

Versinterung von Tunnel drainagen – Empfehlungen für die Instandhaltung von Tunneln

G. Girmscheid, T. Gamisch, A. Meinlschmidt

562

Grundlagen • Tunnel • Drainage • Instandhaltung

Zusammenfassung In dem vorliegenden Aufsatz werden die Auswirkungen, die die Entfernung von Versinterungen aus Tunnelentwässerungssystemen in Verkehrsinfrastrukturen speziell bei der Deutschen Bahn AG mit sich bringt, aufgezeigt. Im Anschluss werden Instandhaltungsmethoden und Instandhaltungsstrategien der Deutschen Bahn AG und anderer Tunnelbetreiber diskutiert, die sich mit wachsendem Problembewusstsein bezüglich der Auswirkungen von Versinterungen auf die Betriebsbereitschaft, Dauerhaftigkeit und Kostenauswirkung entwickelt haben. Zur Umsetzung der Instandhaltungsstrategien stehen speziell für die Durchführung der Rohrreinigung verschiedene Verfahren und Geräte zur Verfügung. Die Einsatzkriterien konventioneller post-sedimentum Reinigungsverfahren sowie ihre Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit des Entwässerungssystems werden kurz gegenübergestellt. Um die Ablagerungen positiv zu beeinflussen und dadurch die Schäden aus der Rohrreinigung verringern zu können, werden in letzter Zeit ergänzend präventive Instandhaltungsverfahren eingesetzt. Das Ziel der so genannten Härtestabilisation ist die Reduzierung der Versinterungsmenge sowie der Härte (Festigkeit) der entstehenden Ablagerungen. Bei der Härtestabilisation mit dem Wirkstoff Polyasparaginsäure handelt es sich um die Applikation eines chemisch-physikalischen Vorgangs, den Schalentiere bei ihrem Wachstum anwenden.

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Life-cycle-orientierte Instandhaltung der Entwässerungsanlagen von Tunneln der Schnellfahrstrecken bei DB Netz“ wird am Institut für Bauplanung und Baubetrieb der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich ein Kosten- und Entscheidungsmodell für Unterhaltsstrategien von Tunnel drainagesystemen, unter Berücksichtigung der hier vorgestellten Verfahrenskombinationen und der betrieblichen Anforderungen, entwickelt.

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Girmscheid

Professor für Baubetriebswissenschaften und Bauverfahrenstechnik und Vorsteher des Instituts für Bauplanung und Baubetrieb der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich
TH Hönggerberg, HIL F 23.3
H-8093 Zürich
E-Mail: girmscheid@ibb.baug.ethz.ch

Dipl.-Ing. Tobias Gamisch

Assistent am Institut für Bauplanung und Baubetrieb der ETH Zürich
E-Mail: gamisch@ibb.baug.ethz.ch

Dipl.-Ing. Alfred Meinlschmidt

Arbeitsgebietsleiter – Geotechnischer Ingenieurbau bei der Deutschen Bahn AG
Konstruktiver Ingenieurbau (TZF 62)
Theodor-Heuss-Allee 7, 60468 Frankfurt/Main
E-Mail: Alfred.Meinlschmidt@bahn.de

Scale sintering in tunnel drainages – Recommendations for maintenance of tunnels

Abstract In this paper the effects of removal the scale sintering out of tunnel drainages are shown especially by German Railways. After that maintenance methods and strategies will be discussed, which have developed by German Railways and other tunnel operators over the years with increasing awareness of the effects of sintering on operational reliability, durability and financial effects. For implementation of the maintenance strategies especially for pipe cleaning different methods and equipment is available. The criteria for application of conventional post-sedimentum cleaning methods as well as their influence on the durability of the drainage system are compared. For positive influence of the deposits and to reduce the damage caused by pipe cleaning additional preventive maintenance methods are recently used. The objectives of this so-called hardness stabilization are to reduce both the quantity and the hardness (strength) of the formed deposits. The hardness stabilization with the agent polyaspartic acid is an application of a chemical-physical process used by crustaceans for the growth of their shells.

Within the scope of a research project „Life-cycle orientated maintenance of drainage systems in tunnels of the high-speed railway connections at German Railways-Network“ at the Institute for Construction Engineering and Management of the Swiss Federal Institute of Technology Zurich a model of costs and decision for maintenance strategies of tunnel-drainage systems will be developed taking into consideration the combination of practices shown in this paper and allowing for operational requirements.

1 Einleitung

Die Ursachen der Versinterungsentstehung in Tunnel drainagen liegen einerseits in der Aufnahme von Kohlendioxid im Boden und damit einhergehender Aufnahme härtebildender Ionen, durch die Auflösung von Erdalkalicarbonaten. Andererseits bewirken alkalische Baustoffe die Ausfällung gelöster Erdalkalicarbonate [1]. Die Geschwindigkeit, mit der Versinterungen in Tunnel drainagen entstehen, hängt, neben der rein chemischen Beeinflussung des Wassers, von dem Entwässerungssystem selbst ab. Fehler und Mängel begünstigen die Einstellung der chemischen Gleichgewichte im Drainagesystem und damit die Geschwindigkeit und Menge, mit der die Ablagerungen entstehen. Basierend auf den grundlegenden Mechanismen der Versinterungsentstehung wurden in [2] grundsätzliche Hinweise für die Planung und Bauausführung von Tunnel drainagen und weiteren Bauteilen, die mit dem Bergwasser in Kontakt kommen und an der Versinterungsbildung beteiligt sind, gegeben, um in Zukunft Tunnel ausführen zu können, deren Drainagen weniger zur Sinterbildung neigen. Vollständig werden sich die Versinterungen in frei drainierten Tunneln jedoch allein durch geringe bauliche Maßnahmen kaum

verhindern lassen. Deshalb werden auch in Zukunft Instandhaltungsmaßnahmen erforderlich sein.

Zur Beseitigung der entstandenen Ablagerungen steht eine Vielzahl an konventionellen post-sedimentum Rohrreinigungsverfahren und -geräten zur Verfügung. Die Wahl eines Verfahrens sollte jedoch sorgfältig erfolgen, da die erforderlichen Einwirkungen zur Beseitigung der Ablagerungen gleichzeitig die Rohrwandung belasten. Es muss also immer das „optimale“ Verfahren ausgewählt werden. Dies zeichnet sich dadurch aus, dass es die Versinterungen zügig und wirtschaftlich beseitigt, aber andererseits die Rohre nur minimal belastet. Um eine möglichst lange Funktionsfähigkeit des Drainagesystems zu gewährleisten, sind also neben der Einhaltung von baulichen Grundsätzen auch Grundüberlegungen zur Wahl der richtigen Instandhaltungsstrategie für die Tunnelentwässerungsanlagen anzustellen, die im Rahmen eines Forschungsprojektes an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, aus technischen und wirtschaftlichen Aspekten entwickelt werden.

Ein präventives Instandhaltungsverfahren, welches die Ablagerungen wirksam beeinflussen kann, so dass bei korrektem Einsatz der erforderliche Reinigungsaufwand und dessen Auswirkungen deutlich reduziert werden können, ist die Härtestabilisation. Es wird dargelegt, wie der Wirkstoff Polyasparaginsäure die Bildung von Kalkkristallen hemmt und stört. Ferner wird beschrieben, in welchen Einsatzformen der Wirkstoff in die Tunnelentwässerungsanlagen gegeben werden kann und welche Potenziale in diesem Verfahren stecken. Im Rahmen des Forschungsprojektes der Deutschen Bahn AG in Zusammenarbeit mit dem Institut für Bauplanung und Baubetrieb der ETH Zürich wurde der Einsatz von Depotsteinen in drei Referenztunneln untersucht. Es werden erste Erfahrungen aus diesen Praxisuntersuchungen dargestellt und weitere Entwicklungsschritte aufgezeigt.

2 Auswirkung der Versinterungen auf die Instandhaltungskosten

Der erforderliche Reinigungsaufwand zur Beseitigung der Ablagerungen in den Drainagesystemen verursacht sehr hohe Kosten. Um die Nutzung nicht übermäßig zu stören, können die erforderlichen Wartungsarbeiten oft nur in der verkehrsarmen Zeit über Nacht durchgeführt werden. Durch Nachtzuschläge kommt es daher zu einer Verteuerung der primären Kosten.

Zur Verdeutlichung des Ausmaßes sei hier ein rund 3 Kilometer langer Bahntunnel der Schnellfahrstrecke Hannover-Würzburg genannt, in dem in den Jahren 1999 bis 2002 durchschnittlich direkte primäre Wartungskosten allein für die Reinigung des Tunnelentwässerungssystems in Höhe von rund 90'000.- Euro pro Jahr entstanden.

Neben den hohen primären Reinigungskosten schränkt die Wartung die Nutzung der Bauwerke ein. Insbesondere in Bahntunneln verursachen die erforderlichen Spül- und Fräsarbeiten durch Streckensperrungen und Umleitungen oft erhebliche logistische Betriebsprobleme. Neben den direkten primären Kosten für die Reinigungsarbeiten entstehen den Betreibern der Tunnel betriebsintern weitere Kosten. Dies sind zum einen sekundäre direkte Kosten für die Organisation der Reinigungseinsätze, wie Planung der Umleitungen, Bereitstellung von Sicherungsmaßnahmen etc., aber auch indirekte Kosten z.B. durch Verschleiß der Fahrleitung und Fahrstrecke infolge von zusätzlichen Beschleu-

nigungs- und Bremsmanövern, zusätzliche Energiekosten infolge von Umleitungen, Schadensersatzforderungen etc. Beispielsweise wird bei der Deutschen Bahn AG, in Abhängigkeit von der Streckenauslastung, mit betriebsinternen Aufwendungen zwischen 30 und 60 % der direkten primären Spülkosten gerechnet.

Verfolgt man das Beispiel des oben genannten Bahntunnels weiter, so kann von ungefähren Kosten in Höhe von 135'000.- Euro pro Jahr ausgegangen werden (indirekte Kosten ~ 50 % der Spülkosten), was jährlich etwa 45.- Euro je Tunnelmeter entspricht. Dazu addieren sich weitere laufende Kosten für die Instandhaltung der restlichen Tunnelinfrastruktur.

Bei der bisherigen Betrachtungsweise blieb ein häufig unterschätzter Kostenfaktor noch unberücksichtigt. Für die Entfernung der harten Ablagerungen sind oft Geräte nötig, die hohe mechanische Einwirkungen auf die Versinterungen ausüben, um den inneren Verbund als auch die Verbundkräfte mit der Rohrwandung zu lösen. Entsprechend werden auch die Rohrleitungen selbst hohen mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt, die zu Verschleißerscheinungen führen [3].

Eine Kanalspülung führt bei sachgemäßer Verlegung geeigneter Rohre auch langfristig in der Regel nicht zu nachhaltigen Beschädigungen. Dagegen bewirken Fräsarbeiten eine hohe mechanische und abrasive Beanspruchung der Leitungen, besonders an Bögen, Nahtstellen und Verbindungen. Dadurch steigt mit dem Alter des Entwässerungssystems und der Zahl der Reinigungsvorgänge auch die Gefahr von Ausbrüchen bis hin zur Zerstörung der Leitungen. Mängel bei der Ausführung des Entwässerungssystems erhöhen das Beschädigungsrisiko beträchtlich. Die Folge einer Beschädigung sind kostenintensive Instandsetzungsmaßnahmen, wie sie in vielen Tunneln bereits ausgeführt werden mussten bzw. bevorstehen.

Als Beispiel sei hier ein anderer Tunnel der Schnellfahrstrecke Hannover-Würzburg herausgegriffen, dessen Entwässerungssystem speziell im Hinblick auf die Feststellung von Beschädigungen einer Kamerabefahrung unterzogen wurde. Dabei wurden auf einer Drainagelänge von rund 8400 Metern fast 2000 Schadstellen festgestellt. Der Tunnel ist aber erst seit 16 Jahren in Betrieb. Trotzdem ist im Durchschnitt etwa alle 4 Meter eine Schadstelle zu finden! Sein Entwässerungssystem musste in der Vergangenheit zweibis drei Mal pro Jahr gereinigt werden, wobei aufgrund der Härte der gebildeten Versinterungen fast durchgängig Fräsarbeiten erforderlich waren.

Werden je Schadstelle durchschnittlich 1000.- Euro Instandsetzungskosten angesetzt, so entstehen für die Instandsetzung des Tunnelentwässerungssystems dieses Tunnels schätzungsweise zusätzliche Kosten von 2 Mio. Euro, die als unmittelbare Folgekosten der Drainagereinigung anzusehen sind. Dies würde über 16 Jahre gerechnet einem jährlichen zusätzlichen Finanzaufwand von fast 92'000 Euro, respektive 17.- Euro je Jahr und Tunnelmeter entsprechen, zu dem wiederum weitere betriebsinterne Aufwendungen für Streckensperrungen und Umleitungen etc. zu zählen sind. Allerdings werden sich die Instandhaltungskosten nicht linear über das Tunnelalter entwickeln, sondern erfahrungsgemäß mit zunehmendem Alter kontinuierlich ansteigen. Vor diesem Hintergrund entschied sich die Deutsche Bahn AG zur Durchführung eines Forschungs- und Entwicklungsprojektes, in Zusammenarbeit mit der Eidgenössischen Tech-

nischen Hochschule Zürich zur Evaluierung und dem Vergleich der Kosten für verschiedene Instandhaltungsstrategien, unter besonderer Berücksichtigung des Einsatzes der Härtstabilisation.

3 Instandhaltungsstrategien

Zur Instandhaltung der Entwässerungssysteme von Tunneln sind sehr unterschiedliche Strategien möglich. Der Bauherr sollte auf die Funktionstüchtigkeit der Drainage besonders hohen Wert legen. Oft wird diesen „versteckten“ Bauelementen, die im täglichen Betrieb nicht direkt wahrgenommen werden, zu wenig Beachtung geschenkt, obwohl durch deren Funktionsuntüchtigkeit langfristig erheblicher latenter baulicher und betrieblicher Schaden verursacht werden kann.

In der Vergangenheit wurde das Versinterungsproblem bei der Deutschen Bahn AG wie auch bei anderen Betreibern eher untergeordnet behandelt. Deshalb wurde auch lediglich eine Minimal-Strategie verfolgt. Es lagen keine Informationen über das Ausfallverhalten der Tunnelentwässerungsanlagen vor. Man inspizierte zwar die Tunnel, wartete aber ab, bis es zum Ausfall der Entwässerung kam, was sich durch Wasseraustritte aus den Kontroll- und Reinigungsschächten bzw. den Blockfugen der Innenschale äußerte. Erst dann wurden notfallmäßig Wartungsmaßnahmen eingeleitet.

Nachdem man sich des Ausmaßes und der damit verbundenen Kosten bewusster wurde und erste Informationen über das Versinterungsverhalten gesammelt hatte, begann man mit der Umsetzung einer Abgrenzungs-Strategie. Demnach wurden besonders gefährdete Bereiche eingegrenzt und der voraussichtliche Ausfallzeitpunkt abgeschätzt, um die primär betroffenen Drainageleitungen rechtzeitig warten zu können.

Derzeit ist aufgrund einer genaueren Dokumentation der benötigten Reinigungsaufwände ein Übergang zu bedarfsgerechten Strategien festzustellen. Bei dieser Vorgehensweise werden die Wartungsintervalle basierend auf den angetroffenen Versinterungen und auf den benötigten Reinigungsaufwendungen nach jeder Maßnahme, in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Zeitfenster und finanziellen Mittel, neu festgelegt. Da die Drainagewartung jedoch betrieblich (zeitlich und räumlich) sowie finanziell von anderen Instandhaltungsmaßnahmen in Tunneln abhängig ist, müssen eher opportunistische Strategien angewendet werden.

Die Reinigung der Entwässerungsleitungen kann entweder parallel oder muss getrennt von anderen Instandhaltungsmaßnahmen im Tunnel stattfinden. Zum Beispiel muss die Instandhaltung der Fahrleitung und des Gleisoberbaus ebenfalls innerhalb der festen Zeitfenster ohne Verkehr ablaufen. In diesem Bereich sind dann keine Arbeiten am Entwässerungssystem möglich. Deshalb ist die Instandhaltungsstrategie für die Entwässerung in Abhängigkeit der anderen Instandhaltungsmaßnahmen und -strategien festzulegen.

Die Deutsche Bahn AG fordert intern von ihren Streckenverantwortlichen eine periodische Inspektion, anhand der erforderliche Instandhaltungsarbeiten eingeleitet werden sollen. Aufgrund der sehr eingeschränkten Zeitfenster und des potentiell hohen Zeitaufwands für die Drainagereinigung unterbleibt jedoch oft der Blick in die Kontrollschächte. Viel-

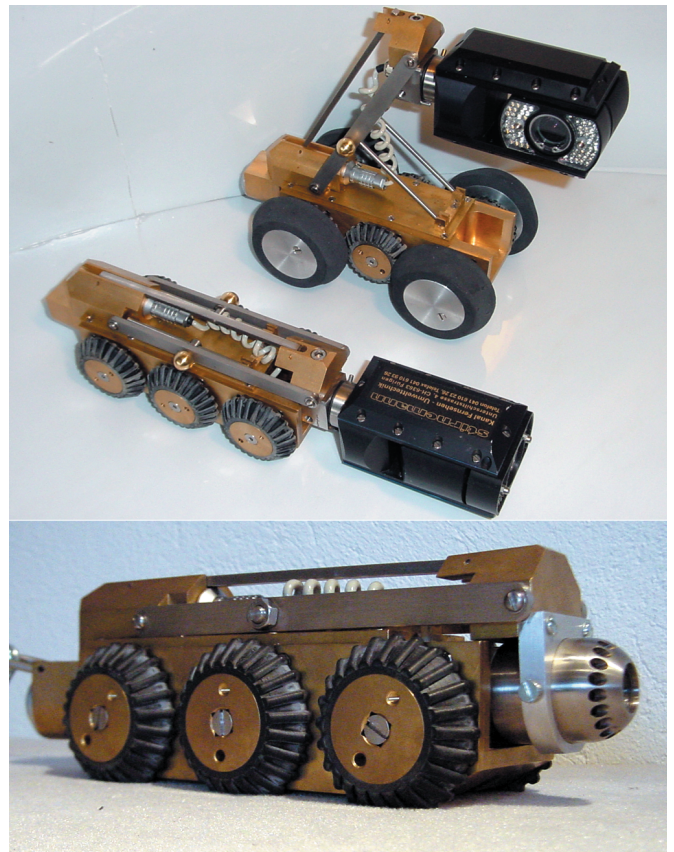


Bild 1. Kanal- und Rohrinspektionskameras (oben: Schwenkkopf-Kamera; unten: Axial-Kamera; mit Genehmigung der Stirnemann Electronic, CH-6363 Fürigen
Fig. 1. Channel- and pipe-inspection cameras (top: pivot-head (pan & tilt) camera; bottom: axial camera; with permission by Stirnemann Electronic, CH-6363 Fürigen)

mehr wird sofort ein Rohrreinigungsunternehmen beauftragt, welches die Haltungen in festgelegten Abständen reinigt.

Eine Inaugenscheinnahme der Schächte allein lässt in vielen Fällen keine Rückschlüsse auf den Versinterungsgrad im Inneren der Rohrleitung zu. Besser wäre eine Inspektion der gesamten Rohrlänge durch Kamerabefahrung. Diese erfordert jedoch einen zeitlichen Aufwand, der innerhalb des jeweiligen Betriebszeitfensters durchgeführt werden muss. Zudem ist die Befahrung oft sehr teuer. Deshalb unterbleibt die vorgängige Inspektion. In Abhängigkeit der Versinterungen in den Schächten bzw. Rohrmündungen wird ein erforderliches Spülgerät gewählt. Erst nach Abschluss der Spülung erfolgt die Erfolgskontrolle mittels Kamerabefahrung (**Bild 1**).

Grundsätzlich ist diese Vorgehensweise als positiv vor dem Hintergrund der eingeschränkten zeitlichen Möglichkeiten zu bewerten. Es bleibt abzuwarten, wie groß die Einsparung ist, die durch vorherige Kamerainspektion zu erzielen wäre. Die bedarfsgerechte Strategie, anhand derer die Reinigungsintervalle in Abhängigkeit vom benötigten Reinigungsaufwand und der bis dahin gebildeten Ablagerungen festgelegt werden, muss allerdings vorsichtig umgesetzt und durch begleitende Schachtinspektionen abgesichert werden. Nicht nur die Bergwasserverhältnisse unterliegen Schwankungen, sondern auch die biologischen Aktivitäten in den Entwässerungsleitungen.

An diversen Beispielen konnten sich die Autoren überzeugen, dass Ulmendrainagen versinterungsfrei vorgefunden

wurden, in denen genau ein Jahr vorher massive Versinterungen mit hohem Aufwand beseitigt werden mussten. Andererseits waren Haltungen stark zugesintert, in denen vorher nur geringe Ablagerungen auftraten. Aus diesem Grund ist vorerst nur eine kombinierte Strategie aus bedarfsgerechter und Inspektions-Strategie die wirksamste, um die Funktionsfähigkeit der Tunneldrainagesysteme dauerhaft aufrechterhalten zu können.

Zur Durchführung der Instandhaltung gemäß den festgelegten Strategien stehen den Betreibern bzw. den damit beauftragten Fremdunternehmen diverse Verfahren zur Verfügung, um die gebildeten Ablagerungen wirksam und wirtschaftlich entfernen zu können. Um die Rohrleitungen nicht übermäßig zu belasten, ist in Abhängigkeit der angetroffenen Versinterungen immer das optimale Verfahren auszuwählen. Es muss einerseits die Versinterungen zügig beseitigen, darf aber andererseits die Rohre nicht beschädigen.

Das Reinigungsgerät erzeugt Einwirkungen auf die Versinterungen, die deren Widerstände übersteigen müssen. Diese Einwirkungen belasten jedoch auch die Rohrwandungen und müssen dauerhaft schadlos von diesen ertragen werden können.

Für die Reinigung der Drainageleitungen stehen sowohl hydraulische, hydromechanische und mechanische Verfahren zur Verfügung. Weiterhin werden präventive chemische Verfahren, die Härtstabilisation, angewandt und weiterentwickelt.

4 Reinigungsverfahren

4.1 Hydraulische Reinigungsverfahren

Für geringe Ablagerungsstärken und Versinterungen geringer Härte eignet sich die herkömmliche Kanalspülung, wie sie auch für die Reinigung kommunaler Abwasserleitungen eingesetzt wird. Dabei kommen vorwiegend feststehende rundumstrahlende Düsen, so genannte Granat- oder Bombendüsen zum Einsatz (**Bild 2**).

Sind die Ablagerungen härter (hohe Festigkeit) und von größerer Dicke, ist eine wirtschaftliche Reinigung nur mit erhöhtem Wasserdruck möglich. Im Extremfall kommen in der Praxis Drücke bis zu 150 bar an der Düse zum Einsatz. Früher versuchte man, dicke und sehr harte Ablagerungen mit bis zu 1000 bar an der Pumpe zu entfernen, obwohl die eingebauten Rohre lediglich Wasserstrahldrücken von ca. 180 bar über 3 Minuten widerstehen können ([4], Prüfverfahren mit stationärer Düse). Die langfristige Folge war eine große Anzahl an Schäden in den Rohren (**Bild 3**).

Die Rohrmaterialien halten solch hohen Beanspruchungen normalerweise nicht stand [3]. Möglich wird dies nur durch die feste Einbettung in den Sickerbeton, da sonst sämtliche Materialien der Kunststoffrohre innerhalb von Sekunden durchschlagen werden. Aus diesem Grund dürfen beim Einsatz der Hochdruckspülung auch keine feststehenden Düsen verwendet werden. Es kommen nur spezielle Rotationsdüsen mit Keramikdüseneinsätzen in Frage (**Bild 4**), die zusätzlich ständig im Rohr bewegt werden müssen, da die



Bild 2. Feststehende Rohrreinigungsdüsen – Granat-Bomben mit unterschiedlichen Keramik-Düsen-einsätzen für spezielle Aufgaben (mit Genehmigung der ENZ® Technik AG, CH-6074 Giswil)

Fig. 2. Fixed nozzles – Grenade bombs with different ceramic inserts for specific problems (with permission by ENZ® Technik AG, CH-6074 Giswil)

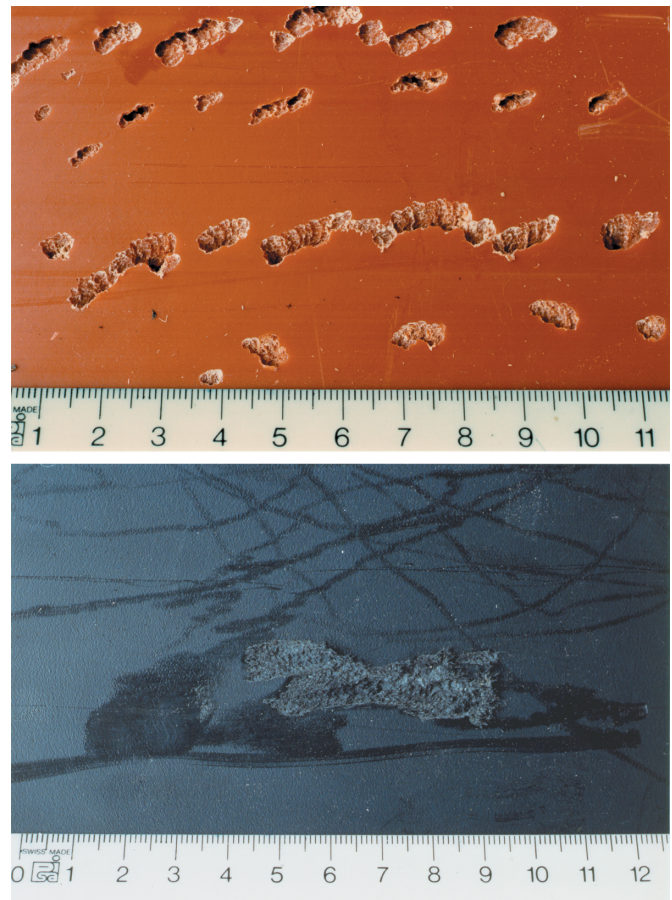


Bild 3. Rohrschäden durch hohe Spüldrücke (400 bar an der Düse) nach 5 Minuten Spülzeit mit fester Düse (oben: PVC-Rohr DN 400; unten: HD-PE-Rohr DN 400) [5]

Fig. 3. Pipe damages as a result of water flushing with high pressure (400 bar at the nozzle) after 5 minutes of flushing with fixed nozzle (top: PVC pipe; bottom: HD-PE pipe; both with a diameter of 400 millimeters) [5]



Bild 4. Rotationsdüsen – Radialdüsen mit 4 x 80° Radialstrahlen zur Rohrreinigung; besonders zur Wiederöffnung versinterter Sickerschlitze (mit Genehmigung der ENZ® Technik AG, CH-6074 Giswil)

Fig. 4. Rotating nozzles – radial nozzles with 4 x 80 degree radial jets for pipe cleaning; especially for re-opening of sintered drain slots (with permission by ENZ® Technik AG, CH-6074 Giswil)

scharfen Wasserstrahlen die Rohre sonst wie ein Messer aufschneiden würden. Es bleibt auch hier zu erforschen, wie sich die Rohre verhalten, wenn sie nicht mehr in festen Filterbeton, sondern in ungebundene Sickerpackungen eingebettet sind.

4.2 Hydromechanische Reinigungsverfahren

Hydromechanische Rohrreinigungsgeräte sind Ketten- und Seilschleudern (Bild 5). Bei diesen wirken zusätzlich zu Wasserstrahlen tangential schlagende Ketten bzw. Stahllitzenseile zertrümmernd auf die Ablagerungen. Mit diesen Geräten ist es daher möglich, sehr harte Ablagerungen, wie Zementleim aus der Bauphase, zu entfernen. Der Einsatzbereich solcher Geräte erstreckt sich im Gegensatz zur landläufigen Meinung auf 80 bis 800 Millimeter Rohrdurchmesser.

Die Schleudern beanspruchen jedoch die Rohrwandung sehr stark, da harte Körper mit einer gewissen Masse gegen die Rohrwandung schlagen. Deshalb sollten keine Rohre damit gereinigt werden, deren Rohr(innen)wandung spröde ist, da es durch Abplatzungen und Scherbenbildung zu Beschädigungen in den Leitungen kommen kann. Neben den offensichtlichen Schäden reduzieren weiterhin erhöhte Ablagerungsmengen infolge vergrößerter Rohrrauigkeit und Undichtigkeiten indirekt die Dauerhaftigkeit und Gebrauchsfähigkeit des Drainagesystems. Besonderes Augenmerk muss deshalb auch auf die richtige Ketten- bzw. Seillänge gelegt werden, da durch zu lang eingestellte Schleuderkörper die Rohre zertrümmert werden.

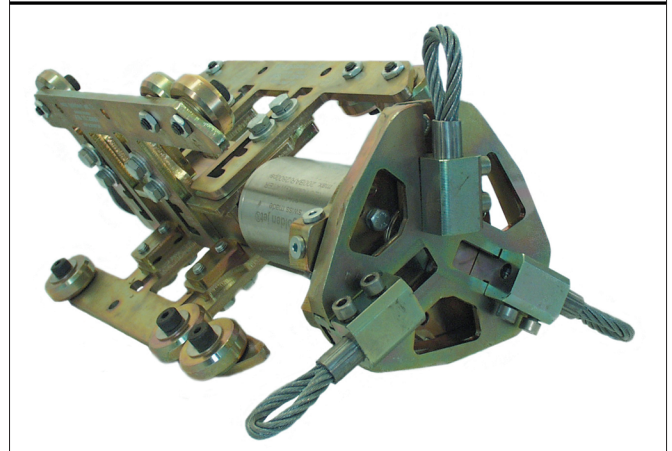
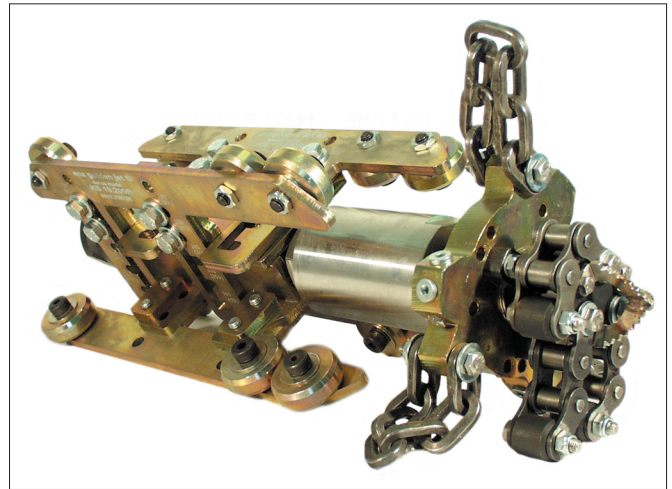


Bild 5. Kettenschleuder (oben) und Seilschleuder (unten); (mit Genehmigung der ENZ® Technik AG, CH-6074 Giswil)

Fig. 5. Chain flail (top) and rope flail (bottom); (with permission by ENZ® Technik AG, CH-6074 Giswil)

4.3 Mechanische Reinigungsverfahren

Befinden sich in den Rohren sehr harte Ablagerungen mit größerer Dicke können oft keine Schleudern mehr eingesetzt werden, da diese nur tangential wirken und der Weg zur Beschleunigung der Schleuderkörper nicht mehr ausreicht, um eine optimale Wirkung zu erzielen. In diesem Fall helfen nur noch rein mechanisch arbeitende Fräsgeräte. Für Rohrdurchmesser ab 100 Millimeter kommen Schlagbohrfräsen (Bild 6) zum Einsatz, die bis zu Rohrdurchmessern von 600 Millimetern die Ablagerungen abfräsen und somit vollständig verschlossene Leitungen wieder öffnen können. Da Kunststoffrohre weiche Rohrwandungen besitzen, müssen für diese Rohrmaterialien Spezialzähne am Umfang des Fräskopfes eingesetzt werden, die eine Führung des Kopfes an der Rohrwandung ohne Schäden ermöglichen. Problematisch sind bei diesen Geräten jedoch enge Richtungswechsel, da der Hydroantrieb, wie auch bei den Schleudern, eine gewisse Größe besitzt. Deshalb können Rohrleitungen mit engen Bögen nicht mit Fräsen „freigebohrt“ werden.

Der reine Einsatz von konventionellen post-sedimentum Reinigungsverfahren bei sehr harten Ablagerungen macht deutlich, dass die Rohre in der Praxis mit sehr harten und robusten Verfahren frei gemacht werden. Dies hat in den meisten Fällen zur Folge, dass erhebliche Schäden in den Drainagesystemen auftreten und somit Funktionsfähigkeit und Dauerhaftigkeit stark beeinflusst werden.

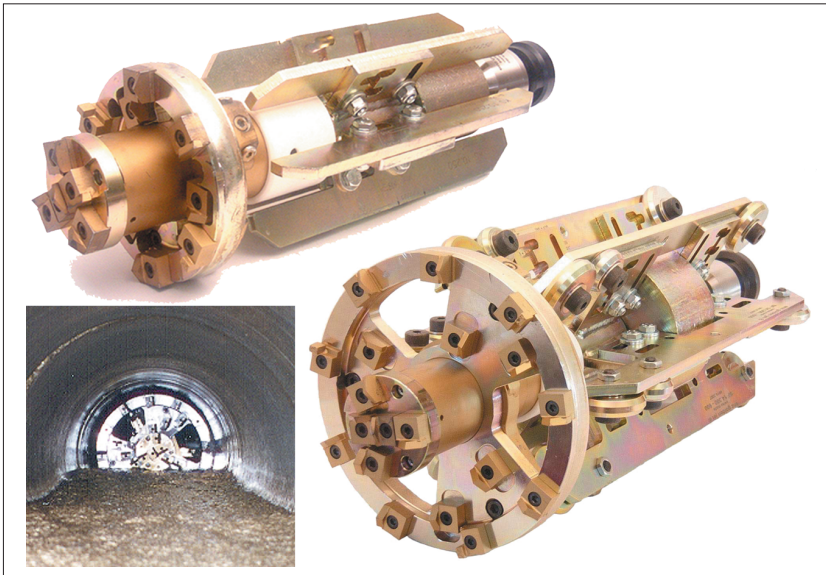


Bild 6. Schlagbohrfräser für DN 200 und DN 300 (mit Genehmigung der ENZ[®] Technik AG, CH-6074 Giswil)

Fig. 6. Impact drilling cutters for diameters of 200 and 300 millimeters (with permission by ENZ[®] Technik AG, CH-6074 Giswil)

Um solche Rohre dennoch reinigen zu können und um den Einsatz von stark rohrverschleißenden Geräten minimieren zu können sowie die Reinigungsfrequenz zu senken, kommen in neuerer Zeit zusätzlich präventive Verfahren zur Anwendung. Ein Verfahren, mit dem die Ablagerungsmenge und –härtet reduziert werden soll, ist die Härtestabilisation.

5 Härtestabilisation des Drainagewassers

Ursprünglich stammt dieses Verfahren aus der Natur. Asparaginsäurereiche Proteine „moderieren“ den Aufbau von anorganischem Skelettmaterial, so z.B. die Schale bzw. das Gerüst von Muscheln und Korallen. Ohne diese Proteine würde die Abscheidung von Kalk zu ungeordneten Anhäufungen von Kristallen führen. Aus diesem Grund bauen sie bei der Schalenbildung bzw. dem Wachstum vermehrt Asparaginsäureketten ein, die sich zwischen die Ebenen der einzelnen Calcit-Kristalle schieben und das Kristallwachstum derart beeinflussen, dass sich die Schalenform ausbildet, die im Erbgut des Schalentiers festgeschrieben ist.

Das Monomer des Wirkstoffs der Härtestabilisation – die Asparaginsäure – ist eine der etwa 20 Aminosäuren, die die Bausteine der Proteine und somit des Lebens ausmachen. Die Polyasparaginsäure ist also ein naturähnlicher Stoff und wird als völlig problemlos eingeschätzt, da sie von Mikroorganismen vollständig abgebaut wird. Deshalb wird sie in Deutschland in die Wassergefährdungskategorie 1 – schwach wassergefährdend, entsprechend der Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe (VwVwS) [6], eingeordnet und es ergeben sich keine Auflagen für den Transport und die Lagerung.

Für die Härtestabilisierung des Drainagewassers kommen Polyasparaginsäure-Konzentrationen im ppm-Bereich zum Einsatz. gemäß der Definition der VwVwS [6], Nr. 2.2.2, a) ist mit Polyasparaginsäure konditioniertes Tunnelabwasser als nicht wassergefährdend einzustufen. Allerdings erfolgen bisher in Deutschland keine generellen Genehmigungen. Die Einsätze müssen individuell mit den jeweils zuständigen Ämtern diskutiert werden. Aufgrund der dezentralen was-

serrechtlichen Zuständigkeiten (Landesrecht) ist keine einheitliche Genehmigungspraxis festzustellen. Die Unterschiede bemessen sich nach den analytischen Anforderungen, die von jeder Wasserrechtsbehörde individuell formuliert werden.

5.1 Wirkungsweise der Härtestabilisation

Die Wirkung der Polyasparaginsäure beruht auf dem Threshold-Effekt (Schwelleneffekt). Die Bildung einer festen Phase aus einer übersättigten Lösung stellt einen Kristallisationsvorgang dar. Eine übersättigte Lösung ist ein Ein-Phasen-System, das thermodynamisch nicht stabil ist. Sie ist vielmehr bestrebt, durch Ausscheidung des entsprechenden Lösungsanteils in einen energieärmeren stabilen Zustand überzugehen. Dabei entsteht eine neue, feste Phase. Dies hat die Schaffung einer Phasengrenzfläche fest-flüssig zur Folge. Die Überwindung der Grenzflächenspannung erfordert allerdings Arbeit. Deshalb muss als Übergangszustand temporär ein noch energiereicheres System ge-

schaffen werden.

Kleine Teilchen haben im Verhältnis zu ihrem Volumen eine relativ große Oberfläche. Sie sind deshalb besonders instabil und lösen sich spontan wieder auf. Erst wenn die Kristallkeime den kritischen Radius r_K erreicht haben, sind sie thermodynamisch stabil und können weiterwachsen. An diesem Punkt setzt die Threshold-Inhibition an. Die Inhibitoren sind wasserlösliche Verbindungen, die an der Oberfläche von bestimmten mineralischen Teilchen stark adsorbiert werden. Die Bindungsenergie von Polyasparaginsäure an Calcit wurde für ein aus 15 Asparaginsäure-Einheiten aufgebautes Polymer zu -1600 bis -1700 kcal/mol berechnet (vgl. Mann [7], S.249 ff).

Die Adsorption bewirkt eine Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit, so dass das weitere Wachstum verhindert, gestört oder verzögert wird. Bilden also solche Threshold-Inhibitoren mit Kristallkeimen, deren Radius kleiner dem kritischen ist, einen Adsorptionskomplex, so verringert sich drastisch die Wahrscheinlichkeit, dass sie bis zum kritischen Radius anwachsen können. Dies führt daher wieder zur spontanen Auflösung der Keime. Auf diese Weise können theoretisch hochübersättigte wässrige Lösungen von mineralischen Bestandteilen stabilisiert werden, ohne dass Trübungen oder Ausfällungen auftreten.

Da jedoch in den Entwässerungsleitungen Verunreinigungen und Versinterungsrückstände vorhanden sind, besitzt die primär homogene Keimbildung nur eine untergeordnete Bedeutung für die Entstehung der Versinterungen. Vielmehr finden primär heterogene Keimbildungen und sekundäre Keimbildungen statt. Das primäre Ziel der Härtestabilisation von Drainagewässern ist deshalb nicht, die Keimbildung unterhalb des kritischen Radius zu hemmen, sondern das Kristallwachstum einzuschränken (vgl. Roques [8], S.266). Auch hier wird durch oberflächliche Adsorption der Inhibitoren das weitere Wachstum verzögert und so stark gestört, dass sich keine geordneten kristallografischen Oberflächen mehr ausbilden können. Es entstehen unregelmäßig geformte Kristalle, die nicht mehr fähig sind, feste, harte Ablagerungen zu bilden (Bild 7, unten).

Es gibt Threshold-Inhibitoren, die besonders geeignet sind, um die Keimbildung zu unterdrücken und andere, die vorwiegend das Kristallwachstum stören. Ebenso ist die Wirkungsweise verschiedener Inhibitoren auf bestimmte schwer lösliche Salze unterschiedlich. Die Polyasparaginsäure eignet sich zur Inkrustationsinhibierung einer ganzen Reihe von Mineralsalzen z.B. von Calciumcarbonat, Magnesiumcarbonat, Calciumsulfat, Bariumsulfat und von verschiedenen Phosphaten. Der Wirkungsgrad für verschiedene Salze ist jedoch unterschiedlich. Sie eignet sich sehr gut, um die baustoffbedingten Ablagerungen positiv zu beeinflussen, wirkt jedoch unter Umständen weniger bei andersartigen Salzablagerungen. Die Entscheidung für ihren Einsatz bzw. den eines anderen Inhibitors sollte deshalb auf der Analyse der Ursachen und der chemischen Zusammensetzung der entstehenden Ablagerungen beruhen. Basierend auf diesen Analysen können die Depotsteine chemisch so formuliert werden, dass eine maximale Reduktion der Hartablagerungen erreicht wird. Neben der Dispergierung von ablagerungsbildenden Ionen können Weichablagerungen entstehen (Bild 7, unten), die jedoch gut ausspülbar sind, weil die Kristalle an ihrem Zusammenwachsen gehindert wurden.

5.2 Einsatz von Polyasparaginsäure zur Härtestabilisation

Bisher kommt die Härtestabilisation mittels Polyasparaginsäure in zwei Formen zum Einsatz. Sie wird entweder in flüssiger Form in definierter Menge an zentraler Stelle in das Drainagewasser eingetropfelt, oder in Form von Polysuccinimid-Depotsteinen dezentral in den Reinigungsschächten verteilt.

Bei Anwendung der Flüssigkonditionierung benötigt man Platz im Tunnel, z.B. in Technischen, um die Anlage und den zugehörigen Tank unterbringen zu können. Die Zugabe der Menge an Härtestabilisator wird heute fest eingestellt. Es ist bis heute keine Regelung in Abhängigkeit von der Wasserführung des Entwässerungssystems möglich. Bei schwankender Wasserführung kommt es deshalb bei zu geringem Wasserfluss zu Über- und bei zu starkem Abfluss zu Unterdosierung, wodurch wiederum Ablagerungen entstehen können. Die wirtschaftlichen und ökologischen Einsatzgrenzen bei heutiger Dosiertechnik liegen bei einer minimalen Wasserführung von $Q \sim 1$ bis 2 l/s , hängen jedoch sehr stark von den örtlichen Gegebenheiten im Tunnel ab (z.B. sind Technischen vorhanden; wie aufwendig ist der Einbau der Anlage?). Ein derart festgelegter Grenzwert ist deshalb situativ mit Vorsicht zu betrachten. Der wirtschaftliche Vorteil der Flüssigkonditionierung besteht in einer zentralen Wartung, da nur ein Vorratsbehälter und nur eine Einleitstelle vorhanden sind. Nachteilig ist jedoch, dass das Wartungsintervall abhängig von der Tankgröße und dem Wartungsintervall der Anlage ist. Das Drainagewasser kann

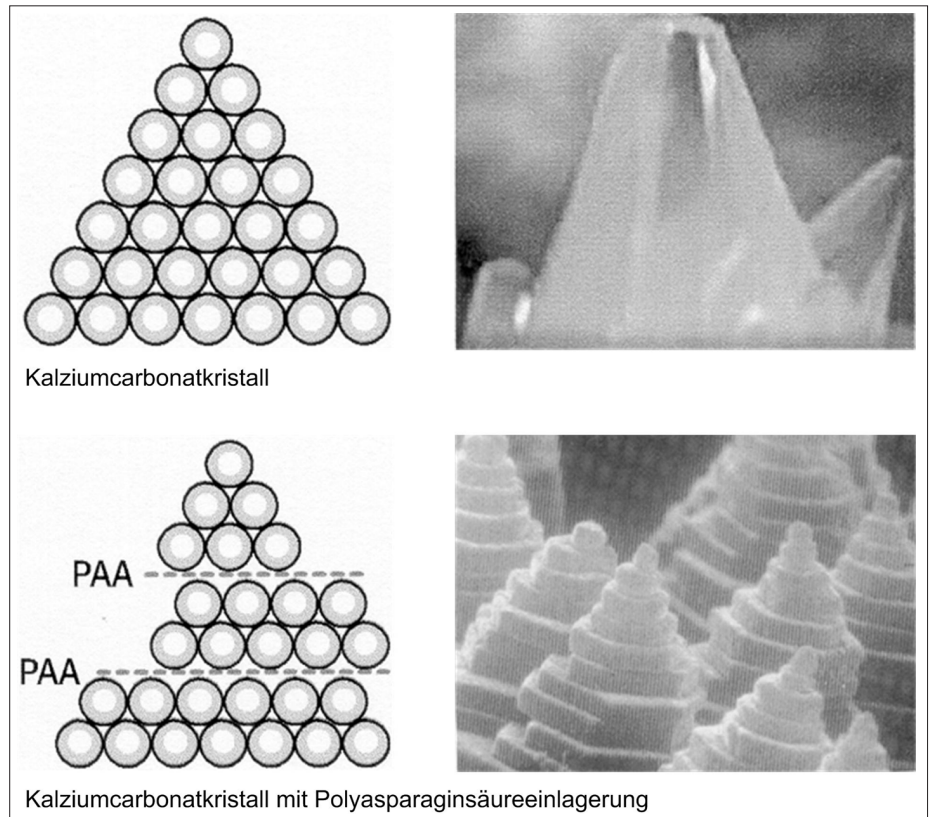


Bild 7. Gegenüberstellung von Calciumcarbonat-Kristallen mit und ohne Polyasparaginsäure-Einlagerung (vgl. [7])
 Fig. 7. Comparison of calcium-carbonate crystals with and without inclusions of polyaspartic acid (cp. [7])

auch nur an einem Punkt im Entwässerungssystem konditioniert werden.

Für die Dosierung und Förderung des flüssigen Härtestabilisators kommen Piezopumpen aus der Medizintechnik zum Einsatz. Mit diesen Pumpen können die sehr kleinen Mengen an Härtestabilisator genau dosiert werden. Allerdings lassen sich mit Piezopumpen keine größeren Drücke realisieren. Aufgrund der Reibungsverluste in den Dosierungsleitungen von der Pumpe zur Einleitstelle ist deshalb die Entfernung der Einleitstellen begrenzt, d.h. dem Wasser der gesamten Tunneldrainage kann nur an ein oder zwei Punkten eines Tunnelquerschnitts Härtestabilisator zugegeben werden.

Hier liegt der Vorteil der Depotsteine. An jeder zugänglichen Stelle im Entwässerungssystem können Depotsteine angeordnet werden, wodurch das gesamte System individuell lokal konditioniert werden kann. Die Auffüllung des Härtestabilisators kann einfach durch Nachlegen, parallel zu den erforderlichen Inspektionen erfolgen, falls dies nötig ist. Die Regelung der Wirkstofffreisetzung erfolgt selbstständig in Abhängigkeit des Wasserflusses und des *pH*-Wertes an den entsprechenden Stellen im Drainagesystem. Nachteilig ist hier lediglich die dezentrale Wartung an mehreren Schächten, die in Kauf genommen muss, wenn eine möglichst optimale Konditionierung des gesamten Entwässerungssystems erreicht werden soll.

Neben dem Einsatz zur Härtestabilisation in den Entwässerungsleitungen wird die Polyasparaginsäure unter anderem auch zum Dispergieren von Farbpigmenten in Wasser und in Waschmitteln als Ersatz für die umweltbelastenden bzw. problematischen Wasserenthärter (Phosphate, Phosphonate, EDTA, NTA), aber auch in Kosmetikartikeln eingesetzt.

5.3 Auswirkung der Härtestabilisation auf die Instandhaltung von Tunnelentwässerungssystemen

Die Wirkung der Polyasparaginsäure einerseits auf die Keimbildung und andererseits auf das Kristallwachstum führt zu unterschiedlichen Ergebnissen hinsichtlich der Versinterungsbeeinflussung. Dadurch, dass die Polyasparaginsäure an (primär homogenen oder sekundären) Kristallkeimen adsorbiert wird, lösen sich die Keime mit einem Radius kleiner als dem kritischen eher wieder auf, bevor sie zu größeren Kristallen anwachsen können (Threshold-Effekt). Deshalb bleibt das Wasser bis zum Tunnelportal weitestgehend hart, da der gelöste Kalk in Schwebe gehalten wird. Es entstehen weniger Ablagerungen.

Da jedoch in den Tunnelentwässerungsanlagen meist Versinterungsrückstände und auch geeignete Oberflächen vorhanden sind, auf denen die Kristalle (weiter)wachsen oder die sekundäre Keime mit einem Radius größer als dem kritischen freisetzen können, besitzt die primär heterogene und die sekundäre Keimbildung einen bedeutenderen Anteil am Versinterungswachstum. Hier wirkt die Polyasparaginsäure durch Adsorption an die Kristalloberflächen. Dadurch stört sie die Ausbildung geordneter Kristalloberflächen (Bild 7, unten) und es entstehen weichere Ablagerungen, die unter Umständen bereits durch den natürlichen Wasserstrom aus den Leitungen gespült werden.

Durch die Konditionierung des Drainagewassers mit Polyasparaginsäure werden also einerseits weniger Ablagerungen gebildet. Dadurch ist es möglich, die Reinigungsintervalle der Entwässerungsleitungen zu vergrößern. Andererseits kann, da der Großteil der entstehenden Ablagerungen wesentlich weicher ist, der Einsatz harter Hochdruckspülungen und von Kettenschleudern vermieden oder auf ein Minimum begrenzt werden. Das Gesamtergebnis ist zum einen eine deutliche Verlängerung der Nutzungsdauer der Tunneldrainage. Weiterhin resultieren aus dem Einsatz einfacher, schneller Rohrreinigungsverfahren geringere direkte Wartungskosten und eine erhöhte Streckenverfügbarkeit. Gegenzurechnen sind die Kosten für den verbrauchten Härtestabilisator, denn die Auslegung der Depotsteine kann in Verbindung mit den Tunnelinspektionen bzw. den verbleibenden erforderlichen Reinigungseinsätzen verbunden werden.

Beim Neubau, der Rekonstruktion bzw. der Umgestaltung von Tunneldrainagesystemen nach [2] können die konstruktiven Maßnahmen die positive Wirkung der Härtestabilisation unterstützen und erhöhen und somit das Life-cycle-Kosten-Nutzen-Verhältnis verbessern. Wird zum Beispiel durch kombinierte Drainage-Transportleitungen in den Ulmen oder durch Überlaufschwelle an den Einläufen der Querableitungen ([2] Bild 5 bzw. Bild 9) ein durchgängiger Wasserstrom durch die Ulmendrainagen sicher gestellt, wirkt die Konditionierung bereits am Anfang jeder Ulmendrainage-Haltung und auch über einen größeren Rohrumfang als bei den Drainagesystemen, bei denen das Wasser jeder Haltung über Querableitungen vollständig in die Sammelleitung abgeleitet wird.

5.4 Erste Ergebnisse aus Praxiseinsätzen sowie weitere Entwicklungsschritte

5.4.1 Auswirkung auf die Reinigung

Bei den ersten Praxiseinsätzen der Härtestabilisation mittels Depotsteinen und im Rahmen des Forschungsprojekts konnte eine Reduktion der Menge und eine deutliche Vermin-

derung der Härte der gebildeten Ablagerungen in den Leitungen beobachtet werden. Deshalb ist zu deren Beseitigung insgesamt ein geringerer Reinigungsaufwand nötig, als ohne Konditionierung des Drainagewassers. Da die Ablagerungen im Durchschnitt weicher sind, können sie mit Reinigungsverfahren entfernt werden, die die Rohre deutlich weniger belasten. Durch den Einsatz der Härtestabilisation ist es daher möglich, die Life-cycle-Kosten nachhaltig zu reduzieren.

5.4.2 Mikrobiologischer Abbau

Neben diesen, beim Einsatz der Härtestabilisatoren festgestellten, positiven Effekten wurden jedoch im Rahmen des Forschungsprojekts auch einige Mängel der eingesetzten Depotsteine offenbart. Da die Polyasparaginsäure ein naturähnlicher Stoff ist und durch Mikroorganismen abgebaut wird, kann es bereits direkt im Tunnelentwässerungssystem zu mikrobiologischem Befall kommen.

Grundsätzlich sind Mikroorganismen ubiquitär. Ihre Vermehrung wird durch biotische Faktoren (z.B. Nahrungsangebot, Fraßfeinde, Bakteriophagendichte, konkurrierende Mikroorganismen oder Populationsdichte) und durch abiotische Faktoren (z.B. Temperatur, *pH*-Wert, Sauerstoffbedarf, Wasservorkommen und Salzgehalt) beeinflusst. „Einige Mikroorganismen können sehr lange Zeiträume unter schlechten Umweltbedingungen überleben, indem sie Sporen oder Zysten bilden. Andere Mikroorganismen bilden keine solche Dauerstadien, sondern können in einen Zustand übergehen, in dem sie zwar lebensfähig“ sind, sich aber nicht vermehren. Mikroorganismen können über Wind, Fließ und Regenwasser sowie an Gegenständen (z.B. Fahrzeugen, Spülschläuchen) angeheftet oder durch regeneriertes Spülwasser, aber auch durch größere Organismen, wie Protozoen, Insekten (z.B. Springschwänze) und andere Bodentiere, wie Regenwürmer transportiert werden. Neben lateralen Transporten konnte auch ein vertikaler, in tiefere Bodenschichten stattfindender Transport nachgewiesen werden. [9]

Insbesondere durch den Einsatz von Kanalspülfahrzeugen, die neben der Tunneldrainagereinigung auch zur Spülung von Abwasserleitungen eingesetzt werden und mit dem System der Wasserrückgewinnung arbeiten, kommt es zum Eintrag von Mikroorganismen (meist erkennbar an (gesamt)coliformen Bakterien bzw. fäkalen coliformen Bakterien oder fäkalen Streptokokken [10]) in die Entwässerungsanlagen. Diese Organismen siedeln sich dort an und ernähren sich unter anderem von Humussäuren, anderen organischen Stoffen, die das Sickerwasser mitführt, aber auch von Stoffen, die z.B. durch die Düngung der Felder in das Grundwasser und damit in die Tunneldrainage eingetragen werden. Es gibt auch Organismen, die sich von dem Kohlenstoff des gelösten Kohlendioxids ernähren und so maßgeblich zur Versinterungsbildung beitragen.

Weil die Polyasparaginsäure eine organische Säure ist, dient sie den Organismen ebenfalls als Nahrungsquelle. Durch die Auslegung der Depotsteine wird diesen Mikroorganismen quasi ein Nährboden zur Verfügung gestellt, von dem sie sich ernähren und deshalb vermehren können. Sichtbar werden diese Biofilme, bestehend aus verschiedensten Mikroorganismen, die sich gegenseitig durch ihre Stoffwechselprodukte ernähren, durch die Bildung von grauweissem bis leicht bräunlichem Schleim. In der Folge bilden sich durch die starke Reduzierung der Wirkstoffabgabe har-

te Kalkkrusten um die Depotsteine und in deren näherer Umgebung. Die Depotsteine werden unter der Kalkkruste übermäßig schnell aufgebraucht.

Bei mikrobiologischem Befall der Depotsteine sind also zunehmende Versinterungsmengen beobachtet wurden, die auf eine Reduzierung des gelösten Kohlendioxids im Drainagewasser zurückgeführt werden konnten. Aus diesem Grund werden in der Folge den Depotsteinen geringe Konzentrationen an Sorbinsäure (Lebensmittelkonservierungsstoff, E 200) zugesetzt. Dadurch können die Bakterien in der Tunneldrainage die Depotsteine nicht mehr als Nahrungsquelle nutzen. Die bereits in Laborversuchen festgestellte Wirkbilanz der modifizierten Depotsteine wird derzeit durch einen Praxiseinsatz in einer extrem biologisch aktiven Haltung getestet.

5.4.3 Reaktion des Bindemittels mit den Calcium-Ionen des Drainagewassers

Weiterhin wurde ein Effekt beobachtet, der die Wirkstofffreigabe jedoch nur gering beeinflusst. Bei hohen *pH*-Werten und hohen Calcium-Konzentrationen löst sich der Wirkstoff sehr schnell auf. Da das Bindemittel der Tabletten jedoch nur gering wasserlöslich ist, kann es zur Bildung von Kalkseife kommen, die sich um die Steine anlagert und die Wirkstofffreigabe behindert. Derzeit gibt es deshalb Überlegungen, den Bindemittelanteil zu verändern, um so einerseits einen höheren Wirkstoffgehalt der Tabletten zu ermöglichen und gleichzeitig die Bildung von Kalkseife zu minimieren. Durch Zugabe von Sorbinsäure wurde bereits ein Teil des Bindemittels substituiert, wodurch mit einem Rückgang der Calciumstearat-Bildung zu rechnen ist. Da diese Depotsteine derzeit getestet werden, kann erst später über weitere Modifikationen des Bindemittelanteils diskutiert werden.

5.5 Conclusion und Ausblick

Basierend auf den grundlegenden Wirkungsmechanismen [1], die bei der Bildung von Versinterungen wirksam sind, und der Interaktion Baustoff/Konstruktion von Tunneln wurden in einem zweiten Aufsatz Handlungsempfehlungen für den Neubau und die Instandhaltung von Tunnelentwässerungssystemen abgeleitet [2], die bei der Planung und Ausführung zu beachten sind. Durch die Berücksichtigung dieser Planungs- und Ausführungshandlungsempfehlungen können die Instandhaltungsmaßnahmen und die Life-cycle-Kosten reduziert sowie die Verfügbarkeit der Tunnel und somit der gesamten Streckennetze erhöht werden. Der vorliegende dritte Aufsatz komplettiert diese Reihe durch die Darstellung und Diskussion verschiedener Instandhaltungsstrategien und -verfahren.

Für die in situ auftretenden Bedingungsgrößen in den jeweiligen Tunneln und die daraus resultierenden Ablagerungen sind die hier aufgezeigten Maßnahmen zu individuellen Instandhaltungsstrategien zu kombinieren. Die Strategien müssen umweltverträglich sein, müssen die betriebliche Nutzungsfähigkeit auf höchstem Niveau sicherstellen, sollen eine maximale Dauerhaftigkeit und Gebrauchstauglichkeit der gesamten Bauwerke gewährleisten und dürfen nur minimale Life-cycle-Kosten verursachen.

Neben den mechanischen und hydromechanischen Reinigungsverfahren hat sich die Härtestabilisation als eine

umweltverträgliche, ergänzende Maßnahme erwiesen. Durch den Einsatz der Härtestabilisation können Reinigungsintervalle vergrößert sowie die erforderlichen Einwirkungen der konventionellen post-sedimentum Reinigungsverfahren reduziert werden. Dadurch werden die Instandhaltungskosten sowie die Gebrauchsfähigkeit und Dauerhaftigkeit nachhaltig verbessert und die Verfügbarkeit der Verkehrstunnelbauwerke erhöht.

Aufgrund der bisherigen Erkenntnisse aus den Feldversuchen innerhalb des Forschungsprojekts wird das Verfahren der Härtestabilisation als wirksames Mittel zur Verringerung der Kalkablagerungen und somit des Instandhaltungsaufwandes von Tunnelentwässerungssystemen eingeschätzt. Weitere Untersuchungen zur Ausschaltung des Mikroorganismenwachstums werden durchgeführt. Zusammenfassend sollten nach heutigen Erkenntnissen die objektspezifischen Einsatzmöglichkeiten durch Vorversuche abgeklärt werden, um eine individuelle, optimale Verfahrenskombination für die Drainageinstandhaltung des jeweiligen Tunnelbauwerks, unter Berücksichtigung der Unterhaltungsstrategien der anderen Tunnelinfrastruktureinrichtungen, zu konzipieren.

Literatur

- [1] Girmscheid, G.; Gamisch, T.; Klein, Th.; Meinschmidt, A.: Versinterung von Tunnelrainagen – Mechanismen der Versinterungsentstehung. Bauingenieur 78 (2003), Nr. 6.
- [2] Girmscheid, G.; Gamisch, T.; Meinschmidt, A.: Versinterung von Tunnelrainagen – Empfehlungen für die Planung und Bauausführung von Tunneln in deszendenden Wässern. Bauingenieur 78 (2003), Nr. 9.
- [3] Zimmermann, F.: Vergleichende Prüfungen zur Hochdruckpülfestigkeit verschiedener genormter Werkstoffe für Abwasserleitungen und –kanäle. Institut für Bauplanung und Baubetrieb der Eidgenössischen Technische Hochschule Zürich 2000. Prüfbericht.
- [4] Norm DIN V 19517 (Januar 2002): Prüfverfahren zur Ermittlung der Hochdruckpülfestigkeit von Rohren für Abwasserleitungen und –kanäle. Vornorm
- [5] Prüfatteest Nr. 1705: Verhalten der Wasserstrahldüsen in den Rohrleitungen LW 400 mm und LW 150 mm. & Testen der Haltbarkeit von Rohren LW 400 mm aus Asbestzement, Beton, Steinzeug, PVC und Hart-PE gegenüber Hochdruckpüfgeräten. Tiefbauamt der Stadt Zürich, Stadtentwässerung, Liegenschaftsentwässerung, Prüfstelle, 1987. – unveröffentlicht
- [6] Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Wasserhaushaltsgesetz über die Einstufung wassergefährdender Stoffe in Wassergefährdungsklassen (Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe – VwVwS). 1999–05–17.
- [7] Mann, S.: Biometric Materials Chemistry. New York: VCH 1996.
- [8] Roques, H.: Chemical Water Treatment: Principle and Practice. New York: VCH 1996.
- [9] Tappeser, B.; Eckelkamp, C.; Weber, B.: Untersuchung zu tatsächlich beobachteten nachteiligen Effekten von Freisetzung genentechnisch veränderter Organismen. Wien: Umweltbundesamt 2000. (Monographien; Band 129)
- [10] Manafi, M.: Enterobakterien, Coliforme und Escherichia coli. Indikator- und Index-Keime: (K)ein zeitgemäßes Konzept? Vortrag am 01.10.2002 in Wien. Vortragsskript. Website: <http://www.univie.ac.at/hygiene-aktuell/ego.htm>, Lectures, Nr. 44, 2003–05–21.