

Bundesamt für Strassen, ASTRA
3001 Bern

ASTRA Forschungsauftrag 52/99

Spritzabdichtungen im Tunnelbau

Schlussbericht

V. Wetzig, VersuchsStollen Hagerbach AG, CH 7320 Sargans
H. Hagedorn, Amberg Engineering AG, CH 8105 Regensdorf
J. Chabot, Amberg Engineering AG, CH 8105 Regensdorf

CH 7320 Sargans, 2002

Inhaltsverzeichnis	Seite
0. Zusammenfassung.....	4
Summary.....	6
1. Ausgangslage	7
2. Forschungsprojekt.....	8
3. Zielsetzung.....	8
4. Themenabgrenzung	9
5. Einflüsse des Wassers auf eine Tunnelauskleidung	10
5.1. Wasserzuflüsse im Gebirge	11
5.2. Wassertransport im Beton	12
5.3. Entwässerungskonzepte.....	13
6. Dokumentation der bisher ausgeführten Arbeiten und Untersuchungen.....	13
6.1. Dokumentation der bisher in der Schweiz ausgeführten Systeme.....	14
6.1.1. Bisher in Tunnelbauwerken eingesetzte Spritzabdichtungssysteme.14	
6.1.2. Spritzversuche im VersuchsStollen Hagerbach (VSH)	15
6.2. Durchführung, Beurteilung und Auswertung der ausgeführten Versuchsarbeiten	19
6.2.1. Versuchsanordnungen.....	19
6.2.2. Ausgeführte Prüfungen	22
6.2.3. Versuchsergebnisse, Feststellungen bei Einbau bzw. Versuchsbetrieb	22
6.3. Feststellungen beim Einbau der Spritzabdichtung.....	23
6.3.1. Untergrundfeuchte / – nässe.....	23
6.3.2. Spritzschatten/ Fehlstellen.....	23
6.3.3. Kontrolle Schichtdicken und Materialverbrauch	24
6.3.4. Tropfenbildung	24
6.3.5. Arbeitsplatzhygiene / Gesundheitsgefährdung	25
6.3.6. Herstellung der richtigen Mischung / Spritzbarkeit	25
6.3.7. Klimaverhältnisse.....	26
6.4. Feststellungen bei eingebauter Abdichtung	26
6.4.1. Auswirkung von unzureichendem Haftverbund.....	26
6.4.2. Durchlässigkeit der Spritzabdichtung.....	28
6.4.3. Chemische Beständigkeit	28
6.4.4. Wechselwirkungen mit anderen Baumaterialien	28
6.4.5. Zusammenfassung der bisherigen Untersuchungs- und Beurteilungsergebnisse	28
7. Verbundverhalten Beton - Spritzabdichtung.....	32

7.1. Modellbildung.....	33
7.1.1. Profil und statisches System.....	34
7.1.2. Gebirgskennwerte.....	34
7.1.3. Belastung.....	34
7.1.4. Ausbruchsicherung und Verkleidung	35
7.1.5. Spritzabdichtung	36
7.1.6. Berechnungsverfahren.....	38
7.2. Berechnungsergebnisse	38
7.2.1. Beanspruchung der Spritzabdichtung	38
7.2.2. Beanspruchungen des Spritzbetongewölbes und der Verkleidung ...	40
7.2.3. Schlussfolgerung aus den Modellrechnungen	41
7.3. Hinweise aus den statischen Modellrechnungen	42
8. Anforderungen an Spritzabdichtungssysteme.....	43
8.1. Anforderungen zum Verarbeitungsprozess.....	43
8.1.1. Viskosität / Verlaufen	43
8.1.2. Reaktionsverhalten	44
8.1.3. Schichtdickenkontrolle	44
8.1.4. Arbeitsplatzhygiene.....	45
8.1.5. Umweltverträglichkeit.....	46
8.1.6. Deklarationspflicht.....	46
8.1.7. Untergrundeigenschaften.....	47
8.1.8. Materialkompatibilität	48
8.2. Anforderung an Spritzabdichtung im eingebauten Zustand	49
8.2.1. Schichtdicke.....	49
8.2.2. Haftfestigkeit	50
8.2.3. Scherfestigkeit	51
8.2.4. Schälzugfestigkeit.....	51
8.2.5. Reissdehnung und Rissüberbrückung	52
8.2.6. Chemische Beständigkeit	52
8.2.7. Brandbeständigkeit	53
8.2.8. Faltbiegung in der Kälte	53
8.2.9. Formänderung in der Wärme.....	53
8.2.10. Durchschlagsfestigkeit	54
8.2.11. Nahtfestigkeit	54
8.3. Tabellarische Zusammenstellung der Anforderungen an Spritzabdichtungen	54
9. Schlussfolgerung.....	59
10. Ausblick.....	60

Beilagen	Beilage 1: Fotodokumentation
	Beilage 2: Felsmechanische Berechnungen
	Beilage 3: Literaturverzeichnis

0. Zusammenfassung

Mit der vorliegenden Arbeit wurden die Erfahrungen, die auf dem Gebiet der spritzbaren Abdichtungen bestehen, erfasst und in ihren Resultaten gegenübergestellt. Seit den ersten Versuchen mit spritzbaren Abdichtungen in den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts hat es vielfältige Weiterentwicklungen im Hinblick auf Produktsysteme und Applikationstechniken gegeben. Heute sind am Markt Spritzabdichtungssysteme erhältlich, die unter gewissen Randbedingungen eingesetzt werden können.

Mit den ausgeführten Betrachtungen und Berechnungen konnte gezeigt werden, dass bereits bei geringen Haftzugfestigkeiten und entsprechenden Festigkeitsparametern der Spritzabdichtung selbst Verbesserungen der Tragfähigkeit des Ausbausystems erwartet werden können, deren Ausmass jedoch für jeden Einzelfall gesondert nachgewiesen werden muss.

Andererseits sind die aus abdichtungstechnischer Sicht zu verlangenden Parameter diskutiert worden, die über den Werten liegen, die aus statischer Sicht erforderlich sind. Damit werden die Überlegungen betreffend der Abdichtungswirkung dominierend, für die Definition der Anforderungen an ein Spritzabdichtungssystem.

Abschliessend wird ein Anforderungskatalog an Spritzabdichtungssysteme vorgestellt und diskutiert.

Résumé

La présente étude consiste à dresser l'inventaire des expériences faites avec les revêtements étanches projetés et leurs résultats. Depuis les premiers essais de revêtements projetés dans les années 60 du 20^e siècle, le procédé a connu de nombreux développements, tant dans le domaine des produits appliqués que dans celui des techniques d'application. Des systèmes d'étanchéité par projection sont aujourd'hui disponibles sur le marché, lesquels peuvent être utilisés sous certaines conditions.

Les considérations et calculs évoqués dans l'étude ont permis de montrer que même pour de faibles valeurs d'adhérence à la traction et des paramètres de résistance correspondants de la couche d'étanchéité projetée, il était possible d'obtenir des améliorations de la portance du système de soutènement, dont l'importance doit toutefois être déterminée cas par cas.

Les paramètres à prendre en compte du point de vue de la technique d'étanchéité ont également fait l'objet d'une discussion. Ils se situent au-dessus des valeurs minimales nécessaires du point de vue de la statique. Il est donc possible de mettre essentiellement l'accent sur l'effet d'étanchéité lorsqu'il s'agit de définir les exigences auxquelles doit satisfaire un système d'étanchéité par projection.

Il suit la présentation et la discussion d'un catalogue de spécifications applicables aux systèmes d'étanchéité par projection.

Summary

This work records the experience available concerning injectable seals, together with a comparison of results. Since the first tests were carried out on injectable seals in the 1960's, a wide variety of further developments have taken place as far as product systems and application methods are concerned. Nowadays, the market offers injected sealing systems which can be used under specific marginal conditions.

The considerations and calculations set forth here have made it possible to demonstrate that improvements can be expected to the load-carrying capacity of the lining system, even for low adhesive pull strengths and corresponding strength parameters for the injected seal itself; however, the extent of these improvements has to be proven separately in each individual case.

The work also discusses the parameters required in terms of sealing technology, which are higher than the values needed from the viewpoint of statics. This gives a dominant position to considerations regarding the sealing effect when it comes to defining the requirements to be met by an injected sealing system.

To conclude, a catalogue of requirements for injected sealing systems is presented and discussed.

1. Ausgangslage

Spritzabdichtungen, die teilweise auch als Spritzfolien bezeichnet werden, sind im Hoch- bzw. Tiefbau seit einigen Jahren bekannt und werden dort auch mit Erfolg zum Abdichten von Dächern, Fundamenten und Brücken eingesetzt. Mit Flüssigkunststoffen können auch komplizierte Oberflächengeometrien einfach abgedichtet werden.

Ausgehend von diesen Anwendungsgebieten wurden Spritzabdichtungssysteme entwickelt, die auch im Untertagebau anstelle der herkömmlichen, vorgefertigten Abdichtungsbahnen eingesetzt werden könnten. Beim Wechsel von vorgefertigter Abdichtungsbahn zu Spritzabdichtung handelt es sich nicht nur um eine Frage der Produktwahl, vielmehr ändert sich allenfalls ein komplettes Abdichtungssystem und evtl. sogar das Bausystem, wenn durch den Wechsel zur Spritzabdichtung z.B. auch ein Wechsel von der zwei- zur einschaligen Bauweise erfolgen kann, bzw. das Entwässerungskonzept angepasst werden muss. Unter Umständen ergibt sich ein völlig neues System, das in die bisherige Klassifikation nicht eingeordnet werden kann.

Es handelt sich bei der Wahl zwischen den beiden genannten Abdichtungssystemen um die komplette Problematik einer Baumethode sowie der statischen Aspekte, die dadurch berührt werden.

Mit der Anwendung von Spritzabdichtungssystemen entfällt ein Teil der bekannten Aufwendungen, die sich bei Applikation der herkömmlichen Kunststoffdichtungsbahnen ergeben. Dies sind z.B. aufwendige Untergroundvorbereitungen, Faltenbildung bei Materialüberschuss, Ausdünnung im Bereich von Bossen oder Erstellung- und Kontrollaufwand der Schweissnähte. Aufgrund des einfacheren Einbaus der Spritzabdichtung ist auch ein wirtschaftlicher Erfolg des Systems zu erwarten.

In der jüngsten Vergangenheit hat die VersuchsStollen Hagerbach AG (VSH) mit unterschiedlichsten Spritzabdichtungsherstellern Versuchsprogramme durchgeführt, um bezüglich der Applikation der Abdichtungssysteme optimale Verfahren und Techniken zu ermitteln. Im Hinblick auf praktische Anwendungen auf Tunnelbaustellen stellt sich immer wieder die Frage, welche Einflüsse sich auf die gesamte Baumethode ergeben und welche Eigenschaften vom Spritzabdichtungssystem erfüllt werden müssen. Diese Fragestellungen sind bis heute ungeklärt.

Bei früheren untertägigen Anwendungen von Spritzabdichtungen traten diverse Schwierigkeiten auf, sowohl bezüglich des Handlings als auch des Produktverhaltens, die im Laufe der ausgeführten Entwicklungsarbeiten sukzessive ausgemerzt wurden.

Nachdem zunächst die möglichen Formen von Wasserzutritten und generelle Entwässerungskonzepte besprochen werden, werden die bisher in der Schweiz ausgeführten Anwendungen von Spritzabdichtung in der Praxis und im Rahmen von Versuchsprogrammen dokumentiert. Anschliessend wird in einer Modellrechnung der Einfluss der Spritzabdichtungen auf das Tragsystem der Tunnelauskleidung betrachtet. In einem letzten Schritt werden Anforderungen an Spritzabdichtungssysteme definiert, soweit dies aufgrund der vorliegenden Erfahrungen möglich ist.

2. Forschungsprojekt

Die vorliegende Studie wurde im Auftrag des Bundesamts für Strassen (ASTRA) erstellt, um den aktuellen Stand der Technik zu dokumentieren und mögliche Beurteilungsparameter zu evaluieren.

Die Arbeiten erfolgen durch die VersuchsStollen Hagerbach AG in Zusammenarbeit mit der Amberg Ingenieurbüro AG

3. Zielsetzung

Ausgehend von der oben beschriebenen Situation bezüglich der Entwicklung und dem Einsatz von Spritzabdichtungen im Tunnelbau, ergeben sich die folgenden Fragestellungen, die im Rahmen dieser Studie beantwortet werden sollen:

- Welche Prozesse bestimmen die Entwässerung hinter der Spritzabdichtung und wie werden diese durch das Fließverhalten des Bergwassers im Fels beeinflusst?
- Welche Informationen aus sind von ausgeführten Objekten oder Versuchen mit Spritzabdichtungsanwendungen verfügbar?
- Welche Parameter beeinflussen das Tragsystem Spritzabdichtung-Spritzbeton? Welche Auswirkungen ergeben sich auf das statische Tragsystem?
- Welche Parameter sind für die Beurteilung von Spritzabdichtungssystemen heranzuziehen und wie sind diese zu gewichten?

4. Themenabgrenzung

Die vorliegende Untersuchung beschäftigt sich ausschliesslich mit Anwendungen von Spritzabdichtungen im bergmännischen Tunnelbau, bei der die Abdichtung auf der "Luftseite" plaziert wird. Dies bedeutet, dass anströmendes Wasser die Spritzabdichtung zunächst nicht auf die Konstruktion des Bauwerks presst, wie dies bei Anwendungen im Hoch- und Tiefbau und auch bei aussenliegenden Abdichtungen von Tagbautunneln der Fall ist, sondern den Verbund Spritzabdichtung–Untergrundspritzbeton auf Zug beansprucht. In einer späteren Bauphase, wenn das Innengewölbe erstellt ist, verliert der Haftverbund mit dem Untergrund an Bedeutung, da die Spritzabdichtung eine Unterstützung durch das Innengewölbe erfährt. Das Innengewölbe wird durch die Abdichtung vor zufließendem Bergwasser geschützt.

Im Vordergrund der Betrachtungen steht somit die Bauweise, bei der zunächst eine Felssicherung mit Spritzbeton eingebaut und anschliessend die Abdichtung aufgebracht wird. Das Innengewölbe kann entweder ganz oder teilweise mit Ortbeton oder mit Spritzbeton eingebracht werden. Der Einbau eines Ortbetoninnengewölbes entspricht dem heutigen Stand der Technik. Es wird von einer vollständigen Verfüllung des Innenringes ausgegangen. Abbildung 1 zeigt schematisch den Aufbau der Tunnelauskleidung mit herkömmlichen Kunststoffdichtungsbahnen und mit Spritzabdichtungen.

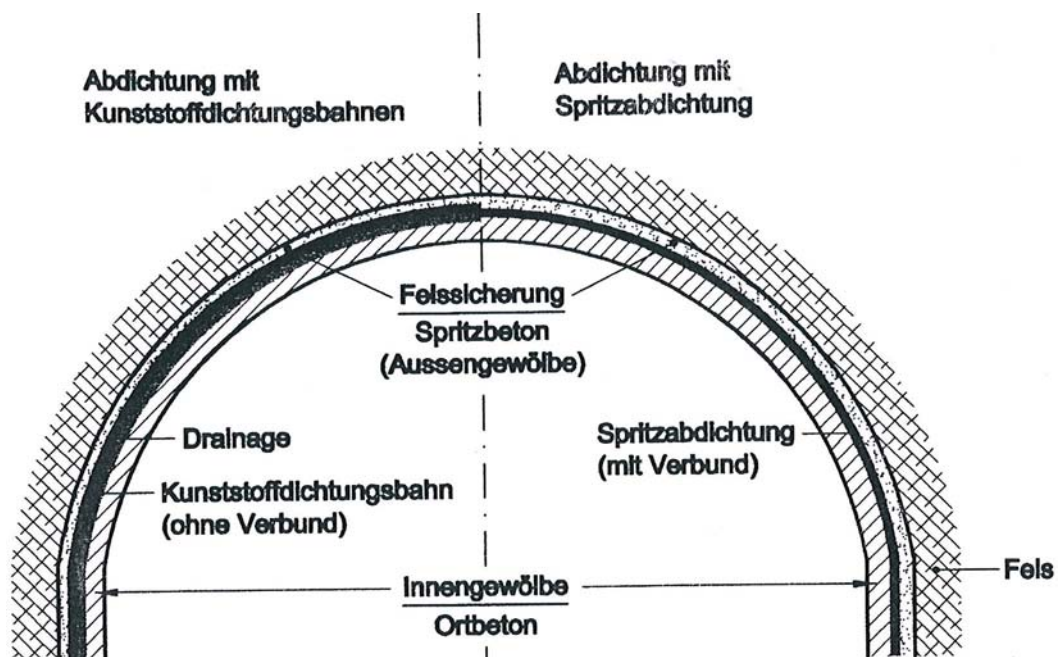


Abb. 1 Gegenüberstellung Abdichtungssysteme im Aufbau der Tunnelauskleidung

Die Applikation der Spritzabdichtung auf geschalteten Flächen, wie Tübbingen wird in dieser Studie nicht näher betrachtet. Ebenso wird auf den Einflussparameter Permafrost nicht näher eingegangen, da er für Strassentunnels in der Schweiz keine Bedeutung hat.

Die hinter der Spritzabdichtungen liegenden Drainageelemente zur Wasserableitung sind nicht Gegenstand dieser Studie und werden daher auch nicht näher beschrieben. Es werden lediglich die Aufgaben und die verlangten Funktionen der Drainagesysteme definiert.

5. Einflüsse des Wassers auf eine Tunnelauskleidung

Die Belastungen, die anstehendes Bergwasser auf eine Tunnelauskleidung und damit auf die Abdichtung ausübt, ist von den Materialparametern des Untergrundes und der Tunnelauskleidung sowie dem generellen Entwässerungskonzept abhängig. Im folgenden werden diese Zusammenhänge zum besseren Verständnis der folgenden Ausführungen stichwortartig dargestellt.

5.1. Wasserzuflüsse im Gebirge

Das Auffahren eines Tunnels untertage bedeutet einen Eingriff in eine bisher stationäre Grundwasserhydrologie infolge von Rissen, Deformationen und Veränderungen von Wegsamkeiten im Gebirge.

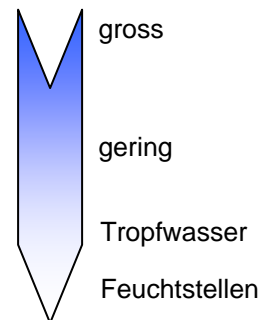
Die Fließmengen und –geschwindigkeiten des Wassers im Gebirge sind von den ursprünglich vorhandenen Wegsamkeiten und den durch den Bau verursachten Veränderungen abhängig.

Die Fließmengen von Bergwasser, Richtung Tunnelhohlraum lassen sich beispielsweise nach abnehmender Ergiebigkeit folgendermassen den jeweiligen Gebirgsverhältnissen zu ordnen:

Gebirgsverhältnisse

- Karst bzw. Grobkies
- Störzonen
- Kluftscharen
- vernetzte Klüfte
- einzelne Klüfte bzw. Sand
- Schieferung bzw. Schluff
- Kapillarstruktur bzw. Ton
- Poren in Gesteinsmatrix

zu erwartende Wassermenge



 : näher betrachtete Wegsamkeiten für Bergwasser

Auf die ersten drei Fälle wird nicht näher eingegangen, da Bergwasser hier im allgemeinen separat gefasst und abgeleitet wird. Bei diesen grösseren Wasserzutritten wird das Wasser in Leitungen oder Halbschalen gefasst und direkt der Tunnelentwässerung zugeführt. Das Abdichtungssystem übernimmt an dieser Stelle keine Aufgaben. Kleinere Wassermengen, die nicht gefasst werden, werden analog den geringen Wasserzutritten behandelt.

Die letztgenannten vier Gebirgsverhältnisse sind für Spritzabdichtungen von Bedeutung. Bergwasser dringt durch das Gebirge und sickert durch Poren und/oder Risse im Spritzbeton der Felssicherung und erreicht so die Kontaktfläche Spritzabdichtung – Spritzbetonsicherung. Bei gutem Haftverbund der Spritzabdichtung zur Unterlage, staut sich das Wasser z.B. in die wasserzuführende Kluft zurück. Dabei wird das Bergwasser je nach Vernetzung der Klüfte bis in benachbarte wasserabführende Kluftsysteme verdrängt. Die Wasserverdrängung beschränkt sich lokal bis auf die nächstliegende Drainagemöglichkeit. Je grösser die Distanz zur nächsterreichbaren Entwässerungsmöglichkeit, desto höherer Wasserdruck kann sich hinter der Spritzabdichtung aufbauen. [2]

Anzumerken bleibt, dass ein während des Vortriebs oder des Betriebs trockener Tunnel nach Jahren oder gar Jahrzehnten durch neu entstandene Bergwasserzuflüsse vernässen kann. Die während des Vortriebs im umliegenden Gestein entstandene Auflockerung, kann in höher gelegene Schichten durchbrechen, so dass neue Wasserwegigkeiten entstehen können. [6,7]

5.2. Wassertransport im Beton

Die Wasserzuflüsse resp. -transporte, die im Spritzbeton der Felssicherung erfolgen, werden von den folgenden Parametern bestimmt:

- Risse in der Spritzbetonsicherung. Diese resultieren einerseits aus Deformationsvorgängen des Felsuntergrundes und andererseits aus Schwindrissen, die beim Abbinden des Betons entstehen. Bereiche mit dünnem Betonauftrag und/oder einspringenden Ecken sind anfälliger auf Rissbildung in der Sicherung. Durch diese Risse kann Tropfwasser ohne grossen Abfall des Druckgradienten bis zur Spritzabdichtung gelangen.
- Ungleiche Kornverteilung oder Entmischungen im Beton ermöglichen z.B. durchlässige Kiesnester (z.B. bei Arbeitsfugen).
- Wassertransport durch kapillares Saugen wird in einem ungerissenen Beton durch die Porenstruktur beeinflusst. So kann in Abhängigkeit vom Tunnelklima je m² und Tag unabgedichteter Abdichtungsunterlage zufließendes Bergwasser in der Grössenordnung von mehreren Litern verdunsten. Die Betonoberfläche erscheint dabei völlig trocken und weist keine Indizien der verdunsteten Wassermengen auf. Bei applizierter Abdichtung wird diese Verdunstung unterbunden, die Feuchtigkeit wird zurückgestaut und wird sich im Untergrund andere Wegigkeiten suchen. Finden sich keine Fliesswege, über die der Wasserdruck entspannt werden kann, baut sich ein entsprechender Druck hinter der Abdichtung auf.



5.3. Entwässerungskonzepte

Die Belastungen auf eine Tunnelauskleidung, die auf den Zufluss von Wasser zurückzuführen sind, hängen von dem gewählten Entwässerungskonzept ab. Es ist zwischen druckwasserhaltenden und nicht druckwasserhaltenden (drainierten) Tunnelausbauten zu unterscheiden. Weitere Unterscheidungsmerkmale ergeben sich bei Betrachtung der Phasen Einbau und Betrieb. Eine Gegenüberstellung der genannten Konzepte findet sich in der Tabelle 1. Der partielle Wasserdruck bei den drainierten Zuständen entsteht, wenn es zur „Umleitung“ von Fließwegen im Untergrund kommt.

	Druckwasserhaltende Abdichtung	Nicht druckwasserhaltender Tunnel
Einbau	<ul style="list-style-type: none"> - temporäre Drainage - partieller Wasserdruck 	<ul style="list-style-type: none"> - permanente Drainage - partieller Wasserdruck
Betrieb	<ul style="list-style-type: none"> - keine Drainage - voller Wasserdruck auf Abdichtung und Ausbau - kein Unterhalt der Entwässerungsleitungen 	<ul style="list-style-type: none"> - dauerhafte Drainage - partieller Wasserdruck - laufender Unterhalt der Entwässerung

Tabelle 1 Gegenüberstellung Entwässerungskonzepte

Je nach gewähltem Entwässerungskonzept sind die Belastungen, denen die Abdichtung ausgesetzt ist, sehr unterschiedlich. Bei druckwasserhaltenden Abdichtungen ist im Betriebszustand keine Drainage vorhanden. Eine auf dem Untergrund haftende Abdichtung verhindert Hinterläufigkeiten und gewährleistet damit auch bei punktuellen Fehlstellen eine Dichtigkeit des Systems.

6. Dokumentation der bisher ausgeführten Arbeiten und Untersuchungen

- Wie oben bereits ausgeführt wurde, sind in der Vergangenheit unterschiedlichste Produkte und Systeme für Spritzabdichtungsanwendungen im VersuchsStollen Hagerbach untersucht worden. Diese Untersuchungen sowie die wenigen praktischen Baustellenanwendungen, die teilweise schon Jahrzehnte zurückliegen, werden im folgenden näher beschrieben.

6.1. Dokumentation der bisher in der Schweiz ausgeführten Systeme

6.1.1. Bisher in Tunnelbauwerken eingesetzte Spritzabdichtungssysteme

In der Schweiz sind in folgenden Untertagebauwerken Spritzabdichtungen appliziert worden. In allen beschriebenen Fällen ist eine Bergwasserentwässerung vorhanden.

System/ Produktname	Jahr	Objekt	Dicke [mm]	Dichtigkeitsbeurteilung der Tunnel im Betrieb
Bitumen- Kautschuk CSM- Spritzabdichtung	1971	Tunnel Kesseltobel (Krumenau)	3	völlig undicht, systematische Vernässung des Tunnels
Polyester- Spritzabdichtung	1965	Tunnel Trögli, Rongellen GR	2-3	leichte Undichtigkeiten, einige Tropfstellen
Polyester- Spritzabdichtung	1964	Portale Tunnel San Bernardino	2-3	starke Undichtigkeiten, Tropfstellen / flächige Vernässungen
Bitumen- Kautschuk- Spritzabdichtung	1973	Heitersberg Tunnel, gewisse Bereiche	Unbek.	leicht undicht vereinzelte Tropfstellen
Bitumen- Kautschuk- Spritzabdichtung	1972	Tunnel Flonzaley	ca. 3	starke Undichtigkeiten, zahlreiche Nassstellen

Tabelle 2 Wichtigste in Schweizer Tunnels applizierte Spritzabdichtungen und subjektiven Dichtigkeitsbeurteilungen anlässlich von späteren Begehungen. [1]

Seit 1973 ist es in der Schweiz wegen den aufgetretenen Problematiken zu keinen weiteren Baustellenanwendungen von Spritzabdichtungen mehr gekommen.

Im Zuge der Entwicklung der Systeme sind auch die Produkte weiterentwickelt oder neu erstellt worden. Diejenigen Systeme, die auf der gleichen Rohstoffbasis erstellt werden wie frühere Entwicklungen, unterscheiden sich von diesen in den effektiven Produkteigenschaften massiv und sind mit ihnen überhaupt nicht mehr vergleichbar.

6.1.2. Spritzversuche im VersuchsStollen Hagerbach (VSH)

In der Vergangenheit konnten zwei Phasen unterschieden werden, während derer im VersuchsStollen Hagerbach Versuche und Untersuchungen an spritzbaren Abdichtungssystemen ausgeführt wurden. Zunächst erfolgten intensive Untersuchungen Mitte der 80er Jahre. Nach einer Phase, in der die Idee der spritzbaren Abdichtungen im Tunnelbau nicht weiterverfolgt wurde, erfolgten ab Mitte der 90er Jahre wieder intensive Bemühungen, spritzbare Abdichtungen auch im Tunnelbau einzusetzen. Gemeinsam ist all diesen Untersuchungen, dass sie auf trockenem Untergrund, in einem Fall auf eine Drainagematte, appliziert wurden. Der Untergrund besteht in allen Fällen aus Spritzbeton. Bei der ersten Versuchsreihe wurde dieser zusätzlich mit einer Feinmörtelschicht versehen. Die klimatischen Randbedingungen sind bei all diesen Versuchen mit 15 °C und 80 % relativer Luftfeuchtigkeit konstant gewesen.

Die ausgeführten Versuche, erfolgten mit Systemen aus den folgenden Produktgruppen:

- Hydraulische Bindemittel (HB)
- Emulsionen (EM)
- Reaktionsharze (RH)

6.1.2.1. Im VSH vor 1990 durchgeführte Spritzabdichtungsversuche

Eine erste umfangreiche Versuchsserie wurde ca. 1985 ausgeführt. Kennzeichnend für diese Arbeiten waren die umfangreichen Vorarbeiten, die am Untergrund erfolgten. Auf einem trockenen und drainierten Untergrund wurde ein Spritzbeton mit 8 mm Grösstkorn aufgetragen. Anschliessend erfolgte ein Auftrag von Feinmörtel 0 - 2 mm, der abgerieben wurde, so dass eine zwar wellige, aber glatte Oberfläche entstand. Die Schichtstärke des Feinmörtels betrug weniger als 5 mm. Er diente allein zum Ausgleich der Rauigkeiten des Spritzbetons.

Der detaillierte Aufbau dieses Abdichtungssystems ist in Abbildung 2 dargestellt. Die verwendeten Produktgruppen sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Produkte, bei denen für die Applikation keine Verwendung von organischen Lösungsmitteln erforderlich sind, werden als lösungsmittelfrei bezeichnet.

Als rissüberbrückend werden die Produkte bezeichnet, die gemäss Herstellerangaben ein elastisches Verhalten zeigen, das ermöglicht, dass sich öffnende Risse überbrückt werden können ohne die Abdichtung zu zerstören.

Es wurden bei diesen Applikationen keine Laboruntersuchungen durchgeführt.

Diese Abdichtungssysteme wurden vorwiegend in unterirdischen Speicherkavernen für Wasser, Kohlenwasserstoffe und Gase eingesetzt.

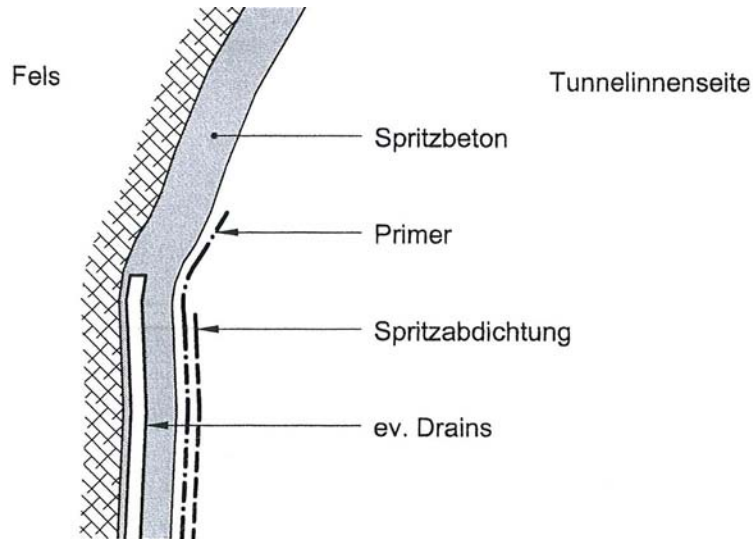


Abb. 2 Aufbau Tunnelauskleidung Versuche 1985

Eigensch. System-Nr.	Produkt gruppe	Lösungs mittelfrei	Rissüberb rückend	Eigenschaft / Anwendungsgebiet	Mittlere Dicke [mm]	Farbe	Bild Nr. (Beilage 1)
A -1.	RH			Imprägnierung (Primer)	ca. 0.5	transpar ent	929/10
A -2.	RH			Korrosionsschutz Stahleinbauten	ca. 1.0	grau	929/11
A -3.	RH		Ja	schlag-, stossfest,	ca. 1.0 - 2.0	hellgrün	929/13
A -4.	Unbeka annt		Ja	Grundierung,	ca. 1.0	dunkelgr ün	929/15
A -5.	RH		Ja	Wandbeschichtung unterirdischer Speicherkaavernen (Treibstoffe)	ca. 1.0 - 2.0	d'grau	929/17
A -6.	RH		Ja	Wandbeschichtung unterirdischer Speicherkaavernen (Treibstoffe)	ca. 1.0	rot- orange (verblich en)	
A -7.	RH		Ja	Wandbeschichtung unterirdischer Speicherkaavernen (Wasser)	ca. 1.0 – 3.0	hellgrün	929/20
A -8.	RH	Ja		Wandbeschichtung unterirdischer Speicherkaavernen (Wasser)	ca. 1.0	transpar ent	
A -9.	RH	Ja		Oberflächenschutz	ca. 1.0	hellblau	
A -10.	EM	Ja	Ja	Abdichtung	ca. 1.0	schwarz	929/21

Tabelle 3 Übersichtstabelle der im VSH durchgeführten Spritzabdichtungs-Versuche bergmännischer Tunnelabdichtungen, ca. 1985. (RH- Reaktionsharz; EM- Emulsion)

6.1.2.2. Im VSH nach 1990 durchgeführte Spritzabdichtungs-Versuche

Tabelle 4 gibt eine Übersicht der nach 1990 im VSH durchgeführten Versuche zum Thema Spritzabdichtungen. Es handelt sich hierbei um Systeme, die teilweise intensiv untersucht wurden und heute am Markt angeboten werden. Diese Untersuchungen sind Basis für die im Kapitel 5.2 gemachten Ausführungen.

Eigenschaft. System-Nr.	Produktgr uppe	Plastizit ät 2001	Ausfüh rung [Jahr]	Dicke [mm]	Untergrund	Mit Wasserdr uck (Kap. 6.2.2)	Prüfkör per	Bild- Nr.: (Beilage 1)
B - 1.	EM	weich	ca. 1997	2 - 4	Spritzbeton 0-8 mm	ja	nein	928/4
B - 2.	RH	weich	ca. 1995	4 - 5	Spritzbeton 0-8 mm	ja	ja, Ø 50 mm.	928/10A
B - 3.	RH	mittel	ca. 1995	3 - 4	Spritzbeton 0-8 mm	ja	ja, Ø 50 mm.	928/16
B - 4.	EM	mittel	1999	1 - 2	Vlies, 3 mm dick, punktuell auf Spritzbeton befestigt	ja	nein	928/20A
B - 5.	EM	mittel	ca. 1999	2 - 4	Spritzbeton 0-8 mm+ gelochtes Vlies Ø 10 cm.	keine	nein	928/31A
B - 6.	EM	mittel	1999	2 - 4	Spritzbeton 0-8 mm	verm. keine	nein	928/29A
B - 7.	RH	hart	ca. 1995 - 98		Spritzbeton 0-8 mm	ja	ja, Ø 50 mm.	928/32A
B - 8.	HB	hart	ca. 1998	ca. 2 - 4	Spritzbeton 0-8 mm/ 0-4 mm	ja	nein	928/33A
B - 9.	RH	hart	ca. 1994 - 95	2 - 3	Spritzbeton 0-4 mm, Primer (gegl. Oberfl.),	nein	nein	929/2

Tabelle 4 Übersichtstabelle der im VSH durchgeführten Spritzabdichtungs-Versuche bergmännischer Tunnelabdichtungen nach 1990 (HB- Hydraulisches Bindemittel; RH-Reaktionsharz; EM-Emulsion)

Bei der Beurteilung der Plastizität, 2001 entsprechen die gemachten Angaben den folgenden Werte der Shore-A-Härte:

Weich	< 35 Shore A
Mittel	35 bis 65 Shore A
Hart	> 65 Shore A

6.2. Durchführung, Beurteilung und Auswertung der ausgeführten Versuchsarbeiten

Alle in diesem Kapitel gemachten Ausführungen beziehen sich auf die Versuche, die seit 1990 im VSH ausgeführt wurden (Kap. 6.1.2.2.).

6.2.1. Versuchsanordnungen

Die Spritzapplikation erfolgte immer über die gesamte Tunnelabwicklung auf einer Länge von mindestens 3 m. Damit waren auch Einflüsse der Applikation über Kopf beurteilbar, die im Bereich aller Spritzapplikationen als besonders heikel beurteilt werden.

6.2.1.1. Versuche ohne Wasserdruck

Die Spritzabdichtung wurde direkt auf den, teilweise mit Feinmörtel (0 – 4 mm) vorbehandelten, Spritzbeton aufgetragen (Abb. 2). Dabei wurde nicht unterschieden, ob das Gebirge selbst trocken war oder anfallendes Wasser über Drains im Untergrund gefasst und abgeführt wurde. Nach dem Aushärten der Spritzabdichtung wurden teilweise Bohrkerne mit 50 mm Durchmesser zur Bestimmung der Haftzugfestigkeit der Abdichtung auf dem Untergrund entnommen.

6.2.1.2. Versuche mit Wasserdruck

In den Tunnelhohlraum eindringendes Wasser beeinflusst das Verhalten und die Funktionstüchtigkeit einer Spritzabdichtung speziell während der Bauphase. Bei der Applikation kann tropfendes oder fließendes Wasser das noch flüssige Abdichtungsmaterial ausschwemmen. Nach dem Aushärten beansprucht das zufließende Wasser den Haftverbund mit dem Untergrund bis das Innengewölbe erstellt ist.

Zur Simulation solcher Verhältnisse wurden zunächst auf dem Fels in einem regelmässigen Abstand von 1.0 m perforierte Schläuche ($D=15\text{ mm}$; $L=15\text{ m}$) montiert und gem. Abb. 3 eingespritzt (siehe Foto Nr. 928/3; Beilage 1). Ab dem gemeinsamen Speisungspunkt der Schläuche konnte so der Spritzbetonuntergrund des Versuchsbereichs über unterschiedliche Zeiträume, in der Regel eine Woche ab Applikationsdatum der Spritzabdichtung, mit variablen Wasserdrücken beaufschlagt werden. Wasserdruck und -verlustmengen wurden kontinuierlich aufgezeichnet. Am Einspeisungspunkt betrug der Wasserdruck maximal 6 bar. Die effektiven Drücke hinter der Spritzabdichtung wurden nicht gemessen.

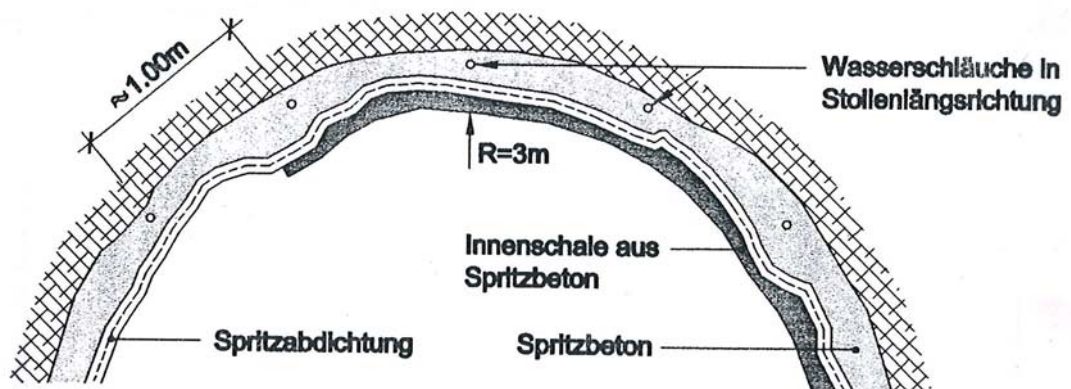


Abb. 3 Stollenparallele Anordnung der perforierten Wasserdruckschläuche

Ziel war die Simulation von Bergwasser auf die aufgetragene Spritzabdichtung, das nicht völlig drucklos über die eingebauten Drainageelemente abgeführt werden kann. Dies ist der Fall, wenn die Fließwege zur nächsten Drainage zu gross werden. Je nach Abstand der Drainageelemente und deren Leistung können sich unterschiedliche Wasserdrücke hinter der Abdichtung aufbauen. Im extremsten Fall, wenn keine Drainage vorhanden ist oder diese nicht mehr funktionsfähig ist, baut sich der vollständige Wasserdruck auf, der durch die Höhe der überlagernden Wassersäule bestimmt wird.

Beim Wasserdruckversuch gelangte das Wasser durch Poren im Spritzbeton, der zu diesem Zweck hochporös erstellt wurde oder durch vorhandene Schwindrisse des Felssicherungsspritzbetons, bis zur aufgetragenen Spritzabdichtung. Unterstützt wurde die Wasserausbreitung während des Abpressversuches durch oberflächennahe Kluftsysteme im angrenzenden Fels bis zum aufgetragenen Spritzbeton.

Die Spritzabdichtung wurde je nach Versuchsaufbau zusätzlich mit einer dünnen Innenschale aus Spritzbeton unterstützt. (Abb. 3)

Es wurden untersucht:

- Haftet die aufgetragene Spritzabdichtung trotz der Einwirkung des drückenden Wassers am Spritzbetonuntergrund oder löst sie sich (Probleme mit Haft- und Unterwanderungsverhalten, Bildung von Wassersäcken)?
- Bildung von Wasserwegigkeiten innerhalb des Gebirges oder zwischen Fels und Spritzbetonauskleidung.
- Anordnung und Einfluss von Drainageelementen bergseitig der Abdichtung.
- Einfluss der Vorbehandlung des Untergrundes.

6.2.1.3. Versuche mit drainiertem Untergrund

Im Versuch B-5 (Tabelle 4) wurde die Abdichtung auf ein gelochtes Geotextilvlies gespritzt. Mit dem Lochdurchmesser von 10 cm (Lochabstand 15 cm) sollte ein Verbund zum dahinterliegenden Untergrund hergestellt werden. Das zwischen den Öffnungen befindliche Vlies mit einem Flächengewicht von 500 g/m^2 (Gewicht ungelocht) gewährleistete eine Drainage zwischen der Spritzabdichtung und dem Untergrund.

Im Versuch B-4 (Tabelle 4) wurde die Spritzabdichtung direkt auf ein punktuell befestigtes Vlies appliziert. Auf der glatten Vliesoberfläche konnte eine gleichmässige Schichtdicke der Spritzabdichtung erstellt werden. Das Vlies gewährleistete das Drainageverhalten des Gesamtsystems innerhalb kurzer Distanzen.

6.2.2. Ausgeführte Prüfungen

Zusätzlich wurden aus den applizierten Systemen Kernproben aus den Wänden entnommen. An diesen Kernproben mit dazwischenliegender Spritzabdichtung wurden Haftzugversuche vorgenommen.

Ermittelt wurde die Haftzugfestigkeit an Bohrkernen mit 50 mm Durchmesser zwischen der Spritzabdichtung und dem Untergrundspritzbeton resp. der Innenschale. Das Betonalter betrug in jedem Fall mehr als 28 Tage.

Visuell wurde die Dichtigkeit der applizierten Spritzabdichtung auf allfällige Fehlstellen geprüft. Prüfungen betreffend Dichtigkeit oder Rissüberbrückung wurden nicht ausgeführt.

Eine zusammenfassende Gegenüberstellung aller untersuchten Systeme mit den zugehörigen Beurteilungen findet sich in Kap 6.3.1.2.

6.2.3. Versuchsergebnisse, Feststellungen bei Einbau bzw. Versuchsbetrieb

Die in den folgenden Kapiteln beschriebenen Versuchsergebnisse bilden die Basis für die in Kapitel 7 aufgestellten Anforderungen an Spritzabdichtungssysteme.

6.2.3.1. Haftverbund und Wasserverdrängung

Die Auswertung der Haftzugprüfung (kraftgesteuerter Zugversuch gemäss ZTV-SIB 90) ergab Werte, welche bei einer Serie von 5 Einzelwerten, zwischen 0 und 1.5 N/mm² lagen. Mehrheitlich lagen die Werte zwischen 0.5 bis 1.0 N/mm². Der Grund der breiten Streuung liegt u.a. an der unterschiedlichen Untergrundvorbereitung. Die Haftung auf feuchtem oder verschmutztem Untergrund war über alle Produkte gesehen tendenziell eingeschränkt. Bei gut haftenden Abdichtungen wurde das Wasser örtlich in benachbarte Klüfte, Risse oder in die Gesteinsmatrix zurückgestaut und so seitlich verdrängt. So stellt sich ein Ausgleich von lokalen Druckspitzen ein. Bergwasser konnte so in Drains abgeleitet werden, die z.B. in regelmässigen Abständen angeordnet waren.

In einem Fall der bisher durchgeführten Versuche wurden ca. 8 bis 10 m ausserhalb eines Versuchsfeldes Wasseraustritte beobachtet (System B-7, Tabelle 4). Es zeigte sich, dass die dort austretenden Wassermengen proportional zu den im Schlauchsystem der Versuchsstrecke aufgetragenen Wasserdrücken waren. Wasserwegigkeiten innerhalb des Felsens resp. zwischen Fels und Spritzbetonauskleidung dürften diese Wasseraustritte verursacht haben. Im Versuchsfeld hat die Spritzabdichtung dem Wasserdruck standgehalten und sich nicht vom Untergrund abgelöst. Die

Funktionsfähigkeit des Abdichtungssystems konnte in diesem Rahmen somit nachgewiesen werden.

6.3. Feststellungen beim Einbau der Spritzabdichtung

Bei der Applikation der Spritzabdichtungen zeigten sich folgende Schwierigkeiten bzw. Problemstellungen:

6.3.1. Untergrundfeuchte / – nässe

Bei trockenem und sauberem Untergrund liessen sich praktisch alle Produkte ohne grosse Probleme auftragen. Der Verbund Spritzabdichtung-Untergrund erreichte unter diesen Randbedingungen gute Haftzugwerte im Bereich über 1.2 N/mm². Bei vorhandenen Feucht- und Nässestellen kam es in Abhängigkeit vom verwendeten Produkt bereits bei der Applikation und unmittelbar danach zu Schwierigkeiten in Form von Ablösungen. Es musste hierbei zwischen den folgenden Arten von Wasserzutritten aus dem Gebirge unterschieden werden:

- Diffusion
- Feuchtstellen
- Tropfstellen
- fliessendes Bergwasser

Ein langsam aushärtendes System, unabhängig um welche Produktgruppe es sich dabei handelt, reagierte empfindlich auf Feuchtigkeitsnachfluss. Der aufgetragene Kunststoff konnte durch den Wasserzutritt nicht oder nicht vollständig aushärten. So wurde auch bei geringem Wassernachfluss die Spritzabdichtung vor Erhärten ausgewaschen und die Haftung auf dem Untergrund stark eingeschränkt. In den Fällen in denen entsprechende Drainagemassnahmen vor Applikation getroffen wurden, kam es zu keinerlei Beeinträchtigungen des Reaktions- und Aushärteprozesses der Spritzabdichtung.

6.3.2. Spritzschatten/ Fehlstellen

Bei einer Spritzbetonoberfläche mit grosser Rauftiefe (Bereich 6 bis 10 mm), können bei der Applikation der Spritzabdichtung Spritzschatten entstehen. Die Rauftiefe des Spritzbetons wird von den Parametern beeinflusst:

- Grösstkorn im Spritzbeton
- Spritzleistung
- Spritzwinkel - Untergrundebenheit

Je flacher der Winkel beim einseitigen Spritzen der Spritzabdichtung gewählt wurde, desto grösser waren die Spritzschatten (siehe Abb. 4). Eine hohe Anzahl von Fehlstellen je m² Spritzabdichtung waren so vorprogrammiert. Auf die Beurteilung dieser Fehlstellen wird im Kap. 7 näher eingegangen. Wurde während dem gleichen oder in einem späteren Arbeitsgang mindestens von einer zweiten Seite her gespritzt, konnten Spritzschatten verschlossen werden. Am geeignetsten erwies sich ein Spritzen unter verschiedenen Düsenwinkeln. Bei einer automatisierten Düsenführung kann dies mit der Eigenbewegung der Spritzdüse, ähnlich einem Spritzbetonauftrag, realisiert werden.

In anderen Fällen wurde zur Reduktion der Rauhtiefe des Spritzbetonuntergrundes eine Ausgleichsschicht mit Feinmörtel appliziert.

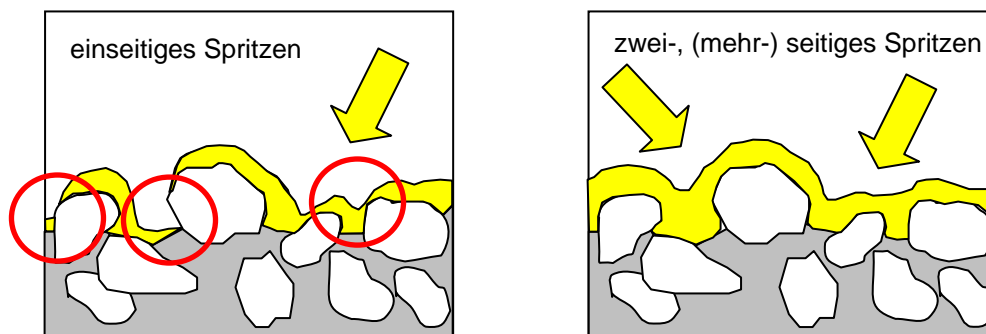


Abb. 4 Auswirkung bei einseitigem und mehrseitigem Spritzen (Darstellung jeweils bei einer Schicht). Mit Kreisen sind Spritzschattenbereiche markiert. Es wird hier eine optimale Viskosität und Oberflächenspannung angenommen, d.h. kein Verfließen und somit Gefahr von Minderstärken.

6.3.3. Kontrolle Schichtdicken und Materialverbrauch

Die Spritzabdichtungen wurden flächig aufgetragen. Eine minimale Überdeckung der einzelnen, vorstehenden Spritzbetonkörner konnte auch bei rauhem Untergrund wie z.B. mit 0 - 8 mm Zuschlägen erreicht werden. Dies bedingte einen Mehrauftrag in den Vertiefungen zwischen den Körnern. Je nach Produkt und dessen Haft- und Flieseigenschaft beim Auftragen resultierte daraus ein beträchtlicher Mehrverbrauch an Ausgangskomponenten der Spritzabdichtung, welcher bis zum Doppelten eines ausgeglätteten Untergrundes betragen hat. Eine zu dick aufgetragene Spritzabdichtung braucht, abhängig von der Produktgruppe, zudem beträchtlich länger zum Aushärten und neigte stellenweise zum Fließen oder Abtropfen (Foto 928/16, Beilage 1).

Tropfenbildung

Bei zu langsam eingestellter Reaktionsgeschwindigkeit der Spritzabdichtung oder auch zu dickem Schichtauftrag der Spritzabdichtung zeigt sich

insbesondere im Firstbereich eine Neigung zur Tropfenbildung (Foto 928/16, Beilage 1).

6.3.5. Arbeitsplatzhygiene / Gesundheitsgefährdung

In Abhängigkeit von

- der Toxizität der Ausgangsprodukte und deren Reaktionsgeschwindigkeit
- der Toxizität des Reaktionsproduktes und der eingesetzten Lösungsmittel

waren unterschiedliche Vorkehrungen zum Schutz des Applikateurs und der weiteren Mitarbeiter im Versuchsbereich erforderlich.

Bei ersten Anwendungsversuchen erfolgten die Arbeiten teilweise unter einer Vollmaske, die künstlich belüftet wurde.

Da eine solche Anwendung auf dem Markt kaum Akzeptanz gefunden hätte, erfolgten Weiterentwicklungen der Spritzabdichtungen, die diese aus arbeitshygienischer Sicht unbedenklich erscheinen lassen. Mit wasserlöslichen Systemen ist eine Verarbeitung der Spritzabdichtungen ohne spezielle Schutzmassnahmen möglich.

Neben dem Einfluss der oben genannten produktspezifischen Parameter, zeigte sich, dass auch die Verarbeitungstechnik die Arbeitsplatzhygiene massiv beeinflusst. Die Applikationsverfahren unterscheiden sich hinsichtlich:

- Druckluftverbrauch
- Spritzdruck bei der Applikation
- Tropfengrösse

Mit Applikationen im Niederdruckbereich wurden die geringsten Emissionen an Spritznebeln erreicht.

6.3.6. Herstellung der richtigen Mischung / Spritzbarkeit

Das Herstellen der richtigen Mischung bei Ein- resp. Mehrkomponentensystemen sowie deren richtige Viskosität für den Spritzvorgang, stellt bei allen Spritzabdichtungssystemen eine Fehlerquelle dar. Bei einer zu niedrigen Viskosität kam es zu oben beschriebenen unerwünschten Phänomenen wie Tropfenbildung. Bei einer zu hohen Viskosität wurden schlechtere Resultate betreffend der Dichtigkeit erreicht. In Extremfällen war das Produkt nicht verarbeitbar.

Die Viskosität wurde bei allen Produkten durch die Verarbeitungstemperatur und bei Mehrkomponentensystemen auch durch das Mischungsverhalten beeinflusst.

6.3.7. Klimaverhältnisse

Alle bisherigen Spritzabdichtungsanwendungen erfolgten bei Temperaturen von 15 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von > 70 %. Fels- und Wassertemperatur betragen einheitlich 12 °C. Über die Kontrolle der Lüftung wurden unterschiedliche klimatische Randbedingungen, insbesondere bezüglich der Luftfeuchtigkeit, eingestellt.

Die flüssig aufgetragenen Komponenten bzw. das Gemisch härten nach dem Auftrag aus. Dabei verdunstet je nach Spritzabdichtungssystem entweder das Lösungsmittel oder Wasser. Abhängig von der Tunnelbelüftung resp. der vor Ort herrschenden Luftfeuchtigkeit dauert dieser Prozess zwischen wenigen Minuten bis zu mehreren Tagen. Speziell bei Spritzabdichtungssystemen auf Wasserbasis kann Tropfwasser hinter der Abdichtung das Austrocknen der Spritzabdichtung beeinträchtigen oder im Extremfall vollständig verhindern.

Ebenso verzögerte sich die Aushärtung bei Spritzabdichtungssystemen auf Wasserbasis bei Mehrauftrag überproportional zur Schichtdicke.

6.4. Feststellungen bei eingebauter Abdichtung

6.4.1. Auswirkung von unzureichendem Haftverbund

Bei Spritzabdichtungen mit Haftverbund zum Untergrund wird in den Tunnel zufließendes Bergwasser in den rückwärtigen Sicherungs- und Felsbereich zurückgedrängt. Der mögliche Druckaufbau hängt unter anderem von den gegebenen Wegigkeiten ab.

Bei dem daraus entstehenden lokalen Wasserdruckaufbau hinter der Spritzabdichtung können sich durch unzureichende Verbundfestigkeiten Hinterläufigkeiten und Ablösungen ergeben.

Beim Versuch mit Epoxy-Bitumen (Nr. B-1, Tabelle 4) bildeten sich infolge des stetigen Wasserzuflusses und -druckes aus dem Wasserdrucksystem und sich stellenweise allmählich vom Untergrund ablösende Spritzabdichtung "Wassersäcke", welche schliesslich unter weiterem Wasserzufluss platzten. Eine beim Versuch eingebrachte dünne Spritzbetoninnenschale wurde abgesprengt. (Fotos 928/4,5 Beilage 1).

Ähnliche Phänomene wurden auch bei ausgeführten Bauwerken beobachtet (Tabelle 2). Die Innenschale wurde in einem zeitlichen Abstand zum

Spritzabdichtungsauftrag eingebaut. Bis dahin konnte durch Klüfte zum Tunnelhohlraum stetig zutropfendes oder fließendes Bergwasser die Spritzabdichtung lokal vom Untergrund ablösen und "Wassersäcke" bilden. Beim Einbringen der Innenschale brachte der Druck des Betons diese zum Platzen. Die Spritzabdichtung war dann ab diesem Zeitpunkt undicht.

Mit dem sich allmählichen aufbauenden Wasserdruck vergrößert sich die weitere Unterwanderungs- und Ablösegefahr bis zu einer Fehlstelle in der Spritzabdichtung bzw. bis die Reissfestigkeit der Spritzabdichtung überschritten wird (Abb. 5).

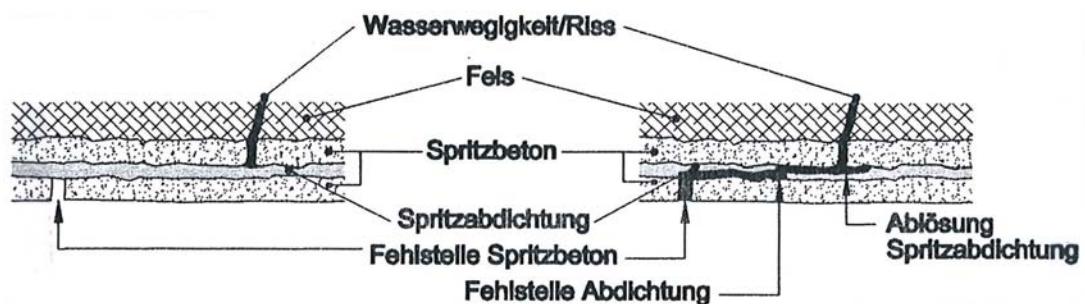


Abb. 5 Allmähliches Ablösen der Spritzabdichtung vom Untergrund bei mangelndem Verbund und drückendem Bergwasser.

Zur Reduktion des Druckes des anstehenden Wassers wurden teilweise punktuelle oder Flächendrainagen plaziert, mit denen das anstehende Wasser abgeleitet wurde. In all diesen Fällen wurden keine Ablösungen und Hinterläufigkeiten festgestellt.

Auf der linken Seite in Abbildung 5 ist ein Riss im Untergrundspritzbeton dargestellt. Bei gutem Haftverbund kann durch den Riss vordringendes Bergwasser nicht bis zu einer benachbarten Fehlstelle in der Spritzabdichtung vordringen.

Das System kann somit als dicht angesehen werden. Zwingende Voraussetzung ist in diesem Fall die dauerhafte Gewährleistung der Haftung. Entscheidend für die Dichtigkeit sind in diesem Fall ebenfalls die Permeabilitäten des Spritzbetons und der Spritzabdichtung.

Auf der rechten Seite der Abbildung 5 ist der Fall einer Undichtigkeit im System dargestellt. Bergwasser konnte infolge mangelhaftem Verbund unter der Spritzabdichtung bis zu einer Fehlstelle in der Spritzabdichtung vordringen und so zwischen Spritzbeton und Spritzabdichtung gelangen. Analoges gilt für den Fall, wenn ein Riss im Untergrund unmittelbar unter einer Fehlstelle in der Spritzabdichtung liegt. Solche Fälle können zu einer Leckage führen, wenn auch der Deckbeton an dieser Stelle eine Wasserwegigkeit aufweist.

6.4.2. Durchlässigkeit der Spritzabdichtung

Je nach verwendetem System kann selbst die ausgehärtete Spritzabdichtung eine deutliche Wasserdurchlässigkeit (Diffusion) aufweisen. Im Fall einer Kunststoffabdichtung auf Zementbasis kam es, (z.B. Tabelle 4, Versuch B-8) durch andauernden Wasserdruck im dahinterliegenden Wasserdrucksystem, an der Oberfläche auf der Luftseite der Spritzabdichtung zu fein verteilter Tropfenbildung.

6.4.3. Chemische Beständigkeit

Die chemische Beständigkeit von Spritzabdichtungen war bisher nicht Gegenstand von Untersuchungen im VersuchsStollen Hagerbach.

6.4.4. Wechselwirkungen mit anderen Baumaterialien

Bei einer Spritzabdichtungsanwendung im Zusammenhang mit Stahlankern wurden intensive Korrosionserscheinungen am Anker festgestellt. Nach gewissen Materialmodifikationen konnte dieser Effekt nicht mehr festgestellt werden. Weitere Wechselwirkungen z.B. zum Beton, wurden nicht untersucht.

6.4.5. Zusammenfassung der bisherigen Untersuchungs- und Beurteilungsergebnisse

In der Tabelle 5 sind die Beurteilungsergebnisse gemäss oben beschriebener Prüfungen und Untersuchungen und die in Kap. 6.1 aufgeführten Spritzabdichtungssysteme gegenüber gestellt. Die Beurteilungen beruhen auf den bisherigen Erkenntnissen im Vergleich zu herkömmlichen Abdichtungsbahnen. Die Beurteilungen und Signaturen sind in Tabelle 7 näher erläutert.

Tabelle der Spritzversuche im VSH mit Übersicht der Feststellungen

Eigen- schaft / System	Produktgruppe	Blasenbildung d. Wasserdrucks beim Abpressen	Spritzschatten/ Perforationen sichtbar	Schichtdicke [mm] mittlere; max.	Tropfenbildung der Spritzabd. beim Auftrag	Arbeitsplatzhygiene / Gesundheitsgefährd.	Umweltgefährdung der Ausgangsprodukte	Aufwand Mischungsherstellung; Spritzbarkeit	erford. Untergrundfeuchtig. (mind. Anforderung.)	Fähigkeit zu Rissüberbrückung d.	Auswirkung v. Fehlstellen a. Haftverbund u. Dichtigkeit	Durchlässigkeit Spritzabdichtung (drück. Berwasser)	Chem. Beständigkeit Mat. Spritzabdichtung
A - 1	RH	- ²	- ³	0.5	- ³	(-)	(-)	(+)-(0) ³	trocken	(-)	-	-	(+) ⁴
A - 2	RH	- ²	- ³	1.0	- ³	(-)	(-)	(+)-(0) ³	trocken	(-)	-	-	(+) ⁴
A - 3	RH	- ²	- ³	1.0	- ³	(+)	(-)	(+)-(0) ³	trocken	(-)	-	-	(+) ⁴
A - 4	Unbekannt	- ²	- ³	1.0; 2.0	- ³	(-)	(-)	(+)-(0) ³	trocken	(-)	-	-	(+) ⁴
A - 5	RH	- ²	- ³	1.0	- ³	(-)	(-)	(+)-(0) ³	trocken	⁷	-	-	(+) ⁴
A - 6	RH	- ²	- ³	1.0; 2.0	- ³	(+)	(-)	(+)-(0) ³	trocken	(-)	-	-	(+) ⁴
A - 7	RH	- ²	- ³	1.0	- ³	(+)	(-)	(+)-(0) ³	trocken	(+)	-	-	(+) ⁴
A - 8	RH	- ²	- ³	1.0; 3.0	- ³	(-)	(-)	(+)-(0) ³	trocken	(+)	-	-	(+) ⁴
A - 9	RH	- ²	- ³	1.0	- ³	(+)	(-)	(+)-(0) ³	trocken	(-)	-	-	(+) ⁴
A - 10	EM	- ²	- ³	1.0	- ³	(+)	(-)	(+)-(0) ³	trocken	(-)	-	-	(+) ⁴
A - 11		- ²	- ³	1.0	- ³	(+)	(-)	(+)-(0) ³	feucht o.k.	(+)	-	-	(+)

- : nicht durchgeführt
- 1.: Produkt lösungsmittelfrei
- 2.: keine Abpressversuche mit Wasser durchgeführt
- 3.: Auftrag mit Roller und Spachtel auf mit Feingunit ausgeglättetem Untergrund;
- 4.: Ohne Polyesterzusatz (sonst mangelnde Alkalibeständigkeit)

Kommentar zu den Eigenschaften und deren Bewertung ist in Tab. 7 beschrieben

Tabelle 5 Übersichtstabelle Feststellungen während und nach der Applikation der Spritzabdichtungssysteme gemäss Tabelle 3.



Eigen- schaft	System	Produktgruppe	Blasenbildung d. Wasserdrucks beim	Spritzschatten/ Perforationen sichtbar	Schichtdicke [mm] mittlere; max.	Tropfenbildung der Spritzabd. beim Auftrag	Arbeitsplatzhygiene / Gesundheitsgefährd.	Umweltgefährdung der Ausgangsprodukte	Aufwand Mischungsherstellung; Spritzbarkeit	erford. Untergrundfeuchtig. (mind. Anforderung.)	Fähigkeit zu Rissüberbrückung d.	Auswirkung v. Fehlstellen a. Haftverbund u. Dichtigkeit	Durchlässigkeit Spritzabdichtung (drück.	Chem. Beständigkeit Mat. Spritzabdichtung
	B - 1	EM	(-)	(0)	2-4; > 10	(-)	(0)	(-)	(+)-(0)	trocke n	(+)	(0)	(+)	(+)
	B - 2	RH	(+)	(+)-(0)	4-5; 8-10	(-)	(0)-(-)	(0)	(0)	trocke n	(+)	(+)-(0)	(+)	(+)
	B - 3	RH	-	(-) ⁵	3-4; 5	unbek.	(0)-(-)	(0)	(0)	trocke n	(+)	(+)-(0)	(-) ⁵	(+)
	B - 4	EM	(+)	(0)	1-2; 2	(+) ⁶	(+)	(+)	(-)	feucht	(+)	(0)	(+)	(0) -(0)
	B - 5	EM	-	(-)	2-4; 5-6	(+) ⁶	(+)	(+)	(-)	feucht	(0)	(0)	(+)	(0) -(0)
	B - 6	EM	(+)	(0)	2-4; 5-6	(+) ⁶	(+)	(+)	(-)	feucht	(0)	(0)	(+)	(0) -(0)
	B - 7	RH	(+)	(+)-(0)	unbe k.	unbek.	(0)-(-)	(0)	(0)	trocke n	(+)	(+)-(0)	(+)	(+)
	B - 8	HB	(+)	(+)	2-4;	(+)	(+)	unbek.	(+)-(0)	feucht	(-)	(+)	(-)	(+)
	B - 9	RH	-	(+)	2-3; 10	(+)-(0)	(0)-(-)	(0)	(0)	trocke n	(+)	(0)-(-)	(+)	(+)

- : nicht durchgeführt
- ⁵: Übungsuntergrund: Auftrag über Untergrund aufgehängtes Vlies
- ⁶: kein Tropfen, aber z.T. trichterförmige Mat.-anhäufungen um Spritzschatten-Loch, Ø ca. 1 bis 3 mm
- ⁷: nicht beurteilbar

Kommentar zu den Eigenschaften und deren Bewertung ist in Tab. 7 beschrieben

Tabelle 6 Übersichtstabelle Feststellung während und nach Applikation des Spritzabdichtungssystems gemäss Tabelle 4

Ein Kommentar zu den Eigenschaften und deren Bewertung ist in Tab. 7 beschrieben.



Eigenschaft	Kommentar und Bewertung
Blasenbildung (durch Wasserdruck beim Abpressen)	Neigung zur Blasenbildung = "Wassersäcken" bei Abpressen mit Wasser. Der Abdichtungsverbund reicht nicht aus, um das Wasser im Felsbereich zurückzudrängen. (+) = keine Blasenbildung ; (0) = leicht; (-) = Blasenbildung bis zum Platzen
Spritzschatten/ Perforationen sichtbar	Neigung zur Bildung von Spritzschatten während der Applikation. (+) = gering, d.h. Verfliessen und Umschliessen der Spritzbetonkörner; (0) = mittel; (-) = eher hoch.
Schichtdicke [mm] typisch - max.	Die Schichtdicke wurde im Bereich von Kernbohrungen resp. z.T. an Rändern der Versuchsfelder subjektiv ermittelt.
Tropfenbildung der Spritzabdichtung beim Auftrag	Neigung zu Tropfenbildung resp. Verfliessen nach Auftrag auf Untergrund bei Regeldicke von ca. 3-4 mm: (+) = gering; (0) = mittel; - (=) hoch
Arbeitsplatzhygiene / Gesundheitsgefährdung	(+) = Frei von organischen Lösungsmitteln (0) = geringer Gehalt von organischen Lösungsmitteln, bedingt starke Lüftung (-) = enthält organische Lösungsmittel, auch mit starker Lüftung vermutlich kein befriedigendes Resultat.
Umweltgefährdung der Ausgangsprodukte	(+) = Ausgangsstoffe grundwassergefährdend (0) = mittel; (-) = geringe resp. ohne Grundwassergefährdung
Aufwand Mischungsherstellung; Spritzbarkeit	Die Herstellung des richtigen Mischungsverhältnisses einer ein- oder zweikomponentigen Spritzabdichtung ist: (+) = einfach ; (0) = mittel; - (=) schwierig, d.h. kann auf der Baustelle Schwierigkeiten bereiten
erford. Untergrundeuchtigkeit (mind. Anford.)	feucht o.k.: Produkt kann auch auf feuchtem Untergrund aufgetragen werden (kein Wasserfilm oder fließendes Wasser)
Fähigkeit zu Rissüberbrückung d. Spritzabd.	(+) = gut ; (0) = mittel; (-) = gering, d.h. starres Verhalten,
Auswirkung v. Fehlstellen auf. Haftverbund u. Dichtigkeit	(+) = keine Auswirkung einer Fehlstelle ; (0) = geringe benachbarte Unterwanderung (ablösen); (-) = stark (ablösen vom Untergrund)
Durchlässigkeit Spritzabdichtung (drückendes Bergwasser)	(+) = gering ; (0) = mittel; (-) = eher hoch, (Tropfenbildung auf Innenseite während Druckversuch)
Chem. Beständigkeit Mat. Spritzabdichtung	(+) = hoch ; (0) = mittel; (-) = gering (z.B. verminderte Beständigkeit gegenüber dauerndem Alkalikontakt oder saurem Bergwasser)

Tabelle 7

Tabelle mit Kommentaren zur Bewertung in Tabelle 5 und 6.

7. Verbundverhalten Beton - Spritzabdichtung

Neben der Abdichtungsfunktion der Spritzabdichtung, die im vorherigen Kapitel beschrieben wurde, kann die Spritzabdichtung, die kraftschlüssig mit dem Untergrund und Innenausbau verbunden ist, auch die Tragfähigkeit des Ausbausystems beeinflussen. Die diesbezüglichen Einflussfaktoren werden im folgenden Kapitel dargestellt.

Jede vollflächige Abdichtung in einem Betongewölbe bewirkt eine Trennung oder Abminderung des Betonverbundes. Im Gegensatz zu einer monolithischen Verkleidung wird das Tragverhalten des Gewölbes durch die Trennschicht der Abdichtung verändert.

Mit den herkömmlichen, lose verlegten Dichtungsbahnen erfolgt praktisch eine vollständige Trennung im Betongewölbe, indem die Reibung zwischen den beiden Betonschalen stark reduziert und die Haftzugverbindung vollständig aufgehoben wird.

Bei einer Spritzabdichtung erfolgt eine Verzahnung im Korngrößen - Bereich der Betonschichten und zusätzlich eine Haftung zwischen Spritzabdichtung und Beton.

Die Belastung des Betongewölbes verursacht eine Beanspruchung der Spritzabdichtung. Damit die Abdichtung gegen Wasser gewährleistet bleibt, darf die Spritzabdichtung durch diese Belastungen nicht zerstört werden.

Mit der vorliegenden Modelluntersuchung wurde der Zusammenhang zwischen verschiedenen Spritzabdichtungseigenschaften und der Beanspruchung der Spritzabdichtung ermittelt.

Ein weiterer Aspekt bestand in der Untersuchung, in welchem Masse der Verbund der Spritzabdichtung mit dem Beton die Tragfähigkeit des 'Zweischalensystems' (Ausbruchsicherung – Verkleidung) beeinflusst.

Die Spritzabdichtungseigenschaften sind einerseits durch die Verbundfestigkeit zwischen Spritzabdichtung und Beton und andererseits durch die Festigkeitseigenschaften der Abdichtung selbst charakterisiert. Beide Eigenschaften sind im Modell durch eine Verbundfestigkeit simuliert, welche sich aus der 'Haftzugfestigkeit' σ_z (Zugfestigkeit), sowie der Scherfestigkeit, bestehend aus der 'Kohäsion' (c) und dem Reibungswinkel (ϕ) zusammensetzt.

Mit diesen theoretischen Überlegungen wird aufgezeigt, in welchem Ausmass bei der Verwendung von Spritzabdichtungssystemen andere Verhaltensweisen und Reaktionsmechanismen des Abdichtungssystems und des gesamten Ausbausystems bestehend aus Innen- und Aussengewölbe (Abb. 1) zu erwarten sind. Die Betrachtungen sind nicht abschliessend und

zeigen auf, in welchen Bereichen weitere Untersuchungen, weitere neue Erkenntnisse erwarten lassen.

7.1. Modellbildung

Die Untersuchungen erfolgen an FE-Modellen, die üblicherweise im Tunnelbau eingesetzt werden. Im folgenden werden die gewählten Spezifikationen des Modells näher erläutert.

Die Modellbildung beruht auf den Annahmen eines Tunnels mit grossem Querschnitt mit zwei Fahr- und einer Standspur. Es wird davon ausgegangen, dass in Zukunft vermehrt Tunnelbauwerke unter diesen Randbedingungen zu erstellen sind. Diese stellen sicherlich extreme Anforderungen an das Auskleidungssystem. Am ehesten sind aber unter solchen Bedingungen Einflüsse zu erkennen, die bei einem Tunnel mit kleinem Querschnitt, der sich praktisch starr verhält, nicht auftreten.

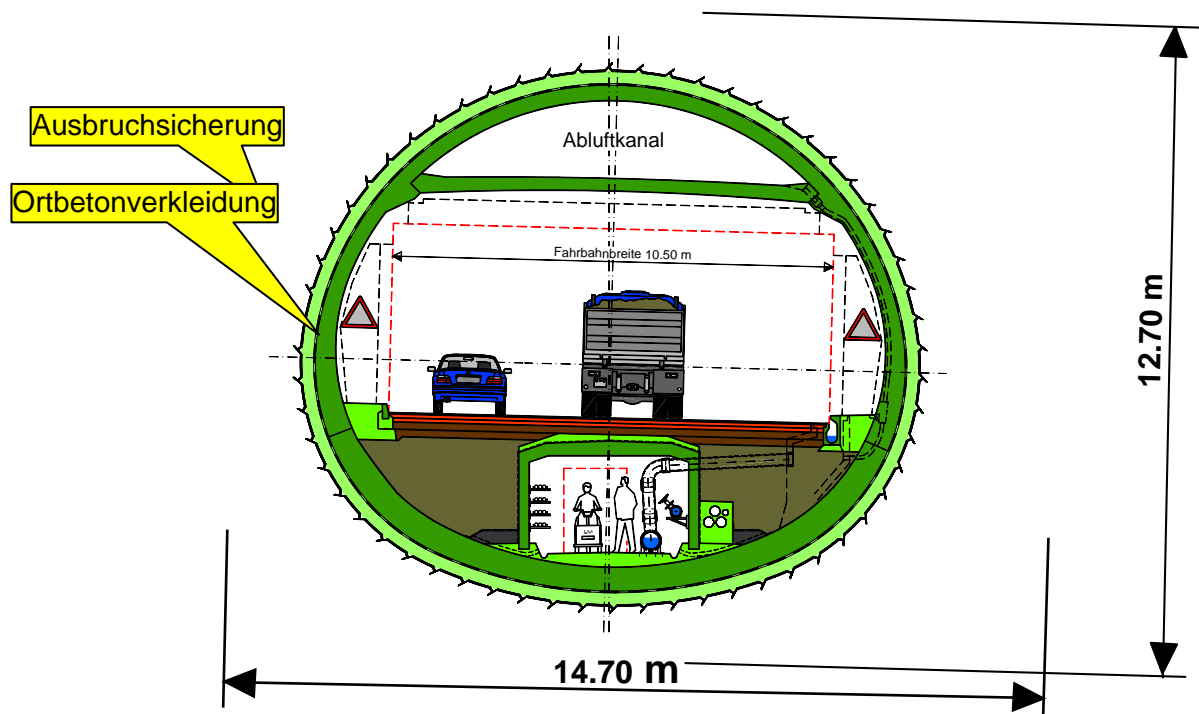


Abb. 6 Tunnelquerschnitt für Modellbildung

7.1.1. Profil und statisches System

Für die Modellbildung wurde ein Kreisprofil mit einem Durchmesser von 13.8 m (Ausbruchsquerschnitt) gewählt. Bedingt durch die Vertikal - Symmetrie von Geometrie und Belastung, muss nur eine Modellhälfte berechnet werden (Fig. 2, Beilage 2).

Das Gewölbe ist in den Paramenten im Gebirge eingebettet angenommen und wird im Firstbereich über einen Öffnungswinkel von 90° (45° im symmetrischen Modell) durch einen sog. Auflockerungsdruck belastet. Das Gewölbe ist im Firstbereich frei tragend und es besteht kein Verbund mit dem Fels. Im Modell sind daher die 'Felselemente' über dem First eliminiert worden.

Als Modell dient eine Scheibe im ebenen Verformungszustand mit einer Stärke von 1 m. Die Modellausdehnung senkrecht zur Scheibe, ist damit als 'unendlich' angenommen. Die Ausdehnung des Modells ist so gewählt, dass der Einfluss der Randbedingungen (Lagerungsbedingungen an den Scheibenrändern) auf die Berechnungsergebnisse vernachlässigt werden kann.

7.1.2. Gebirgskennwerte

Die Gebirgskennwerte sind in der folgenden Tabelle 8 zusammengestellt. Sie sind einem realen Tunnelprojekt entnommen.

	Elastizitätsmodul E. Mod.	Poissonzahl v	Kohäsion c	Reibung φ	Zugfestigkeit σ _z	Druckfestigkeit σ _d	Dichte γ	Dilatation Φ
	(kN/mm ²)		(N/mm ²)	(°)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(kN/m ³)	(°)
Gebirge	10	0.2	7.32	38.0	0	30.02	2.7	10

Tabelle 8: Materialkennwerte für das Gebirge. (Für alle Berechnungen gleich)

7.1.3. Belastung

Die Belastung wurde als Auflockerungsdruck auf den frei tragenden Gewölbebereich im First in die Berechnungen eingesetzt und entspricht einer Auflockerungstiefe von 13.8 m. Daraus resultiert eine Vertikalbelastung von 0.383 N/mm² bzw. 38.3 t/m². Infolge der Kreisgeometrie und dem gewählten Seitendruckbeiwert $\lambda = 0.4$ entsteht aus diesem Auflockerungsdruck auch eine horizontale Belastungskomponente, welche in Fig. 3 durch die Schrägstellung der Belastungsvektoren im seitlichen Kämpferbereich erkennbar ist.

Die Belastung durch den gesamten Auflockerungsdruck erfolgt auf das System Spritzbetongewölbe und Verkleidung, d.h. die Belastung wirkt theoretisch erst nach Fertigstellung der Verkleidung.

Dieses Belastungsszenario ist dann realistisch, wenn sich die Auflockerung beispielsweise erst nach dem Versagen der Felsanker der Ausbruchsicherung, d.h. nach einer längeren Zeit, bilden kann.

7.1.4. Ausbruchsicherung und Verkleidung

Für den zweischaligen Ausbau wurde ein 35 cm starkes Spritzbetongewölbe als Ausbruchsicherung und ein 55 cm starkes Innengewölbe für die Verkleidung gewählt. Die Verkleidung kann aus Ortbeton oder aus mehreren Lagen von Spritzbeton erstellt werden. Im Modell wurden für die Verkleidung die Materialkennwerte von Ortbeton eingesetzt. Die Simulation der Spritzbetonschicht für die Ausbruchsicherung erfolgte mit 4 Lagen von Kontinuumselementen und die Verkleidung wurde mittels Balkenelementen mit einer Stärke von 55 cm modelliert.

Im Bereich der Einbettung des Ausbaus im Gebirge, ist sowohl für das Spritzbetongewölbe, wie auch für die Verkleidung angenommen, dass sie infolge der Belastung durch den Auflockerungsdruck nicht zerstört werden und, dass sie sich rein elastisch verhalten.

Im Firstbereich mit der Belastung durch den Auflockerungsdruck ist angenommen, dass der Spritzbeton teilweise zerstört ist und damit eine reduzierte Tragfähigkeit besitzt. Eine solche Zerstörung kann im Laufe der Zeit, d.h. bis zur Bildung des Auflockerungsdruckes (Kap. 7.1.3) erfolgen, wenn der Spritzbeton beispielsweise aggressivem Wasser ausgesetzt ist. Die Zerstörung bewirkt eine Reduktion der Tragfähigkeit des Spritzbetongewölbes, was in den Berechnungen durch eine Verringerung des Spritzbeton - Elastizitätsmoduls im Firstbereich auf $E. Mod. = 0.1 \text{ kN/mm}^2$ simuliert wurde. Zusätzlich wurde ein elastisch-idealplastisches Verhalten der Spritzbetonverkleidung im Firstbereich angenommen.

Die Materialeigenschaften für den Fels, das Spritzbetongewölbe und die Verkleidung sind in Tabelle 9 zusammengestellt.

	Stärke d	Elastizitätsmodul E-Modul	Poissonzahl ν	Kohäsion c	Reibung ϕ	Zugfestigkeit σ_z	Druckfestigkeit σ_d	Dichte γ	Dilatation ϕ
	(cm)	(kN/mm ²)		(N/mm ²)	(°)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(kN/m ³)	(°)
Spritzbeton Firstbereich	35	0.1	0.3	0.05	30'	0	0.17	2.5	0
Spritzbeton Einbettung	35	10	0.2	elastisch				2.5	
Verkleidung	55	30.83	0.2	elastisch				2.5	

Tabelle 9: Materialkennwerte für das Spritzbetongewölbe und die Verkleidung (für alle Berechnungen gleich).

7.1.5. Spritzabdichtung

Die Spritzabdichtung wurde im Berechnungsmodell durch ein sogenanntes Interface simuliert. Mit dem Interface werden sowohl die Festigkeitseigenschaften der Spritzabdichtung selbst, wie auch diejenigen der Verbindung Spritzabdichtung – Beton kombiniert simuliert. In den Modellberechnungen ist somit der kleinere der beiden Werte berücksichtigt. Unter der Annahme, dass die Zugfestigkeitseigenschaften des Verbundes Spritzabdichtung – Beton geringer sind, als diejenigen der Spritzabdichtung selbst, wird im folgenden die Festigkeitseigenschaft der Spritzabdichtung generell als Verbundfestigkeit bezeichnet. Die Verbundfestigkeit setzt sich zusammen aus der Scherfestigkeit und der Haftzugfestigkeit σ_z . Die Scherfestigkeit ist durch die Kohäsion c und den Reibungswinkel ϕ definiert.

Dem Interface werden folgende Materialkennwerte zugewiesen:

- Normalsteifigkeit (S_n)
- Schersteifigkeit (s_s)
- Kohäsion (c)
- Reibungswinkel (ϕ)
- Zug- bzw. Haftzugfestigkeit (σ_z)

Mit diesen Materialkennwerten wird ein elastisch – idealplastisches Stoffgesetz für das Scherverhalten gem. Abb. 7 simuliert. Die Haftzugfestigkeit σ_z des Interface wird im Falle einer Festigkeitsüberschreitung automatisch auf null gesetzt, d.h. es besteht keine 'Zugverbindung' mehr zwischen Beton und Spritzabdichtung bzw. zwischen dem Spritzbetongewölbe und der Verkleidung.

Der Einfluss der Verbundfestigkeit der Spritzabdichtung wurde durch eine Parameteranalyse mit Variation der Haftzugfestigkeit σ_z , sowie der Kohäsion c des Interface untersucht. Mit den verschiedenen Werten für die Kohäsion c wurde der nicht lineare bzw. plastische Anteil des Scherwiderstandes variiert. Um zu verhindern, dass sich die Druckspannung im Interface (Druckspannung zwischen dem Spritzbetongewölbe und der Verkleidung) unrealistisch günstig auf den Scherwiderstand auswirkt, wurde für alle Berechnungen ein geringer Reibungswinkel $\phi = 5^\circ$ im Modell eingesetzt.

Für die Parameteranalyse wurden die Werte gem. Tabelle 10 eingesetzt.

Materialkennwerte der Spritzabdichtung für die Parameteranalyse			
1)	Reibungswinkel	Kohäsion	Haftzugfestigkeit
	ϕ	c	σ_z
	(°)	(N/mm ²)	(N/mm ²)
Berechnung			
ZG	Betonverbindung zwischen		
Z1	5	2.0	1.0
Z05	5	1.0	0.5
Z015	5	0.5	0.25
Z01	5	0.2	0.1
Z00	5	0	0

Tabelle 10: Kennwerte der Spritzabdichtung für die Parameteranalyse

1) Mit den Bezeichnungen Z1, Z05, usw. werden die dargestellten Parameterkombinationen als Funktion der Haftzugfestigkeit beschrieben, auf die auch im weiteren Text Bezug genommen wird.

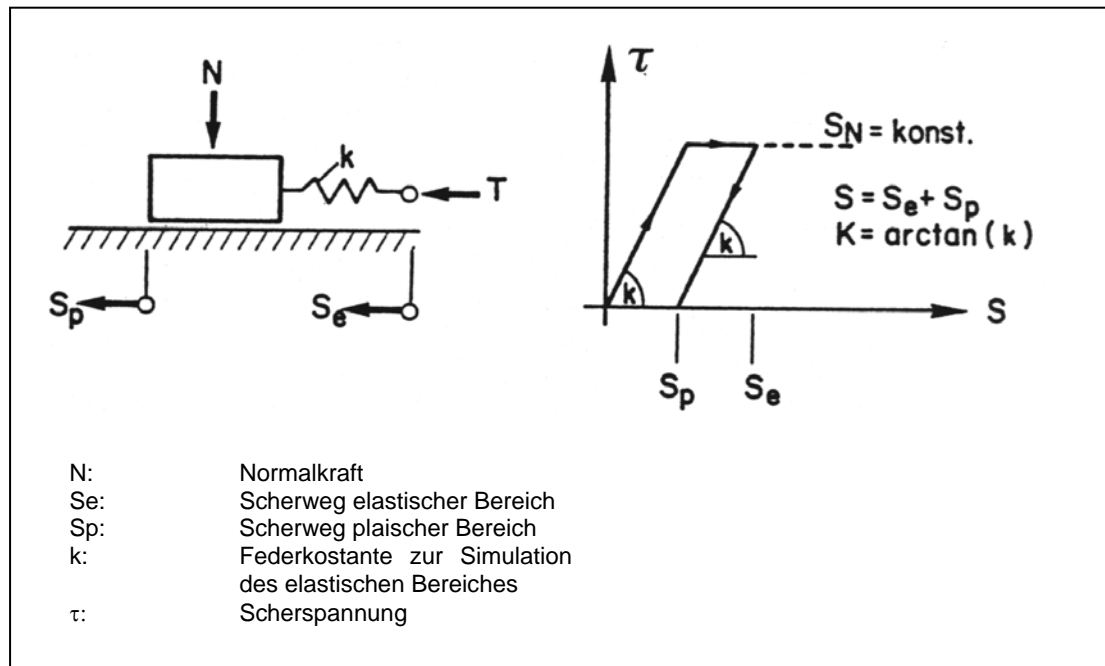


Abb. 7 Systemskizze des elastisch – idealplastischen Stoffgesetzes für das Interface zur Simulation der Spritzabdichtung.

7.1.6. Berechnungsverfahren

Die Berechnung erfolgte mit einem 2-dimensionalen Kontinuumsmodell. Als Programm wurde FLAC (Fast Lagrangian Analyses of Continua) benutzt, welches die "Finite Difference Method" verwendet. Es handelt sich dabei um ein weltweit anerkanntes Programm in der Geotechnik.

7.2. Berechnungsergebnisse

7.2.1. Beanspruchung der Spritzabdichtung

Die Ergebnisse sollen für den gewählten Modellfall die Beanspruchung der Spritzabdichtung zeigen, sowie eine Abschätzung erlauben, welche für Haftzugfestigkeit σ_z und Kohäsion c der Spritzabdichtung erforderlich sind, um deren Beschädigung oder Zerstörung zu vermeiden. Massgebende Eigenschaften der Spritzabdichtung sind dabei deren Dehnungsvermögen bzw. deren Belastbarkeit durch Druck- (Normal-) und Scherkräfte. Die relevanten Berechnungsergebnisse für die Spritzabdichtung sind daher folgende Größen:

- die relative Scherverschiebung
- die Scherspannung
- die relative Kompression (Zusammendrückung)
- die Druckspannung

Diese Berechnungsergebnisse sind in Tabelle 11 zusammengestellt und zeigen die Beanspruchung der Spritzabdichtung.

Ergebnisse der Parameteranalyse für verschiedene Haftzugfestigkeiten und Kohäsion der Spritzabdichtung						
Spritzabdichtungen - Eigenschaften						
Kohäsion c	(N/mm ²)	2.00	1.00	0.50	0.20	0.00
Haftzugfestigkeit σ_z	(N/mm ²)	1.00	0.50	0.25	0.10	0.00
Reibungswinkel ϕ	(°)	5	5	5	5	5
Berechnungsergebnisse						
Rel. Scherverschiebung	(mm)	0.0015	0.0015	0.0394	0.6200	4.9540
Scherspannung	(N/mm ²)	0.7508	0.7508	0.4406	0.2050	0.0340
Rel. Kompression	(mm)	0.0015	0.0015	0.0013	0.0009	0.0097
Druckspannung	(N/mm ²)	0.7558	0.7558	0.6689	0.4507	0.4580
Abs. Scherverschiebung	(mm)	0.9301	0.9301	0.9359	1.3310	7.0090
Abs. Normalverschiebung	(mm)	3.1750	3.1750	3.1940	4.0960	7.0490

Tabelle 11 Berechnungsergebnisse der Parameteranalyse mit verschiedenen Spritzabdichtungen - Eigenschaften (Haftzugfestigkeit σ_z , Kohäsion c)

Der für alle Berechnungen geringe Reibungswinkel von 5° wurde gewählt, um die maximalen Werte für die Belastung der Spritzabdichtung (relative Scherverschiebung, Scherspannung, Kompression und Druckspannung) zu ermitteln.

Im folgenden wird für die Eigenschaft der Spritzabdichtung bzw. für den Berechnungsfall nur die Haftzugfestigkeit σ_z der Spritzabdichtung angegeben (Tabelle 11).

In Fig. 4 und Fig. 5 in der Beilage 2, sind die Deformationen bzw. die Schnittkräfte in der Verkleidung für eine Haftzugfestigkeit σ_z der Spritzabdichtung von 1 N/mm² dargestellt. Im Bereich der Einbettung des Gewölbes im Fels nehmen diese Grössen für die angenommene Belastung sehr schnell ab.

Für die Fälle Z01 und Z1 N/mm² mit Zugfestigkeiten σ_z der Spritzabdichtung von 1.0 bzw. 0.1 N/mm² sind die relativen Scherverschiebungen, die Kompression sowie Scherspannung und Druckspannung in den Figuren 6 - 13, Beilage 2, abgebildet.

Die Druckspannung und die Kompression in der Spritzabdichtung wird für $\sigma_z = 1.0$ und 0.1 N/mm^2 im Bereich der Einbettung des Gewölbes im Gebirge kontinuierlich abgebaut (Fig. 6, 8, 10 und 12, Beilage 2).

Die Maximalwerte der Scherspannung und der Scherbewegung in der Spritzabdichtung, bilden sich im Übergang des frei tragenden Firstgewölbes in den, in den Fels eingebetteten Gewölbebereich. Die relativen Scherbewegungen werden im eingebetteten Bereich für $\sigma_z = 1.0 \text{ N/mm}^2$ kontinuierlich abgebaut (Fig. 7, Beilage 2). Analog reduziert sich für $\sigma_z = 0.1 \text{ N/mm}^2$ die Scherverschiebung in diesem Gewölbebereich (Fig. 11, Beilage 2), während hier die Scherspannung im Paramentbereich des Gewölbes konstant bleibt und erst im Sohlbereich reduziert wird (Fig. 13, Beilage 2).

Die relative Scherbewegung für eine Zugfestigkeit σ_z der Spritzabdichtung von 1.0 N/mm^2 beträgt 0.1 mm (Fig. 7, Beilage 2) und für $\sigma_z = 0.1 \text{ N/mm}^2$ erhöht sich dieser Wert auf 0.61 mm (Fig. 11, Beilage 2).

Für Haftzugfestigkeiten σ_z der Spritzabdichtung zwischen 0 bis 0.25 N/mm^2 erfolgt eine Reduktion der relativen Scherbewegung der Spritzabdichtung von 5 mm auf 0.04 mm (Fig. 17 und Tabelle 9, Beilage 2).

Die Kompression der Spritzabdichtung nimmt im Bereich der Haftzugfestigkeit zwischen 0 und 0.1 N/mm^2 von 0.01 auf 0.001 mm ab und bleibt für $\sigma_z = 0.1$ und 1 N/mm^2 im Bereich von 0.001 bis 0.002 mm konstant (Fig. 15, Beilage 2).

Die Normal- und Scherspannung in der Spritzabdichtung steigt im Bereich von $\sigma_z = 0 - 0.5 \text{ N/mm}^2$ von 0.45 auf 0.76 N/mm^2 (Fig. 14) bzw. von 0 auf 0.75 N/mm^2 (Fig. 16, Beilage 2).

7.2.2. Beanspruchungen des Spritzbetongewölbes und der Verkleidung

Ein weiterer Aspekt der Verbundwirkung ist deren Einfluss auf die Trageigenschaften des Ausbaus, bestehend aus dem Spritzbetongewölbe der Ausbruchsicherung und der Verkleidung.

7.2.2.1. Spannungen im Spritzbetongewölbe

Bei der Beurteilung der Spannungen im Spritzbetongewölbe ist zu beachten, dass dessen Steifigkeit infolge des reduzierten E-Moduls gering ist. Bei der Belastung des Verbundsystems Spritzbetongewölbe – Verkleidung übernimmt die steifere Verkleidung den Hauptanteil der Belastung. Die Randspannungen σ_{\min} und σ_{\max} im Spritzbetongewölbe (Fig. 18, Beilage 2) sind dementsprechend gering. σ_{\min} und σ_{\max} sind etwa gleich gross und

bleiben für die Haftzugfestigkeit der Spritzabdichtung $\sigma_z > 0.1 \text{ N/mm}^2$ bei einem Wert von ca. 0.17 N/mm^2 konstant.

7.2.2.2. **Schnittkräfte und Spannungen in der Verkleidung**

Im Bereich der Haftzugfestigkeit der Spritzabdichtung σ_z zwischen 0 und 0.25 erfolgt eine geringe Zunahme der Normalkraft N von 2087 auf 2200 kN . Für $\sigma_z > 0.25$ bleibt N mit 2200 kN etwa konstant (Fig. 19, Beilage 2).

Im Bereich der Haftzugfestigkeit der Spritzabdichtung σ_z zwischen 0 und 0.25 erfolgt eine Abnahme des Biegemomentes M von ca. 275 auf 134 mkN . Für $\sigma_z > 0.25$ bleibt M mit 134 mkN etwa konstant (Fig. 20, Beilage 2).

Die Randspannungen im Scheitelpunkt der Verkleidungen in Funktion von σ_z sind in Fig. 21, Beilage 2 dargestellt. Die Randspannung σ_{\min} auf der Tunnelseite der Verkleidung steigt im Bereich von σ_z zwischen 0 und 0.25 von -1.65 N/mm^2 (Zugspannung) auf 1.3 N/mm^2 (Druckspannung), was auf die Momenten - Reduktion im gleichen σ_z - Bereich (Fig. 2, Beilage 2) zurückzuführen ist.

7.2.3. **Schlussfolgerung aus den Modellrechnungen**

Mit den für die Untersuchung getroffenen Modellannahmen (Kap. 7.1) können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Bei einer Haftzugfestigkeit von $\sigma_z = 0 \text{ N/mm}^2$ und Kohäsion von $c = 0 \text{ N/mm}^2$, entsprechend den Verhältnissen einer lose verlegten Kunststoffdichtungsbahn, entsteht eine maximale relative Scherbewegung in der Abdichtung von 5 mm .
- Mit einer Haftzugfestigkeit von $\sigma_z = 0.25 \text{ N/mm}^2$ wird die relative Scherbewegung in der Spritzabdichtung bereits auf 0.039 mm reduziert.
- Die maximalen Scher- und Druckspannungen liegen bei ca. 0.75 N/mm^2 , und werden für Haftzugfestigkeiten $> \text{ca. } 0.4 \text{ N/mm}^2$ erreicht.
- Mit einer Haftzugfestigkeit der Spritzabdichtung von $\sigma_z = 0.4 \text{ N/mm}^2$ und einer Kohäsion $c = 0.8 \text{ N/mm}^2$ würde die Spritzabdichtung höchstwahrscheinlich weder infolge Belastung, noch infolge Deformationen beschädigt werden.
- Die Spannungen im Spritzbetongewölbe sind infolge der hohen Steifigkeit der Verkleidung gering. Dabei ist auch das geringere angenommene Elastizitätsmodul für den Spritzbeton zu berücksichtigen (Tabelle 6).



- Das Biegemoment M in der Verkleidung wird im σ_z – Bereich von 0 bis 0.25 N/mm^2 stark reduziert (Fig. 20, Beilage 2) und verhindert die Bildung von Zugrandspannungen σ_{\min} auf der Innenseite der Verkleidung im Scheitelpunkt der Verkleidung (Fig. 21, Beilage 2).
- Der Verbund von Spritzbetongewölbe und Verkleidung durch die Spritzabdichtung bewirkt für diesen Modellfall generell eine Reduktion der Randspannungen und kann die Bildung von Zugspannungen auf der Innenseite der Verkleidung verhindern. Da die Auskleidung in diesem Fall keine Zugkräfte aufnehmen muss, kann sie entsprechend schlanker dimensioniert werden. Allenfalls kann der Armierungsgehalt und die Betonstärke reduziert werden. Detailberechnungen müssen für jeden Einzelfall, mit den effektiven Gewölbedicken, das Einsparpotenzial ermitteln.

7.3. Hinweise aus den statischen Modellrechnungen

Die mechanischen Eigenschaften der Spritzabdichtung und die verbundmechanischen Eigenschaften der Verbindung zwischen Spritzabdichtung und Beton sind noch zu wenig erforscht.

Damit über die Modellrechnungen eine umfangreichere Beurteilung der Beanspruchung der Spritzabdichtung und deren Einfluss auf das Tragverhalten des Gewölbes erfolgen kann, schlagen wir folgende zusätzliche Untersuchungen vor:

- Laborversuche für die Bestimmung der verbundmechanischen Eigenschaften der Spritzabdichtung mit dem Beton. Daraus lassen sich gesicherte Stoffgesetze für das Interface zur Simulation der Spritzabdichtung ableiten.
- Weitere Modelluntersuchungen für die Bestimmung folgender Einflüsse:
 - Geometrische Unstetigkeiten im Spritzbetongewölbe
 - Tunnelgeometrie
 - Verhältnis der Stärken von Spritzbetongewölbe und Verkleidung
 - Langzeitverhalten des Spritzbetongewölbes (Zerstörung und entsprechende Reduktion der Festigkeitseigenschaften)
 - Langzeitverhalten der Spritzabdichtung
 - Einfluss der verbundmechanischen Eigenschaften auf das Tragverhalten von Verbundsystemen für den Ausbau, insbesondere für einschalige Systeme.
 - Beanspruchung der Spritzabdichtung bei unterschiedlichen Gefährdungsbildern bzw. deren Belastungen, wie beispielsweise druckhaftes Gebirge.

Insbesondere dem Einfluss der geometrischen Unstetigkeiten ist eine hohe Bedeutung zuzumessen, da diese Unstetigkeiten auch den Schichtdickenauftrag beeinflussen. An vorstehenden Unstetigkeiten werden vorgefertigte Kunststoffdichtungsbahnen die geringste Dicke und in Vertiefungen höhere Stärken aufweisen. Dieser unterschiedliche Schichtdickenaufbau steht in direkter Wechselwirkung mit den einwirkenden Belastungen, und ist daher für die Beurteilung des Systems von mitentscheidender Bedeutung.

8. Anforderungen an Spritzabdichtungssysteme

Ausgehend von den bisherigen Praxiserfahrungen (Kap. 5) und den theoretischen Überlegungen zur Beeinflussung des Verbundverhaltens von Spritzabdichtung und Ausbau (Kap. 6) werden im folgenden Anforderungen an Spritzabdichtungen definiert. Dabei wird unterschieden in Anforderungen

- während der Verarbeitung
- im eingebauten Zustand

Zunächst werden die Anforderungen themenweise diskutiert und im Kapitel 7.3 tabellarisch zusammengefasst

8.1. Anforderungen zum Verarbeitungsprozess

8.1.1. Viskosität / Verlaufen

Die Anforderungen an eine Spritzabdichtung betreffend die Viskosität sind gegensätzlich. Zur Erzielung einer optimalen Förderbarkeit in den Applikationseinrichtungen sind niedrige Viskositäten erforderlich. Um ein Abtropfen zu verhindern, sind im applizierten Zustand hohe Viskositäten erforderlich. Gegenstand der folgenden Betrachtungen ist nur die Viskosität im applizierten Zustand.

Neben den Materialverlusten und der Verunreinigung des Sohlbereiches führt die Tropfenbildung auch zu extremen Inhomogenitäten in der Schichtdicke des applizierten Materials. Im Bereich des entstehenden Tropfens erfolgt eine Materialanreicherung zu Lasten der umliegenden Bereiche. Daher sind Tropfenbildungen, auch nur ansatzweise, unerwünscht.

Bei einer hohen Reaktionsgeschwindigkeit (siehe Kap 7.1.2) wird sich die Viskosität der applizierten Spritzabdichtung schnell erhöhen und damit die Tropfenbildung verhindert.

Aufgrund der vielfältigen Wechselwirkungen zwischen Viskosität und Reaktionsgeschwindigkeit kann die Anforderung an die Viskosität nur allgemein formuliert werden.

Anforderung:

Die Spritzabdichtung darf unmittelbar nach Auftrag bis zur Erreichung der Endschichtstärke - welche prinzipbedingt über dem zu erzielenden durchschnittlichen Wert liegen - nicht zu Tropfenbildung neigen.

8.1.2. Reaktionsverhalten

Das Reaktionsverhalten der Spritzabdichtungen wird in Abhängigkeit vom Materialtyp von folgenden Faktoren bestimmt:

- Umgebungstemperaturen
- Luftfeuchtigkeit
- Luftbewegung
- Untergrundfeuchtigkeit

Der Lieferant der Spritzabdichtungen hat die klimatischen Bedingungen zu definieren unter denen die Produkte noch angewendet werden können. Es muss angegeben werden, welche Auswirkungen das nicht Einhalten der vorgegebenen Randbedingungen auf die Qualität des Endproduktes hat bzw. haben kann.

Bei Mehrkomponentensystemen kann das Reaktionsverhalten durch Wahl des Mischungsverhältnisses angepasst werden. In diesem Fall ist jedoch eine Kontrolle der effektiv gewählten Mischverhältnisse erforderlich.

Anforderung:

Schnelles Reaktionsverhalten muss unabhängig von den Umgebungsbedingungen (Temp., Feuchte, etc.) erreicht werden, damit die Anforderungen unter dem Stichwort Viskosität erfüllt werden können.

8.1.3. Schichtdickenkontrolle

Im Gegensatz zu vorgefabrizierten Kunststoffdichtungsbahnen ergibt sich die Schichtdicke der Spritzabdichtung durch den Applikationsprozess.

Die Kontrolle der effektiven Schichtdicke am Objekt ist bis heute nicht zufriedenstellend gelöst.

Bei den bisher ausgeführten Versuchsarbeiten zielt ein Lösungsansatz auf einen zweimaligen Auftrag mit unterschiedlich gefärbtem Material. In dem Moment, in dem der Untergrund vollständig gedeckt ist, wird davon

ausgegangen, dass eine minimale Schichtstärke appliziert wurde. Diese wiederum ist abhängig von der Viskosität und den Oberflächenspannungen im flüssigen Abdichtungsmaterial.

Für Anwendungen auf grossen Flächen ist ein gleichmässiger Auftrag der Spritzabdichtung über den gesamten Tunnelquerschnitt erforderlich. Im First- und Paramentbereich muss auf grossen Flächen die gleiche Schichtdicke garantiert werden können. Kleinräumig ist eine saubere Überdeckung und Umschliessung von Untergrundrauigkeiten wie z.B. vorstehenden Spritzbetonkörnern notwendig.

Die effizienteste und flächendeckendste Kontrolle kann mit einem automatisierten Spritzsystem erreicht werden, bei dem die Spritzbewegung vorprogrammiert und der Materialverbrauch kontinuierlich erfasst wird. Mit Stichprobenkontrollen, bei denen an ausgewählten Stellen Nachmessungen der Schichtstärke erfolgen, kann mit hoher Wahrscheinlichkeit eine minimale Schichtstärke der Spritzabdichtung gewährleistet werden.

Voraussetzung für die Anwendbarkeit dieses Beurteilungsverfahrens ist eine gleichmässige Oberflächenstruktur des Untergrundes. Alternativ kann die Beurteilung auch auf Basis des Untergrundes mit der grössten Rauigkeit erfolgen. Allerdings wird in diesem Fall in den übrigen Bereichen eine zu grosse Materialstärke aufgebracht, die aus wirtschaftlichen Überlegungen unerwünscht ist.

Die Definition einer erforderlichen Mindestschichtstärke erfolgt unter dem entsprechenden Kapitel (Kap. 8.2.1) der Prüfungen im eingebauten Zustand, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass sich durch Reaktions- oder Austrocknungsprozesse die Schichtstärke noch verändert.

8.1.4. Arbeitsplatzhygiene

Einige Spritzabdichtungssysteme verursachen bei der Applikation und dem Abbindevorgang, Ausdünstungen von gesundheitsgefährdenden Lösungsmitteln, wie z.B. Aerosole von Epoxidharzen und -härtner. Bei Polyurethanen sind dies beim Härter z.B. Isocyanat und bei Epoxidharzen die Aminhärtnernebel. Neben der Reizung der Atemwege können auch Hauterkrankungen bei direktem Kontakt auftreten.

In allen Bereichen der Tunnelbaustelle muss die Einhaltung der einschlägigen Arbeitssicherheitsvorschriften wie z.B. MAK-Werte gewährleistet werden. Dies gilt auch für die Arbeitsbereiche, die in der Abluftrichtung der Spritzabdichtungsbaustelle liegen. Die Zusammensetzung der Spritznebel und die Stoffe deren Grenzwerteinhaltung zu kontrollieren sind, müssen durch den Lieferanten vorgängig angegeben werden.

Neben der Anpassung und dauernden Überwachung der Baulüftung, kann die Gesundheitsgefährdung des Personals im Applikationsbereich zusätzlich mit dem Tragen von Schutzmasken und Schutzkleidern reduziert werden.

Anforderungen:

Die einschlägigen Vorschriften (MAK-Werte, SUVA Arbeitshygienische Grenzwerte) sind einzuhalten.

8.1.5. Umweltverträglichkeit

Zu unterscheiden ist eine mögliche Umweltgefährdung durch die Komponenten einer noch nicht applizierten resp. der noch nicht erhärteten Spritzabdichtung und, durch die bereits gespritzten Abdichtung.

Die einzelnen Komponenten müssen auslaufsicher auf der Baustelle gehandhabt und gelagert werden. Ein Kontakt der Komponenten mit dem Tunnelwasser ist zu vermeiden.

Havariefälle mit nicht abgeordneten Spritzabdichtungskomponenten oder Gemischen sind bei der Auslegung des Wasserrückhalte- und Aufbereitungssystems der Baustelle entsprechend zu berücksichtigen.

Das Auslaugverhalten, wassergefährdender Stoffe, der applizierten und bereits erhärteten Abdichtung ist zu überprüfen.

Die Reinigung der Geräte ist meistens unmittelbar nach deren Einsatz erforderlich. Die dazu nötigen Reinigungsmittel sind entsprechend ihrer Toxizität zu handhaben.

Anforderungen:

Geringes Umweltgefährdungspotential durch die Ausgangs- oder erhärteten Komponenten des Abdichtungssystems resp. deren Ausdünstungen. Die einschlägigen Vorschriften, die teilweise mit den Vorschriften bezüglich der Arbeitsplatzhygiene korrespondieren, sind einzuhalten.

8.1.6. Deklarationspflicht

In engem Zusammenhang mit Fragen der Arbeitshygiene und Umweltverträglichkeit, aber auch zur Gewährleistung einer zweckmässigen Materialverarbeitung, sind die folgenden Angaben auf jedem Gebinde zu deklarieren:

- Verfalldatum
- Giftklasse
- Lagerbedingungen
- Produktionschargennummer, die rückverfolgbar sein muss

8.1.7. Untergrundeigenschaften

An den Untergrund sind folgende Anforderungen zu stellen:

Sauberkeit

- Schmutz resp. lose Partikel müssen vorgängig entfernt werden, damit eine ausreichende Haftung auf dem Untergrund sichergestellt wird. In den ausgeführten Versuchen hat sich immer wieder gezeigt, dass eine unzureichende Reinigung zu unbefriedigenden Haftzugwerten führt (Kap 5.2.4.1).

Rauhigkeit

- Grundsätzlich hat man bei allen Spritzbetonuntergrundflächen (Versuche wurden bis 8 mm Grösstkorn ausgeführt) eine geschlossene Abdichtungsschicht auftragen können. Mit zunehmender Rauhigkeit stieg die durchschnittliche Schichtstärke und damit der Materialverbrauch an. Die Rauhigkeit des Untergrundes sollte daher möglichst gering sein, um den Materialverbrauch sowie die Gefahr von Spritzporenbildung zu reduzieren. Eine Spritzbetonoberfläche 0 - 8 mm, entsprechend einer Rauhigkeit von 4 bis 6 mm, stellt gemäss den praktischen Versuchen die obere Grenze für die Applikation von Spritzabdichtung dar. Neben den technischen Parametern ist für jeden Einzelfall auch eine wirtschaftliche Beurteilung der Verhältnisse vorzunehmen.

Eine maximale Rauhigkeit des Untergrundes, wie sie bei vorgefertigten Kunststoffdichtungsbahnen gefordert ist, ist bei gespritzten Abdichtungen aus technischen Überlegungen nicht erforderlich. Allerdings führen wirtschaftliche Überlegungen, die den Materialverbrauch betreffen, ebenfalls zu dem Ziel eines möglichst glatten Untergrundes.

Ebenheit

- Eine minimale Ebenheit des Untergrundes, wie sie bei vorgefertigten Kunststoffdichtungsbahnen gefordert ist, ist bei gespritzten Abdichtungen aus technischen Überlegungen nicht erforderlich.

Anforderungen an die Ebenheit des Untergrundes ergeben sich weder aus technischen noch wirtschaftlichen Überlegungen.

Untergrundfeuchte

- Teilweise setzen Spritzabdichtungssysteme einen trockenen Untergrund voraus, um mit dem gewünschten Resultat appliziert werden zu können. In diesen Fällen ist eine entsprechende leistungsfähige Drainage im Untergrund vorzusehen.

Anzumerken bleibt, dass bei der Beurteilung der Trockenheit des Untergrundes durch eine vorhandene Baulüftung, mehr Bergwasser verdunstet als durch Kapillaren und Risse in der Sicherung nachzusickern vermag. Nach Applikation der Spritzabdichtung entfällt diese Verdunstungswirkung. Somit kann es auch in Bereichen zu Schwierigkeiten mit nachströmendem Wasser kommen, die vor dem Einbau des Abdichtungssystems trocken erschienen, da dort mehr Wasser an der Oberfläche verdunstete als aus dem Untergrund nachfloss. Ein Wasserrückstau während der Aushärtezeit der Spritzabdichtung resp. vor Einbringen der Innenschale kann zu Überbeanspruchungen der Abdichtung führen.

Anforderungen:

Gemäss Angaben der Hersteller bezüglich Sauberkeit, Rauigkeit, Untergrundfeuchte.

8.1.8. Materialkompatibilität

Spritzabdichtungen sollen zu anderen im Untertagebereich verwendeten Materialien verträglich sein. Dies gilt speziell beim Überspritzen von Kunststoff- resp. Stahlelementen wie z.B. Drainageeinrichtungen oder Durchführungen.

Produkte mit z.B. hohen Säureanteilen sind nur bedingt geeignet, da sie zu Korrosion an Stahl und allenfalls zu lösenden Prozessen beim Beton führen können. Vor diesem Hintergrund und allenfalls weiteren Überlegungen sind die Spritzabdichtungssysteme sorgfältig auf Ihre Eignung im Bauwesen zu prüfen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei der Spritzabdichtung ähnlich wie beim Beton Reaktionsprozesse im eingebauten Zustand ablaufen, die auch auf benachbarte Bauteile einwirken können.

Bei den bisherigen Versuchen ist dieses Phänomen einzig einmal bei Stahllankern aufgetreten, bei denen eine beschleunigte Korrosion festgestellt wurde. Das Material wurde daraufhin modifiziert, um diese Wechselwirkung zu vermeiden.

Anforderungen:

Spritzabdichtungen müssen mit anderen im Untertagebereich verwendeten Materialien verträglich sein. Insbesondere dürfen keine Korrosionsprozesse durch chemische Wechselwirkungen ausgelöst werden.

8.2. Anforderung an Spritzabdichtung im eingebauten Zustand

8.2.1. Schichtdicke

Die Einhaltung der gewünschten und geforderten Schichtstärke ist bei der Spritzabdichtung Folie eine zentrale Forderung, da im Gegensatz zu den vorgefertigten Abdichtungsbahnen die Schichtstärke durch den Einbauvorgang bestimmt wird. Im Extremfall führt ein ungleichmässiger Schichtstärkenaufbau zu Fehlstellen im Abdichtungssystem.

Nach der Applikation kann die Schichtdicke visuell kontrolliert werden. Dabei wird in dem System, das in zwei Lagen aufgetragen wurde, nach Farbunterschieden gesucht. Diese Methode kann nur eine grobe Einhaltung der Schichtdicken gewährleisten. Beleuchtungsverhältnisse bei der Kontrolle und Aufmerksamkeit der Kontrollpersonen beeinflussen das Ergebnis massgeblich.

Stellen, wo die Spritzabdichtung an einzelnen Spritzkörnern verflossen ist und somit benachbarte, punktuelle Minderdicken auftreten, lassen sich, wenn überhaupt, nur aus nahen Distanzen feststellen.

Kontrollen können auch an eingespritzten kleinen Markierkörpern erfolgen, anhand derer sich die Schichtdicke grob ablesen lässt.

Informationen über Gleichmässigkeit erhält man aber bei allen genannten Verfahren nicht.

Denkbar wäre, elektrische Leiter periodisch auf dem Spritzbeton zu befestigen und einzuspritzen. Damit liesse sich im eingebauten Zustand, relativ einfach, mittels elektronischem Gerät die Schichtdicken ermitteln. Der damit verbundene Aufwand ist erheblich und setzt eine sorgfältige Verlegung der Kontrolldrähte voraus.

Ein Auftrag mittels roboterisierten Systemen kann eine bessere und gleichmässigeren Auftragsleistung gewährleisten. An ausgewählten Prüfmustern, die aus den applizierten Flächen herausgeschnitten werden, wird die effektive Schichtstärke gemessen. Allfällige Fehlstellen können erfasst werden.

Aus heutiger Sicht wird für eine Spritzabdichtung zur Gewährleistung einer ausreichenden Dichtigkeit analog zu den vorgefertigten Dichtungsbahnen

eine Schichtdicke von mind. 3 mm vorgeschlagen. Bei gutem Verbund (Kap 8.2.2) auf dem Untergrund kann lokal allenfalls auch eine Mindeststärke von 2 mm toleriert werden. Die Toleranzwerte bei der Dickenmessung werden von der SIA-Norm 280 übernommen.

Die Anzahl möglicher tolerierbarer Fehlstellen muss noch definiert werden.

Anforderung:

Mindestschichtdicke 3 mm, in Ausnahmefällen bei ausreichender Haftung 2 mm.

8.2.2. Haftfestigkeit

Mit Drainagemöglichkeiten wie z.B. systematischer in einem Raster angeordnete Drains wird die Distanz der Wasserrückverdrängung zurück in den Fels beschränkt. Damit resultiert eine Limitierung eines möglichen Wasserdruckaufbaus. Dazwischen ist aber lokal immer mit einem geringen Wasserdruckaufbau hinter der Spritzabdichtung zu rechnen. Im Extremfall eines undrainierten Tunnels wird der Wasserdruck durch die statische Druckhöhe bestimmt.

Bei genügender Haftung der Spritzabdichtung auf dem Untergrund und sichergestellter Drainage zeigen Fehlstellen in der Spritzabdichtung wie Poren oder Spritzschatten auch bei bergseitigem Wasserdruckaufbau lediglich geringe Folgen, da die Tendenz zur weiteren Ausbreitung der Unterwanderung gering ist.

Diese Tatsache hat sich auch bei Bauwerken mit vollflächig verklebten Abdichtungsbahnen bestätigt.

Bei Spritzabdichtungen auf Brückenplatten wird eine Haftzugfestigkeit von 1.5 N/mm^2 gefordert¹. Dieser Wert sollte im Tunnel sowohl im Parament als auch in den über Kopf liegenden Firstbereichen erreicht werden. Jedoch liegt eine andere Belastungssituation der Abdichtung vor, als bei den betrachteten Spritzabdichtungen im Tunnelbau.

Wird eine Spritzabdichtung auf einem Untergrund mit drückendem Bergwasser appliziert, werden an den Haftverbund Spritzabdichtung-Untergrund erhöhte Anforderungen gestellt. Der in einer ersten Phase auf die Spritzfolie wirkender Wasserdruck hat das Bestreben diese vom Untergrund abzulösen und Wassersäcke zu bilden. Erst nach Fertigstellung des

¹ (in der VBK-Richtlinie Abdichtungen mit Flüssigkunststoff, Prüfungen und Anforderungen werden für Dichtungsschichten aus Flüssigkunststoff folgende Anforderungen festgelegt: Mittelwert einer 3er Serie gleich/grösser 1.5 N/mm^2 , Einzelwerte gleich/grösser 1.0 N/mm^2).

Bauwerkes erfährt die Spritzabdichtung eine Stützwirkung durch das Innengewölbe.

Zur Erzielung der Verbesserung der Trageigenschaften des Ausbausystems mit der Spritzabdichtung sind Haftzugwerte unter den gewählten Randbedingungen von 0.5 N/mm^2 ausreichend. Dieser Wert liegt deutlich unter dem Wert, der aufgrund der Überlegungen zu Abdichtungszwecken erforderlich ist. Damit ist letztere massgeblich für die Dimensionierung.

Es wird vorgeschlagen für Spritzabdichtungen ebenfalls an einer Kontaktfläche Haftzugwerte von 1.5 N/mm^2 zu verlangen. Dabei darf in einer Prüfsreihe von 3 Einzelwerten kein Wert unter 1.0 N/mm^2 liegen.

8.2.3. Scherfestigkeit

Durch die Verbundwirkung zum Sicherungsspritzbeton und zur Innenschale muss das Material der Spritzabdichtung eine gewisse Scherfestigkeit aufweisen, um die entsprechenden Kräfte wie in Kap 6.2 ausgeführt, aufnehmen zu können.

Die in Kap. 6.2 ermittelten maximalen Scherkräfte von 0.75 N/mm^2 gelten für die dort gewählten Parameterkombinationen vom Winkel der inneren Reibung und Kohäsion. Zur Definition eines Mindestwertes sind mit entsprechenden Untersuchungen die getroffenen Annahmen zu verifizieren.

8.2.4. Schälzugfestigkeit

In allen bisherigen Untersuchungen ist die Schälzugfestigkeit nicht bestimmt worden. Die Bestimmung dieser Grösse ist nur bei Systemen erforderlich, deren Wirkungsweise auf einem Haftverbund mit dem Untergrund oder Innenschalenbeton beruht. In diesem Fall ist die Schälzugfestigkeit auf dem Untergrund und allenfalls auch auf dem Deckbeton zu bestimmen.

8.2.5. Reissdehnung und Rissüberbrückung

Eine Dehnbeanspruchung erfährt eine Spritzabdichtung in der Regel nicht, wenn sie kraftschlüssig auf einem „starren“ Untergrund wie Spritzbeton appliziert wird.

Entstehen jedoch nach dem Auftrag der Spritzabdichtung nachträglich durch Gebirgsdeformationen Risse im Untergrund, ist mit einem lokalen Abreißen der Spritzabdichtung vom Untergrund unmittelbar neben dem Riss zu rechnen. Damit darf die rissbedingte Verdünnung der Spritzabdichtung bei der Bildung eines Risses in beschränkter Breite nicht zum unmittelbaren Reißen der Spritzabdichtung führen.

Zur Überbrückung eines Risses sind grosse Dehnfähigkeiten des Materials erforderlich, da die Längenänderung auf einer sehr kurzen Strecke erfolgen muss. Da diese Situationen eher selten anzutreffen sind, da die Spritzabdichtung nach Stabilisierung des Hohlräume eingebracht wird und keine weiteren Bewegungen erfolgen, wird vorgeschlagen, die Anforderungen der SIA V280 zu übernehmen.

Neben der Applikation auf dem Spritzbeton oder Felsuntergrund sind auch Varianten mit Auftrag auf einem Drainagevlies ausgeführt worden. In diesen Fällen ist die Spritzabdichtung den gleichen Belastungen wie eine vorgefertigte Kunststoffdichtungsbahn ausgesetzt. Es gelten dann auch die für diese Anwendungen formulierten Anforderungen.

8.2.6. Chemische Beständigkeit

Die Spritzabdichtungen müssen sowohl alkali- als auch säurebeständig sein. Die Alkalibeständigkeit ist meistens unproblematisch, im Hinblick auf die Anwendung im Kontakt mit Beton aber auch eine zwingende Forderung. Aber auch der Beständigkeit gegenüber sauren Umgebungsmedien wie kohlensaures (CO_2) oder schwefelwasserstoffhaltiges (H_2S) Bergwasser, ist eingehende Beachtung zu schenken.

Es wird vorgeschlagen, die Prüfung zur chemischen Beständigkeit an Spritzabdichtungsmustern in Anlehnung an jene für Kunststoffdichtungsbahnen durchzuführen.

8.2.7. Brandbeständigkeit

Bezüglich Brennbarkeitsklasse und Qualmbildung sind die gleichen Anforderungen zu stellen wie an eine Kunststoffdichtungsbahn.

Bei Systemen die kraftschlüssig auf dem Untergrund appliziert sind, ist das Brandverhalten vermutlich günstiger zu beurteilen als bei einer frei hängenden Abdichtung. Im Beton- oder Felsuntergrund wird die entstehende Wärme besser abgeführt, so dass eine Aufkummulierung der Energie, die den Brand beschleunigt, langsamer erfolgt. Diese Randbedingung ist bei entsprechenden Prüfungen mit zu berücksichtigen.

8.2.8. Faltbiegung in der Kälte

Faltbiegung in der Kälte wurde bisher bei keiner der ausgeführten Untersuchungen betrachtet. Im Tunnel ist diese Problematik eher von untergeordneter Bedeutung. Einzig in den Portalbereichen kann die Faltbiegung bei auf einem Drainagevlies applizierter Spritzabdichtung zum Thema werden.

Da andererseits für den Abbindeprozess des Abdichtungsmaterials eine gewisse Mindestwärme erforderlich ist, sind Anwendungen während der Wintermonate unwahrscheinlich. Aufgrund dieser Überlegungen wird auf eine spezielle Anforderung diesbezüglich verzichtet.

8.2.9. Formänderung in der Wärme

Es wird vorgeschlagen, auf diese Prüfung für Spritzabdichtungen zu verzichten, da die Abdichtung bei den hier besprochenen Einsatzfällen nicht direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzt ist.

Hitzeeinwirkung infolge von Unglücksfällen wie Bränden, die vermutlich zu einer Zerstörung der Abdichtung führen würden, wird im Rahmen dieser Betrachtungen nicht mit berücksichtigt.

8.2.10. Durchschlagsfestigkeit

Durch direkte Applikation der Spritzabdichtung auf dem Untergrund besteht keine Gefahr des Durchstanzens.

Da auch beim Einbau der Abdichtung keine Verletzungsgefahr besteht, da die Abdichtung am Nutzungsort hergestellt wird, wird vorgeschlagen, auf diese Prüfung bei Spritzabdichtungen zu verzichten.

8.2.11. Nahtfestigkeit

Bei Spritzabdichtungen sind keine Nähte analog den vorgefertigten Kunststoffbahnen vorhanden. Bei den Arbeitsetappen entstehen Überlappungsbereiche, in denen die frische Spritzabdichtung nicht auf dem Fels, sondern auf dem ausgehärteten Material der vorherigen Arbeitsetappe, die zwischen einigen Stunden bis zu mehreren Tagen vorher erstellt worden ist, appliziert wird.

Die Überlappungsbereiche sind im gleichen Sinn zu prüfen wie die Nähte bei vorgefertigten Kunststoffdichtungsbahnen. Dabei ist das Alter der überlappenden Schicht mit mindestens 1 Woche zu wählen, um einen deutlichen Überlappungsbereich auszubilden.

8.3. Tabellarische Zusammenstellung der Anforderungen an Spritzabdichtungen

In der folgenden Tabelle 10 sind die Anforderungen aus den Kap. 8.1 und 8.2 und der SIA-Norm V280 zusammengestellt, die sich auf Grundwasserabdichtungen bezieht und auch für herkömmliche Tunnelabdichtungen gilt, gegenübergestellt. Es wird dabei nur auf die Anforderungen Bezug genommen, die für den Tunnelbau von Relevanz sind.

Spritzabdichtungen, die kraftschlüssig auf den Untergrund aufgetragen werden, verhalten sich anders und sind anderen Belastungen ausgesetzt als Spritzabdichtungen, die z.B. auf Drainagevlies aufgetragen werden. Letztere sind in ihrem Verhalten und Beanspruchungen den vorgefertigten Kunststoffdichtungsbahnen gleichzusetzen.

Lose verlegte Kunststoffdichtungsbahnen, vorgefertigt oder vor Ort im Spritzverfahren auf einem Drainagevlies hergestellt, müssen mit grosser Sorgfalt an die unregelmässige Oberfläche angepasst werden. Erst der nachfolgend eingebaute Beton presst die Abdichtung vollständig auf den Untergrund. In der Folge können im Bereich von Bossen, Zerrungen und Ausdünnungen und im Bereich von Vertiefungen Faltenbildung entstehen.



Zur Reduzierung dieser Effekte werden spezielle Anforderungen an die Ebenheit des Untergrundes gestellt.

Die kraftschlüssig applizierte Spritzabdichtung, die vor Ort den jeweiligen Untergrundverhältnissen angepasst und produziert wird, ist bei dem nachfolgenden Einbau eines Betoninnengewölbes den oben geschilderten Belastungen nicht ausgesetzt. Allerdings fehlen bis heute praktische Erfahrungen wie sich eine Spritzabdichtung im Zusammenhang mit einer Ortbetoninnenschale verhält, die durch den Betonierdruck in anderer Weise belastet wird als bisher untersucht.

Pos.	Prüfung	Nr gemäss SIA Norm V280. ²	SIA V280 (Grundwasserabdichtungen)	Vorschlag Anforderungen für Spritzabdichtungen
1.	Viskosität	-	-	Kein Abtropfen oder Tropfenbildung bis zum Erreichen der erforderlich Schichtstärke
2.	Reaktionsverhalten	-	-	Schnelles Reaktionsverhalten unabhängig von Umgebungsbedingungen wie Temp., Feuchte, etc.
3.	Schichtdickerkontrolle bei der Applikation			Kontrolle erfolgt z.B. über Verbrauch pro Flächeneinheit. Siehe auch unter Prüfungen basierend auf bestehender SIA V280 (Pos 9)
4.	Arbeitsplatzhygiene	-	-	Die einschlägigen Vorschriften (MAK-Werte) sind einzuhalten. (SUVA arbeitshygienische Grenzwerte)
5.	Umweltgefährdung	-	-	Die einschlägigen Vorschriften sind einzuhalten.
6.	Untergrundanforderungen:	-	- ³	Anforderungen gemäss Angaben Hersteller bezüglich Sauberkeit, Rauigkeit, Untergrundfeuchte.
7.	Materialkompatibilität	-	-	Kompatibilität der Spritzabdichtung zu anderen Werkstoffen.
8.	Schälzugfestigkeit	-	-	Es liegen bisher keine Versuchsergebnisse vor, die Auskunft über erreichbare und erforderliche Werte geben.
9.	Haftverbund Spritzabdichtung zum Untergrund bzw. Deckbeton	-	-	1.5 N/mm², kein Einzelwert unter 1.0 N/mm² (Prüfung gemäss ZTV 90)

Tabelle 10 Vorschlag eines Anforderungskatalogs für Spritzabdichtungsapplikationen

² Ohne Eintrag = Parameter ist nicht Gegenstand der SIA V280. Ausgelassene Prüfungen (Sprünge in der Nummerierung) sind für Untertageanwendungen nicht relevant.

³ keine Anforderungen in Prüfung SIA V280.

Nr.	Prüfung	Nr gemäss SIA V280.	SIA V280 (Grundwasserabdichtungen)	Vorschlag Anforderungen für Spritzabdichtungen
10.	Dickenmessung an applizierte Abdichtung	1	Abweichung -5 %, +10 % (Mittelwerte, ± 10 % Einzelwerte)	Mindestdicke 3 mm.
11.	Fehlstellen	-	Keine Fehlstellen zulässig	Bei kraftschlüssiger Applikation können allenfalls vereinzelte Fehlstellen zugelassen werden.
12.	Reissdehnung	2	Min. 200 % bei nicht gewebeärmerter Abdichtung	Analog SIA V280
13.	Faltbiegung in der Kälte	3	keine Risse bei -10°C	Verzicht auf diese Prüfung
14.	Formänderung in der Wärme	4	< 2.0 %, keine Blasenbildung	Verzicht auf diese Prüfung
15.	Schlitzdruck	5	0.5 N/mm ²	0.5 N/mm²,
16.	Thermische Alterung	8	Massenänderung < 2.0 %; Abnahme Reissdehnung < 30 %	Massenänderung < 3.0 % <i>leicht höherer Wert, da Spritzabdichtungen mit Wasser oder Lösungsmitteln verdünnt aufgetragen werden. Auch im erhärteten Zustand kann die Massenänderung noch über derjenigen von Abdichtungsbahnen liegen.</i> Abnahme Reissdehnung < 30 %
17.	Wurzelbeständigkeit	11	Kein Wurzeldurchwuchs, eingewachsene Wurzeln sterben ab	Analog SIA V280
18.	Brandkennziffer	12	Brennbarkeitsklasse 4 Qualmbildungsstufe 2 oder Brennbarkeitsklasse 5 Qualmbildungsstufe 1	Analog SIA V280
19.	Verhalten in warmem Wasser	13	Änderung der Reissdehnung ≤ 30 %, Massenänderung ≤ 4 %	Analog SIA V280 <i>Prüfung an Musterstücken mit 3 mm Dicke</i>
20.	Dauerdruckfestigkeit	14	Dicht bei 7 N/mm ²	Analog SIA V280
21.	Mech. Durchschlagfestigkeit	15	Dicht bei 500 mm Fallhöhe	Verzicht auf diese Prüfung
22.	Nahtfestigkeit	16	Der Bruch muss neben der Naht eintreten. Während des Reissversuchs darf kein Aufschälen oder Abgleiten der verbundenen Schenkel erfolgen.	Analog SIA V280

Tabelle 10 Fortsetzung

Nr.	Prüfung	Nr gemäs s SIA V280.	SIA V280 (Grundwasserabdichtungen)	Vorschlag Anforderungen für Spritzabdichtungen
23.	Widerstand gegen Mikroorgani smen	17	Massenänderung $\leq 6\%$	Analog SIA V280
24.	Verhalten in aggressiven Flüssigkeite n	18	Beurteilung der Massen- und Dimensionsänderung	Analog SIA V280

Tabelle 10 Fortsetzung

9. Schlussfolgerung

Die erfolgte Dokumentation der bisher in der Schweiz im Rahmen von Baustelleneinsätzen und Versuchsarbeiten ausgeführten Anwendungen zeigen, dass seit den ersten Arbeiten mit Spritzabdichtungen nennenswerte Entwicklungsschritte vollzogen wurden. Die Entwicklung ist geprägt von Misserfolgen, die in den vergangenen Jahrzehnten immer wieder zu Entwicklungsstillständen geführt haben. Die in den letzten Jahren ausgeführten Versuchsarbeiten zeigen heute einen Entwicklungsstand, der erfolgreiche Abdichtungen mit Spritzabdichtungssystem als realisierbar erscheinen lässt. In-situ-Anwendungen mit Systemen, die dem heutigen Stand der Technik entsprechen, finden sich bisher nicht in der Schweiz.

Ausgehend von den Wasserbewegungen im umliegenden Fels und im Spritzbeton der Felssicherung wird aufgezeigt wie das Entwässerungskonzept (druckwasserhaltende Abdichtung oder drainierter Tunnel) die Wahl und Auslegung des Abdichtungssystems beeinflussen. Ein mit dem Untergrund und/oder Deckbeton kraftschlüssig verbundenes Abdichtungssystem wie die Spritzabdichtung vermindert insbesondere bei druckwasserhaltenden Entwässerungskonzepten die Gefahr von Leckagen durch Hinterläufigkeiten der Abdichtung. Wird die Hinterläufigkeit der Abdichtung verhindert, tritt eine Leckstelle nur dann auf, wenn in der Abdichtung und im (Spritz-)Beton die Fehlstellen örtlich deckungsgleich sind.

Bereits minimale Haftzugfestigkeiten zwischen Spritzabdichtung und umliegendem Beton vermindern die Scherbewegungen in der Spritzabdichtung auf ein unbedeutendes Mass. Die weiteren Betrachtungen zeigen, dass für die Dimensionierung im Hinblick auf die Haftzugfestigkeit nicht die statischen, sondern die abdichtungstechnischen Fragestellungen massgeblich sind.

Die Modellrechnungen haben weiterhin gezeigt, dass die Randspannungen im Innengewölbe reduziert werden und allfällige Zugspannungen sich vermindern. In den Fällen, in denen eine Dimensionierung des Innengewölbes auf Zug erfolgt, können gewisse Einsparungen, die in jedem Einzelfall unter Berücksichtigung des Langzeitverhaltens nachgewiesen werden müssen, realisiert werden.

Auf Basis der vorliegenden Erfahrungen aus Baustellenanwendungen und Versuchen sowie den Modellrechnungen wurde ein Parameterkatalog zusammengestellt, der aufzeigt, welche Grössen untersucht werden müssen. Soweit möglich und sinnvoll wurden Vorschläge zu erreichenden Grenzwerten gemacht. Es wird ein mittlerer Haftzugfestigkeitswert von 1.5 N/mm^2 gefordert, der sich aufgrund der Überlegungen zur Abdichtungswirkung der Systeme ergibt. Die Anforderungen aus den statischen Überlegungen führen zu niedrigeren Anforderungswerten und sind daher nicht massgeblich für die Dimensionierung.

10. Ausblick

Mit den gemachten Ausführungen wurden primär bestehende Untersuchungen zusammengefasst und beurteilt. Diese Zusammenstellung zeigt, dass sich die bisherigen Prüfungen auf wenige Parameter konzentrieren, die primär anwendungsbezogen sind.

Für die umfassende Beurteilung von Spritzabdichtungen im Untertagebau sind noch verschiedenste Fragen im Hinblick auf die Beeinflussung des Tragsystems und des Abdichtungsverhaltens zu beantworten. Diese Themenbereiche sind:

- Untersuchung der verbundmechanischen Eigenschaften der Spritzabdichtung mit dem Beton in entsprechenden Laborversuchen
- Untersuchungen des Langzeitverhaltens von Spritzabdichtungen bezüglich Dichtigkeit und Verhalten der Trageigenschaften
- Einfluss von Fehlstellen in der kraftschlüssig applizierten Spritzabdichtung auf die Dichtigkeit des Gesamtsystems. Randbedingungen, die Hinterläufigkeiten des Abdichtungssystems verursachen. Neben vertieften theoretischen Betrachtungen ist auch der Einfluss der Untergrundrauhigkeit in entsprechenden Versuchsreihen zu belegen.
- Methoden zur Schichtdickenkontrolle sind durch geeignete Grossversuche und exemplarischen manuellen Nachmessungen zu verifizieren. Im Vordergrund steht hier der automatisierte Spritzauftrag, der zunächst nur einen gleichmässigen Flächenverbrauch gewährleistet. Es ist nachzuweisen, dass damit auch eine gleichmässige und dichte Abdichtung aufgetragen werden kann. Auch hier ist der Einfluss der Rauigkeit der Oberfläche zu berücksichtigen.
- Keinerlei Erfahrungen bestehen beim Einsatz von Spritzabdichtungen mit dem anschliessenden Einbau einer Ortbetoninnenschale. Der Einfluss der Druck- und Scherbeanspruchungen der Abdichtung ist zu untersuchen.
- Abdichtung von Tübbingfugen

Auch wenn noch eine Vielzahl offener Fragen besteht, stellt die Spritzabdichtung nach mehreren Jahrzehnten der Entwicklung eine interessante Alternative für die Abdichtung für untertägige Bauwerke dar. Der erfolgreiche Einsatz, setzt jedoch eine kritische Beurteilung der Umgebungsbedingungen und ein entsprechend angepasstes Abdichtungskonzept voraus, das die Randbedingungen für einen Spritzabdichtungseinsatz berücksichtigt.

Beilage 1

Zu ASTRA Forschungsauftrag 52/99, Spritzabdichtung als Abdichtung im Tunnelbau.



Foto 928/3: Schlauchanschluss für Wasservermessung



Foto 928/4: Gespritzte Bitumenabdichtung mit Blasenbildung



Foto 928/5: Abplatzungen infolge unzureichender Haftung der Abdichtung



Foto 928/10 A: PU-Abdichtung



Foto 928/16: PU-Abdichtung mit Tropfenbildung

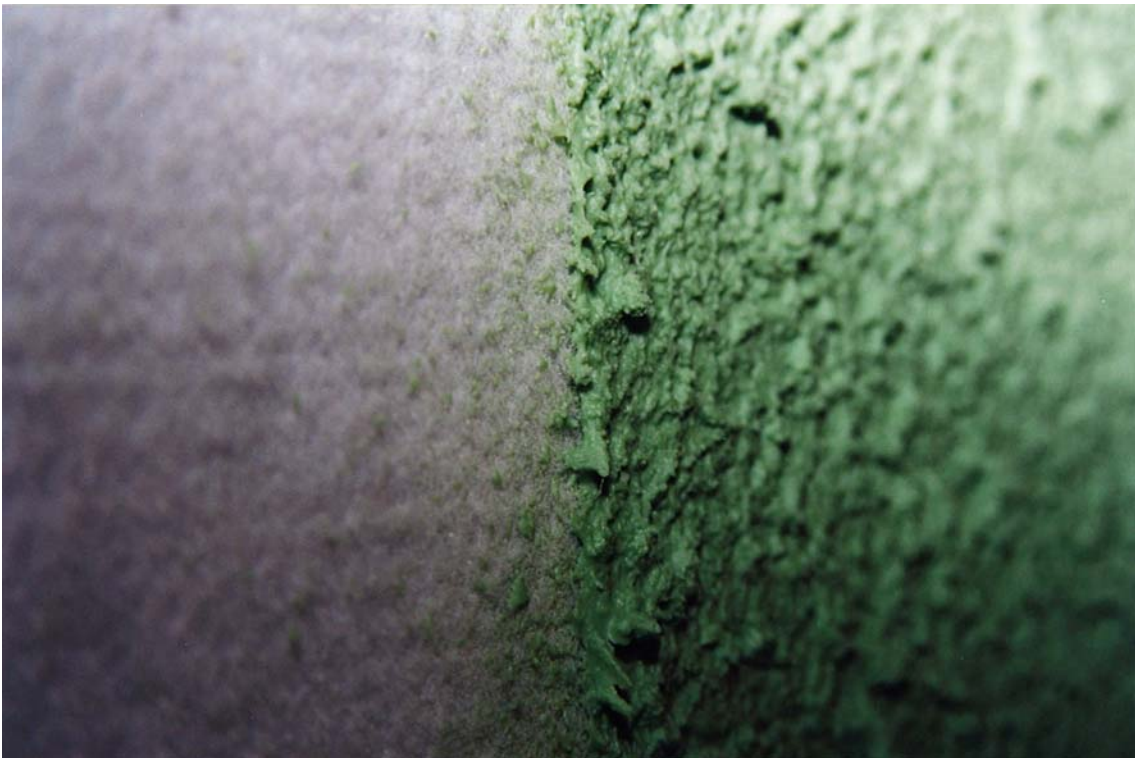


Foto 928/20A: Abdichtung auf Vlies



Foto 928/29A: Abdichtung auf Spritzbeton



Foto 928/31A: Abdichtung auf Lochvlies



Foto 928/32A: PU-Abdichtung



Foto 928/33A: Zementbasierte Abdichtung



Foto 929/2: Ph-basische Abdichtung auf Primer



Foto 929/10: Imprägnierung auf geglättetem Untergrund



Foto 929/11: Korrosionsschutzanstrich



Foto 929/13: Rissüberbrückende Abdichtung

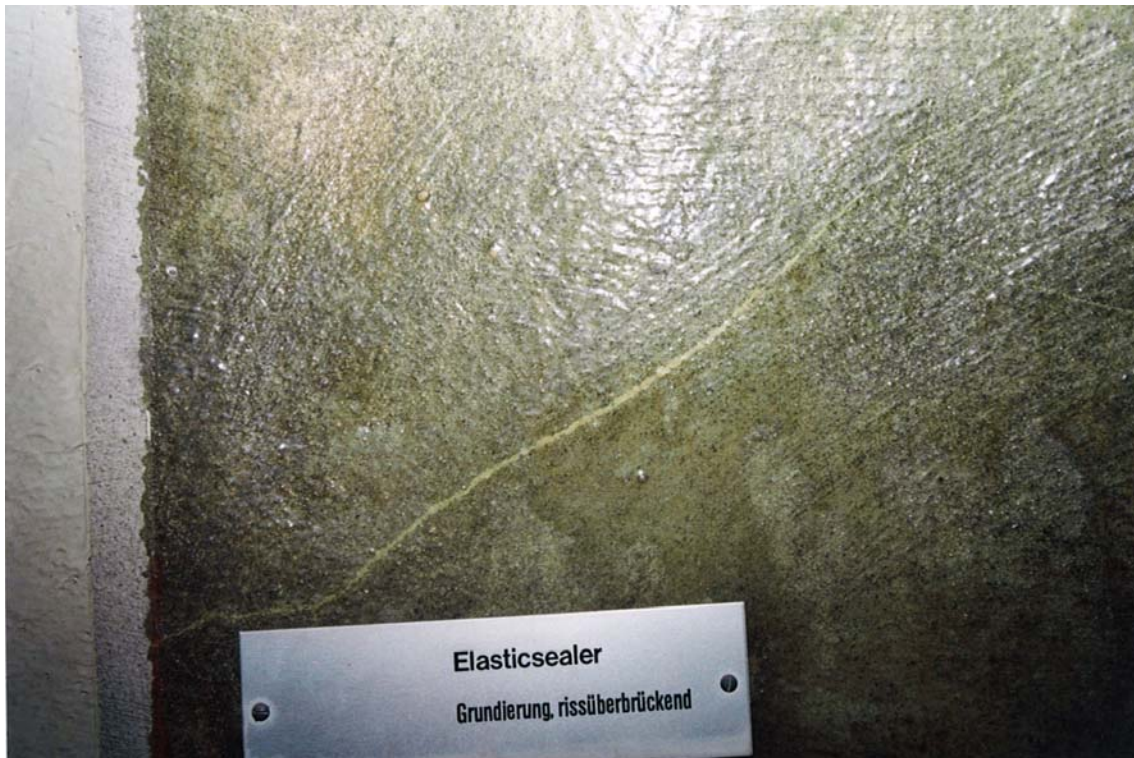


Foto 929/15: Rissüberbrückende Grundierung

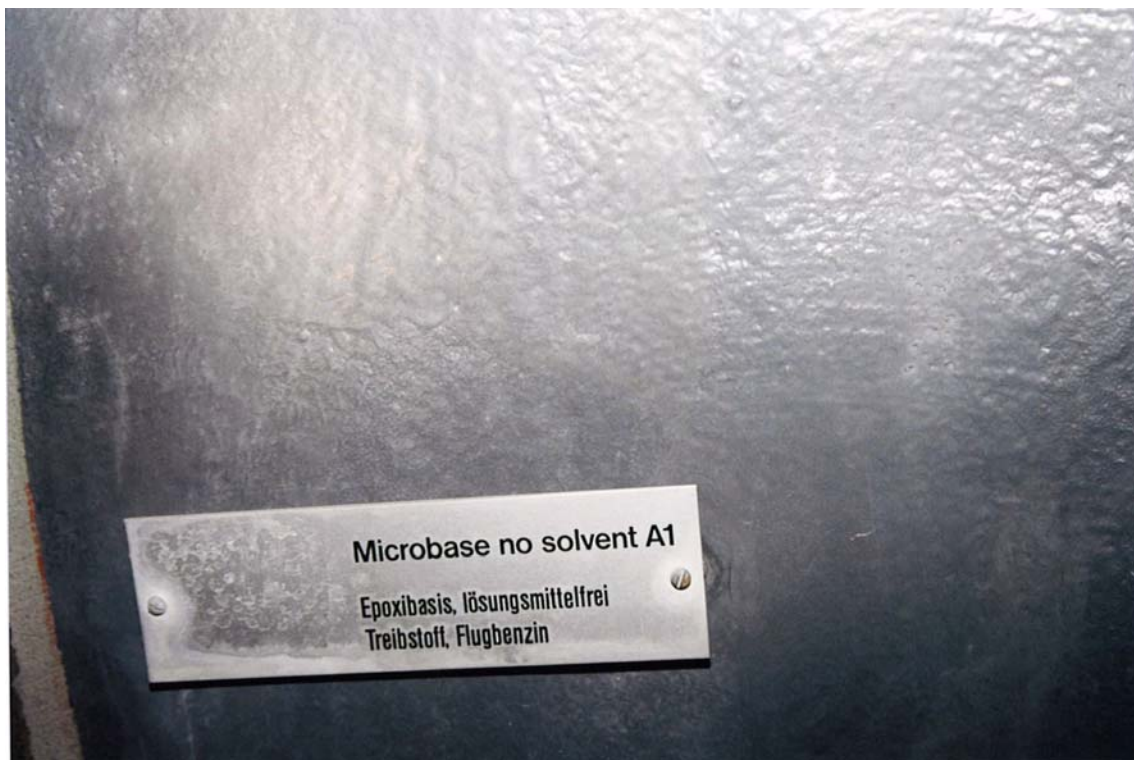


Foto 929/17: Abdichtung, kohlenwasserstoffbeständig



Foto 929/20: Rissüberbrückende Beschichtung



Foto 929/21: Teerbasische Abdichtung



Beilage 2

Zu ASTRA Forschungsauftrag 52/99, Spritzabdichtungen als Abdichtung im Tunnelbau.

- Fig. 1: Tunnelquerschnitt, der der Modellbildung zugrunde liegt.
- Fig. 2: Berechnungsmodell mit den Elementen für den Fels und das Spritzbetongewölbe sowie den Stabelementen (Beam plot für die Verkleidung)
- Fig. 3: Elemente des Spritzbetongewölbes im Firstbereich mit Verkleidung (Beam plot) und Lastvektoren aus dem Auflockerungsdruck (Applied Forces)
- Fig. 4: Berechnung Z1MPa (Haftzugfestigkeit $\sigma_z = 1$ MPa). Deformationen des Spritzbetongewölbes und der Verkleidung
- Fig. 5: Berechnung Z1MPa (Haftzugfestigkeit $\sigma_z = 1$ MPa). Moment und Normalkraft in der Verkleidung
- Fig. 6: Berechnung Z1MPa (Haftzugfestigkeit $\sigma_z = 1$ MPa). Kompression (Closure) der Spritzabdichtung. (Max.: 0.0015 mm).
- Fig. 7: Berechnung Z1MPa (Haftzugfestigkeit $\sigma_z = 1$ MPa). Relative Scherbewegung (Rel. Shear Displacement) der Spritzabdichtung (Max.: 0.0015 mm).
- Fig. 8: Berechnung Z1MPa (Haftzugfestigkeit $\sigma_z = 1$ MPa). Druckspannung in der Spritzabdichtung (Max.: 0.75 MPa).
- Fig. 9: Berechnung Z1MPa (Haftzugfestigkeit $\sigma_z = 1$ MPa). Scherspannung in der Spritzabdichtung (Max.: 0.75 MPa).
- Fig. 10: Berechnung Z01 (Haftzugfestigkeit $\sigma_z = 0.1$ MPa). Kompression (Closure) der Spritzabdichtung (Max.: 0.0009 mm.)
- Fig. 11: Berechnung Z01 (Haftzugfestigkeit $\sigma_z = 0.1$ MPa). Relative Scherbewegung (Rel. Shear Displacement) der Spritzabdichtung (Max.: 0.61 mm).
- Fig. 12: Berechnung Z01 (Haftzugfestigkeit $\sigma_z = 0.1$ MPa). Druckspannung in der Spritzabdichtung (Max.: 0.45 MPa).
- Fig. 13: Berechnung Z01 (Haftzugfestigkeit $\sigma_z = 0.1$ MPa). Scherspannung in der Spritzabdichtung (Max.: 0.21 MPa).
- Fig. 14: Maximale Druckspannung in der Spritzabdichtung in Funktion der Haftzugfestigkeit σ_z (s. Tab. 9).
- Fig. 15: Maximale Kompression der Spritzabdichtung in Funktion der Haftzugfestigkeit σ_z bzw. Haftzugfestigkeit (s. Tab. 10).
- Fig. 16: Maximale Scherspannung in der Spritzabdichtung in Funktion der Haftzugfestigkeit σ_z (s. Tab. 9).
- Fig. 17: Maximale relative Scherverschiebung der Spritzabdichtung in Funktion der Haftzugfestigkeit σ_z (s. Tab 9).
- Fig. 18: Randspannungen im Scheitelpunkt des Spritzbetongewölbes in Funktion der Haftzugfestigkeit σ_z der Spritzabdichtung
- Fig. 19: Normalkraft im Scheitelpunkt der Verkleidung in Funktion der Haftzugfestigkeit σ_z der Spritzabdichtung
- Fig. 20: Moment im Scheitelpunkt der Verkleidung in Funktion der Haftzugfestigkeit σ_z der Spritzabdichtung

Fig. 21: Randspannungen im Scheitelpunkt der Verkleidung in Funktion der Haftzugfestigkeit σ_z der Spritzabdichtung

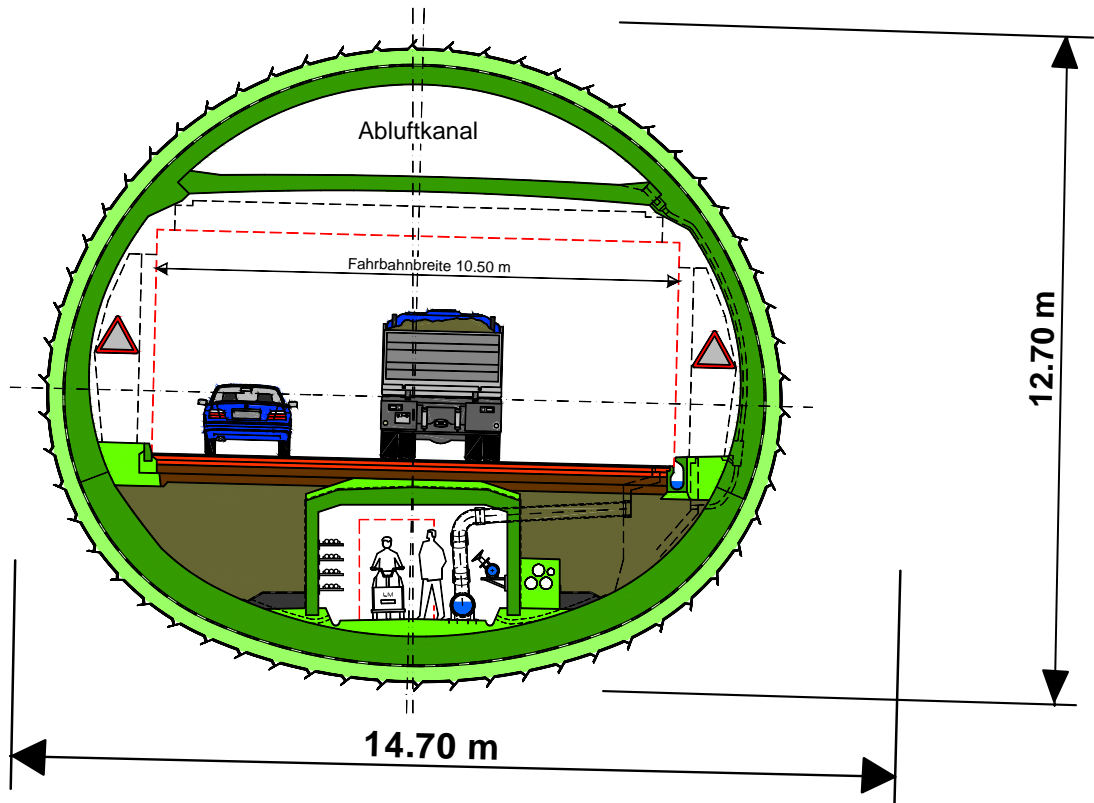


Fig. 1: Tunnelquerschnitt, der der Modellbildung zugrunde liegt.

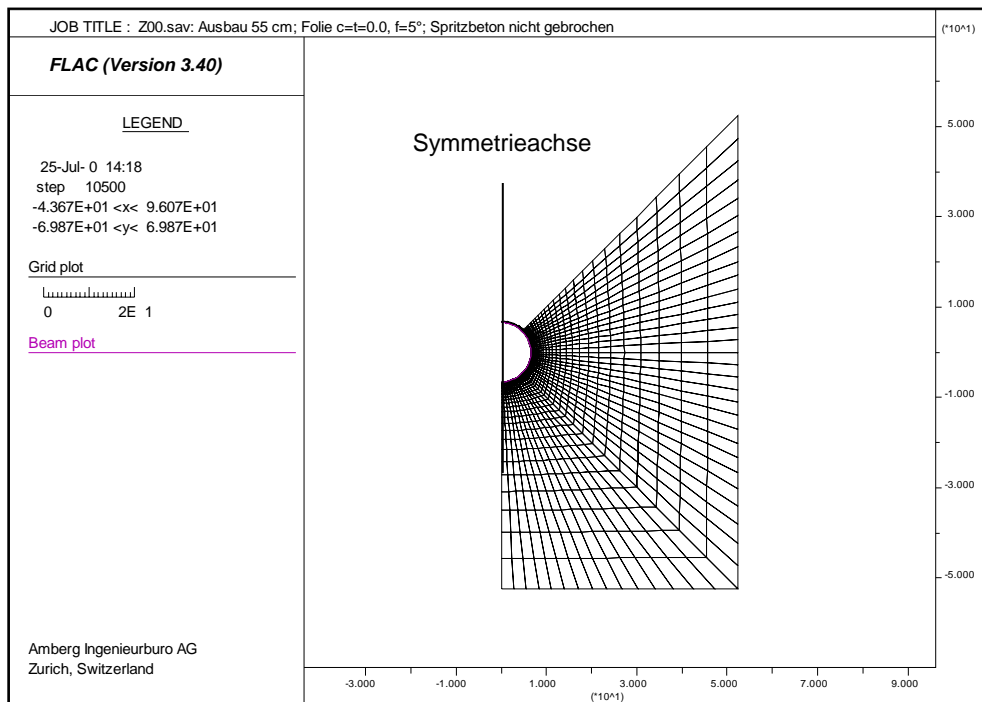


Fig. 2: Berechnungsmodell mit den Elementen für den Fels und das Spritzbetongewölbe sowie den Stabelementen (Beam plot) für die Verkleidung

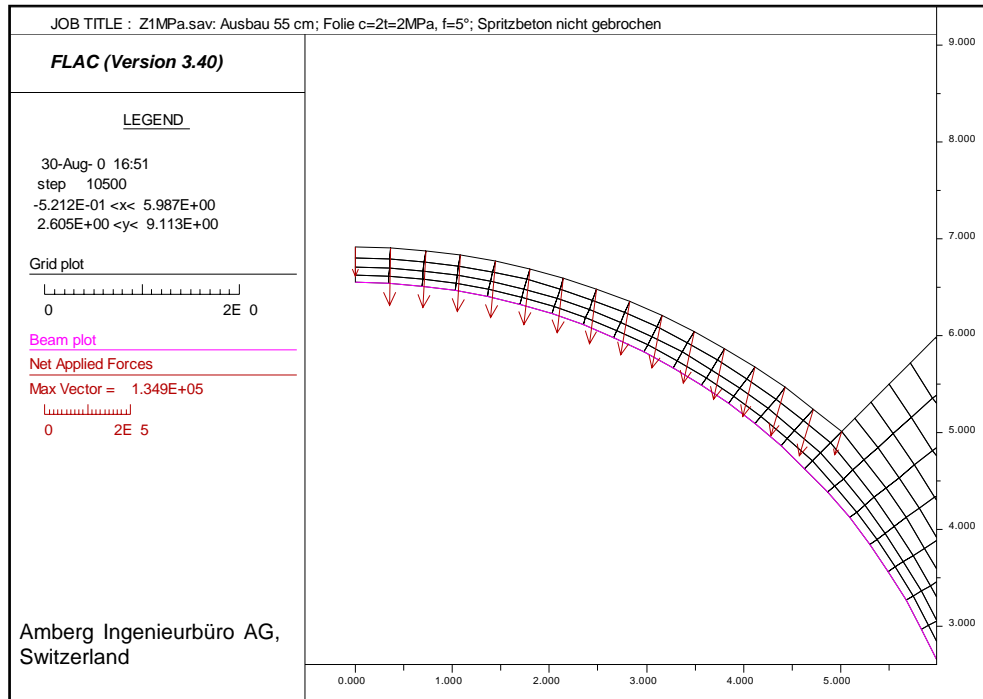


Fig. 3 Elemente des Spritzbetongewölbes und Stabelemente der Verkleidung (Beam plot) sowie Lastvektoren aus dem Auflockerungsdruck (Applied Forces)

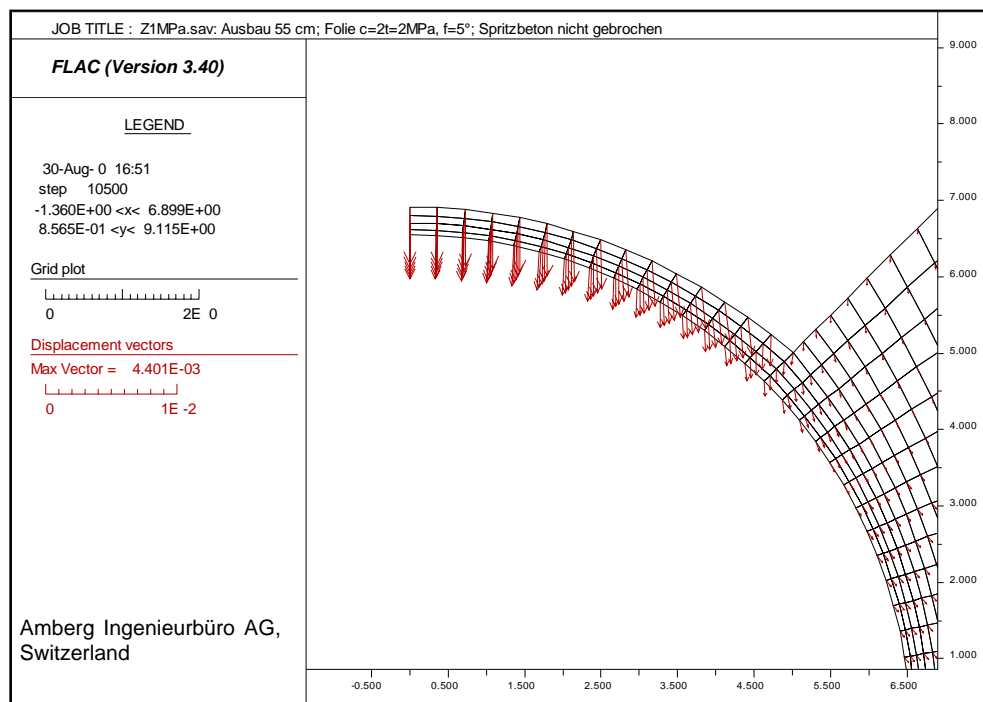


Fig. 4 Berechnung Z1MPa (Haftzugfestigkeit = 1 MPa). Deformationen des Spritzbetongewölbes und der Verkleidung

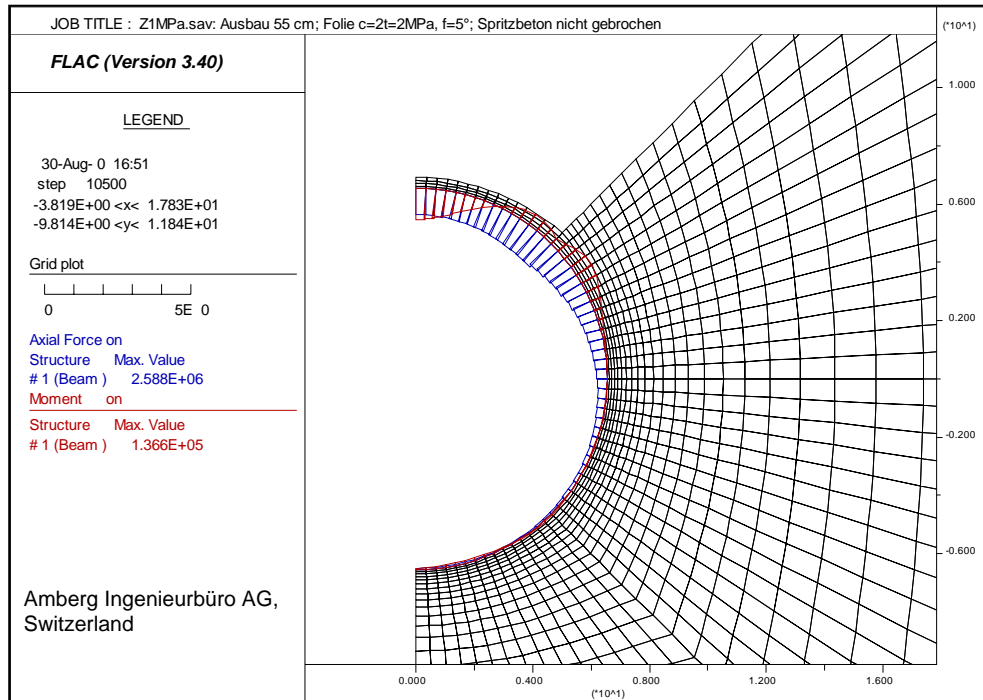


Fig. 5 Berechnung Z1MPa (Haftzugfestigkeit = 1 MPa). **Moment** und **Normalkraft** in der Verkleidung

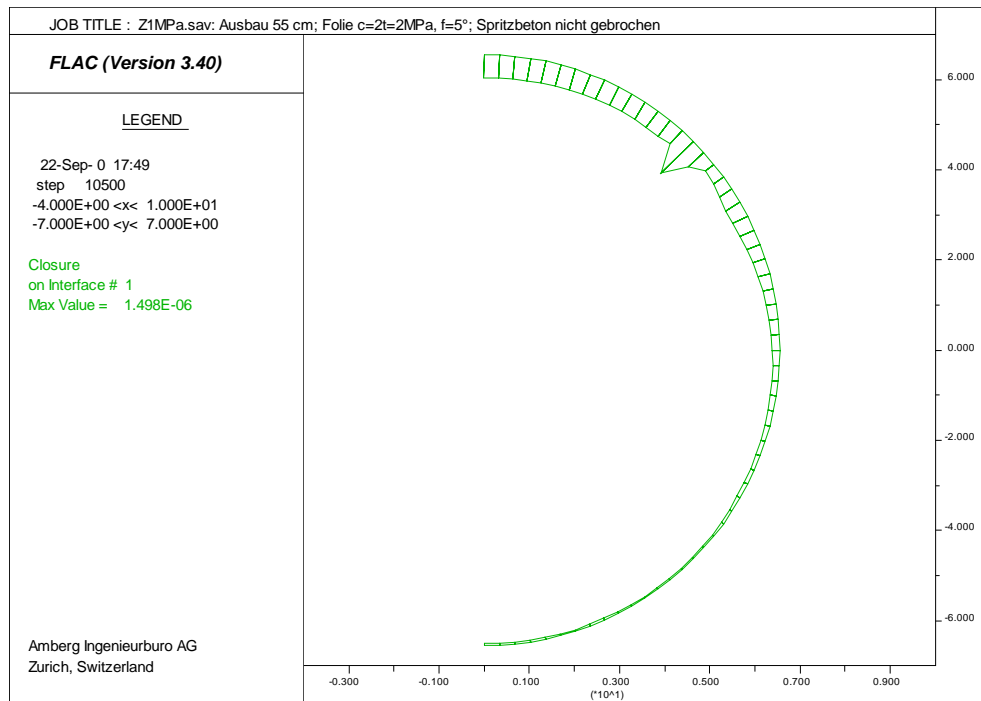


Fig. 6 Berechnung Z1MPa (Haftzugfestigkeit = 1 MPa). Kompression (**Closure**) der Spritzabdichtung. (Max.: 0.0015 mm).

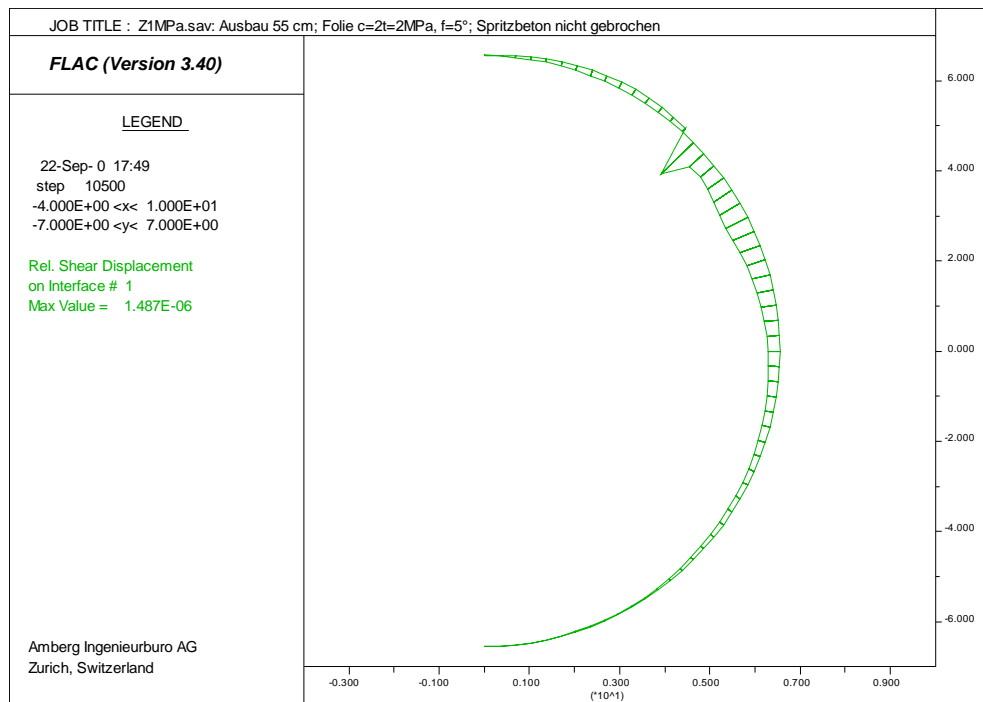


Fig. 7 Berechnung Z1MPa (Haftzugfestigkeit = 1 MPa). Relative Scherbewegung (Rel. Shear Displacement) der Spritzabdichtung. (Max.: 0.0015 mm).

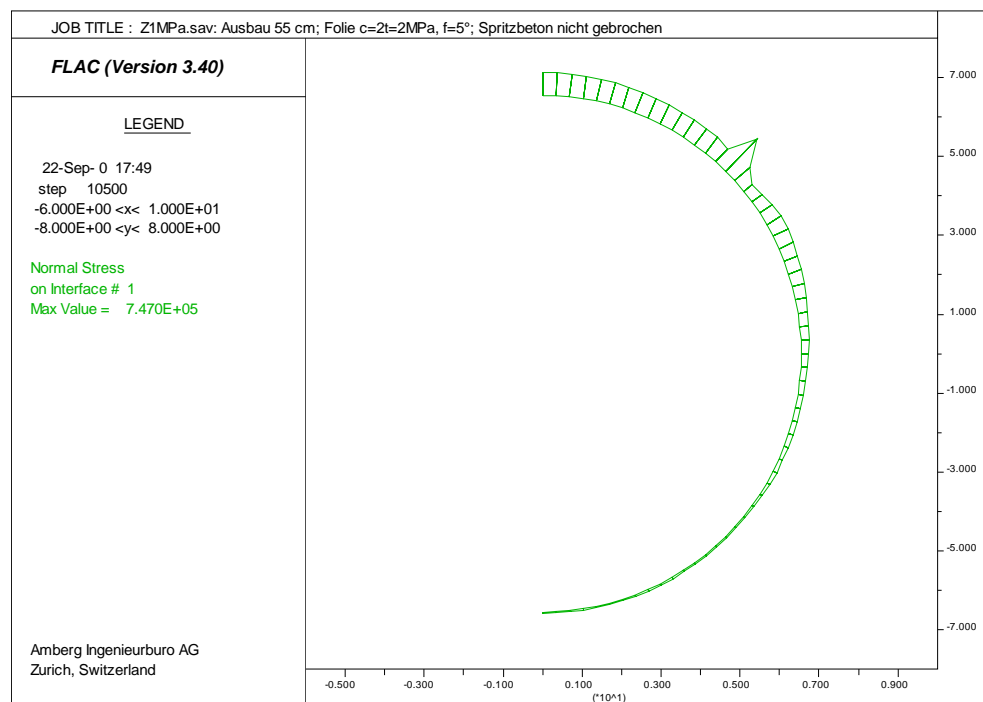


Fig. 8 Berechnung Z1MPa (Haftzugfestigkeit = 1 MPa). Druckspannung in der Spritzabdichtung (Max.: 0.756 MPa).

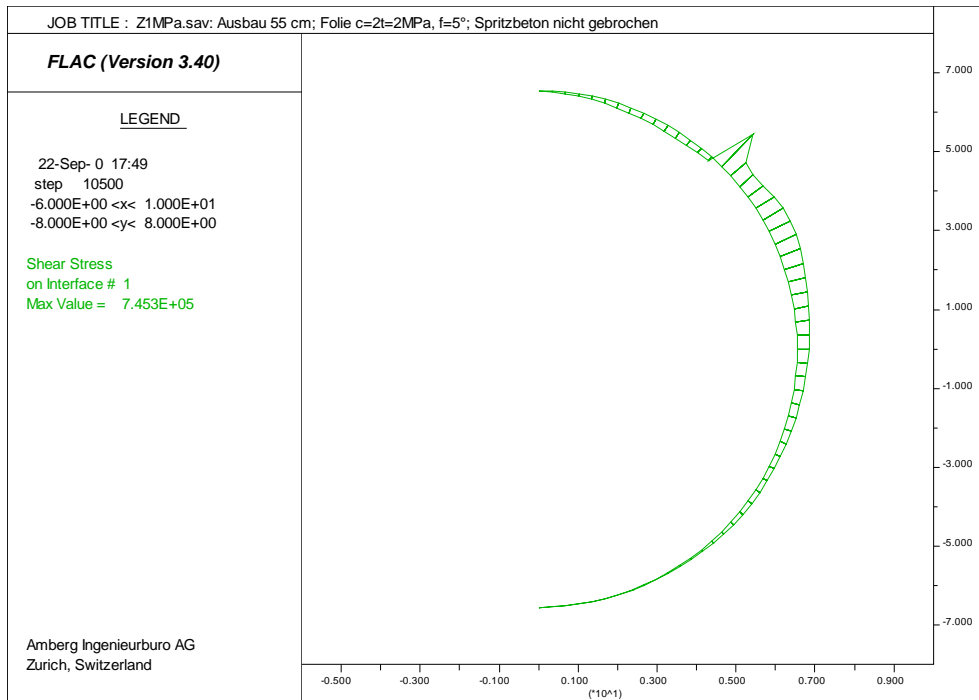


Fig. 9 Berechnung Z1MPa (Haftzugfestigkeit = 1 MPa). Scherspannung in der Spritzabdichtung (Max.: 0.751 MPa).

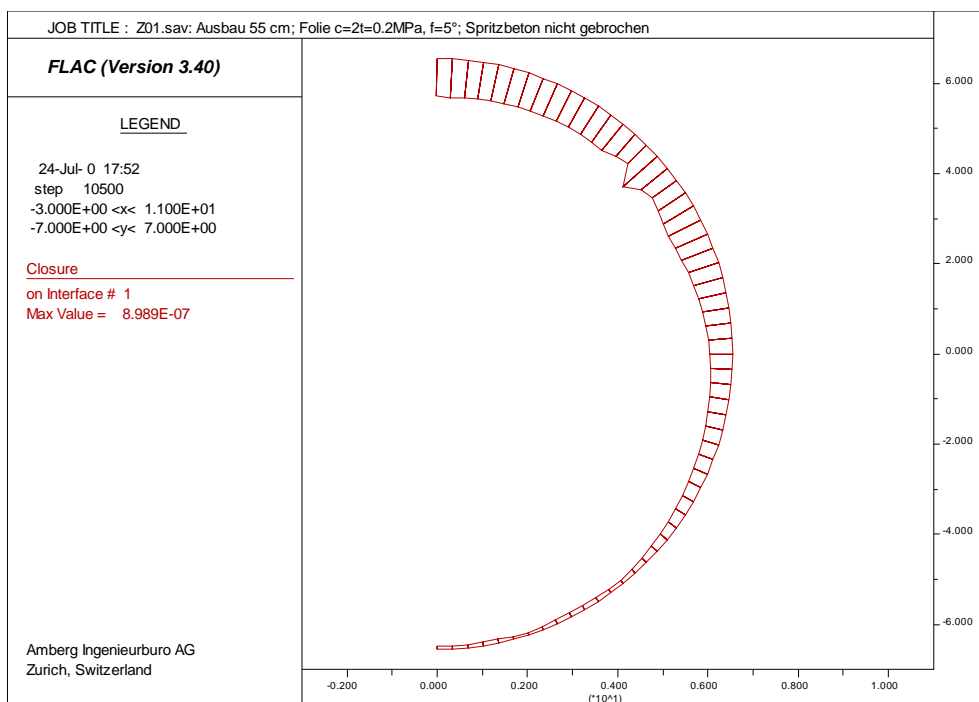


Fig. 10 Berechnung Z01 (Haftzugfestigkeit = 0.1 MPa). Kompression (Closure) der Spritzabdichtung (Max.: 0.0009 mm.)

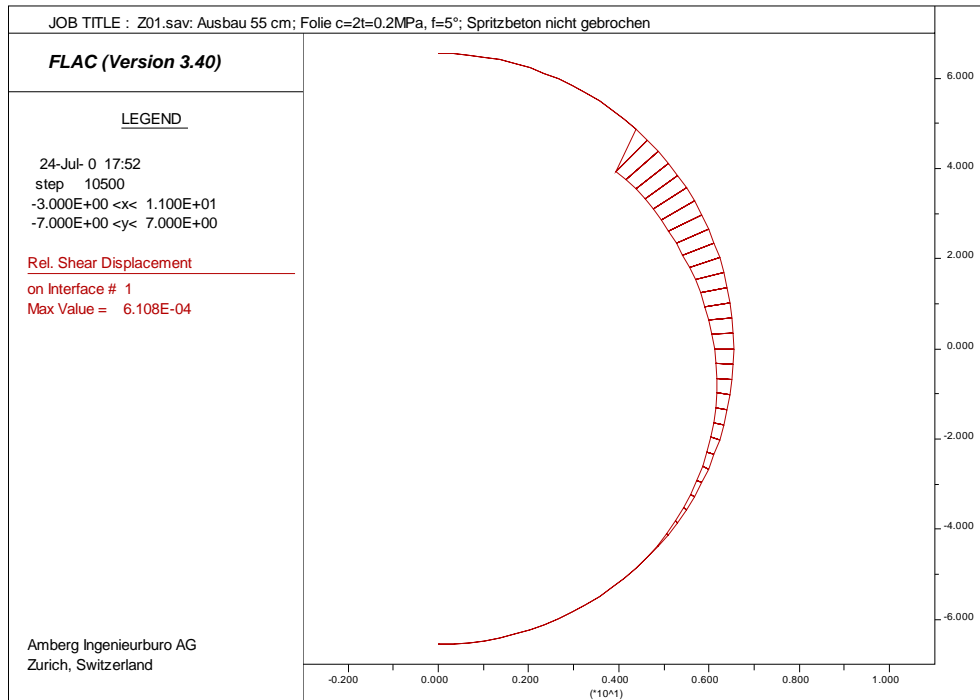


Fig. 11 Berechnung Z01 (Haftzugfestigkeit = 0.1 MPa). Relative Scherbewegung (Rel. Shear Displacement) der Spritzabdichtung (Max.: 0.62 mm).

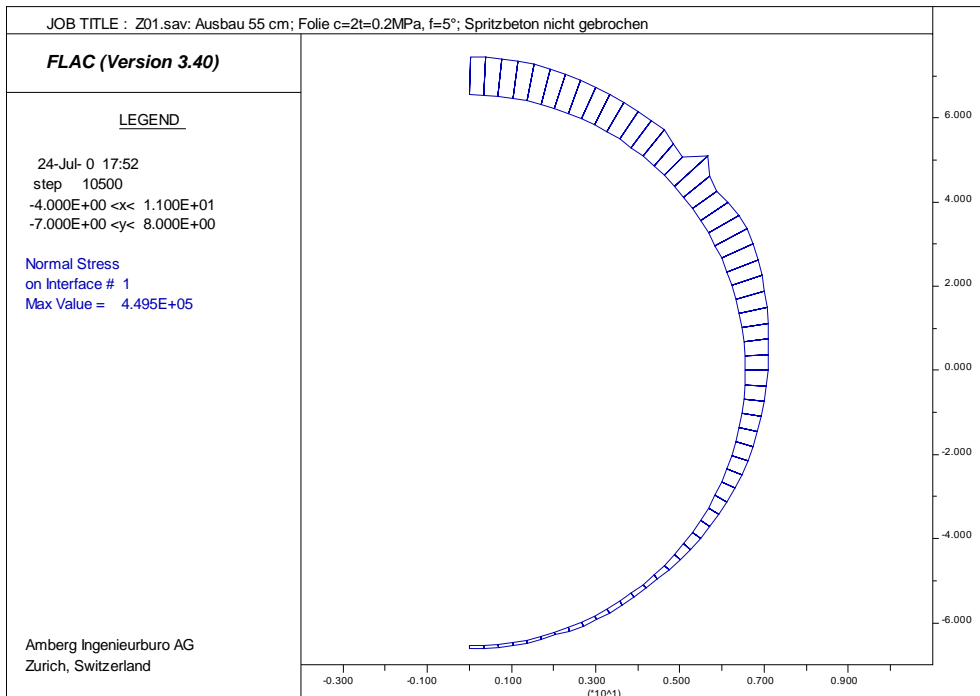


Fig. 12 Berechnung Z01 (Haftzugfestigkeit = 0.1 MPa). Druckspannung in der Spritzabdichtung (Max.: 0.45 MPa).

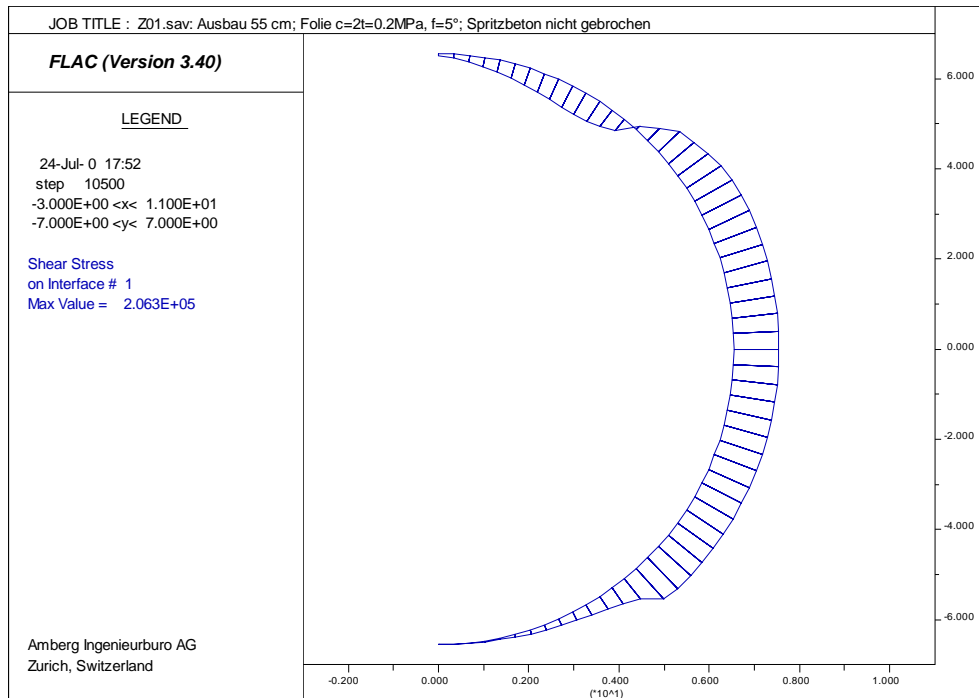


Fig. 13 Berechnung Z01 (Haftzugfestigkeit = 0.1 MPa). Scherspannung in der Spritzabdichtung (Max.: 0.21 MPa).

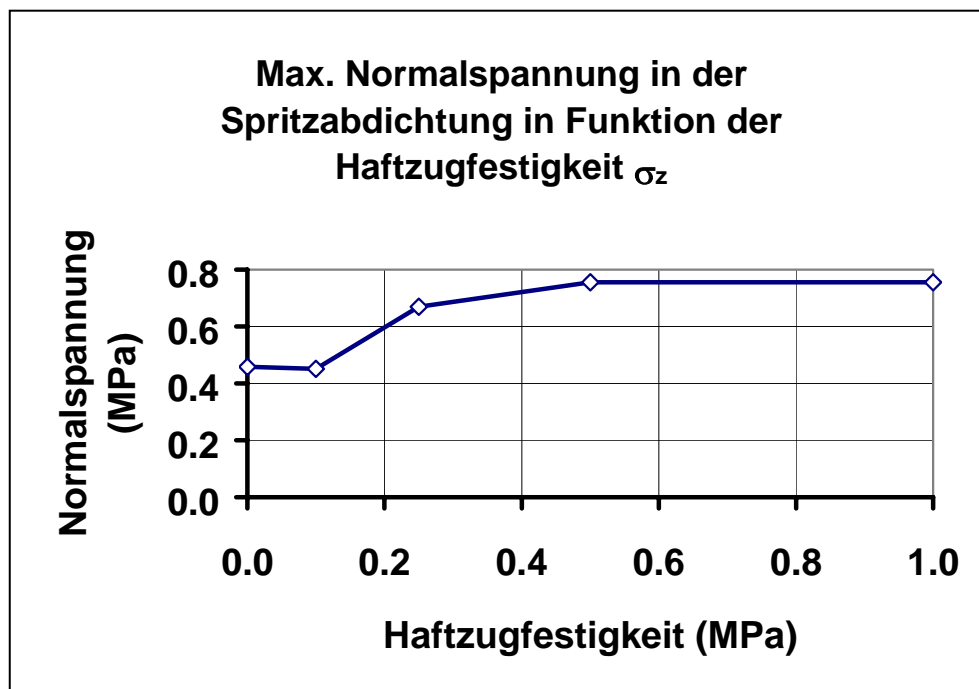


Fig. 14 Maximale Druckspannung in der Spritzabdichtung in Funktion der Haftzugfestigkeit σ_z (s. Tab. 9)

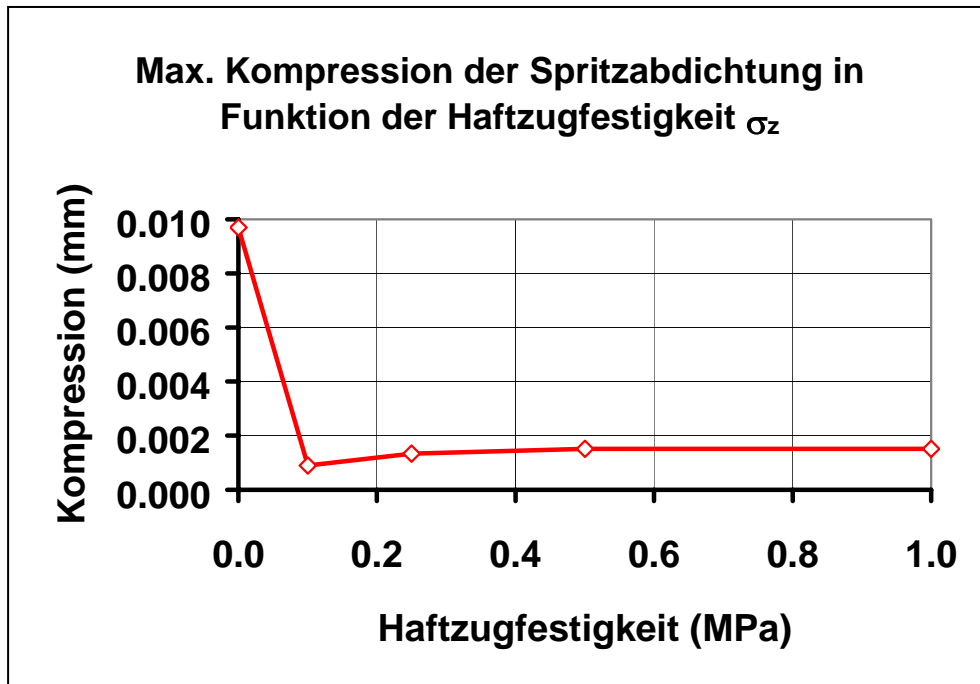


Fig. 15 Maximale Kompression der Spritzabdichtung in Funktion der Haftzugfestigkeit σ_z (s. Tab. 9)

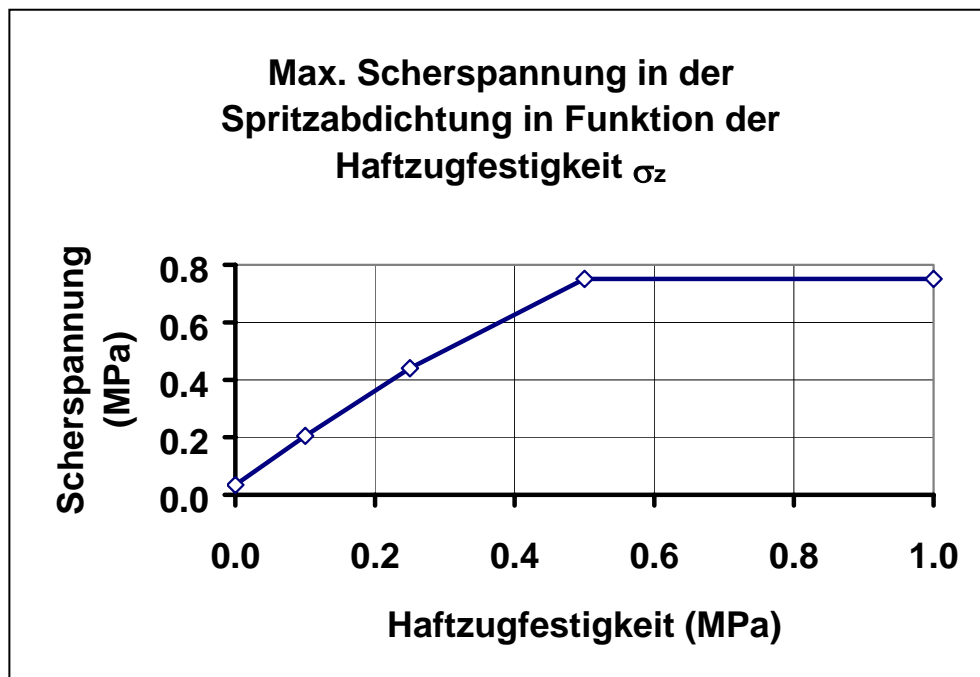


Fig. 16 Maximale Scherspannung in der Spritzabdichtung in Funktion der Haftzugfestigkeit σ_z (s. Tab. 9)

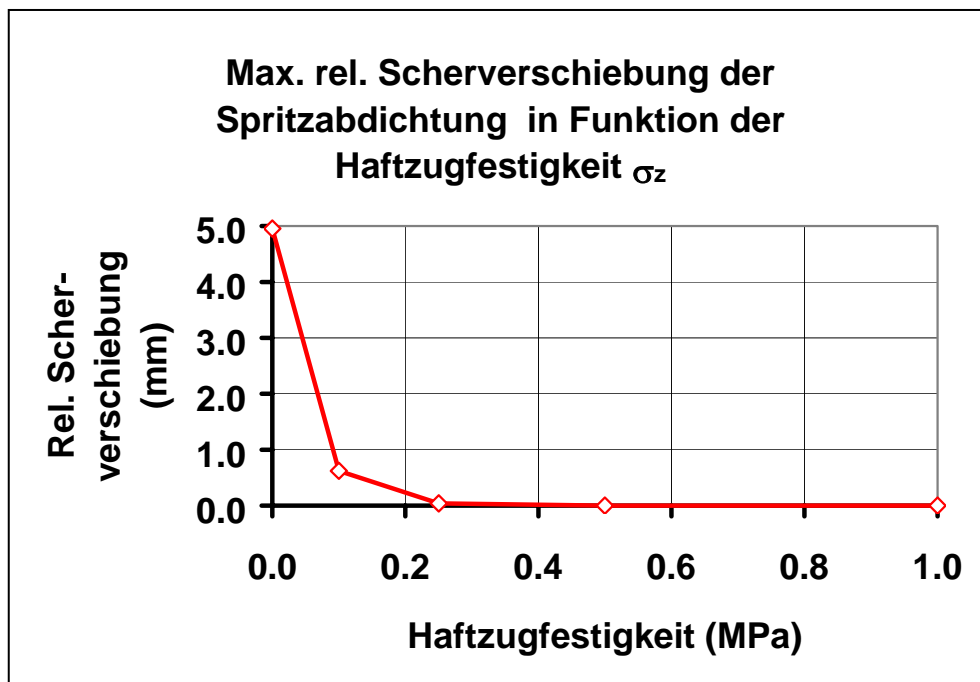


Fig. 17 Maximale relative Scherverschiebung der Spritzabdichtung in Funktion der Haftzugfestigkeit σ_z (s. Tab. 9)

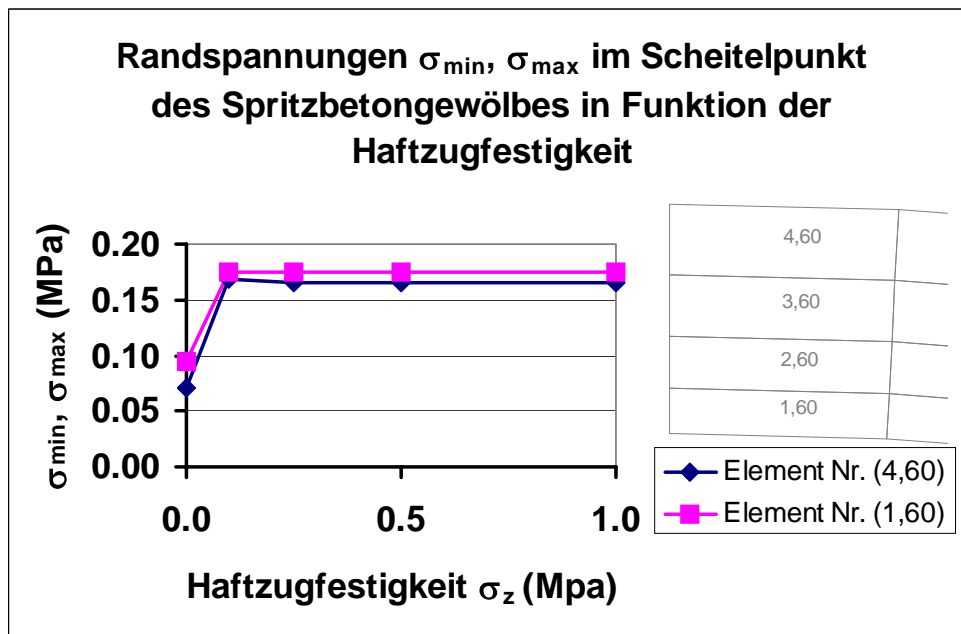


Fig. 18 Randspannungen im Scheitelpunkt des Spritzbetongewölbes in Funktion der Haftzugfestigkeit σ_z der Spritzabdichtung

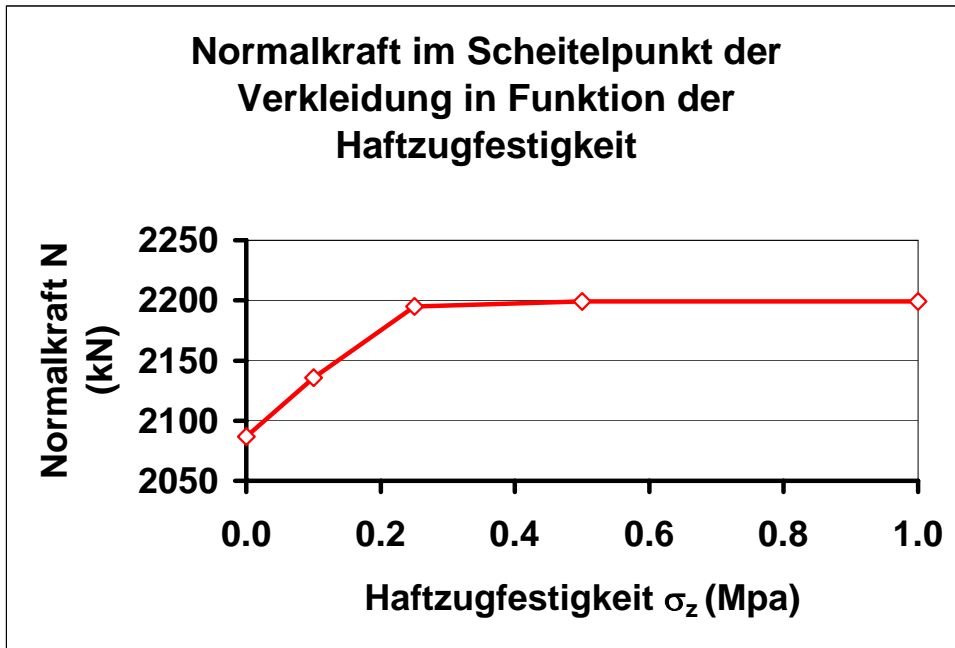


Fig. 19 Normalkraft im Scheitelpunkt der Verkleidung in Funktion der Haftzugfestigkeit σ_z der Spritzabdichtung

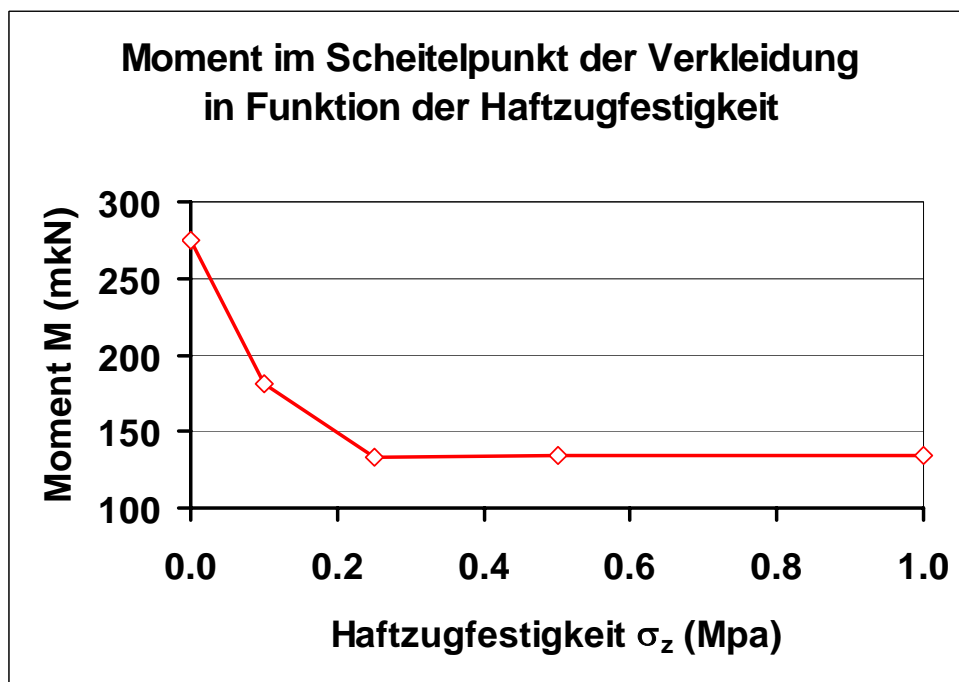


Fig. 20 Moment im Scheitelpunkt der Verkleidung in Funktion der Haftzugfestigkeit σ_z der Spritzabdichtung

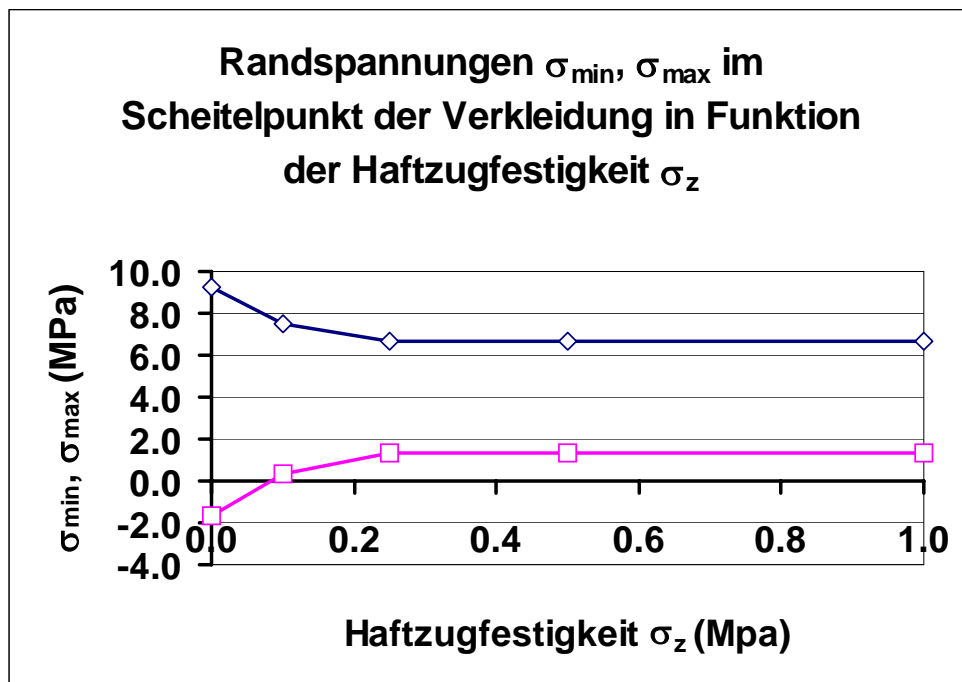


Fig. 21 Randspannungen im Scheitelpunkt der Verkleidung in Funktion der Haftzugfestigkeit σ_z der Spritzabdichtung



Beilage 3

Literaturverzeichnis

- [1] Zwicky P., Technischer Bericht "Tunnelabdichtungen Schweiz", Sarnen, Nov. 1996
- [2] Löw S., Einflüsse der Hydrogeologie auf den Tunnelbau", Fachtagung vom 18.11.98 im VSH Sargans.
- [3] Schneider T. R., Hunkeler F., H. Ungricht, H. C. Schmid, "Auswirkung von Gebirgs- und Betriebswässern und Massnahmen im Untertagebau", TFB-Veranstaltung No. 4411 von 1999, Wildegg
- [4] Kirschke, D., "Neue Tendenzen bei der Drainage und Abdichtung bergmännisch aufgefahrener Tunnel" Bautechnik Nr. 74, Heft 1, Verlag Ernst & Sohn, 1997
- [5] Chabot J. D., Entwässerung bergmännischer Tunnels – neue Tendenzen. Schweizerischer Ingenieur und Architekt, Heft 12 / 2000, März 2000
- [6] Reik G., "Der Tunnel als Drainagerohr, wechselseitige Beeinflussung von Tunnel und Gebirge" technische Universität Clausthal, Fachtagung vom 18.11.98 im VSH Sargans.
- [7] AGMT-Besichtigung Tunnelbauwerke im Kt. GR vom 22.06.1999
- [8] Wegmüller M. C., "Verhindern und Entfernen von Versinterungen in Drainage- und Entwässerungsleitungen in Tunneln, AGMT-Bericht Nr. 96110-10 vom 9. Juni 1998
- [9] AGMT-Arbeitsgruppe Versinterungen "Empfehlungen für die Verhinderungen von Versinterung in den Basistunneln von Alptransit, AGMT-Bericht Nr. 96110-12, 12. Mai 1999

Grundlagen

1.1 Normen und Richtlinien von Fachverbänden

- [1] SIA V280, Kunststoff-Dichtungsbahnen, Fassung 1996
- [2] Richtlinie 853 der Deutschen Bundesbahn, (frühere bez. DS 853), Okt. 1998
- [3] Bundesministerium für Verkehr, Abt. Strassenbau: ZTV-BEL-B Teil 3, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für das Herstellen von Brückenbelägen auf Beton, Dichtungsschicht aus Flüssigkunststoff. S 133 – 138, 1995
- [4] Grenzwerte am Arbeitsplatz 1997. Schweizerische Unfallversicherungsanstalt SUVA, Luzern,