of Material Science and Testing of Polymers, Montanuniversität Leoben, Otto Glöckel-Strasse 2, 8700 Leoben, Austria

<sup>3</sup>OBB Infrastructure AG, SAE- Fachbereich Bautechnik – Tunnelbau, Nordbahnstraße 50, 1020 Vienna, Austria



#### Conclusion

Preliminary results show that the mineral precipitates consist of various kinds of calcite crystals with different shapes and amounts on the distinct plastic surfaces as well as significant differences in nucleation behavior, crystallite abundance and sizes. Tailored plastic materials (e.g. PE+Zeolith) perform much better in respect to quantitative results of carbonate scaling tendency compared to most frequently used materials used in drainage systems (PVC, PE and PP, see table 2).

## 10 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Dietzel M, Kieffer DS, Schubert W, Schweiger H, Semprich S. Drainagesysteme im Tunnelbau: Design, Versinterung und Instandhaltung. Verlag der Technischen Universität Graz; 2008.
- [2] Dietzel M, Rinder T, Niedermayr A, Mittermayr F, Leis A, Klammer D et al. Ursachen und Mechanismen der Versinterung von Tunnel drainagen. Berg Huettenmaenn Monatsh 2008;153(10):369–72. <https://doi.org/10.1007/s00501-008-0412-3>.
- [3] Rebel W. Schematische Darstellung des Gotthard Basistunnel. [December 09, 2020]; Available from: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:GBT-tube.png>.
- [4] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik. Richtlinie Tunnelentwässerung. Wien; 2010.
- [5] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik. Richtlinie Tunnelentwässerung. Wien; 2010.
- [6] Schachinger T, Arbeiter FJ, Eichinger S, Saliger F. Research on pipe materials for tunnel drainage by the ÖBB Task Force Drainage. Geomechanik Tunnelbau 2019;12(5):467–71. <https://doi.org/10.1002/geot.201900022>.
- [7] Wagner OK, Koch D, Lemmerer J, Druckfeuchter H, Petraschek T. Maintenance-optimised drainage system for the New Semmering Base tunnel and Pummersdorf Tunnel / Instandhaltungsoptimiertes Entwässerungssystem für den Semmering-Basistunnel neu und Tunnel Pummersdorf. Geomechanik Tunnelbau 2014;7(5):626–35. <https://doi.org/10.1002/geot.201400032>.
- [8] Siegmann K, Sterchi R, Zuber F, Vetterli B, Widler R, Hirayama M. Sol–gel coatings with lime repellent properties. J Sol-Gel Sci Technol 2011;59(3):574–9. <https://doi.org/10.1007/s10971-011-2530-8>.
- [9] Siegmann K, Sterchi R, Widler R, Hirayama M. Lime repellent polyethylene additives. J. Appl. Polym. Sci. 2013;129(5):2727–34. <https://doi.org/10.1002/app.38928>.
- [10] Martina Hirayama LM. Surfaces that reduce adhesion(EP1816155 B1).
- [11] Arbeiter F, Eichinger S, Rieß G, Schachinger T, Boch R, Wenighofer R et al. Optimierte Polymer-Rohrwerkstoffe für effiziente Drainagesysteme in Tunnelbauwerken – PolyDrain. Berg Huettenmaenn Monatsh 2019;164(12):545–51. <https://doi.org/10.1007/s00501-019-00918-6>.
- [12] Huneault MA, Godfroy PG, Lafleur PG. Performance of talc/ethylene-octene copolymer/polypropylene blends. Polym. Eng. Sci. 1999;39(6):1130–8. <https://doi.org/10.1002/pen.11500>.
- [13] Scott D. Wear. New York: Academic Press; 1979.
- [14] Wang Q, Xu J, Shen W, Liu W. An investigation of the friction and wear properties of nanometer Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> filled PEEK. Wear 1996;196(1-2):82–6. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)06866-X](https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)06866-X).
- [15] Lu S-Y, Hamerton I. Recent developments in the chemistry of halogen-free flame retardant polymers. Progress in Polymer Science 2002;27(8):1661–712. [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(02\)00018-7](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(02)00018-7).
- [16] Riepler L. Bauwerke als Ursache für Versinterungen [Bachelorarbeit]. Leoben: Montanuniversität Leoben; 2017.

- [17] Wessely G, Liebl W. Oil and Gas in Alpidic Thrustbelts and Basins of Central and Eastern Europe. Petroleum Exploration and Production in Thrustbelts and Foreland Basins: 1994 EAGE Conference in Vienna. London: Geological Society:217–35; 1996.
- [18] Joanneum Research. Hydrogeologischer Bericht für den Zeitraum 2003 der S6, Semmering Schnellstraße; 2004.
- [19] Felber S. Problematik der Tunneldrainagesysteme Österreichs [Masterarbeit]. Leoben: Montanuniversität Leoben; 2019.
- [20] ASFINAG Autobahnmeisterei Mürzzuschlag. Protokollierung Drainagenzustand und Spülarbeiten. Mürzzuschlag; 2014.
- [21] Institut für Subsurface Engineering. Zweigleisiger Ausbau Nahverkehr. Ötztal – Landeck. Abschnitt Kronburg – Landeck. Km 67+740,000 – Km 71+356,296. Ausführungsprojekt. Zammertunnel. Tunnelregelquerschnitt mit Sohlgewölbe Masse-Feder-System; 1994.
- [22] Gusenbauer D. Entwicklung der Entwässerungssysteme in Eisenbahntunneln in Österreich [Masterarbeit]. Leoben: Montanuniversität Leoben; 2020.
- [23] ÖBB Infrastruktur AG. Spülbericht; 2016.
- [24] Czerniak M. Bestandserhebung des Wartungsaufwandes von Drainagesystemen von Verkehrstunnel [Masterarbeit]. Leoben: Montanuniversität Leoben; 2021.
- [25] Arbeiter F, Eichinger S, Rieß G, Schachinger T, Boch R, Wenighofer R et al. Optimierte Polymer-Rohrwerkstoffe für effiziente Drainagesysteme in Tunnelbauwerken—PolyDrain Teil II. Berg Huettenmaenn Monatsh 2020;165(12):623–30. <https://doi.org/10.1007/s00501-020-01045-3>.
- [26] Eichinger S, Arbeiter FJ, Boch R, Schachinger T, Dietzel M. INFLUENCING CARBONATE SCALING BY TAILORED DRAINAGE MATERIALS IN TUNNELS - AN EXPERIMENTAL APPROACH. In: Austrian Mineralogical Society, editor. MinPet 2019. Graz; 2019, p. 34.
- [27] Videtta S. Reales Versinterungspotential von optimierten Spritzbetonmischungen [Masterarbeit]. Graz: Technische Universität Graz; 2021.