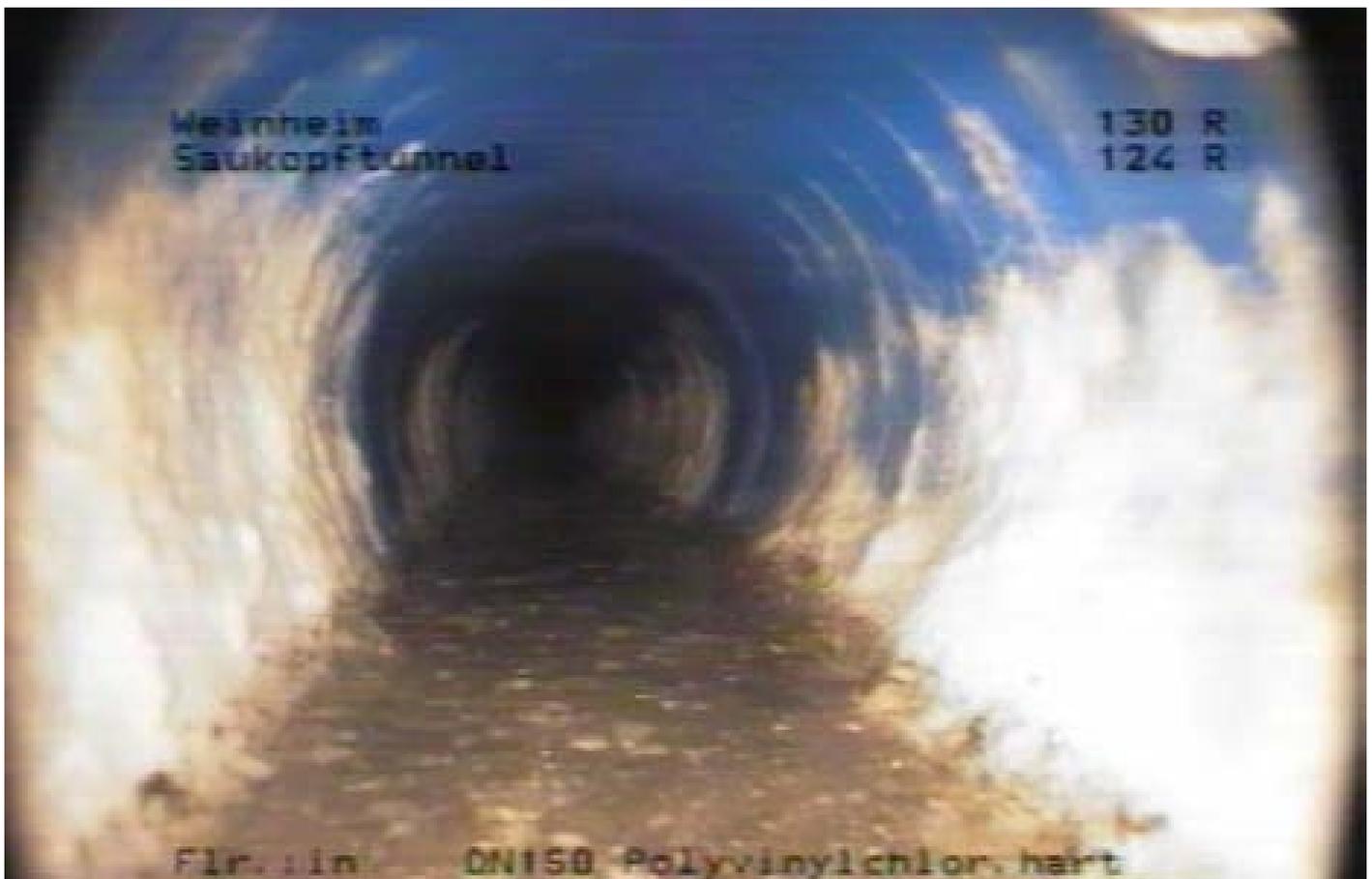


Götz Vollmann

Zur Härtestabilisierung als versinterungsreduzierende Maßnahme für Tunneldränagesysteme



Zur Härtestabilisierung als versinterungsreduzierende Maßnahme für Tunneldränagesysteme

Dissertation

zur Erlangung des Grades

Doktor – Ingenieur

der

Fakultät für Bauingenieurwesen

der

Ruhr-Universität Bochum

von

Dipl.-Ing. Götz Vollmann

Berichter: em. o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. B. Maidl, Ruhr-Universität Bochum
Prof. Dr.-Ing. K. Krass, Ruhr-Universität Bochum

Eingereicht am: 22.06.2005
Tag der mündliche Prüfung: 25.08.2005

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2005
Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2005
ISBN 3-86537-663-0

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2005
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen
Telefon: 0551-54724-0
Telefax: 0551-54724-21
www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2005
Gedruckt auf säurefreiem Papier

ISBN 3-86537-663-0

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Bauverfahrenstechnik, Tunnelbau und Baubetrieb der Ruhr-Universität Bochum. Sie wurde von der dortigen Fakultät für Bauingenieurwesen als Dissertation angenommen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. B. Maidl für die wissenschaftliche Begleitung dieser Arbeit, das mir entgegengebrachte Vertrauen sowie die interessanten und lehrreichen Erfahrungen die ich während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl sammeln konnte.

Herr Prof. Dr.-Ing. K. Krass danke ich für das freundliche Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Koreferats. Die konstruktiven Hinweise waren stets hilfreich bei der Abfassung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Willems danke ich für sein Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme der Aufgabe des fachfremden Prüfers.

Weiterhin gilt mein Dank den Mitarbeitern des Lehrstuhls für die fachliche und kollegiale Hilfe und Unterstützung. Insbesondere Herr D. Abraham für die akribische Vorbereitung und Begleitung der Versuche am Saukopftunnel, Herr H. Schmidt für Kaffee und Zeichnungen, Frau B. Wagner für Korrektur an Grammatik und Zeichensetzung, sowie Herrn H.-B. Einck, Herrn P. Nellesen und Herrn K. Werkhäuser für Gespräche und kollegiale „Nachbarschaft“. Weiterhin danke ich Herrn G. Kaufhold und den ehemaligen Mitarbeitern Herrn Dr.-Ing. F. Abel Herrn Volker Stein und insbesondere Herr Dr.-Ing. F. Heimbecher. Mein Dank gilt ebenfalls den studentischen Hilfskräften des Lehrstuhls, insbesondere Herrn H. Winter.

Abschließend bedanke ich mich bei meiner Familie und vor allem meiner über alles geliebten Frau Petra, die mich zusammen durch ihre Unterstützung dahin gebracht haben wo ich heute angekommen bin.

Dortmund, im August 2005

Götz Vollmann

Für Petra

*„... mit den Füßen im Sand,
den Bus im Rücken und dem Blick raus aufs Meer...“*

Zusammenfassung

Kalkablagerungen oder so genannte Versinterungen in Dränagesystemen haben für Betreiber von Tunnelbauwerken häufig langfristige und kostenintensive Wartungen zur Folge. Neben der Entwicklung optimierter und damit versinterungsarmer Grundkonzeptionen von Dränagesystemen wird diesem Problem auch mit verfahrenstechnischen Ansätzen, vor allem dem Einsatz von Härtestabilisatoren begegnet.

In der vorliegenden Arbeit wird auf Basis theoretischer Überlegungen und in situ Versuchen an einem bestehenden Bauwerk die Einsetzbarkeit von Härtestabilisatoren im Rahmen von Tunneldränagen untersucht. Parallel wird eine optimierte Nachweismethodik entwickelt, die besser als bisher verwandte Methoden an die Randbedingungen von Tunneldränagesystemen angepasst ist und daher verlässlichere und eindeutiger Ergebnisse liefert. Diese Methode wird in ein allgemeines Untersuchungskonzept überführt, welches – an beliebigen Bauwerken angewandt – verlässliche systemspezifische Erkenntnisse hinsichtlich Funktionalitäts- und Effektivitätsbetrachtungen von Härtestabilisatoren ermöglicht.

Abstract

Lime deposits or so-called scale deposits in drainage systems often result in long-term and cost-intensive maintenance for the operating authorities of tunnelling construction. Besides the development of optimized and thereby deposit depleted basic concepts of drainage systems, it is tried to come up with different technological approaches against this problem, especially the use of hardness stabilisation.

Within this paper the ability to apply hardness stabilisation within tunnel drainage system is researched by theoretical considerations and in situ experiments at an existing building. An optimized verification method is developed which is better adjusted to the boundary conditions of tunnel drainage systems than hitherto used methods. Therefore it delivers more precise and more reliable results. This method is transferred into a general trial concept which enables the user to come up with reliable and system-specific results, concerning functionality and effectiveness of hardness stabilisation used in any tunnel drainage system.

Dieser Dissertation liegen Teile der im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen, unter FE-Nr. 15.387/2003/ERB durchgeführten Forschungsarbeit zugrunde. Die Verantwortung für den Inhalt liegt allein beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Ziel der Arbeit	2
1.3	Aufbau der Arbeit	2
2	Grundlagen und Stand der Technik	3
2.1	Hydrochemische Aspekte der Versinterungsbildung	3
2.1.1	Löslichkeit von Feststoffen in Wasser	3
2.1.2	Löslichkeit von Gasen in Wasser	4
2.1.3	Entstehung und Dissoziation von Kohlensäure	7
2.1.4	Das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht	8
2.1.5	Zusammenfassung wichtiger hydrochemischer Einflüsse auf den Gleichgewichtszustand zwischen Kalk und Kohlensäure unter der Berücksichtigung der Versinterungsproblematik bei Tunnelbauwerken	9
2.1.6	Wasserhärte, Calcitsättigung und ihre Bestimmung	10
2.2	Kalkanreicherung von Bergwässern	14
2.2.1	Allgemeines	14
2.2.2	Natürliche Anreicherung des Bergwassers mit CO ₂ und CaCO ₃	14
2.2.3	Elution von Kalk aus Komponenten des Tunnelsicherungs- und Tunnelentwässerungssystems	15
2.3	Grundlagen der Härtestabilisierung	19
2.3.1	Kristallwachstum bei Ausfällung von Calcit	19
2.3.2	Funktionsprinzipien der Inhibierung und Dispergierung als primäre Wirkungsweisen	22
2.3.3	Zusammensetzung gängiger stabilisierender Wirkstoffe	23

2.4	Härtestabilisatoren im Tunnelbau	24
2.4.1	Grundlegende Unterschiede zwischen industrieller und tunnelbautechnischer Nutzung von Härtestabilisatoren	24
2.4.2	Härtestabilisierende Wirkstoffe für den Tunnelbau.....	26
2.4.3	Mögliche Einsatzbereiche von Härtestabilisatoren im Rahmen von Tunnelentwässerungssystemen	31
2.4.4	Regelwerke und Vorschriften im Aus- und Inland	32
2.4.5	Bisherige Erkenntnisse zur Funktionalität und Effektivität von Härtestabilisatoren anhand von Versuchen an bestehenden Bauwerken..	35
2.4.6	Zusammenfassung des Grundlagenwissens und der Erkenntnisse aus Erfahrungsberichten von ausgeführten Projekten	36
2.5	Beurteilung und Wertung des bisherigen Kenntnisstandes	37
3	Bei bisherigen Einsätzen von Härtestabilisatoren angewandte Nachweismethodik.....	39
3.1	Allgemeines	39
3.2	Darstellung bisheriger Nachweismethodik	40
3.2.1	Phänomenologische Datenerfassungen.....	40
3.2.2	Analytische Datenerfassungen.....	40
3.2.3	Auswertungsschema und Nachweismethodik	42
3.3	Anwendung der dargestellten Methodik auf andere Einsatzbereiche von Härtestabilisatoren	48
3.4	Erkenntnisse der bisherigen Analyse	48
4	Bewertung und Erweiterung der bisherigen Nachweismethodik.....	49
4.1	Vorgehensweise bei der Bewertung	49
4.2	Mögliche Ionenfrachten von Dränagewässern ohne den Einfluss eines Härtestabilisators	50
4.2.1	Tunnelbauspezifische Ursachen schwankender Ionenfrachten	50
4.2.2	Zusätzliche Reaktionsmechanismen	52
4.2.3	Exemplarische Entwicklung der Ionenfrachten von Dränagewässern ohne den Einfluss eines Härtestabilisators.....	53
4.2.4	Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse	59

4.3	Analyse der tunnelbauspezifischen Versinterungsmechanismen.....	59
4.3.1	Unzureichende Drainagekonzepte	59
4.3.2	Ungeeignete Einzelkomponenten des Entwässerungssystems	60
4.3.3	Versinterungsbegünstigende Ausführungsmängel.....	64
4.3.4	Uneffektive Wartungsintervalle und –verfahren.....	66
4.3.5	Zusammenfassung der gewonnen Erkenntnisse	67
4.4	Bewertung der bisherigen Nachweismethodik vor dem Hintergrund tunnelbauspezifischer Versinterungsentstehung.....	68
4.4.1	Phänomenologische Datenerfassung.....	68
4.4.2	Analytische Datenerfassung.....	69
4.4.3	Fazit der Bewertung für bisher durch Versuche gewonnenen Erkenntnisse zu Härtestabilisatoren und ihren Einsatzmöglichkeiten	69
4.5	Erweiterung der bisherigen Nachweismethodik	70
4.5.1	Erweiterung der phänomenologischen Datenerfassung.....	70
4.5.2	Erweiterung der analytischen Datenerfassung.....	72
4.5.3	Ergänzung des Umfangs der zu beobachtenden Kriterien.....	73
5	Experimentelle Untersuchungen	74
5.1	Vorstellung des Versuchsprogramms.....	74
5.1.1	Zielsetzungen des Versuchsprogramms	74
5.1.2	Zu untersuchende Einsatzspektren und dabei zu berücksichtigende Funktionalitätskriterien für Härtestabilisatoren	74
5.1.3	Wahl eines geeigneten Bauwerks	75
5.1.4	Durchzuführende Einzelversuche.....	75
5.1.5	Versuchsaufbauten.....	77
5.1.6	Versuchsabläufe und versuchsspezifische Konkretisierung des Auswertungsschemas	80
5.2	Ergebnisse.....	84
5.2.1	Voruntersuchungen im Labor	84
5.2.2	Fester Härtestabilisator in einer simulierten Filterschicht am Saukopftunnel.....	85
5.2.3	Fester Härtestabilisator in der Drainageleitung des Tunnelbauwerks Saukopf	91
5.3	Zusammenfassung und Bewertung der Versuchsergebnisse	104

5.3.1	Fester Härtestabilisator in der Filterschicht des Tunnelbauwerks Saukopf	104
5.3.2	Fester Härtestabilisator in den Dränageleitungen des Tunnelbauwerks Saukopf	104
5.3.3	Vergleich bisherige zu erweiterter Nachweismethodik	105
6	Allgemeines Untersuchungskonzept	108
6.1	Allgemeines	108
6.2	Effektivitätskriterien	108
6.2.1	Hydrochemische Entwicklung.....	108
6.2.2	Ablagerungsentwicklung.....	109
6.2.3	Ökologie	109
6.2.4	Verfahrenstechnik.....	109
6.3	Versuchsprogramm	109
6.3.1	Ablauf	109
6.3.2	Zu erfassende Parameter.....	111
6.4	Auswertung der ermittelten Daten unter Berücksichtigung der relevanten Parameter	112
6.4.1	Darstellung der hydrochemischen und hydrologischen Entwicklung.....	112
6.4.2	Darstellung der Ablagerungsentwicklung - Auswertungsschema für Kamerabefahrungen.....	112
6.4.3	Darstellung ökologischer und verfahrenstechnischer Aspekte	119
6.5	Bewertung des ermittelten Datensatzes	119
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	122
7.1	Zusammenfassung	122
7.2	Ausblick	124
8	Literatur.....	125

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Im Vergleich mit druckwasserhaltenden und druckgeregelten Tunnelbauwerken stellen dränierte Bauwerke zwar in der Bauphase die von allen Varianten deutlich günstigste dar, sie benötigen aber oftmals kostenintensivere Wartungs- und Revisionskonzepte. Zurückzuführen ist dies zumeist auf die so genannten Versinterungen, die einen erheblichen Wartungsaufwand des jeweiligen Entwässerungssystems bedingen. Diese Versinterungen - zum Teil harte bis sehr harte Ablagerungen aus Kalk - müssen, in Abhängigkeit von ihrer Konsistenz, mit hohem mechanischem und logistischem Aufwand aus den Entwässerungssystemen entfernt werden. Verbunden mit den Kosten, die aus den für Reinigungskampagnen nötigen Sperrungen der Bauwerke und etwaigen Verkehrsumleitungen resultieren, entstehen so im Rahmen der Lebensdauer der Tunnelbauwerke beträchtliche Aufwendungen [28].

Aus diesem Grund wird seit mehreren Jahren versucht, die Versinterungsproblematik zu verringern. Hierbei ist zwischen zwei verschiedenen Ansätzen zu unterscheiden, einem konstruktiven und einem verfahrenstechnischen Ansatz. Während einerseits, speziell an der Ruhr-Universität Bochum, konstruktive Verbesserungen der Einzelkomponenten von Entwässerungssystemen erarbeitet wurden, versucht man andererseits durch verfahrenstechnische Neuerungen die Bildung von Kalk in Bergwasserdränagen zu beeinflussen bzw. günstigstenfalls vollständig zu unterbinden. Da Ablagerungen von Kalk in wasserführenden Systemen kein auf den Tunnelbau begrenztes Problem darstellen, liegt es nahe, die Erfahrungen artverwandter Systeme - wie etwa von Kraftwerksentwässerungen - zu nutzen und sofern möglich auf den Tunnelbau zu übertragen. Im Zuge interdisziplinärer Recherchen wurde durch M.C. Wegmüller ein Verfahren patentiert, welches durch Einspeisung von speziellen Wirkstoffen in ein Dränagesystem, so genannten Härtestabilisatoren, eine deutliche Reduzierung des versinterungsbedingten Wartungsaufwandes verspricht [54]. Dieses Verfahren wird bereits seit mehreren Jahren vereinzelt in der Schweiz eingesetzt, drängt über neue Vertriebswege auch auf den deutschen Markt und findet ebenfalls Eingang in die Empfehlungen für optimierte Dränagesysteme der Alp-Transit Strecken [16] sowie in diversen Vorschriften der Schweiz und Österreichs [38][44][46]. Es existierten jedoch bislang keine experimentell abgesicherten Erkenntnisse über Funktionalität, Effektivität und ökologische Verträglichkeit des Verfahrens bzw. der verwendeten Chemikalien, sondern lediglich Erfahrungsberichte der Verfahrensvertreiber. Auch lagen bislang keine Vorgaben hinsichtlich sinnvoller Einsatzbereiche des Verfahrens, angepasster Wirkstoffdosierungen oder sonstiger Einsatzkriterien vor, die eine bauwerksspezifische Prüfung des Wirkungsgrades ermöglichen.

1.2 Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, anhand durchgeführter Untersuchungen sinnvolle Einsatzspektren des Verfahrens der Härtestabilisierung einzugrenzen. Hierzu sind primär die Aspekte der Funktionalität und der ökologischen Verträglichkeit des Verfahrens im Rahmen der Versuchsauswertungen zu beleuchten und mit den Erfahrungsberichten der Vertreiber zu vergleichen. Anhand eines gemeinsamen wissenschaftlichen Maßstabs sind dann - sofern möglich - effektive Einsatzspektren zu extrapolieren sowie praxisorientierte Vorgaben und etwaige Verbesserungsansätze zu formulieren. Zumindest aber ist ein Untersuchungskonzept zu entwickeln, dessen Umsetzung dem Betreiber eines Bauwerks letztlich sichere Bewertungskriterien liefert, anhand derer die Effektivität einer Härtestabilisierung für das jeweilige Bauwerk messbar gemacht werden kann.

1.3 Aufbau der Arbeit

Zunächst müssen die chemischen und physikalischen Ursachen für Versinterungen aufgezeigt werden. Diese sind für die tunnelbauspezifischen Randbedingungen zu konkretisieren.

In einem zweiten Schritt werden dann die chemischen Prinzipien der Härtestabilisierung erörtert und ein Überblick über die auf dem Markt befindlichen Härtestabilisatoren und ihre Anwendungsgebiete geliefert. Ergänzend werden die für einen Einsatz im Tunnelbau vorgesehenen Wirkstoffe vorgestellt, ihre von den Vertreibern genannten Grenzen aufgezeigt und ein Überblick über die diesbezügliche Vorschriftenlage dargestellt.

Bisherige Erfahrungen der Vertreiber im Umgang mit dem Verfahren an bestehenden Bauwerken werden hinsichtlich ihrer Aussagekraft analysiert und offene Fragen bezüglich Verfahrenstechnik, Effektivität etc. vor dem Hintergrund des Grundlagenwissens hergeleitet.

Hierbei wird auch die spezifische Nachweismethodik formalisiert, mit deren Hilfe bislang Effektivitäts- und Funktionalitätsnachweise von Härtestabilisatoreinsätzen verifiziert wurden.

Diese Nachweismethodik ist hinsichtlich ihrer chemischen und physikalischen Grundlagen zu prüfen. Vor allem aber ist vor dem Hintergrund tunnelbauspezifischer Entwicklung der Bergwasserhydrochemie und der Ablagerungsbildung, eine mögliche Falsifizierung der Aussage zu prüfen, dass besagte Nachweismethodik einen eindeutigen kausalen Schluss zulässt.

Auf Basis dieser Erkenntnisse wird ein modifiziertes, problem- und bauwerksspezifisches Versuchskonzept vorgestellt, mit dessen Hilfe Härtestabilisatoren am Tunnel Saupf hin-sichtlich ihrer Funktionalität untersucht und die verschiedenen Nachweisverfahren gegen-übergestellt werden. Ziel ist die Falsifizierung der ursprünglichen Methodik im Vergleich zur dann gegebenenfalls erweiterten Methodik.

Abschließend werden durch Bewertung der Versuchsergebnisse und Vergleich der Methoden, allgemeine Bewertungskriterien für Härtestabilisatoreinsätze an Tunnelbauwerken erarbeitet und in ein allgemeines, schlüssiges und problemorientiertes Untersuchungskonzept überführt.

2 Grundlagen und Stand der Technik

2.1 Hydrochemische Aspekte der Versinterungsbildung

2.1.1 Löslichkeit von Feststoffen in Wasser

Wird ein löslicher Feststoff in Wasser eingebracht, so werden durch den Kontakt der dipolaren Wasser-Moleküle mit der Kristallstruktur des Feststoffs sukzessive Ionen aus eben dieser Struktur ausgelöst (elektrolytische Dissoziation). Die dipolaren Wassermoleküle lagern sich dabei an der Kristallstruktur an, schwächen die Integrität des Gitters, lösen bei Überschreiten der strukturellen Bindungsenergie Ionen aus dem Verbund und umschließen diese mit einer Hülle aus Wassermolekülen (Hydratation).

Der Lösungsprozess verläuft so lange, bis entweder alle Ionen des Feststoffs aufgebraucht sind oder keine weiteren Ionen mehr hydratisiert werden können, die Lösung also gesättigt ist. Hierbei findet keine chemische Reaktion zwischen Wassermolekülen und den Bestandteilen des Feststoffs statt. Man spricht daher von einer „physikalischen“ Lösung. Die Konzentrationen der beteiligten Spezies lassen sich dabei anhand der thermodynamischen Gleichgewichtskonstanten quantifizieren, die wie folgt definiert ist:

$$K = \frac{c(A^+) \cdot c(B^-)}{c(AB)} \quad (\text{Gl. 2.1})$$

mit:	K	thermodynamische Gleichgewichtskonstante
	$c(A^+)$	Konzentration der Ionenspezies A^+
	$c(B^-)$	Konzentration der Ionenspezies B^-
	$c(AB)$	Konzentration des zusammengesetzten Stoffes AB

Geht man von einem vollständig dissoziierten Elektrolyten aus, also davon, dass der Feststoff im Lösungsmittel vollständig gelöst ist, so lässt sich für das Gemisch aus gelöstem Feststoff und Lösungsmittel das so genannte Löslichkeitsprodukt wie folgt formulieren:

$$K_L(AB) = a(A^+) \cdot a(B^-) \quad (\text{Gl. 2.2})$$

mit:	$K_L(AB)$	Löslichkeitsprodukt des Stoffes AB
	$a(A^+)$	wirksame (aktive) Konzentration der Ionenspezies A^+
	$a(B^-)$	wirksame (aktive) Konzentration der Ionenspezies B^-

Die Ionenaktivität a einer Ionenart definiert dabei allgemein den aktiven, an der chemischen Reaktion partizipierenden Anteil dieser Ionengruppe. Auf Grund interionischer Interferenzen und Wechselwirkungen sind bei wässrigen Lösungen zumeist nicht alle Ionen der jeweiligen Gruppe verfügbar. Die Aktivität gibt dann den aktiven, wirklich wirkenden Teil der Ionengruppe an.

Dieses sich in Abhängigkeit von Druck, Temperatur und dem Lösungsmittel im Allgemeinen ergebende Produkt steht in direktem Zusammenhang mit dem chemischen Begriff der Löslichkeit und fließt in dessen Bestimmung mit ein. Die Löslichkeit l , also die bei den gegebenen Bedingungen maximal lösbare Menge des Feststoffs $A_m B_n$ ergibt sich zu:

$$l = \sqrt[m+n]{\frac{K_l}{m^m \cdot n^n}} \quad (\text{Gl. 2.3})$$

mit:	l	Löslichkeit des des Feststoffs $A_m B_n$
	K_l	Löslichkeitsprodukt nach Gl. 2-2
	m^m	Anteil des Stoff A am Feststoff $A_m B_n$
	n^n	Anteil des Stoff B am Feststoff $A_m B_n$

Ändern sich Temperatur und Druck nicht, so bleibt das Löslichkeitsprodukt einer gesättigten Lösung konstant. Dabei bedeutet „gesättigt“ nicht, dass durch das Lösungsmittel keine weiteren Feststoffe mehr in Lösung gebracht werden können, sondern es bezieht sich immer auf den gerade betrachteten Feststoff an sich.

2.1.2 Löslichkeit von Gasen in Wasser

Treten Gase mit wässrigen Lösungen in Kontakt, so entstehen an der Kontaktfläche zwischen Gasphase und Flüssigkeit Absorptionsprozesse, die zu Gleichgewichtsreaktionen zwischen den im Wasser gelösten Inhaltsstoffen, dem Wasser selbst und dem Gas führen. Nach dem Gesetz von Henry-Dalton lässt sich dieser Zusammenhang in Form einer Gleichgewichtsbeziehung wie folgt darstellen:

$$c(i) = K_H \cdot p(i) \quad (\text{Gl. 2.4})$$

mit:	$c(i)$	Konzentration eines Gas i in Wasser
	K_H	Henry-Konstante
	$p(i)$	Partialdruck des Gases i in der Gasphase

Die so genannte Henry-Konstante K_H wird dabei in Abhängigkeit vom jeweiligen Gas und Lösungsmittel - hier Wasser - formuliert und sinkt spezifisch mit steigender Temperatur. Dies ist gleichbedeutend mit einer erhöhten Lösungskapazität des flüssigen Mediums, bzw. Bindungsfähigkeit bereits gelösten Gases innerhalb der Flüssigkeit bei geringeren Umgebungstemperaturen. Auch Kohlendioxid (CO_2) genügt dieser Gesetzmäßigkeit wie anhand von Bild

2.1 nachvollzogen werden kann. Für Temperaturen von 0 °C bis 60 °C ist hier die lösliche Menge an CO₂ in 1 Liter Wasser aufgezeichnet. Klar zu erkennen ist die stete Abnahme der Löslichkeit des CO₂ in Abhängigkeit von der Zunahme der Temperatur des Wassers.

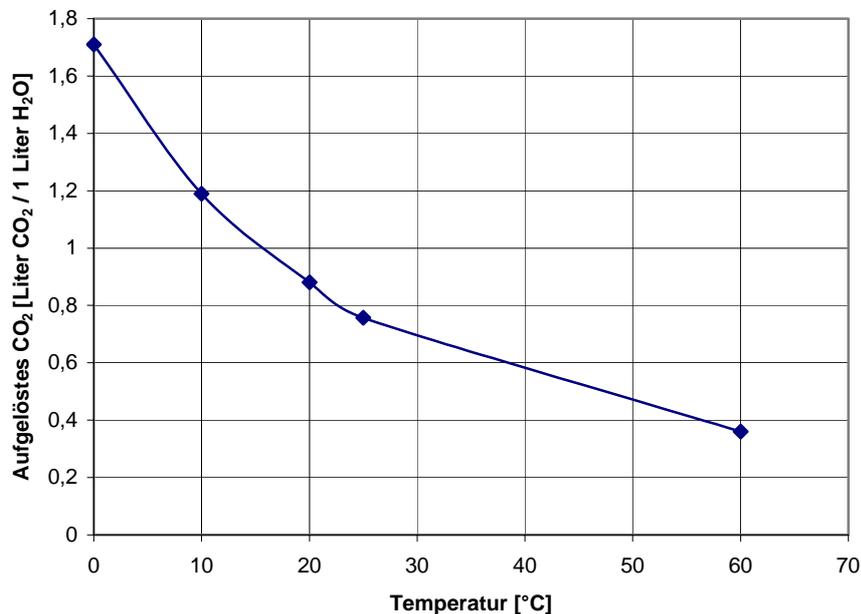


Bild 2.1: Abhängigkeit der Löslichkeit von CO₂ in Wasser von der Temperatur [40]

Als weitere Abhängigkeit ergibt sich bei Betrachtung der Gleichung 2.4 ein Zusammenhang zwischen dem Lösungsverhalten des Gases und seinem Partialdruck $p(i)$. Als Partialdruck wird dabei der alleinige Druck des Gases definiert, also der Druck, den das betrachtete Gas einnehmen würde, sofern es allein im betrachteten Raum aufträte. Hierbei gilt, dass Mischungen idealer, nicht miteinander reagierender Gase als Gesamtdampfdruck die Summe der Einzeldrücke der an der Mischung beteiligten Einzelgase einnehmen. Dies lässt sich z.B. am Wasserdampf verdeutlichen, dessen Partialdruck sich als Maß für die relative Luftfeuchtigkeit darstellen lässt. Allgemein lässt sich der Partialdruck daher wie folgt definieren:

$$p(i) = p_{ges} \cdot \frac{V(i)}{V_{ges}} \quad (\text{Gl. 2.5})$$

mit: $p(i)$ Partialdruck des Gases i in der Gasphase
 p_{ges} Gesamtdruck aller an der Gasphase beteiligten Gase
 $\frac{V(i)}{V_{ges}}$ Volumen von Gas i im Verhältnis zur gesamten Gasphase

Nach dem Henry-Daltonschen Gesetz gilt also bei konstanter Temperatur T ein proportionaler Verlauf des Lösungsverhaltens eines Gases in Abhängigkeit von seinem Partialdruck. Zu beachten ist bei diesen Betrachtungen, dass die dargestellten Gesetzmäßigkeiten nicht un-

eingeschränkt unter allen Bedingungen gelten. Prinzipiell ist von einer höheren Genauigkeit der Darstellung auszugehen, je näher sich das betrachtete Gas einem „idealen“ Gas annähert, je geringer also seine molare Masse und sein Siedepunkt sind. Hinzu kommt, dass bei Gasen, die chemische Reaktionen mit dem Lösungspartner eingehen, das Lösungsverhalten durch das Gesetz von Henry-Dalton nur noch näherungsweise abgebildet werden kann. Dies gilt u.a. auch für Kohlendioxid, welches bei Kontakt mit Wasser, in einer chemischen Reaktion, Kohlensäure bildet. Zur Verdeutlichung dieses Zusammenhangs sei die Differenz zwischen einer linearen Zunahme des löslichen CO_2 mit zunehmendem Gasdruck und den sich tatsächlich einstellenden Verhältnissen in Bild 2.2 dargestellt. Hier liefert die blaue Linie den tatsächlichen Verlauf bei Drücken von 1, 5, 15, 25 und 30 bar, wohingegen die rote Linie einen idealisiert linearen Verlauf vergegenwärtigt.

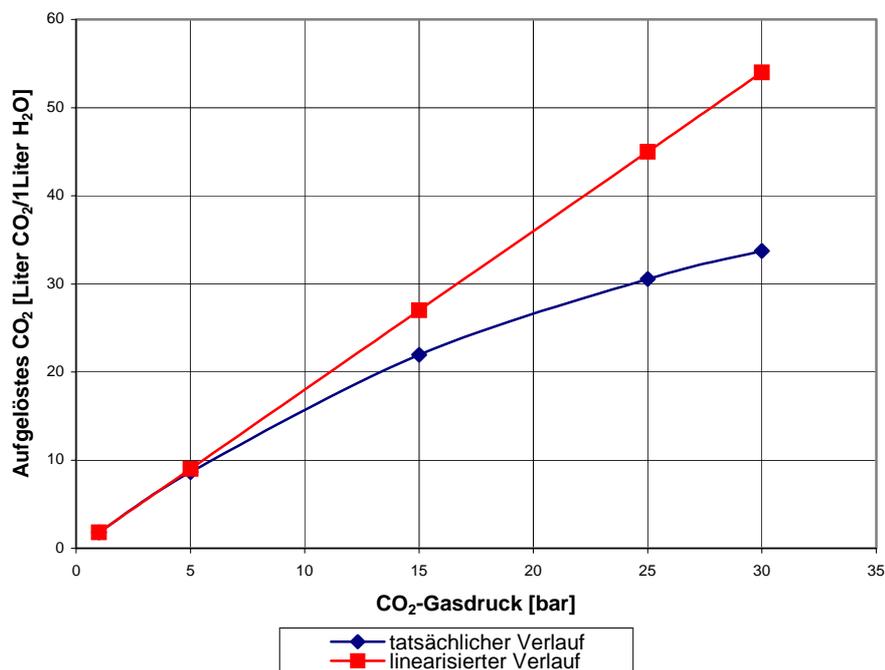


Bild 2.3: Darstellung der Zunahme an gelöstem CO_2 mit Erhöhung des Gasdrucks nach [40]

Die dargestellte Diskrepanz zwischen einer linearen Annahme und dem tatsächlichen Verlauf liegt darin begründet, dass die Bildung von Kohlensäure bei höheren Drücken stagniert und Kohlendioxid weiterhin nur noch „physikalisch“ gebunden werden kann.

Kombiniert man diese Erkenntnisse und überträgt sie auf das Kohlendioxid im Kontakt mit Wasser, so lassen sich zusammenfassend einige wichtige und für das Verständnis der Versinterungsentstehung grundlegende Erkenntnisse formulieren:

- Mit steigendem Partialdruck nimmt das Lösungsvermögen des Bergwassers zu
- Daraus folgt, dass mit Erreichen tieferer Gebirgsschichten auf Grund höherer Umgebungsdrücke mehr Kohlendioxid in Bergwasser gelöst werden kann
- Sinkt der Druck wieder, so sinkt das Lösungsvermögen des Wassers und das überschüssige CO_2 muss ausgasen
- Sinkt die Temperatur, so steigt das Lösungsvermögen des Wassers im gleichen Maße, in dem die Henry-Konstante ansteigt

- Umgekehrt sinkt das Lösungsvermögen des Wassers bei steigenden Temperaturen, und eine Erwärmung des Bergwassers führt demnach zur Ausgasung überschüssiger Kohlensäure

Neben den hier beschriebenen Gesetzmäßigkeiten nach Henry-Dalton wurden z.B. von Ostwald und Bunsen auch noch andere Löslichkeitskoeffizienten definiert, die jedoch an bestimmte Messverfahren gebunden sind und daher hier nicht weiter betrachtet werden sollen.

2.1.3 Entstehung und Dissoziation von Kohlensäure

Wasser, welches in einem offenen System mit freiem Kohlendioxid in Kontakt tritt, beginnt chemisch zu reagieren und Kohlensäure zu bilden. Die hierfür signifikante Reaktionsgleichung lautet:



Hierbei gelten die unter 2.1.2 dargelegten Gesetzmäßigkeiten des Henry-Daltonschen Gesetzes hinsichtlich der äußeren Bedingungen und der Löslichkeit der Kohlensäure im Wasser. Aufgrund der Besonderheiten des Wassermoleküls sind dabei im Falle der Sättigung rund 99% des CO_2 physikalisch gelöst, und nur etwa 1% mit Wassermolekülen nach oben dargestellter Gleichung zu Kohlensäure reagiert [40]. Die gebildeten H_2CO_3 -Moleküle dissoziieren jedoch umgehend und „zerfallen“ in Hydroniumionen (H_3O^+ oder vereinfacht H^+), Hydrogen-carbonationen (HCO_3^-) und Carbonationen (CO_3^{2-}). Die ablaufenden Reaktionen lauten im Einzelnen:

1. Dissoziationsstufe:



2. Dissoziationsstufe:



Die so gebildeten Hydroniumionen stellen in der Chemie die für Säuren signifikante Verbindung dar. Auf Grund ihrer im Vergleich zum Hydrogencarbonat geringeren Löslichkeit bilden sich reine Carbonate erst bei pH-Werten $>8,7$ [20]. Da sich, wie bereits erläutert, nur ein geringer Teil des gelösten Kohlendioxids wirklich zu Kohlensäure verbindet, bleibt die Anzahl der durch Dissoziation gebildeten Hydroniumionen gering. Aus diesem Grund stellt Kohlensäure eine nur schwache Säure dar.

Die leichter löslichen Hydrogencarbonate bilden sich auch bei Kontakt bereits entstandener Carbonate mit Kohlendioxid:



Betrachtet man die Konzentrationen der drei wichtigen Verbindungen des Kohlensäuregleichgewichts, so lassen sich die anteiligen Mengen in Abhängigkeit vom pH-Wert der Lösung wie folgt darstellen (Bild 2.4):

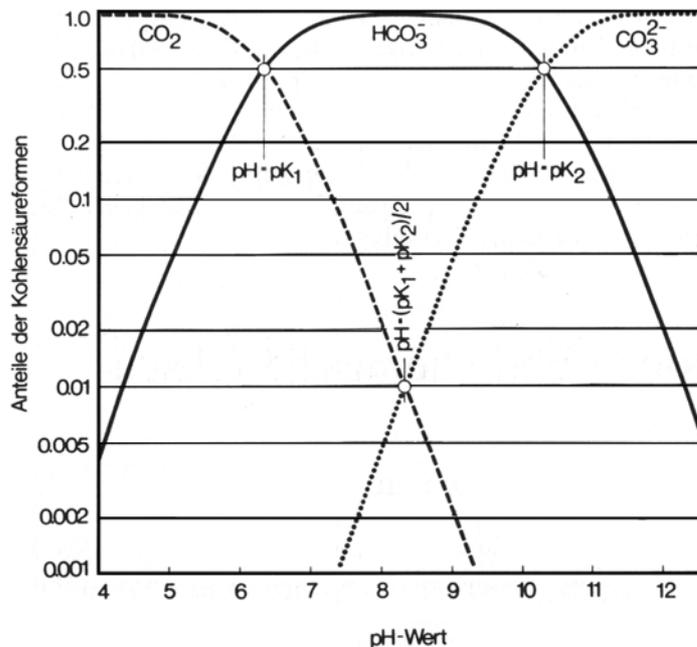


Bild 2.4: Anteile von CO_2 , HCO_3^- und CO_3^{2-} in wässriger Lösung in Abhängigkeit vom pH-Wert [20]

Die Bildung von Carbonaten wird also primär durch einen relativ hohen pH-Wert der Lösung ermöglicht. Je nach den äußeren Bedingungen wird so Kohlensäure gebildet, bis sich schließlich der Sättigungszustand eingestellt und das Wasser die in Abhängigkeit von Druck und Temperatur mögliche Menge von CO_2 aufgenommen hat.

2.1.4 Das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht

In der Natur anzutreffende Wässer sind chemisch niemals rein, sondern enthalten stets in ihnen gelöste Stoffe. Neben gelösten Gasen (O_2 , N_2 , CO_2) sind im Wasser vor allem gelöste Salze von Alkali- und Erdalkalimetalle anzutreffen. Die Erdalkalimetalle Calcium und Magnesium als Härtebildner besitzen dabei für diese Ausführungen eine zentrale Bedeutung, da die in Dränagen von Tunnelbauwerken auftretenden Ausfällungen zu rund 95% aus Calciumcarbonat, dem Kalkstein, bestehen. Auf Grund der typischen äußeren Bedingungen von Tunneldränagen, mit einem begrenzten Spektrum an klimatischen Bedingungen, kommt es dabei vornehmlich zur Bildung von Calcit, einer der möglichen kristallinen Formen des Calciumcarbonats, welche nur bei Temperaturen unterhalb von etwa 60°C entsteht.

Calciumcarbonat ist eigentlich als nur schwer wasserlöslich anzusehen, wird jedoch vom kohlensauren Wasser und durch das in ihm gelöste Kohlendioxid selbst in Lösung gezwungen. Dies lässt sich durch folgende Gleichung darstellen:



Das sich so bildende Calciumhydrogencarbonat ist dabei deutlich leichter wasserlöslich als reines Calciumcarbonat und dissoziiert umgehend:



In Abhängigkeit von Temperatur, Druck, pH-Wert und Sättigung stellt sich nun das sogenannte Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht ein. In Abhängigkeit von der Menge gelösten Kohlendioxids und somit freier Kohlensäure, kann das Wasser weiteres Calciumcarbonat lösen, solange, bis auch hier seine Sättigung erreicht ist.

Werden nun durch äußere Einflüsse Parameter des Gleichgewichtszustandes verändert, z.B. durch Änderung der Temperatur oder des Drucks, so verschieben sich nach den oben dargelegten Gesetzmäßigkeiten die jeweiligen Gleichgewichtszustände.

Allgemein spricht man hier vom Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht, welches sich bei Vorhandensein dieser Stoffe einstellt und bei einer Betrachtung der Lösungssättigung eine Aussage über Ausfällungstendenzen des Kalks im wasserführenden System zulässt.

2.1.5 Zusammenfassung wichtiger hydrochemischer Einflüsse auf den Gleichgewichtszustand zwischen Kalk und Kohlensäure unter der Berücksichtigung der Versinterungsproblematik bei Tunnelbauwerken

Die Erläuterungen der Löslichkeiten von Gasen und Feststoffen in Wasser und die Darstellungen zur Dissoziation von Kohlensäure legen nahe, dass äußere Einflüsse – wie z.B. Änderungen der Temperatur, des pH-Wert oder des Partialdrucks – teilweise erheblichen Einfluss auf das chemische Gleichgewicht einer Lösung haben. Dies gilt ebenfalls für das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht. In Abhängigkeit von der geänderten Randbedingung lassen sich daher nachfolgende Einflüsse und ihre Auswirkung auf im Wasser gelöstes Calcit festhalten:

a) Änderung des pH-Werts

Wird durch Zugabe von Säuren oder Basen eine Veränderung des sich einstellenden pH-Werts bewirkt, so verschieben sich auch die chemischen Gleichgewichte der im Wasser befindlichen Inhaltsstoffe. Fügt man z.B. eine Base hinzu und erhöht damit den pH-Wert, so verringert sich der Anteil der Hydroniumionen am Gesamtsystem. Zum Ausgleich werden daher vermehrt Kohlensäuremoleküle aufgebraucht und somit mehr Carbonationen gebildet. Da das Löslichkeitsprodukt des Calcits bei unveränderter Temperatur und gleichem Druck nach Definition von 2.1.1 konstant bleiben muss, sinkt in Folge der Zunahme der Carbonate die Menge an löslichem Calciumcarbonat und der „Überschuss“ des in Lösung befindlichen

Calcits wird ausgefällt. Umgekehrt steigt mit einer Abnahme des pH-Werts die Menge des löslichen Calcits an. Tritt also beispielsweise stark basisches Wasser der Dränage eines Tunnels zu, so ist mit vermehrter Abscheidung von Calciumcarbonat zu rechnen.

b) Änderung der Temperatur

Entsprechend Bild 2.1 nimmt die Löslichkeit von CO_2 in Wasser mit steigender Temperatur deutlich ab. Bei einer CO_2 -gesättigten Lösung wird bei Erhöhung der Temperatur daher überschüssiges Kohlendioxid ausgegast und damit das Gleichgewicht zwischen Kalk, Kohlensäure und Wasser verändert. In Folge der Ausgasungen sinkt die Löslichkeit des Calciumcarbonats, es kann also weniger Calciumcarbonat in Lösung gehalten werden und der Überschuss gelösten Calciumcarbonats fällt aus. Entsprechend kann bei Verringerung der Temperatur mehr Kohlendioxid gelöst und damit auch die Menge des löslichen Calciumcarbonates erhöht werden. Treten also einer Dränage höher temperierte Wässer zu, beispielsweise als aufsteigende hydrothermale Wässer, so ist mit vermehrter Abscheidung von Calciumcarbonat zu rechnen

c) Änderung des Partialdrucks

Wie in Bild 2.3 dargestellt und in 2.1.2 zusammenfassend erläutert, nimmt bei fallendem Partialdruck die Löslichkeit von Kohlendioxid im Wasser ab. Entspannt sich also der Partialdruck des CO_2 , z.B. in Folge des Kontakts des unter Druck stehenden Bergwassers mit dem normalen Druck der Luft im Bauwerk, so kann deutlich weniger Kohlendioxid in Lösung gehalten werden, das chemische Gleichgewicht verändert sich, und das nun nicht mehr in Lösung zu haltende Calciumcarbonat wird ausgefällt.

d) Änderung des Salzgehaltes

Prinzipiell können auch bei Erreichen der Sättigung einer Lösung bezüglich eines bestimmten Salzes wie z.B. Calciumcarbonat noch andere Salze durch das Lösungsmittel dissoziiert werden. In Folge der Vielzahl verschiedener Ionentypen in der Lösung kann es jedoch zu interionischen Aktivitäten und Interferenzen kommen, welche den Dissoziationsprozess des Calciumcarbonats beeinflussen und dadurch dessen Löslichkeit herabsetzen. Nimmt z.B. Grundwasser auf seinem Weg zum Tunnelbauwerk durch die wasserführenden Schichten weitere Stoffe/Salze auf, so wird dies in der Regel zu einer Herabsetzung der Löslichkeit von Calciumcarbonat führen, und es wird somit entweder kein weiteres mehr gelöst oder bereits in Lösung befindliches Calciumcarbonat ausgeschieden.

2.1.6 Wasserhärte, Calcitsättigung und ihre Bestimmung

2.1.6.1 Härte eines Wassers nach DIN 38409-6

Im Wasser gelöste Salze der Erdalkalimetalle werden allgemein als Härtebildner bezeichnet. Historisch geht dieser Begriff auf die Reaktion der Calcium-Ionen des Wassers mit den frü-

her verbreiteten fettsauren Seifen zurück, die sich zu einem festen flockigen Niederschlag, zumeist Calciumstearat, verbinden. Faktisch handelt es sich bei den hier dissoziierten Elektrolyten jedoch nicht nur um gelöste Hydrogencarbonate und Carbonate, sondern auch Calcium- und Magnesiumverbindungen mit Sulfaten und Chloriden als Anionen. Diese sind deutlich besser in Wasser löslich und verhalten sich bei geänderten Randbedingungen des Gleichgewichts anders als Hydrogencarbonate. Während letztere durch Aufkochen der Lösung einfach ausgefällt werden können, bedarf es bei Sulfat- und Chloridverbindungen eines deutlich höheren Aufwandes. Daher wird die Härte eines Wassers nach DIN 38409-6 als Gesamtheit aller gelösten Ca- und Mg-Ionen definiert, die sich aus Anteilen von „Härtehydrogencarbonat“ - also durch Temperaturerhöhung ausfällbaren Anteilen - und permanenter bzw. bleibender Härte subsumiert [11]. Gemäß der zitierten DIN sind andere Begriffe, wie etwa Carbonathärte, als wissenschaftlich unzutreffend anzusehen und daher zu vermeiden.

In der Regel besteht die Härte eines Wassers zu etwa 70-85% aus Verbindungen des Calciums und etwa 15-30% aus denen des Magnesiums [40]. Für exakte Angaben der genauen Konzentrationen liefert die DIN 38406 dezidierte Verfahren, die für genaue Härtebestimmungen bindend sind. Dabei gelten nicht nur oben genannte Definitionen wie „Carbonathärte“ als überholt sondern auch der noch oft verwendete Begriff des „deutschen Härtegrades“ ($^{\circ}\text{dH}$) ist mit dem derzeit gültigen „Gesetz über Einheiten im Maßwesen“ nicht mehr konform.

2.1.6.2 Calcitsättigung und ihre Bestimmung nach DIN 38404-10

Während die Härte eines Wassers im Prinzip nur eine Aussage über die im Wasser mitgeführten Ca- und Mg-Ionen zulässt, kann über die Calcitsättigung die Neigung des Wassers zur Ausfällung von Calciumcarbonat bestimmt werden. Geht man von drei grundlegenden Zuständen hinsichtlich des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts aus, nämlich übersättigt, gesättigt und untersättigt, liefert eine Angabe über die Calcitsättigung daher eine qualitative Messgröße zur Gefährdung durch Härteabscheidungen. Die Tatsache, dass hierbei nur Verbindungen des Calciums berücksichtigt werden, spielt angesichts der prozentualen Verteilung von Calciumverbindungen zu denen des Magnesiums (95% zu 5%), zumindest für den Tunnelbau eine untergeordnete Rolle.

Durch die DIN 38404-10 [10] werden mehrere Verfahren zur Verfügung gestellt, diesen Wert exakt erfassen zu können. Es handelt sich hier um:

- Rechenverfahren 1: Bestimmung der Calcitsättigung eines Wassers durch Berechnung des Sättigungs-pH-Wertes nach Austausch von Kohlendioxid (pH_A)
- Rechenverfahren 2: Bestimmung der Calcitsättigung eines Wassers durch Berechnung des Sättigungs-pH-Wertes nach Strohecker und Langlier (pH_L)
- Rechenverfahren 3: Grundlagen zur Bestimmung der Calcitsättigung eines Wassers durch iterative Berechnung mit Rechenprogrammen
- Bestimmung der Calcitsättigung durch den Marmorlöseversuch
- Bestimmung der Calcitsättigung durch den pH-Schnelltest

Die Erfahrungen mit der Bestimmung der Versinterungsneigung verschiedener Bauwerke, wie z.B. Saukopftunnel, Hochwaldtunnel, Tunnel Berg Bock oder Rennsteigtunnel, haben gezeigt, dass dabei das Rechenverfahren 2 am ehesten für den Einsatz bei Dränagewässern eines Tunnelbauwerks geeignet ist [1]. Hierbei spielt auch eine Rolle, dass dieses Verfahren auch bei Über- oder Unterschreitung der angegebenen Grenzwerte noch ausreichend genaue Ergebnisse liefert, um die Versinterungsneigung eines Entwässerungssystems qualitativ zu beschreiben. Daher soll dieses Verfahren hier kurz vorgestellt werden:

Kennwerte

Die für die Bestimmung des Sättigungs-pH-Werts zu erfassenden Kennwerte sind

- der Calciumgehalt c (in mmol/l)
- der pH-Wert (als pH_t , also bezogen auf die Messtemperatur t)
- die Messtemperatur t (in °C)
- die Bewertungstemperatur t_B (in °C)
- die elektrische Leitfähigkeit des Wasser χ_{25} bei 25 °C (in mS/m)
- die Säurekapazität bis $pH=4,3$ $K_{S4,3}$ (in mmol/l)

sowie der Gehalt an Sulfat- und Magnesium-Ionen zur Abschätzung der Grenzbereiche.

Grenzbereiche

Per DIN 38404-10 werden folgende Einsatzgrenzen für das Rechenverfahren 2 festgelegt:

Elektrische Leitfähigkeit bei 25 °C in mS/m	5	$\leq \chi_{25}$	≤ 200
Säurekapazität bis $pH=4,3$ in mmol/l	0,25	$\leq K_{S4,3}$	≤ 10
Stoffmengenkonzentration an Calcium in mmol/l	0,25	$\leq c(\text{Ca})$	≤ 10

Sofern diese Werte unter- oder überschritten werden, soll gemäß der DIN das Rechenverfahren 3 angewendet werden. Wie bereits eingangs erläutert, liefert das Verfahren für die Beurteilung der Versinterungstendenz des Entwässerungssystems eines Tunnels, unter Berücksichtigung der Zielsetzung dieser Arbeit, jedoch auch bei Überschreitung der Grenzwerte eine ausreichend hohe Genauigkeit.

Durchführung

Sind die zu ermittelnden Messwerte durch geeignete Messinstrumente erfasst worden, kann anhand nachfolgender Gleichungen der Sättigungs-pH-Wert nach Strohecker und Langlier (pH_{Ltb}) errechnet werden:

$$pH_{Lib} = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 \quad (\text{Gl. 2.12})$$

$$\text{mit: } L_1 = -5 \cdot \frac{-\frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{\chi_{25}}{6200}}}{1 + 1,4 \cdot \sqrt{\frac{\chi_{25}}{6200}}}$$

$$L_2 = \lg\{K_C\} - \lg\{K_2\}$$

wobei

$$\lg\{K_C\} = -8,481 - 522,3 \cdot \left(\frac{1}{298,15} - \frac{1}{t_b + 273,15} \right) - 14,1 \cdot \left(\ln\left(\frac{t_b + 273,15}{298,15} \right) + \left(\frac{298,15}{t_b + 273,15} \right) - 1 \right)$$

sowie

$$\lg\{K_2\} = -10,329 + 780,9 \cdot \left(\frac{1}{298,15} - \frac{1}{t_b + 273,15} \right) - 15,1 \cdot \ln\left(\frac{t_b + 273,15}{298,15} + \frac{298,15}{t_b + 273,15} - 1 \right)$$

$L_3 = -\lg\{c\{HCO_3^-\}\}$, wobei eine Bestimmung dieses Wertes durch folgende Berechnung erfolgen kann: $L_3 = -\lg\{K_{S4,3}\}$

$$L_4 = -\lg\{c\{Ca^{2+}\}\}$$

Diese zunächst recht komplex erscheinenden Berechnungen ist durch geeignete Programme oder Tabellenkalkulationen komfortabel umsetzbar und so der pH_{Lib} relativ einfach zu ermitteln.

Im letzten Schritt wird dann der errechnete Sättigungs-pH-Wert mit dem tatsächlichen pH-Wert verglichen und so die Calcitabscheidetendenz des Wassers ermittelt. Hierbei gilt:

$pH_{Tb} < pH_{Lib}$	\rightarrow	das Wasser ist calcitlösend
$pH_{Tb} = pH_{Lib}$	\rightarrow	das Wasser ist calcitgesättigt
$pH_{Tb} > pH_{Lib}$	\rightarrow	das Wasser ist calcitabscheidend

Zu einer Dränage zutretende Wässer liegen in der Regel als calcitlösende oder calcitabscheidende Wässer vor; der Fall einer „Sättigung“ nach obiger Definition ist daher unwahrscheinlich. Für den Fall der tatsächlichen Abscheidung von Calcit muss dabei eine Differenz > 1 zwischen pH_{Tb} und pH_{Lib} vorliegen. Unterhalb dieser Grenze bedarf es einer geeigneten Absorptionsfläche für entstehende Calcitkristalle, um sich anlagern und wachsen zu können. Oberhalb dieser Grenze bilden sich im Wasser selbst Kristalle, die dann wiederum als Impfkristalle fungieren und eine beschleunigte Abscheidung von Calcit aus der wässrigen Lösung ermöglichen.

Als calcitlösend klassifiziertes Bergwasser ist bei Eintritt in die Dränage im Stande, bereits bestehende Ablagerungen anzulösen und eine Reinigung des Systems nachhaltig positiv zu beeinflussen.[31]

2.2 Kalkanreicherung von Bergwässern

2.2.1 Allgemeines

Dränierte Tunnelbauwerke stehen in Abhängigkeit von ihrer Lage im Gebirge unter den Einflüssen verschiedener Wässer mit unterschiedlicher Herkunft und Zusammensetzung. Einerseits handelt es sich um Oberflächenwässer, die – je nach geologischer Situation des Tunnels – verschiedenste Schichten und Formationen durchlaufen haben, bevor sie dem Dränagesystem zutreten. Andererseits können z.B. auch aufsteigende, hydrothermale Wässer oder – je nach Lage der Tunneltrasse – sonstige Tiefenwässer angetroffen werden, die auf Grund ihrer Genese ganz spezifische Zusammensetzungen aufweisen. Solche Wässer haben zumeist deutlich höhere Wassertemperaturen, die grundlegende Veränderungen der chemischen Randbedingungen bewirken. Bei Betrachtung der Versinterungsproblematik von dränierten Tunnelbauwerken spielt die Herkunft des Wassers jedoch letztlich eine nur untergeordnete Rolle, sofern zwischen aufsteigenden und absteigenden Wässern differenziert werden soll. Entscheidend ist die Zusammensetzung und Temperatur des Wassers bei Zutritt zur Dränage. Seine Sättigung mit Calcit und seine Tendenz, Calcit unter den in der Dränage herrschenden Bedingungen auszufällen, sind von entscheidender Bedeutung. Daher wird im Folgenden nicht zwischen auf- oder absteigenden Wässern unterschieden, sondern es wird lediglich zwischen den verschiedenen Formen der Kalkanreicherung des Bergwassers differenziert.

2.2.2 Natürliche Anreicherung des Bergwassers mit CO_2 und CaCO_3

Wie bereits unter 2.1.4 erläutert, bedarf es im Wasser gelösten Kohlendioxids, um das in Wasser zunächst unlösliche Calciumcarbonat in Lösung zu zwingen. Betrachtet man daher den Weg des Wassers hin zum Tunnelbauwerk, muss auch bei Durchströmung stark kalkhaltiger, geologischer Strukturen einer Anreicherung des Wassers durch CO_2 erfolgen, um eine Anreicherung des Bergwassers mit Calciumcarbonat zu ermöglichen.

Das für den Beginn des Elutionsprozesses notwendige CO_2 kann vom Bergwasser auf verschiedene Weisen aufgenommen werden. Ein minimaler Anteil der CO_2 -Anreicherung geschieht bereits in der Atmosphäre, bei Kontakt des Regenwassers mit dem Kohlendioxid der Luft. Dieser Teil ist jedoch verschwindend gering und daher vernachlässigbar. Die weitaus größere Menge an Kohlendioxid wird dem Sickerwasser durch den Kontakt mit der Erdoberfläche beigefügt. Da die Wurzelatmung des Oberflächenbewuchses aerob funktioniert, wird in den oberflächennahen Bodenschichten der Luft Sauerstoff entzogen und Kohlendioxid freigesetzt [45]. Bilanzierungen der Zusammensetzung der Gasphase oberflächennaher Schichten, wie z.B. durch *Schack-Kirchner et al.* [45], untermauern den Verdacht, dass im Sickerwasser gut lösliches CO_2 in diesem Bereich aufgenommen und abtransportiert wird. Die sich dabei bildende Kohlensäure trägt einerseits zur Versäuerung des Bodens bei, liefert

aber andererseits eine gute Basis für die Elution von Kalk aus den im weiteren Verlauf durchsickerten Bodenschichten. Je nach Überdeckung des Tunnelbauwerks kann die Sickerstrecke dabei von wenigen Metern bis zu mehreren hundert Metern reichen und die Möglichkeit zur Aufkonzentration von mineralischen Inhaltstoffen dementsprechend variieren. Werden dabei eingelagerte Carbonate angetroffen, so kann das mit Kohlendioxid angereicherte Bergwasser diese gemäß den unter 2.1.4 dargestellten Grundsätzen aus dem Gestein lösen und abtransportieren.

In tieferen Schichten steht nicht das CO_2 der oberflächennahen Gasphase zur Verfügung. Reservoirs an Kohlendioxid, aus der Entstehung der tiefer liegenden geologischen Schichten reichern hier gegebenenfalls das Wasser an. Durch den dabei z.T. enormen Druck, der bei großen Überdeckungen erreicht wird, nimmt mit zunehmender Tiefe auch die Löslichkeit des Kohlendioxids zu. Dem zu Folge ist bei größeren Tiefen natürlicher Weise auch mit saureren Wässern und damit mit einem höheren Angriffsgrad auf Lagerstätten von Calciumcarbonat und anderen Mineralstoffen zu rechnen. Der Rückgang der Löslichkeit des CO_2 in Folge höherer Temperaturen hat im Gegensatz zu den Einflüssen der hohen Drücke nur marginale Auswirkungen, so dass bei aufsteigenden Wässern oder der Durchörterung von großen Überdeckungen mit z.T. extremen Mineralstofffrachten zu rechnen ist.

2.2.3 Elution von Kalk aus Komponenten des Tunnelsicherungs- und Tunnelentwässerungssystems

Bei der bergmännischen Erstellung dränkter Tunnel werden in Folge des Aufbaus von Sicherungs- und Entwässerungssystemen vielfältige Kontaktflächen zwischen Bergwasser und kalkhaltigen Komponenten der Bauwerkssicherung und -entwässerung ausgebildet. Besonders die bei der Spritzbetonbauweise anzutreffende, als vorläufige Sicherung des Bauwerks konzipierte Spritzbetonaußenschale neigt auf Grund ihrer strukturellen und chemischen Zusammensetzung zur Elution von kalkhaltigen Komponenten bei Kontakt mit kohlen-saurem Bergwasser. Aber auch die zur Verklebung von Ankern mit dem Gebirge verwendeten Mörtel oder die zur Verpressung des bei Verwendung eines zweisehaligen Ausbaus obligatorischen Firstspalts nötigen Verpressmittel können ebenso wie die Filterschichten in nicht geringem Maße zur Auslaugung von Kalk neigen [43]. Diese Elutionseffekte in Zusammenhang mit zementuösen Bestandteilen des Sicherungs- und Entwässerungssystem des Bauwerks, stellen versinterungstechnisch ein deutlich größeres und spürbareres Problem dar als natürlich mit Kalk angereicherte Bergwässer [38].

Der Prozess der Elution vollzieht sich dabei in Folge des sich einstellenden Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts: Die im Bergwasser gelöste Kohlensäure neigt dazu, den prinzipiell nur schwer wasserlöslichen Kalk anzugreifen und in Lösung zu zwingen.

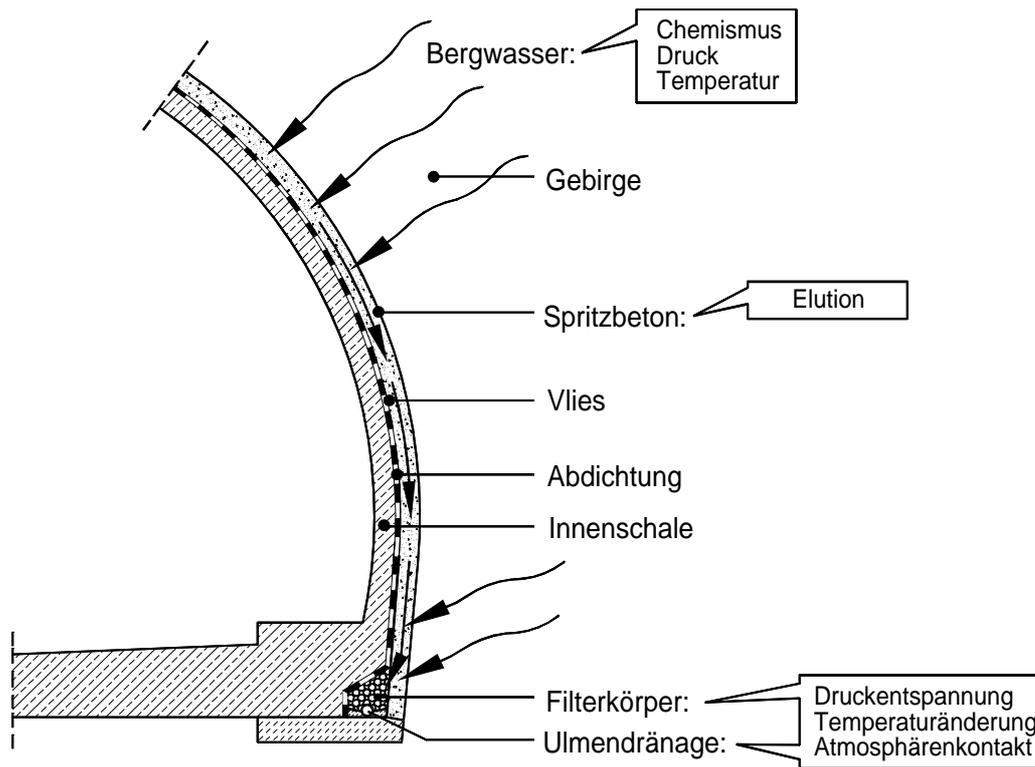


Bild 2.5: Weg des Bergwassers vom Kontakt mit dem Bauwerk bis zum Eintritt in die Drainage nach [38]

Bei der Durchdringung der Spritzbetonschale setzt der Elutionsprozess ein, sofern das Bergwasser aggressiv auf die vorläufige Sicherung wirkt.

Die Freisetzung löslicher Bestandteile aus einer Zementsteinmatrix in Kontakt mit Wasser wird durch verschiedene, sich auch überlagernde Phänomene kontrolliert, die durch vier auf mikroskopischer Ebene auflaufende Schritte dezidiert beschrieben werden können:

1. Auflösung der Stoffe im Porenwasser
2. Nachlösen gebundener Anteile und Einstellen neuer Gleichgewichte
3. Transport innerhalb der Matrix und Übergang in das wässrige Medium
4. Weitertransport/Ausbreitung im wässrigen Medium

Im 1. Schritt werden nach [9] die meisten Spurenelemente (darunter auch Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium) aufgrund des hohen pH-Wertes bereits im Anmachwasser ausgefällt. Da sich Porenwasser und Zementsteinmatrix im Gleichgewicht befinden, verbleibt ein nur geringer Anteil der schwer löslichen Stoffe im Porenwasser gelöst. Dieser Vorgang ist stoffspezifisch und abhängig von der chemischen Zusammensetzung und dem pH-Wert der Porenlösung. (Bild 2.6)

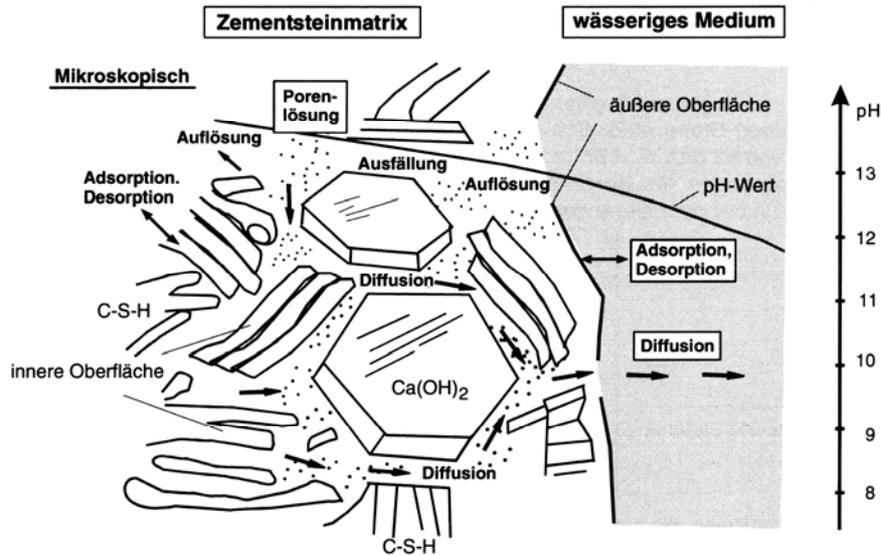


Bild 2.6: Freisetzung von löslichen Bestandteilen aus einer Zementsteinmatrix (schematisch) [21]

Auf Grund des Konzentrationsgefälles werden die gelösten Stoffe im 2. Schritt zur Oberfläche transportiert und dort in den sogenannten Eluenten, also hier dem anstehenden Bergwasser, freigesetzt. Diese Prozesse bewirken ein Nachlösen vorher noch gebundener Stoffe. Da sich die chemischen Randbedingungen während der Auslaugung zeitabhängig ändern können, besteht die Möglichkeit sich neu einstellender Lösungsgleichgewichte (schnelleres/langsameres Nachlösen). Dies kann z.B. durch Carbonatisierung bzw. Verschiebung des pH-Wertes zu niedrigeren Werten bewirkt werden.

Im 3. Schritt werden dann die gelösten Stoffe durch Diffusion im Porensystem der Matrix (Porenwasser) bis an die Oberfläche des Betons transportiert. Da der pH-Wert im Porenwasser zur Oberfläche hin leicht abnimmt, kann es auf diesem Weg auch zu einer Ausfällung der Stoffe kommen. Dabei ist die Diffusion im Porenwasser und damit auch die Freisetzung ins wässrige Medium von den strukturellen bzw. betontechnischen Einflüssen abhängig (Gesamtporosität, Porengrößenverteilung etc.).

Die freigesetzten Stoffe werden im 4. Schritt im wässrigen Medium entweder im stehenden Wasser, in Folge eines Konzentrationsgradienten durch Diffusion, oder im fließenden Wasser, durch Konvektion und Dispersion, ausgebreitet. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit hängt von vielen Faktoren ab, z.B. vom Konzentrationsgefälle, von der Fließgeschwindigkeit des Wassers oder der Temperatur. Bei diesen Prozessen ist jeweils der langsamste Schritt geschwindigkeitsbestimmend. Dies bedeutet: Wenn die Diffusion im Zementstein langsamer ist als z.B. die Auflösung der Stoffe, dann ist die Diffusion der dominierende Prozess.

Zusätzlich zu den beschriebenen Prozessen können lösliche Salze, die auf der äußeren Oberfläche des Betons adsorbiert sind, beim ersten Kontakt mit dem Eluenten abgelöst werden. Man spricht von der so genannten Anfangsauswaschung („wash-off“ - Effekt). Dieser Prozess ist meistens bereits nach kurzen Zeiträumen beendet und ist für die bei Tunnelprojekten oftmals extremen pH-Werte des Bergwassers kurz nach Erstellung der Außenschale verantwortlich.

Zusammengenommen ergeben die Schritte 1-4 die Auslaugrate, die in einem Auslaugver-

sich bestimmt werden kann. Für eine Beschreibung des Langzeitauslaugverhaltens bzw. einer Prognose (Modellierung) der langfristigen Auslaugung ist die Bestimmung des dominierenden Auslaugmechanismus notwendig, der jedoch von vielen äußeren Faktoren abhängt, die sich bauwerksspezifisch über die Lebensdauer des Bauwerks durchaus ändern können. Eine Bewertung der effektiven Auslaugung ist daher prinzipiell nur qualitativ möglich.

Betrachtet man den Elutionsprozess und seine Auswirkung auf das Dränagewasser unter rein chemischen Gesichtspunkten, so lassen sich - je nach Zusammensetzung des Bergwassers und Zeitpunkt der Betrachtung - vier mögliche Reaktionsstufen der zementuösen Komponenten des Tunnelbauwerks mit dem Bergwasser herausarbeiten (Bild 2.7):

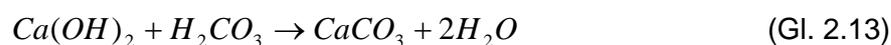
		Löslichkeit	
		g/l	Verhältnis
a) im Beton vorhanden:	Ca(OH)_2	1,230	100
b) im Wasser: $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$	H_2CO_3	1,019	95
Reaktionsprodukt			
1) $\text{Ca(OH)}_2 + \text{H}_2\text{CO}_3$	$\text{CaCO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$ = Calciumcarbonat	0,013	1
2) $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3$	$\text{CaH}_2(\text{CO}_3)_2$ = Calciumbicarbonat	165,000	13 000
3) $\text{CaH}_2(\text{CO}_3)_2 + \text{Ca(OH)}_2$	$2\text{CaCO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$ = Calciumcarbonat	0,013	1
4) $\text{CaH}_2(\text{CO}_3)_2 + \text{Luft}$	$\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ Calciumcarbonat	0,013	1

Schema
(n. R. Grün)

	unlöslich
	schwach löslich
	stark löslich

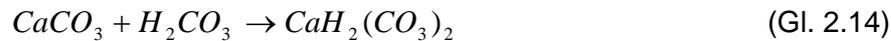
Bild 2.7 Reaktionsstufen bei der Bildung von Calciumcarbonat in Abhängigkeit von der Beschaffenheit des Bergwassers [26]

- 1. Stufe:** Das beim Hydratationsprozess des Betons aus den Silikaten des Zements entstehende, relativ stark basische Calciumhydroxid (Ca(OH)_2) reagiert im Rahmen einer Neutralisationsreaktion mit der im Bergwasser entstandenen Kohlensäure unter Bildung von Calciumcarbonat und Wasser:



- 2. Stufe:** Das so im ersten Reaktionsschritt entstehende Calciumcarbonat lagert sich zunächst in den außen liegenden Poren des Betons ab und wirkt prinzipiell abdichtend für das Porengefüge. Mit weiter anströmender Kohlensäure kommt es je-

doch zu ihrer zunehmenden Anlagerung an diesen „frischen“ Carbonaten, wobei sich gut wasserlösliches Calciumbicarbonat, auch Calciumhydrogencarbonat genannt, in einem zweiten Reaktionsschritt bildet:



3. Stufe: Weiterhin aus der Hydratation vorhandenes Calciumhydroxid reagiert nun in Schritt 3 gemeinsam mit den im Wasser gelösten Bicarbonaten erneut zu Calciumcarbonat und Wasser, wobei sich ein Teil der Carbonate wiederum in den Poren des Betons ablagert, um wiederum durch neue Kohlensäure zu Calciumbicarbonat zu reagieren. Ein anderer Teil wird - je nach Ort und Zeitpunkt der Reaktion - in das Dränagesystem gespült :



4. Stufe: Das nicht durchreagierte Bicarbonat strömt ebenfalls in Richtung Dränage, wo es mit der atmosphärischen Luft in Kontakt tritt und zu Wasser und Calciumcarbonat zerfällt:



Dies entspricht im Prinzip dem beim Entstehen von Tropfsteinen ablaufenden chemischen Prozessen [26].

Auf diese Weise erreichen daher prinzipiell drei verschiedene Formen des Calciumcarbonats die Dränagesysteme eines Tunnelbauwerkes:

- kristallines Calciumcarbonat, welches durch Aufspaltung der Bicarbonate entstanden ist, sich jedoch nicht erneut in den Poren des Zementsteins absetzen oder in Lösung gezwungen werden konnte
- Bicarbonate, die bei Kontakt mit Luft innerhalb der Dränage zu den deutlich unlöslicheren Carbonaten zerfallen
- Carbonate, die sich noch mit dem Kohlensäuregehalt des Bergwasser im Gleichgewicht befinden und daher gelöst vorliegen

2.3 Grundlagen der Härtestabilisierung

2.3.1 Kristallwachstum bei Ausfällung von Calcit

Allgemein bezeichnet der Begriff des Kristalls (von griechisch „krystallos“ = Eis) den thermodynamisch stabilen Zustand eines Feststoffs, der aus der Schmelze, aus einer Lösung oder einer Gasphase entstanden ist. Die sich zusammenfügenden Bausteine der kristallinen Substanz bilden dabei zumeist relativ homogene und für die jeweilige Substanz charakteristische Anordnungen, die einer dreidimensionalen Periodizität unterliegen. Sind diese Gitterbausteine Ionen, so spricht man von Ionenkristallen.

Eine integrale Rolle beim Kristallwachstum spielen die Prozesse der Keimbildung und die physikalischen Randbedingungen des Kristallwachstums selbst, wobei Letzteres erst bei Sättigungsgraden von über 1,0 möglich wird. Unterhalb dieses Levels bilden sich lediglich Keime in der Lösung, die sich mit hoher Wahrscheinlichkeit wieder auflösen. Im Fluid befindliche Moleküle (a) häufen sich dabei zufällig zu sogenannten Clustern zusammen (b)(c) und versuchen, dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik folgend, einen energetisch niedrigeren Zustand zu erreichen, einen Kristall auszubilden (d) (Bild 2.8).

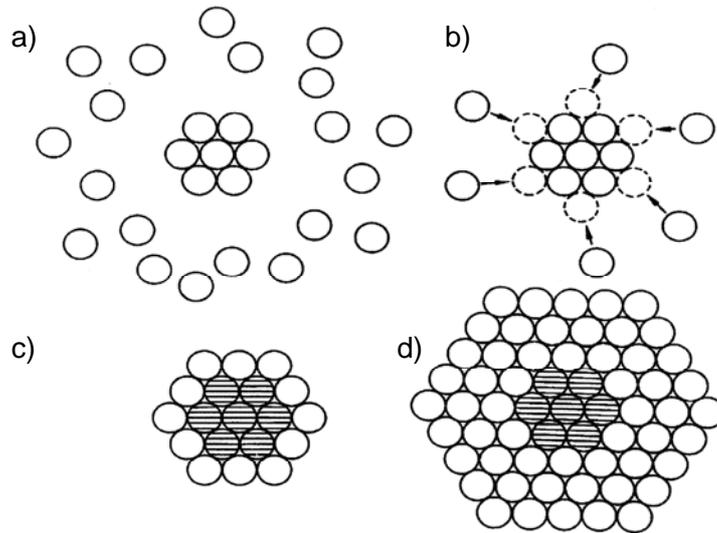


Bild 2.8 Schematische Darstellung der Bildung eines Kristalls aus einem Keim

Überschreiten die Keime dabei den kritischen Radius, so ist die Wahrscheinlichkeit, dass sie sich zu Kristallen ausbilden, größer als die einer Auflösung des Keims. Der hierfür charakteristische kritische Radius r_k lässt sich dabei wie folgt ermitteln:

$$r_k = \frac{2 \cdot \sigma \cdot v}{R \cdot T \cdot \ln S} \quad (\text{Gl. 2.17})$$

mit	σ	Grenzflächenenthalpie
	$v = \frac{M}{\rho}$	molares Volumen des Keimes, gebildet aus dem Quotienten seiner molaren Masse und seiner Dichte
	R	allgemeine Gaskonstante $R=8,3145 \frac{J}{K \cdot mol}$
	T	Temperatur in K
	S	Sättigung der Lösung

Einmal begonnen lässt sich bei der Entstehung von Keimen in der Lösung zwischen drei

verschiedenen Arten der Keimbildung unterscheiden:

- Primär homogene Keimbildung
- Primär heterogene Keimbildung
- Sekundäre Keimbildung

Als primär homogene Keimbildung wird ein Prozess bezeichnet, bei dem es zu plötzlicher Ausfällung des Feststoffs kommt, ohne dass vorher bereits artgleiche Kristalle vorhanden gewesen sind.

Bei primär heterogener Keimbildung lagern sich die Keime an geeigneten Oberflächen an und können auf Grund der Tatsache, dass ein Teil des Keims nun von dieser Oberfläche abgeschirmt wird, deutlich leichter zu Kristallen anwachsen. Dies bezieht sich sowohl auf die Wahrscheinlichkeit des Auswachsens zu einem Kristall als auch auf den Umstand, dass die primär heterogene Keimbildung auch schon bei geringsten Überschreitungen des Sättigungspunktes einsetzen kann.

Bei der sekundären Keimbildung nutzen neu entstehende Keime die arteigenen Oberflächen von z.B. Spülrückständen in den wasserführenden Systemen zur Anlagerung. Hierbei fungieren die im System noch befindlichen alten Ablagerungen quasi als Impfkeime, an denen sich neue Kristalle leicht anlagern können, und beschleunigen so den Ausfällungsprozess.

Betrachtet man die Ausfällung von Kalk speziell unter den Bedingungen einer Bergwasserdrainage, so lässt sich feststellen, dass es prinzipiell zu zwei verschiedenen Spezies des gewachsenen Kalkkristalls kommen kann - dem Calcit und dem Aragonit wobei letztere Spezies nur bei höheren Temperaturen entsteht und daher nicht typisch für eine Tunneldrainage ist. Calcit - oder auch Kalkspat - bildet als Kristallstruktur eine Art von entlang der Diagonalen gedrungener Würfelform aus (Bild 2.9) und kann extrem formenreich und hart angetroffen werden.

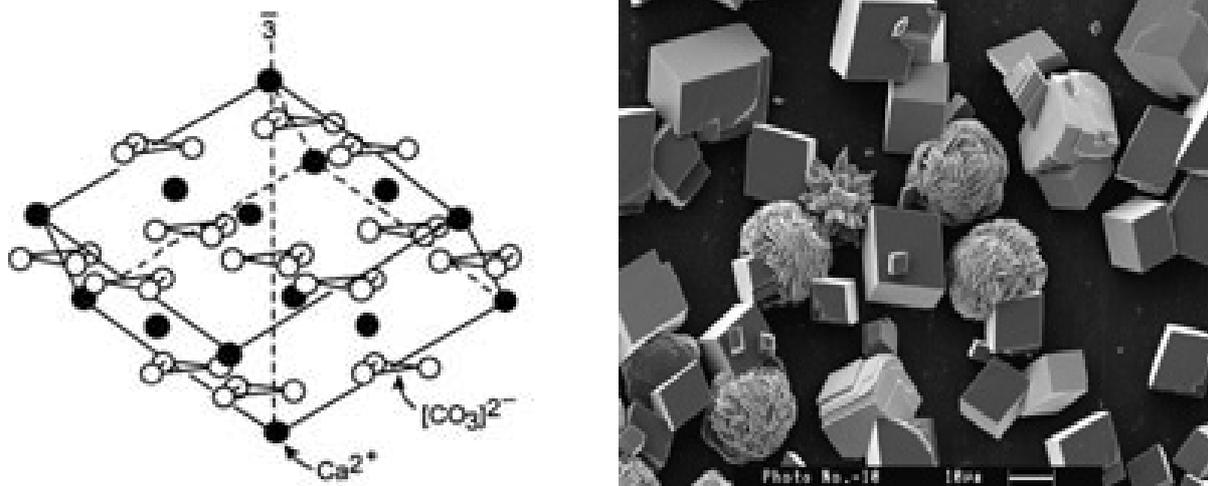


Bild 2.9 Aufbau und Form des Calcitkristalls – links schematisch, rechts in realer Form (Vergrößerung 10^5) [22]

2.3.2 Funktionsprinzipien der Inhibierung und Dispergierung als primäre Wirkungsweisen

Obwohl die nachfolgend erläuterten Effekte gängiger polymerer Konditionierungsmittel seit langem bekannt sind, liegen bis heute keine absolut genauen Erkenntnisse hinsichtlich der tatsächlich ablaufenden Mechanismen vor [41]. Die folgenden Erläuterungen stellen somit prinzipiell eine hypothetische chemisch-physikalische Deutung von beobachteten Versuchsergebnissen dar [41].

2.3.2.1 Inhibierung

Als primärer stabilisierender Effekt wird die sogenannte „Threshold-Inhibition“ oder auch Schwellen-Inhibition angesehen. Übersättigte Lösungen stellen ein thermodynamisch instabiles System dar, wobei das in Lösung gehaltene Salz versucht auszufallen und somit wieder ein energetisch niedrigeres Niveau zu erreichen. Zur Lösung zugegebene Inhibitoren sollen nun von den sich bildenden Keimen adsorbiert werden und somit die Oberflächenbeschaffenheit des Keims verändern. In Folge dieser strukturellen Manipulation erfährt das weitere Zusammenwachsen vorhandener Keime ein Hemmnis, und der Keim verharrt in seiner Ausdehnung mit hoher Wahrscheinlichkeit unterhalb des kritischen Radius. Die primär homogene Keimbildung wird somit eingeschränkt, und eine Ausfällung von Kristallen, trotz Übersättigung der Lösung, weitestgehend unterbunden [22].

Ein weiterer Effekt entsteht durch die mögliche Einlagerung von Molekülen des Konditionierungsmittels in eine bereits entstehende Kristallstruktur. Die sich so ergebende Inhomogenität des Kristalls wirkt sich sowohl auf seine Form als auch auf seine Festigkeit aus. Es kann so durch Modifikation der typischen Kristallstruktur theoretisch zu innerkristallinen Spannungen kommen, welche letztlich sogar ein Abplatzen eines Kristalls von einer Rohrwandung nach sich ziehen können [13]. Diese Veränderung der Kristall-Form unter Einfluss eines Konditionierungsmittels lässt sich optisch anhand von Bild 2.10 nachvollziehen:

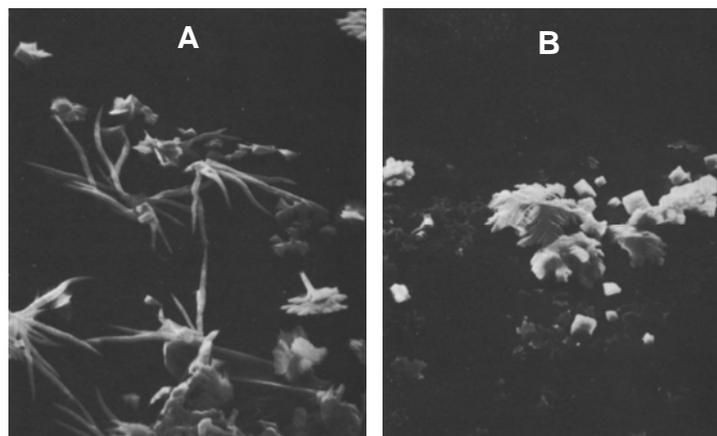


Bild 2.10 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von CaCO_3 -Kristallen, ohne (A) und mit (B) Zugabe eines Konditionierungsmittels [13]

Bild A zeigt unbehandelte Calciumcarbonatkristalle unter einer 1000-fachen Vergrößerung. Im Vergleich mit Bild B, einer Aufnahme von Kristallen unter Einfluss eines Konditionierungsmittels bei gleicher Vergrößerung, wird die veränderte Struktur der Kristalle ersichtlich.

Der große Vorteil dieser Konditionierungsmittel ist ihr substöchiometrischer Wirkungsbereich. Dies bedeutet im Prinzip, dass der Wirkstoff in so geringen Konzentrationen seine Wirkung entfaltet, dass diese unterhalb der Ermittlungsgrenzen chemischer Massenbilanzen stehen und der Wirkstoff somit keine „echten“ chemischen Bindungen bzw. Reaktionen mit dem dissoziierten Salz eingeht.

2.3.2.2 Dispergierung

Ein weiterer in der Literatur beschriebener Effekt gängiger Konditionierungsmittel ist die Dispergierung. Polymere können an der Oberfläche eines Feststoffs, z.B. eines gewachsenen Kristalls, adsorbiert werden. Handelt es sich hierbei nun beispielsweise um ein anionisches Polymer, so erhält der Kristall durch die Anionität eine negative Umhüllung. Betrachtet man zwei Kristalle, welche beide ein anionisches Polymer adsorbiert haben und somit beide eine negative Hülle besitzen, so werden sich diese auf Grund der wirkenden elektrostatischen Kräfte von einander abstoßen und sich nicht zu einem größeren Kristall verbinden. Bleibt das Molekulargewicht des verwendeten Polymers niedrig, so wird darüber hinaus auch eine Brückenbindung zwischen den Polymeren selbst verhindert [13].

2.3.2.3 Überlagerte Effekte

Die in der Regel in der wasserableitenden Industrie eingesetzten Wirkstoffe besitzen zu meist mehr als eine der beschriebenen Wirkungsweisen. In der Regel kommt es daher zu einer Überlagerung von härtestabilisierenden Einflüssen, so dass i.d.R. nicht nur zwischen dispergierenden oder inhibierenden Wirkstoffe unterschieden wird. Zumeist werden Wirkstoffe sogar entsprechend ihrer Nutzung konfektioniert und somit den speziellen Einsatzbedingungen im wasserableitenden System angepasst [13].

2.3.3 Zusammensetzung gängiger stabilisierender Wirkstoffe

Die ständig größer werdende Familie der Härtestabilisatoren und Dispergiermittel ist nur schwer zu überblicken, da ständig neue Produkte auf den Markt drängen bzw. anwendungsspezifisch entwickelt werden. Es lassen sich jedoch ein paar häufig wiederkehrende Strukturen und Bausteine lokalisieren, die allein oder in Kombination mit anderen für die stabilisierende Wirkung der Produkte verantwortlich sind. Im Folgenden wird eine Auswahl der wichtigsten Gruppen von Produkten der Industrie vorgestellt [41].

Kondensierte Phosphate

Zur Familie der kondensierten Phosphate zählen sowohl die Polyphosphate als auch Meta- und Ultraphosphate. Sie bilden gerade in Europa die Gruppe mit dem ehemals größten Marktanteil, vor allem durch ihr vornehmliches Einsatzgebiet, der Waschmittelproduktion.

Dies sind primär auslösender Faktor für den Vorgang der Eutrophierung (Überdüngung) von Gewässern, bei dem es durch den Einsatz der Phosphate zu unkontrolliertem Pflanzenwachstum und damit letztlich zum „Umkippen“ des Gewässers, der Hypertrophie kommen kann.

Phosphor-organische Verbindungen

Phosphor-organische Verbindungen besitzen eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen die Hydrolyse und gelten als biologisch gut abbaubar. Im weitesten Sinne versteht man in der Technik unter dieser Gruppe die Ester der Phosphorsäuren (Phosphite) und der Phosphonsäuren (Phosphonate). Sie werden bereits seit etlichen Jahren zur Stabilisierung eingesetzt und sind gemäß einiger Autoren auch in der Lage, bestehende harte Ablagerungen anzulösen [41]. Bis heute ist allerdings nicht genau geklärt, ob und wie sie ebenfalls zur Eutrophierung von Gewässern beitragen können.

Polycarbon- und Polysulfonsäuren

Die dritte wichtige Gruppe wird durch die Polycarbon- und Polysulfonsäuren gebildet, die Roques [41] kurz zu den „Polyanionen“ zusammenfasst. Zu ihnen gehören auch Wirkstoffe wie Polyasparaginsäure. Aufgrund der biologischen Abbaubarkeit vieler dieser Stoffe besteht bei Verwendung von Elementen dieser Gruppe oft ein nur minimales Risiko der Gewässerverschmutzung. Im Zuge der Durchführung diverser Studien [41] wurde ein Ersatz von phosphathaltigen Härtestabilisatoren bei Waschmitteln durch eben diese Wirkstoffe untersucht.

2.4 Härtestabilisatoren im Tunnelbau

2.4.1 Grundlegende Unterschiede zwischen industrieller und tunnelbautechnischer Nutzung von Härtestabilisatoren

Betrachtet man die Möglichkeit eines Einsatzes von Härtestabilisatoren im Tunnelbau, so fällt auf, dass grundlegende Unterschiede im Hinblick auf Randbedingungen und Verfahrenstechnik zwischen Industrie und Tunnelbau existieren. Diese Unterschiede lassen sich im Einzelnen wie folgt darstellen:

Hydrologische Randbedingungen

Wasserableitende Systeme der Industrie lassen sich grundlegend als geschlossene oder halboffene Systeme klassifizieren.

Geschlossen bedeutet hierbei, dass eine konstante Menge Wasser in einem abgeschlossenen System unter fest definierten Randbedingungen in einem Kreislauf zirkuliert. Theoretisch ist die Menge des im System befindlichen Wassers konstant, und die das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht beeinflussenden Randbedingungen, wie z.B. Temperatur, Druck und pH-Wert, sind fest definiert und deren Änderungen steuerbar. Ein zugegebener härtestabilisierender Wirkstoff unterliegt also im Vorfeld bekannten äußeren Einflüssen und kann

daher für die jeweiligen Bedingungen konkret konfektioniert werden. Wasser aus einem geschlossenen System wird nicht entnommen, es sei denn, es wird im Wartungsfalle komplett ausgetauscht. Daher ist auch die Menge des zu zugebenden Wirkstoffs klar definierbar. Das bei einem Austausch abgeschlagene Systemwasser wird gezielt abgeführt und kann so vor Weitergabe an eine Vorflut vollständig in eine Kläranlage übergeben werden. Daher können bei geschlossenen Systemen auch ökologisch bedenkliche Wirkstoffe, wie etwa Stoffe aus der Gruppe der kondensierten Phosphate, eingesetzt werden.

Halbgeschlossene Systeme unterscheiden sich von geschlossenen Systemen dadurch, dass es, entweder durch Kontakt mit der Umluft und daraus resultierender Konvektion von Wasserdampf oder durch gezielte Entnahme von Wasser, zu einem Verlust von gewissen Mengen Systemwassers kommt. Diese Verluste müssen zur Aufrechterhaltung der Funktion des Systems ausgeglichen werden, wobei die zuzugebende Menge an Wasser sich angesichts des bekannten Systemvolumens relativ leicht bilanzieren lässt. Für den Einsatz eines Härtestabilisators bedeutet dies im Unterschied zu geschlossenen Systemen, dass bei Zugabe der Ausgleichsmenge eine dementsprechende Menge neuen Stabilisators hinzugefügt werden muss, um die Wirkung des Härtestabilisators aufrecht zu erhalten. Ansonsten gleichen sich die beiden Systeme, da - ähnlich wie bei den geschlossenen Systemen - auch bei halbgeschlossenen Systemen das Systemwasser einer gezielten Klärung zugeführt werden kann und alle sonstigen Randbedingungen definiert und bekannt sind.

Ein Tunnel unterscheidet sich in dieser Hinsicht ganz erheblich von den Systemen der Industrie. Anhand hydrogeologischer Vorerkundungen lassen sich zwar die Menge und die Zusammensetzung des anstehenden Bergwassers entlang der Trasse grob abschätzen. Für das konkrete Bauwerk können im Vorfeld jedoch weder genau Zutrittsstellen von Bergwasser, noch dessen letztendlich zutretende Menge, noch dessen hydrochemische Randbedingungen und somit auch nicht dessen etwaige Neigung zur Ausfällung von CaCO_3 exakt ermittelt werden. Ebenfalls nicht vorhersehbar sind z.B. jahreszeitlich bedingte Schwankungsbreiten in den effektiv zur Dränage zutretenden Mengen des Bergwassers, die Entwicklung besonderer klimatischer Verhältnisse innerhalb der Dränage oder die Neigung der Sicherungsmaterialien zu Auslaugung von Härtebildnern. Ein weiterer deutlicher Unterschied zwischen Tunnel und Industrie liegt im Umstand begründet, dass Dränagen zumeist direkt an Vorfluter wie Bäche oder Flüsse abgeschlagen werden und daher nur ökologisch unbedenkliche Wirkstoffe zum Einsatz kommen dürfen.

Verfahrenstechnische Randbedingungen

Wasserkreisläufe der Industrie sind in Bezug auf Tunnelentwässerungssysteme als wartungstechnisch komfortabel und räumlich deutlich weniger beengt anzusehen. In Folge des Aufbaus eines Tunnelquerschnitts stehen für zusätzliche Einrichtungen, wie z.B. Dosiersysteme und Vorrattanks für Wirkstoffe, nur begrenzte räumliche Möglichkeiten zur Verfügung. Zudem sind Dränagesysteme bei Verkehrstunneln, dem allergrößten Teil an Tunnelbauwerken, in der Regel nur im Falle turnusmäßiger Revisionen zugänglich, da das Bauwerk im Wartungsfalle gesperrt und der jeweilige Verkehr umgeleitet werden muss. Während man im Falle eines industriellen Wasserkonditionierungssystems also direkt und ständig auf die Elemente der Konditionierung zugreifen kann, ist dies bei Tunnelbauwerken nur stark begrenzt bis gar nicht möglich. Als Schlussfolgerung aus diesen Erkenntnissen ergibt sich, dass Wasserkonditionierungssysteme für den Tunnelbau

- wartungsarm und weitestgehend störungsfrei
- flexibel auf Wassermengen und hydrochemische Randbedingungen einstellbar
- und ökologisch unbedenklich

sein müssen.

2.4.2 Härtestabilisierende Wirkstoffe für den Tunnelbau

Die unter 2.4.1 formulierten Grundsätze für in Tunnelbauwerken nutzbare Härtestabilisatoren und Härtestabilisationsverfahren sind erstmalig von M.C. Wegmüller durch ein Patent umgesetzt worden [54]. Die Idee ist durch Zugabe eines biologisch abbaubaren Stabilisators eine deutliche Reduzierung des Versinterungsaufkommens bei gleichzeitiger ökologischer Verträglichkeit realisieren zu können. Dies ist nach Auffassung Wegmüllers durch den Einsatz der Polyasparaginsäure (PASP) gelungen. Neben diesem im Prinzip natürlichen Wirkstoff, kommen noch zwei weitere Präparate zum Einsatz. Dies hängt mit dem Umstand zusammen, dass man für eine optimierte Verwendung des Härtestabilisators auch eine feste Aggregatsform benötigt, welche durch PASP nur unzureichend zur Verfügung gestellt werden kann. Ein flüssiger Wirkstoff ist nämlich nur bei konstantem Wasserfluss in der Drainage einsetzbar, da es ansonsten bei Trockenfallen der Entwässerungsleitung zu einer massiven Überkonditionierung des Wirkstoffs kommen kann. Daher gelangen derzeit neben der reinen PASP auch noch das Polysuccinimid (PSI) und das Polyacrylat zum Einsatz, welche sich einfach als Depotstein herstellen lassen.

2.4.2.1 Flüssiger Härtestabilisator - Polyasparaginsäure

Wirkungsweise

Hauptwirkstoff für den Tunnelbau ist die Polyasparaginsäure (PASP) ($[\text{C}_4\text{H}_4\text{NO}_3\text{Na}]_x$), welche in ihrer monomeren Form als nicht-essentielle Aminosäure bereits hinreichend bekannt und beschrieben ist. Die langkettigen Moleküle der PASP schieben sich, vereinfacht gesagt, zwischen die verschiedenen Kristallebenen und sorgen dafür, dass sich eher „schieferige“ Strukturen ausbilden als harte Kristalle. Auf diese Weise verändert sich nachhaltig die Struktur des Calcitkristalls, was erhebliche Auswirkungen auf seine physikalischen Eigenschaften hat. Insgesamt wirkt Polyasparaginsäure also vornehmlich als Inhibitor, wobei Wegmüller den genauen Stabilisierungsprozess wie folgt beschreibt [54]:

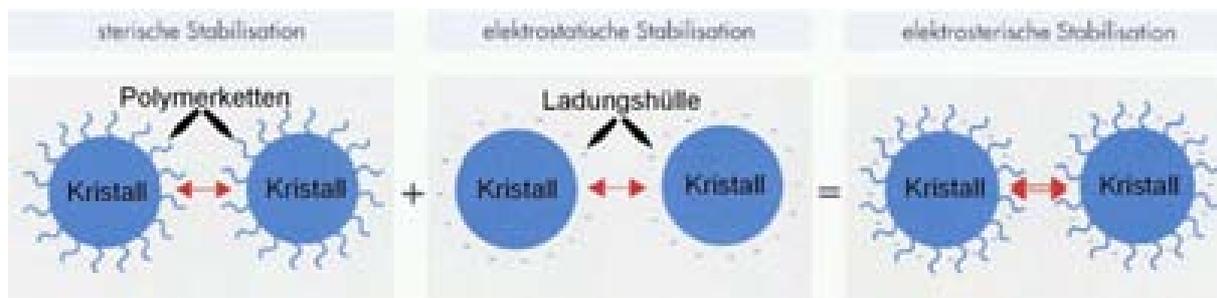


Bild 2.11 Schematische Darstellung der Stabilisierung bei Einsatz von Polyasparaginsäure nach [54]

Durch die Adsorption der langkettigen PASP-Moleküle an der Calcitkeimoberfläche setzt ein

inhibierender Mechanismus ein, den Wegmüller als „sterische Stabilisation“ bezeichnet (A). Parallel erzeugen die anionischen funktionellen Gruppen des Moleküls eine negative Ladungshülle um den Keim herum, so dass ebenfalls elektrostatische Abstoßungen zu anderen Keimen der Lösung zu beobachten sind - ein Prozess den Wegmüller als „elektrostatische Stabilisation“ beschreibt (B). Gemeinsam stellen beide Mechanismen die exakte Wirkungsweise der Polyasparaginsäure dar, die letztlich als „elektrosterische Stabilisation“ subsummiert wird (C).

PASP ist flüssig, ökologisch abbaubar und wird – gemäß der Verordnungen deutscher Wasserbehörden [54] - als „unbedenklich“ eingestuft. Es ist jedoch nicht möglich, PASP in eine als Depotstein effektiv nutzbare, feste Form zu transformieren. Für reines PASP lässt sich keine geeignete Trägersubstanz finden und die hierfür geeigneten Salze der PASP lösen sich in sprühgetrockneter Form zu rasch auf [25].

Verfahrenstechnik

Bei der Verwendung von PASP im Rahmen eines Tunnelbauwerks, wird das Polymer mit Hilfe einer Dosierpumpe oder eines Druckbehälters, über eine Verbindungsleitung in das Entwässerungssystem, bzw. den zu konditionierend Abschnitt eingebracht. Hierbei können, in Abhängigkeit von der Stärke der verwendeten Pumpe, im gängigen Fall etwa 40-50 m Distanz zwischen Ort der Installation und dem jeweiligen zu konditionierenden Abschnitt überbrückt werden [54].



Bild 2.12 Dosierpumpe mit Vorratstank im Einsatz [54]

Bei der Pumpe handelt es sich beispielsweise um ein aus der Medizintechnik stammendes Modell, welches zu diesem Zweck in leicht modifizierter Form verwendet wird (Bild 2.12). Die Pumpen benötigen eine konstante Netzspannung von 220 V - daher ist ein Einsatz von Dosierpumpen an das Vorhandensein ausreichender räumlicher Möglichkeiten mit Anschluss an die Stromversorgung beschränkt. Als verfahrenstechnische Eingrenzungen ergeben sich hieraus also:

- ⇒ ausreichend räumliche Möglichkeiten zur Aufstellung von Pumpe und Vorratstank, im näheren Umfeld zur Versinterung neigender Drainageanschnitte.
- ⇒ das Vorhandensein konstanter Netzspannung

Spezifische Einsatzgrenzen

Grenzen des Verfahrens lassen sich technisch hinsichtlich zweier Randbedingungen definieren:

- ⇒ der Menge des Wassers in der Dränage
- ⇒ des maximalen pH-Werts des Wassers

In Bezug auf die Wassermenge liefert der Hersteller eine Produktinformation (Bild 2.13). Hinsichtlich einer flüssigen Konditionierung sind hier Grenzwerte bezüglich der Wassermenge angegeben. Für Dosieranlagen lässt sich als günstige Einsatzgrenze ein $Q_{\min} \geq 10$ l/min ($\approx 0,17$ l/s) entnehmen.

Für den maximalen pH-Wert, bei dem eine Konditionierung noch verwertbare Erfolge liefern soll, wird eine obere funktionale Grenze von pH = 13 genannt.

Die in der Tabelle angegebenen Grenzwerte für Depotsteine beziehen sich im Übrigen lediglich auf solche aus Polyacrylat.

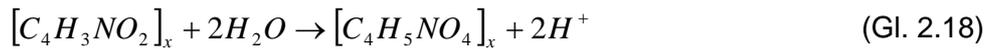
Produktepalette	Q = variabel Sickerleitungen Wasseranfall unregelmäßig	Q = 0,1–0 l/min z.B. Hängentwässerungs- anlagen und dgl.	Q = 2–10 l/min z.B. Staumattengolen und dgl.	Q = >10 l/min z.B. Bahn- und Straßentunnel Tunnelentwässerungen	
Depotsteine klein 1–2 g/Stück	+ + +	+ + +	+ +	+ +	insbesondere bei tiefen EWS
Depotsteine gross 0,5–2 kg/Stück	+ +			+ +	stehende Wassermengen z.B. Pumpenschicht
Druckbehälter klein, 0–5 l	+ + +	+ +			
Druckbehälter gross, 5–50 l		+ + +	+ + +	+ + +	
Dosierstationen auf Fässen montiert		+	+ + +	+	auch portabel
Dosieranlagen in GFR-Gehäusen			+	+ + +	Festinstallation in Räumen

Bild 2.13 Anwendungsgrenzen für Depotsteine aus Polyacrylat und flüssige PASP gemäß [54]

2.4.2.2 Fester Härtestabilisator – Polysuccinimid (PSI) und Polyacrylat

Wirkungsweise

Wie bereits zu Beginn dieses Abschnitts erläutert, werden in Folge verfahrenstechnischer Überlegungen zur Optimierung eines Stabilisatoreinsatzes auch solche in einem festen Aggregatzustand benötigt. Hierbei muss für den Bereich des Tunnelbaus zwischen zwei verschiedenen Produkten unterschieden werden. Während in der Schweiz ursprünglich das eigentlich aus der Industrie als Flockungsmittel bekannte Polyacrylat in Form kleinerer Depotsteine oder aber auch größerer Monolithen angeboten wurde, sind für den europäischen Markt mittlerweile einheitliche Depotsteine aus Polysuccinimid (PSI) ($[C_4H_3NO_2]_x$) erhältlich. Der Unterschied dieser beiden Produkte liegt darin, dass es sich beim Polysuccinimid um eine Vorstufe des Polyaspartats handelt, einem Salz der Polyasparaginsäure. Die eingangs geschilderte Problematik einer geeigneten Trägersubstanz bei Verwendung des PASP konnte so umgangen werden, da das PSI durch Reaktion mit Wasser selbst zum Polyaspartat reagiert:



Die hierbei stattfindende stufenweise Hydrolyse des PSI lässt sich wie folgt darstellen:

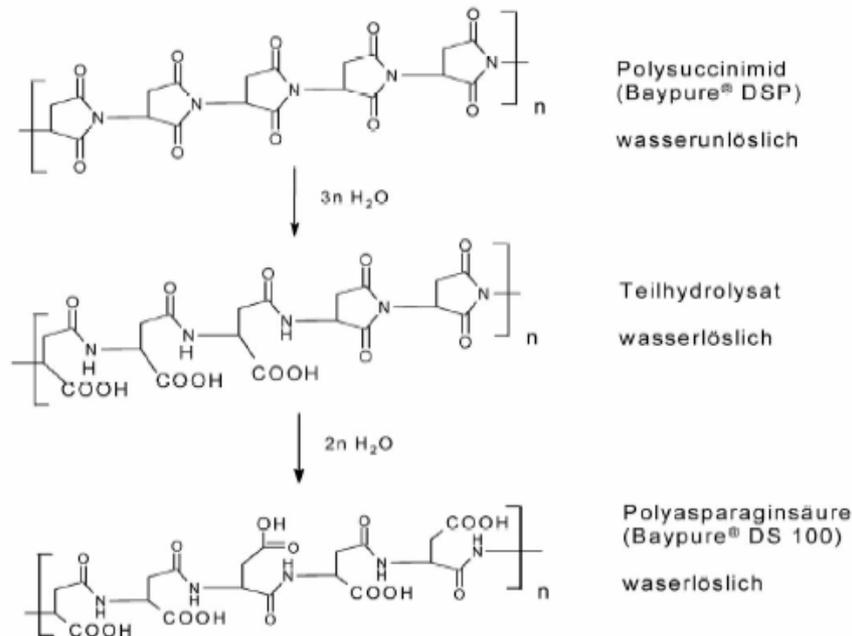


Bild 2.14 Stufenweise Hydrolyse des Polysuccinimids [25]

Alle Hydrolysate liegen in Abhängigkeit vom pH-Wert des umgebenden Wassers mehr oder weniger dissoziiert vor, wobei der Anteil intakter Succinimid-Einheiten im Polymer in Abhängigkeit von Temperatur und pH-Wert sukzessive abnimmt und letztlich nur noch Polysuccinimid vorliegt [25]. So wird durch Hydrolyse dem Dränagewasser der Härtestabilisator beigegeben, wobei die Menge des Stabilisators in Abhängigkeit von den zentralen hydrochemischen Parametern (pH-Wert, Temperatur, Wassermenge) differiert.

Da Polyacrylat in der Industrie vornehmlich als Flockungsmittel wirkt und im Prinzip nicht vollständig biologisch abbaubar ist, verringert sich der tunnelbauspezifische Marktanteil des Wirkstoffs sukzessive. Hinzu kommt der Umstand, dass Depotsteine aus Polyacrylat zu teilweise hohen Auflösungsgeschwindigkeiten und damit auch zu lokalen Überkonzentrationen des Wirkstoffs neigen [25]. Daher wird dieses Produkt im Laufe dieser Arbeit nur noch partiell betrachtet.

Verfahrenstechnik

PSI und Polyacrylat können gleichermaßen in eine Depotsteinform gebracht werden, so wie in Bild 2.15 dargestellt, und werden in der Regel als Sack mit einem Gewicht von 0,5 kg (PSI) bzw. 1,0 kg (Polyacrylat) zur Konditionierung angeboten.



Bild 2.15 Depotsteine Polyacrylat, Polysuccinimid

Die Depots werden im Entwässerungssystem ausgelegt, sind dort geeignet in ihrer Position zu fixieren und verbleiben dann theoretisch bis zur Auflösung der Steine oder einer Hal tungsspülung an ihrem Ort. Die vom Wasser der Drainage umströmten Depotsteine geben nun in Abhängigkeit von der Menge des Wassers, dessen Temperatur und seines pH-Wertes den härtestabilisierenden Wirkstoff an die Umgebung ab. Hieraus resultiert auch einer der Haupt-Vorteile gegenüber flüssigen Konditionierungsmitteln, da eine Überdosierung des Wirkstoffes bei Abnahme der Wassermenge der Theorie nach auszuschließen ist: Je weniger Wasser fließt, desto weniger Wirkstoff wird herausgelöst und im Dränagewasser verteilt. Dieser Zusammenhang wirkt sich, laut Hersteller und Vertreiber des Verfahrens, auch positiv auf eine eventuelle Foulingproblematik aus, denn die direkte Abhängigkeit der Wirkstoffkonzentration von pH-Wert und Menge des Wassers schließt eine Überkonditionierung und damit die Möglichkeit eines bakteriellen Angriffs auf den Stabilisator theoretisch aus.

Einziges, zunächst verfahrenstechnisch offensichtliches Problem dieser Variante einer Wasserkonditionierung liegt darin, dass die Depots im System ein Abflusshindernis darstellen. Bei solchen Abflusshindernissen kann es zu deutlichen Versinterungen direkt vor dem Hindernis kommen. Zur Vermeidung der Bildung harter Ablagerungen direkt vor einem Sack mit Depotsteinen wird daher vom Vertreiber die zusätzliche Verwendung eines mit Depotsteinen gefüllten „Netzschlauchs“ empfohlen (Bild 2.16).



Bild 2.16 Netzschläuche zur Verhinderung von Ablagerungen im Aufstaubereich vor Depotsteinsäcken

Diese Netzschläuche sollen eine ausreichende Menge an Wirkstoff an das Dränagewasser vor dem Sack abgeben und damit eine Spülfähigkeit dieser Ablagerungen gewährleisten.

Spezifische Einsatzgrenzen

Wie auch für die flüssigen Stabilisatoren geben Hersteller und Vertreiber der Produkte Grenzen für eine wirtschaftliche und sinnvolle Nutzung des Polyacrylats an. Eine genauere Eingrenzung kann Bild 2.13 entnommen werden.

Für das PSI existieren solche genauen Angaben derzeit nicht. Hier könnten lediglich die in Bild 2.13 genannten Angaben zu Grunde gelegt werden. Ebenso unbekannt sind derzeit noch genaue Standzeiten der Depotsteine, in Abhängigkeit vom pH-Wert des Wassers und der Wassermenge selbst sowie der Temperatur als ebenfalls wichtigem Einflussfaktor.

2.4.3 Mögliche Einsatzbereiche von Härtestabilisatoren im Rahmen von Tunnelentwässerungssystemen

Die wasserfassenden und -ableitenden Komponenten eines Dränagesystems sind im Einzelnen die Dränageröhre, die Trag- und Filterschichten, die Flächendrängen im Ringspalt und die Spritzbetonschale (Bild 2.17).

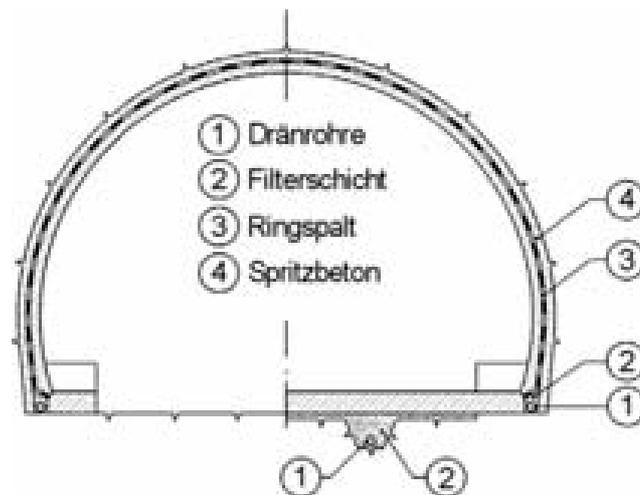


Bild 2.17 Wasserführende Komponenten eines dränierten Tunnelquerschnitts

Bei Annahme eines mängelfreien und für den Tunnelbau geeignet adaptierten Verfahrens lässt sich prinzipiell in jeder dieser Komponenten ein möglicher Einsatzbereich für Härtestabilisatoren sehen – außer Spritzbeton. Anhand der Empfehlung der ADRES-Expertengruppe für eine nachhaltige Konditionierung des Gotthard-Basistunnels [16], aber auch anhand der Aussagen von Wegmüller [55], können diese Einsatzbereiche konkretisiert werden. Letzterer empfiehlt einen Einsatz von Härtestabilisatoren innerhalb folgender Komponenten, jeweils in Abhängigkeit von der Aggregatsform des Wirkstoffs:

Flüssige Härtestabilisatoren:

- ⇒ im Ringspalt, über in der Firste eingebrachte Sprinkler
- ⇒ in den Dränageröhren, über Dosieranlagen an neuralgischen Punkten eingespeist

Feste Härtestabilisatoren:

- ⇒ in den Dränagerohren bzw. in den Revisionschächten der Haltungen
- ⇒ in der Filterschicht bzw. auf der Filterschicht

2.4.4 Regelwerke und Vorschriften im Aus- und Inland

2.4.4.1 Vorschriften in der Schweiz

In der Schweiz existiert derzeit noch keine Integration der Härtestabilisierung in den allgemein bindenden sia-Normen. Im Rahmen der Fortschreibung der sia-Norm 198/3 wird jedoch derzeit eine solche Integration vorbereitet. Bislang liegt hierzu der „Vernehmlassungsentwurf sia 198/3“ von 05/2002 vor, der noch keine Gültigkeit besitzt.

In Abschnitt 3.9.4.6 wird dabei folgendes formuliert:

„Zur Versinterungsverhinderung können dem Bergwasser Härtestabilisatoren in flüssiger Form zudosiert oder fester Form eingebaut werden.[...] Diese Härtestabilisatoren müssen zu den im Kontakt kommenden Baumaterialien verträglich sein und dürfen in den eingesetzten Konzentrationen nicht grundwassergefährdend sein.“

Es wird im Weiteren auf den Anhang D des Entwurfs verwiesen, wobei dort nur allgemeine Formulierungen zum Funktionsprinzip und der Verfahrenstechnik der Härtestabilisierung angeführt werden.

Bereits seit 1995 existiert in der Schweiz die „Technische Spezifikation“ W Bau GD 11/95 der SBB (Schweizer Bundesbahn) [44], in der Anforderungen an die Entwässerungsanlagen in neuen Eisenbahntunneln definiert sind. Neben allgemeinen Vorgaben hinsichtlich der Gestaltung und baulichen Durchbildung moderner Entwässerungssysteme umfasst die Spezifikation auch einige Angaben zu den baulichen Randbedingungen für den Einsatz einer Härtestabilisierung im Rahmen eines Tunnelentwässerungssystems. Hierbei handelt es sich weniger um eine Definition von hydrochemischen Randbedingungen, unter denen der Einsatz einer Härtestabilisierung sinnvoll erscheint, sondern vielmehr um bauliche Voraussetzungen, die künftig für ein solches Verfahren bei Neubauten vorzusehen sind. Im Anhang dieser Weisung werden diese Voraussetzungen spezifiziert, wobei allgemeine Zusammenhänge bei der Verwendung von flüssigen Härtestabilisatoren erörtert werden.

Nachfolgende Punkte grenzen einen Umgang mit der Härtestabilisierung während Bau- und Betriebsphase näher ein. Hierzu heißt es (Abschnitt 1.2 des Anhangs):

„Während der Bau- und Betriebsphase gelten die folgenden Anforderungen:

- *In die Sekundärentwässerung muss Konditionierungsmittel zugegeben werden, da das anfallende Wasser mit Kalziumverbindungen, welche aus dem Beton herausgelöst werden, belastet ist. Das anfallende Wasser ist laufend durch Spezialisten zu analysieren. Diese bestimmen aufgrund der Analyse das zu verwendende Konditionierungsmittel und die Dosierung.*

- Ablagerungen, die trotz der Wasserkonditionierung entstehen, müssen laufend vor dem Erhärten entfernt werden. Der Einsatz von schlagenden oder fräsenden Reinigungsgeräten in der definitiven Entwässerungsanlage ist untersagt, da dieser zu Schäden an den Rohrleitungen führen kann.

Während der Bauphase gelten zusätzlich folgende Anforderungen:

- Die provisorischen Installationsstandorte der Anlagen für die Wasserkonditionierung werden dem Vortrieb folgend in der Nähe der Sekundärentwässerungsschächte festgelegt. Als Vorratsbehälter sind Wechselcontainer zu verwenden (Anhang 1,A 1-6)
- Die provisorische Installation der Anlagen für die Wasserkonditionierung und der Verbrauch an Konditionierungsmittel über die Bauzeit sind in der Ausschreibung aufzunehmen.“

Anhang 1 liefert hierzu Abbildung A 1-6, die den Aufbau der Dosierungsanlage und deren Integration in den Tunnelquerschnitt schematisch darstellt (Bild 2.18).

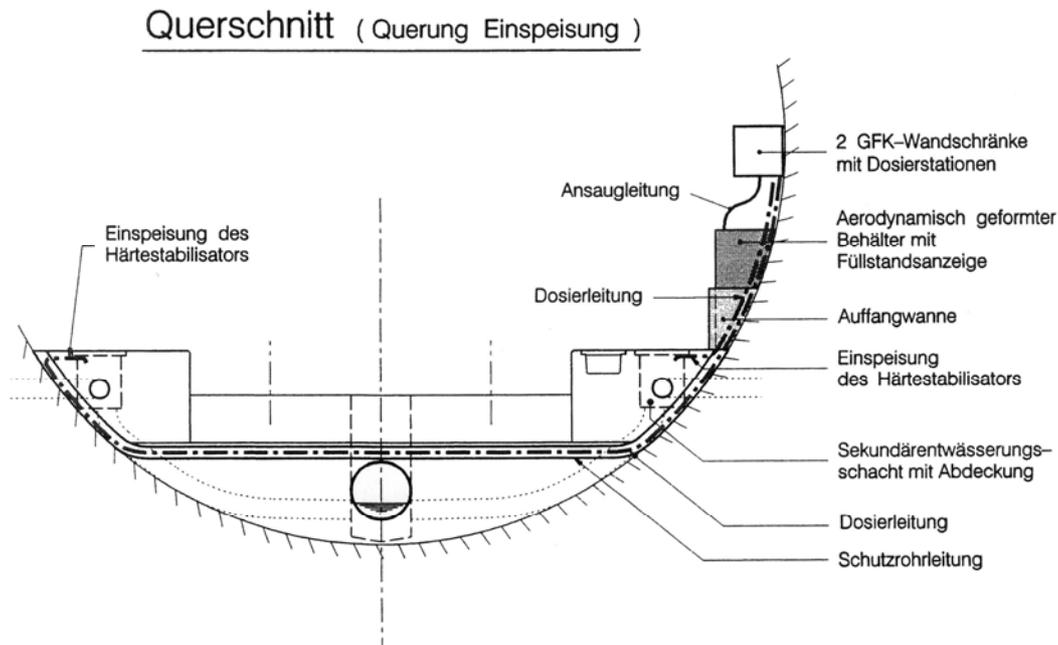


Bild 2.18 Schematische Darstellung der Dosierstation mit Vorratsbehälter und Einspeisung [44]

Der hierfür nötige Raumbedarf wird auf Grund standardisierter Dosierstationen zu 50cmx50cmx50cm festgelegt, wobei dies noch nicht den zusätzlich nötigen Vorratsbehälter umfasst, der ebenfalls noch in den Querschnitt zu integrieren ist.

Feste Härtestabilisatoren werden in der Weisung nicht angeführt und sind dementsprechend nicht vorgesehen.

Weitere Vorgaben lassen sich in Form allgemeiner und projektbezogener Empfehlungen für den Einsatz von Härtestabilisatoren, wie z.B. die ADRES-Dokumente (Expertengruppe „Abdichtungs-, Drainage- und Entwässerungssysteme) der Alp-Transit-Strecke finden [16]. Diese sind jedoch als Empfehlungen formuliert und daher als nicht bindend zu sehen. Deßhalb werden sie an dieser Stelle nicht weiter kommentiert.

2.4.4.2 Vorschriften in Österreich

Die Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik liefert mit der Richtlinie „Ausbildung von Tunnelentwässerungen“ (06/2003) eine dezidierte Vorgabe zur Erstellung wartungsarmer Entwässerungssysteme [38]. Hier wird Härtestabilisierung als eine ergänzende Möglichkeit zur Verringerung starker Sinterbildung angeführt. Es wird unterschieden zwischen Systemen innerhalb der Bauzeit und Systemen im Rahmen des Nutzungszeitraums des Tunnels.

Während der Bauphase ist eine Härtestabilisierung unter folgenden Vorgaben vorgesehen:

„Die Härtestabilisierung der anfallenden Bergwässer und der damit verbundenen weitergehenden Verhinderung von Versinterungen wird in erster Linie für die dauerhafte Wasserabführung installiert. Bei längeren Bauzeiten bzw. bei längeren Zeiten zwischen Dränageeinbau und Bauwerksübergabe und bei hohen Versinterungsgefährdungen können sich diese Härtestabilisierungsmaßnahmen als zusätzliche Maßnahme gemäß Pkt. 7.5 auch schon während der Bauzeit gegenüber aufwendigen Reinigungsmaßnahmen als kostengünstiger darstellen.“

Bei dem in diesem Abschnitt angeführtem Punkt 7.5 handelt es sich um die Vorgaben der Richtlinie hinsichtlich eines permanenten Einsatzes der Härtestabilisierung im Rahmen der Betriebsphase des Tunnels. Dieser enthält folgende Vorgaben.

„Ergibt die Vorerkundung für den Tunnelbau besonders ungünstige Bedingungen für die zu erwartende Mineralfracht des Bergwassers, so dass mit einer hohen Neigung zu Versinterungen zu rechnen ist, sollten folgende Stabilisierungsmaßnahmen zusätzlich gesetzt werden:

- *Die Platzierung von Stabilisierungssteinen mit Auflösezeit von bis zu 2 Jahren, bevorzugt bereits in der Sickerpackung oder Rohrleitung, um die anfänglich stärkere Versinterungsneigung abzuschwächen.*
- *Der Bau von Stabilisierungsanlagen mit Vorratstank, Dosieranlage und Dosierleitung an kritischen Stellen der Dränagen. Die dabei verwendeten Härtestabilisatoren werden in geringen Mengen zugegeben und müssen biologisch abbaubar sein. Die Projektierung und Überwachung der Maßnahme hat durch fachkundige Chemiker in Übereinstimmung mit Umweltschutzbelangen zu erfolgen“*

Weitere Vorgaben, vor allem hinsichtlich etwaiger Nutzungsgrenzen oder Vorgaben bezüglich der Mineralfracht des Bergwassers, welche als Automatismus die Nutzung der Härtestabilisierung auslöst, existieren nicht. Es existieren ebenfalls keine konstruktiven Vorgaben hinsichtlich der Integration der Dosieranlagen in den Querschnitt des Bauwerks, wie aus den Vorschriften der Schweiz bereits bekannt.

2.4.4.3 Vorschriften in Deutschland

In Deutschland existieren derzeit keine Vorgaben zum Einsatz von Härtestabilisatoren, weder in Form von Richtlinien noch Vorschriften. Dies gilt sowohl für den Bereich der Bahn wie

auch der Straße.

Durch die DB AG wurde allerdings bereits im Jahre 2000 im Rahmen eines Schreibens an alle Betriebsstandorte ein Einsatz der Härtestabilisierung im Rahmen der durch RIL 853.0022, Anhang1, definierten Wartungsstrategie für Bahntunnel empfohlen. Grund für diese Empfehlung ist der laut diesem Rundschreiben deutlich geringere Reinigungsaufwand bei Verwendung von Härtestabilisatoren in Zusammenhang mit Hochdruckspülverfahren. Dieser lässt sich nach Aussage der Verfasser zu 10m/min (mit Härtestabilisatoren) im Vergleich zu 1,5 – 3 m/min beziffern. Daher ergeht als Empfehlung:

„Vor diesem Hintergrund bitten wir bevorzugt und verstärkt die Wasserbehandlung mit Konditionierungsmitteln einzusetzen und die Spülintervalle auf entstehende weiche Ablagerungen (Schlamm) anzupassen.“

Das BMVBW, als für die Straßentunnel in Deutschland zuständige Behörde, äußerte sich bislang nur im März 2003 in Form eines Rundschreibens an die Mitglieder des Bund/Länder-Hauptausschusses für Brücken- und Ingenieurbau zum Thema der Härtestabilisatoren. Hierbei wird auf die Ergebnisse eines Forschungsvorhabens der Ruhr-Universität Bochum verwiesen, auf deren Grundlage eine Verwendung von Härtestabilisatoren für Straßentunnel bis auf weiteres generell nicht empfohlen wird.

2.4.5 Bisherige Erkenntnisse zur Funktionalität und Effektivität von Härtestabilisatoren anhand von Versuchen an bestehenden Bauwerken

Härtestabilisatoren wurden bereits in der Schweiz, in Österreich und in Deutschland an einigen Bauwerken eingesetzt. Hierbei kamen Härtestabilisatoren jedoch fast ausschließlich in den Revisionsschächten von Entwässerungssystemen zum Einsatz. Untersuchungen zum Einsatz flüssiger Stabilisatoren im Ringspalt existieren bislang nicht. Untersuchungen zum Einsatz von festen Härtestabilisatoren im Rahmen von Filterschichten wurden bislang am Teststollen „Mitholz“ des Lötschbergbasistunnels und am Unterwäldertunnel vorgenommen. Verwertbare und übertragbare Ergebnisse zur Funktionalität einer solchen Härtestabilisierung konnten entweder nicht mit Aussagekraft für andere Projekte und Bauwerke erzielt werden (Teststollen „Mitholz“ [48]) oder liegen in konkreter Form nicht vor (Unterwälder Tunnel).

Anhand der Erfahrungsberichte von Einsätzen in den Revisionsschächten von Entwässerungssystemen, diversen diesbezüglichen Schriftstücken und themen- bzw. projektspezifischen Veröffentlichungen lassen sich Erkenntnisse zur Funktionalität und Einsatzgrenzen der Härtestabilisatoren ermitteln. Diese Erkenntnisse stehen jedoch inhaltlich teilweise im Gegensatz zu dem in diesem Kapitel bislang dargestellten Grundlagenwissen. Exemplarisch ist dies im Folgenden anhand einer jüngeren Veröffentlichung zu dieser Thematik dargestellt [7]. Im Zuge nachfolgender Tabelle werden dabei einige Aussagen besagter Veröffentlichung den bisherigen Erkenntnissen zu der jeweils gleichen Thematik gegenübergestellt.

Tabelle 2.1: Beispielhafte Gegenüberstellung widersprüchlicher Erkenntnissen zu Härtestabilisatoren

„Härtestabilisation von Bergwässern – Ein präventiver Baustein in der Instandhaltung von Bauwerksdränagen“ [7]	Bisherige Aussagen und Erkenntnisse
Funktionalität	
<p>„Je nach Wasserführung und Strömungsgeschwindigkeit wird die Bildung von Versinterungen in diesem Bereich unterbunden oder die Bildung von Hartablagerungen verhindert, so dass der Wartungsaufwand in jedem Fall reduziert werden kann“</p>	<p>„Schon kleinste Mengen des Wirkstoffs reichen aus, die Ablagerungsbildung zu verhindern.“ [18]. oder „Mit der Härtestabilisierung steht eine Methode zur Verfügung, Entwässerungssysteme des Straßen-, Bahn-, Tief- und Tunnelbaus dauerhaft vor Versinterungen zu schützen.“ [18]</p>
<p>„Eine Veränderung der Wassergüte ist allgemein nur in einer Erhöhung der Wasserhärte festzustellen, da die Calciumlöslichkeit durch den Einsatz der Inhibitoren erhöht wird, während der pH-Wert praktisch unverändert bleibt.“</p>	<p>„Generell konnte bei allen Messpunkten nach der ersten Inspektion im August ein Absinken der pH-Werte um einen Punkt festgestellt werden. Mit Blick auf das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht kann dies auf die Verwendung des Konditionierungsmittels Dekalin Stab TS (Anmerkung des Autors: Wirkstoff dieses Mittels ist PASP) zurückgeführt werden [...]“ [51]</p>
Standzeit	
<p>„Es gibt jedoch derzeit keine abgesicherten Erkenntnisse, über welchen Zeitraum die Härtestabilisierung im Primärsystem wirksam bleibt [...]“</p>	<p>„Eine durchschnittliche Lebensdauer von 4 bis 5 Jahren scheint vernünftig, denn in dieser Zeitperiode ist die Versinterungsbildung [...] am stärksten.“ [55]</p>
Ökologische Verträglichkeit	
<p>„Eine hohe biologische Aktivität des Bergwassers kann in Einzelfällen zu einem unerwünschten Befall der Härtestabilisatoren durch Hefen und Pilze führen, wodurch die Wirkstoffabgabe reduziert und der Stabilisatorverbrauch erhöht werden kann. Bisher ist allerdings lediglich erst ein Fall bekannt in dem [...] biologische Stoffwechselprozesse sogar zu einer erhöhten Karbonatabscheidung führten.“</p>	<p>„Vielmehr ist die PASP—aggressive Mikrobiologie nach unserer Kenntnis an die sauren pH-Milieus im Einleitbereich [des Stabilisators] gebunden und in dem bereits nach wenigen Metern wieder alkalische Dränagewasser nicht signifikant vermehrungsfähig. [...] Ein Auftreten von Weichablagerungen liegt dabei durchaus im Bereich des Möglichen, nicht aber eine (chemisch nicht mögliche) vermehrte Kalkausfällung.“ [37]</p>

2.4.6 Zusammenfassung des Grundlagenwissens und der Erkenntnisse aus Erfahrungsberichten von ausgeführten Projekten

Nimmt man die bezüglich der Effektivität des Verfahrens positiven Ergebnisse der verschiedenen Bauwerke hinzu, so lässt sich anhand dieser Erkenntnisse ein Gesamtbild entwerfen, das sich wie folgt stichpunktartig zusammensetzen lässt:

- Für Einsätze von Härtestabilisatoren im Ringspalt und in der Filterschicht wurde bislang nicht untersucht, ob Verfahrenstechnik und Wirkungsweise den Randbedingungen eines Tunnelbauwerks genügen.
- Für Einsätze von Härtestabilisatoren (fest und flüssig) in den Revisionschächten des Entwässerungssystems eines Tunnelbauwerks liegen Erfahrungsberichte vor, die ein zum Teil sehr positives Bild der Effektivität des Verfahrens hinsichtlich der Verminderung der Ablagerungsbildung skizzieren.
- Bezogen auf einen Einsatz in Revisionschächten besteht zwischen den theoretischen Grundsätzen zu Chemismus des Verfahrens, Einsatzgrenzen, Effektivität etc. und den an ausgeführten Projekten gemachten Beobachtungen teilweise ein Unterschied.
- Den Nachweisen der Funktionalität des Verfahrens liegt dabei zumeist eine Untersuchungs- und Nachweismethodik zu Grunde, die allerdings im Rahmen der Untersuchungsberichte nicht beschrieben oder formalisiert dargestellt wird, sondern als Methode nur konkret zur Anwendung gelangt.
- Diese ist jedoch bezüglich ihrer Eignung genauer zu untersuchen, da - oberflächlich betrachtet - typische Randbedingungen von Bergwasserdränagen, die einen konkreten Einfluss auf die Versinterungsentstehung haben, systematisch ausgeblendet werden.
- Es liegen nur widersprüchliche Daten zu Standzeiten von Depotsteinen vor.
- Einflussgrößen auf die Standzeiten werden zwar qualitativ (pH-Wert, Temperatur, Wassermenge), aber nicht quantitativ (Stärke des Einflusses der Einzelgröße) genannt.
- Der Nachweis der ökologischen Verträglichkeit ist zwar erfolgt, aber das Zusammenspiel mit einer aktiven Mikrobiologie bleibt nur vage beleuchtet.

2.5 Beurteilung und Wertung des bisherigen Kenntnisstandes

Auf Grundlage des dargestellten Wissens um die Chemie des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts, der Wirkungsweise von Härtestabilisatoren und ihres Einsatzspektrums in der Industrie lässt sich hypothetisch ein messbarer Einfluss des Verfahrens auf die aus Versinterungen entstehenden Wartungskosten dräniert Tunnelbauwerke erwarten. Diese werden durch vorliegende Erfahrungsberichte zum Teil auch widerspiegelt.

Ob Härtestabilisatoren allerdings wirklich effektiv zu einer Reduzierung des versinterungsbedingten Wartungsaufwandes beitragen können, lässt sich bislang nicht stichhaltig unter Beweis stellen. Faktisch existieren Widersprüche zwischen Erfahrungsberichten von Einsätzen des Verfahrens und dem Grundlagenwissen.

Sofern die bei den vorliegenden Untersuchungen angewandte Methodik zum Nachweis der Funktionalität des Verfahrens idealisiert aus der Industrie übernommen worden ist, müssen diese so gewinnbaren Erkenntnisse kritisch hinterfragt werden.

In diesem Sinne ist auch die derzeitige Vorschriftenlage als unzureichend anzusehen, da

durch geltendes Regelwerk im Moment keine Nutzungseinschränkungen in Folge bestimmter Randbedingungen vorgegeben werden.

Es fehlten also bislang:

- verbindliche Erkenntnisse über die Funktionalität von Härtestabilisatoren in Tunnelentwässerungssystemen, die durch eindeutige Versuchsergebnisse an ausgeführten Tunnelprojekten abgesichert sind.
- Untersuchungen, die offene Fragen der Verfahrenstechnik (Standzeiten, Effektivität unter verschiedenen hydrochemischen Bedingungen, Ökologie des Verfahrens) und zu möglichen Einsatzbereichen (Ringspalt, Filterschicht) beantworten.
- gegebenenfalls eine auf den Tunnelbau angepasste Nachweismethodik, die eindeutige Ergebnisse gewährleistet.
- konkrete Einsatzkriterien für Härtestabilisierungen an Tunnelbauwerken, die entweder als quantitative Vorgaben oder qualitative Methoden formuliert sind.

Als quantitative Vorgaben sind in diesem Zusammenhang z.B. konkrete Einsatzgrenzen im Bezug auf pH-Werte oder Durchflussmengen des Bergwassers zu verstehen. Qualitative Methoden hingegen sind als Untersuchungskonzepte zu begreifen, die bei bauwerksspezifischer Anwendung eine verbindliche Aussage hinsichtlich der Verwendbarkeit von Härtestabilisatoren liefern.

Im weiteren Verlauf ist daher zunächst die bislang verwendete Nachweismethodik anhand vorliegender Erfahrungsberichte genauer zu analysieren und darzustellen. Diese ist anhand von allgemeinen Überlegungen zu den Versinterungsmechanismen bei Tunnelbauwerken und hydrochemischen Eigenheiten von Bergwasserdränagen zu überprüfen. Mit Hilfe der so gewonnenen Erkenntnisse muss die Aussagekraft der Berichte gegebenenfalls neu bewertet werden. Durch ergänzende Untersuchungen sind zusätzlich die vorhandenen Wissenslücken zu schließen.

3 Bei bisherigen Einsätzen von Härtestabilisatoren angewandte Nachweismethodik

3.1 Allgemeines

Im Rahmen bisheriger Einsätze von Härtestabilisatoren in Tunneldränagesystemen wurde und wird ein relativ identischer Umfang an Methoden zum Nachweis der Funktionalität verwendet. [50][51]. Diese lassen sich in rein phänomenologische und in analytische Untersuchungen unterscheiden und führen gemeinsam zu kausalen Schlussfolgerungen hinsichtlich der Funktionalität von Härtestabilisatoren.

Aus diesen Schlussfolgerungen und dem gesammelten Datenmaterial können innerhalb eines begrenzten Rahmens Erkenntnisse über sinnvolle Einsatzgrenzen und Verwendungsvorgaben für das Verfahren hergeleitet werden. Begrenzt ist dieser Rahmen einerseits durch die Tatsache, dass bisherige Untersuchungen gewisse Einsatzbereiche des Verfahrens, wie z.B. einen Einsatz in Filterschichten, ausklammern. Andererseits ist unklar, ob die angewandte Methodik und die kausale Nachweisführung den Randbedingungen einer Tunneldränage genügen.

Zusätzlich wurde bei den betrachteten Untersuchungen ein etwaiger Rückgang der Kosten für Wartung und Revision durch Verwendung von Härtestabilisatoren ermittelt. Hierzu wurde der jeweils ursprünglich notwendige Umfang an Aufwendungen mit einem modifizierten Umfang verglichen. Dieser modifizierte Umfang wurde anhand von möglichen Optimierungen des Wartungsaufwandes durch Härtestabilisatoreinsatz ermittelt. Im Prinzip konnte somit eine Kosteneinsparung durch modifizierte Wartungskonzepte errechnet und diese Einsparung den funktionalen Härtestabilisatoren zugeschrieben werden. Damit dieser Kausalzusammenhang hergestellt werden kann, ist zunächst jedoch der Nachweis eines funktionalen Härtestabilisators zu führen. Ansonsten können äußere Einflüsse für den Versinterungsrückgang, wie z.B. Veränderung der hydrochemischen Randbedingungen durch Rückgang der Belastung aus Elution, nicht ausgeschlossen werden. Oftmals kann schon eine reine Optimierung von Revisionszyklen, so wie sie zumeist mit dem Einsatz eines Härtestabilisators einhergeht, zu einer spürbaren Einsparung von Wartungskosten führen [1][7][34]. In diesem Sinne wird im Folgenden auf die Nachweisführung des Funktionalitätsnachweises als Grundlage der kausalen Schlussfolgerung fokussiert. Kann dieser nicht eindeutig geführt werden, so sind daraus abgeleitete Schlussfolgerungen in Zweifel zu ziehen.

3.2 Darstellung bisheriger Nachweismethodik

3.2.1 Phänomenologische Datenerfassungen

Unter phänomenologischen Untersuchungsmethoden werden allgemein Methoden subsumiert, die als Ergebnis eine Zustandbeschreibung des jeweils untersuchten Objekts über den Untersuchungszeitraum hinweg liefern. Auf diese Weise lassen sich optisch erfassbare Zustandsänderungen des untersuchten Systems aufnehmen. Durch die nachgestellte analytische Detektion geänderter Randbedingungen oder optisch nicht erfassbarer Zustandsänderungen können dann funktionale Zusammenhänge zwischen geänderten Randbedingungen des Systems und phänomenologisch wahrnehmbaren Veränderungen hergestellt und empirisch abgesichert werden.

Im Rahmen der Untersuchungen zum Nachweis der Funktionalität von Härtestabilisatoren in Tunneldränagen wurden phänomenologische Untersuchungen bislang vornehmlich an den Revisionsschächten des Entwässerungssystems vorgenommen [50][51]. Hierbei wurden vor allem das Erscheinungsbild der Revisionsschächte dokumentiert, etwaige Ablagerungen nach Mächtigkeit und Gestalt charakterisiert und zusätzlich die hydrochemischen Leitparameter für die nachgestellte Analytik erfasst. Im Einzelnen wurden zumeist folgende Daten aufgenommen:

- Strömungsbild
- Höhe des Wasserstandes im Revisionsschacht
- eventuell Strömungsgeschwindigkeit bzw. Durchflussmenge
- Ablagerungshöhe
- Ablagerungshärte und –gestalt

Neben diesen Datenerfassungen wurden zudem von einigen Schächten Fotografien erstellt, die eine wahrnehmbare Veränderung des Schachtbildes dokumentieren sollen.

3.2.2 Analytische Datenerfassungen

Als Analyse bezeichnet man allgemein die Bestimmung der Zusammensetzung eines Stoffs oder Gemisches, hinsichtlich der Art (*qualitative Analyse*) oder der Menge (*quantitative Analyse*) seiner Bestandteile, durch chemische oder physikalische Methoden. Im Sinne dieser Definition ergeben sich für einen Nachweis der Effektivität von Härtestabilisatoren einige Ansatzpunkte für quantitative Analysen mit Aussagekraft.

Gemäß der Grundlagen zur Hydrochemie des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts stellt sich in Abhängigkeit von pH-Wert, Temperatur, Umgebungsdruck und der ionischen Zusammensetzung des Dränagewassers ein Gleichgewichtszustand ein. Wird eine dieser Komponenten in einem für chemische Massenbilanzen relevanten Umfang verändert, so ändert sich auch die Menge des im Bergwasser löslichen Carbonats.

Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass bei einer messbaren Zunahme des im Bergwasser gelösten Calcium- und Magnesiumcarbonats sich entweder eine dieser Komponenten in einem massenbilanziell spürbaren Umfang geändert haben muss oder ein weiterer äußerer Effekt Einfluss nimmt.

Auf einem ganz ähnlichen kausalen Schluss fußt die bisherige Nachweisführung der Funktionalität von Härtestabilisatoren. Die zu Grunde liegende logische Verknüpfung lässt sich vereinfacht wie folgt darstellen: Sofern bei gleich bleibender Temperatur und konstantem pH-Wert des Bergwassers die Menge an mitgeführten Härtebildnern zunimmt - eine konstante Wasserführung vorausgesetzt - so muss diese Zunahme auf die parallele Wirkstoffzugabe des Härtestabilisators zurückzuführen sein [7][50][51].

Im Sinne dieser Nachweisführung bedarf es einiger analytischer Datenerfassungen, wobei die vier nachfolgend dargestellten Beobachtungen im Vordergrund stehen. Diese erfassen Veränderungen des hydrochemischen Bildes der versinterungsrelevanten Leitparameter über den laufenden Versuch hinweg:

- a) Ermittlung und Darstellung der Entwicklung des pH-Werts des Dränagewassers
- b) Ermittlung und Darstellungen der Temperatur des Dränagewassers
- c) Ermittlung der im Dränagewasser mitgeführten Wirkstoffkonzentration des gelösten Härtestabilisators
- d) Ermittlung der Menge an im Bergwasser mitgeführten Calcium- und Magnesiumionen und ihrer mengenmäßigen Entwicklung über den Versuchszeitraum sowie deren Darstellung entweder als „Härtegrad“ des Dränagewassers oder als reine Konzentration in mg/l

Diese Beobachtungen lassen sich entweder im Rahmen von Vorortuntersuchungen (a und b) mit geeigneten mobilen Gerätschaften erfassen oder müssen durch chemische Laboranalytik (c und d) ermittelt werden.

Wie den Grundlagen zu entnehmen, liegt der wichtigste hydrochemische Wirkungszusammenhang auf der relativen Entwicklung des pH-Werts des Dränagewassers und seinem Härtegrad, bzw. der Konzentration von Calcium- und Magnesiumionen. Vereinfacht kann dabei die Magnesiumionenkonzentration vernachlässigt werden, da diese nur einen geringen Anteil an der Gesamtkonzentration von Härtebildnern bei Bergwässern einnimmt (rund 5%).

3.2.3 Auswertungsschema und Nachweismethodik

3.2.3.1 Formalisierte Darstellung des bisherigen Auswertungs- und Analyseschemas

Analysiert man die bereits in 3.2.2 angedeutete Nachweisführung der bislang existierenden Erfahrungsberichte, so lässt sich ein Auswertungsschema für die Nachweise der Funktionalität des Verfahrens ermitteln und wie folgt formalisiert darstellen:

- Schritt 1: Darstellung der über den Messzeitraum am Dränagesystem erfassten Messwerte und der phänomenologisch erfassten Daten.
- Schritt 2: Vergleich der revisionsschachtspezifischen pH-Werte im Untersuchungszeitraum und Überprüfung einer relativen Konstanz der Werte
- Schritt 3: Im Falle relativ konstanter pH-Werte Untersuchung der allgemeinen Entwicklung der Ablagerungen von Carbonaten in den Revisionsschächten und Überprüfung hinsichtlich eines Rückgangs der Ablagerungsneubildung.
- Schritt 4: Im Falle eines Rückgangs der Ablagerungen (Schritt 3) und relativ konstanter pH-Werte (Schritt 2) Überprüfung der Entwicklung der Ionenkonzentration der Härtebildner. Ein Zunahme der Calciumionen weist hierbei vereinfacht auf eine funktionierende Härtestabilisierung hin.

Diese Nachweisführung lässt sich übersichtlich und verständlich in Form eines Flussdiagramms darstellen, welches den Versuchsablauf und die kausale Schlussfolgerung vergegenwärtigt (Diagramm 3.1).

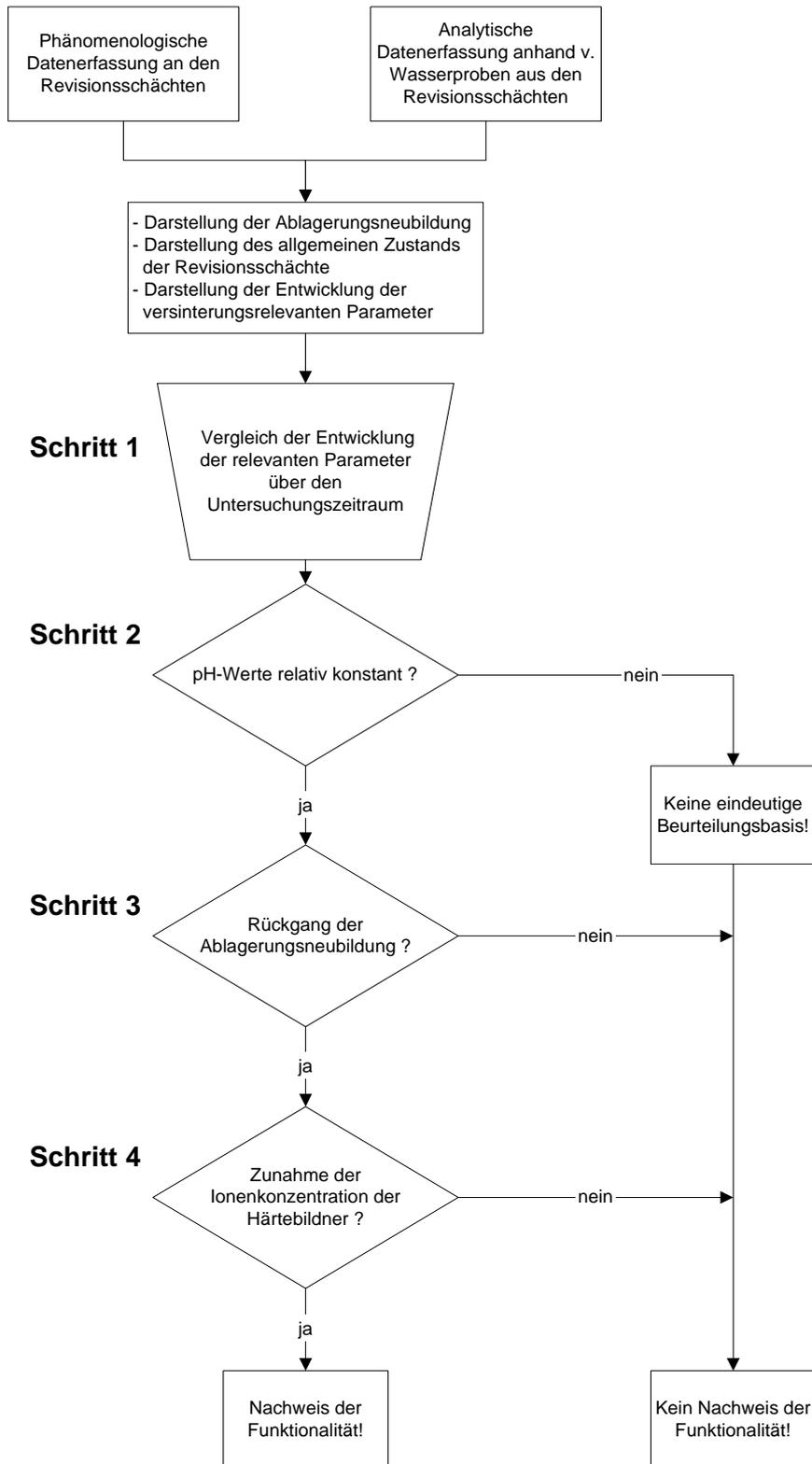


Diagramm 3.1: Formalisierte Darstellung der bisherigen Nachweismethodik zur Effektivität von Härtestabilisierungen, ermittelt anhand bisheriger Erfahrungsberichte

Als Charakteristikum für einen funktionierenden Härtestabilisator wird also eine Zunahme der Ionen der Härtebildner bei gleichzeitig konstanten, hydrochemischen Leitparametern des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts postuliert.

Parallel wird die beobachtbare Wirkstoffkonzentration protokolliert. Aufgrund des substöchiometrischen Wirkungsbereichs des PASP, liegt das Augenmerk hierbei nicht auf funktionalen Zusammenhängen zwischen Wirkstoffkonzentration und Entwicklung der Hydrochemie sondern lediglich auf der Einhaltung der behördlichen Grenzwerte für maximale Wirkstoffkonzentration bei Einleitung in eine Vorflut.

3.2.3.2 Darstellung der formalisierten Nachweis- und Auswertungsmethodik anhand eines konkreten Erfahrungsberichts

Das geschilderte Nachweisprozedere lässt sich anhand der vorliegenden Erfahrungsberichte am konkreten Beispiel nachvollziehen. Exemplarisch werden hierzu die am Schemmelsbergtunnel durchgeführten Untersuchungen betrachtet [50].

Im Zuge der Untersuchungen wurde entlang einer Teststrecke in der linken Ulme der Weströhre des Tunnels der Einsatz einer Härtestabilisierung phänomenologisch und analytisch dokumentiert und hinsichtlich der Funktionalität des Verfahrens ausgewertet.

Dem Bericht zu Folge waren im gesamten Versuchszeitraum relativ konstante Strömungsverhältnisse und Wassermengen anzutreffen.

Der vorliegende Bericht liefert nur tabellarische Messwerte, die hier im Sinne einer besseren Anschaulichkeit in Diagramme umgesetzt wurden (Schritt 1).

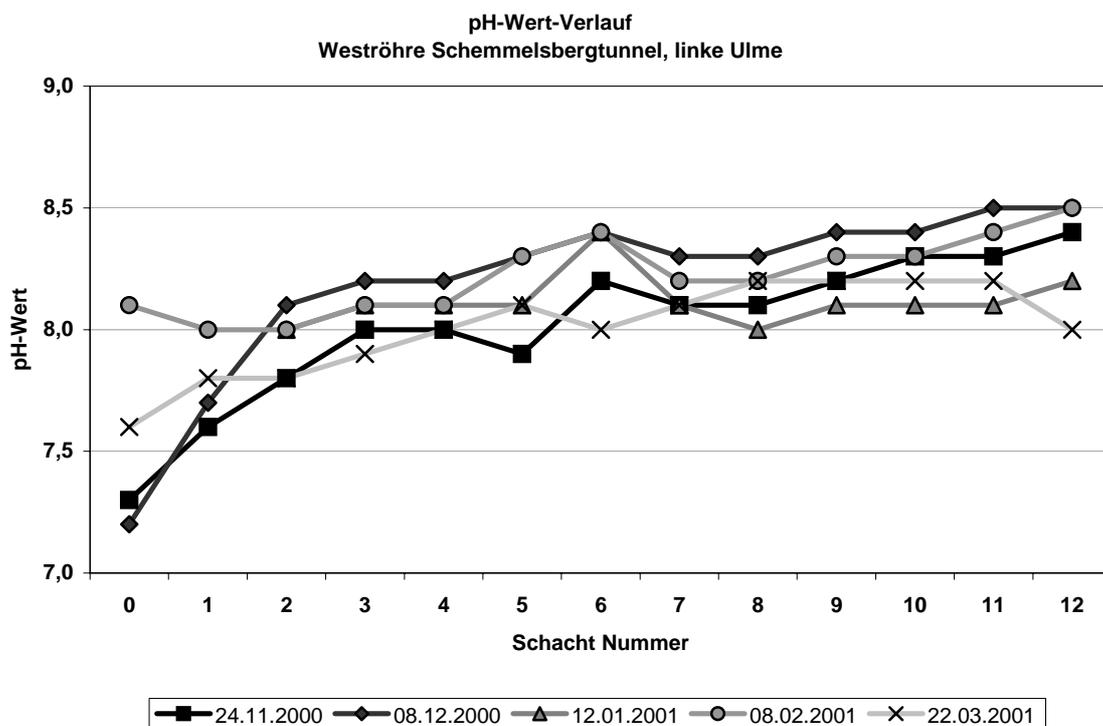


Diagramm 3.2: pH-Wert-Verlauf entlang der Teststrecke im Schemmelsbergtunnel

Betrachtet man den Verlauf der pH-Werte, so werden nur geringe Schwankungen innerhalb des Versuchszeitraums erkennbar, die zu dem offensichtlich keiner einheitlichen Tendenz unterliegen. Die beobachteten Schwankungsbreiten sind daher – Schacht „0“ hierbei ausgeklammert – als vernachlässigbar anzusehen, und es wird von einem konstanten pH-Wert ausgegangen (Schritt 2).

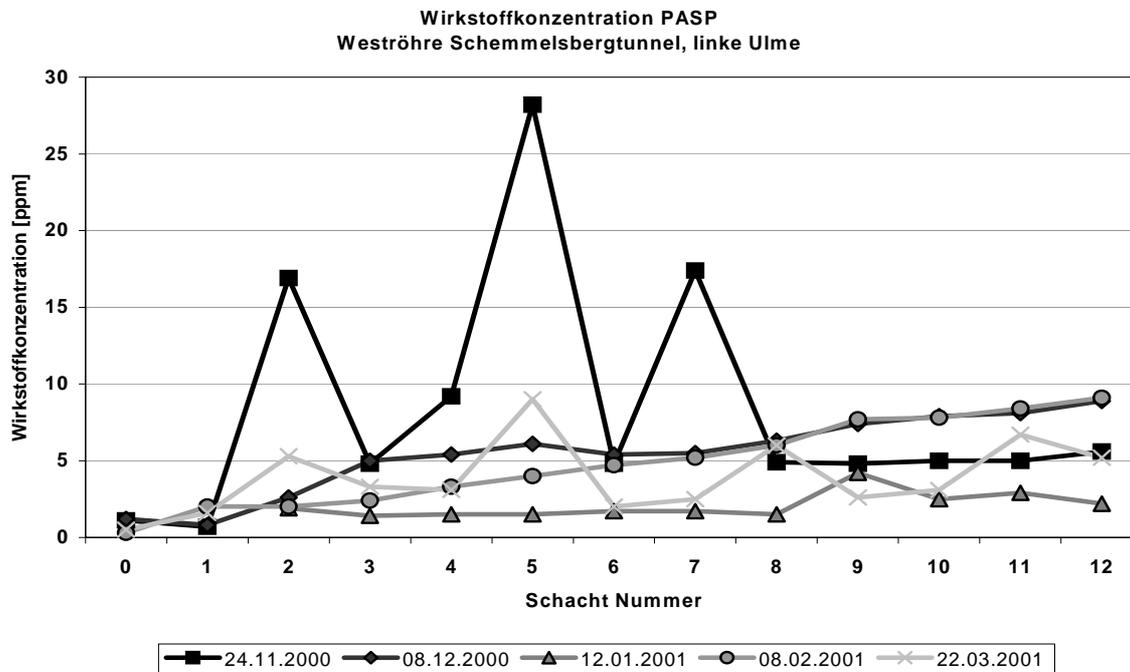


Diagramm 3.3: Wirkstoffkonzentration an PASP entlang der Teststrecke im Schemmelsbergtunnel

Betrachtet man die Wirkstoffkonzentration an PASP über den Versuchszeitraum hinweg (Diagramm 3.3), so fällt die hohe Schwankungsbreite auf, die sich vor allem im Rahmen der ersten Messreihe an den Schächten 2, 5, und 7 manifestiert. Interessanter Weise stehen diese schwankenden Werte in keiner Korrelation zu den relativ konstanten pH-Werten, der gemessenen Temperatur des Bergwassers und den konstanten Strömungsverhältnissen. Dies wäre angesichts der Wissensgrundlagen zur Auflösungsgeschwindigkeit von Depotsteinen, die sich in Abhängigkeit von Temperatur, Wasserfluss und pH-Wert einstellt, zu erwarten gewesen. Eine Schwankung in dem beobachteten Ausmaß stellt jedoch ein nur geringes Problem dar, da der Wirkstoff im substöchiometrischen Wirkungsbereich arbeitet und sich daher effektive Wirkung nur bedingt mit der Konzentration des Wirkstoffs ins Verhältnis setzen lässt.

Die Auswertung des phänomenologisch ermittelten Datenmaterials liefert als Ergebnis einen Rückgang der Ablagerungsneubildung, wie in Bild 3.1 und Bild 3.2 dokumentiert.



Bild 3.1: Schacht 10 der Versuchsstrecke zu Beginn der Versuchsphase [50]



Bild 3.2 Schacht 10 der Versuchsstrecke zum Ende der Versuchsphase [50]

Deutlich wird der Rückgang der Ablagerungen im rechten Bild. Der Verfasser stellt im Weiteren einen kausalen Zusammenhang zwischen Verwendung des Härtestabilisators und beobachtetem Rückgang her, der bei genauerer Betrachtung der Rahmenbedingungen jedoch kritisch zu sehen ist. Anhand der im Bericht wiedergegebenen Daten von Spülungen und den Zeitpunkten der Aufnahmen lässt sich nachvollziehen, dass die in Bild 3.2 dargestellte Situation direkt nach einer Hochdruckspülung des Gesamtsystems aufgenommen wurde, während Bild 3.1 einem Zeitraum zwischen zwei Spülereignissen entstammt. Eine geringere, erfassbare Menge an Ablagerungen direkt nach einem Spülereignis im Vergleich zu einer größeren Menge zwischen zwei Spülereignissen ist als trivial anzusehen.

Als letzter Schritt der Nachweisführung erfolgt anschließend die Bewertung der im Versuchszeitraum beobachteten Konzentrationsänderungen der Härtebildner, hier in Form der Darstellung des Härtegrades (Diagramm 3.4).

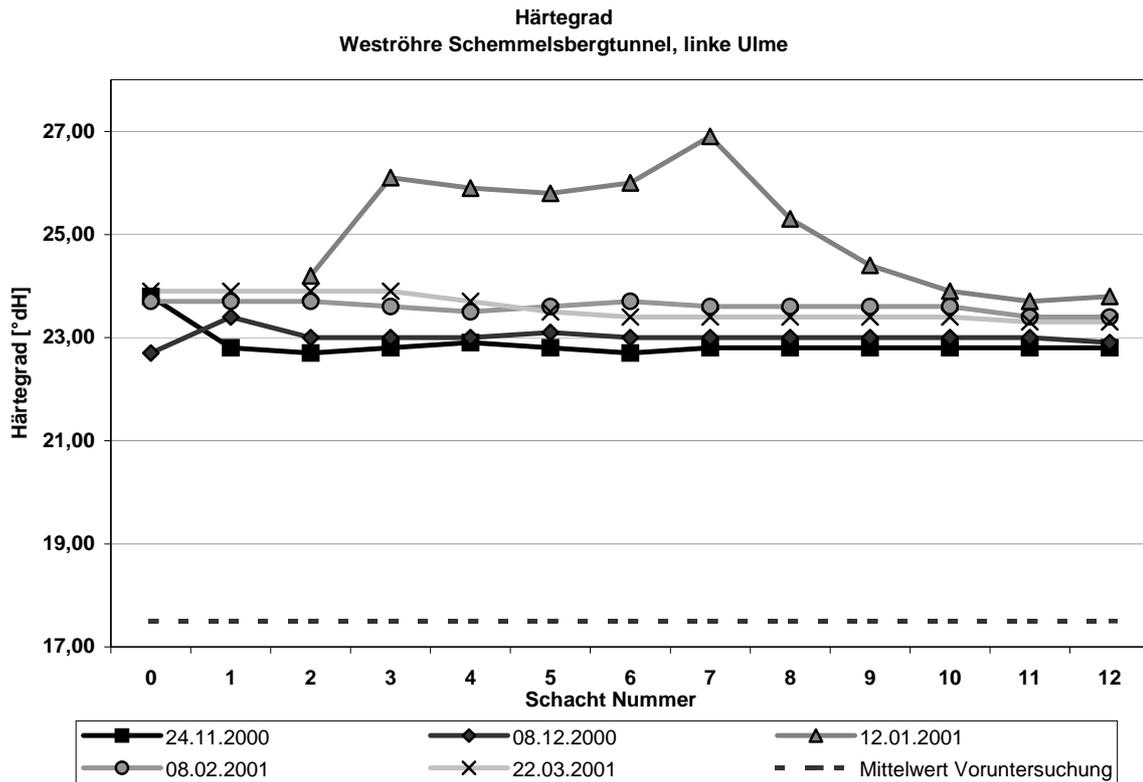


Diagramm 3.4: Härtegrad des Bergwassers entlang der Teststrecke im Schemmelsbergtunnel

Vier der fünf Messreihen liegen eng beieinander und spiegeln so einen relativ konstanten Härtegrad des Dränagewassers wieder. Im Gegensatz dazu zeigt sich die Messreihe vom 12.01.2001 als deutlich erhöht, wobei der Spitzenwert ($26,9^{\circ}\text{dH}$) deutlich über dem Mittelwert aller sonstigen Messungen liegt ($23,6^{\circ}\text{dH}$).

Diesen fünf dargestellten Messreihen aus dem Versuchszeitraum steht im Rahmen der Auswertung ein anhand von drei Einzelmessungen berechneter Mittelwert aus dem Zeitraum vor Einbringen des Härtestabilisators gegenüber. So wird ein Vergleich der Situation *Dränagewasser mit Härtestabilisator* mit *Dränagewasser ohne Härtestabilisator* hergestellt. Auf diese Weise wird eine maximale Zunahme der Speicherkapazität des Wassers hinsichtlich Carbonathärte bildender Stoffe ermittelt.

Der Verfasser berechnet hier fälschlich einen Wert von 65 % als maximale Steigerung der Carbonathärte. Mathematisch richtig wäre ein Wert von 53,7%. Diese Zunahme wird als deutlicher Beweis der Funktionalität des Härtestabilisators gewertet.

Bei weniger verengtem Blickwinkel auf den singulären Maximalwert von $26,9^{\circ}\text{dH}$ liegen die im Vorfeld ermittelten Härtegrade allerdings durchaus im Rahmen einer üblichen Schwankung des Systems. Nimmt man z.B. nur die Messreihen vom 24.11.2000 und vom 8.12.2000 so lässt sich ein Mittelwert von $22,9^{\circ}\text{dH}$ berechnen. Von diesem Wert aus betrachtet liegen die Extremwerte der Versuchsreihe ($26,9^{\circ}\text{dH}$) und der Mittelwert der Voruntersuchung ($17,5^{\circ}\text{dH}$) mit 17,5% bzw. 23,5% Abweichung schon innerhalb einer relativ gleichmäßigen Schwankungsbreite. Zudem stehen die drei Einzelmessungen quantitativ in keinem sinnvollen Verhältnis zur Anzahl der Messungen während des Versuchszeitraums. Trotzdem ist

grafisch eine deutliche Zunahme an gelösten Härtebildnern zu erfassen.

Im Ergebnis werden die im Rahmen der Versuchsreihe gewonnenen Erkenntnisse als Erfolg für das Verfahren der Härtestabilisierung gewertet.

3.3 Anwendung der dargestellten Methodik auf andere Einsatzbereiche von Härtestabilisatoren

Wie bereits in den Grundlagen dargestellt, existieren aufbereitete Datensätze bislang nur von Einsätzen des Verfahrens in Revisionsschächten eines Entwässerungssystems. Daher kann eine vergleichbare oder identische Nachweismethodik für die Bereiche Filterschicht und Ringspalt nicht ausgemacht werden.

Eine direkte Übertragbarkeit der hier dargelegten Methodik ist für den Ringspalt und/oder Filterschichten zudem nicht gegeben. Dies liegt in dem Umstand begründet, dass beide Einsatzorte durch das Einbringen der Innenschale des Bauwerks quasi versiegelt werden. Vom Härtestabilisator unbeeinflusstes Wasser wäre aus den von außen zugänglichen Bereichen (Revisionsschächte) daher nur mit Hilfe von Bohrungen zu erhalten. Phänomenologische Untersuchungen müssten sogar ganz entfallen, da die Versinterungsentwicklung ohne den Einfluss des Härtestabilisators gar nicht ermittelt werden könnte, vor allem nicht unter hydrochemisch identischen Ausgangsbedingungen.

Zur Anwendung der Methodik wäre daher ein Versuchsaufbau notwendig, der zwei konstruktiv identische Abschnitte, von denen einer mit einer Härtestabilisierung versehen ist, mit hydrochemisch identischem Wasser beschickt.

3.4 Erkenntnisse der bisherigen Analyse

Für die Feststellung der Funktionalität von Härtestabilisatoren in den Revisionsschächten von Entwässerungssystemen steht ein funktionales, übersichtliches und an den chemischen Randbedingungen des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts angelehntes Nachweisschema zur Verfügung. Dieses kann prinzipiell für alle Tunnelentwässerungssysteme angewendet werden und liefert anschauliche Ergebnisse.

In einem nächsten Schritt ist zu prüfen, ob dieses Nachweisschema den speziellen Randbedingungen eines Tunnelbauwerks genügt und diese ausreichend berücksichtigt. Im Falle einer Falsifizierung der allgemeinen Verwendbarkeit der Nachweismethodik durch geeignete Beispiele von ausgeführten Tunnelbauwerken müsste dieses Nachweisschema ergänzt oder modifiziert werden, beispielsweise durch zusätzliche phänomenologische und analytische Datenerfassungen.

Für Untersuchungen zur Funktionalität des Härtestabilisators in Filterschichten oder im Ringspalt ist diese Nachweismethodik nicht geeignet. Auf Grund der Unzugänglichkeit von Filterschicht oder Ringspalt ist es bei diesen Komponenten nicht möglich vom Härtestabilisator unbeeinflusste Messwerte vom Bergwasser zu erhalten.

4 Bewertung und Erweiterung der bisherigen Nachweismethodik

4.1 Vorgehensweise bei der Bewertung

Um die bisherige Nachweismethodik einer kritischen Betrachtung unterziehen und sie gegebenenfalls hinsichtlich einer generellen Anwendbarkeit und Aussagekraft falsifizieren zu können, sind prinzipiell einige grundlegende Fragen zu erörtern:

1. Welchen Einfluss auf die Versinterungsentstehung haben die tunnelbauspezifischen Randbedingungen, wie z.B. Ausführungsmängel oder die Wahl ungünstiger Einzelkomponenten des Entwässerungssystems?
2. Ist eine Zunahme der Calciumionengehalte unter definierten Randbedingungen (Rückgang der Ablagerungsneubildung, Konstanz der pH-Werte), so wie als kausale Prämisse für die Nachweisführung einer funktionierenden Härtestabilisierung postuliert, zwingend an die Verwendung eines eben solchen Härtestabilisators geknüpft?
3. Werden die Erkenntnisse aus der Beantwortung der Fragen 1 und 2 durch das bisherige Procedere des Nachweisverfahrens in ausreichendem Maße berücksichtigt?

Für die Beantwortung der Frage eins ist zunächst durch Betrachtung der besonderen Bedingungen eines Tunnelbauwerks und seiner Sicherungsmaterialien zu erläutern, in wieweit hydrochemische Entwicklungen von Dränagewässern prognostiziert werden. Im Weiteren ist anhand der Dränagewasserchemismen eines bestehenden Bauwerks nachzuvollziehen, ob auch ohne Einflüsse eines Härtestabilisators steigende Calciumionengehalte, bei ansonsten konstanten hydrochemischen Leitparametern, beobachtet werden können. Wäre dies der Fall, so müsste das Auftreten einer solchen Steigerung von einer hinreichenden zu einer notwendigen Bedingung für den Nachweis funktionierender Härtestabilisierung zurückgestuft werden.

Zur Beantwortung der Frage zwei ist eine eingehende Betrachtung und Analyse der tunnelbauspezifischen Versinterungsmechanismen notwendig.

Fragestellung drei wird in Form einer abschließenden Analyse der so gewonnenen Erkenntnisse beantwortet. Hieraus wird dann auch der etwaige Bedarf an ergänzenden Untersuchungen abgeleitet.

4.2 Mögliche Ionenfrachten von Dränagewässern ohne den Einfluss eines Härtestabilisators

4.2.1 Tunnelbauspezifische Ursachen schwankender Ionenfrachten

4.2.1.1 Einfluss des Spritzbetons und seiner Ausführung auf die Ionenfracht

Bis vor wenigen Jahren ließen sich Versinterungsprobleme dränierteter Tunnelbauwerke zu meist direkt mit der Verwendung alkalihaltiger Spritzbetonbeschleuniger bei der Erstellung der Spritzbetonschale in Verbindung bringen. Die vormals zum Teil in hohen Dosen zugesetzten Erstarrungsbeschleuniger erhöhen den Anteil an leicht löslichen Bestandteilen von Kalium und Natrium und damit direkt den Anteil ihrer Basen im Eluat. Die damit einhergehende Erhöhung des pH-Werts besitzt fatale Folgen für die Versinterungsentstehung, wie z.B. am Mühlbergtunnel der DB AG nachgewiesen werden kann [7][47].

Im Zuge vielfältiger Untersuchungen konnte ein deutlicher Rückgang der Elution – und damit der Versinterungsgefährdung – bei Verwendung alkaliarmer und alkalifreier Spritzbetonbeschleuniger nachgewiesen werden [31]. Dies findet mittlerweile auch in den baulichen Vorschriften Eingang. In der Fortschreibung der ZTV-Ing Teil 5 [58] wird daher beispielsweise bereits die Verwendung alkalifreier Spritzbetonbeschleuniger zwingend gefordert.

Im Hinblick auf die Versinterungsproblematik besitzt jedoch auch die Dichtigkeit des Spritzbetons, die sich vor allem aus der Abstimmung der Einzelkomponenten und der Ausführung vor Ort ergibt, einen mindestens genauso großen Einfluss wie die Wahl des Bindemittels, des Zuschlags oder des erforderlichen Beschleunigers an sich. Wird oder wurde auf der Baustelle ungenau gearbeitet und lassen sich Mängel im Qualitätsmanagement der Spritzbetonsicherung hinsichtlich ihrer Ausführung aufzeigen, so ist die Verschärfung einer etwaigen Versinterungsproblematik des Entwässerungssystems als relativ sicher anzusehen [35]. Eine Folge des heterogenen Schalenaufbaus und der Vielzahl der äußeren Einflussfaktoren ist dabei aber nicht nur die entstehende, hohe Ionenfracht an sich. Zusätzlich schwanken diese Frachten hinsichtlich ihrer quantitativen Zusammensetzung zum Teil erheblich und sind diesbezüglich langfristig im Prinzip nicht prognostizierbar. Dies gilt sowohl für die Bewertung einer möglichen Ionenfracht des Dränagewassers im Vorfeld der Baumaßnahme, als auch für eine langfristige Prognose ihrer Entwicklung nach Inbetriebnahme des Bauwerks. *Abel* hat u.a. aus diesem Grund eine problemorientierte Form der aus der Spritzbetonbauweise oder auch der Geotechnik bekannten Beobachtungsmethode entwickelt, um so verlässliche Bewertungskriterien für die Versinterungsgefährdung von Bergwasserdrägen zu erhalten [1]. *Abel* weist dabei unter anderem nach, dass sich eine Versinterungsgefährdung im Prinzip zunächst nur qualitativ abschätzen lässt und diese für längerfristige Aussagen nach Inbetriebnahme der Bauwerks auf Grund sich ändernder Randbedingungen stets bauwerksbegleitend zu ermitteln ist [1].

Neben den bereits im Zuge der Grundlagen dargestellten Mechanismen der Elution ist einer der primären Faktoren der Versinterungsentstehung in Folge Elution des Spritzbetons in der Kontaktzeit des Bergwassers mit der Spritzbetonschale zu finden. Untersuchungen am Hochwaldtunnel [30] zeigten, dass bei zweiröhrigen Tunneltrassen die innenliegenden Ulm-

dränagen zumeist von einer stärkeren Versinterungsneigung geprägt sind als die äußeren. Als „innenliegend“ bezeichnet man hier die direkt nebeneinanderliegenden Ulmdrängestränge zweier benachbarter Tunnelröhren, also z.B. die östliche Ulmdränge der Weströhre und die westliche Ulmdränge der Oströhre. Diese Erkenntnisse lassen sich durch Beobachtungen an weiteren Bauwerken, wie Rennsteigtunnel oder Berg Bock, sowie anderen zwei-röhrigen Bauwerken bestätigen. Ursache für diesen Zusammenhang ist der Umstand, dass bei innenliegenden Dränagesträngen, auf Grund ihrer Lage, zumeist weniger Bergwasser anfällt als bei außenliegenden (Bild 4.1).

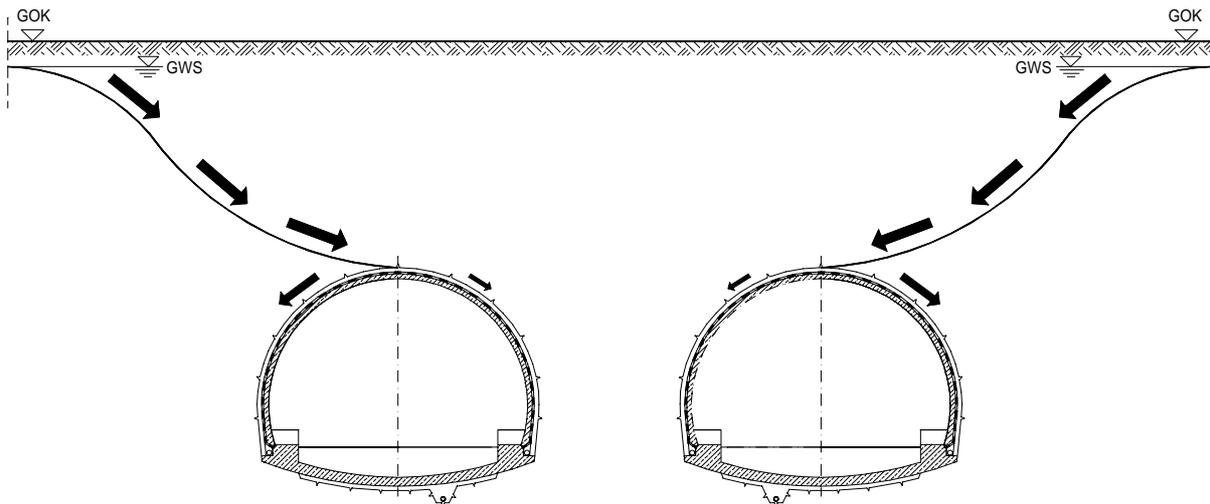


Bild 4.1: Schematische Darstellung der Bergwassermengenverteilung bei innenliegenden Dränagen

Das Bergwasser fließt auf der Innenseite demnach langsamer zur Dränage, womit der Strömungsdruck im Vergleich zur äußeren Dränage absinkt. Hieraus resultiert eine höhere Perkolationszeit des Bergwassers im Spritzbeton. In Folge dieser längeren Phase der Sickerlaugung kommt es zu einem ausgeprägteren Auswaschungseffekt auf der Innenseite, mit dem eine deutliche Erhöhung des pH-Werts und damit eine Zunahme der Versinterungsneigung einhergehen. Z.B. durch Bildung von neuen Wasserwegigkeiten kann ein sich hierbei einstellender Status Quo nun langfristig, teilweise deutlich, variieren. Eine Prognose der zu erwartenden Ionenfracht für äußere und innere Ulme wird damit für einen längeren Zeitraum mehr als vage.

4.2.1.2 Einfluss von Injektionskörpern und Ankermörtel auf die Ionenfracht

Lassen sich bei Spritzbeton durch eine konsequente Qualitätssicherung Unregelmäßigkeiten im Gefüge des Betonkörpers zumindest deutlich reduzieren, ist dies für Injektionskörper oder den Verpresskörper bei Beton- oder Mörtel-Ankerungen nicht möglich. Die Ausbildung der Verpress- und Injektionskörper ist nur geringfügig steuerbar, ihr struktureller Aufbau daher kaum zu beeinflussen. Aus diesem Grund liegt bei Bauwerken, deren geologische oder hydrogeologische Rahmenbedingungen einen Einsatz größerer Injektionsschirme oder umfangreicher Systemankerung mit Verpressankern notwendig machen, durch verstärkte Elutions-

erscheinungen eine erhöhte Versinterungsgefahr vor [43]. Hinzu kommt, dass bei Einsatz von Injektionen oder Ankerungen oftmals Abbindbeschleuniger verwendet werden, um eine rasche Festigkeit bzw. Nutzbarkeit des zusätzlichen Sicherungselements gewährleisten zu können. Hierbei werden z.T. auch noch alkalihaltige Zusatzmittel eingesetzt, welche das Problem gemäß der bereits zum Spritzbeton formulierten Erläuterungen weiter verschärfen. Insofern lassen sich, wie z.B. auch am Tunnel Berg Bock [33], bei Zusammentreffen von Bergwasserzutritten und Bereichen mit Injektionsschirmen oder einer umfangreichen Systemankerung oftmals deutlich stärkere Versinterungsraten aufzeigen als bei vergleichbaren Abschnitten des gleichen Bauwerks, ohne zusätzliche Sicherungsmaßnahmen. In Folge der ungleich größeren Heterogenität der Injektionskörper im Vergleich zu einer Spritzbetonschalen ist hierbei eine genaue Zusammensetzung der zu erwartenden Ionenfracht und ihre langfristige Entwicklung so gut wie nicht vorhersehbar.

4.2.1.3 Einfluss von Firstraumverfüllungen auf die Ionenfracht

Bei der Spritzbetonbauweise kommt es bei der Erstellung der Innenschale aus Schalbeton zu einem Absetzvorgang des Betons im Firstbereich und einer damit verbundenen Hohlrumbaue. Dieser Hohlraum, der unterhalb der eigentlichen Abdichtungsschicht liegt, muss aus baustatischer Sicht mit Injektionsmaterial verfüllt werden (Bild 4.2).

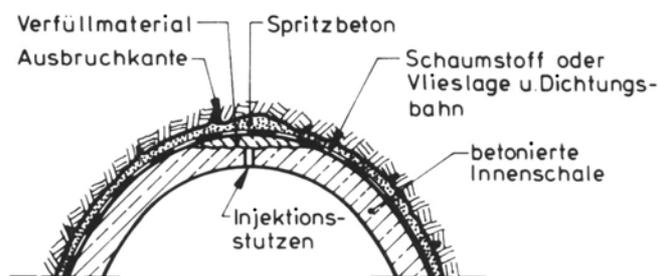


Bild 4.2: Verfüllung des Firstraums bei Sicherung mit Abdichtung [27]



Bild 4.3: Spülreste aus der Drainage des Hochwaldtunnels nach der Firstraumverfüllung

Die Erfahrungen an verschiedenen Bauwerken haben gezeigt, dass auf Grund der hohen Verpressdrücke das Injektionsgut teilweise entlang der Abdichtungsbahn bis zu den Filterkörpern der Ulmdrängen hinab gelangen kann und sich dort auch in die Dränagerohre selbst presst (Bild 4.3). Neben der Versinterungsbegünstigung durch bauverfahrenstechnische Mängel entstehen so auch noch baustofftechnische Probleme, da auch hier oftmals noch mit alkalihaltigen Abbindbeschleunigern gearbeitet wird.

4.2.2 Zusätzliche Reaktionsmechanismen

Untersuchungen von *Dietzel* [14] haben gezeigt, dass bei Tunnelbauwerken häufig eine Magnesiumverarmung im Dränagewasser zu beobachten ist, die die Magnesiumionenkonzentration teilweise unter die Nachweisgrenze drückt.

Diese Verarmung beruht auf dem Umstand, dass die Löslichkeitskonstante des Brucits

($\text{Mg}(\text{OH})_2$) mit $K_{\text{Mg}(\text{OH})_2} = 10^{-10.4}$ als sehr klein einzustufen ist. Daher kann ab einem pH-Wert von 12 praktisch kein Magnesium als härtebildendes Ion mehr in der Lösung enthalten sein. Gerade im Zeitraum nach Inbetriebnahme eines Bauwerks, werden bei Tunnelbauwerken in der Regel pH-Werte von um 12 oftmals erreicht und überschritten und stellen eher die Regel als die Ausnahme dar. Die Abscheidung des Brucits beginnt zudem bereits weit unterhalb von $\text{pH}=12$ und ist nicht lokal an das Milieu der Drainage gekoppelt. Aussagen, die zum Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht getätigt wurden, gelten also nicht uneingeschränkt für Magnesium und seine Carbonate. Schwankende pH-Werte können daher auch einen viel direkteren Einfluss auf die Konzentration der Mg-Ionen haben als dies für Calcium gilt. Schlussfolgerungen, die allgemein bezüglich einer hydrochemischen Entwicklung auf der Beobachtung der Entwicklung der Magnesiumionenkonzentration in einem Dränagesystem beruhen, sind daher kritisch zu hinterfragen.

Daher empfiehlt sich eine Fokussierung auf das Calciumion als primär härtebildendes Ion für Bewertungen der Effektivität von Härtestabilisatoren.

4.2.3 Exemplarische Entwicklung der Ionenfrachten von Dränagewässern ohne den Einfluss eines Härtestabilisators

Die bisherigen Erkenntnisse dieses Kapitels beschreiben eine zeitlich hohe Inhomogenität der Ionenfrachten von Dränagewässern in Folge von tunnelbauspezifischen Elutionsprozessen und deren Randbedingungen. Bislang wurde im Rahmen der in Kapitel 3 vorgestellten Nachweise zur Effektivität von Härtestabilisatoren allerdings stets vorausgesetzt, dass die Ionenfracht von Bergwässern in ihrer quantitativen Zusammensetzung einer zeitlichen Konstanz unterliegt. Dies ist angesichts der geschilderten Zusammenhänge zwischen Elution und Ionenfracht allerdings unwahrscheinlich.

Sofern daher an einem unkonditionierten Dränagewasser eine vergleichbare Entwicklung der Ionenfracht wie bei der Verwendung von Härtestabilisatoren beobachtet werden kann, dass also die Konzentration der Calciumionen steigt, ohne dass das Dränagewasser dem Einfluss eines Härtestabilisators unterliegt, so kann die Beobachtung eines solchen Phänomens nicht mehr monokausal auf die Verwendung eines Härtestabilisators zurückgeführt werden. Diese Entwicklung wäre dann eher den bislang in diesem Kapitel beschriebenen Phänomenen zuzuschreiben. Ein Nachweis der Funktionalität des Verfahrens mittels einer solchen analytischen Betrachtung wäre dann künftig in Zweifel zu ziehen.

Für die Darstellung einer möglichen Entwicklung der Ionenfrachten und der versinterungstechnischen Leitparameter von Dränagewässern, ohne den Einfluss eines Härtestabilisators, werden im Folgenden exemplarisch Messwerte der Wasserchemismen vom Hochwaldtunnel betrachtet, welche im Zuge der Erstellung von [30] ermittelt wurden. Gemäß dem in Kapitel 3 dargestellten formalisierten Ansatz des Nachweises erfolgt hier ebenfalls die Beachtung der einzelnen Schritte des formalisierten Nachweisschemas, jedoch bereits mit Schritt 2 beginnend, der Betrachtung der pH-Werte der linken (inneren) Ulme der Oströhre des Hochwaldtunnels (Diagramm 4.1).

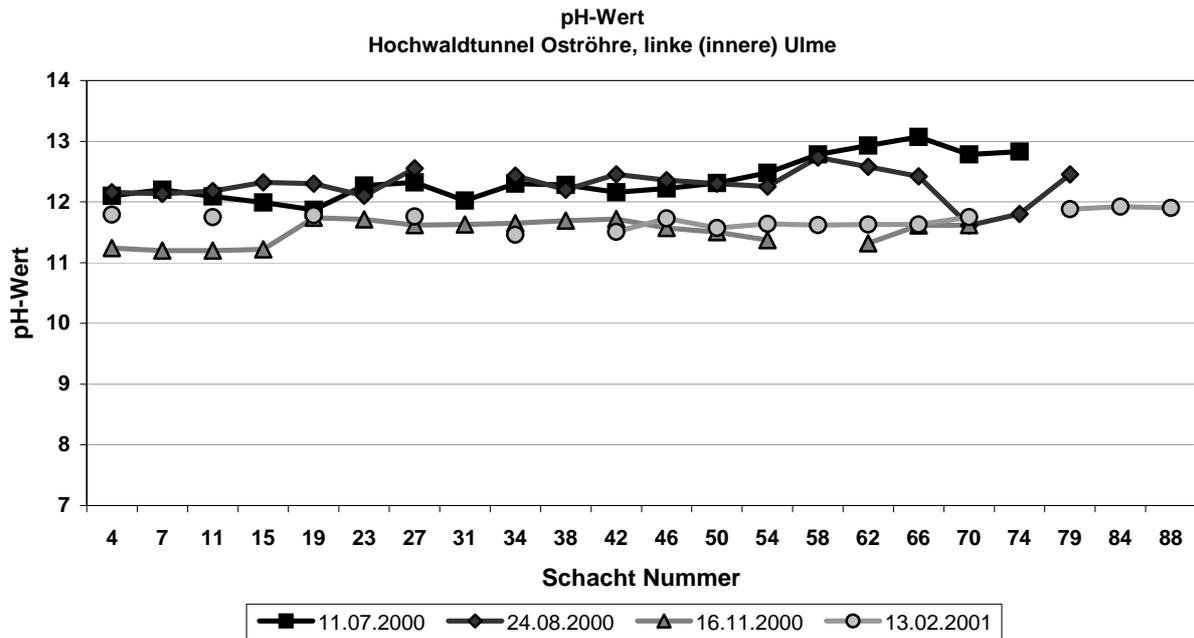


Diagramm 4.1: pH-Werte der linken (inneren) Ulme, Oströhre, Hochwaldtunnel

Die Messreihen zeigen über den Verlauf rund eines halben Jahres einen weitestgehend identischen Verlauf der Messreihen, bei hohen bis sehr hohen pH-Werten. Zur Verdeutlichung dieser Aussage liefert nachfolgendes Diagramm die mittleren pH-Werte, ermittelt aus den jeweiligen Absolutwerten der einzelnen Dränageschächte.

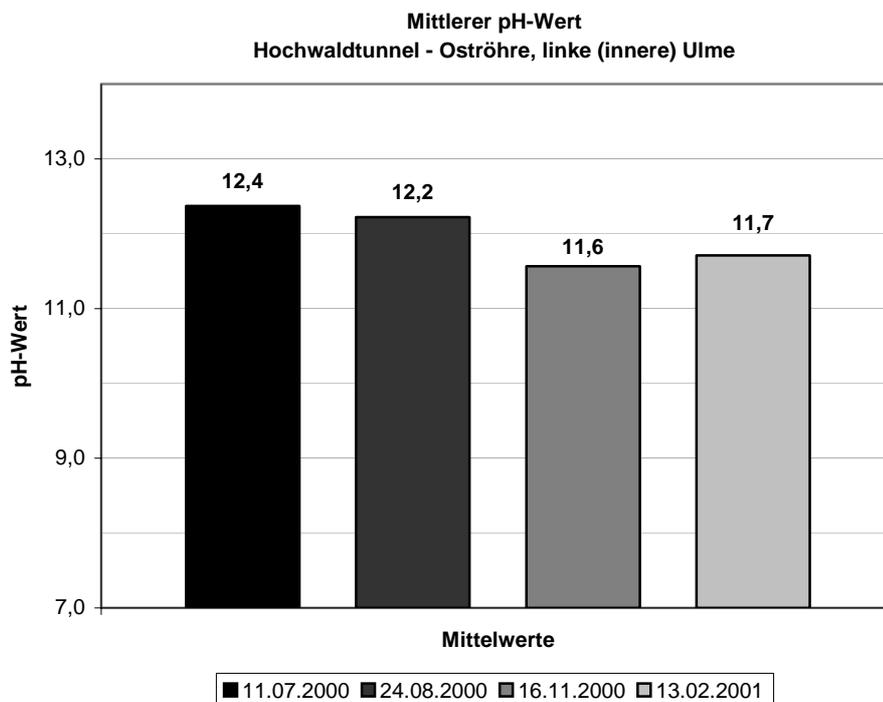


Diagramm 4.2: Mittlere pH-Werte der linken (inneren) Ulme, Oströhre, Hochwaldtunnel

Mit 12,4 als Maximum und 11,6 als Minimum der Messungen liegen die mittleren pH-Werte relativ nah beieinander. Es kann also von einem verhältnismäßig konstanten pH-Wert gesprochen werden, bei genauer Betrachtung von einem sukzessiven leichten Rückgang.

Parallele Begutachtungen in den Revisionsschächten des untersuchten Drainageabschnitts ergaben eine konstante bis leicht rückläufige Entwicklung bei der Ablagerungsbildung, welche von Messung zu Messung phänomenologisch begleitet wurde (Schritt 3) [30].

Gemäß der theoretischen Überlegungen zur Beeinflussung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts wäre nun bei Betrachtung der Calciumionenkonzentration zumindest von einer gewissen Korrelation zwischen pH-Wert und Calciumgehalt auszugehen. Der Blick auf die real gemessenen Werte lässt diesen Schluss jedoch nicht zu (Diagramm 4.3) (Schritt 4).

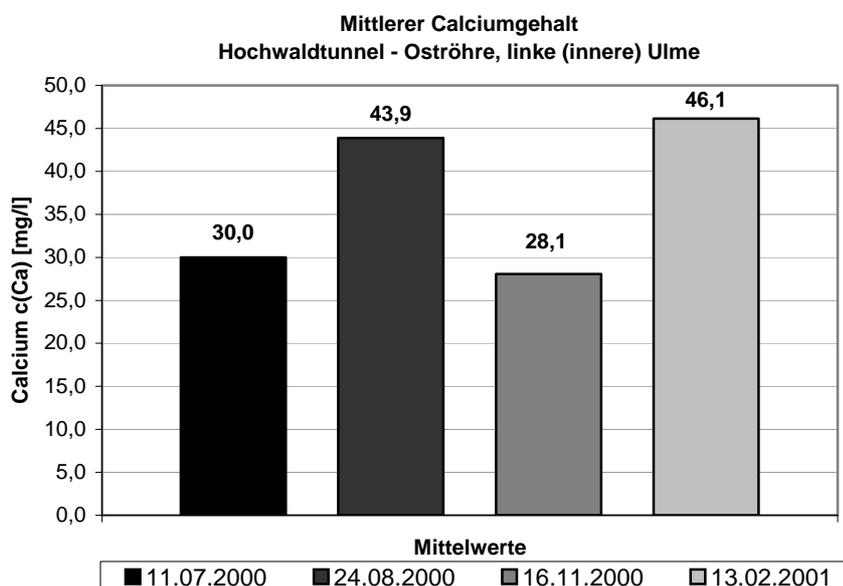


Diagramm 4.3: Mittlerer Calciumgehalt der linken (inneren) Ulme, Oströhre, Hochwaldtunnel

Es ist weder eine Korrelation zwischen pH-Werten und Calciumgehalt feststellbar, noch lässt sich eine Tendenz bei der Entwicklung des Calciumgehalts ermitteln. Wie der Blick auf die genauen Verläufe der Calciumwerte darlegt (Diagramm 4.4) folgt die allgemeine Entwicklung der Messwerte einem eher zufälligen Muster, das sich sehr wahrscheinlich in Folge diverser Randbedingungen des Systems ausprägt. Im Zuge von Kamerabefahrungen der einzelnen Drainageabschnitte, wurden am Hochwaldtunnel z.B. erhebliche Fertigungsmängel aus der Bauphase festgestellt, die eine Versinterung nachhaltig begünstigen. Betrachtet man den Verlauf der Calciumionenkonzentration, so sind weiterhin lediglich qualitative Tendenzen des Kurvenverlaufs erkennbar, so dass die Versinterungsneigung, im Verhältnis der Schächte zueinander, von Messung zu Messung gesehen konstant bleibt.

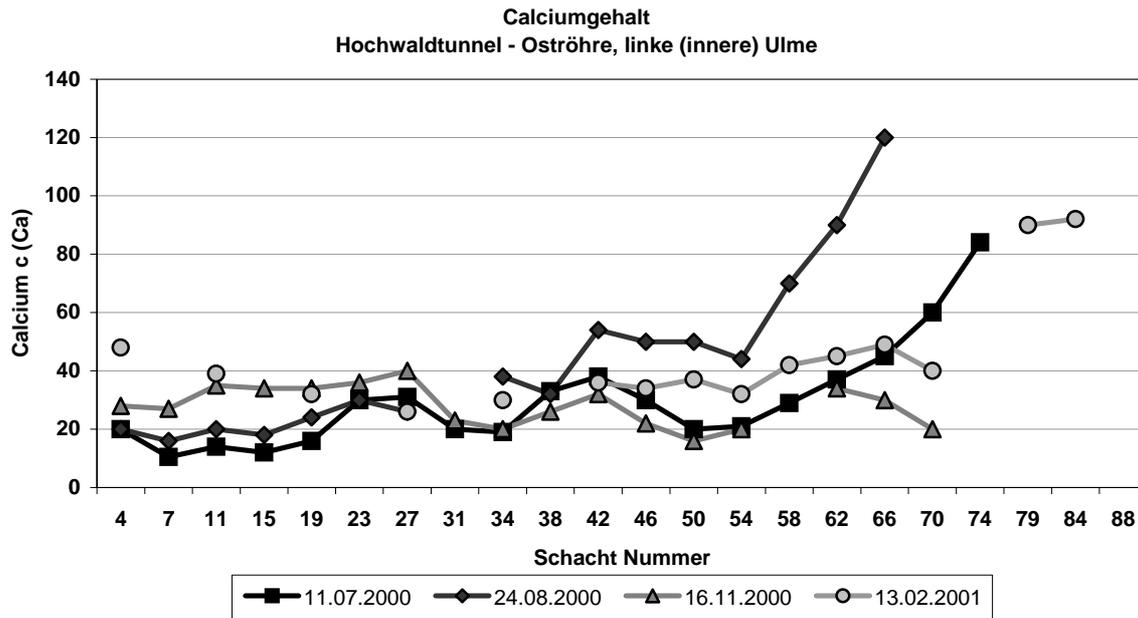


Diagramm 4.4: Calciumgehalt des Dränagewassers am Hochwaldtunnel, Oströhre, linke (innere) Ulme

Bemerkenswert ist vor allem, dass es hier bei relativ konstanten pH-Werten zu starken Schwankungen (und auch zu Zunahmen des Calciumionengehalts) kommen kann, wie z.B. ein Vergleich der Messreihen vom 11.07.2000 und vom 24.08.2000 nahe legt. Trotz nahezu konstantem pH-Wert (12,4 zu 12,2) stieg der durchschnittliche Calciumionengehalt von 30,0 auf 43,9 mg/l.

An der Oströhre des Hochwaldtunnels konnte somit, unter Erfüllung der Randbedingungen für einen Nachweis der Effektivität eines Härtestabilisators (konstanter pH-Wert, konstante Fließbedingungen, konstante bis rückläufige Ablagerungsneubildung), eine Zunahme der Calciumionen im Dränagewasser gemessen werden, ohne dass allerdings ein Härtestabilisator zum Einsatz gekommen wäre. Der als Nachweis für die Funktionalität des Härtestabilisators bemühte Wirkungszusammenhang – Steigerung der Lösungskapazität an Calciumionen bei ansonsten gleich bleibenden hydrochemischen Leitparametern – kann hier also nicht nur durch die Verwendung eines Härtestabilisators erzielt werden. Offensichtlich existieren auch andere Randbedingungen, unter denen eine identische Entwicklung im Dränagewasser zu beobachten ist.

Zur Verdichtung dieser Erkenntnis sei der gleiche Umstand nochmals an der Weströhre des gleichen Bauwerks verdeutlicht. Es wird wiederum die linke Ulme betrachtet, wobei diese hier der äußeren Ulme gleichkommt. Zunächst erfolgt die Betrachtung der mittleren pH-Werte (Diagramm 4.5).

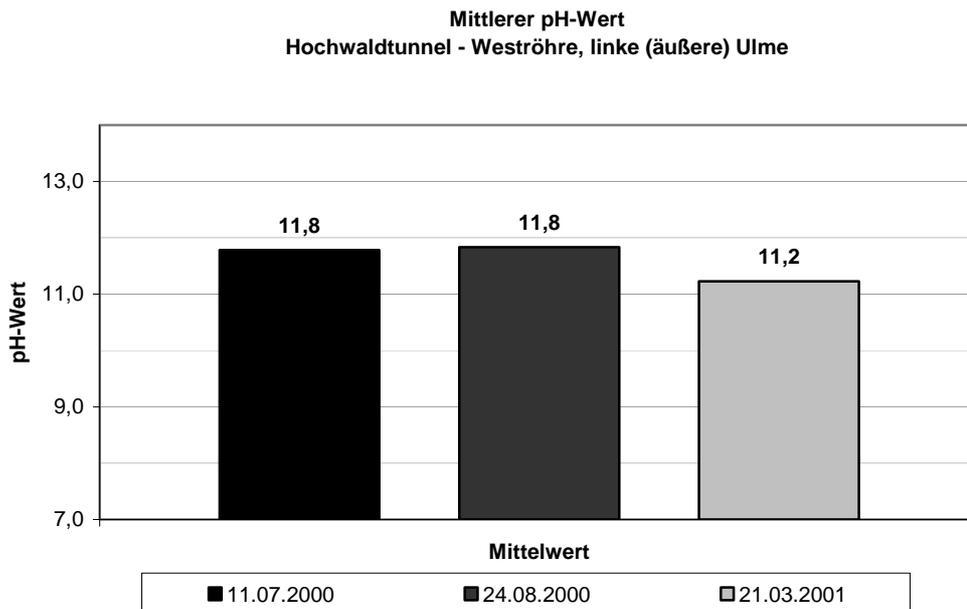


Diagramm 4.5: Mittlere pH-Werte der linken (äußeren) Ulme, Weströhre, Hochwaldtunnel

Die mittleren pH-Werte zeigen erneut ein fast homogenes Bild, welches sich auch durch den Verlauf über die einzelnen Dränageschächte hinweg weiter manifestiert (Diagramm 4.6).

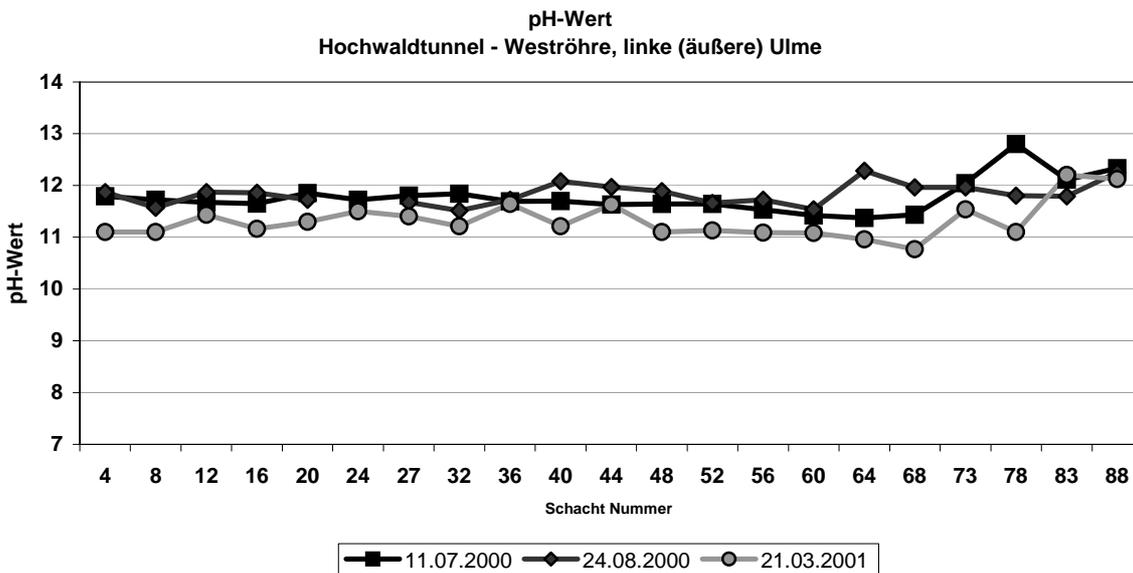


Diagramm 4.6: pH-Werte der linken (äußeren) Ulme, Weströhre, Hochwaldtunnel

Die pH-Werte bewegen sich auf ähnlich hohem Niveau wie bereits in der Oströhre festgestellt und fallen zum spätesten Untersuchungstermin ebenfalls nur leicht ab (Schritt 2).

Parallel konnte auch in der Weströhre des Hochwaldtunnels ein konstantes Wachstum der Ablagerungen festgestellt werden, ohne dass im Zuge der Untersuchungen chemische oder physikalische Phänomene aufgetreten waren, die nicht natürlichen oder tunnelbauspezifischen Ursprungs waren (Schritt 3) [30].

Insofern wären auch hier keine großartigen Schwankungen des Calciumgehalts zu erwarten.

Dies gilt vor allem für den Vergleich der Messreihen vom 11.07.2000 zum 24.08.2000.

Die Betrachtung der mittleren Calciumionenkonzentrationen legt allerdings einen anderen Umstand nahe (Diagramm 4.7)(Schritt 4).

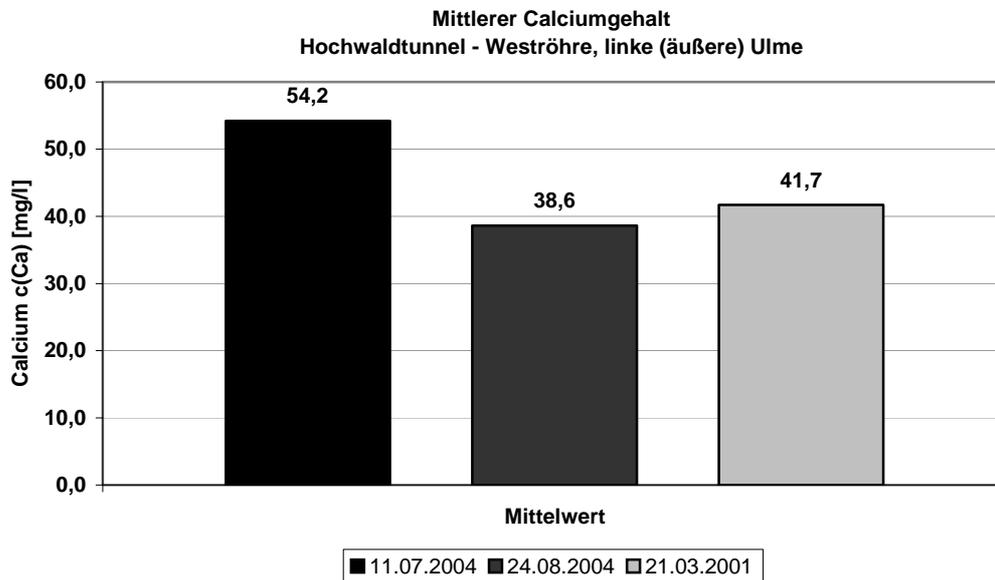


Diagramm 4.7: Mittlerer Calciumgehalt der linken (äußeren) Ulme, Weströhre, Hochwaldtunnel

Wiederum kann keine erkennbare Korrelation zwischen pH-Werten und dem Calciumgehalt des Dränagewassers festgestellt werden. Unerwarteter Weise fällt, trotz identischem pH-Wert der Gehalt an Calciumionen, von Messung 1 zu Messung 2, um rund 29 %, von 54,2 auf 38,6 mg/l. Betrachtet man auch hier die Einzelverläufe der zugehörigen Messreihe des Calciumgehalts (Diagramm 4.8), so ist erkennbar, dass auch hier Affinitäten der Messreihen zueinander bestehen.

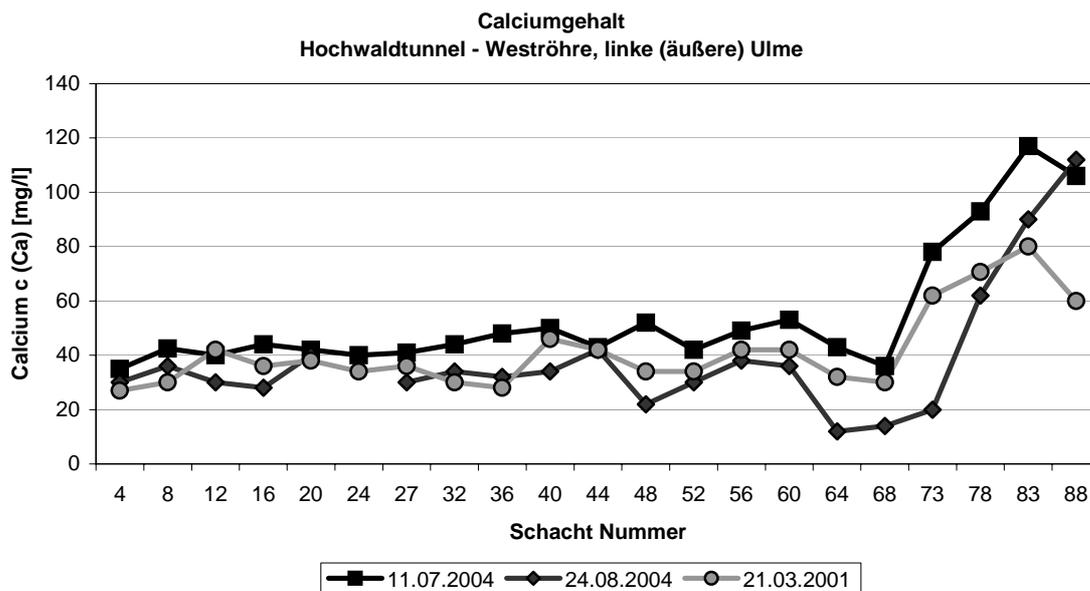


Diagramm 4.8: Calciumgehalt des Dränagewassers am Hochwaldtunnel, Weströhre, linke (äußere) Ulme

Die Messreihen variieren also nur absolut und Tendenzen im Verhältnis Schacht zu Schacht wiederholen sich bei allen Messreihen.

Auch diese Entwicklung lässt sich nicht der dem Nachweisschema zu Grunde liegenden theoretischen Überlegung in Einklang bringen. Ein Abfall der Lösungskapazität des Calciumcarbonats, so wie zwischen 11.07.2000 und 24.08.2000 zu beobachten, ist mit dem formalisierten Nachweisschema nur bedingt vereinbar. Gemäß der in Kap. 3 dargestellten Theorie, bedingen konstante hydrochemische Leitparameter auch konstante Calciumgehalte.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass die Temperatur des Dränagewassers einen Einfluss auf die Calcitbindungsfähigkeit besitzt, so wie bereits im Rahmen dieser Arbeit thematisiert. Um jedoch Schwankungen im Calciumgehalt des Bergwassers zu verursachen, so wie z.B. bei den Messreihen vom 11.08.2000 und dem 24.08.2000 zu beobachten; bedarf es extremer Temperaturschwankungen. Dies gilt vor allem, da bei besagten Messreihen im Mittel fast identische pH-Werte gemessen wurden. Die mittleren Temperaturen der Messreihen lagen bei 11,6°C (11.07.2000) und 12,2°C (24.08.2004), verliefen erwartungsgemäß relativ konstant bei Schwankungsbreiten von rund $\pm 0,5^\circ\text{C}$ und scheiden daher als Begründung für die beobachteten Schwankungen der Calciumgehalte aus. Dieser Zusammenhang lässt sich so auch bei allen weiteren Messreihen beobachten.

Ähnliche Erkenntnisse wie am Hochwaldtunnel wurden auch bei anderen Bauwerken der Kammquerung Thüringer Wald [33][34] bzw. verschiedenen weiteren Bauwerken in Deutschland gewonnen.

4.2.4 Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse

Die Beobachtungen am Hochwaldtunnel haben die Annahme bestätigt, dass bei Tunnelbauwerken hinsichtlich der zu erwartenden Ionenfrachten auf Grund der komplexen Randbedingungen und der Vielzahl von Einflüssen auf den Elutionsprozess mit zum Teil starken Schwankungen der ermittelten Messwerte zu rechnen ist. Dies manifestiert sich vor allem in der Belastung des Dränagewassers durch die Ionen der Härtebildner, vornehmlich durch Ionen des Calciums. Im Ergebnis kann es z.B. durch eine verstärkte Elution, auf Grund einer neuen Wasserwegigkeit in der Schale und den Kontakt mit Bereichen geringerer Qualität der Ausführung, trotz vermeintlich identischer Randbedingungen zu Erhöhungen des Calciumgehalts kommen. Ein kausaler Schluss zur Funktionalität von Härtestabilisatoren, der vornehmlich auf der Zunahme des Calciumgehalts im Bergwasser aufgebaut ist, muss daher kritisch gesehen werden.

4.3 Analyse der tunnelbauspezifischen Versinterungsmechanismen

4.3.1 Unzureichende Drainagekonzepte

Untersuchungen zu Abdichtungs- und Entwässerungssystemen haben gezeigt, dass auch die Konzeption eines Drainagesystems die Versinterungsentstehung begünstigen kann. Dies

betrifft neben der Anzahl und Anordnung der Dränageleitungen auch deren Verlauf sowie die vorgesehenen Zugangs- und Reinigungsmöglichkeiten. Zur Bestimmung der optimalen Einsatzbereiche von Dränagesystemen, wurden in früheren Forschungsvorhaben die Einflüsse unterschiedlicher Entwässerungskonzepte auf die Folgekosten untersucht [28][35]. Als Ergebnis lassen sich folgende Fehler bei der Wahl von Entwurfselementen oder ihrer Ausprägung als versinterungsbegünstigend klassifizieren:

- Unzureichendes Gefälle in den Dränageleitungen, da so ausfallendes CaCO_3 durch die geringen Fließgeschwindigkeiten nur unzureichend abtransportiert wird, zu Boden sinkt, an der Dränagerohrsohle anhaftet und dort aushärtet.
- Zu großer Abstand der Revisionsschächte, da so eine gründliche Reinigung durch Hochdruckspülung, auf Grund des bei größeren Abständen erheblichen Druckverlustes an der Spüldüse, nicht gewährleistet werden kann.
- Der Entwurf eines Dränagesystems unter Verwendung von T-Abzweigungen oder Blindrohren, da es hier durch die Strömungsbeunruhigung grundsätzlich zu verstärkten Ausfällungen kommt.
- Die Verwendung von Absturzbauwerken zur Überbrückung von Höhendifferenzen, da hier – ähnlich den T-Abzweigungen oder Blindrohren – mit der Strömungsbeunruhigung am Entwurfselement eine Versinterungsbegünstigung einher geht.

4.3.2 Ungeeignete Einzelkomponenten des Entwässerungssystems

Neben den Baustoffen haben die verwendeten Einzelkomponenten des Dränagesystems den größten, direkten Einfluss auf die Versinterungsneigung einer Tunnelentwässerung. Hierbei ist in folgende Komponenten zu unterteilen:

- Flächendränagen
- Filterbeton
- Dränagerohre
- Wartungs- und Revisionsbauwerke

Im Zuge mehrerer Untersuchungen wurde die Versinterungsneigung dieser Einzelkomponenten überprüft [29][31][35]. Als Ergebnis entstand ein optimales Grundsystem zur Herstellung künftiger, wartungsarmer Dränagesysteme. Parallel ermöglichen die Ergebnisse dieser Untersuchungen konkrete Aussagen hinsichtlich der Versinterungsbegünstigung durch Einzelkomponenten bei bestehenden Bauwerken.

Flächendränagen

Der versinterungsbegünstigende Einfluss ungeeigneter Flächendränagen ist für den Betreiber des Bauwerks zunächst kaum spürbar. Durch die Lage der Flächendränagen im System dränkter Bauwerke, also in der Regel als Vlies zwischen Abdichtungsbahn und vorläufiger Spritzbetonsicherung eingebaut, können die Auswirkungen der Versinterung in diesen Elementen auf Grund ihrer Unzugänglichkeit vom Wartungspersonal nicht erfasst werden.

Oberflächlich betrachtet könnte man zunächst annehmen, dass eine Flächendränge sogar

als eine Art Puffer für das Restsystem wirkt, da es bereits hier zu starken Versinterungen kommen kann, welche dann nicht mehr für das Dränagerohr relevant werden. Als Problem erweist sich jedoch langfristig, dass einerseits das Gesamtsystem an einer nicht revisionierbaren Stelle nachhaltig durch Versinterungen beeinträchtigt wird. Andererseits hat das die Drainage immer noch erreichende Bergwasser, auf Grund des nach Versinterungsentstehung geringeren Durchflusses in den Vliesen, deutlich höhere Kontaktzeiten mit der Spritzbetonsicherung und neigt daher zu stärkerer Elution. Eine ausreichende Transmissivität, also eine ausreichend hohe Durchflussrate für das Bergwasser durch das Vlies, ist daher zwingend notwendig [31].

Filterbeton

Wie auch bei den Flächendrängen, besteht für den Filterbeton zunächst selbst die Gefahr zu versintern. Das Eluat aus dem Spritzbeton gelangt durch die dränierende Wirkung des Filterkörpers in den Porenraum des Filters und kann hier bereits ausgefällt werden. In der Folge verliert der Filterkörper seine Funktion, und das Bergwasser wird nicht mehr in die Drainage transportiert. Auch hier gilt, dass ein versinterter Filter für das Wartungspersonal nicht erreichbar und daher auch nicht revisionierbar ist.

Die Möglichkeit der Elution von Calciumcarbonat aus dem Betonkörper besteht jedoch für Filterkörper und Spritzbeton im Prinzip gleichermaßen. Dies gilt vor allem, sofern für die Erstellung des Filters Portlandzemente verwendet werden, die weitaus höhere Elutionsraten entwickeln als z.B. Hochofenzemente [29][31]. Des Weiteren kann sich die Verwendung von gebrochenem und/oder ungewaschenem Zuschlag nachhaltig negativ auf die Versinterungsentwicklung auswirken, da in diesem Fall Unterkorn und Feinbestandteile eine spürbar versinterungsbegünstigende Auswirkung auf das Dränagesystem besitzen.

Dränagerohre

Bislang verwendete Dränagerohre zeichnen sich zumeist durch zu enge Schlitzweiten der Sickerschlitze aus. Im Regelfall wurden bis vor wenigen Jahren noch Rohre mit Schlitzweiten deutlich unter den mittlerweile in der ZTV-Ing geforderten 5-6 mm verwendet, teilweise sogar < 1 mm. Im Ergebnis neigen enge Schlitze dazu, bei Zutritt calcitabscheidender Wässer direkt zu versintern und damit ihre entwässernde Funktion zu verlieren (Bild 4.4).

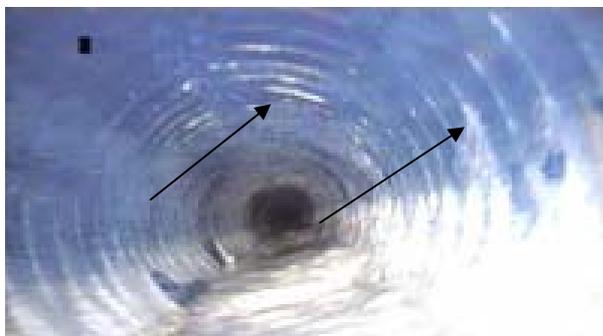


Bild 4.4: Versinterter Sickerschlitz eines Dränagerohres (Saukopftunnel)



Bild 4.5: Versinterungen im Bereich der Fließfläche eines Wellrohres (Saukopftunnel)

Sind diese Versinterungen einmal ausgehärtet, so ist das Calciumcarbonat auch durch Hochdruckspülungen nur schwer zu entfernen. Langfristig drohen die Schlitze ganz zu zu-

wachsen und damit endgültig ihre dränierende Wirkung zu verlieren. Dies wird zudem durch Reste alter Ablagerungen begünstigt, die bei der Spülung nicht aus den Schlitzten entfernt werden konnten. Als weiteres Problem haben sich Dränagerohre mit rauer Fließfläche herausgestellt. Unter „rau“ lassen sich hier sowohl gewellte Fließflächen (Bild 4.5) als auch nach allgemeinsprachlichem Gebrauch „raue“ Oberflächen der Rohrwandung im Fließbereich des Wassers subsumieren.

Hierbei kann es auch vorkommen, dass ursprünglich glatte Fließflächen, durch die Lasteinwirkung des sie umgebenden Filterpakets auf das Rohr, leichte Wellen ausbilden. Dieser Vorgang wurde z.B. am Hochwaldtunnel oder am Tunnel Königshainer Berge beobachtet, in dem sogenannte Verbundrohre, mit der beschriebenen, versinterungstechnisch ungünstigen Eigenschaft, verbaut wurden [30]. Bild 4.6 und Bild 4.7 demonstrieren, anhand einer Sinterscholle aus dem Bauwerk Königshainer Berge, eindeutig dass sich im Verlauf des Rohres ausbildende Wellenprofil, das hier quasi als Formgebung für die Sinterscholle gedient hat.



Bild 4.6: Sinterscholle - Aufsicht



Bild 4.7: Sinterscholle - seitlich

Eine erhöhte Rauigkeit kann ebenfalls durch die Verwendung von Vollsickerrohren, also rundum geschlitzten Rohren entstehen. Nach dieser Definition raue Fließflächen wirken, durch die in Folge der Rauigkeit entstehende Beunruhigung des Fließbildes, versinterungsbegünstigend. Diese versinterungsbegünstigende Wirkung rauer Rohre entsteht durch einen erhöhten Gasaustausch in Folge des Energieeintrags beim Wechsel des Strömungszustandes und eine Begünstigung der primär heterogenen Keimbildung. Die gebundene Kohlensäure wird durch die Umwälzung des Wassers ausgegast, und das Gleichgewicht zwischen Wasser-Kohlensäure und Kalk ungünstig verändert (Bild 4.8).



Bild 4.8: Raue Fließfläche eines Verbundrohres in Folge Schlitzung im Fließbereich

Deutlich erkennbar sind die leichten Versinterungen im Fließbereich, die sich vergleichsweise stark an den erkennbaren Erhebungen, in Folge der umlaufenden Schlitzung der Rohre (Pfeil), ausgebildet haben. Zusätzlich wird eine Anlagerung von gebildeten Kristallkeimen an diesen Fließwiderständen begünstigt.

Wartungs- und Revisionsbauwerke

Bei Wartungs- und Revisionsbauwerken kann es in Abhängigkeit von ihrer technischen und planerischen Ausführung zu versinterungsbegünstigenden Einflüssen kommen. Häufige Fehler bei Schachtbauwerken, welche sich nachhaltig versinterungsbegünstigend auswirken können, sind ungenügend ausgeführte Anschlüsse des Dränagerohres. Als Beispiel diene ein Schacht aus dem Hochwaldtunnel, bei dem deutlich ein Versatz des Rohres bei Anschluss (A) an den Revisionsschacht erkennbar ist, der links oben am Rohr beginnt und sich bis in die Sohle des Rohrs fortsetzt (Bild 4.9).

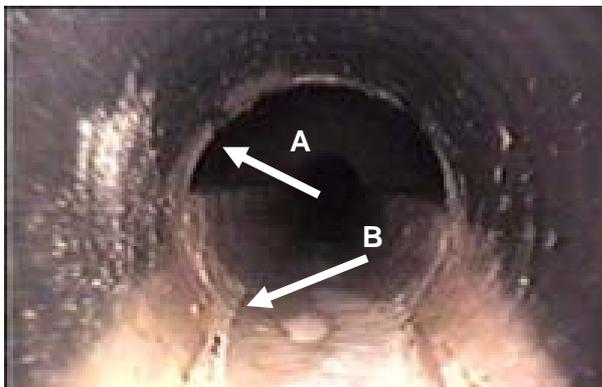


Bild 4.9: Versatz eines Dränagerohres bei Anschluss an den Revisionsschacht und daraus resultierende Versinterungen am Hochwaldtunnel



Bild 4.10: Roststäube im Dränagesystem des Hochwaldtunnels

Ebenfalls klar sichtbar sind Versinterungen im Versatzbereich (B). Der hier wirksame Versinterungsmechanismus ist dem bei rauen Fließflächen der Rohre auftretenden vergleichbar: Aus der starken Umwälzung des Dränagewassers im Versatzbereich folgt eine vermehrte Ausgasung des CO_2 und damit eine stärkere Ausfällung von Kalk an dieser Stelle. Diese Versätze sind bei einigen Schachttypen fast unvermeidlich, da systembedingt, können aber durch die Wahl geeigneter Schachttypen, z.B. mit angeformten Rohrstummeln, vermieden werden.

Als weiteres Problem erweist sich die Wahl der Schachtabdeckung. Sind die Abdeckungen nicht vollkommen dicht, so können Stäube aus dem Fahrbereich des Tunnels in die Dränage eingetragen werden und hier als „Impfkeime“ die Versinterungsentstehung im Rahmen der primär heterogenen Keimbildung begünstigen. Dieses Problem kann jedoch auch bei dichten und fest verriegelbaren Abdeckungen entstehen, wenn wie z.B. in Bild 4.10 die Unterseiten der Abdeckung von starker Rostbildung gekennzeichnet sind und so Roststäube in das System eingetragen werden.

Deutlich zu erkennen sind auf dem Bild die im Dränagewasser befindlichen Roststäube, die

sich durch Erschütterung der Abdeckung beim Öffnungsvorgang abgelöst haben. Im Dränagewasser können diese Stäube nicht nur als Impfkörper für CaCO_3 fungieren, sondern auch die Funktionalität eines Wasserbehandlungsverfahrens beeinträchtigen.

4.3.3 Versinterungsbegünstigende Ausführungsmängel

Die richtige Wahl an Komponenten des Systems kann eine optimale Versinterungsreduzierung nur bedingt garantieren. Dies liegt im Umstand begründet, dass Fehler in der Bauausführung bei Erstellung des Dränagesystems oftmals deutlich begünstigenden Einfluss auf die Versinterungsentstehung besitzen, auch trotz optimal gewählter Einzelkomponenten. Da bislang Qualitätssicherung bei der Erstellung von Dränagesystemen nur eingegrenzt üblich ist, stellen solche Mängel eher die Regel als die Ausnahme dar. Untersuchungen am Mühlbergtunnel zeigten bei einer Tunnellänge von 8400 m rund 2000 Schadstellen in den Rohren auf. Gleiches Bild in den Dränagerohren am Tunnel Königshainerberge, am Tunnel Wattkopf [28] oder am Tunnel Hochwald [30]. Letzterer musste in Folge der Wahl ungünstiger Rohre und unsachgemäßer Bauausführung bereits kurz nach Inbetriebnahme durch das Land Thüringen umfangreich saniert werden, wobei im Relining-Verfahren nachträglich kurze Rohrstücke in den beschädigten Bereichen eingefügt wurden. Die so entstehenden Schäden und ihre Auswirkung auf die Versinterungsneigung sind vielfältig und variieren von Baustelle zu Baustelle. Allerdings lassen sich gewisse, häufig wiederkehrende Beschädigungen von Dränagesystemen in Folge Mängeln aus der Bauphase des Tunnels herausstellen.

Unsachgemäßer Rohranschluss

Unsachgemäße Rohranschlüsse entstehen zumeist durch Verziehungen des Dränagerohres als Resultat falscher Lagerung oder auf Grund mangelhaft ausgeführter Muffenstöße der Rohre (Bild 4.11). Gemäß der Schadensklassifizierungen der Abwassertechnischen Vereinigung (ATV) ist zwischen horizontalen und vertikalen Versätzen und Längsversätzen (Muffenspalte) zu unterscheiden [3][4][48]. Durch Versätze oder Muffenspalte entstehen Turbulenzen im Dränagewasser, die zu verstärkter Ausgasung und damit zu verstärkten Ausfällungen führen. Mit der Zeit können sich schlimmstenfalls Versinterungsplatten bilden (A), die ein neues Abflusshindernis bilden, an dem es durch Begünstigung der primär heterogenen und der sekundären Keimbildung wiederum zu verstärkten Ausfällungen kommt. Durch Spülen lösen sich diese Sinterplatten zumeist von der Fließsohle, verkanten jedoch häufig an einer anderen Stelle im Dränagerohr und bilden dort wiederum ein höheres Abflusshindernis, das zu noch stärkeren Versinterungen führt (Bild 4.12).

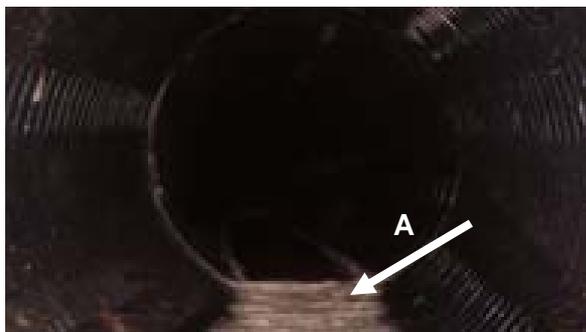


Bild 4.11: Unsachgemäßer Rohranschluss



Bild 4.12: Platte im Dränagerohr

Unterbögen

Wird die Bettung des Dränagerohres unzureichend ausgeführt, so können sich in Folge nicht durchgängiger Lagerung des Rohres auf einer Berme oder einem Bett aus Filterbeton Sackungen bilden, die gemäß der Schadensklassifizierung der Abwassertechnischen Vereinigung (ATV) als Unterbögen bezeichnet werden [3][4]. In diesen Unterbögen bilden sich strömungsberuhigte Zonen aus, in denen ausgefälltes Calciumcarbonat sedimentieren und aushärten kann. Bleibt nach erfolgter Spülung des Rohres an dieser Stelle ein erhärteter Rest an Kalk zurück so wird künftig eine Anlagerung und Sedimentation von Calciumcarbonat deutlich begünstigt. Unterbögen stellen ein häufiges Problem bei Tunnelentwässerungssystemen dar, welches aus mangelnder Qualitätssicherung in der Bauphase resultiert.

Verdrehte Dränagerohre

Bereits bezüglich ungünstig gewählter Einzelkomponenten wurde auf die Verwendung von Vollsickerrohren, also Rohren mit einer umlaufenden Schlitzung, als Versinterungsursache hingewiesen. Die im Fließbereich angeordneten Sickerschlitze beunruhigen das Fließbild des Dränagewassers und sorgen daher für eine Versinterungsbegünstigung. Gleiches gilt jedoch auch im Falle eines verdrehten Mehrzweck- oder Teilsickerrohres, bei dem in Folge der Verdrehung die Sickerschlitze in den Fließbereich wandern. Hier lassen sich ähnliche Versinterungen wie bei dem in Bild 4.8 gezeigten Dränagerohr feststellen.

Unsachgemäßer Einbau

Häufige versinterungsbegünstigende Schadensursache ist ein unsachgemäßer Einbau der Dränagerohre. Unter unsachgemäßem Einbau ist z.B. eine zu starke Verdichtung des Filterbetons und eine damit einhergehende Beschädigung des Rohres, in Folge zu großer Auflasten beim Verdichtungsprozess zu verstehen. Dies kann dann eine Deformation des Rohres, wie in Bild 4.13 dargestellt, nach sich ziehen oder sogar zum Bruch des Rohres führen. Ähnlich wie bei den im Fließbereich befindlichen Sickerschlitzen, wird durch die Deformation eine Strömungsbeunruhigung erzeugt, welche sich nachhaltig negativ auf die Versinterungsneigung des Systems auswirkt und die primär heterogene Keimbildung im Wasser begünstigt.

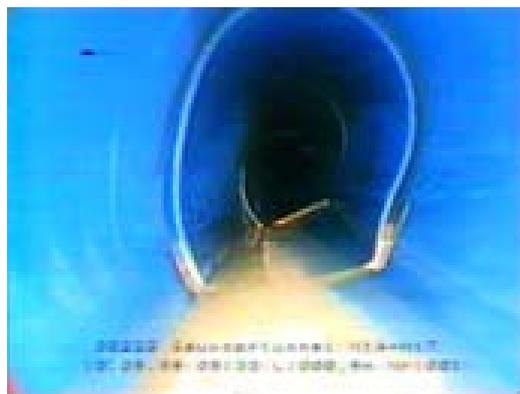


Bild 4.13: Deformiertes Dränagerohr (Saukopftunnel)

Fremdkörper im Dränagerohr

Zum Teil gelangen während der Bauphase, in Folge fehlender Abdeckungen und durch Fehler im Bezug auf die Behandlung der Revisionsschächte, Abfälle oder andere Gegenstände

in das System. Diese Fremdkörper (Bild 4.14) können sich als erheblich versinterungsbe­günstigend erweisen und sind durch Spülungen nur schlecht, zum Teil jedoch gar nicht mehr zu entfernen.



Bild 4.14: Fremdkörper im Dränagesystem (Saukopftunnel)



Bild 4.15: Strömungsbeunruhigung in Folge Fremdkörper im Dränagerohr (Rennsteigtunnel)

In der Folge bilden diese Fremdkörper in der Regel ein Abflusshindernis. In Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit entstehen so entweder strömungsberuhigte Zonen (geringe Fließgeschwindigkeit), in denen ausgefälltes CaCO_3 sedimentieren und aushärten kann (Bild 4.14), oder die Fremdkörper sorgen für eine hohe Beunruhigung des Fließbildes (Bild 4.15) (hohe Fließgeschwindigkeit), die zu einer erhöhten Ausgasung von CO_2 und damit einer verstärkten Ausfällung von CaCO_3 im weiteren Verlauf des Dränagestranges führen kann.

4.3.4 Uneffektive Wartungsintervalle und –verfahren

Oftmals liegen auch in der zeitlichen und organisatorischen Struktur von Reinigungsintervallen Gründe für verstärkte Versinterungserscheinungen von Dränagesystemen. Hierbei nimmt die Abfolge und Länge von Revisionszyklen allerdings weniger Einfluss auf die reine Entstehung von Versinterungen, als vielmehr auf ihre Intensität, ihre Härte und damit auf den zu ihrer Entfernung nötigen Arbeitsaufwand.

Untersuchungen am Saukopftunnel haben gezeigt, dass sich mit Hilfe eines auf das Bauwerk und seine Verhältnisse abgestimmten Wartungskonzeptes, ein enormes Einsparungspotential bei den versinterungsbedingten Wartungskosten erzielen lässt [31]. Bauwerksspezifisch lässt sich demnach stets ein optimales Verhältnis zwischen minimalem Reinigungsaufwand und maximaler Reinigungsleistung finden.

Darüber hinaus werden z.T. systematische Fehler bei der Ablagerungsbeseitigung durch das Wartungspersonal begangen. So wird z.B. oftmals entgegen der Fließrichtung des Dränagewassers gereinigt. Dies hat zur Folge, dass gelöste Ablagerungen im System verbleiben und nicht vollständig abgesaugt werden können. Häufigster Fehler ist allerdings die Verwendung von Spülfahrzeugen, welche im Vorfeld bereits bei der Reinigung kommunaler Abwassersysteme zum Einsatz gekommen waren. Durch diese Fahrzeuge kann es zu einem Eintrag einer aktiven Mikrobiologie aus dem kommunalen Abwassernetz in das Entwässerungssystem des Tunnelbauwerks kommen. Neben rein hygienischen Aspekten und

der Gefahr eines Transports dieser Mikrobiologie in die jeweilige Vorflut, kann es so aber auch zu einer Verschärfung der Versinterungsentstehung kommen. Die hierbei zumeist beobachteten Mikroorganismen entziehen dem Dränagewasser CO_2 und verändern damit das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht zu Ungunsten des Kalks.

Auswirkungen auf die Versinterungsneigung in Folge der hier geschilderten Probleme wurden bislang nicht durch experimentelle Untersuchungen quantifiziert. Daher ist an dieser Stelle nur eine qualitative Aussage, in Folge der an diversen Bauwerken gesammelten Erfahrungen, möglich [31][35].

4.3.5 Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse

Die vorliegende Analyse der tunnelbauspezifischen Versinterungsmechanismen liefert ein umfassendes Bild der Randbedingungen, unter denen sich Kalkablagerungen in Dränagen bilden können. Das Vorhandensein hydrochemischer Grundvoraussetzungen für Ablagerungsbildung wird beim Tunnelbau demnach oft erst durch ungeeignete Baustoffe, Mängel in der Dränagenausbildung, die Wahl ungeeigneter Komponenten des Systems oder durch falsche Wartungskonzepte induziert. Die aufgezeigten Problemfelder, wie z.B. die aufgrund unzureichender Qualitätssicherung in der Bauphase entstehenden Ausführungsmängel von Dränagesystemen, beeinflussen direkt oder indirekt das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht des Dränagewassers und können so auch bei eigentlich nicht calcitabscheidenden Bergwässern zu einer konkreten Ablagerungsbildung führen.

Hieraus lassen sich einige grundlegende Erkenntnisse für die weiteren Untersuchungen ableiten:

- Die Reduzierung der Ablagerungsbildung beginnt nicht erst mit dem Wechsel vom Bau- in den Betriebszustand, sondern bereits in der Planungsphase, durch die Wahl und Durchbildung des Entwässerungskonzeptes.
- Zur vollständigen Erfassung der Versinterungsbildung eines Systems ist die Dokumentation von hydrochemischen Parametern erforderlich.
- Diese muss jedoch durch umfangreiche Beobachtungen des Zustandes zwischen den Revisionsschächten ergänzt werden.
- Hierzu sind Kamerabefahrungen der Dränageabschnitte das einzig probate Mittel, da nur sie den Zustand zwischen den Revisionsschächten erfassen können.
- Einsparungen bei den Wartungskosten können bereits durch intensive Studie der Versinterungsneigung des Systems und einer dementsprechend angepassten Optimierung des Wartungskonzeptes erzielt werden.
- Um eventuelle Einsparungspotentiale bei den versinterungsbedingten Wartungskosten eines dränierten Tunnelbauwerks abschätzen zu können, ist die umfassende Kenntnis der Versinterungsbildung am System grundlegende Voraussetzung.

4.4 Bewertung der bisherigen Nachweismethodik vor dem Hintergrund tunnelbauspezifischer Versinterungsentstehung

4.4.1 Phänomenologische Datenerfassung

Die Analyse der tunnelbauspezifischen Versinterungsmechanismen hat gezeigt,

- dass die Versinterungsneigung einer Tunneldränage zwar primär von hydrochemischen Randbedingungen abhängt, jedoch stark von den äußeren Bedingungen (u.a. Spritzbetonzusammensetzung, Wahl der Einzelkomponenten), vor allem aber auch von den Bedingungen innerhalb der Dränage, also zwischen den Revisions-schächten, beeinflusst wird.
- dass neben Mängeln der Ausführung und der Wahl ungeeigneter Komponenten zusätzlich auch fehlerhafte Wartung und Instandsetzung der Dränageabschnitte ein Problem darstellt (z.B. in Form von Beschädigungen des Systems oder im System verbleibenden Restablagerungen). Diese können zu einer verstärkten Versinterungsneigung beitragen, da sie häufig die primär heterogene und die sekundäre Keimbildung im Dränagesystem begünstigend beeinflussen.
- dass demnach die Erfassung der Versinterungsneigung eines Tunnelentwässerungssystems ausschließlich anhand der Betrachtung der Revisionsschächte wirklich kritische und signifikante Abschnitte des Systems nur marginal bis gar nicht berücksichtigt.
- dass eine phänomenologische Erfassung der Dränageabschnitte zwischen den Revisionsschächten somit für eine umfassende Beschreibung des Versinterungsverhaltens unabdingbar ist.

Dies gilt konsequenter Weise sowohl allgemein als auch im Speziellen bei Einsatz eines Härtestabilisators und dem Nachweis seiner Funktionalität. Wird hierbei z.B. die Ablagerungsneubildung eines Entwässerungssystems nur anhand der Revisionsschächte beurteilt, so unterliegen auf dort gemachten Beobachtungen basierende Schlussfolgerungen einer deutliche Verzerrung. Für die Versinterung des Systems weitaus signifikantere Dränageabschnitte als die Revisionsschächte werden bei dieser Betrachtung ausgeblendet. Das so gewonnene Bild ist damit mehr als unvollständig und seine Aussagekraft in Zweifel zu ziehen.

Bezogen auf bisherige Erfahrungsberichte zum Einsatz von Härtestabilisatoren an Tunnelentwässerungssystemen lässt sich hieraus ableiten, dass eine der zentralen Schlussfolgerungen des Funktionsnachweises, die Beobachtungen zum Rückgang der Ablagerungsneubildung, bislang anhand einer für das jeweilige Gesamtsystem wenig repräsentativen phänomenologischen Beobachtung erfolgt.

Der Umfang der phänomenologischen Datenerfassung ist daher zu erweitern und um geeignete Beobachtungen zu ergänzen.

4.4.2 Analytische Datenerfassung

Als Schluss aus den Betrachtungen der Chemismen am Hochwaldtunnel lässt sich erkennen,

- dass die Entwicklung des Gehalts an Ionen der Härtebildner innerhalb einer Bergwasserdrainage von verschiedensten Randbedingungen beeinflusst wird, und sich daher die realen hydrochemischen Bedingungen und Entwicklungen nur begrenzt durch theoretische Überlegungen zum Bergwasserchemismus abbilden lassen.
- dass sich auf Grund der vielfältigen Einflüsse, die sich noch dazu in ihrer Wirkung laufend ändern können, eine Konstanz bei der Hydrochemie bzw. der Bergwasserzusammensetzung nur begrenzt ausbildet.
- dass sich eine Änderung des Calciumgehalts daher offensichtlich auch ohne signifikante Korrelation mit dem Verlauf anderer hydrochemischer Leitparameter (Temperatur, pH-Wert) ergeben kann, sondern vornehmlich auch von eben diesen Randbedingungen nachhaltig beeinflusst wird.
- dass somit eine Erhöhung der Calciumionenkonzentration bei Verwendung eines Härtestabilisators und ansonsten konstanten Leitparametern und rückläufiger Ablagerungsneubildung zwar eine notwendige, aber bei weitem keine hinreichende Bedingung für den Nachweis der Funktionalität der Härtestabilisierung im Rahmen einer Tunneldrainage ist.
- dass Magnesiumverbindungen keine verlässliche Quelle für Aussagen hinsichtlich des Einflusses von Härtestabilisatoren sind.

Die bisher verwandte analytische Methodik ist demnach zwar im Prinzip im Sinne chemischer Zusammenhänge korrekt. Die aus den so gewonnenen Daten gefolgerten Schlüsse können jedoch in Folge der dargestellten Zusammenhänge nur eine oberflächliche Richtigkeit besitzen. Die Bedingung, dass bei Verwendung eines funktionalen Härtestabilisators eine Zunahme der Konzentration an Härtebildnern zu beobachten sein muss, ist daher von hinreichend auf notwendig zurückzustufen. Zudem sollte eine überarbeitete Nachweismethodik die Bewertung der Entwicklung der Calciumionen im System bevorzugen und künftig Magnesiumverbindungen ausklammern.

4.4.3 Fazit der Bewertung für bisher durch Versuche gewonnenen Erkenntnisse zu Härtestabilisatoren und ihren Einsatzmöglichkeiten

Mit Hilfe einer genaueren Prüfung der bisher verwandten Nachweismethodik konnte herausgestellt werden, dass die bisherigen Schlussfolgerungen der Nachweise nur auf notwendigen nicht aber auf hinreichenden Bedingungen beruhen. Die Untersuchungen haben zudem gezeigt, dass bisherige phänomenologische Beobachtungen, zur Wirkung des Härtestabilisators im betrachteten System, unter wenig repräsentativen Bedingungen vorgenommen wurden. In Folge der bisherigen Methodik beschränkt man sich bislang fast ausschließlich auf Datenerfassungen an den Revisionsschächte, an denen jedoch viele der tunnelspezifischen Versinterungsmechanismen und -bilder nicht beobachtet werden können. Zudem bleiben durch die Fokussierung auf Revisionsschächte viele, der aus Mängeln am System

entstehenden, Probleme unberücksichtigt.

Auf diesen Schlussfolgerungen und Beobachtungen basierende Erkenntnisse, hinsichtlich einer grundsätzlichen Funktionalität des Verfahrens, sind demnach in ihrer Verlässlichkeit und Allgemeingültigkeit in Frage zu stellen.

4.5 Erweiterung der bisherigen Nachweismethodik

Im Folgenden wird die bislang verwandte Nachweismethodik auf Grundlage der Erkenntnisse dieses Kapitels geeignet ergänzt. Hierzu werden die in Kapitel 3 dargelegten phänomenologischen und analytischen Datenerfassungen geeignet erweitert und zusätzliche ökologische und verfahrenstechnische Bewertungsaspekte formuliert, die zu einer Gesamtbeurteilung der Effektivität des Verfahrens notwendig sind.

4.5.1 Erweiterung der phänomenologischen Datenerfassung

Eine phänomenologische Erfassung der Ablagerungsentwicklung im Bereich der Drainageabschnitte zwischen den Revisionsschächten ist gemäß der bisherigen Erkenntnisse für eine umfassende Beschreibung des Versinterungsverhaltens unabdingbar.

Wie bereits in diesem Kapitel dargelegt, sind Kamerabefahrungen zwischen den Revisionsschächten das einzig probate Mittel, um Schäden oder die Ablagerungsentwicklung zwischen zwei Revisionsschächten vollständig zu erfassen. Aus diesem Grund ist die Durchführung von Kamerabefahrungen als sinnvolle Ergänzung zu den bislang vorgenommenen phänomenologischen Datenerfassungen zu sehen.

Hierbei müssen einerseits Schäden und Ausführungsmängel am System erfasst und dargestellt sowie die Entwicklung der Versinterung an diesen Stellen explizit beurteilt werden.

Andererseits sind sämtliche Ablagerungen im System bzw. im konditionierten Abschnitt, zu untersuchen, zu klassifizieren und zu kartographieren sowie ihre Entwicklung unter dem Einfluss der Konditionierung einer vergleichenden Betrachtung zu unterziehen (Vergleich „vorher-nachher“).

4.5.1.1 Erfassung und Klassifizierung von Schäden

Die Erfassung, Beschreibung und Kartographierung von Schäden und Ausführungsmängeln an Entwässerungssystemen kann gemäß dem von der Abwassertechnischen Vereinigung (ATV) entwickelten Schadenskatalog erfolgen. Zur Klassifizierung liefert die ATV durch Arbeitsblatt 143 Teil 2 in Kombination mit dem Merkblatt ATV – M 149 ein eigenes Dokumentations- und Bewertungskonzept [17].

Standardmäßig werden bei Durchführung von Kamerabefahrungen diese Schadensbenennungen und ihre Klassifizierungen bereits durch die ausführende Kanalkamerafirma vorgenommen. Da die so entstehenden Schadensdokumentationen üblicherweise jeweils abschnittsweise erstellt werden, empfiehlt sich als ergänzender Schritt, die Schadensdokumentationen in einen übersichtlichen Gesamtplan des zu konditionierenden Abschnitts zu über-

führen. So kann auf einen Blick eine Analyse der Schäden des Gesamtsystems erfolgen. Weiterhin können so die, eventuell hinsichtlich der Effektivität der Härtstabilisierung genauer zu untersuchenden, Drainageabschnitte eingegrenzt werden.

Dazu sind die beobachteten Schäden hinsichtlich ihrer Versinterungsrelevanz zu beurteilen. Hierbei ist beispielsweise ein Riss in der Rohrfirste als bedeutende Schädigung anzusehen, die jedoch, ohne einen Einbruch von Filterbeton bzw. ohne Beeinflussung der Fließfläche, keinerlei versinterungstechnische Relevanz besitzt. Auf diese Weise entstehen Darstellungen, wie in Bild 4.16 exemplarisch für einen Abschnitt des Hochwaldtunnels entwickelt.

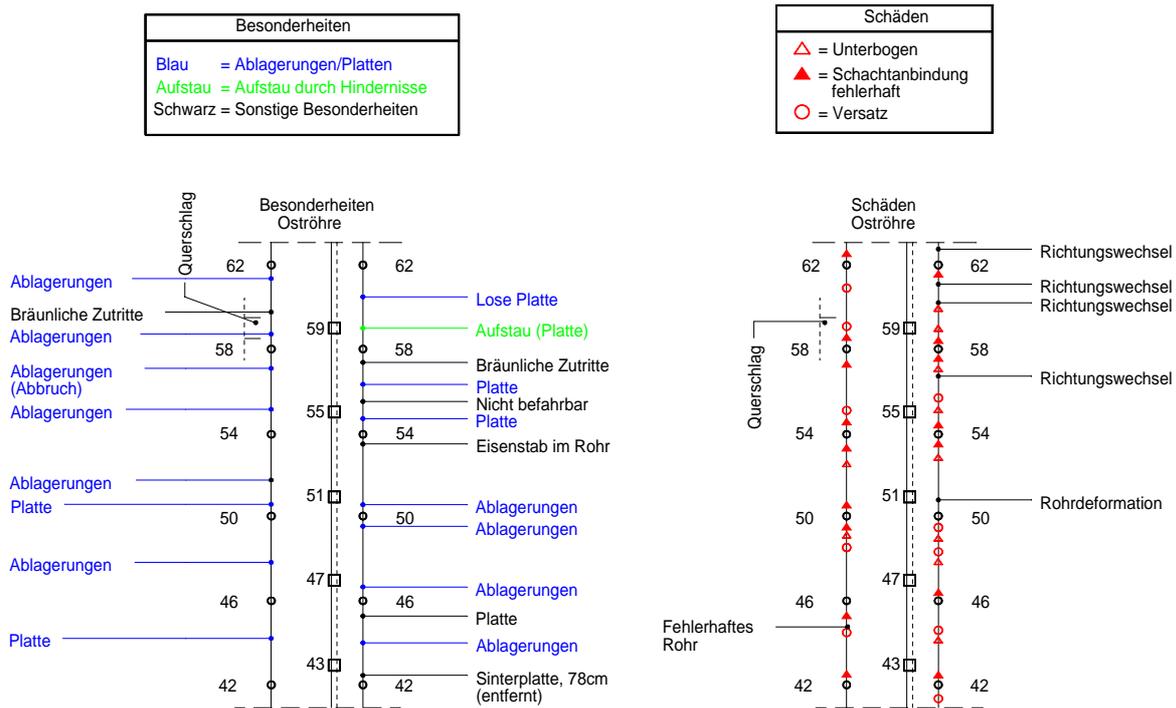


Bild 4.16: Schadensbilder und Ausführungsmängel an einem Abschnitt des Hochwaldtunnels

4.5.1.2 Erfassung von Ablagerungen

Die detaillierte Erfassung von Calcit-Ablagerungen in einem Dränagesystem sind vom Lehrstuhl für Bauverfahrenstechnik, Tunnelbau und Baubetrieb der Ruhr-Universität Bochum bereits mehrfach vollzogen worden [29][30]. Die hierbei angewandte Methode hat sich bewährt und liefert einen ausreichend genauen Überblick über Versinterungen in Dränagesystemen.

Hierbei wird, wie in Bild 4.17 exemplarisch für den Hochwaldtunnel dargestellt, zwischen Abschnitten ohne, mit leichten, mit mittleren und mit starken Versinterungen unterschieden, die dann entlang der untersuchten Haltungsabschnitte kartographiert werden. Die Klassifizierung der beobachteten Ablagerungen unterliegt dabei einer Ungenauigkeit und Schwankung, in Abhängigkeit vom jeweils Auswertenden, da eine Zuordnung hinsichtlich einer der vier Kategorien der persönlichen Einschätzung unterliegt. Dieses Manko kann einerseits durch Redundanz in Form mehrfacher Auswertung der Bilder reduziert werden. Andererseits hebt sich diese Unschärfe durch Begutachtung der relativen Entwicklung, von vor zu nach der Konditionierung mit einem Härtestabilisator, auf.

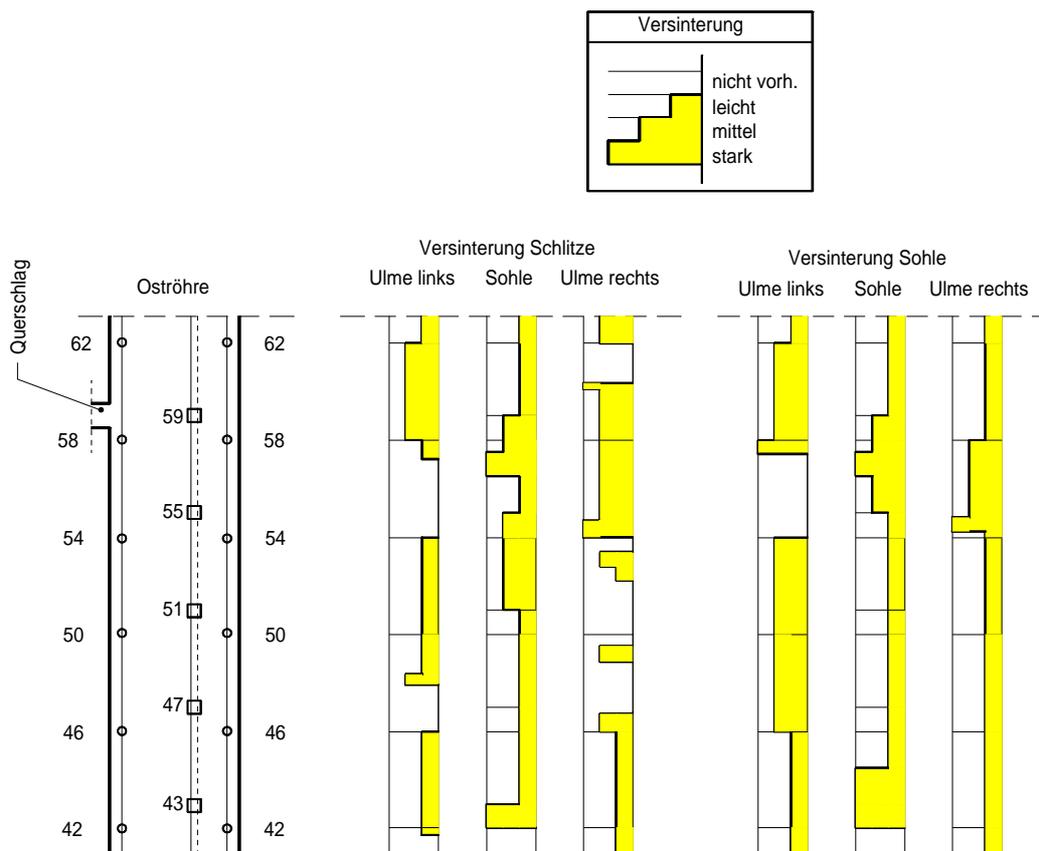


Bild 4.17: Versinterungsbilder einer Auswertung an einem Abschnitt des Hochwaldtunnels [30]

4.5.2 Erweiterung der analytischen Datenerfassung

Wie im Rahmen der Bewertung der analytischen Methodik erörtert, ist es sinnvoll, auf die Bewertung von Calciumverbindungen zu fokussieren und die Bewertung des Gehalts an Magnesiumverbindungen auszuklammern. Zu diesem Zweck ist die Bestimmung des Calciumionengehalts im Dränagewasser ausreichend.

Zusätzlich ist sinnvoller Weise die Calcitsättigung nach DIN 38 404-10 [10] zu bestimmen. Da hier weitere Einflussfaktoren wie Temperatur und auch elektrische Leitfähigkeit eine Rolle spielen, bildet die Ermittlung der Calcitsättigung einen direkten Maßstab für die Neigung des Bergwassers zur Abscheidung von Calcit. Zudem ist durch eine Bewertung der Calcitsättigung eine Abschätzung hinsichtlich des zu erwartenden Kristallwachstums möglich. Erst

für $SI > 1,0$ kann der kritische Radius des sich bildenden Kristallkeims überschritten werden und das Kristallwachstum einsetzen. Für eine objektive Bewertung der Effektivität einer Härtestabilisierung auf das Kristallwachstum, sollte daher $SI > 1,0$ als Voraussetzung gelten.

4.5.3 Ergänzung des Umfangs der zu beobachtenden Kriterien

4.5.3.1 Ökologie

Der Wirkstoff PASP ist durch seine Zulassung als unbedenklich eingestuft, und auch seine Biotoxizität ist prinzipiell als problemlos anzusehen.

Bislang wird daher, als ergänzende ökologische Komponente, im Rahmen der Nachweisführung und Untersuchung bei Einsatz eines Härtestabilisators, vornehmlich die Entwicklung der Wirkstoffkonzentration entlang der Konditionierungsstrecke begutachtet. So soll durch Kontrolle der Wirkstoffmenge, vor Übergabe des Dränagewassers an die Vorflut, die Einhaltung der behördlich vorgegebenen Grenzwerte – zumeist 10 mg/l – abgesichert werden.

Zusätzlich empfiehlt sich allerdings die optische Erfassung des Zustandes des jeweils konditionierten Abschnitts sowie eine Bestimmung von Keimzahlen im Wasser und am eingesetzten Härtestabilisator. Diese Untersuchungen ergeben sich aus der Überlegung, dass PASP auf Grund seiner guten biologischen Abbaubarkeit als ein Nährstoff für im Dränagewasser befindliche Bakterienstämme fungieren kann. Das Vorhandensein einer aktiven Mikrobiologie könnte dann im Extremfall zu einem relativ unkontrollierten Wachstum und damit zur Kontaminierung des konditionierten Abschnitts führen.

4.5.3.2 Verfahrenstechnik

Die angewandte Verfahrenstechnik ist zusätzlich zu bewerten. Dies umfasst beispielsweise, neben Aussagen zur Rezeptur, auch Erkenntnisse hinsichtlich der Auflösungsgeschwindigkeit, in Abhängigkeit von angetroffenen Rahmenbedingungen oder unerwarteten Phänomenen bei Einsatz von PASP-Härtestabilisatoren in einem Dränagesystem.

5 Experimentelle Untersuchungen

5.1 Vorstellung des Versuchsprogramms

5.1.1 Zielsetzungen des Versuchsprogramms

Als Zielsetzungen des Versuchsprogramms sind folgende Punkte herauszustellen:

- Untersuchung der Funktionalität des Härtestabilisators unter den Randbedingungen einer Tunneldrainage und Schließen der diesbezüglichen Wissenslücken, in Abhängigkeit vom jeweiligen Einsatzspektrum des Härtestabilisators.
- Anwendung der erweiterten Nachweismethodik auf ein konkretes Beispiel und Überprüfung ihrer Aussagekraft im Vergleich zur ursprünglichen Methodik.

5.1.2 Zu untersuchende Einsatzspektren und dabei zu berücksichtigende Funktionalitätskriterien für Härtestabilisatoren

Aufgrund der dargestellten Problematik bei Verwendung von flüssigen Härtestabilisatoren, vor allem der Konstanz in der Wirkstoffzugabe und den hieraus resultierenden Problemen (z.B. Biofouling bei Trockenfallen der Drainage), sind diese gemäß neuerer Erkenntnisse nur unter ganz bestimmten Randbedingungen verwendbar (unterste Grenze für eine technisch sinnvolle Nutzung $Q_{\min} > 3 \text{ l/s}$ [37]). Diese Bedingungen können nur wenige Bauwerke in Deutschland erfüllen [28]. Daher wird die Betrachtung im Folgenden auf die Verwendung von Depotsteinen begrenzt und auf die Untersuchung von flüssigem Härtestabilisator verzichtet.

Die erweiterte Nachweismethodik ist in ihrer Anwendung von der Aggregatsform des Härtestabilisators unabhängig, sodass diesbezüglich für feste Härtestabilisatoren gewonnene Erkenntnisse auch auf flüssige Härtestabilisatoren übertragbar sind.

Die möglichen Einsatzbereiche fester Härtestabilisatoren (Filterschicht, Revisionschächte [16][55]) sind durch geeignete Einzelversuche abzudecken. Die hierbei zu bewertenden Kriterien werden im Folgenden erörtert. In Abhängigkeit vom jeweiligen Aufbau des Einzelversuchs, lassen sich einige dieser Kriterien unterschiedlich messbar machen und werden daher im Bezug auf den jeweiligen Einzelversuch im weiteren Verlauf dann noch genauer konkretisiert:

- **Hydrochemische Entwicklung**

Die Effektivität des Härtestabilisators lässt sich anhand der hydrochemischen Leitparameter und ihrer Entwicklung beschreiben. Diese Entwicklung ist zu analysieren und hinsichtlich eines (spürbaren) Einflusses zu bewerten.

- **Ablagerungsentwicklung**

Der Einfluss des Härtestabilisators auf die Ablagerungsentwicklung ist versuchsspe-

zifisch zu ermitteln und zu bewerten. Hierbei sind einerseits bereits im System bestehende Ablagerungen - sofern vorhanden - und andererseits die Ablagerungsneubildung getrennt zu betrachten. Letztere Bewertung ist sowohl hinsichtlich der Qualität (hinsichtlich der Härte und Widerstandsfähigkeit der Ablagerungen) als auch der Quantität (hinsichtlich des reinen Aufkommens) der Ablagerungen zu differenzieren.

▪ **Ökologie**

Der ökologische Aspekt umfasst einerseits die Bewertung der Konzentration des Wirkstoffs im Bergwasser, also die Einhaltung behördlicher Grenzwerte. Andererseits ist hierbei das Zusammenspiel des Härtestabilisators und seiner speziellen Aggregatsform, mit den Randbedingungen der Bauwerksdränage zu sehen. Da der Wirkstoff auf Grund seiner biologischen Abbaubarkeit als Nährstoff für Mikroorganismen dienen kann, ist auf eventuelles Biofouling besonderes Augenmerk zu legen.

▪ **Verfahrenstechnik**

Hinsichtlich des jeweiligen Einsatzspektrums ist die Verfahrenstechnik zu bewerten und Probleme, die in Folge der verwendeten Verfahrenstechnik auftreten können, darzustellen. Dies umfasst beispielsweise Erkenntnisse zur Auflösungs geschwindigkeit der Depotsteine oder Eigenheiten ihrer Rezeptur in Verbindung mit dem Dränagewasser.

5.1.3 Wahl eines geeigneten Bauwerks

Als geeignetes Bauwerk wird der Saukopftunnel bei Weinheim ausgewählt. Aufgrund der im Zuge eines Forschungsvorhabens durchgeführten umfangreichen Untersuchungen an dessen Dränagesystem [29] kann ohne erneuten hohen Aufwand bei der Voruntersuchung ein aussagekräftiger Ausgangszustand ermittelt werden. Hinzu kommt die günstige Anordnung des Lüftungsbauwerks in Tunnelmitte, welches den Einsatz von Versuchswannen zur Simulation von Filterschichten ermöglicht, so wie bereits auch bei früheren Untersuchungen zu Einzelkomponenten von Entwässerungssystemen durchgeführt [29].

5.1.4 Durchzuführende Einzelversuche

Anhand der zu untersuchenden Einsatzspektren, der Effektivitätskriterien und des ausgewählten Bauwerks ergibt sich nachfolgend dargestellte grundlegende Konzeption für Einzelversuche:

- Voruntersuchungen im Labor zur Bestimmung von Anhaltswerten zur Auflösungsgeschwindigkeit von Depotsteinen.
- Untersuchung der Eignung fester Härtestabilisatoren in einer simulierten Filterschicht durch Aufstellung eines Versuchsstandes im Lüftungsgebäude des Saukopftunnels. Speisung des Versuchsstandes mit dem Wasser der linken Ulmdränage des Saukopftunnels durch Aufstau des Dränagewassers bei Schacht 112L

und Abfluss des Wassers durch den Versuchsstand.

- Untersuchung der Eignung fester Härtestabilisatoren in den Dränageleitungen eines Tunneldränagesystems durch Bestückung der zur Versinterung neigenden Revisionschächte der rechten Ulmdränage des Saukopftunnels [31] und somit Konditionierung der Dränageleitung zwischen den Schächten 136R bis 106R.

Voruntersuchungen zur Gewinnung von Anhaltswerten bezüglich der Auflösungsgeschwindigkeit von Depotsteinen in Abhängigkeit von spezifischen Änderungen hydrochemischer Leitparameter sind gerade für den Einsatz der Depotsteine in Filterschichten notwendig. Einmal in eine Filterschicht eingebrachte Depotsteine können auf Grund des Aufbaus des Querschnitts nicht erneuert werden. Die Einbauorte der Depots sind nach Betonierung der Innenschale künftig unerreichbar. Daher ist die Auflösungsgeschwindigkeit der Depotsteine für diesen Einsatzbereich ein besonders entscheidendes Kriterium.

Zur besseren Übersicht sind die Einzelversuche für den Saukopftunnel in nachfolgendem Bild 5.1 kurz dargestellt. Hierbei kann eine schematische Darstellung des Aufbaus des Entwässerungssystems Saukopftunnel und die Positionierung der jeweiligen Versuchsstrecken entnommen werden.

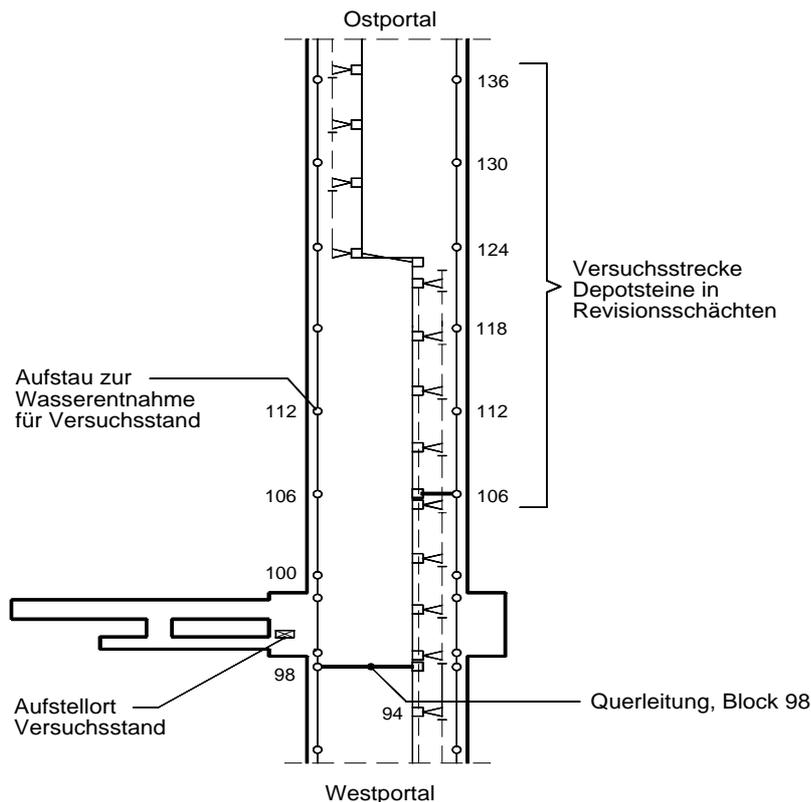


Bild 5.1 Schematische Darstellung des Entwässerungssystems Saukopftunnel und der Versuchsstrecken

5.1.5 Versuchsaufbauten

5.1.5.1 Voruntersuchungen im Labor

Mit Hilfe einer Versuchswanne wird im Labor ein Gerinne simuliert. Hierbei wird das Wasser in einem halboffenen Kreislauf geführt. Ziel des Versuchs ist es, die Auflösungsgeschwindigkeit des Polysuccinimids und des Polyacrylats unter Bedingungen zu beobachten, die eine Dokumentation des Auflösungsprozesses bei verschiedenen hydrochemischen Bedingungen ermöglicht.

Aus diesem Grund ist der Versuch in drei Phasen unterteilt:

- Phase A: Beaufschlagung des Polysuccinimids mit Trinkwasser (pH-Wert um 8)
- Phase B: Beaufschlagung des Polysuccinimids mit basischem Wasser (pH-Wert um 11)
- Phase C: Beaufschlagung des Polyacrylats mit basischem Wasser (pH-Wert um 11)

Als Beschickung des Standes wird mit rund $6 \text{ m}^3/\text{d}$ ein für den Saukopftunnel zu erwartender Volumenstrom gewählt. Die in Bild 5.1 dargestellte Aufbausituation ist bei allen drei Phasen identisch.

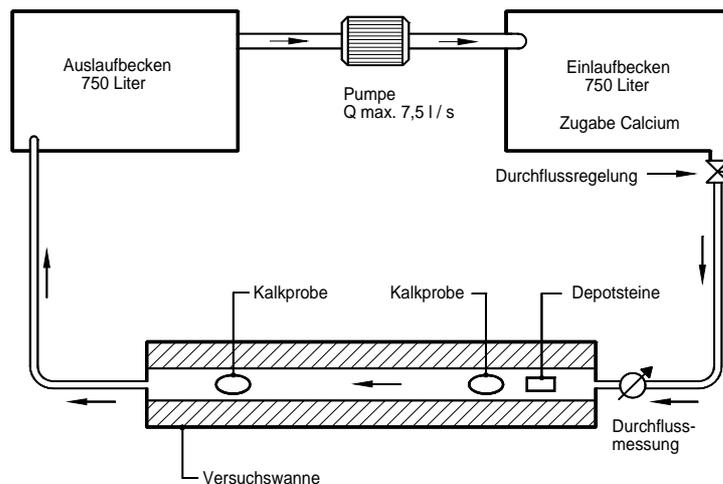


Bild 5.2 Schematische Darstellung der Aufbausituation bei den Vorversuchen

5.1.5.2 Fester Härtestabilisator in simulierten Filterschichten am Saukopftunnel

Für Untersuchungen zu Härtestabilisatoren in der Filterschicht eines Tunnelbauwerks wird mit Hilfe zweier Versuchswannen im Bereich des Lüftungsgebäudes des Saukopftunnels eine reale Filterschicht simuliert. Beide Wannen sind von ihrem Aufbau her identisch gestaltet, wobei eine mit Hilfe von PSI-Depotsteinen konditioniert, die andere hingegen unkonditioniert ausgeführt wird. Bild 5.3 zeigt den exemplarischen Querschnitt einer Versuchswanne. In beiden Wannen befindet sich eine Magerbetonsohle auf der das Dränagerohr aufliegt. Es

handelte sich hierbei um Dränagerohre der Nennweite DN 150 mit tunnelförmigem Querschnitt und einer Schlitzbreite von 0,8mm. Überschüttet sind die Dränagerohre mit einem Filterkies, Kornfraktion 16-32mm, der aus einer Charge stammt und zur Verhinderung des Eintrags von kalkhaltigen Substanzen aus dem Kies vor dem Einbau gewaschen wird.

Um möglichst realitätsnahe Versuchsbedingungen zu schaffen, wird zur Beschickung des Versuchsstandes das Wasser der Dränage des Saukopftunnels verwendet. Zu diesem Zweck wurde im Revisionschacht 112 L ein Aufstau haltungsaufwärts erzeugt, der beide Wannen des Standes mit identisch zusammengesetztem Dränagewasser versorgt. Bei beiden Wannen liegen somit hydrochemisch vollkommen identische Ausgangsbedingungen vor.

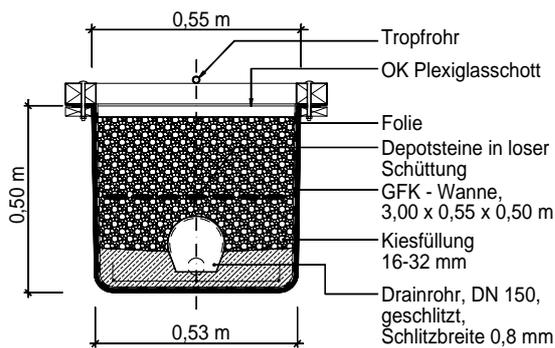


Bild 5.3 Querschnitt Versuchswannenaufbau



Bild 5.4 Livebild Versuchsstand

Es existieren derzeit keine dezidierten Einbauvorschriften für Depotsteine in Filterschichten. Darüber hinaus bestehen in der Schweiz und in Deutschland unterschiedliche Ansichten hinsichtlich Art und Weise des Einbaus und des Umfangs der Konditionierung. Daher umfasst der Versuch zwei Versuchsphase, in denen die verschiedenen regional bevorzugten Einbauvarianten für die Depotsteine simuliert werden. Für jede Phase wird der Filterkies komplett ausgetauscht.

Phase A: Schweizer Variante

In der Schweiz werden Härtestabilisatoren, speziell für den Einsatz in Filterschichten, auch in Form eines großformatigen Blocks geliefert. Aus diesem Grund wird im Rahmen der Phase A durch Depotsteinsäcke die Verwendung solcher Blöcke simuliert. In Anlehnung an die in [16] als Konditionierung des Bergwassers des Gotthardtunnels empfohlene minimale Menge von 0,5 kg/lfdm, wird je ein Sack PSI-Depotsteine zu Beginn, in der Mitte und am Ende einer der beiden Wannen positioniert (Bild 5.5). Bei einer Länge von 3 m je Teststrecke ergibt sich so eben jene Mengenvorgabe. Zu diesem Zweck wird die Rohrfirste zunächst mit einer 7cm Kiesschüttung überdeckt, auf der die Säcke abgelegt werden.

Phase B: Alternative Variante

Außerhalb der Schweiz wird vielfach eine Variante bevorzugt, bei der die Depotsteine in loser Schüttung in einer bestimmten Höhe über der Rohrfirste angeordnet werden. Hinsichtlich des Einbaus des Härtestabilisators liegt der einzige Unterschied zu Phase A in der Anordnung der Depotsteine, welche nun gleichmäßig in der Versuchswanne, wiederum etwa

7 cm über der Rohrfirste verteilt werden (Bild 5.6). Für den Inhalt von drei Säcken à 500 g ergibt sich so die in der Schweiz vorgegebene, minimale Konzentration von 0,5 kg/lfdm.



Bild 5.5 Positionierung der Säcke in Phase A



Bild 5.6 Ausgestreute Depotsteine in Phase B

5.1.5.3 Fester Härtestabilisator in der Dränageleitung des Tunnelbauwerks Saukopf

Für die Durchführung der Versuchsreihe sind die Haltungen zwischen den Schächten 136 bis 106 der rechten Ulmdränage des Saukopftunnels ausgewählt worden. Im Zuge früherer Untersuchungen konnte dieser Bereich als stark zur Versinterung neigend beschrieben werden [31].

Aufgrund des Umstandes, dass es derzeit nicht möglich ist, eine exakt auf das jeweilige Bauwerk angepasste Dosierung an Härtestabilisatoren zu formulieren, wird bislang, in Abhängigkeit vom Bauwerk, eine freie Grunddosierung gewählt und diese dann sukzessive den Gegebenheiten vor Ort angepasst. Daher wurde hier zunächst eine homogene Dosierung von je zwei Sack pro Schacht gewählt (= rd. 1kg Depotsteine pro Schacht). Zusätzlich wurde in jedem Schacht der Einsatz von Netzschläuchen vorgesehen (exemplarisch in Bild 5.7).



Bild 5.7 Aufbausituation Schacht 136 R



Bild 5.8 Aufbausituation Schacht 106 R

Zu beachten ist bei diesem Versuchsaufbau, dass in Schacht 106R, aufgrund der in [31]

beschriebenen Umbaumaßnahmen, ein Aufstau anzutreffen ist, der für einen Wasserstand von rund 30 cm im Schacht sorgt. Im Gegensatz zu allen anderen Schächten, liegen die Depotsteinsäcke daher nicht teilweise an der Luft, sondern sind zu jeder Zeit vollständig von Wasser umspült, erkennbar in Bild 5.8, anhand der Spiegelung auf der Wasseroberfläche.

5.1.6 Versuchsabläufe und versuchsspezifische Konkretisierung des Auswertungsschemas

5.1.6.1 Voruntersuchungen im Labor

Der Volumenstrom und der pH-Wert sind als die für den Auflösungsprozess primären Einflussfaktoren möglichst konstant zu halten. Der Volumenstrom kann durch die im Versuchsaufbau vorgesehene Pumpe genau gesteuert werden. Der pH-Wert wurde durch täglich mehrfache Kontrollmessungen überprüft und gegebenenfalls durch Zugabe von $\text{Ca}(\text{OH})_2$ stabilisiert. Natürlicherweise unterliegt der pH-Wert bei diesem Vorgehen einigen Schwankungen. Eine Konstanz des pH-Werts ist jedoch nur durch unverhältnismäßig größeren Aufwand (kontinuierliche Analytik in Verbindung mit gekoppelter Zugabe einer Base) zu realisieren. Hierbei stünde der Aufwand in keinem vernünftigen Verhältnis zum Ergebnis (Erhalten von Anhaltswerten zur Auflösungsgeschwindigkeit, Überprüfung der in der Literatur fixierten Werte von bis zu 5 Jahren Standzeit). Vor diesem Hintergrund sind jedoch alle erzielten Ergebnisse einzuordnen und zu bewerten.

Nach einer Dauer von drei Wochen wurde die jeweilige Phase spätestens beendet und über den Verbrauch maximale Standzeiten hochgerechnet: die Depotsteine wurden hierzu aus dem Gerinne entfernt, getrocknet und anschließend gewogen. Dieses Prozedere war für alle Phasen identisch.

Aus den so ermittelten Werten für Ausgangs- und Restgewicht, können in Abhängigkeit von der Durchflussmenge und dem pH-Wert Anhaltswerte über die Standzeit der Depotsteine unter eben diesen Bedingungen ermittelt werden. Weiterhin wird die Reaktion der Depotsteine mit dem Trinkwasser hinsichtlich ökologischer Aspekte (z.B. Pilzbildung) beobachtet.

Die Vorversuche werden demnach hinsichtlich zweier Kriterien beleuchtet

- Auflösungsgeschwindigkeit
- Ökologie.

Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse fließen anschließend in die Bewertung eines Einsatzes von festen Härtestabilisatoren in Filterschichten ein.

5.1.6.2 Fester Härtestabilisator in simulierten Filterschichten am Saukopftunnel

Am Versuchsstand ist durch die Verwendung zweier baugleicher Versuchswannen, in denen identische Filterschichten simuliert und die mit dem gleichen Dränagewasser beschickt werden, ein äußerer Einfluss, z.B. in Form einer plötzlichen Temperaturänderung, auszuschließen: Beide Wanne unterliegen den exakt gleichen Bedingungen. Zudem ist es nicht notwen-

dig Kamerabefahrungen der Dränagerohre durchzuführen, da die besagten Rohre nach Beendigung einer Versuchsreihe ausgebaut und begutachtet werden können.

Unter diesen Gesichtspunkten wurde folgender Ablauf der einzelnen Versuchsphasen gewählt:

Phase A:

1. Aufbau des Versuchsstandes unter Berücksichtigung der Variante A eines möglichen Einbaus der Depotsteine in die Filterschicht.
2. Beginn einer dreimonatigen Versuchsphase
3. Mehrere Revisionen des Versuchsstandes, Dokumentation der hydrochemischen Parameter, Dokumentation der versinterungstechnischen Entwicklung beider Wann
4. Abschluss der Versuchsreihe, Ausbau der Rest-Depotsteine, Ausbau der Rohre
5. Auswertung

Phase B ist dementsprechend analog auszuführen unter Berücksichtigung der weiteren Einbauvariante.

Die Auswertung erfolgt dabei gemäß der unter 5.1.2 spezifizierten Kriterien. Hinsichtlich der Ablagerungsentwicklung sind dabei, unabhängig von den Versuchsphasen, zwei getrennte Bereiche zu betrachten, die sich von den üblicherweise vorzunehmenden Betrachtungen der Ablagerungsneubildung und der Entwicklung härterer Ablagerungen unterscheiden:

- Ablagerungsentwicklung am Stand im Allgemeinen
- Ablagerungsentwicklung an den Dränagerohre im Speziellen

Während erstere eine Beobachtung während des laufenden Versuchs widerspiegelt, wird die zweite Beobachtung am aus dem Stand ausgebauten Rohr vollzogen. Dieses wird nach Abschluss der Versuchsphase aus dem Versuchsstand entfernt und hinsichtlich der Ablagerungsentwicklung, vornehmlich ihrer Härte und Intensität, bewertet.

Bei der Darstellung der hydrochemischen Entwicklung, wird in Folge des vergleichenden Charakters der Untersuchungen, nicht auf den Calciumgehalt des Standwassers begrenzt, sondern lediglich der Sättigungsindex gemäß DIN 38 404-10 für beide Wann

Auf diese Weise ist die wirkliche Differenz der Neigung zur Calcitabscheidung für den Vergleich beider Wann

Die hydrochemische Analytik wurde durch Vor-Ort-Untersuchungen (pH-Wert, Temperatur, Leitfähigkeit) bzw. durch das siedlungswasserwirtschaftliche Labor der Ruhr-Universität ausgeführt (c(Ca), Alkalität). Die Analyse der Wirkstoffkonzentration erfolgte anhand geeigneter Wasserproben durch ein Labor der Bayer AG.

5.1.6.3 Fester Härtestabilisator in der Dränageleitung des Tunnelbauwerks Saukopf

Für den Einsatz fester Härtestabilisatoren in den Revisionsschächten eines Tunnelbau-

werks, ist neben der reinen Funktionalität der Härtestabilisatoren auch die Erweiterung der Nachweismethodik gemäß Kapitel 4 zu bewerten. Aus diesem Grund muss die Versuchsreihe zunächst nach der ursprünglichen Methodik ausgewertet werden, bevor die Ergebnisse in einem zweiten Schritt anhand der erweiterten Methodik zu beurteilen sind.

Die Auswertung gemäß der bisherigen Nachweismethodik erfolgt nach dem in Kapitel 3 dargelegten Schema. Hinsichtlich der Beurteilung der Ablagerungsentwicklung ist - nach erweiterter Methodik - für den Einsatz in Revisionschächten, zwischen nachfolgenden Punkten zu differenzieren:

- Ablagerungsentwicklung vor dem Spülen
- Ablagerungsentwicklung nach dem Spülen

Die Ablagerungsentwicklung vor dem Spülen kennzeichnet die Beeinflussung der Ablagerungsneubildung durch den Härtestabilisator. Die Ablagerungsentwicklung nach dem Spülen beschreibt den Einfluss des Härtestabilisators auf ältere härtere Ablagerungen im System, die normalerweise nicht durch eine Spülung entfernt werden.

Mit diesen Differenzierungen ergibt sich folgender Versuchsablauf:

1. Erfassung der hydrochemischen Leitparameter entlang der Schächte 132R-106R der rechten Ulmdränge des Saukopftunnels,
2. Kamerabefahrung der gesamten Versuchsstrecke
3. Spülung der gesamten Versuchsstrecke
4. Erneute Kamerabefahrung der Versuchsstrecke
5. Beginn der Konditionierung
6. Nach Ablauf eines Revisionszyklus (3 Monate) Erfassung der hydrochemischen Parameter
7. Erneute Kamerabefahrung der Versuchsstrecke
8. Spülung der gesamten Versuchsstrecke
9. Erneute Kamerabefahrung der Versuchsstrecke
10. Nochmaliges Durchlaufen der Punkte 5.-7., danach Abschluss der Versuchsreihe und Auswertung

Die erforderliche Analytik wird auf gleiche Weise wie für die Versuchsstände realisiert.

Aufgrund der Vielfältigkeit der Untersuchungen und den versuchsspezifisch unterschiedlichen Untersuchungsmethoden und Auswertungskriterien sind alle durchgeführten Versuchen nochmals übersichtlich in Diagramm 5.1 dargestellt.

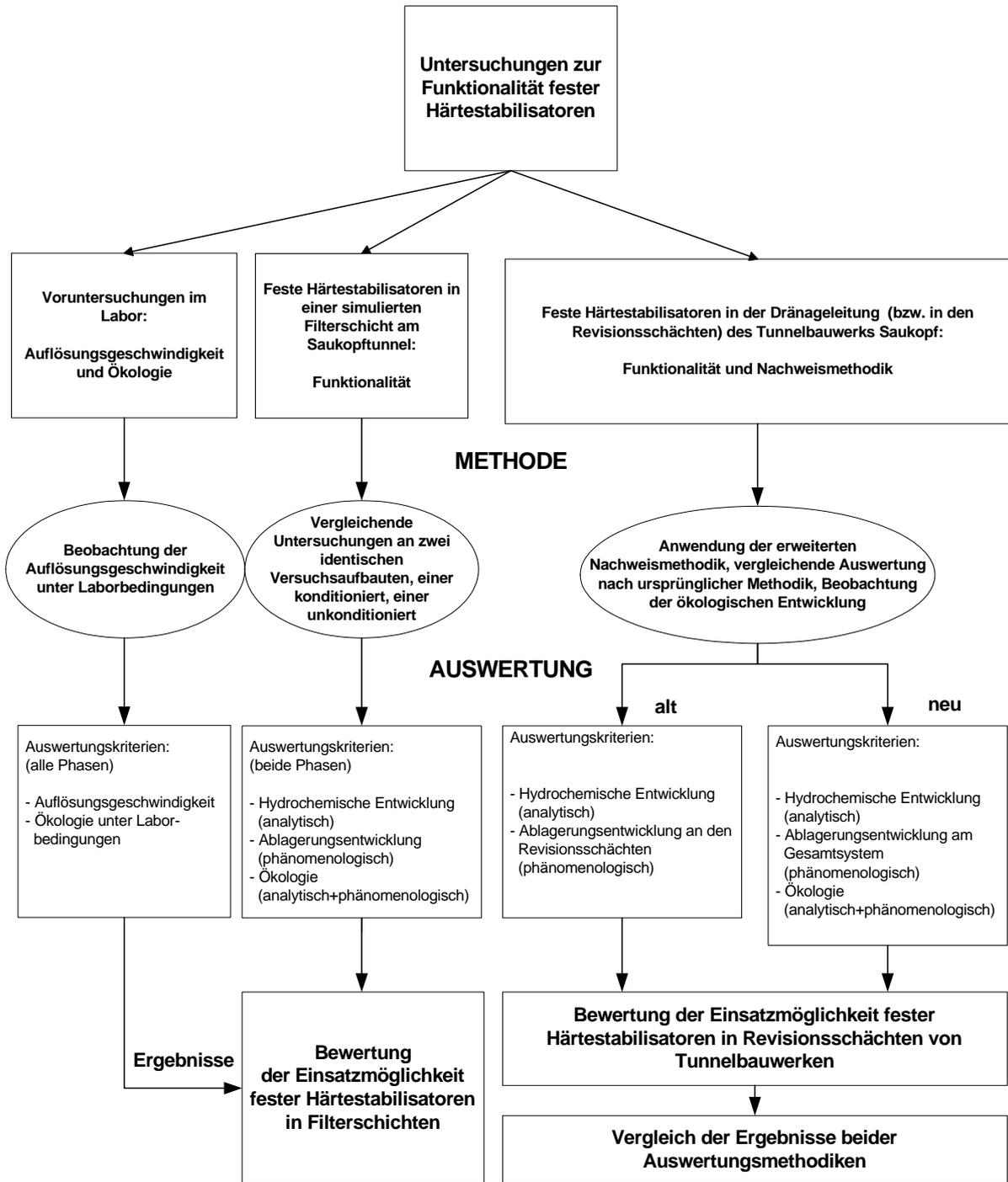


Diagramm 5.1: Schematische Darstellung des Versuchsprogramms und der Bewertungskriterien

5.2 Ergebnisse

5.2.1 Voruntersuchungen im Labor

5.2.1.1 Auflösungsgeschwindigkeit

Der Aufbau der Versuche ist als halboffenes Labor-System zu klassifizieren, mit den sich daraus ergebenden Einschränkungen für die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den Tunnelbau. Neben einer möglichen Aufkonditionierung des Wirkstoffs, bei sukzessivem Lösungsprozess der Depotsteine ist vor allem die hohe Umgebungstemperatur (im Schnitt etwa 22°C) im Labor und die nicht mit der Entwicklung des pH-Werts direkt kombinierte Zugabe von $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kritisch anzumerken. Daher ist davon auszugehen, dass die erzielten Ergebnisse, auf Grund der extremen Randbedingungen, nicht exakt den an Tunnelbauwerken beobachtbaren Auflösungsgeschwindigkeiten entsprechen. Wichtig sind bei den gewonnenen Ergebnissen jedoch nicht quantitative Größen sondern die Ermittlung qualitativer Richtwerte und somit die Möglichkeit, anhand der Untersuchungsergebnisse eine Tendenz für Auflösungsgeschwindigkeiten zu ermitteln und sie den Angaben der Literatur gegenüber zu stellen. Vor diesem Hintergrund sind die nachfolgenden Ergebnisse zu betrachten und gemeinsam mit den nachfolgenden in situ Versuchen vom Saukopftunnel zu interpretieren.

Phase A

Bei Bestückung des Gerinnes war die Masse des Depotsteinsacks zu 520 g ermittelt worden. Nach Beendigung der ersten Phase (Versuchsdauer: 3 Wochen) wurde ein Trockengewicht der übrigen Depotsteine von 333,4 g (=64%) festgestellt. Bei weiterhin konstanten Bedingungen im Stand und unter der Annahme eines linearen Auflösungsprozesses wäre also nach rund 11 Wochen eine vollständige Auflösung der Depotsteine zu erwarten. Angesichts einer bei fortschreitendem Lösungsprozess sich eher erhöhender Auflösungsgeschwindigkeit muss dieser Wert als für den Versuchsaufbau auf der sicheren Seite liegend betrachtet werden.

Phase B

Bei gleicher Durchsatzmenge an Wasser von $6 \text{ m}^3/\text{d}$ ($=0,07 \text{ l/s}$) waren in der zweiten Versuchsphase mit pH-Wert 11,5 nach drei Wochen nur 52,3 g (=10%) des gesamten Stabilisatorvolumens übrig.

Phase C

Hinsichtlich der Auflösungsgeschwindigkeit der Depotsteine aus Polyacrylat muss von einer extrem geringen Standzeit gesprochen werden. Nach bereits 24 h Laufzeit des Versuchs hatte sich die Menge an Stabilisator von 1026,9 g auf 330 g reduziert. Dies entspricht einer 67,8%igen Volumenreduktion bei einem pH-Wert von 11 und einer Durchflussmenge von $0,07 \text{ l/s}$. Die erneute Wiederholung des Versuchs, unter gleichen Voraussetzungen, führte zum gleichen Ergebnis, bei geringen Abweichungen im Bezug auf das Restgewicht (325 g im Vergleich zu 330 g).

5.2.1.2 Ökologie

In Phase A wurde bei Entnahme der Depotsteine aus dem Gerinne die durch Bild 5.9 dokumentierte Pilz- und Hefenbildung beobachtet, erkennbar durch die dunkle bis gräuliche Färbung der Depotsteine.

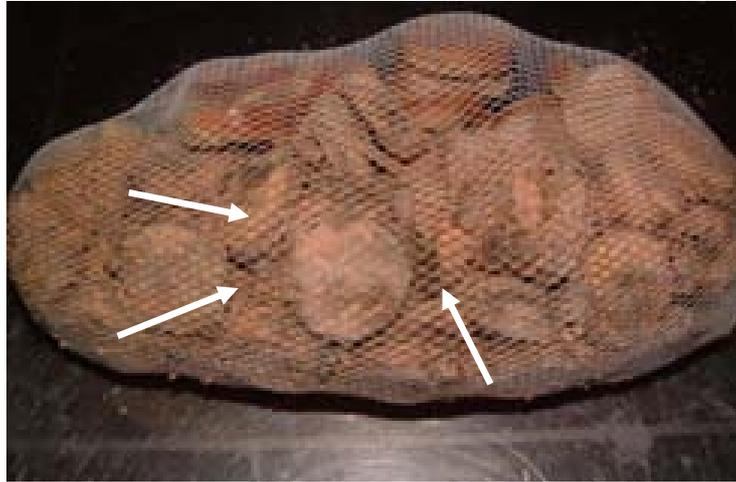


Bild 5.9 Schimmelpilzbildung an Depotsteinen, Versuchsstand in der RUB

Das Auftreten einer vergleichbaren Foulingproblematik, an in Dränagesystemen verwendeten Härtestabilisatoren war bislang vornehmlich einer ortsfesten Mikrobiologie als Ursache zugeschrieben worden [7]. Als weiterer Erklärungsansatz wurde die Verwendung von Spülfahrzeugen der kommunalen Abwasserreinigung genannt [7][37].

Da der Versuchsstand in den Vorversuchen mit Trinkwasser gespeist wurde und der Stand selbst keine aktive Mikrobiologie besitzt, können diese Begründungen ausgeschlossen werden. Allerdings kann die relativ hohe Temperatur des Standwassers, in Verbindung mit im Wasser mitgeführten Bakterien, zu einem verstärkten Wachstum von Bakterienkulturen geführt haben. Diese hätten dann den Wirkstoff der Depotsteine als Nährstoff erschlossen. Insgesamt ist die Bildung von Pilzen und Hefen unter den Bedingungen des Versuchs (Depotsteine im Trinkwasser) allerdings negativ im Sinne einer Bewertung der Funktionalität.

In Folge des hohen Grades der Auflösung der Depotsteine war in Versuchsphase B keine Schimmel- oder Pilzbildung zu beobachten. Gleiches gilt für Phase C.

5.2.2 Fester Härtestabilisator in einer simulierten Filterschicht am Saukopftunnel

5.2.2.1 Hydrochemische Entwicklung

Über den Versuchsverlauf hinweg konnte ein Rückgang der Zuflussmenge an Dränagewasser beobachtet werden, der jedoch für beide Wannen gleichermaßen gilt und daher keinen Einfluss auf nachfolgende Aussagen besitzt.

Hinsichtlich der Temperaturen des Wassers im Versuchsstand ist festzuhalten, dass - in Folge des Aufstellungsortes des Versuchsstand im Lüftungsgebäude des Saukopftunnels - eine Erwärmung des Wassers zu beobachten war (bis zu 16°C), die so für ein Dränagesys-

tem eines deutschen Straßentunnels nicht repräsentativ ist. Allerdings muss angemerkt werden, dass z.B. beim Einsatz von Depotsteinen in der Filterschicht des Gotthardtunnels Umgebungstemperaturen von z.T. über 30°C erreicht werden und dass gemäß [37] erst bei viel höheren Temperaturen als dieser ein deutlich spürbarer Einfluss auf das Lösungsverhalten der Depotsteine zu erwarten ist. Unter diesen Voraussetzungen ist die benannte Erwärmung des Wassers im Versuchsstand zwar nicht vernachlässigbar, jedoch ohne deutlich spürbaren Einfluss auf die im Folgenden dargestellten Ergebnisse.

Diagramm 5.2 stellt die zu drei Messpunkten ermittelten Werte, hinsichtlich Calcitsättigung des Wassers und dessen pH-Wert im Auslauf des Standes, in Phase A dar. Mit „Wanne 2“ ist hierbei jeweils die mit Depotsteinen konditionierte Wanne gekennzeichnet. Erkennbar ist die deutliche Zunahme des pH-Werts im Vergleich beider Wannen zueinander. Gemäß der Theorie zur Funktion von Härtestabilisatoren, ist eine Zunahme des Calciumgehalts zu erwarten und kann auch anhand des Messwerte beobachtet werden, wie hier durch die gestiegenen Calcitsättigung (SI-Index) dargelegt. Eine pH-Wert-Schwankung, so wie hier beobachtet, ist jedoch angesichts des theoretischen Grundlagenwissens zum Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht und zur Chemie der Härtestabilisatoren, nicht zu erklären. Ein auslösen von Kalkdepots aus dem Kies konnte im Vorfeld durch gründliches Waschen des Kieses ausgeschlossen werden. Unter Berücksichtigung identischer Ausgangslagen für beide Versuchswannen, die sich nur durch den in Wanne 2 eingebauten Härtestabilisator von einander unterscheiden, sind diese Phänomene demnach monokausal mit der Verwendung des Härtestabilisators verknüpfbar.

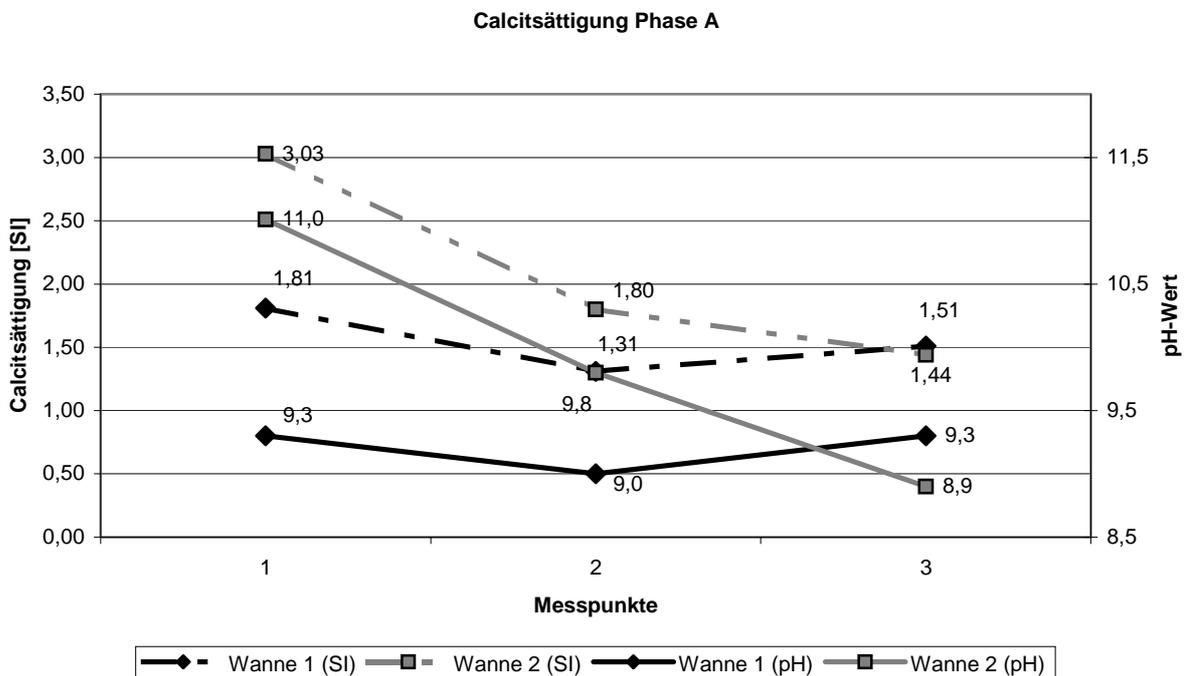


Diagramm 5.2: Darstellung der hydrochemischen Entwicklung an beiden Versuchswannen in Phase A

In Phase B liegen die Messwerte für Calcitsättigung und pH-Wert für beide Wannen gleich auf und zeigen über den Versuchsverlauf hinweg keine signifikanten Schwankungen oder Anomalien (Diagramm 5.3).

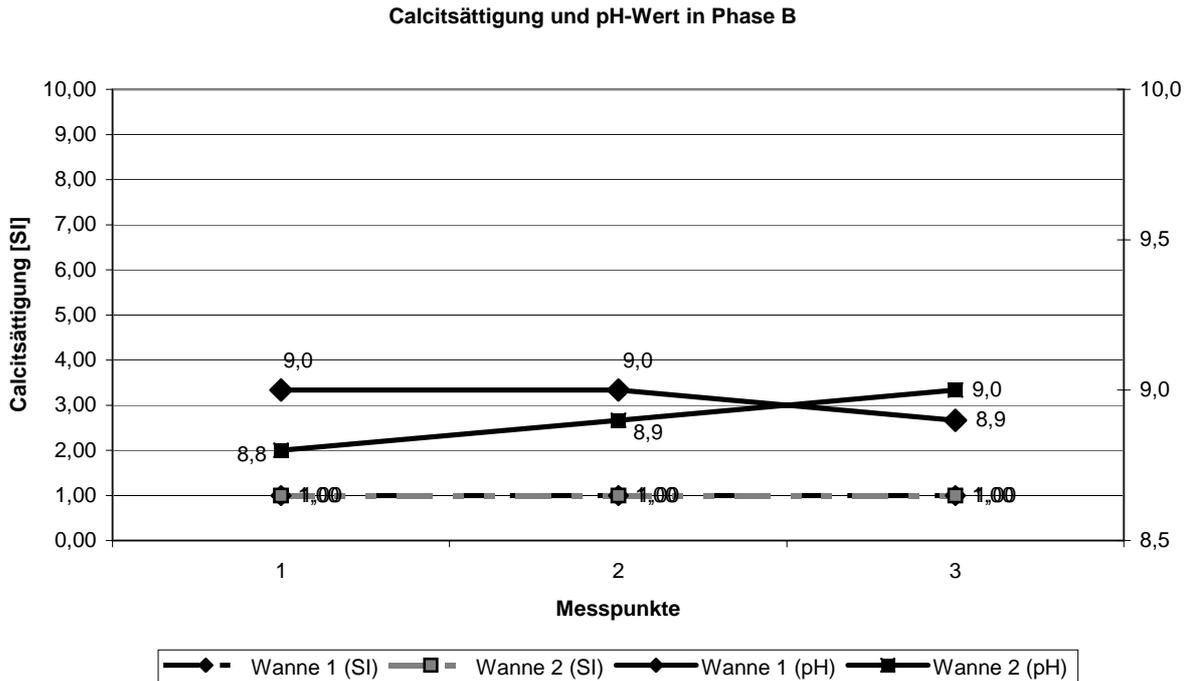


Diagramm 5.3: Darstellung der hydrochemischen Entwicklung an beiden Versuchswannen in Phase B

Im Ergebnis ist festzuhalten, dass in Phase A bislang unbekannte und daher unerwartete hydrochemische Entwicklungen auftraten, die in Folge des Aufbaus des Versuchs nur auf die Verwendung des Härtestabilisators zurückgeführt werden können. Die Zunahme des pH-Werts ist dabei keinesfalls als Positivum anzusehen. In Phase B konnten keine signifikanten hydrochemischen Unterschiede zwischen beiden Wannern festgestellt werden, die einen Rückschluss auf einen Härtestabilisator zulassen. Zu gering sind die hydrochemischen Unterschiede zwischen beiden Wannern.

5.2.2.2 Ablagerungsentwicklung

In Phase A wurden, analog zu den unerwarteten Messwerten, auch so nicht erwartete Beobachtungen hinsichtlich der Ablagerungsentwicklung festgehalten. Bild 5.10 und Bild 5.11 stellen exemplarisch die Situation am Versuchsstand während des Ablaufs der Phase A dar.



Bild 5.10 Auslaufbereich der Versuchswannen, links ohne – rechts mit Depotsteinen (Phase A)



Bild 5.11 Auslaufstutzen der Versuchswannen, links ohne – rechts mit Depotsteinen (Phase A)

Im Bereich der konditionierten Wanne war während der gesamten Versuchsphase ein deutlich höheres Ablagerungsaufkommen zu beobachten als in der unkonditionierten Wanne. Zu berücksichtigen ist die leicht rötlich-orange Einfärbung der ansonsten typischerweise rein weißen Ablagerungen der Härtebildner, die an die Färbung der Depotsteine erinnert und deutlich einen Zusammenhang zwischen Ablagerungsbildung und Verwendung des Härtestabilisators assoziiert (Bild 5.11 rechts). Entgegen der theoretischen Vorüberlegungen wurde somit in Phase A an der konditionierten Wanne ein höheres Ablagerungsaufkommen beobachtet als an der unkonditionierten Wanne.

Diese Aussage lässt sich auch für die ausgebauten Dränagerohre so wiederholen, wie Bild 5.12 und Bild 5.13 darlegen.



Bild 5.12 Phase A, Rohr konditioniert



Bild 5.13 Phase A, Rohr unkonditioniert

Deutlich erkennbar ist die größere Ablagerungsbildung auf der Rohrsohle des konditionierten Rohres (links) im Vergleich zum unkonditionierten Rohr (rechts). Am Versuchsstand muss also insgesamt in Phase A ein um ein vielfach höheres Ablagerungsaufkommen an der konditionierten Wanne konstatiert werden.

Die in Phase A auf der konditionierten Seite beobachteten Ablagerungen konnten durch geringen mechanischen Aufwand aus dem System entfernt werden. Der hierzu notwendige Aufwand lag auf der unkonditionierten Seite deutlich spürbar höher.

Analog zu der Entwicklung der Messwerte in Phase B konnte auch hinsichtlich der Ablagerungsentwicklung kein wirklich signifikanter Unterschied zwischen beiden Wanne ausgemacht werden, wie auch Bild 5.14 und Bild 5.15 hinsichtlich der Ablagerungsentwicklung während des Versuchs so wie Bild 5.16 und Bild 5.17 hinsichtlich der Ablagerungsentwicklung im Dränagerohr dokumentiert.



Bild 5.14 Tropfbereiche der Wannen, links ohne – rechts mit Depotsteinen (Phase B)



Bild 5.15 Auslaufbereich Versuchswannen, links ohne – rechts mit Depotsteinen (Phase B)



Bild 5.16 Phase B, Rohr konditioniert



Bild 5.17 Phase B, Rohr unkonditioniert

Auch in Phase B waren die erfassten Ablagerungen der konditionierten Versuchswanne, im Vergleich zur unkonditionierten, durch deutlich geringeren mechanischen Aufwand entfernbar.

Bezüglich der Ablagerungshärte konnte in Phase A, im Bereich der Konditionierung, eine Entwicklung harter Ablagerungen beobachtet werden (Bild 5.18 und Bild 5.19). Eine solcher Prozess kann demnach also auch bei Verwendung von PSI-Depotsteinen nicht vollkommen ausgeschlossen werden.



Bild 5.18 Bildung einer großen Ablagerung in Phase A



Bild 5.19 Harte Ablagerung aus der konditionierten Wanne in Phase A

5.2.2.3 Ökologie

Die Konzentration des PASP im Standwasser befand sich zu jeder Messwertaufnahme in einem Bereich, der weit unter den behördlich zugelassenen Grenzwerten von 10 mg/l liegt. Eine ökologisch relevante Überkonzentration des Wirkstoffs war also in keiner der beiden Versuchsphasen zu beobachten.

In beiden Phasen konnte eine Pilzbildung an den Depotsteinen beobachtet werden, so wie durch Bild 5.20 und Bild 5.21 für Versuchsphase A und B dokumentiert.



Bild 5.20 Schimmelbildung an den Depotsteinen (Phase A)



Bild 5.21 Schimmelbildung an den Depotsteinen (Phase B)

Exemplarisch wurden aus dem Versuchsstand einige Proben zur Ermittlung der ökologischen Belastung entnommen, deren Ergebnisse in Tabelle 5.1 wiedergegeben sind.

Tabelle 5.1: Analyseergebnisse der Pilzkulturen aus dem Versuchsstand

Probenobjekt	KBE-Wert [Kolonie bildende Einheiten]	Identifizierung des Bewuchs
Wasser des Versuchsstands	$1,1 \times 10^4$	-keine Angaben -
Depotstein aus dem Versuchsstand	nicht auswertbar $> 10^3$ KBE	filamentöse Pilze Penicillium sp. Hefen 4×10^3 KBE
Bewuchs des Kieses	nicht auswertbar $> 10^3$ KBE	filamentöse Pilze Enterobacteriaceae Pseudomonaden

Im Bereich der Depotsteine hatten sich filamentöse Pilze und Hefen gebildet, die aus einer Reaktion des Depotsteins mit dem Bergwasser resultieren. Bemerkenswert waren vor allem die hohen Anteile an „Kolonie bildenden Einheiten“ (KBE-Wert), die außerhalb der Messwert-Skala lagen. Die parallel angefertigte Analyse des Standwassers belegt zudem, dass es sich hierbei keineswegs um diesbezüglich bedenkliches Wasser handelt, der Umstand der Pilzbildung und der hohen Kontamination also auf die Verwendung des Depotsteins zu-

rück zu führen ist. Dies steht vor allem im Gegensatz zu den Aussagen von [7]. Hier war das Auftreten von derlei Pilzen und Hefen, im direkten Umfeld der Depotsteine, an eine ortsfeste Mikrobiologie und Dränagewässer mit hohen Keimbelastungen geknüpft worden. Da hier weder eine solch ortsfeste Mikrobiologie (autarker Versuchsstand) noch belastetes Dränagewasser festgestellt werden konnte, stellt diese Beobachtung eine Erweiterung bisherigen Wissens dar.

5.2.2.4 Verfahrenstechnik

In beiden Phasen konnte beobachtet werden, dass das Bindemittel der Depotsteine unter gewissen Bedingungen (geringe Fließgeschwindigkeit, Luftkontakt) offensichtlich mit dem kalkhaltigen Bergwasser zu einem schleimigen Rückstand reagieren kann, dem Calciumstearat (Bild 5.22 und Bild 5.23). Dieser ist zwar ökologisch nicht bedenklich aber verfahrenstechnisch als unerwünscht anzusehen, da er – wie Bild 5.22 belegt – durchaus gesamte Depotsteine mit einer undurchlässigen Schicht überziehen kann.



Bild 5.22 Depotsteine mit Ablagerungen von Calciumstearat (Phase A)



Bild 5.23 Calciumstearatbildung in der Filterschicht (Phase B)

Darüber hinaus waren die Depotsteine, in Folge der andauernden Durchfeuchtung im Versuchsstand, von einer weichen, breiigen Konsistenz und verloren schon bei geringer mechanischer Belastung ihre Stabilität und Form. Für Phase B konnte zudem festgestellt werden, dass nicht alle der ausgestreuten Depotsteine vom Wasser erreicht worden waren.

5.2.3 Fester Härtestabilisator in der Dränageleitung des Tunnelbauwerks Saukopf

5.2.3.1 Auswertung des Versuchs mit Hilfe der ursprünglichen Nachweismethodik

Vergleichbar zum Versuchsstand, war auch im untersuchten Dränageabschnitt ein marginaler Rückgang der Wassermenge über den Versuchsverlauf hinweg zu erkennen. Der Rückgang war jedoch zu gering um qualitative Auswirkungen auf die Versuchsergebnisse zu haben. Gemäß Schritt 1 der in Kapitel 3 dargestellten Methodik wurden die analytisch ermittelten Daten zunächst aufbereitet und dann in ein vergleichendes Diagramm für die analysierten pH-Wert überführt (Diagramm 5.4).

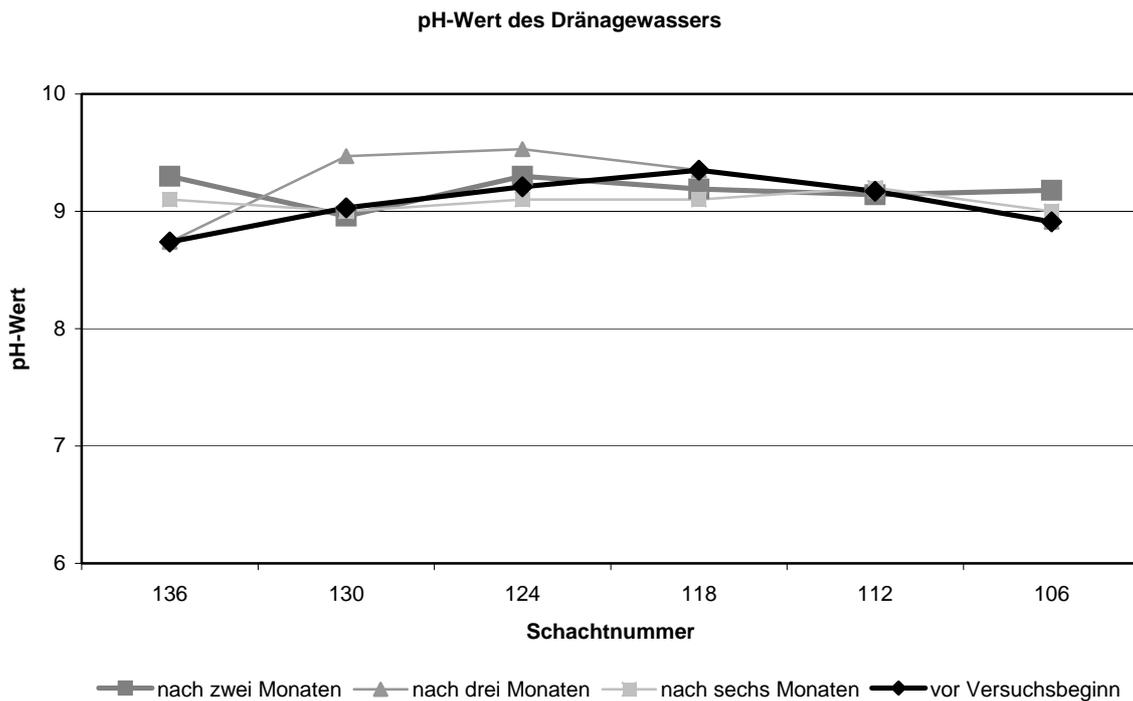


Diagramm 5.4: pH-Werte entlang der Versuchsstrecke im Saukopftunnel

Die dargestellten Kurvenverläufe der pH-Werte zeigen nur leichte Schwankungen. Die pH-Werte können daher, über den Versuchsverlauf hinweg als relativ konstant angesehen werden. Maximale Schwankungsbreiten zwischen den Messwerten liegen schachtbezogen im Bereich von unter 0,5. Die gemäß der ursprünglichen Methodik geforderte Konstanz des pH-Werts kann also als gegeben angesehen werden (Schritt 2).

Die phänomenologische Datenerfassung an den Revisionssschächten liefert Bilder einer konstanten bis rückläufigen Neubildung von Ablagerungen im Schachtbereich (Schritt 3). Bild 5.25 zeigt zwar im Vergleich zu Bild 5.24 eine leicht höhere Ablagerungsdichte nach Ablauf von sechs Monaten, allerdings ist erstere Aufnahme vor dem Spülen der Haltung entstanden was im Vergleich zum frisch gereinigten Schacht in Bild 5.24 einen Rückgang der Ablagerungsneubildung nahe legt. Vor allem die harten Ablagerungen, strömungsabwärts im Schacht (im Bild jeweils rechts), gingen im Versuchszeitraum deutlich zurück. Die sich im Aufstaubereich vor den Säcken üblicherweise bildenden Ablagerungen werden hierbei vernachlässigt.

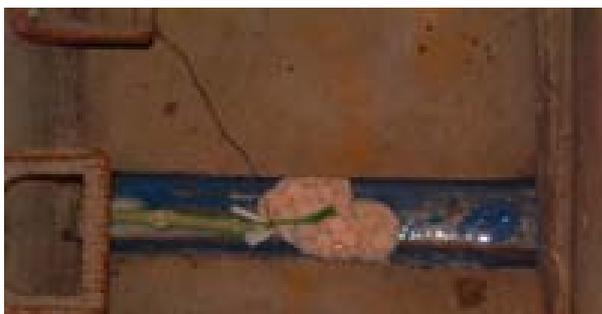


Bild 5.24 Depotsteine in Schacht 136R bei Versuchsbeginn



Bild 5.25 Depotsteine in Schacht 136R nach sechs Monaten

Im letzten Schritt werden die Analysewerte der Härtebildner betrachtet, wobei hier vereinfachend ausschließlich Werte zur Calciumionenkonzentration betrachtet werden (Diagramm 5.5). Deutlich erkennbar ist die partielle Zunahme der Messwerte im Verlauf des Untersuchungszeitraums im Vergleich zu den im Rahmen der Voruntersuchung ermittelten Werten. Letztere wurden vor Beginn der Konditionierung gemessen und stehen in direkter Korrespondenz zu den Werten, die in früheren Untersuchungen an diesem Drainageanschnitt gemessen wurden [29].

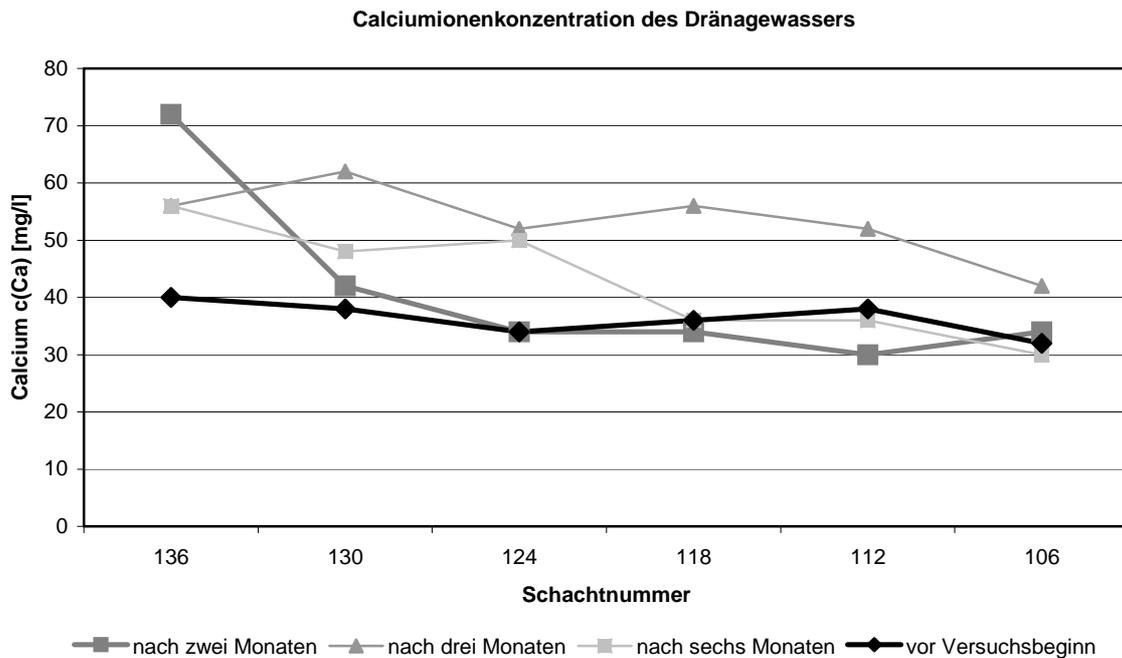


Diagramm 5.5: Calciumionenkonzentration entlang der Versuchsstrecke im Saukopftunnel

Im Ergebnis ist festzuhalten, dass es nur bei vier Messpunkten zu einer Unterschreitung der im Vorfeld ermittelten Messwerte kommt und die Versuchsdaten aus dem Untersuchungszeitraum somit im Mittel über denen der Voruntersuchung und früheren Untersuchungen am Saukopftunnel liegen. In Folge dieser Erkenntnis ist der Einsatz des Härtestabilisators nach ursprünglicher Methodik als Erfolg zu werten, da eine Zunahme der Calciumlöslichkeit in Folge der Verwendung des Härtestabilisators anhand der Messwerte dargestellt werden konnte.

5.2.3.2 Auswertung des Versuchs mit Hilfe der erweiterten Nachweismethodik

5.2.3.2.1 Hydrochemische Entwicklung

Grundlegend ist die hydrochemische Entwicklung innerhalb des Versuchszeitraums bereits durch die Darstellungen in 5.2.3.1 ausreichend beschrieben. Da sich beide Nachweismethodiken bezüglich der Darstellung dieses Aspekts nicht grundlegend unterscheiden kann eine erneute Beschreibung der Ergebnisse an dieser Stelle entfallen.

Die für die erweiterte Methodik geforderte Darstellung der Sättigungsindizes lässt nachfolgendes Diagramm 5.6 entstehen.

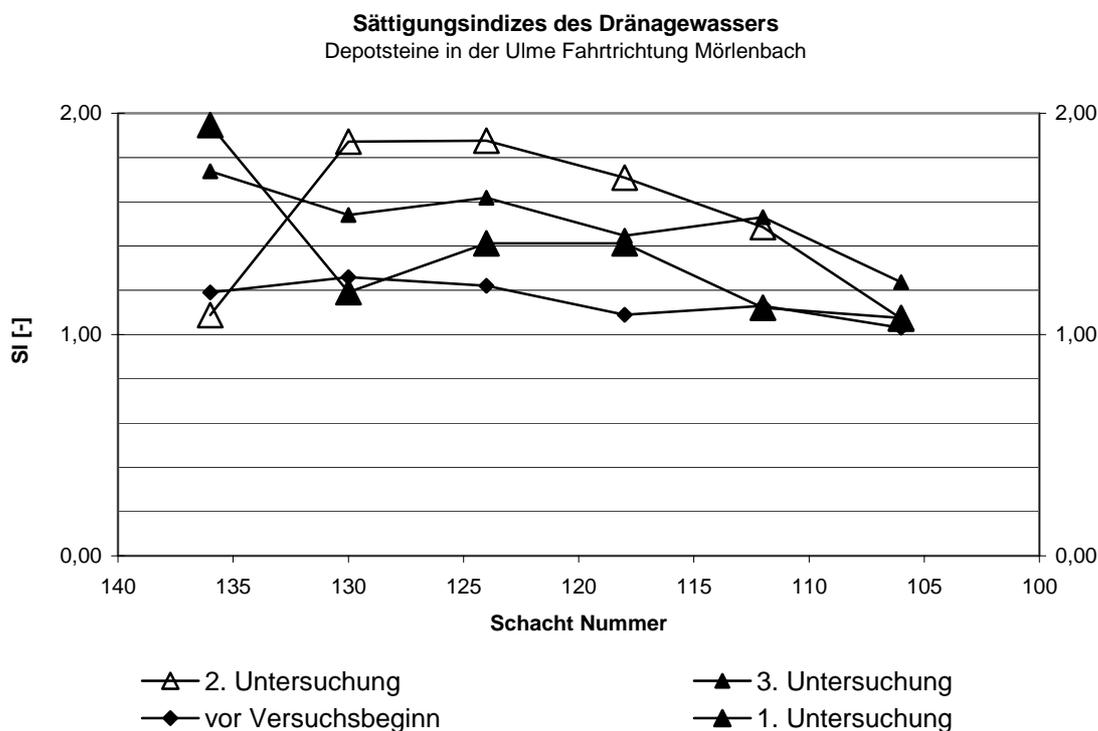


Diagramm 5.6: Darstellung der Sättigungsindizes in den Revisionsschächten des Systems

Angesichts des gestiegenen Calciumgehalts zeigt auch der Sättigungsindex des Dränagewassers erwartungsgemäß einen leichten Anstieg im Versuchszeitraum, wenn auch nicht an allen Schächten. Der Sättigungsindex liegt dabei einheitlich über der Grenze von $SI=1,0$, oberhalb derer es nicht nur zur Keimbildung, sondern auch zur Ausfällung von Kristallen kommen kann. Die hydrochemischen Voraussetzungen für ein Kristallwachstum, somit für eine Ablagerungsbildung, sind also im gesamten Versuchszeitraum günstig.

5.2.3.2.2 Ablagerungsentwicklung

Wie bereits unter 5.2.3.1 dargestellt, kann in den Revisionsschächten, also im direkten Umfeld der Depotsteine, ein Rückgang der Bildung neuer Ablagerungen beobachtet werden. Natürlicherweise sedimentieren jeweils im Bereich vor den Depotsteinsäcken bereits ausgefällte Calcitkristalle, jedoch – in Folge der ausgelegten Netzschläuche – ohne dabei auszuhärten.

Gemäß der erweiterten Nachweismethodik sind die Bilder der Kamerabefahrungen zunächst hinsichtlich versinterungsbeeinflussender Ausführungsmängel des Systems zu bewerten. Dies kann an dieser Stelle entfallen, da aus früheren Untersuchungen explizite Aufzeichnungen über den Zustand des Dränagesystems existieren (Bild 5.26)[29].

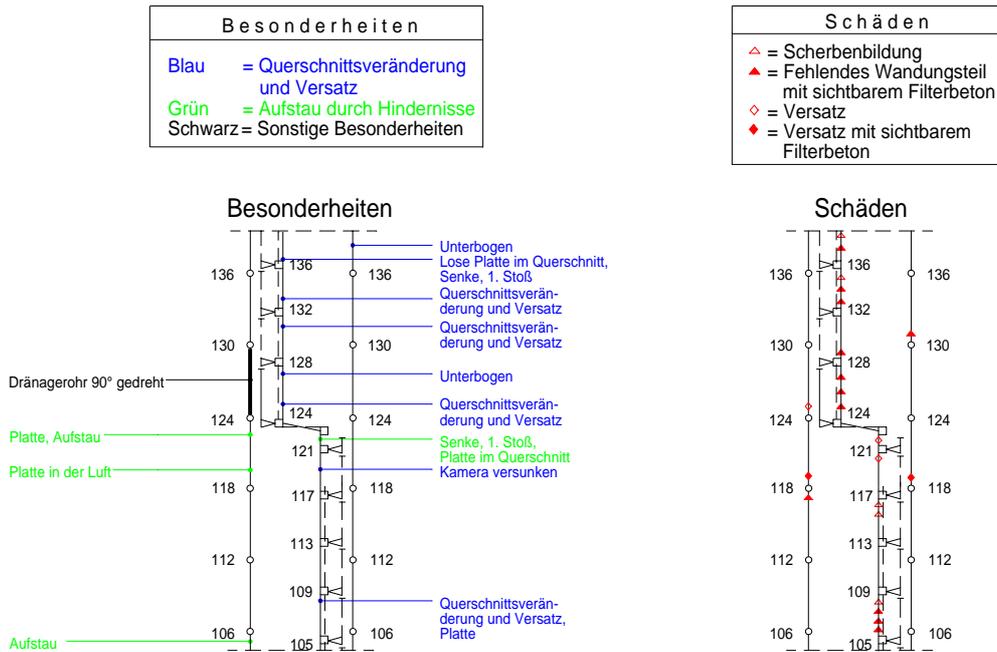


Bild 5.26: Bauliche Mängel am Dränagesystems des Saukopftunnels im Bereich der Versuchsstrecke [29]

Wie im Bild 5.26 ersichtlich, sind im betreffenden Abschnitt des Entwässerungssystems lediglich im Bereich der Sohldränage und der linken Ulme Schäden und Ausführungsmängel erkennbar, die einen Einfluss auf die Versinterung haben könnten. Die rechte Ulme ist hingegen frei von Mängeln mit Versinterungsrelevanz und muss daher nicht gesondert hinsichtlich solcher Mängel bewertet werden.

Die Anwendung der modifizierten Auswertungsmethodik auf die von der Versuchsstrecke angefertigten Kamerabefahrungen liefert im Weiteren daher lediglich eine Übersicht über die zu den jeweiligen Zeitpunkten im System ermittelbaren Versinterungen (Diagramm 5.7).

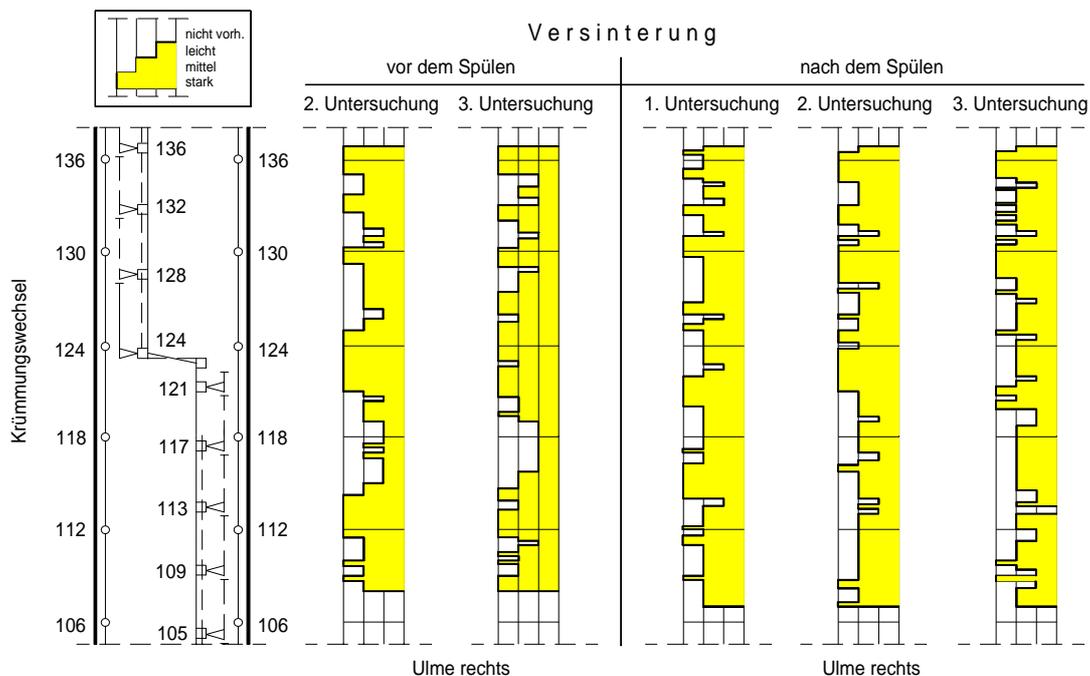


Diagramm 5.7: Darstellung der Ablagerungsentwicklung vor und nach dem Spülen im Versuchszeitraum

Vor dem Spülen konnte zu Beginn der Versuchsreihe aus logistischen Gründen keine Kamerabefahrung angefertigt werden. Die Entwicklung der Ablagerungen vor dem Spülen kann allerdings auch innerhalb nur eines Revisionszyklus ausreichend erfasst werden, da es sich hierbei um eine Relativbetrachtung handelt.

Eine numerische Auswertung der Flächenänderung, im Vergleich der jeweiligen Diagrammflächen zueinander ist dabei als Maß für die Ablagerungsentwicklung vor und auch nach dem Spülen anzusehen. Für eine solche Auswertung werden die Diagrammflächen zunächst in ein 5 m-Raster unterteilt, anschließend die relative Flächenänderung sukzessive erfasst und die jeweilige Änderung abschnittsweise aufsummiert. Würden im jeweiligen Abschnitt solche Mängel auftreten, die einen versinterungsbegünstigenden Einfluss besitzen, so müsste das Auswertungsraaster an dieser Stelle weiter verfeinert werden. Trägt man nun die relative Zustandsänderung der Fläche entlang der Versuchsstrecke auf, so entsteht für den gesamten Abschnitt ein Abbild der relativen Ablagerungsentwicklung vom Beginn bis zum Ende des Messzeitraums. Hierbei gibt die Lage des Kurvenendes – im mathematisch 1. oder 4. Quadranten – an, ob und um wieviel nach der gewählten Dokumentationskalierung die Ablagerungen in der gesamten Haltung zugenommen haben. Parallel liefern die Steigungen der Kurve und ihre Wechsel, ein zu jedem Punkt übersichtliches Maß für die lokale Ablagerungsentwicklung.

Auswertung „Vor dem Spülen“ (Beurteilung der Ablagerungsneubildung):

Wie schon ein oberflächlicher Blick auf die absoluten Diagrammflächen nahelegt, konnte vor dem Spülen eine leichte Zunahme der Ablagerungsbildung festgestellt werden. Exemplarisch wird dies an Bildern aus der Versuchsstrecke dokumentiert (Bild 5.27 und Bild 5.28), auf denen die deutliche Zunahme an neugebildeten Ablagerungen erkennbar wird.

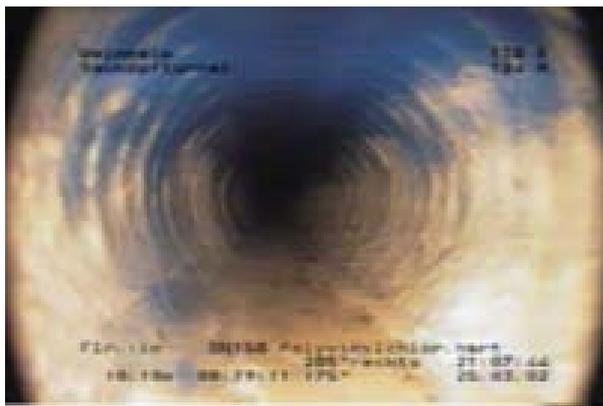


Bild 5.27 Halungsmeter 10, Abschnitt 130R-124R,
nach 3 Monaten

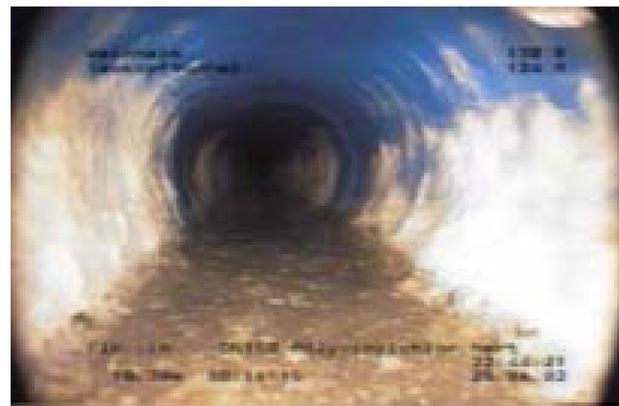


Bild 5.28 Halungsmeter 10, Abschnitt 136R-130R,
nach 6 Monaten

Diese These bestätigt sich durch die numerische Auswertung der Diagrammflächen. Wie Diagramm 5.8 belegt, konnte sowohl eine partielle Abnahme als auch eine teilweise Zunahme der lokalen Ablagerungsneubildung ermittelt werden. In der Summation der Flächen ergibt sich so die in Diagramm 5.8 dargestellte, insgesamt leicht überwiegende Zunahme der

Ablagerungsneubildung vor dem Spülen. Hierbei ist die in Bild 5.27 und Bild 5.28 dargestellte Situation und ihre Auswirkung auf die Kurvensteigung als exemplarischer Messpunkt herausgehoben.

Entgegen der Annahme eines funktionalen Härtestabilisators und trotz einer anhand der Messwerte nachvollzogenen Zunahme der Calciumlöslichkeit des Bergwassers ist somit über den Verlauf der Versuchsstrecke, von einem Mehr an Ablagerungsneubildung bei dem untersuchten Bauwerk auszugehen. Diese Erkenntnis steht im Gegensatz zu den Aussagen, die sich bei Verwendung der ursprünglichen Nachweismethodik herleiten lassen.

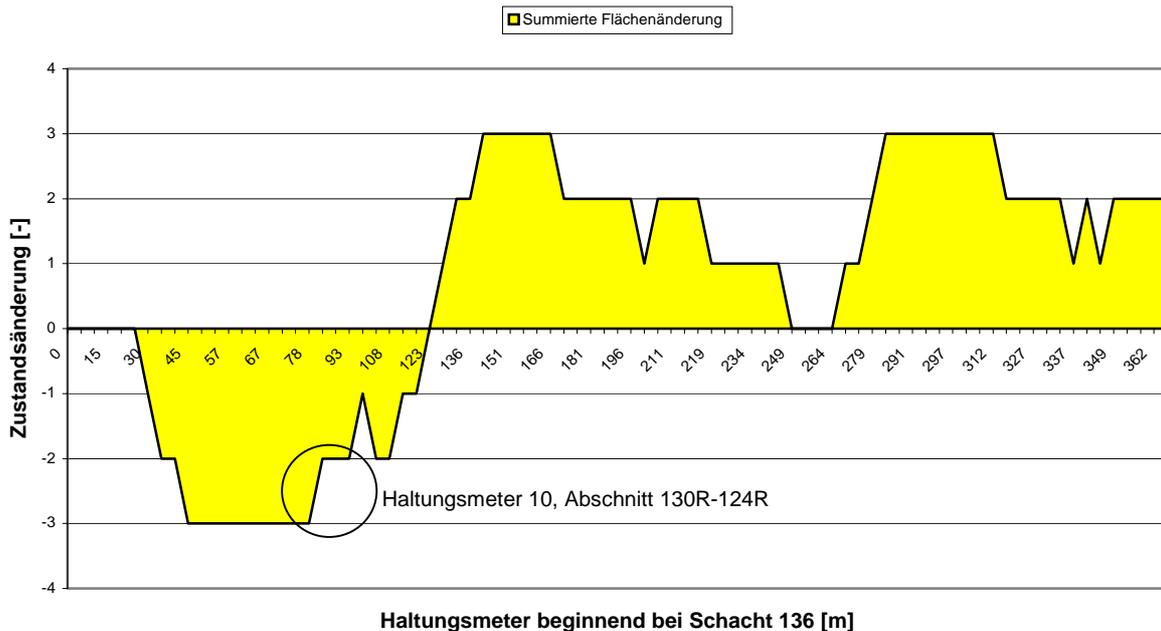


Diagramm 5.8: Numerische Auswertung der Flächenänderung als Maß für die Ablagerungsentwicklung vor dem Spülen

Auswertung „Nach dem Spülen“ (Beurteilung der Entwicklung harter Ablagerungen):

Betrachtet man die in Diagramm 5.7 dargestellten Diagrammflächen für den Zeitraum „Nach dem Spülen“, so fällt rasch auf, dass sich auch bei den harten Ablagerungen keine einheitliche Entwicklung im Versuchszeitraum feststellen lässt. Allerdings kann, wie auch schon für den Zeitraum „Vor dem Spülen“, eine Tendenz herausgearbeitet und dargestellt werden.

Über den Versuchszeitraum hinweg ist so ein insgesamt spürbarer Rückgang härterer älterer Ablagerungen festzustellen. Exemplarisch ist dies anhand von Bild 5.29 und Bild 5.30 dargelegt. Klar erkennbar ist im dargestellten Haltungsabschnitt (Haltungsmeter 10, Abschnitt 112R-106R) die Zunahme blauer Flächen auf der Rohrsohle (Bild 5.30) und damit der Rückgang älterer, härterer Ablagerungen nach dem Spülen. Zwar konnten auch hier wiederum Abschnitte mit einer gegenläufigen Entwicklung, also einer Zunahme von Hartablagerungen, lokalisiert werden, jedoch überwog tendenziell ihr Rückgang.

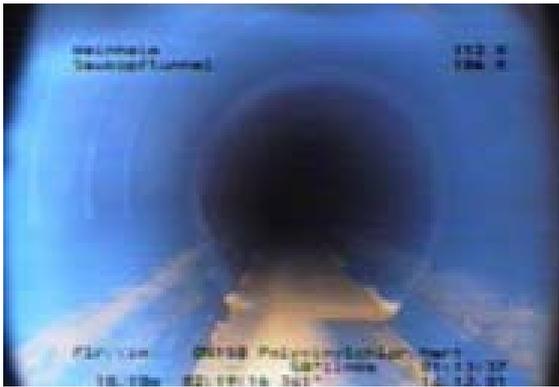


Bild 5.29 Haltemeter 10, Abschnitt 112R-106R bei Versuchsbeginn

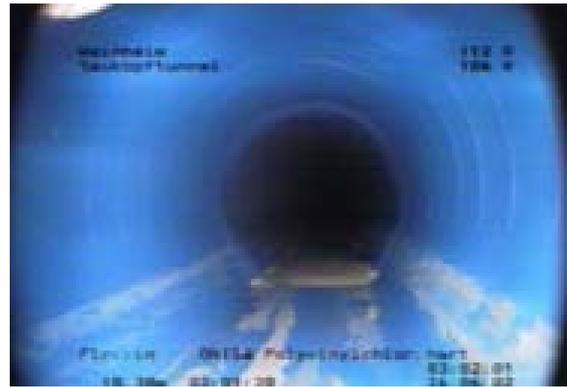


Bild 5.30 Haltemeter 10, Abschnitt 112R-106R nach sechs Monaten

Um diese Tendenz genauer erfassen zu können, wird für den Zeitraum „Nach dem Spülen“ das gleiche Auswertungsschema wie für den Zeitraum „Vor dem Spülen“ auf die in Diagramm 5.7 dargestellten Diagrammflächen angewendet. Dies liefert eine qualitative Darstellung der Beeinflussung härterer Ablagerungen durch den Härtestabilisator und die Festigkeitsentwicklung der Ablagerungen insgesamt.

Der Blick auf die numerische Auswertung der Diagrammflächen unterstreicht die Erkenntnis, dass auch für diesen Aspekt der Auswertung kein insgesamt einheitliches Bild entlang der Versuchsstrecke zu ermitteln ist. Dies wird vor allem beim Blick auf die Abschnitte zwischen den Schächten 136 und 124 deutlich, im Diagramm 5.9 durch die Haltemeter 0 bis etwa 123 dargestellt. Hier war zunächst eine deutliche Zunahme der härteren Ablagerungen festzuhalten. Erst ab Schacht 124 (in etwa bei Meter 123) nimmt der Umfang an beobachteter Ablagerungsneubildung mit der Fließrichtung des Wasser ab. In Folge der geringen Anzahl an Wendepunkten kann zur Verdeutlichung der erkennbaren Tendenz eine Trendlinie in Diagramm 5.9 eingefügt werden, die diesen Vorgang beschreibt.

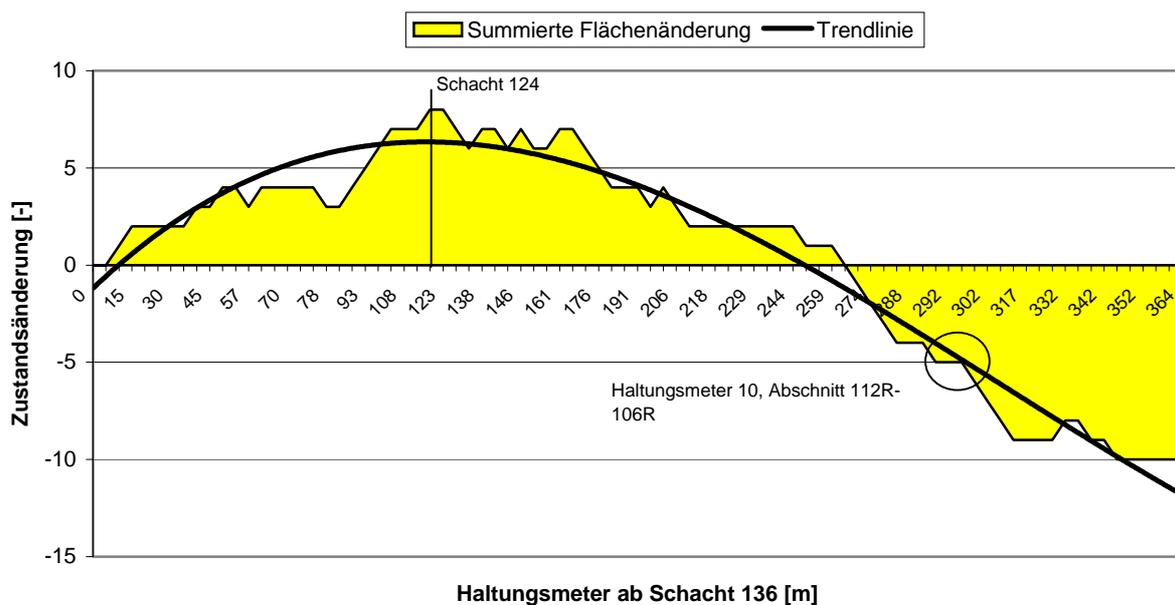


Diagramm 5.9: Numerische Auswertung der Flächenänderung als Maß für die Ablagerungsentwicklung nach dem Spülen

5.2.3.2.3 Ökologie

Die wasserbehördlichen Zulassungen, die in Deutschland bislang stets im Einzelfall ausgesprochen werden, basieren vor allem auf den Zahlenwerten der vom Hersteller angegebenen „Arbeitskonzentration“ des Wirkstoffs, der eine Regelkonzentration von < 20 ppm im Dränagewasser beschreibt. Die Menge an beigefügtem Wirkstoff bei Regelkonzentration wird durch die zuständigen Wasserbehörden zumeist auch als Grenzwert für die zulässige Konzentration im Dränagewasser formuliert. Von Fall zu Fall kann es dabei jedoch zu Unterschieden in Folge der Gewässersensibilität der Vorflut kommen, an welche die Dränagewässer letztlich abgeschlagen werden sollen.

Setzt man 20 ppm als allgemein zulässige Obergrenze der Wirkstoffkonzentration vereinfachend voraus, so zeigt die Betrachtung der Konzentrationen des Wirkstoffs im Dränagewasser, entlang der Versuchsstrecke eine partielle deutliche Überschreitung der zulässigen Grenzwerte der maximalen Konzentration (Diagramm 5.10).

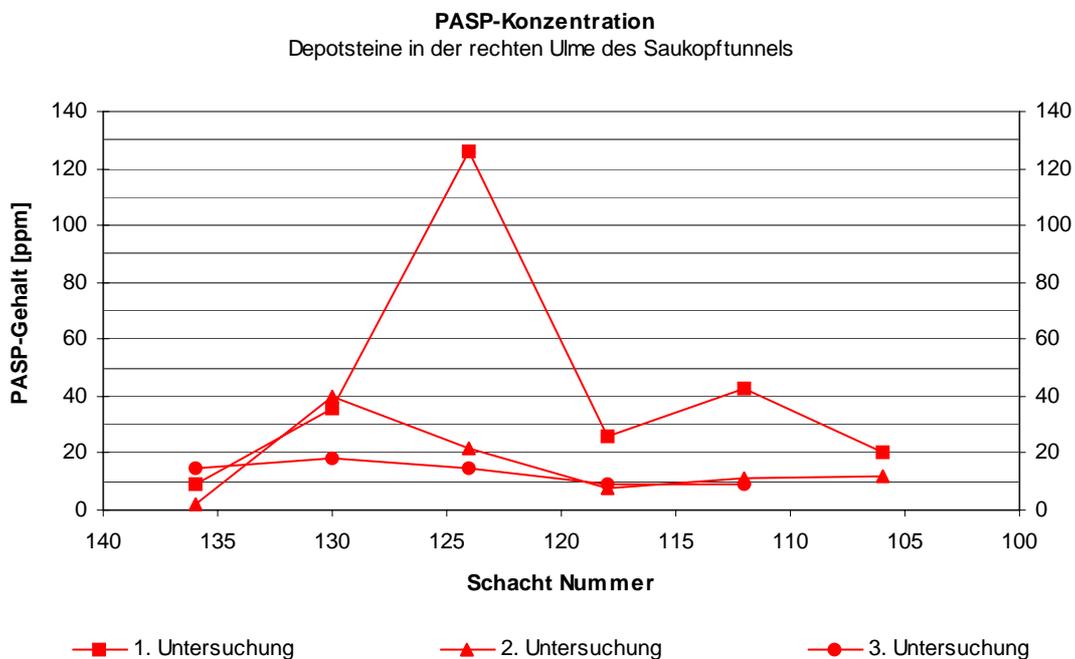


Diagramm 5.10: Darstellung des PASP-Gehalts im Dränagewasser entlang der Versuchsstrecke

Vor allem bei Schacht 124 wurde mit 126 ppm ein gegenüber den zulässigen Grenzwerten um ein vielfaches erhöhter Messwert erfasst. Dies kann zum Teil auf den Umstand zurückgeführt werden, dass die Wasserproben in den Revisionsschächten entnommen wurden und damit quasi dem direkten Umfeld der Depotsteine entstammen. Eine Abgabe des Wirkstoffs in dieser Höhe ist bislang durch die Darstellungen zum Zusammenhang zwischen Auflösungsgeschwindigkeit der Depotsteine und der Hydrochemie des Bergwassers, auszuschließen gewesen. Lokale Überkonzentrationen sind bis dato nur bei Einsatz von Depotsteinen der sprühgetrockneten Natriumsalze der Polyacrylsäure bekannt [25], können offenbar aber auch in Verbindung mit PSI-Depotsteinen auftreten.

Die Formulierung besagten Grenzwerts geschieht allerdings für den Zuflusspunkt des Dränagewasser zur jeweiligen Vorflut und nicht bezogen auf lokal begrenzte Stellen des Ent-

wässerungssystems. Bezogen auf den Saukopftunnel sind die Messwerte jedoch als unbedenklich einzustufen. Dies gilt zum einen, da am untersten Messpunkt, dem Schacht 106R, zu allen Messzeitpunkten Werte im Bereich der behördlichen Zulassung angetroffen wurden. Zum anderen werden die Wässer des Schacht 106R komplett in die Sohldränage des Bauwerks überführt, so dass hier zusätzliche Verdünnungseffekte zum Tragen kommen. Künftig ist jedoch vor allem bei Bauwerken mit hohen Mengen eingesetzten Wirkstoffs, besonderes Augenmerk auf die Konzentration des Wirkstoffs im Abfluss zu legen.

Insgesamt ist festzustellen, dass mit fortschreitender Dauer des Versuchs die Konzentration des Wirkstoffs im Dränagewasser nachlässt, was im Prinzip analog zum Rückgang der Calciumionenkonzentration im Dränagewasser verläuft (siehe auch Diagramm 5.5).

Hinsichtlich der Auswertung der ökologischen Belastung, in Folge des Zusammenspiels zwischen Härtestabilisator und Mikrobiologie im System, wurde zunächst durch Betrachtung der Kamerabefahrungen festgestellt, dass sich vor dem Spülen teilweise nicht nur die Menge an beobachtbaren Ablagerungen erhöht, sondern sich z.T. auch eine erhebliche Belastung durch Verschmutzung des Systems bildet (Bild 5.31 und Bild 5.32).

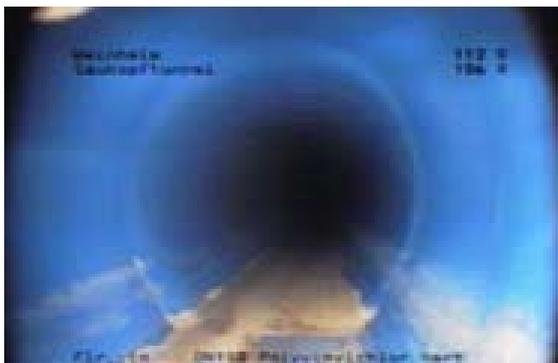


Bild 5.31: Belastung durch Schlämme bei Haltemeter 10, Abschnitt 112R-106R, nach 3 Monaten



Bild 5.32: Belastung durch Schlämme bei Haltemeter 10, Abschnitt 112R-106R, nach 6 Monaten

Klar erkennbar ist der deutliche Verschmutzungsgrad der Rohrsohle durch Schlämme, der zudem vor allem in den unteren Abschnitten mehr und mehr zunimmt. Aus diesem Grund wurden die Bilder der Kamerabefahrungen nochmals nach der erweiterten Nachweismethodik ausgewertet, diesmal jedoch hinsichtlich einer zusätzlichen Schlammbelastung im Dränagewasser (Diagramm 5.11).

Deutlich erkennbar ist die Zunahme an Belastung aus Schlämmen im Vergleich der beiden Beobachtungszeitpunkte.

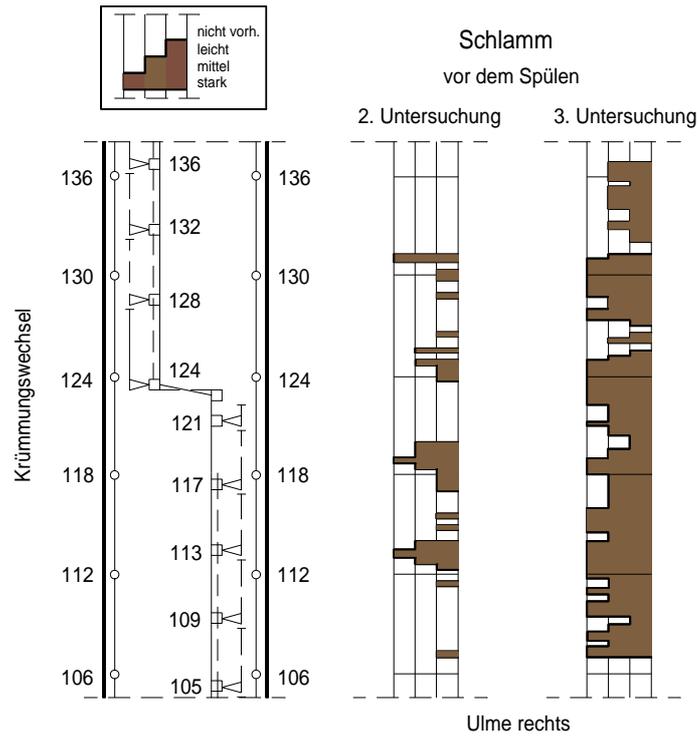


Diagramm 5.11: Darstellung der Verschmutzungsentwicklung vor dem Spülen im Versuchszeitraum

Eine numerische Auswertung der Relation dieser Diagrammflächen liefert einen Überblick über die effektive Zunahme der ökologischen Belastung durch Fouling im Zeitraum zwischen den beiden betrachteten Datenerfassungen. Erneut erfolgt die Bildung der Differenzfläche durch sukzessive Auswertung eines 5 m-Rasters (Diagramm 5.12), so wie auch schon zur Auswertung der Diagrammflächen bezüglich der Ablagerungsentwicklung vorgenommen.

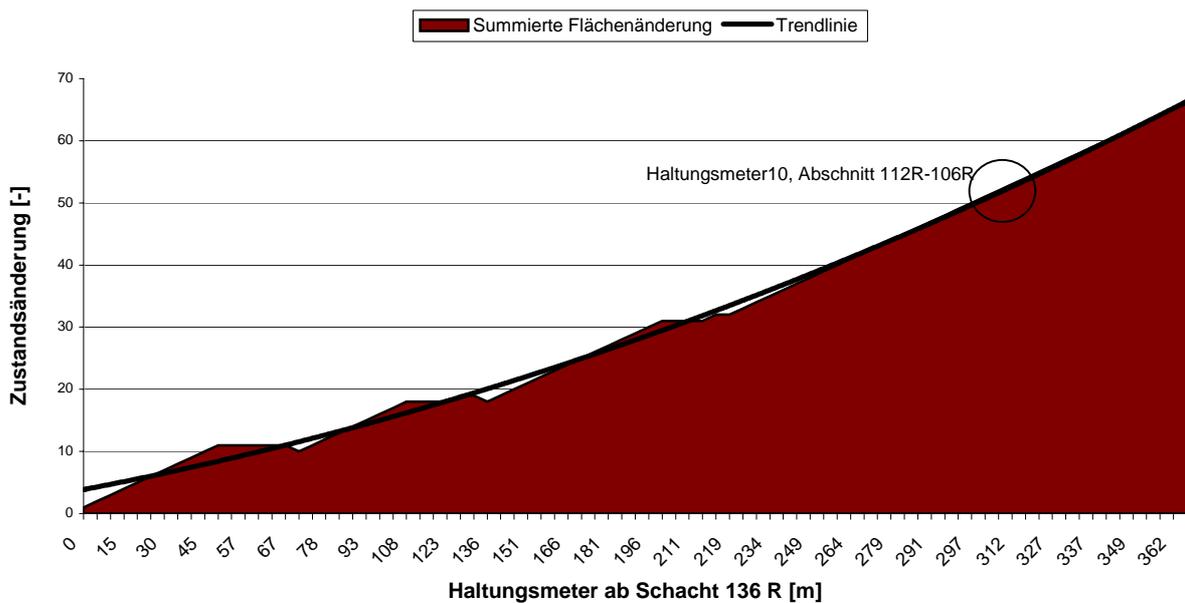


Diagramm 5.12: Numerische Auswertung der Flächenänderung des Schlammbildungsdiagramms

In der Summe ist deutlich erkennbar, dass entlang der Versuchsstrecke die Belastung insgesamt zunimmt und sich somit über den Verlauf des Versuchs hinweg eine deutlich spürbare Erhöhung der ökologischen Belastung durch die Verwendung des Härtestabilisators ergibt. Die eingefügte Trendlinie ist dabei entlang der gesamten Versuchsstrecke stetig.

Analog zur Analyse des Pilzbewuchses der Depotsteine vom Versuchsstand im Saukopftunnel wurden auch die Depotsteine aus den Revisionsschächten hinsichtlich des beobachtbaren Pilzbewuchses untersucht (Tabelle 5.2).

Tabelle 5.2 Analyseergebnisse des Pilzbewuchs an Depotsteinen aus dem Dränagesystem

Probenobjekt	KBE-Wert [Kolonie Bildende Einheiten]	Identifizierung des Bewuchs
Depotstein aus Dränage	nicht auswertbar > 10 ³ KBE	Penicillium sp. Bacillus sp. Enterobacteriaceae Enterobacter cloacae Enterobacter coli Pseudomonaden Pseudomonas aeruginosa

Wie auch bereits für den Versuchsstand im Saukopftunnel beobachtet, liegen die Mengen des beobachteten Pilzwuchses und der daraus resultierenden Keimbelastung außerhalb der Nachweisgrenzen. Interessant ist in diesem Fall vor allem das Auftreten von Coli-Bakterien, die auf einen aktiven biologischen Verfallprozess hindeuten und in der Menge durchaus als massive Gefährdung angesehen werden müssen. Angesichts der Ergebnisse der Kamerabefahrungen und den in Tabelle 5.2 dargelegten Analyseergebnissen, kommt es offensichtlich zu einer Verstärkung der Problematik einer aktiven Mikrobiologie der Versuchsstrecke durch die Verwendung von Härtestabilisatoren auf Basis von PASP.

5.2.3.2.4 Verfahrenstechnik

Analog zu der am Versuchsstand im Saukopftunnel beobachteten Bildung von Kalkseifen konnte auch an den im Entwässerungssystem ausgelegten Depotsteinen neben dem Phänomen der Pilz- und Schimmelbildung auch die Bildung von Calciumstearat als schleimigem und dabei hartnäckigem Überzug der Depotsteine beobachtet werden (Bild 5.33 und Bild 5.34). Hinzu kam das weitere Phänomen einer dunklen Verfärbung der Depotsteine (Bild 5.34), welche gemäß der Ergebnisse der Laboranalytik von an den Depotsteinen anhaftendem PASP herrührt, welches nicht mit dem Dränagewasser abtransportiert wird, sondern den Depotstein umhüllt. Laut Aussage des Herstellers jedoch ohne dabei die Funktion des Depotsteins zu beeinträchtigen [25].



Bild 5.33 Depotsteine, Schacht 130R - Unterseite



Bild 5.34 Depotsteine Schacht 130R – Oberseite

Betrachtet man den Rückgang der Calciumionenkonzentration (Diagramm 5.5), parallel zur sukzessiven Abnahme des PASP-Gehalts im Dränagewasser (Diagramm 5.10), in Verbindung mit der fortschreitenden Verschmutzung der Versuchsstrecke im Saukopftunnel im Allgemeinen und der Verschmutzung der ausgelegten Depotsteine im Speziellen, so ist ein Zusammenhang dieser Beobachtungen nahe liegend: Aller Voraussicht nach bedingt die zunehmende Verschmutzung des Systems und vor allem der Depotsteine einen Rückgang ihrer Effektivität und Funktionalität.

Der Verbrauch an Depotsteinen bzw. ihre Standzeit ist in Folge dieser extremen Verschmutzungsphänomene nur schwer zu deuten und zu quantifizieren. Die Untersuchungen am Entwässerungssystem des Saukopftunnels haben aber am Schacht 106R qualitativ gezeigt, dass die Auflösungsgeschwindigkeit von Depotsteinen offensichtlich nicht nur von der Durchflussmenge des Wassers, seiner Temperatur und seinem pH-Wert abhängt, sondern auch vom Wasserstand des betrachteten Schachts und dem daraus resultierenden Durchfeuchtungsgrad der Depotsteine. Während bei Versuchsende in allen anderen Schächten der Versuchsstrecke noch deutliche Menge an Depotsteinen aufzufinden waren, hatten sich in Schacht 106R, in dem die Steine konstant rund 30 cm unter der Wasseroberfläche lagen, sämtliche eingebrachten Depots bereits nach etwa 3,5 Monaten aufgelöst. Schon im Versuchsstand am Saukopftunnel war festzustellen, dass die durchfeuchteten Depotsteine eine breiige Konsistenz annehmen und bereits bei geringen mechanischen Belastungen zur Auflösung neigen. Dies vorausgesetzt hat die Strömung innerhalb des Schachts 106R offensichtlich zu einer sukzessiven Erosion der Depotsteine und damit zu einer schnelleren Auflösung der Steine geführt. Im Ergebnis zeigt sich so ein quantitativ erheblicher Unterschied der Verbrauchswerte zu den anderen Schächten, bei denen nach 6 Monaten jeweils nur ca. 50 % des Härtestabilisatorvolumens aufgebraucht waren.

Dieses Phänomen lässt sich allerdings an dieser Stelle nicht genauer quantifizieren, da unklar ist, welchen Einfluss z.B. die Bildung von Kalkseifen auf die Standzeit der Depotsteine außerhalb von Schacht 106R hatte.

5.3 Zusammenfassung und Bewertung der Versuchsergebnisse

5.3.1 Fester Härtestabilisator in der Filterschicht des Tunnelbauwerks Saukopf

Die Voruntersuchungen im Labor haben gezeigt, dass die in der Literatur bislang angegebenen Auflösungsgeschwindigkeiten und Standzeiten, angesichts der derzeit auf dem Markt befindlichen Depotsteine, nicht haltbar sind. Auch wenn der hier durchgeführte Vorversuch in seinen Randbedingungen nicht denen einer Tunneldränage entspricht, muss auch bei differenzierter Sichtweise auf die Ergebnisse und Einrechnung einer Sicherheit (z.B. Annahme der bis zu dreifachen Standzeit gegenüber dem Vorversuch) immer noch von zu geringen Standzeiten für einen derartigen Einsatzbereich gesprochen werden (11 Wochen x 3 = 33 Wochen = rd. 8 Monate im Vergleich zu 5 Jahren z.B. nach [54][55]). Hinzu kommen dabei noch verfahrenstechnische Probleme wie die nicht umkehrbare Hohlraumbildung im Filter bei Auflösung des Depots und ökologischen Probleme, wie z.B. die beobachtete Pilzbildung, auch bei Trinkwasser oder die Entstehung von Kalkseifen.

Die danach durchgeführten Versuche am Versuchsstand im Saukopftunnel haben zudem gezeigt, dass unter gewissen Umständen die Verwendung der PSI-Depotsteine offenbar zu einer deutlichen Erhöhung der Ablagerungsneubildung führen kann. Die sich ausbildenden Ablagerungen waren in ihrer Konsistenz zwar tendenziell weicher als unbeeinflusste Kalkablagerungen, jedoch bei höherer Quantität. Zudem können Depotsteine unter gewissen Voraussetzungen (geringe Fließgeschwindigkeiten, atmosphärischer Kontakt) Calciumstearate, also Kalkseifen ausbilden, die einen schleimigen, klebrigen Überzug erzeugen. Zudem wurde ohne Indikation durch das Standwasser eine deutliche Bildung von Pilzen und Hefen auf den Depotsteinen beobachtet, die bei Bestimmung der zugehörigen Keimzahlen extreme Werte erreichten.

Im Ergebnis zeigen sich Depotsteine für einen Einsatz in Filterschichten ungeeignet. Die Probleme hinsichtlich der Kalkseifen und bezüglich der ökologischen Probleme lassen sich zwar gegebenenfalls durch geeignete neue Rezepturen der Depotsteine lösen, beispielsweise durch Zugabe eines Konservierungsmittels. Allerdings sind die Standzeiten der Depotsteine zu gering, um effektiv Spitzenbelastungen durch Calcit ausfällungen in den ersten 5 Jahren nach Fertigstellung des Bauwerks abzufangen. Dies vorausgesetzt ist zu berücksichtigen, dass Filterschichten aufgrund des Schalenaufbaus bei Tunnelbauwerken nicht revisierbar sind und daher einmal aufgelöste Depots nicht ersetzt werden können.

5.3.2 Fester Härtestabilisator in den Dränageleitungen des Tunnelbauwerks Saukopf

Die Versuche an einem Teilabschnitt des Entwässerungssystems des Saukopftunnels unter Verwendung der erweiterten Nachweismethodik haben verdeutlicht, dass der Einsatz von Depotsteinen in den Revisionsschächten eines Entwässerungssystems unter bestimmten Randbedingungen tendenziell zu einer Erhöhung der Ablagerungsneubildung und einer starken Reaktion des Härtestabilisators mit dem Dränagewasser führen kann. Die hieraus entstehende Verschmutzung des Systems ist ökologisch bedenklich, da während des Ver-

suchszeitraum offenbar auch die Bildung bzw. Vermehrung von Coli-Bakterien gefördert wurde. Die entstehenden Mehrablagerungen sind verfahrenstechnisch unerwünscht. Sie bedingen im Extremfall einen erhöhten Wartungsaufwand und somit einen Kostenzuwachs bei den Unterhaltskosten. Dieser ist durch die vorliegenden Untersuchungen allerdings nicht quantifizierbar.

Parallel konnte durch die Verwendung der PSI-Depotsteine tendenziell ein Rückgang härterer älterer Ablagerungen festgestellt werden. Ein solcher Rückgang bedingt langfristig einen geringeren mechanischen Reinigungsaufwand, welcher direkt in einer Erhöhung der Lebensdauer des Dränagesystems mündet und damit in einen Rückgang der Unterhaltskosten. Auch dieser ist durch vorliegende Untersuchungen nicht weiter quantifizierbar.

In den Revisionsschächten des Saukopftunnels wurde weiterhin eine extreme Bildung von Calciumstearat an den Depotsteinen beobachtet. Mit der Bildung dieser Stearate und der zunehmenden Verschmutzung des Systems und der Depotsteine sank die beobachtbare Menge an Wirkstoff im System.

Zudem konnte festgestellt werden, dass neben pH-Wert, Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit auch der Durchfeuchtungsgrad der Depotsteine, also indirekt die Höhe des Wasserstandes im jeweiligen Revisionsschacht, einen direkten Einfluss auf die Auflösungsgeschwindigkeit der Depotsteine besitzt. Hohe Durchfeuchtungen bedingen offensichtlich hohe Auflösungsgeschwindigkeiten bei den Depotsteinen. Dies hängt angesichts der Versuchsergebnisse mit der Konsistenz der Depotsteine zusammen, die bei Feuchtwerden deutlich an Festigkeit verlieren und so ohne wirkliche Indikation durch pH-Wert, Strömungsgeschwindigkeit und Temperatur des Dränagewasser auch durch seichte Strömungen erodiert werden.

Im Ergebnis ist festzustellen, dass der Einsatz von Härtestabilisatoren in Revisionsschächten zur Reduzierung der Wartungs- und Unterhaltskosten von dränierten Tunnelbauwerken weder generell empfohlen, noch generell abgelehnt werden kann. Die Rückbildung älterer Ablagerungen ist positiv und kostenminimierend zu sehen. Die aufgezeigten ökologischen und verfahrenstechnischen Problemfelder sowie die Ablagerungsmehrbildung sind diesbezüglich negativ zu sehen. Ein Zusammenhang zwischen ökologischer Problematik (mikrobiologischer Angriff auf den Wirkstoff) und Ablagerungsmehrbildung ist denkbar und wäre genauer zu untersuchen. Ein genereller Einsatz am Saukopftunnel ist auszuschließen. Eine Verwendung an einem anderen Bauwerk im Einzelfall zu prüfen.

5.3.3 Vergleich bisherige zu erweiterter Nachweismethodik

Als zweites Versuchsziel wurde eingangs der Vergleich der bislang verwendeten Nachweismethodik mit der im Zuge dieser Arbeit erweiterten Nachweismethodik formuliert. Als theoretischer Ansatz war dargelegt worden, dass das bislang verwandte Procedere mit vornehmlichen Blick auf die Hydrochemismen und phänomenologischen Datenerfassungen an den Revisionsschächten in seinen Schlussfolgerungen nicht hinreichend ist. Teilweise werden einige, für die Bewertung der Effektivität und Funktionalität des Verfahrens, wichtige Aspekte und signifikante Dränageabschnitte ausblendet. Dieser Ansatz hat sich durch vorliegende Untersuchungen bestätigt. Zur Verdeutlichung dieser Analyse sind die sich methodenspezifisch ergebenden Auswertungen der Versuche im Weiteren stichpunktartig in

Tabelle 5.3 zusammengefasst. Diese enthält als Abschluss ebenfalls eine Bewertung der erzielten Ergebnisse im Hinblick auf die Beurteilung der Funktionalität des Härtestabilisators.

Tabelle 5.3: Tabellarischer Vergleich der Ergebnisse des Versuchs

Kriterium	Ergebnis	
	Bisherige Methodik	Erweiterte Methodik
Hydrochemische Entwicklung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ pH-Wert relativ konstant (bei konstanter Temperatur und konstanter Fließgeschwindigkeit) ▪ Erhöhung des mittleren Calciumgehalts 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ pH-Wert relativ konstant (bei konstanter Temperatur und konstanter Fließgeschwindigkeit) ▪ Erhöhung des mittleren Calciumgehalts ▪ Schwankungen bei der Calcitsättigung
Ablagerungsentwicklung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rückgang der Ablagerungsneubildung im Bereich der Revisionschächte 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rückgang der Ablagerungsneubildung im Bereich der Revisionschächte ▪ Zunahme der Ablagerungsneubildung zwischen den Revisionschächten ▪ Rückgang der harten älteren Ablagerungen
Ökologie	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zulässiger Grenzwert im Bereich der Übergabe des Dränagewassers an die Vorflut nicht bedenklich 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zulässiger Grenzwert im Bereich der Übergabe des Dränagewassers an die Vorflut nicht bedenklich ▪ Hohe Verschmutzung des Systems durch den Härtestabilisator ▪ Förderung der Vermehrung von Coli-Bakterien ▪ Pilzbewuchs auf den Depotsteinen
Verfahrenstechnik	(keine Auswertung)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Standzeitbeeinflussung durch Wasserhöhe im Schacht ▪ Stearatbildung bei geringen Fließgeschwindigkeiten und Luftkontakt ▪ „Verkrustung“ der Depotsteine durch Reste von PASP
Ergebnis →	Härtestabilisator funktional	Härtestabilisator nicht funktional

Wie in Tabelle 5.3 dargelegt, wäre gemäß der kausalen Schlussfolgerung der bisherigen Nachweismethodik der Einsatz von Härtestabilisatoren am Saukopftunnel als erfolgreich zu werten. Im Gegensatz dazu ist ein genau gegenteiliges Urteil bei Anwendung der erweiterten Nachweismethodik zu fällen. Dies ist jedoch nicht auf unterschiedliche Versuchsergebnisse oder einen differierenden Bewertungsmaßstab zurückzuführen. Die Studie der Tabelle eröffnet, dass sich die Ergebnisse nach ursprünglichen Methodik völlig identisch im Rahmen der erweiterten Methodik wieder finden lassen.

Vielmehr erhöht die Anwendung der erweiterten Methodik die Quantität an bewertbaren Aussagen und Erkenntnissen. Diese liefern qualitative Ergebnisse, die eine gegenteilige Gesamtanalyse zur ursprünglichen Methodik erzwingen.

Bei Anwendung der bisherigen Nachweismethodik werden die hier beobachteten kritischen Entwicklungen am Dränagesystem (Zunahme der Ablagerungen vor dem Spülen, Entwicklung eines bedenklichen ökologischen Zustandes des Systems) nicht bei der Urteilsfindung eingeschlossen. Dies konnte durch vergleichende Auswertungen nach beiden Vorgehensweisen und durch die Betrachtung der dabei entstehenden Aussagen, hinsichtlich der Effektivität des Härtestabilisators, nachgewiesen werden. Durch die vergleichenden Untersuchungen am Saukopftunnel wurde die These einer effektiven ursprünglichen Nachweisführung somit erfolgreich falsifiziert.

Für einen künftigen Einsatz von Härtestabilisatoren in Revisionsschächten wäre demnach ein bauwerkspezifischer Nachweis der Funktionalität und Effektivität unter Berücksichtigung der erweiterten Methodik, zu empfehlen. Diese wird daher im folgenden Kapitel auf andere Bauwerke übertragbar aufbereitet.

6 Allgemeines Untersuchungskonzept

6.1 Allgemeines

Basis für das im Folgenden dargestellte allgemeine und bauwerksunabhängige Versuchskonzept sind die Erkenntnisse hinsichtlich der Aussagekraft der bisherigen und der erweiterten Nachweismethodik für Härtestabilisatoren der vorhergehenden Kapitel. Des Weiteren fließen Überlegungen mit ein, die zu einer Vereinheitlichung der Auswertungen führen, universell einsetzbar sind und damit eine rasche Überprüfbarkeit der an einem beliebigen Bauwerk erzielten Ergebnisse ermöglichen. Günstigstenfalls kann das Untersuchungskonzept allgemein als Teil des diesbezüglichen Regelwerks installiert werden. Zumindest aber liegen mit Durchführung dieses Konzepts bauwerkspezifisch abgesicherte Ergebnisse vor, mit deren Hilfe künftig Einsätze von Härtestabilisatoren aufschlussreich und eindeutig bewertet werden können.

6.2 Effektivitätskriterien

6.2.1 Hydrochemische Entwicklung

Die Effektivität des Härtestabilisators lässt sich anhand der hydrochemischen Leitparameter und ihrer Entwicklung beschreiben. Diese Entwicklung ist daher zu erfassen, zu analysieren und hinsichtlich eines spürbaren Einflusses zu bewerten. Die dabei zu beobachtenden Parameter sind im Einzelnen:

- pH-Wert des Wasser
- Temperatur des Wassers
- Calciumgehalt des Wassers

Während es sich bei pH-Wert und Temperatur um Untersuchungen handelt, die vorort durch geeignete Gerätschaften durchzuführen sind, ist der Calciumgehalt durch eine geeignete Laboranalytik zu bestimmen. Hierbei sind auch noch

- Alkalität
- Elektrische Leitfähigkeit

zu bestimmen. Allgemein ist hierbei eine Zunahme der beobachtbaren Calciumgehalte im Versuchszeitraum, als notwendige Bedingung für einen funktionalen Härtestabilisator zu sehen. Dies gilt sofern alle sonstigen hydrochemischen Leitparameter eine Konstanz in ihrer Entwicklung aufweisen. Durch die Hinzunahme von Alkalität und elektrischer Leitfähigkeit ist, anhand des Rechenverfahrens 2 nach DIN 38 404-10, der Calcitsättigungsindex des Dräna-

gewassers zu bestimmen, der als Maß für die Neigung des Dränagewassers zur Abscheidung von Calcit anzusehen ist. Erst dieser ermöglicht eine Bewertung, ob Kristallbildung in der jeweiligen Dränage hydrochemisch zu erwarten ist. Letzteres gilt für $SI > 1,0$.

6.2.2 Ablagerungsentwicklung

Die Ablagerungsentwicklung am Gesamtsystems ist versuchsspezifisch zu ermitteln und zu bewerten. Dies umfasst neben den Revisionsschächten auch alle konditionierten Haltungen. Hierbei ist zwischen verschiedenen Aspekten zu unterscheiden:

- der Entwicklung von Ablagerungen vor dem Spülen (Neubildung von Ablagerungen)
- der Entwicklung von Ablagerungen nach dem Spülen (Ablagerungen, die normalerweise als Hartablagerung nach dem Spülen im System verbleibt und die Bewertung ihrer Härte)

Zur Erfassung und Auswertung der Ablagerungsbildung wird im Folgenden ein schlüssiges Verfahren vorgestellt.

6.2.3 Ökologie

Der Ökologische Aspekt umfasst einerseits die Bewertung der Konzentration des Wirkstoffs im Bergwasser, also die Einhaltung behördlicher Grenzwerte. Andererseits ist hierbei das Zusammenspiel des Härtestabilisators und seiner speziellen Aggregatsform, mit den Randbedingungen der Bauwerksdränage zu sehen, vor allem bei Vorhandensein einer aktiven Mikrobiologie und einer sich hieraus ergebenden Foulingproblematik. Da der Wirkstoff auf Grund seiner biologischen Abbaubarkeit als Nährstoff für Mikroorganismen fungieren kann, ist hierauf besonderes Augenmerk zu legen.

6.2.4 Verfahrenstechnik

Hinsichtlich des jeweiligen Einsatzspektrums ist die Verfahrenstechnik zu bewerten und Probleme, die in Folge der verwandten Verfahrenstechnik auftreten können, darzustellen. Dies betrifft vor allem Probleme hinsichtlich der Rezeptur des Depotsteines (z.B. Bildung von Kalkseifen) und seines Auflösungsverhaltens (Auflösungsgeschwindigkeitserhöhung in Abhängigkeit vom Durchfeuchtungsgrad des Depotsteins).

6.3 Versuchsprogramm

6.3.1 Ablauf

Es ist ein bauwerksunabhängiges Versuchsprogramm zu konzipieren, welches sich als Flussdiagramm schematisch abfassen und darstellen lässt (Diagramm 6.1):

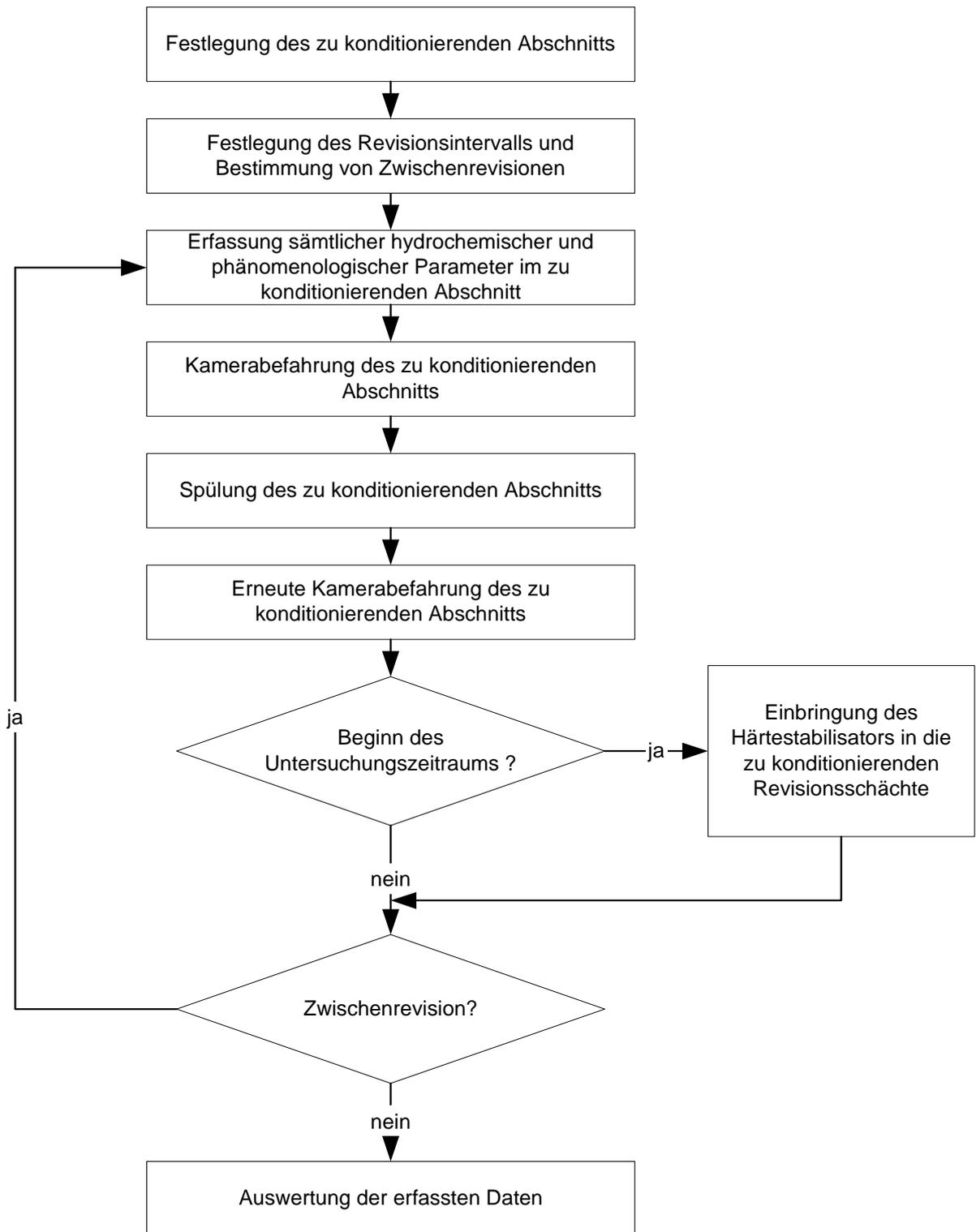


Diagramm 6.1: Schematische Darstellung des allgemeinen Versuchsprogramms zur Ermittlung der Effektivität von Härtestabilisatoren bei Einsatz im Rahmen von Dränagesystemen

Nach Festlegung des zu konditionierenden Abschnitts des jeweiligen Entwässerungssystems, ist zunächst die Länge des Untersuchungszeitraums zu formulieren. Innerhalb des so bestimmten Gesamtzeitraums sind Zwischenrevisionen einzuplanen. Die Länge eines Zwischenintervalls sollte mindestens so lang wie ein normaler Revisionszyklus des jeweiligen Bauwerks sein. Nur so ist eine Vergleichbarkeit der Daten zur Ablagerungsbildung, aus dem Zeitraum zu Versuchsbeginn mit denen zu Abschluss eines Zwischenintervalls, gegeben.

Zu diesen Zwischenrevisionen sind hinsichtlich aller effektivitätskriterien-bezogenen Parameter Messungen durchzuführen und diese auszuwerten. Hierdurch unterliegt die Beurteilung der hydrochemischen Entwicklung einer höheren Redundanz (mehrere gleichlange Intervalle die z.B. äußere klimatische Einflüsse besser widerspiegeln).

Gegebenenfalls kann so, durch wiederholtes Durchlaufen des Versuchsprogramms, auch der unterschiedliche Einfluss einer angepassten Dosierung des Wirkstoffs verdeutlicht und bewertet werden.

6.3.2 Zu erfassende Parameter

Nachfolgende Tabelle stellt die bei Durchführung des Versuchsprogramms zu erfassenden Parameter dar, differenziert nach phänomenologisch und analytisch zu erfassenden Parametern.

Tabelle 6.1: Differenzierte Darstellung der zu erfassenden Parameter

	optisch zu erfassende Parameter	messtechnisch zu erfassende Parameter
vor Ort	(Erfassung nach Augenschein) - Ablagerungsentwicklung im jeweiligen Revisionsschacht (Härte u. Umfang) - Strömungsverhältnisse (Wasserfluss, Wasserstand) - Allgemeiner Zustand des jeweiligen Revisionsschachts	- pH-Wert - Temperatur - elektrische Leitfähigkeit
im Nachhinein	(Erfassung durch Kamerabefahrungen) - Ablagerungsentwicklung im Gesamtsystem vor dem Spülen (Kamerabefahrung) - Ablagerungsentwicklung im Gesamtsystem nach dem Spülen (Kamerabefahrung) - Schlamm bildung im System	- Calciumgehalt (Wasserprobe) - PASP-Gehalt (Wasserprobe) - Alkalität (Wasserprobe) - Keimzahlbestimmung (Wasserprobe oder gegebenenfalls am Depotstein)

6.4 Auswertung der ermittelten Daten unter Berücksichtigung der relevanten Parameter

6.4.1 Darstellung der hydrochemischen und hydrologischen Entwicklung

Die Darstellung der hydrochemischen Entwicklung umfasst zwingend folgende Parameter:

- pH-Wert
- Calciumgehalt des Dränagewassers
- SI-Index

Folgende Datenerfassungen sind zunächst nur zu bewerten und im Falle von unerwarteten Abweichungen oder Entwicklungen gezielt auszuwerten:

- Strömungsverhältnisse
- Strömungsbild
- Allgemeine Entwicklung des Revisionsschachts

Die Auswertungen münden in der Darstellung der hydrochemischen Parameter entlang der Versuchsstrecken. Hierbei sind jeweils alle Revisionsschächte und alle Revisionszeitpunkte darzustellen. Eine exakte Erfassung der Strömungsverhältnisse ist nur mit relativ hohem Aufwand zu realisieren. Eine Bewertung anhand von Wasserständen und Abschätzungen der Fließmenge reicht angesichts der Zielsetzung des Versuchs aus, vor allem da mit Hilfe der Bewertung der Ablagerungsentwicklung die Effektivität des Verfahrens direkt bewertet wird.

6.4.2 Darstellung der Ablagerungsentwicklung - Auswertungsschema für Kamerabefahrungen

6.4.2.1 Allgemeines

Die Darstellung der Ablagerungsentwicklung umfasst vornehmlich die Auswertung der Kamerabefahrungen und die Umsetzung der hierbei gewonnenen Daten in einen Übersichtsplan. Die Darstellung der Ablagerungsentwicklung an den Revisionsschächten muss nicht gesondert erfolgen, da selbige in die Auswertung der Kamerabefahrungen integriert ist. Gegebenenfalls können bei Auftreten unerwarteter Phänomene, gesonderte Aussagen zu an Revisionsschächten gemachten Beobachtungen erfolgen. Für die Erkenntnisgewinnung, hinsichtlich der Effektivität des Verfahrens, spielen sie jedoch nur eine untergeordnete Rolle. Zudem können sich in den Revisionsschächten Verhältnisse ausbilden, die für das Gesamtsystem nicht repräsentativ sind.

Im Folgenden wird ein Verfahren vorgestellt, mit dem eine einheitliche Darstellung der bauwerkspezifischen Schäden, Mängeln und Ablagerungserscheinungen möglich wird. Basis

hierfür ist das von der ATV entwickelte Kürzelsystem, mit dessen Hilfe Kamerabefahrungen von Abwassersystemen dokumentiert und ausgewertet werden.

6.4.2.2 Zustandsbeschreibung von Abwasserleitungen nach ATV

Die vorgeschriebene Sichtprüfung einer Rohrleitung der kommunaler Abwasserentsorgung umfasst:

- Richtungen und Höhenlagen
- Verbindungen
- Beschädigungen und Deformationen
- Anschlüsse
- Auskleidungen und Beschichtungen

Das ATV-Arbeitsblatt 143 [4] fordert für diese Untersuchung eine Kamerabefahrung der nicht begehbaren Rohrleitungen. Zur Auswertung liefert die ATV 143 Teil 2 in Kombination mit dem Merkblatt ATV – M 149 ein eigenes Dokumentations- und Bewertungskonzept. Des Weiteren wird eine Dichtheitsprüfung gemäß DIN EN 1610 verlangt, die jedoch für das Entwässerungssystem eines Straßentunnels, auf Grund der Verwendung geschlitzter Rohre und vor allem vor dem Hintergrund der hier diskutierten Problematik, keine Bedeutung besitzt.

ATV – M 143 Teil 2 [4] beinhaltet in Anlage 2 und 3 ein beispielhaftes Kürzelsystem, welches sehr detailliert auf vorhandene Schäden des Abwassersystems eingeht. Dieses System gliedert sich auf in „Allgemeine Texte“, „Zustandstexte für Kanäle und Leitungen“ und „Zustandstexte für Schächte und Bauwerke der Ortsentwässerung“, für die ein jeweiliges Kürzelsystem vorhanden ist. [5]. Die Kürzel „Allgemeine Texte“ werden dabei als bereits fertige, zwei- bis vierstellige Kürzel, mit einer eventuell angehängten numerischen Angabe geliefert (Beispiel: QVN300 = Nennweitenveränderung auf DN 300).

Die Kürzel für „Zustandstexte für Kanäle und Leitungen“ und „Zustandstexte für Schächte und Bauwerke der Ortsentwässerung“ bestehen in der Regel aus vier Kürzelstellen (in Form von Buchstaben), welche grundsätzlich frei kombinierbar sind.

Diese vier Kürzel stellen im einzelnen bei Kanälen und Leitungen dar:

- 1. Stelle: Zustandsgruppe (z.B. Hindernis, Riss etc.)
- 2. Stelle: Zustandsausprägung (z.B. Sedimentation, Inkrustation etc.)
- 3. Stelle: Undichtigkeitsangaben (z.B. sichtbarer Wasseraustritt, Geröll etc.)
- 4. Stelle: Lage im Profil, Sonstiges (z.B. Scheitel oben, Sohle unten, Rückstau)

Zur Dokumentation von Schächten und Bauwerken der Ortsentwässerung sind die Stellen 1-3 nahezu identisch. Lediglich bei der 4. Stelle wird eine Differenzierung vorgenommen.

- 4. Stelle: Bauwerksgegenstand (z.B. Schmutzfänger, Auflagerring etc.)

Weiterhin gibt die ATV Beispiele für die am häufigsten auftretenden Störungen mit ihren jeweiligen Kürzeln an.

Die Auswertung festgestellter Schäden erfolgt im Allgemeinen nach dem Merkblatt ATV- M 149 „Zustandserfassung, -klassifizierung und -bewertung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden“ [5].

6.4.2.3 Übertragung und Modifikation des Kürzelsystems auf dränierte Tunnelbauwerke unter Berücksichtigung der Ablagerungsproblematik

Grundlegend unterscheiden sich bei Abwasserleitungen feststellbare Mängel und Schäden nicht von denen, die bei Dränagerohren angetroffen werden können. Einzig entscheidende Differenz zwischen den beiden Systemen bildet die für Abwasserleitungen signifikante Dichtigkeitsanalyse, die im Rahmen des Kürzelsystems durch die dritte Stelle repräsentiert wird.

Für eine geeignete Anpassung des Kürzelsystems auf die Beschreibung von Versinterungsereignissen in Dränagen wird die 3. Stelle des Kürzelsystems hier nun dazu genutzt, versinterungsspezifische Probleme der untersuchten Haltung abzubilden. Das Kürzel ermöglicht nun einerseits, einen bestehenden mechanischen Schaden als versinterungstechnisch „neutral“ (z.B. Riss in der Firste) oder „relevant“ zu deklarieren (z.B. Schaden in der Sohle mit damit verbundener Wasserumwälzung und verstärkter Versinterungsgefahr). Weiterhin können beobachtete Versinterungen bzgl. ihrer Stärke klassifiziert werden (leicht, mittel, stark). Die einzelnen Buchstabenkürzel drücken nun aus:

- Zustandsgruppe (1. Stelle), z.B. Riss, Deformation, Versinterung
- Zustandsausprägung (2. Stelle), z.B. Stärke des mechanischen Schadens
- Versinterungsrelevanz/Versinterungsgrad (3. Stelle), z.B. versinterungsrelevant, versinterungsneutral oder „stark“, „mittel“ etc.
- Lage im Profil (4. Stelle), z.B. Firste, Kämpfer, Sohle

Neben der Deklaration der Schadenslage beinhaltet die 4. Stelle noch die Möglichkeit, zwischen Versinterungen von Sohle und Schlitzen zu unterscheiden. Die abwasserspezifischen Probleme werden aus der Kürzelschrift ausgeschlossen, da sie für Straßentunnel ohne Relevanz sind.

6.4.2.4 Anwendung des Kürzelsystems auf Schäden und Ablagerungen

Die von der ATV zur Verfügung gestellten Kürzel und die zugehörigen Definitionen sind hinsichtlich der Dokumentation von Schäden und Ausführungsmängeln hinreichend erprobt und bekannten Schadensmustern angepasst. Hinsichtlich der Beobachtung von Versinterungen, sind als Kürzel einige Ergänzungen vorzunehmen, vor allem hinsichtlich der Lokalisierung von Ablagerungen im Querschnitt und der Klassifizierung ihrer Mächtigkeit. Unter Berücksichtigung des bereits am Saukopftunnel verwandten dreistufigen Systems - Klassifizierung in „leichte“, „mittlere“ und „starke“ Versinterungen - ergibt sich in Tabelle 6.2 dargestellte überarbeitete Kürzelsystem.

Tabelle 6.2: Problemspezifisch überarbeitetes Kürzelsystem nach ATV [4][5]

1.: Zustandsgruppe		2.: Zustandsausprägung		3.: Folgeschäden/ Versinterungsgrad		4.: Lage im Profil/ Sonstiges		
A	Abzweig	A	Anschluss Rohr	A	Leichte Versinterung	A	Axial	
B	Rohrbruch	B	Ausbiegung	B	Mittlere Vers.	C	Schlitz	
E	Verschleiß	C	Verbindung	C	Starke Vers.	H	Horizontal	
D	Deformation	F	Flitermaterial	D	Verstopfung	L	Linker Kämpfer	
H	Hindernis	H	Horizontal	N	Versinterungsneutral	O	Scheitel	
L	Lageabweichung	I	Inkrustation	R	Versinterungsrelevant	R	Rechter Kämpfer	
M	Sanierung	L	Längs-, Axial-			S	Rückstau [cm]	
R	Riss	M	Fremdmaterial			U	Sohle	
T	Fehlende Teile	N	nicht fachgerecht			V	Vertikal	
V	Versinterung	Q	Quer-, Radial-			-	Gesamter Umfang	
Z	sonstiger Schaden	R	Riss					
		S	Scherbe					
		T	Einsturz					
		V	Vertikal					
		W	Wandung					

Zusätzlich zu den hier dargelegten Kürzeln, liefert das diesbezügliche ATV-Arbeitsblatt auch noch eine Anzahl an Steuerkürzeln, die jedoch unmodifiziert für Dränagen übernommen werden können und daher nicht weiter zu bearbeiten sind. Anhand voriger Definitionen ergeben sich folgende die in Tabelle 6.3 dargestellten sinnvollen Buchstabenkombinationen für Tunneldränagen:

Tabelle 6.3: Darstellung der möglichen Kürzel-Kombinationen gemäß Tabelle 6.2

Situation	Kürzelstelle				Beschreibung
	1.	2.	3.	4.	
Abzweig	A	N	(N,R)	(L,O,R,U,-)	Abzweig nicht fachgerecht eingebaut
	A	-	(N,R)	D	Abzweig verstopft
	A	R	(N,R)		Riss im Abzweig
Rohrausbruch	B	A	(N,R)	(L,O,R,U,-)	Fehlendes Rohrstück am Schacht, Bauwerksanschluss
	B	C	(N,R)	(L,O,R,U,-)	Fehlendes Rohrstück im Verbindungsbe- reich
	B	T	(N,R)	(L,O,R,U,-)	Einsturz
	B	W	(N,R)	(L,O,R,U,-)	Loch, fehlendes Rohrwandungsstück
Verschleiß	E	-	(N,R)	(L,O,R,U,-)	mechanischer Verschleiß allgemein
	E	C	(N,R)	(L,O,R,U,-)	mechanischer Verschleiß an Rohrverbin- dung
Deformation	D	-	(N,R)	(L,O,R,U,-)	Deformation
Hindernis	H	-	(N,R)	(L,O,R,U,-)	Hindernis allgemein
	H	F	(N,R)	(L,O,R,U,-)	Eingebrochenes Filtermaterial
	H	I	(N,R)	(L,O,R,U,-)	Inkrustation
	H	M	(N,R)	(L,O,R,U,-)	Fremdmaterial
	H	S	(N,R)	(L,O,R,U,-)	Einragende Scherbe
	Lageabweichung	L	B	(N,R)	U
	L	B	(N,R)	(L,O,R)	Ausbiegung
	L	H	(N,R)	L	Versatz horizontal, links sichtbar
	L	H	(N,R)	R	Versatz horizontal, rechts sichtbar
	L	L	(N,R)	-	Versatz axial
	L	V	(N,R)	O	Versatz vertikal, oben sichtbar
	L	V	(N,R)	U	Versatz vertikal, unten sichtbar
Sanierungsmaßnahme	M	-	(N,R)	(L,O,R,U,-)	Dränagesanierungsmaßnahme
	M	N	(N,R)	(L,O,R,U,-)	Sanierungsmaßnahme unfachgerecht

Tabelle 6.4: Darstellung der möglichen Kürzel-Kombinationen gemäß Tabelle 6.2 (Fortsetzung)

Risse	R	C	(N,R)	(L,O,R,U,-)	Riss im Verbindungsbereich
	R	L	(N,R)	(L,O,R,U,-)	Längsriss
	R	Q	(N,R)	(L,O,R,U,-)	Querriss
	R	S	(N,R)	(L,O,R,U,-)	Scherbenbildung
	R	X	(N,R)	(L,O,R,U,-)	Risse von einem Punkt ausgehend
Fehlstück	T	-	(N,R)	(L,O,R,U,-)	Fehlendes Teil allgemein
Versinterungen	V	-	A	C	Leichte Versinterung Schlitze
	V	-	B	C	Mittlere Versinterung Schlitze
	V	-	C	C	Starke Versinterung Schlitze
	V	-	A	U	Leichte Versinterung Sohle
	V	-	B	U	Mittlere Versinterung Sohle
	V	-	C	U	Starke Versinterung Sohle
	V	C	(A,B,C)	(L,O,R,U,-)	Versinterung an Rohrverbindung
	V	S	(A,B,C)	(L,O,R,U,-)	Versinterung an Scherbe
Sonstiges	Z	-	(D,N,R)	(L,O,R,U,-)	Sonstiger Schaden allgemein
	Z	-	(N,R)	S	Wasserrückstau

Im Folgenden wird zur Veranschaulichung anhand zweier realer Beispiele die Klassifizierung eines Schadens und einer beobachteten Ablagerungsbildung exemplarisch durchgeführt.

Beispiel 1: Klassifizierung eines versinterungsrelevanten Schadensbildes

Vertikaler Rohrversatz (L V R O)



Das Bild 6.1 zeigt einen Rohrversatz in vertikaler Richtung. Diese Lageabweichung erhält dementsprechend das Kürzelpaar „**L V**“ für die ersten beiden Stellen. Der Kreisquerschnitt ist deutlich verschoben. An der Sohle sind bereits deutliche Versinterungsspuren zu erkennen, der Schaden besitzt also Versinterungsrelevanz (3.Kürzel „**R**“). Da der Versatz am oberen Rand zu lokalisieren ist, wird die 4.Stelle mit einem „**O**“ belegt. Das vollständige Kürzel lautet also: **L V R O**

Bild 6.1: vertikaler Rohrversatz an einem Rohrstoß

Beispiel 2: Klassifizierung eines Versinterungsbildes

Versinterung (mittlere Stufe) der Sohle (V – B U)



Auf Bild 6.2 sind Versinterungen zu erkennen (1. Stelle „V“), die sich im freien Rohr gebildet haben (2. Stelle „-“). Bereits der gesamte Sohlbereich ist mit einer Sinterschicht überzogen (4. Stelle „U“), der Querschnitt der Dränage ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht grundlegend reduziert, die Versinterungen sind insgesamt als mittlere Versinterungen anzusehen (3. Stelle „B“). Das Kürzel lautet also: **V – B U**

Bild 6.2: Mittlere Versinterungen auf einer Rohrsohle

Analog zu diesen Beispieldeklinationen können alle, im Rahmen einer Kamerabefahrung feststellbaren Schäden und Versinterungsbilder erfasst und klassifiziert werden.

6.4.2.5 Auswertungsschemas für Kamerabefahrungen

Das modifizierte Kürzelsystem liefert bei Anwendung auf die Aufnahmen einer Kamerabefahrung einen Datensatz, anhand dessen eine genaue Aufschlüsselung der Ablagerungsentwicklung am Gesamtsystem möglich wird. Die durch eine Kamerabefahrung untersuchten Abschnitte und die so erhaltenen Ergebnisse, können nach Schäden und Versinterungen hin differenziert graphisch dokumentiert werden.

Zu diesem Zweck ist die Auswertung in zwei Teile zu gliedern:

a) Erfassung von Schäden des Systems mit Versinterungsrelevanz

Die Erfassung von Schäden allgemein wird bereits durch eine Durchführung der jeweiligen Kamerabefahrungen nach den Richtlinien der ATV vollzogen. Von Bedeutung für dieses Versuchsprogramm ist hierbei die zusätzliche Klassifizierung des jeweiligen Schadens hinsichtlich seiner Versinterungsrelevanz. Diese ist gegebenenfalls nachträglich vorzunehmen und die betreffenden Schäden sind in einem Übersichtsbild der Versuchsstrecke zu kartographieren.

Im weiteren Verlauf der Untersuchung/Auswertung bleibt die Klassifizierung des jeweiligen Schadens identisch, jedoch ist die an ihm beobachtbare Versinterungsentwicklung zu bewerten.

b) Darstellung von Versinterungen und ihrer Entwicklung im Versuchszeitraum

Bei der Kamerabefahrung wird durch das modifizierte Kürzelsystem eine Differenzierung der beobachtbaren Versinterungen erzielt: Durch die Festlegung eines Index der Versinterungsstärke (3. Kürzel) kann die Versinterung am Gesamtsystem dokumentiert und in einem Übersichtsbild dargestellt werden. Diese Darstellung ist von jeder Kamerabefahrung anzufertigen, sodass Vergleichsflächen hinsichtlich der Versinterungsentwicklung vor und nach dem Spülen ermittelt werden können.

Hinsichtlich der Bewertung der Versinterungsentwicklung sind diese Übersichtsbilder mit einem 5 m-Raster zu belegen und das entstehende Netz bei gegebenenfalls auftretenden Schäden mit versinterungsrelevanz zu verfeinern. Durch numerische Auswertung der Flächenänderung vom Startzeitpunkt zum Endzeitpunkt des Versuchs kann so ein Maß für die Versinterungsentwicklung im Gesamtsystem hergestellt werden.

6.4.3 Darstellung ökologischer und verfahrenstechnischer Aspekte

Die Messdaten zur ökologischen Bewertung des jeweiligen Versuchs sind bezüglich der Entwicklung des PASP-Gehalts im Dränagewasser grafisch auszuwerten. So kann beurteilt werden, ob es zu lokalen oder globalen Überkonzentrationen des Wirkstoffs kommt. Hierzu sind die Analyseergebnisse zur Konzentration des Wirkstoffs im Dränagewasser, entlang der Versuchsstrecke grafisch zu dokumentieren und hinsichtlich der bauwerksspezifischen Zulassung und dem in ihr enthaltenen Grenzwert zur maximalen Konzentration des Wirkstoffs zu bewerten.

Für den Fall einer Schlammbelastung, in Folge einer Reaktion des Wirkstoffs mit einer gegebenenfalls vorhandenen Mikrobiologie, sollte diesbezüglich nach der gleichen Auswertungs- und Darstellungsmethodik, wie für die Versinterungen entwickelt, verfahren werden.

Reaktionen, z.B. des Depotsteins mit dem Dränagewasser (Stichwort Pilzbildung), sind revisionsschachtspezifisch zu dokumentieren und hinsichtlich der Auswirkung auf das Gesamtsystem zu bewerten. Gleiches gilt für Erkenntnisse und Auffälligkeiten hinsichtlich der Verfahrenstechnik des Härtestabilisators

6.5 Bewertung des ermittelten Datensatzes

Mit Hilfe der so erhaltenen kriterienspezifischen Auswertungen lässt sich durch eine kausale Schlussfolgerung die bauwerksspezifische Effektivität des Härtestabilisators ermitteln. Formalisiert kann diese Schlussfolgerung wie in Diagramm 6.2 dargestellt gezogen werden.

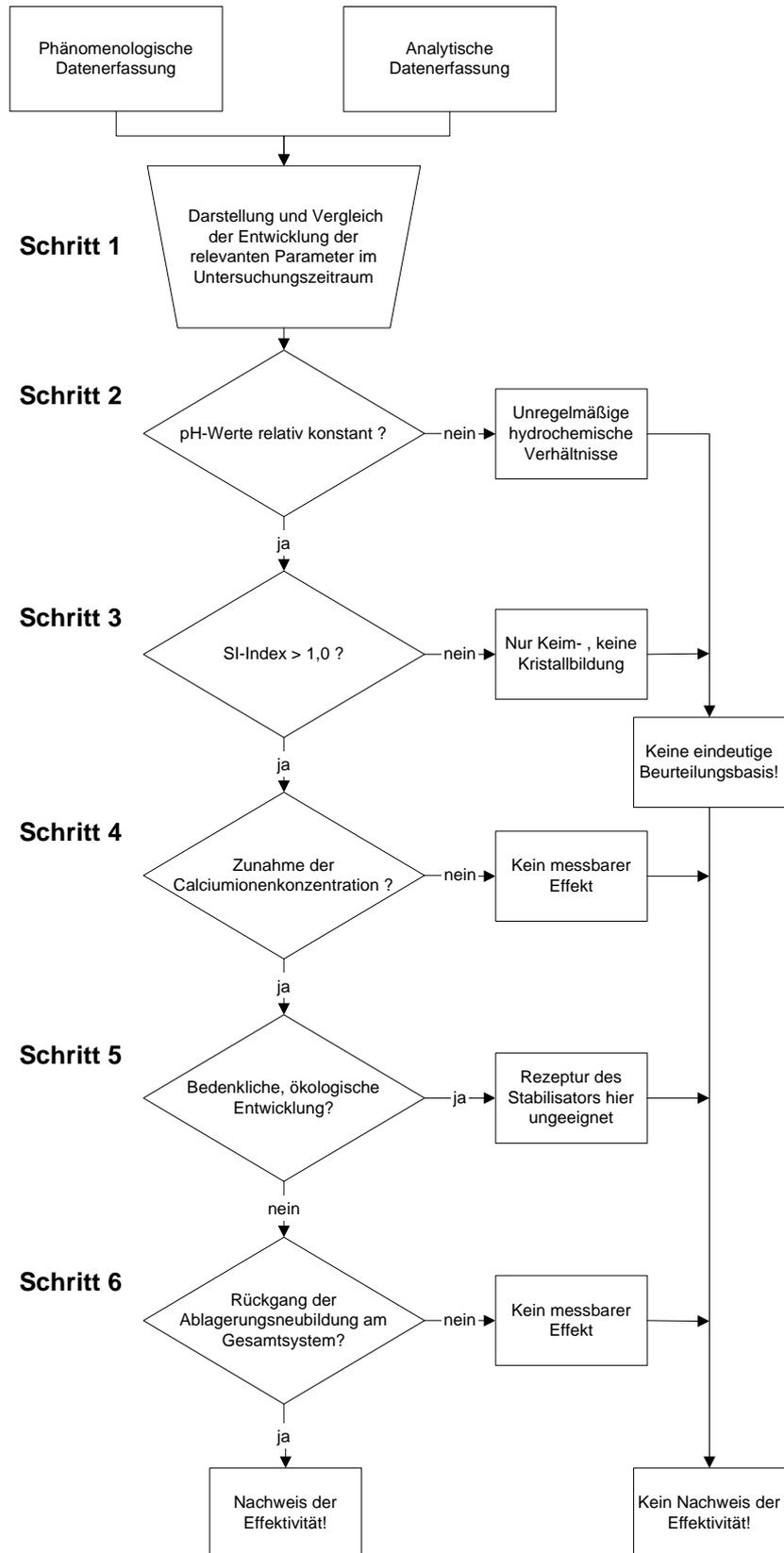


Diagramm 6.2: Formalisierte Darstellung der kausalen Schlussfolgerung zum Nachweis der Effektivität von Härtestabilisatoren, bei Einsatz in der Dränage eines Tunnelbauwerks

Im einzelnen lassen sich die Schritte und die zugehörigen Entscheidungsabfragen wie folgt beschreiben:

- Schritt 1: Darstellung der in Abschnitt 6.4 dargelegten Auswertungen
- Schritt 2: Vergleich der revisionsschachtspezifischen pH-Werte im Untersuchungszeitraum und Überprüfung einer relativen Konstanz der Werte im Untersuchungszeitraum. Sofern diese nicht als konstant bezeichnet werden können, liegt aufgrund zu unregelmäßiger hydrochemischer Verhältnisse keine eindeutige Beurteilungsbasis vor und der Nachweis der Effektivität kann nicht geführt werden
- Schritt 3: Im Falle relativ konstanter pH-Werte: Betrachtung der Sättigungsindizes entlang der Versuchsstrecke über den Versuchszeitraum hinweg. Sofern gilt $SI < 1,0$, kann hinsichtlich der Kristallbildung des Calcits nur maximal von Keimbildung ausgegangen werden, und Kristalle werden sich zumeist nicht ausprägen. Dies ist gleichbedeutend mit einer mehrdeutigen Beurteilungsbasis und der Nachweis der Effektivität kann nicht geführt werden
- Schritt 4: Im Falle $SI > 1,0$: Betrachtung der Calciumionenkonzentration entlang der Versuchsstrecke über den Versuchszeitraum. Sofern keine Zunahme der Calciumionenkonzentration beobachtet werden kann, liegt kein messbarer Effekt des Härtestabilisators vor, und der Nachweis der Effektivität kann nicht geführt werden
- Schritt 5: Im Falle einer Zunahme der Calciumionenkonzentration: Bewertung der ökologischen Entwicklung am Gesamtsystem, hinsichtlich der Konzentration des Wirkstoffs und etwaiger Reaktionen des Härtestabilisators mit dem Dränagewasser. Sofern hierbei eine bedenkliche Entwicklung konstatiert werden muss, z.B. in Form einer starken Schlamm- oder Reaktionsproduktbildung des Wassers mit dem Härtestabilisator oder durch eine massive Überschreitung der Grenzwerte der Wirkstoffkonzentration mit Relevanz für eine etwaige Vorflut, so ist die verwendete Rezeptur des Härtestabilisators nicht geeignet, und der Nachweis der Effektivität kann nicht geführt werden
- Schritt 6: Im Falle einer ökologischen Unbedenklichkeit: Untersuchung der allgemeinen Entwicklung der Ablagerungen von Calcit am Gesamtsystem und Überprüfung hinsichtlich eines Rückgangs der Ablagerungsneubildung. Sofern kein Rückgang der Ablagerungsneubildung beobachtet werden kann, liegt kein messbarer Effekt des Härtestabilisators vor, und der Nachweis der Effektivität kann nicht geführt werden

Sofern im letzten Schritt ein Rückgang der Ablagerungsneubildung erkannt und dargestellt werden kann, ist der Härtestabilisator für den untersuchten Drainageabschnitt als funktional und effektiv anzusehen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Das Verfahren der Härtestabilisierung als versinterungsreduzierende Maßnahme wurde im Rahmen dieser Arbeit, als einziges industrielles Verfahren mit wirklichem Adaptionspotential für den Tunnelbau, auf Verwendbarkeit für Tunneldränagen hin untersucht. Bei diesem Verfahren werden chemische Wirkstoffe dem wasserführenden System zugesetzt, die einen deutlichen Einfluss auf die Kristallstruktur und damit letztlich auch auf die Ablagerungsbildung haben sollen. Derlei Wirkstoffe werden in der Industrie schon seit langem erfolgreich eingesetzt. Für den Tunnelbau wurde durch *Wegmüller* [54] mit der Polyasparaginsäure ein ökologisch zunächst unbedenklicher, weil vollständig abbaubarer Wirkstoff auf den Markt gebracht. Die Wirkstoffzugabe erfolgt hierbei in flüssiger Form oder als im Fließbereich des Wassers abgelegter Depotstein, der in Abhängigkeit von Wassermenge, Temperatur und pH-Wert seinen Wirkstoff an das Berg- bzw. Dränagewasser abgibt. Wirkungsweisen und Verfahrenstechnik dieser Methode zu Ablagerungsreduzierung sind durch den industriellen Einsatz weitestgehend erklärt und nachgewiesen. Unklar war jedoch bislang, ob das Verfahren unter den komplexen Randbedingungen einer Tunneldränage, spürbare Erfolge liefert und wenn ja, unter welcher Voraussetzung ein Einsatz des Verfahrens bei Tunnelbauwerken möglich ist.

Zielsetzung dieser Arbeit war daher, die Formulierung problemorientierter Einsatzkriterien, um eine tunnelbautechnisch sinnvolle Verwendung des Verfahrens zu definieren. Diese Einsatzkriterien können für Härtestabilisatoren einerseits quantitativ, in Form spezifischer Vorgaben, z.B. hinsichtlich pH-Wert, spezifischem Reinigungsaufwand oder als Wirtschaftlichkeitsbewertungen, formuliert sein. Hierfür ist eine generelle, bauwerksunabhängige Funktionalität und Effektivität des Härtestabilisators von Nöten. Andererseits können für ein nicht generell einsetzbares Produkt qualitative Vorgaben, vor allem in Form eines bauwerksunabhängigen Versuchskonzepts, definiert werden. Ein solches Versuchskonzept muss, auf schlüssigen Kausalketten fußend, durch seine Anwendung eindeutige Aussagen hinsichtlich der bauwerkspezifischen Effektivität und Funktionalität des Härtestabilisators liefern.

In diesem Sinne war zu prüfen, ob sich spezifische Einsatzkriterien für Härtestabilisatoren anhand von Untersuchungsergebnissen zum Einsatz des Verfahrens an einem ausgeführten Tunnelbauwerk formulieren lassen. Voraussetzung für die Übertragbarkeit der Ergebnisse ist dabei, dass die verwendete Nachweismethodik eindeutige Ergebnisse zur Beurteilung der Effektivität liefert. Daher war die bis dato eingesetzte Nachweismethodik, mit deren Hilfe im Zuge früherer Untersuchungen Aussagen zur Effektivität des Härtestabilisators gewonnen wurden, zu prüfen und sie gegebenenfalls zu falsifizieren und geeignet zu erweitern.

Im Anschluss an die Darstellung der problemspezifischen Grundlagen, wurde durch Betrachtung bisheriger Einsätze des Verfahrens besagte Methodik, die vornehmlich auf hydrochemischen Zusammenhängen und Schlussfolgerungen basiert, herausgearbeitet und für eine vertiefte Betrachtung im Rahmen dieser Arbeit formalisiert. Diese wurde dann den tunnelbauspezifischen Einflussfaktoren der Versinterungsentstehung gegenübergestellt.

Hierbei konnte zunächst festgestellt werden, dass die der Verwendung des Härtestabilisa-

tors zugeschriebenen hydrochemischen Effekte an Dränagesystemen auch ohne die Verwendung eines Härtestabilisators beobachtet werden können. Eine hierauf basierende Schlussfolgerung, ist also als nicht eindeutig anzusehen. Zudem gilt, dass im Gegensatz zur Chemietechnik, wo die Ablagerungsbildung des Kalks fast vollständig von den hydrochemischen Einflussparametern des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts bestimmt wird, beim Tunnelbau deutlich komplexere Randbedingungen für die Versinterungsprognose berücksichtigt werden müssen. Daher sind, auch bei Kenntnis der Hydrochemismen eines Entwässerungssystems, letztlich nur grobe Extrapolationen der Versinterungsbildung möglich. Z.B. die tunnelbauspezifische Elution von Kalk aus den Sicherungsmaterialien oder auch Ausführungsmängeln des Dränagesystems, haben spürbaren Einfluss auf die Hydrochemie des Dränagewassers, die durch die bisherige Methodik nicht berücksichtigt werden.

Anhand dieser Erkenntnisse wurde die Nachweismethodik um sinnvolle Datenerfassungen erweitert und in ein Versuchsprogramm für Untersuchungen am Saukopftunnel überführt. Die durchgeführten Untersuchungen waren dabei im Einzelnen:

- Feste Härtestabilisatoren (Depotsteine) in Filterschichten
- Feste Härtestabilisatoren (Depotsteine) in den Revisionsschächten
- Vergleich der ursprünglichen und der erweiterten Methodik

Zusätzlich wurden Voruntersuchungen im Labor vorgenommen, die Anhaltswerte zur Auflösungsgeschwindigkeit in Filterschichten liefern sollten.

Die Ergebnisse der Untersuchungen weisen Depotsteine als für Filterschichten ungeeignet aus. Zum Einen haben sich die erreichbaren Standzeiten der Depots als zu gering herausgestellt. Zum Anderen besitzen die Depotsteine in der untersuchten Rezeptur einige funktionale Mängel, die sich vor allem bei geringen Fließgeschwindigkeiten einstellen, so wie sie in Filterschichten zu erwarten sind. Dies sind vor allem die beobachtete Bildung von Kalkseifen (Calciumstearat) und die Möglichkeit eines bakteriologischen Angriffs auf den Wirkstoff. Hinzu kam eine im Versuch beobachtete Zunahme der Ablagerungsbildung durch die Verwendung von Depotsteinen. Auch bei Änderung der Rezeptur scheidet ein Einsatz der Depotsteine in Filterschichten daher aus.

Feste Härtestabilisatoren bieten nur in Revisionsschächten von Tunnelbauwerken unter ganz bestimmten Voraussetzungen eine sinnvolle Einsatzmöglichkeit. In den Versuchen am Saukopftunnel konnte beobachtet werden, dass Härtestabilisatoren offenbar einen spürbaren Einfluss auf härtere Ablagerungen nehmen können. Allerdings wurde auch hier eine prinzipielle Zunahme der Ablagerungsneubildung, in Verbindung mit der Verwendung der Depotsteine, festgestellt. Hinzu kam eine erhebliche Foulingproblematik im Dränagesystem in Folge der Reaktion der Depotsteine mit der Mikrobiologie des Saukopftunnels im untersuchten Abschnitt. Ein Zusammenhang zwischen dem beobachteten Fouling und der Zunahme der Ablagerungsneubildung ist dabei nahe liegend.

Im Ergebnis ist denkbar, dass Bauwerke existieren, bei denen der Einsatz des Verfahrens im Rahmen der Revisionsschächte sinnvoll ist. Für den Saukopftunnel selbst konnte dies allerdings so nicht nachgewiesen werden. Als für einen Einsatz der Härtestabilisierung sinn-

volle Bauwerke können aller Voraussicht nach solche angesehen werden, die unter extremen Versinterungen, vor allem hinsichtlich der Wachstumsrate, leiden. Exemplarisch kann hier beispielsweise der Straßentunnel Königshainer Berge angeführt werden, bei dem durch Härtestabilisierung die Wartung optimiert werden konnte [49]. Ein solches Einsatzgebiet wäre für künftige Einsätze durch weitere geeignete Untersuchungen zu quantifizieren.

Der Vergleich der beiden Nachweismethoden lieferte weiterhin die Falsifizierung der ursprünglichen Methodik. Während durch die Anwendung der erweiterten Methodik, eine Verwendung der Härtestabilisatoren am Saukopftunnel ausgeschlossen werden konnte, lieferte die ursprüngliche Methodik eine positive Bewertung des Verfahrens. Dies lag an einer differierenden Interpretation der Daten in Folge größeren Datenumfanges begründet. Die Anwendung der erweiterten Methodik erhöht die Quantität an bewertbaren Aussagen und Erkenntnissen. So entstehen qualitative Ergebnisse, die eine gegenteilige Gesamtanalyse zur ursprünglichen Methodik erzwingen. Aus diesem Grund ist künftig eine Verwendung der erweiterten Methodik, der ursprünglichen Nachweisführung vorzuziehen.

In einem letzten Schritt wurden diese Erkenntnisse vom Saukopftunnel allgemein auf dränerte Tunnelbauwerke übertragen und in ein allgemeines Untersuchungskonzept überführt: Mit dessen Hilfe ist künftig ein verlässlicher und eindeutiger bauwerksspezifischer Nachweis der Funktionalität und Effektivität von Härtestabilisatoren möglich. Der Schwerpunkt dieses Programms liegt dabei auf einer expliziten Erfassung des Zustands der jeweiligen Dränage, sowohl im Hinblick auf den Zustand im Allgemeinen als auch auf die spezifische Ablagerungsbildung im Speziellen.

7.2 Ausblick

Die beobachteten Mängel des Verfahrens lassen sich zu einem nicht unerheblichen Teil auf die Rezeptur der Depotsteine bzw. auf die Zusammensetzung des Wirkstoffs zurückführen. Durch eine geeignete Modifikation besagter Rezeptur, z.B. durch geeignetere Bindemittel und durch die Verwendung von Konservierungstoffen zur Vermeidung der Foulingproblematik lassen sich einige der hier festgestellten Schwächen künftig vermeiden. Zum Teil wurden die Modifikationen bereits umgesetzt, und die neueren Depotsteine befinden sich derzeit im Teststadium.

Doch auch bei Lösung dieser Problematik bleiben weiterhin viele Fragen offen, z.B. zur Verfahrenstechnik, zur Standzeitproblematik oder zur Beeinflussung der Ablagerungsbildung durch Härtestabilisatoren bei deutlich extremeren hydrochemischen Bedingungen. Aus diesen Gründen erscheint fraglich, ob langfristig eine generell positive und bauwerksunabhängige Bewertung des Verfahrens möglich ist.

Das primäre Augenmerk muss weiterhin auf eine frühzeitige Versinterungsverhinderung gelegt werden. Diese ist durch Verwendung geeigneter Einzelkomponenten, durch Planung wartungsarmer Entwässerungssysteme, durch weitestgehend mängelfreie Ausführung in der Bauphase und bauwerksspezifisch optimierte Wartungskonzepte für die Betriebsphase zu realisieren. Erst in zweiter Linie ist über zusätzliche Maßnahmen wie z.B. konstruktive Aufwertung des zur Versinterung neigenden Entwässerungssystems oder Einsatz von Wasserkonditionierungsverfahren nachzudenken.

8 Literatur

- [1] **Abel, F.:** Einsatz der Beobachtungsmethode zur Optimierung von Tunneldränagesystemen. Dissertation, Mensch & Buch Verlag, Bochum 2003
- [2] **ARGE HGN/Jena Geos:** Hydrogeologisches Gutachten Tunnel Rennsteig
- [3] **ATV DVWK-A 139:** Einbau und Prüfung von Abwasserleitungen und Kanälen. 2001
- [4] **ATV-Merkblatt 143:** Inspektion, Instandsetzung, Sanierung und Erneuerung von Abwasserkanälen und -leitungen, Teil 2: Optische Inspektion, 1999
- [5] **ATV-Merkblatt 149:** Zustandserfassung, -klassifizierung und -bewertung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden 1999
- [6] **Becker, J.R.:** Corrosion and Scale Handbook, PennWell 1998
- [7] **Dotzler B., Meinschmidt A., Roschig F., Wüstefeld D.:** Härtestabilisation von Bergwässern – Ein präventiver Baustein in der Instandhaltung von Bauwerksdrainagen. Eisenbahningenieur (54), Juli 2003
- [8] **DIN EN 1610:** Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen, 1997
- [9] **DIN 18 551:** Spritzbeton - Herstellung und Güteüberwachung. März 1992
- [10] **DIN 38 404 - 10:** Physikalische und physikalisch-chemische Stoffkenngrößen Teil 10, Calcitsättigung eines Wassers. Berlin, April 1995
- [11] **DIN 38 409 - 6:** Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen Teil 6, Härte eines Wassers. Berlin Januar 1986
- [12] **DIN 4030:** Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase. Berlin Juni/1991
- [13] **Drew Chemicals Corp.:** Grundlagen der industriellen Wasserbehandlung. Vulkan-Verlag-Essen III./93
- [14] **Dietzel, M.:** $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ - und $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -Signaturen von Calcit-Abscheidungen in Drainagesystemen, Acta hydrochim. hydrobiol. 23, Weinheim, 1995
- [15] **Flemming, H.-C.:** Biofouling and Corrosion in industrial water systems. Springer Verlag, 1991
- [16] **Flüeler, P., Dudli, H. Matsch, S., Wegmüller, M., Zwicky, P.:** Gesamtdokument ADRES, Abdichtungs-, Drainage- und Entwässerungssysteme
- [17] **Furrer, R.:** Zum Einfluss der organischen Säuren des Wassers auf das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht, Dissertation, Universität Karlsruhe
- [18] **Galli, M.:** Härtestabilisierung in kalkführenden Gewässern. Schweizer Ingenieur und Architekt, 24.März 2000
- [19] **Gräf, R.:** Taschenbuch der Abwassertechnik. Carl Hanser Verlag München Wien, 1995

- [20] **Höltling, B.:** Hydrogeologie - Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie, Ferdinand Enke Verlag, 1995
- [21] **Hohberg, 1:** Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Charakteristische Modellierung und Bewertung des Auslaugverhalten umweltrelevanter, anorganischer Stoffe aus zementgebundenen Baustoffen, Beuth, Berlin, 2003.
- [22] **Hurlblut-Klein:** Manual of Mineralogy (19.), New York: Wiley 1977
- [23] **Kellermann, C.:** Zur Bewertung des Infiltrationsverhaltens von Tragschichten ohne Bindemittel, Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Straßenwesen und Eisenbahnbau, Bochum 2003
- [24] **Kirschke, D.:** Fortentwicklung der Tunnelentwässerung - Teilprojekt 6: Verbesserung der durch den Ringspalt gegebenen Wasserwegigkeit durch besondere Fließkanäle. Bericht im Auftrag der Deutschen Bundesbahn, 11/1993
- [25] **Klein, T.; Mitschker, A.; Moritz, R.-J.:** Zur Hydrolyse von Polysuccinimid und zu dessen Wirkung gegen Tunnelversinterung, Zeitschrift „Wasserwirtschaft“, April 2004
- [26] **Krenkler, K.:** Chemie des Bauwesen, Band 1: Anorganische Chemie. Springer Verlag 1980
- [27] **Maidl, B.:** Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus, Band 1: Konstruktionen und Verfahren, Band 2: Grundlagen und Zusatzleistungen für Planung und Ausführung. Verlag Glückauf, Essen, 1994, 1998 u. 2004
- [28] **Maidl, B.; Kirschke, D.:** Abdichtungs- und Entwässerungssysteme bei Verkehrstunnelbauwerken, Abschlußbericht zum FE-Vorhaben im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und der Deutschen Bahn AG. Bochum, August 1998
- [29] **Maidl, B.:** Untersuchungen zur Bestimmung des Versinterungsverhaltens unterschiedlicher Drainageelemente, Abschlußbericht zum FE-Vorhaben im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und der Deutschen Bahn AG. Bochum, Februar 1999
- [30] **Maidl, B.:** Untersuchungen zur Versinterungsproblematik am Tunnel Hochwald, Bericht zum FE-Vorhaben im Auftrag des DEGES, Bochum September 2001
- [31] **Maidl, B.:** Experimentelle Untersuchungen zur Verbesserung der Drainagesysteme von Verkehrstunnelbauwerken. Abschlußbericht zum FE-Vorhaben im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen. Bochum, November 2001
- [32] **Maidl, B.; Abel, F.; Vollmann, G.:** Wirksamkeit chemischer und physikalischer Wasserbehandlungsverfahren zur Reduzierung der Versinterung von Dränagen, Abschlussbericht zum FE-Vorhaben im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr. Bochum, Oktober 2002
- [33] **Maidl, B.:** Untersuchungen zur Versinterungsproblematik am Tunnel Berg Bock, Bericht im Auftrag des DEGES, Bochum, März 2003

- [34] **Maidl, B.:** Untersuchungen zur Versinterungsproblematik am Tunnel Rennsteig, Bericht im Auftrag des DEGES, Bochum, Mai 2003
- [35] **Maidl, B.; Abel, F.; Vollmann, G.:** Empfehlungen für den Entwurf, die Herstellung und den Betrieb von Entwässerungssystemen im Straßentunnelbau, Abschlussbericht zum FE-Vorhaben im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr. Bochum, September 2004
- [36] **Naumann, J.; Schockemöhle, B.:** Abdichtungs- und Entwässerungskonzepte bei Tunnelbauten, Tagungsband zum X. Kolloquium für Bauverfahrenstechnik. Bochum, März 1999
- [37] **Roschig, F.:** Projektspezifischer Schriftverkehr der Fa. UCM-Heidelberg, zu Einsätzen von Depotsteinen im Allgemeinen und spezifischen Projekten im Speziellen, unveröffentlicht
- [38] **Richtlinie Ausbildung von Tunnelentwässerungen,** Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, Juni 2003
- [39] **Richtlinie Spritzbeton:** Anwendung und Prüfung, Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, Oktober 1998
- [40] **Römpf: Lexikon Chemie,** Bände 1-6, 10. Auflage, Georg Thieme Verlag, 1999
- [41] **Roques, H.:** Chemical Water Treatment: Principles and Practice, New York: VCH 1996
- [42] **RIL 853:** Richtlinie - Eisenbahntunnel planen, bauen, instandhalten. Deutsche Bahn AG, Frankfurt 2003
- [43] **Saxer, A.:** Untersuchungen zur Kalkabscheidung von 3 Injektionszementen nach Auslaugung mit Wasser. Univ. Innsbruck, Inst. für Baustoffe und Bauphysik, 2001
- [44] **SBB Schweizer Bundesbahn:** Technische Spezifikation - Anforderungen an die Entwässerungsanlage in neuen Eisenbahntunneln, W Bau GD 11/95,
- [45] **Schack-Kirchner, H.; Hildebrand, E.; Hochstein, E.; von Wilpert, K.:** Messung von Gaskonzentrationsprofilen in der Rhizosphäre von Waldstandorten. Allgemeine Forstund Jagdzeitung 163 (1992), Jg. 11/12
- [46] **sia 198/3:** Schweizer Tunnelnorm, Bautechnik & Untertagebau, Vernehmlassungsentwurf, 2002
- [47] **Springenschmid, R.; Dorner, H.W.; Handke, D.:** Verringerung chemischer Auslaugungen aus Spritzbetonauskleidungen zum Schutz von Tunneldrainagen und der Umwelt. Forschung & Praxis 34, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1992
- [48] **Stech, J.:** Email zu den Ergebnissen zu Untersuchungen von Depotsteinen am Versuchstollen Mitholz, Schweiz, unveröffentlicht
- [49] **Straßenmeisterei Tunnel Königshainer Berge:** Bericht über den Einsatz von Härtestabilisatoren zur Optimierung des Wartungsintervalls, 2004, unveröffentlicht
- [50] **UCM Heidelberg:** Härtestabilisation der Dränagewässer des Schemmelsbergtunnels. Erfahrungsbericht, Eigenveröffentlichung, Heidelberg 2001

-
- [51] **UCM Heidelberg (DEKONTA):** Konditionierung der Bergwässer des Mühlbergtunnels der DB AG, Versuchsbericht, Eigenveröffentlichung, Heidelberg 1999
- [52] **VÖEB, Verband Österreichischer Entsorgungsbetriebe:** Widerstandsfähigkeit von Rohrleitungsteilen für Abwasserkanäle und Leitungen beim Hochdruckspülen - Prüfung mit beweglicher Düse, Stellungnahme des VÖEB, Juni 2004
- [53] **WaschMG:** Gesetz über die Umweltverträglichkeit von Wasch- und Reinigungsmitteln, BGBl, 1975, letzte Änderung v. 25.11.2003
- [54] **Wegmüller M.C., UCM Heidelberg:** Anlagen und Produkte zur Verhinderung von Kalkablagerungen in Entwässerungssystemen. Eigenveröffentlichung (Produktwerbung)
- [55] **Wegmüller, M.C.:** Einflüsse des Bergwassers auf Tiefbau/Tunnelbau. Eigenveröffentlichung 2001
- [56] **Willmes, A.:** Textbuch Chemische Substanzen. Eigenverlag Dr. Willmes, Saarbrücken, 1./90
- [57] **Zimmermann, F.:** Vergleichende Prüfungen zur Hochdruckspülfestigkeit verschiedener genormter Werkstoffe für Abwasserleitungen und-kanäle. Prüfbericht, Institut für Bauplanung und Baubetrieb der ETH Zürich, 2000
- [58] **ZTV-ING Teil 5:** Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. Teil 5: Tunnelbau. Januar 2003.

