

Versinterung von Tunnel drainagen – Empfehlungen für die Planung und Bauausführung von Tunneln in deszendenten Wässern

G. Girmscheid, T. Gamisch, A. Meinlschmidt

478

Forschung • Tunnel drainage • Versinterung

Zusammenfassung Die Entstehung von Versinterungen in Tunnel drainagen ist nicht allein auf die Kalkanreicherung des Grundwassers zurückzuführen. Oft erzeugen und verstärken Fehler in der Planung und Ausführung der Drainagesysteme die Entstehung von Kalkablagerungen. In dem vorliegenden Aufsatz werden deshalb grundsätzliche Gestaltungs- und Ausführungshinweise angegeben, um die Versinterungsneigung zu minimieren und somit die Nutzungsdauer der Drainagen und der Tunnel zu verlängern. Die dargestellten baulichen Empfehlungen gelten weitestgehend auch für Tunnel, die im Einflussbereich von aszendenten Wässern liegen. In diesen Tunneln sind jedoch oft weitere wesentliche Maßnahmen vorzusehen (z.B. erhöhte Sulfatbeständigkeit des Betons), um eine maximale Dauerhaftigkeit zu erreichen. In bestehenden Tunneln ist eine Korrektur der Baumängel oft nur im Rahmen von teuren Instandsetzungs- und Rekonstruktionsmaßnahmen möglich. Einige Auswirkungen grundsätzlicher Planungsmängel können jedoch auch durch Modifikationen des bisherigen Systems mit geringerem Aufwand gemildert werden. Nachfolgend dargestellte Maßnahmen sind grundsätzlich in verschiedene Kategorien, entsprechend ihrer Beteiligung an der Versinterungsentstehung, einzuordnen. Welche Maßnahmen ein Bauherr letztendlich umsetzt, muss er anhand von life-cycle-orientierten Kosten-Nutzen-Analysen projektspezifisch entscheiden. Die hier vorgestellten Empfehlungen wurden im Rahmen des Forschungsprojekts „Life-cycle-orientierte Instandhaltung der Entwässerungsanlagen von Tunneln der Schnellfahrstrecke bei DB Netz“ am Institut für Bauplanung und Baubetrieb der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich deduktiv theoriegeleitet begründet. Diese Arbeit stellt somit ein systematisches Vorgehen

dar und integriert bisherige, exemplarisch induktive Forschungsergebnisse.

Scale sintering in tunnel drainages – Recommendations for design and construction of tunnels in descending water

Abstract Scale sintering in tunnel drainages is not only caused by the lime enrichment in ground water. Often, mistakes in the planning and construction of drainage systems also produce and increase calcification. Accordingly basic design and construction principles will be given which minimize the tendency towards calcification and thus extend the durability of both the drainage system and the tunnel. The presented constructional recommendations also apply to tunnels influenced by ascending water. But in such tunnels often further measures (i.e. higher resistance to sulfate) shall be provided to achieve a maximum durability. Often in existing tunnels a correction of building mistakes is possible only by expensive reconstruction measures. But some effects of basic design mistakes can alleviate by modifications of the existing system with low expense. Subsequent presented measures are to classify in different categories according to involvement on scale formation. Which measures a client finally implements, he has to decide with life-cycle cost benefit analyses for the specific project. The recommendations given in this paper were founded deductive theoretically conducted in the research project “Life-cycle oriented maintenance of drainage systems in tunnels of the high-speed railway connections at German Railways-Net” at the Institute for Construction Engineering and Management of the Swiss Federal Institute of Technology Zurich. Therefore this work presents a systematic approach and integrates previous, exemplary inductive exploratory results.

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Girmscheid

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

Dipl.-Ing. Tobias Gamisch

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

Dipl.-Ing. Alfred Meinlschmidt

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

1 Einleitung

In [1] wurden die Grundlagen bzw. verschiedene Ursachen-Wirkungs-Mechanismen dargestellt, die wesentliche Ursachen für die Versinterungsentstehung in Tunnel drainagen sind. Aus den angesprochenen Gründen ist anzunehmen, dass das Wasser in den Tunnel drainagen meist auf einem hohen Niveau kalkgesättigt ist, dieses Niveau dort aber nicht halten kann. Die Ursache der Versinterungsentstehung in Tunnel drainagen liegt also einerseits in der Aufnahme von Kohlendioxid im Boden und einhergehender Kalklösung. Andererseits begünstigen alkalische Baustoffe, aber auch Fehler bei der Gestaltung und Ausführung der Drainagesysteme die Geschwindigkeit und Menge, mit der die Ablagerungen entstehen.

Das Resultat sind zeit- und kostenintensive Reinigungsmaßnahmen, um die Funktionsfähigkeit zu gewährleisten. Oft sind Geräte nötig, die hohe spülende, schlagende oder abrasive Beanspruchungen erzeugen. Dadurch werden aber

nicht nur die Ablagerungen, sondern auch die Rohre selbst hohen Beanspruchungen ausgesetzt. Bei falscher Materialwahl und Verlegungsmängeln kommt es sehr schnell zu Beschädigungen, was langfristig teure Instandsetzungsmaßnahmen nach sich zieht. Um eine möglichst lange Funktionsfähigkeit des Drainagesystems zu gewährleisten, sind also gewisse Grundsätze einzuhalten, die im Rahmen eines Forschungsprojektes am Institut für Bauplanung und Baubetrieb der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, aus technischen und wirtschaftlichen Aspekten aus [1] abgeleitet und zusammengestellt werden. Dies sind zum einen Gestaltungsgrundsätze sowie Empfehlungen zur richtigen Materialwahl und zur Bauausführung bei der Erstellung neuer Entwässerungssysteme.

2 Gestaltungsgrundsätze zur Verringerung der Ablagerungsbildung

Als bedeutende Kalklieferanten an das Sickerwasser wurden neben Kalk- und kalkhaltigen Gesteinen eindeutig zementgebundene Baustoffe identifiziert [1, 2]. Im Tunnelbau kommen solche Baustoffe in Form von Spritzbeton, Injektionsmassen, Ankermörteln und Einkornbeton für die Filterkörper über den Drainageleitungen zum Einsatz. Der Grad der Versinterung ist deshalb in der Planungs- und Bauphase weder anhand der vorliegenden Gesteinsarten noch der chemischen Zusammensetzung des (durch Baustoffe unbeeinflussten) Bergwassers zuverlässig vorherzusagen, da die heute verwendeten Baustoffe durch die Elution mittels sie umgebendes Berg- und Grundwasser entscheidend dazu beitragen. Grundsätzlich sollte man davon ausgehen, dass bei Tunneln, die mit den bisher praktizierten Baumethoden und Baustoffen erstellt wurden, das Drainagewasser kalkgesättigt ist und entsprechend Maßnahmen vorzusehen sind, um die Änderung der chemischen Gleichgewichte und damit der Ausfällung von Salzen entgegenzuwirken.

2.1 Betonbaustoffe

2.1.1 Spritzbeton

Spritzbeton kommt etwa seit 1960 verstärkt im Tunnelbau zum Einsatz. Wurden früher noch Normalzemente unter Zugabe von Beschleunigern verwendet, geht der Trend in jüngerer Zeit zu umweltfreundlicheren Betonrezepturen. Diese zeichnen sich durch eine geringere Alkalität und Eluierbarkeit aus. Neben der Entwicklung von alkalifreien Beschleunigern, werden heute auch spezielle Spritzzemente eingesetzt, bei denen es keiner Beschleunigerzugabe mehr bedarf.

Die Elution ist eine Funktion des Bindemittel- und Porengehalts sowie der Nutzporosität (Volumen der miteinander verbundenen Poren). Deshalb weisen Betone mit gebrochenen Zuschlägen, aufgrund von größeren Ausmaßen und Häufigkeiten der Kornzwischenräume und aufgrund des höheren erforderlichen Zementgehalts, ein größeres Auslaugungspotenzial auf, als Betone mit rundkörnigen Zuschlägen [2].

2.1.2 Injektions- und Ankermörtel

Neben der Elution von Spritzbeton wirken Injektions- und Ankermörtel maßgeblich an der Versinterungsentstehung mit. In den Abschnitten von Tunneln, in denen beim Vortrieb nachweislich Injektionen bzw. verstärkt Verankerungen vorgenommen wurden, sind deutlich größere Versinterungsmengen in den Haltungen der Drainage zu beobach-

ten. Diese Mörtel besitzen wesentlich höhere Zementgehalte als Spritzbeton oder Konstruktionsbeton und erhöhen daher den pH -Wert des zuströmenden Bergwassers erheblich. Etwa 60 % des Zementsteins besteht aus Calcium, welches hauptsächlich in den C-S-H-Phasen (Calciumsilikathydrat) gebunden und als Calciumhydroxid im Beton vorliegt. Nachdem das Calciumhydroxid eluiert wurde und die Calciumkonzentrationen in der Porenlösung maßgeblich geringer geworden sind, können sich die C-S-H-Phasen des Zementsteins auflösen. Das Calcium wird abtransportiert und zurück bleibt ein amorphes S-H-Gel geringer Festigkeit. [3] Durch die Verwendung von Zementinjektionen und Ankermörteln wird also einerseits ein großes Potential an Calcium- und Hydroxid-Ionen im tunnelnahen Gebirge eingebaut, welches vom Bergwasser eluiert wird und zu verstärkten Ablagerungen in den Entwässerungssystemen beiträgt. Andererseits ist aufgrund des Bergwasserangriffs langfristig mit einer Auflösung/Schädigung der Verpresskörper zu rechnen. In weiteren Untersuchungen müsste deshalb geklärt werden, wie lang die Tragwirkung von Injektionsmörteln und verpressten Verankerungen erhalten bleibt.

2.1.3 Einsatz von Beton zur Gebirgsstabilisierung

Bei baulichen Instandhaltungsmaßnahmen und Neubau von Tunneln ist also in Zukunft darauf zu achten, elutionsarme Spritzbetone, Injektions- und Ankermörtel einzusetzen, um die Kalkanreicherung des Drainagewassers abzumindern, so die Versinterungsneigung einzuschränken und die Umweltbelastung zu reduzieren. Die Menge an löslichen Calciumverbindungen im Beton ist unbedingt gering zu halten. Dies kann durch eine Substitution von Zement gegen puzzolanische Zusatzstoffe erfolgen, die keine Kalkanteile enthalten. Aber auch die Beschleunigerzugabe sollte, beispielsweise durch den Einsatz von speziellen Spritzbetonzementen, auf ein Minimum reduziert werden (vgl. [4]). Weiterhin ist darauf zu achten, dass keine kalk- bzw. zementhaltigen Zuschläge (z.B. aus Recyclingmaterial) verwendet werden.

Durch Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) im Beton, aber auch durch Natriumaluminat ($\text{NaAl}(\text{OH})_4$) alkalischer Spritzbetonbeschleuniger, kommt es zu einer pH -Wert-Anhebung des Sickerwassers bei Baustoffkontakt. Dies zieht eine Verschiebung des Kohlensäure-Gleichgewichts nach sich und führt so einerseits zu einer Reduzierung der Lösbarkeit von Calcium-Ionen aus dem Beton [1]. Andererseits kommt es zur Ausfällung der gelösten Calcium-Ionen aus bereits kalkangereicherten Sickerwässern in Form von Calciumcarbonat. Dadurch werden zunächst die Hohlräume der Drainageschicht zwischen Spritzbeton und Innenschale bzw. Dichtung und in der Sickerpackung um die Drainageleitungen soweit verschlossen, bis sich ein entsprechender geringer Wasserdruck aufgebaut hat, bei dem die ausgefällte Salzmenge gleich der wieder aufgelösten ist. Dieser Wasserdruck wird durch die Reibung des Wassers an den Feststoffoberflächen auf dem Fließweg zur Drainage abgebaut. In den Drainagerohren herrschen, sofern sie nicht durch Versinterungen verschlossen sind, atmosphärische Druckverhältnisse. Aus diesem Grund würde sich der Ort der Sinterbildung nach und nach, innerhalb von Monaten nach der Fertigstellung des Innenausbaus in die Drainageleitungen verschieben. Oft sind jedoch von Anfang an Versinterungen in den Rohren zu beobachten. Das liegt daran, dass einerseits die Formation der Calciumcarbonatkristalle nach der pH -Wert-Erhöhung zeitlich verzögert weiterläuft und ande-

rerseits nicht alle Versinterungen in der Erhöhung des *pH*-Werts begründet sind.

2.2 Wasserrfassung auf dem Gebirge

Eine besonders wirksame Methode, die Auslaugung von Calcium-Komponenten aus dem Beton zu verhindern, ist die Minimierung des Bergwasserkontaktes mit dem Beton. Deshalb sollte auch unbedingt der bestehenden Praxis gefolgt werden, stärkere örtliche Wasserzutritte durch Abschlauchungen direkt am Gebirge abzuleiten, bevor es den Spritzbeton erreicht.

Die Applikation von Entlastungsbohrungen durch den Spritzbeton verringert zwar den starken spülenden Angriff durch größere Öffnungen, ermöglicht dem Wasser jedoch trotzdem Kalkkomponenten aufzunehmen und seine chemische Zusammensetzung grundlegend zu ändern. Größere flächenhafte Austritte sind vorzugsweise mit Noppenbahnen zu fassen und direkt auf dem Gebirge abzuleiten [5]. Oft werden dazu stärkere Vliese bzw. Kunststoffdrainagematten in Verbindung mit Vliesen eingesetzt. Durch die Poren in den Geotextilien ist es dem Wasser jedoch möglich, mit dem Beton in Kontakt zu kommen, da bereits beim Auftragen des Spritzbetons feine Zementpartikel durch die Poren geschleudert werden.

2.3 Anordnung der Abdichtung

Basierend auf dem Grundsatz der Minimierung des Baustoffkontakts erscheinen früher angewendete Außenabdichtungen geeigneter als die heute geläufigen Zwischenabdichtungen (Bild 1). Ältere Tunnel wurden, wenn die Erfordernis nach einem tropfenfreien Gewölbe bestand und ausreichend Arbeitsraum vorhanden war, mit einer bituminösen Außenabdichtung auf der Mauerwerk-Auskleidung versehen (vgl. Maidl [6] Bild 237). Einerseits bietet Mauerwerk ein deutlich geringeres Kalkpotential, wenn es aus kalkfreien Steinen erstellt wurde. Andererseits kommt das Bergwasser bei dieser Art der Abdichtung nicht in Kontakt mit versinterungsrelevanten Baustoffen, was in einer deutlich geringeren Versinterungsneigung resultiert. Dies ist auch deutlich bei alten gemauerten Tunneln festzustellen.

Im heutigen Tunnelbau werden jedoch keine Außenabdichtungen mehr angewendet, um das Überprofil zu minimieren und um die Gefahren beim Vortrieb, durch sofortigen Einbau von Sicherungsmitteln mit direkten Gebirgskontakt, zu reduzieren. Nach dem Ausbruch erfolgt, falls erforderlich, die Sicherung des Gebirges mittels Spritzbeton, Bögen und Ankern etc. Anschließend wird die Dichtungsbahn an der gesicherten Tunnelwand befestigt und die Innenschale eingebaut [5]. Es werden aber auch Tunnel ganz ohne Dichtungsmembran erstellt. Bei der Deutschen Bahn AG dürfen Tunnel in zweischaliger Bauweise, bei „nicht sehr stark betonangreifendem Bergwasser“, bis zu einer Wasserdruckhöhe von 30 mWS über Unterkante Sohle (3 bar) ohne separa-

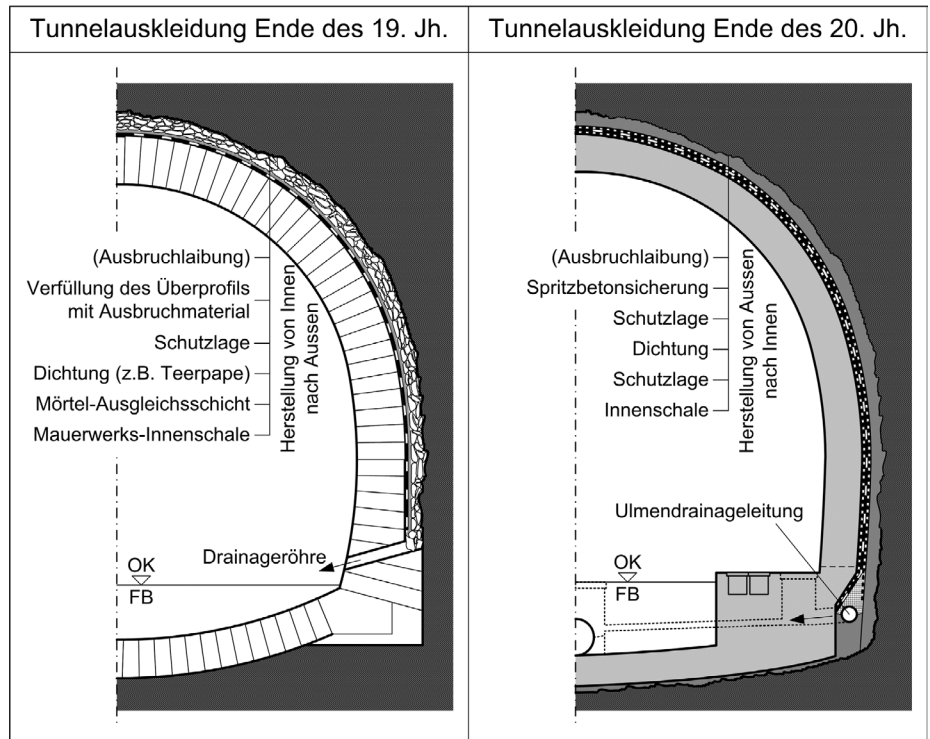


Bild 1. Früher angewendete Aussenabdichtungen und heute übliche Konstruktion mit Zwischenabdichtung am Beispiel eines Eisenbahntunnels

Fig. 1. In former times applied outer sealing and construction with intermediate sealing which is common in practice today considering as example of a railway-tunnel

te Dichtungsbahn hergestellt werden ([7] Bild 1). Die Dichtigkeit wird bei dieser Bauweise durch Herstellung der Innenschalen aus wasserundurchlässigem Beton mit Fugendichtung sicher gestellt.

Durch die Lage der Dichtung zwischen Spritzbetonsicherung und Innenschale kommt das zusickernde Wasser in Kontakt mit kalk- und zementhaltigen Baustoffen. Dadurch nimmt es Calcium-Ionen auf, die später in der Drainage als Versinterungen ausfallen. Neben der Aufnahme von härtebildenden Ionen werden auch Hydroxid-Ionen aus dem Beton gelöst, die zu einer deutlichen *pH*-Wert-Erhöhung führen und somit die Bildung der Versinterungen unterstützen. Eine Neuentwicklung der Valplast AG [8] ist ein Schritt zu einer neuen Art der „alten“ Tunnelaußenabdichtungen. Durch Aufgreifen der früher angewandten Baumethode mit Außenabdichtung wurde ein System entwickelt, mit dem ein deutlich größerer Drainagehohlraum auf der Abdichtungsmem-

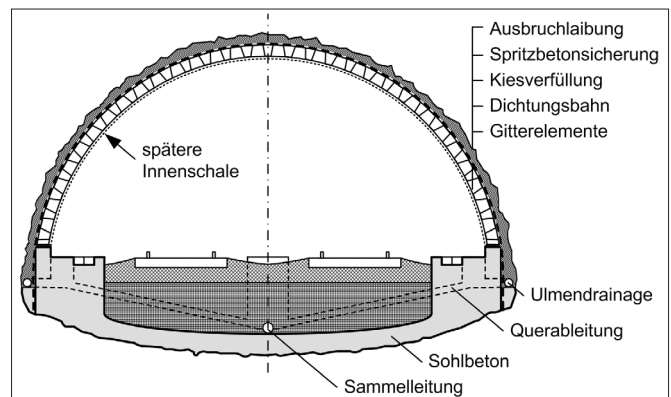


Bild 2. Drainage- und Abdichtungssystem der Valplast AG [8]

Fig. 2. Drainage and sealing system of the Valplast AG [8]

bran geschaffen und der Verbrauch an Beton für das Überprofil gesenkt wird (Bild 2).

Die temporäre Sicherung kann, da die Stützkonstruktion aus Gitterträgern auf die Lasten im Bauzustand bemessen wird, auf ein Mindestmaß reduziert werden. Allerdings wird die Sicherung der Ausbruchlaibung nach wie vor aus Spritzbeton hergestellt. Deshalb ist zu erwarten, dass, dort wo Spritzbeton als Oberflächenversiegelung oder Gebirgssicherung eingesetzt wird, die gleichen Versinterungsprobleme auftreten, wie bei der herkömmlichen Spritzbeton-Bauweise; möglicherweise aber über eine kürzere Zeitdauer, da die Spritzbetonmenge und -dicke geringer sein kann.

Auf weitere zu klärende Fragen wie Korrosionsschutz der Bewehrung auf der Dichtungsseite, Beschädigungsrisiko der Dichtungsbahn auf den Gitterträgern und Wirtschaftlichkeit des zusätzlichen Überprofils etc. soll in diesem Aufsatz nicht eingegangen werden.

2.4 Herstellung der Sickerpackung über den Entwässerungsleitungen

Bevor das Wasser die Drainageleitungen erreicht, fließt es durch die Sickerpackung. In der jüngeren Vergangenheit wurde diese aus Einkornbeton hergestellt. Durch die offene Porenstruktur bietet der Filterbeton dem Wasser eine sehr große Oberfläche, an der es durch Zementkontakt Calcium- und Hydroxid-Ionen aufnehmen kann.

Bei den bisherigen Baumethoden (Bild 3, Variante I) war eine Verklebung des Korngerüsts notwendig, um die Sickerpackung im oberen Teil abzuböschchen und so einen geneigten Übergang auszubilden. Dieser sanfte Übergang war erforderlich, um die Dichtungsbahn von der Spritzbetonsicherung auf die Sohlplatte verlegen zu können und an ein Anschlussprofil anschweißen zu können, damit die Sickerschicht und die darin befindlichen Drainageleitungen vor

versehentlicher Zementierung geschützt werden konnten. Ein neu entwickeltes PVC-Hohlkammer-Winkelprofil [9] lässt diesen komplizierten Übergang unnötig werden (Bild 3, Variante II). Die Sickerschicht kann aus ungebundenem, gewaschenem, rundkörnigem Material hergestellt werden, in der die Dichtungsbahn frei, etwa 10 bis 20 cm über dem Unterbeton endet. Der Schutz der Sickerpackung vor Zementleim erfolgt durch Abdecken mit einem Geotextil, welches bei einem Betondruck von 20 bis 30 cm garantiert die Zementpartikel abfiltert, denn so hoch ist etwa die Betonüberdeckung der Sohlplatte über der Sickerschicht bis zur Arbeitsfuge. Nur mit diesem oder abgewandelten Systemen lassen sich die neuen Vorgaben einiger nationaler Tunnelbaunormen (vgl. [10] 7.1.4 bzw. [11] 5.9.5.1) nach weitestgehend zement- und kalkfreier Sickerpackung umsetzen.

2.5 Einbau von Härtestabilisations-Depotsteinen in die Sickerpackung

In der Schweiz werden derzeit, um die Versinterungen in den ersten Jahren nach der Fertigstellung zu vermindern, zusätzlich Depotsteine in die ungebundene Sickerpackung eingebaut, die Polyacrylate zur Härtestabilisation freisetzen. Erfahrungen an der Schnellfahrstrecke Hannover-Würzburg der Deutschen Bahn AG zeigen jedoch, dass die Versinterungsneigung auch über zehn Jahre nach dem Bau der Tunnel nach wie vor sehr hoch ist. Innerhalb dieser Zeitspanne sind die Depotsteine in der Sickerpackung aufgebraucht und können nicht ergänzt werden. Dadurch können Hohlräume entstehen, weil nicht gewährleistet ist, dass die Depotsteinräume in den Ulmen schnell genug zusintern. Derzeit liegen noch keine Informationen zur Auswirkung der verbliebenen Hohlräume vor. Deshalb muss diese Art der Vorgehensweise grundsätzlich als Verschiebung des Problems und als unsicher hinsichtlich der Auswirkungen

auf die Konstruktion des Tunnels beurteilt werden. Dies gilt insbesondere, wenn großformatige Härtestabilisator-Blöcke in die Sickerpackung eingebaut werden.

2.6 Gestaltung des Entwässerungssystems

Eine besondere Beachtung bei Neubau und Instandsetzung bedarf der Gestaltung und Materialwahl des Entwässerungssystems selbst. Die Rohrwahl ist immer eine Interaktion zwischen versinterungsarmer Wasserableitung und Gewährleistung der Reinigungsfähigkeit.

2.6.1 Rohrquerschnitte

Die Innenflächen der Rohre müssen glatt und sollten nicht rau und/oder gewellt sein. Einerseits erzeugen die Rohrwellen turbulente Strömungen, andererseits kommt es durch die große Kontaktfläche zu extremen Adhäsions-

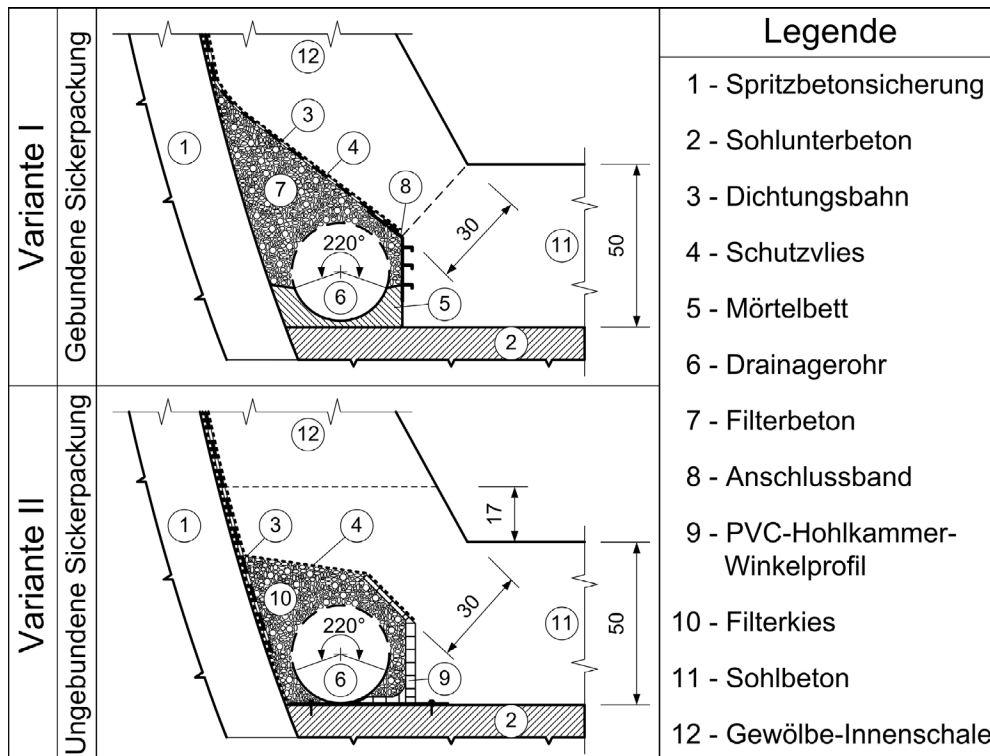


Bild 3. Ausführung der Ulmendrainage (oben: herkömmliche Variante; unten: ausgeführte Variante im Rennsteig-Tunnel) [9]

Fig. 3. Configuration of a side-wall drainage (top: accepted form; bottom: installed form in Rennsteig-Tunnel) [9]

kräften der Versinterungen mit der Rohrwandung, die die Reinigung erheblich erschweren. Für die hydraulischen Reinigungsgeräte ist es schwer und für die mechanischen Geräte unmöglich, die Ablagerungen aus den Wellentälern zu entfernen. Gewellte Rohre erzeugen also nicht nur künstlich verstärkte Versinterungen, sondern sind auch nur bedingt zu reinigen und daher für den Einsatz als Drainage im Tunnelbau ungeeignet.

Drainagerohre mit Tunnelprofil sollten bei Neubau- und Rekonstruktionsmaßnahmen möglichst nicht mehr eingesetzt werden, weil es durch die breite Fließsohle bereits bei geringen Wassermengen im Gegensatz zum Kreisquerschnitt zu einer Ausbildung einer großen Wasser-Gasphasen-Grenzfläche kommt, durch die der Ausgleich des Kohlensäure-Gleichgewichtes gefördert wird. Weiterhin bedeutet eine große Oberfläche stärkere Verdunstung und Eindickung der Lösung, und somit erhöhte Versinterungsbildung.

In Zukunft sollten deshalb ausschließlich wieder kreisrunde Rohre eingebaut werden, die nur im oberen Querschnittsteil geschlitzt sind. Durch Sickerschlitze im Fließbereich des Wassers kann es zu Verwirbelungen, Luftuntermischung und erhöhter Sinterbildung kommen. Derzeitige Weiterentwicklungen der runden Drainagerohre hin zu breiteren Sickerschlitzen sind deshalb wegweisend. Durch die breiten Schlitze dauert es bei gleichem Versinterungsaufkommen grundsätzlich länger, bis ein Vollverschluss der Sickeröffnungen eintritt. Zusätzlich reduziert sich das Versinterungsaufkommen, da die Tropfen nicht mehr durch Kapillarkräfte zwischen den beiden Schlitzflächen hängen bleiben, sondern eher abtropfen. Auch die Reinigung breiterer Sickerschlitze mittels hydraulischer Geräte ist mit wesentlich geringerem Aufwand möglich, da die Spülverfahren die Versinterungen in den breiten Öffnungen eher flächig beanspruchen, wodurch es zu einem schnelleren Aufbruch kommt. In Deutschland wurden kreisrunde Rohre mit 5 Millimeter breiten Sickerschlitzen im oberen Rohrbereich, über einen Winkel von 220°, erstmals am Rennsteig-Tunnel der Autobahn A 71 eingesetzt [9], vgl. auch Bild 3, Variante II). Beim Bau des Gotthard-Basistunnels in der Schweiz kommen ebenfalls HD-PE-Rohre mit 10 Millimeter breiten Einlauföffnungen zum Einsatz.

2.6.2 Rohrmaterialien

Besondere Beachtung sollte der Materialwahl geschenkt werden. Trotz der definierten Rohrbezeichnung in der Ausschreibung kommt es vereinzelt zum Einbau ungeeigneter Rohre, die durch nachlässige Bauabnahme nicht bemängelt werden. Diese Leitungen erzeugen durch ihre Form (z.B. Innenwellen) oft nicht nur zusätzliche Versinterungen, auch die Verlegung kann aufgrund der Forminstabilität nicht ordnungsgemäß ausgeführt werden, und die Lebensdauer ist durch unzureichenden Widerstand gegen die hohen Reinigungsbeanspruchungen erheblich verkürzt (Bild 4).

Aufgrund der Baustoffeinflüsse sollte der Drainagewasser-Beton-Kontakt auf ein Minimum reduziert werden. Dies gilt nicht nur für die Wasserfassung durch Abschlauungen und Ableitung in die Drainage, sondern auch im Drainagesystem selbst. Schachteinläufe und Gerinne sollten nicht wie üblich über Betonsohlen erfolgen. Vielmehr sind Gerinne aus einem versinterungstechnisch neutralen Werkstoff auszubilden bzw. nach der Formgebung mit einem solchen Werkstoff zu versiegeln.



Bild 4. Rohrschaden in Kämpfer und Sohle durch falsche Materialwahl und zu große Reinigungsbeanspruchung

Fig. 4. Pipe damage in abutment and bottom because of using incorrect material and to heavy strain by cleaning

Da davon auszugehen ist, dass während der Wartung starke schlagende Beanspruchungen von den hydromechanischen Reinigungsgeräten auf die Rohrwandungen ausgeübt werden, sollten diese aus einem schlagfesten, nicht spröden Material bestehen, um Beschädigungen zu vermeiden. Zur einwandfreien Verlegung muss eine ausreichende Formstabilität der Rohre gewährleistet sein.

2.6.3 Rohrdimensionierung

Eine Durchmischung des Drainagewassers mit Luft ist zu verhindern bzw. zu vermeiden und die Zugänglichkeit der Rohrstränge mit hydromechanischen und mechanischen Reinigungsgeräten ist zu gewährleisten. Deshalb muss auf enge Rohrkrümmungen verzichtet werden.

Die Leitungen sind so zu verlegen, dass das Wasser schnell und gezielt aus dem Tunnel geleitet wird, um die Verweilzeit in den Rohren zu minimieren. Dadurch wird der Luft-Wasser-Kontakt verkürzt und die Gleichgewichte können sich unter idealen Umständen nicht vollständig einstellen. Das Mindestgefälle der Drainageleitungen sollte in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers 1 bis 1,5 % betragen. Andererseits ist darauf zu achten, dass eine laminare Strömung gewährleistet ist und das Wasser nicht turbulent abfließt. Durch die turbulente Strömung wird die Wasseroberfläche unruhig und der Austausch mit der Luft verstärkt, was wiederum zur Zunahme der Ablagerungsbildung führt.

Für eine versinterungsfreie Wasserableitung ist es notwendig, die Rohre nicht überzudimensionieren, um die Verdunstung und den Wasser-Atmosphärenkontakt innerhalb der Leitung auf ein Minimum zu reduzieren. Die hydraulische Dimensionierung der Leitungen sollte anhand der, während der Vortriebphase gemessenen, tatsächlichen Wassermengen und den geologischen Voruntersuchungen zum höchstmöglichen Grundwasserstand basieren. Um die Reinigung zu ermöglichen ist jedoch ein Minstdurchmesser einzuhalten, in dem die Versinterungen einen gewissen Raum einnehmen können und die Reinigung mit den üblichen Geräten dennoch problemlos möglich ist.

Weiterhin ist, um eine langfristige Nutzungsdauer sicher zu stellen, darauf zu achten, dass auftretende Schadstellen problemlos instand gesetzt werden können. Neben der Zugäng-

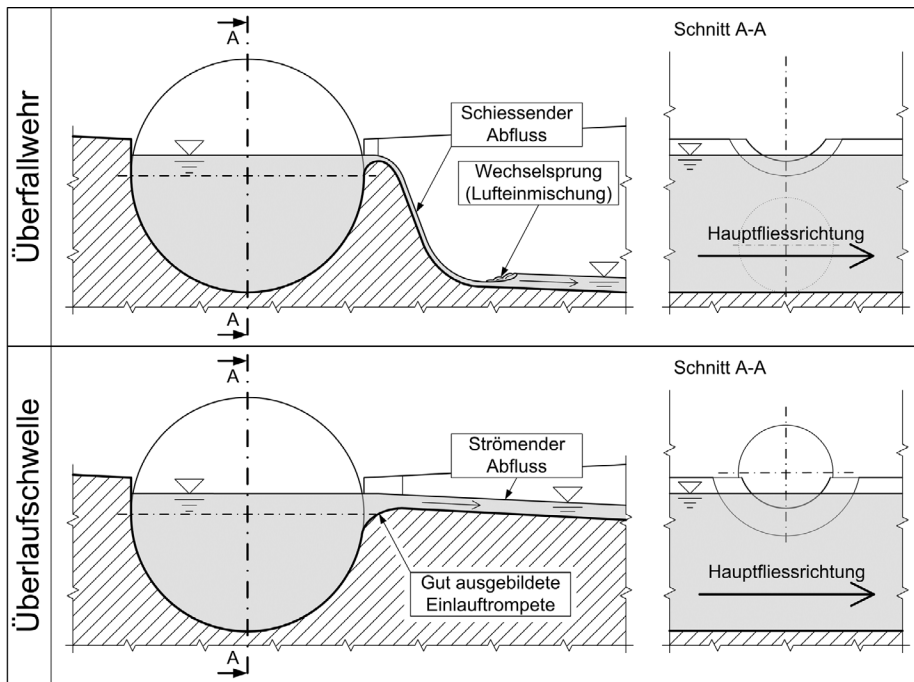


Bild 5. Überfallwehr und Überlaufschwelle
Fig. 5. Overfall weir versus overflow spillway

portleitungen kann entweder durch manuelles Öffnen oder Verschließen, aber auch durch Überlaufschwellen in den Schächten erfolgen, die stets eine optimale Rohrfüllung von etwa einem Drittel bei 220° geschlitzten Teilsickerrohren und etwa drei Viertel bei 120° geschlitzten Mehrzweckrohren einstellen und überschüssiges Wasser über die Querableitungen in die Sammelleitung abführen. Strömungsgünstig ausgerundete Überlaufschwellen haben im Gegensatz zu Überfallwehren den Vorteil, dass sie keine zusätzliche Lufteinmischung verursachen (Bild 5). Durch diese Maßnahmen ist es möglich, die Versinterungstendenz bzw. die Bildung von harten Ablagerungen in den Ulmendrainagen zu verringern.

2.6.5 Kontroll- und Reinigungsschächte

In neueren Tunneln wird oft ein geringer Schachtabstand von 50 Metern gewählt. Dies widerspricht jedoch den Entwicklungen der Rohrrei-

lichkeit mit dem Packer zum Versetzen von Inlinern, ist auf eine Reduktion des Rohrquerschnitts zu achten.

2.6.4 Querableitungen zur planmäßigen Änderung des Fließverhaltens

Vor dem Hintergrund der Versinterungsproblematik stellen Querableitungen der Ulmendrainagen in regelmäßigen Abständen in die Sammelleitung unnötige Verlängerungen der Fließstrecke und der zu reinigenden Rohrlänge dar. Die zusätzlichen Richtungsänderungen und die gebräuchliche Einleitung in den Sammler über Abstürze tragen zusätzlich zur Belüftung des Drainagewassers und damit zur Versinterungsentstehung bei. Durch die Ableitung des Wassers jeder Ulme in die Sammelleitung werden in den Ulmendrainagehaltungen mit sehr geringem Wasseranfall künstliche Verdunstungsstrecken geschaffen.

Die Ableitung des anfallenden Bergwassers sollte auf kürzestem Weg erfolgen. Um die Wassermenge in den Rohren jedoch nicht unnötig zu reduzieren, sollten kombinierte Drainage-Transportleitungen an beiden Ulmen vorgesehen werden. Damit diese Leitungen nicht zu groß dimensioniert werden müssen und um eine Trennung von Wässern mit unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung vornehmen zu können, sollten bei zukünftigen Neubauvorhaben aber auch bei Rekonstruktionen des gesamten Drainagesystems planmäßig verschlossene Querableitungen in eine mittige Sammelleitung vorgesehen werden. Die Steuerung der Wasserführung dieser Drainage-Trans-

nigungstechnik, nach denen heutzutage Rohrstrecken von 100 Metern und mehr problemlos gereinigt werden können. Da ein enger Schachtabstand den Luftaustausch zwischen Drainageluft und Tunnelluft unterstützt und somit die Entstehung der Versinterungen fördert, wird grundsätzlich empfohlen, die früher ausgeführten Abstände von etwa 90 Metern wieder vorzusehen. Allerdings sollten die Schachtabstände 100 Meter nicht überschreiten.

Durch den größeren Schachtabstand werden nicht nur der Luftaustausch behindert, sondern auch die Investitionskosten für den Bau und die Instandhaltungskosten reduziert. Um den ständigen Luftwechsel zwischen Entwässerungssystem und Atmosphäre weiter einzuschränken, wird vor-

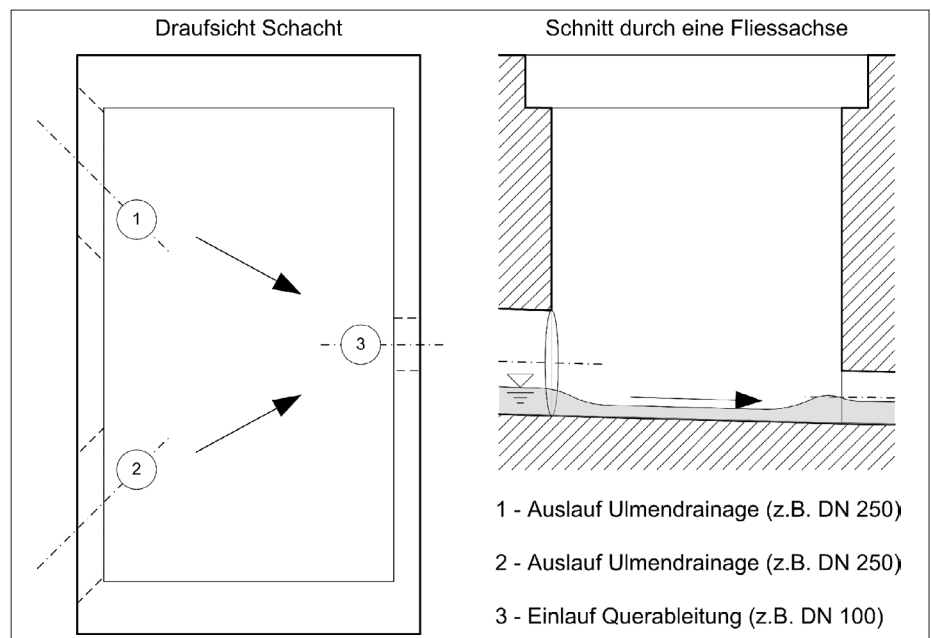


Bild 6. Reinigungs- und Kontrollschacht – Einmündung der Ulmendrainagen in die Querableitung
Fig. 6. Cleaning and control manhole – intake of side-wall drainages into lateral pipe



Bild 7. Versinterungsschwerpunkt infolge der Einleitung der Querableitungen in die Sammelleitung über Abstürze (Escherberg-Tunnel, Schacht Sammelleitung, Block 309)
 Fig. 7. Main sintering as a result of outlet the lateral pipes into collecting pipe over falls (Escherberg-tunnel, manhole of collecting pipe, sector 309)

geschlagen, die Schachtabdeckungen luftdicht auszuführen.

Bisher werden die Sohlen der Reinigungsschächte zwischen den Halungen der Ulmendrainagen oft ohne Gerinne hergestellt (Bild 6). Das Wasser fließt über eine breite Betonfläche ab. Dadurch entsteht eine sehr große Kontaktfläche zwischen Beton und Wasser, aber auch zwischen Wasser und Luft. Das Wasser kann einerseits auf der großen Betonfläche Calcium- und Hydroxid-Ionen aufnehmen und neigt daher stark zur Ausfällung von gelöstem Kalk. Andererseits fördert die große Wasseroberfläche den Ausgasungsprozess von gelöstem Kohlendioxid und die Verdunstung von Lösungsmittel.

Insbesondere die Einleitungen der Rohre in die Schächte sind sorgsam und ohne Abstürze auszubilden, da durch diese eine besonders hohe Luft-Wasser-Durchmischung erfolgt und es zu spontaner Versinterungsbildung kommt (Bild 7). Aus diesen Gründen wird empfohlen, alle Schächte des Entwässerungssystems zukünftig mit einem Gerinne (Bild 8 bzw. Bild 9) zu versehen, dessen Oberfläche aus versinterungstechnisch neutralen Werkstoffen herzustellen ist.

3 Bauliche Lösungsvorschläge

3.1 Aufstau

Durch Luftabschluss des Wassers mittels Aufstau (Bild 10) entstehen nur geringere Ablagerungen, wenn die Ursache ihrer Entstehung rein auf dem Kohlendioxid-Dissoziations-Gleichgewicht beruht. Da jedoch oft

weitere Druck- und/oder biologische Einflüsse wirksam sind, wird sich die Menge der Versinterungen dadurch kaum verringern lassen. Als Folge des Aufstaus können die Ablagerungen auch bei kurzzeitigem Versiegen des Wasserzustroms aus dem Gebirge nicht mehr austrocknen.

Da der gesamte Rohrquerschnitt mit Wasser gefüllt ist, ist die Fließgeschwindigkeit im Gegensatz zum Freispiegelabfluss deutlich geringer. Es werden also eher flächig verteilte, weichere Calcitablagerungen anstatt harter punktueller Versinterungen entstehen. Einerseits werden durch die geringere Fließgeschwindigkeit starke lokale Versinterungsbildungen an Diskontinuitäten reduziert, andererseits ist der gesamte

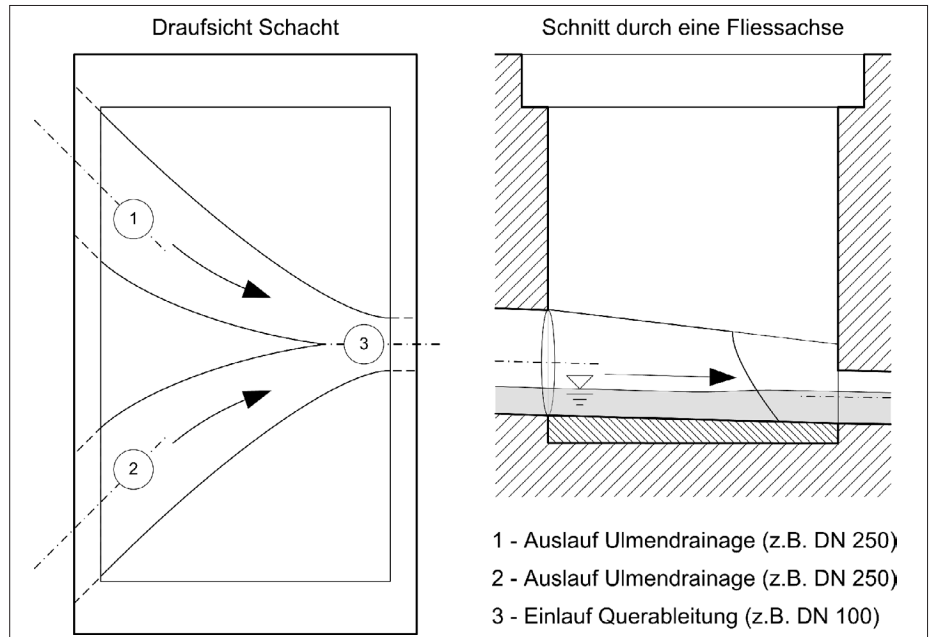


Bild 8. Gerinne zur versinterungsarmen Wasserableitung – vollständige Ableitung der Ulmendrainagen in die Querableitung
 Fig. 8. Channel for low-sintering water drainage – complete outflow of the side-wall drainages into lateral pipe

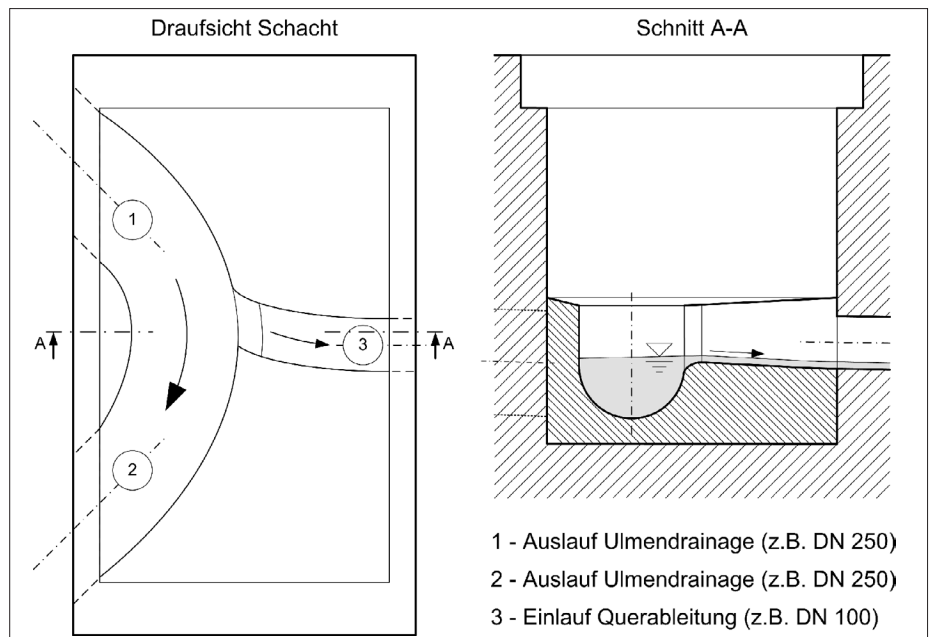


Bild 9. Gerinne zur versinterungsarmen Wasserableitung – Ableitung des Wassers durch die Ulmendrainage, mit Überlaufschwelle zur Regelung einer optimalen Rohrfüllung
 Fig. 9. Channel for low-sintering water drainage – outflow along the side-wall drainage, with steering the optimal filling level by overflow spillway

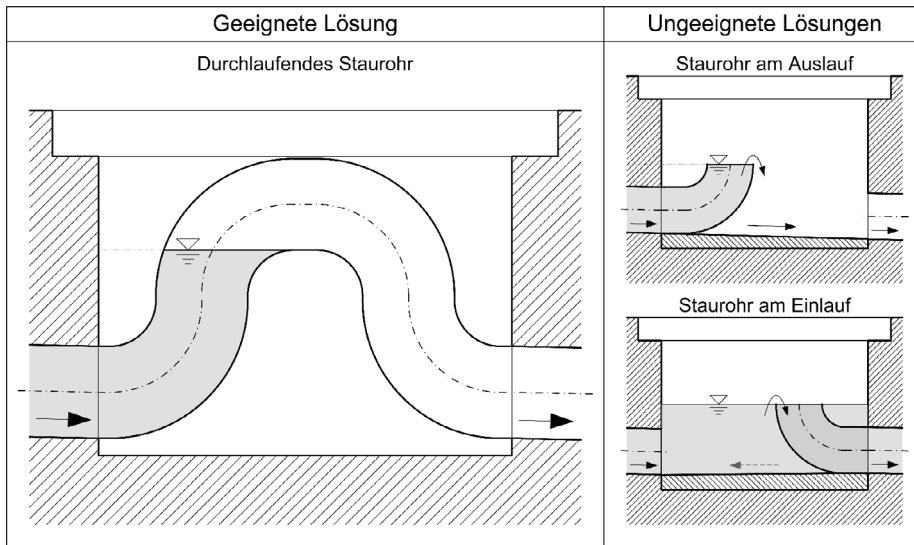


Bild 10. Lösungsmöglichkeiten zur Ausbildung von Aufstauungen in Tunnelentwässerungen
Fig. 10: Options for design of water jams in tunnel drainages

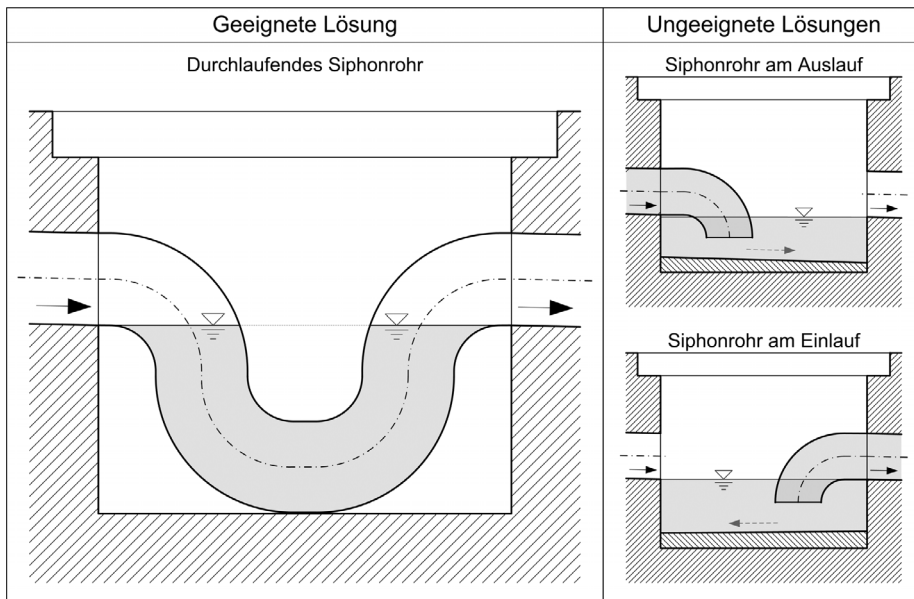


Bild 11. Lösungsmöglichkeiten zur Ausbildung von Siphons in Tunnelentwässerungen
Fig. 11: Options for design of siphons in tunnel drainages

Rohrquerschnitt mit Wasser gefüllt, wodurch der Gasaustausch und somit die Kohlendioxid-Abreicherung verlängert wird.

Durch den Einsatz voll gefüllter, geschlossener Rohrsysteme kann also die Versinterungsgeschwindigkeit und -menge eher nicht reduziert, unter Umständen aber die Art der anzu-

treffenden Ablagerungen günstig beeinflusst werden. Nach oben geöffnete Rohrkrümmen behindern die Reinigungsarbeiten lediglich gering. Trotzdem sollten in jedem Fall, nicht nur bei geschlossenen Aufstauungen, die Rohrkrümmen an den Einführungen in den Schacht schnell und einfach abnehmbar ausgeführt werden, um einen einfacheren Zugang mit Geräten zu gewährleisten, die große Krümmungsradien erfordern.

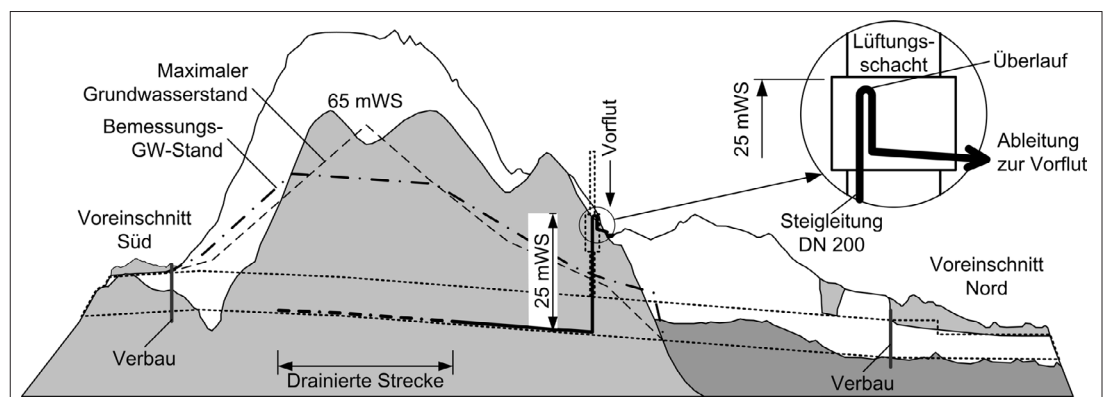
Ähnliche Effekte wie beim Aufstau des Wassers in den Leitungen werden durch Siphonierung (Bild 11) erreicht. Zusätzlich zur Vermeidung der Luftströmungen durch die Leitungen und einer realisierbaren, geringen Druckhaltung können an den Siphons sedimentierte Feinteile abgezogen werden, bevor sie in die nächste Haltung eingespült werden. Bei biologischer oder chemischer Versinterungsursache kann jedoch auch hierdurch keine Reduzierung der Versinterungsmenge erzielt werden. Aufgrund der nach unten gerichteten Rohröffnungen bilden Siphonierungen bauliche Erschwernisse für die Reinigung der Leitungen. Aus diesem Grund sollten die Rohrkrümmen an den Einführungen in den Schacht schnell und einfach abnehmbar ausgeführt werden.

3.3 Druckhaltende Systeme

Oft diskutiert werden in den letzten Jahren komplett druckhaltende Entwässerungssysteme. Zwei Varianten wurden in Deutschland bereits realisiert.

Am Farchant-Tunnel erfolgt die Druckhaltung durch eine Steigleitung, die über einen Lüftungsschacht nach oben geführt wurde und auf dem Berg in einen Vorfluter entwässert (Bild 12). Durch die Druckhaltung und den Luftabschluss werden in den Drainageröhren längs des Tunnels die gleichen Verhältnisse eingestellt, wie sie auch im Gebir-

Bild 12. Druckhaltendes Drainagesystem mit Steigleitung, ausgeführt im Farchant-Tunnel [12]
Fig. 12. Pressure retention in drainage system by standpipe, built in Farchant-tunnel [12]



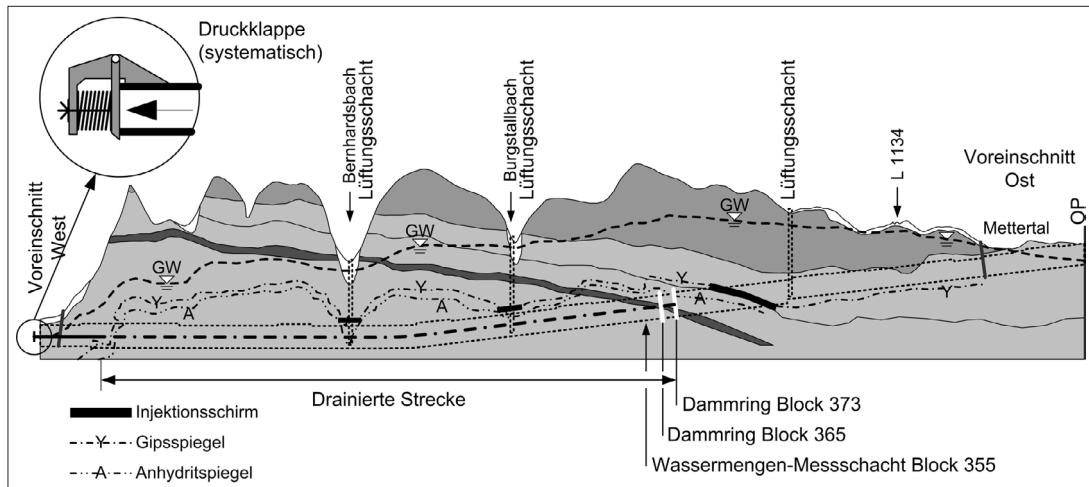


Bild 13. Druckhaltendes Drainagesystem mit Druckklappe, ausgeführt im Freudenstein-Tunnel [13]
 Fig. 13. Pressure retention in drainage system by pressure valve, built in Freudenstein-tunnel [13]

ge auftreten. Deshalb werden diese Leitungen dauerhaft funktionstüchtig bleiben, da sich ein Gleichgewicht aus Ablagerung und Auflösung einstellt. Problematisch ist jedoch die Steigleitung, weil mit zunehmender Höhe der hydrostatische Wasserdruck abnimmt. Infolge dessen kann es bei kohlensäuregesättigtem Bergwasser zur Ausgasung und gleichzeitigen Salzausfällungen kommen, die nach und nach den Querschnitt verschließen und die Funktionstüchtigkeit beeinträchtigen.

Eine bessere, wenn auch aufwendigere Lösung ist der Einsatz von Druckklappen am Auslauf der Drainageleitung am Tunnelportal wie es beim Freudenstein-Tunnel realisiert wurde (Bild 15). Hierbei bleibt der Druck bis zur Klappe konstant und die Leitungen werden voraussichtlich frei von Versinterungen bleiben. Problematisch ist lediglich die Wartung der Druckklappe, da das Wasser hier schlagartig entspannt wird und es zu spontanen Ausfällungsreaktionen kommen kann.

3.4 Getrennte Ableitung unterschiedlicher Wässer

Ferner sollte eine getrennte Ableitung unterschiedlich chemisch zusammengesetzter Wässer vorgesehen werden, da es durch Mischung zu plötzlichen Ausfällungen kommen kann. Bei getrennter Abführung unter Berücksichtigung der individuellen Wasserchemie und den deshalb vorzusehenden Stabilisationsmaßnahmen, wie z.B. Ableitung unter Druck, können die Wässer stabil und ohne große Ausfällungserscheinungen aus dem Tunnel geführt werden. Die Trennung unterschiedlicher Wässer kann durch die Öffnung von planmäßig verschlossenen Querableitungen erfolgen.

3.5 Bauausführung und Bauabnahme

Für eine langfristige Funktionsfähigkeit eines Tunnelentwässerungssystems ist jedoch nicht nur die Reduktion der Belastungen durch die Reinigung ein wichtiger Faktor, sondern auch die mängelfreie Ausführung, die durch eine genaue Bauabnahme gewährleistet werden muss. Es ist also Aufgabe der Bauherren, dafür zu sorgen, ein mängelfreies Entwässerungssystem einzukaufen, denn nur ein solches ist in der Lage, langfristig funktionstüchtig zu bleiben. Die später nötigen Instandsetzungskosten werden auf jeden Fall viel höher sein, als die Kosten für eine qualifizierte Bauabnahme zur Sicherstellung eines mängelfreien Entwässerungssystems in der Bauphase.

Die Drainageleitungen müssen so gekennzeichnet sein, dass ein lagesicherer Einbau erfolgen kann. Bisher war man da-

von ausgegangen, dass z.B. die Rohrquerschnitte mit Tunnelprofil einwandfrei verwechslungssicher einzubauen sind. Die Autoren konnten sich hingegen in einigen Tunneln davon überzeugen, dass es nicht nur möglich ist, ganze Haltungen verdreht einzubauen, sondern auch nur einzelne Rohre innerhalb der Leitungen zu verdrehen. Daher ist es Aufgabe der Bauabnahme, eine einwandfreie Lage der vorgeschriebenen Rohrmaterialien zu prüfen und diese nötigenfalls sofort nachbessern zu lassen.

Bei der Abnahme der Entwässerungsleitungen ist insbesondere darauf zu achten, dass die Rohre keine Fehlstellen oder Scherbenbildung aufweisen. Die eingebauten Rohre sollten unverseht und nicht bereits beim Einbau durch Flickstellen gekennzeichnet sein. Da mangelhafte Anschlüsse und Verbindungen zu Verwirbelungen führen, entstehen vorwiegend an schlecht ausgeführten Stellen starke punktuelle Versinterungen. Die Bauabnahme sollte also begleitend zum Einbau die ordnungsgemäße Ausführung der Anschlüsse sowie die richtige Lage der Rohre überprüfen.

Ebenso muss sicher gestellt sein, dass das Gefälle eingehalten wird und keine Vertiefungen („Wassersäcke“) eingebaut werden, da es aufgrund der verringerten Fließgeschwindigkeit zur Sedimentation von Fein- und Feinstpartikeln kommt, die sonst mit dem natürlichen Wasserstrom ausgeschwemmt werden. Dadurch ist die Versinterungsgefahr an diesen Stellen sehr hoch und kann bei Trockenfallen durch Verdunstung des gestauten Wassers verstärkt werden. Neben dem homoaxialen (Weiter-)Wachsen der Kristalle bei Anwesenheit von Wasser, werden durch Wasserentzug und Austrocknung Zementationsvorgänge in Gang gesetzt, die zu einer Aushärtung der vorhandenen Weichablagerungen führen.

Nach abgeschlossenem Einbau einer Haltung muss die Rohrleitung nochmals durch Kamerabefahrung von innen geprüft werden. Dadurch sollen deformierte Rohre bzw. Rohrstellen, verstopfte Sickeröffnungen oder Ablagerungen von Zementleim und Beton erkannt, sofort bemängelt und korrigiert werden. Nur durch die sofortige Mängelanzeige nach der Verlegung ist eine Beseitigung mit geringem Aufwand möglich, so dass das ausführende Bauunternehmen die Mängelbeseitigung nicht durch unverhältnismäßig hohen Aufwand ablehnen kann (für Deutschland vgl. VOB, Teil B [14], §13, Nr.6; für die Schweiz vgl. SIA 118 [15], Art.169, Abs.1 in Verbindung mit OR [16], Art.368, Abs.2).

3.6 Conclusion und Ausblick

Basierend auf den Grundlagen des vorangegangenen Aufsatzes [1] wurden in dieser Veröffentlichung grundsätzliche Hinweise für die Planung und die Bauausführung beim Neubau bzw. bei Instandsetzungsmaßnahmen von Tunneln und Tunnelentwässerungssystemen abgeleitet. Diese Empfehlungen sollen Planer und Bauherren anregen, sich während der Planungsphase verstärkt mit der Gestaltung der Entwässerung auseinander zu setzen. Diesen versteckten Bauteilen wird oft zu wenig Beachtung geschenkt, obwohl bei deren Versagen erheblicher latenter baulicher Schaden entstehen kann. Durch Berücksichtigung der dargestellten Hinweise sollte es in Zukunft möglich sein, die Drainagesysteme versinterungsärmer auszuführen. Da jedoch allein durch bauliche Maßnahmen nicht unbedingt eine Reduzierung in Menge und Festigkeit (Härte) der Versinterungen bzw. eine Versinterungsfreiheit erreicht werden kann (vgl. [1]), beschäftigt sich ein Folgeaufsatz mit der Instandhaltung von Tunnelentwässerungssystemen. Neben der Vorstellung unterschiedlichster Rohrreinigungsgeräte werden verschiedene Instandhaltungsstrategien diskutiert und ein kurzer Ausblick auf die Potenziale eines präventiven Instandhaltungsverfahrens – die Härtestabilisation – gegeben sowie weitere Entwicklungsschritte angesprochen.

Literatur

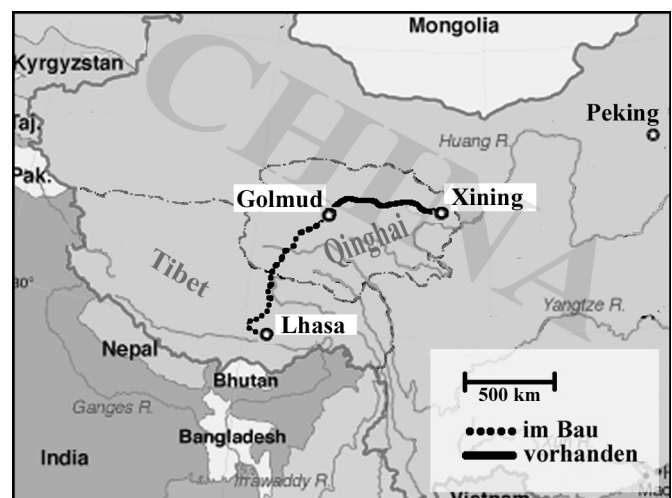
- [1] *Girmscheid, G.; Gamisch, T.; Klein, Th.; Meinschmidt, A.*: Versinterung von Tunneldrainagen – Mechanismen der Versinterungsentstehung. Bauingenieur 78 (2003), Nr. 6.
- [2] *Springenschmidt, R.; Maidl, B.; Maidl, R.*: Bericht über das Untersuchungsprogramm zur Minimierung von chemischen Ausfällungen in Tunnelentwässerungen und der Korrosion von Spritzbeton bei Tunneln der Deutschen Bundesbahn. Baustoffinstitut der TU München, Ingenieurgesellschaft mbH Bochum 1991. Forschungsbericht, im Auftrag der Deutschen Bundesbahn, Bundesbahndirektion Nürnberg, Projektgruppe NBS Nürnberg der Bahnzentrale.
- [3] *Steinour H.H.*: C-S-H-stability and pore solution chemistry. Proceedings of the 3rd ISCC, 1954, p. 261 – 270. Vgl.: *Pfiffner, M.; Holzer, L.*: Schädigungsmechanismen der Zementsteinkorrosion: Auslaugung und Sulfatangriff. In: Bergwasserproblematik in Tunnelbauwerken. Tagungsband zum Symposium vom 30. November 2001 an der EMPA-Akademie. EMPA: Dübendorf 2001.
- [4] *Naumann, J.; Maidl, B.; Heimbecher, F.; Abel, F.*: Verbesserung von Tunneldrainagen unter Berücksichtigung des versinterungsbedingten Wartungsaufwandes. Taschenbuch für den Tunnelbau 2002. Essen: Glückauf 2001.
- [5] *Girmscheid, G.*: Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau. Berlin: Ernst & Sohn 2000.
- [6] *Maidl, B.*: Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus. Band I: Konstruktionen und Verfahren. Essen: Glückauf 1994.
- [7] Richtlinie 853: Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten. Modul 853.4101 – Abdichtung und Entwässerung. DB Netz AG, Frankfurt a. M. Gültig ab 01.06.2002.
- [8] *Valplast AG*: Valplast-Drainagen. Drainage- und Dichtungssystem für Tunneln. Niedergesteln: Valplast 2002. Unternehmens-Systempräsentation.
- [9] *Kirschke, D.*: Fortschritte und Fehlentwicklungen bei der Tunnelentwässerung. Geotechnik 24 (2001), Nr. 1, S. 42 – 50.
- [10] *Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik*: Richtlinie Ausbildung von Tunnelentwässerungen. Entwurf, Stand 19.12.2002.
- [11] SN 531 198: Tunnelnorm Schweiz – Untertagebau. Entwurf, Stand 28. Mai 2001. Schweizer Norm SIA 198.
- [12] *Schikora, K.; von Soos, P.; Jedelhauser, B.; Heimbecher, F.; Thomée, B.*: Tunnel Farchant – Abdichtungs- und Entwässerungssystem. Bauingenieur 76 (2001), Nr. 9, S. 379 – 383.
- [13] *Kirschke, D.; Kuhnenn, K.; Prommersberger, G.*: Der Freudensteintunnel – Eine Herausforderung für den planenden Ingenieur. In: Ingenieurbauwerke (ibw) – DB Neubaustrecke Mannheim-Stuttgart. Der Freudensteintunnel. 12/91, Nr. 7, S. 5 –39. Vaduz: Elite Trust Reg. 1991.
- [14] VOB: Verdingungsordnung für Bauleistungen, Teil B: Allgemeine Vertragsbedingungen für die Ausführung von Bauleistungen.
- [15] SN 507 118: Allgemeine Bedingungen für Bauarbeiten. November 1991. Schweizer Norm SIA 118.
- [16] OR: Obligationenrecht der Schweiz. August 2001.

Die Qinghai-Tibet Bahn auf dem „Dach der Welt“

Die Qinghai-Tibet Eisenbahnlinie von Xining in der chinesischen Provinz Qinghai zur Hauptstadt Tibets, Lhasa, wird nach ihrer Fertigstellung die weltweit höchste und längste Eisenbahnlinie durch eine Hochgebirgsregion sein. Obwohl die Regierung von Mao Ze Dong bereits in den 50er Jahren die Bedeutung dieses Projektes erkannte, sieht erst der 10. Fünfjahresplan der chinesischen Regierung von 2001 nun die Fertigstellung der Eisenbahnverbindung vor, die lange durch unerfüllbare technische und finanzielle Ansprüche verhindert war. Mit der neuen Bahnverbindung will China das annektierte Tibet besser an China anschließen. Außenpolitisch argumentiert die Regierung in China, damit den wirtschaftlichen und sozialen Fortschritt von Qinghai und Tibet zu fördern.

Die komplette Trasse von Xining nach Lhasa hat eine Gesamtlänge von 1.963 km (**Bild**).

Ein 845 km langer Abschnitt von Xining nach Golmud (China) wurde bereits 1984 eröffnet, die Reststrecke wurde aber



Trassenverlauf der Qinghai-Tibet Eisenbahn