

# **Druckdichte Tunnels mit Kunststoffdichtungsbahnen (KDB)**

Dipl.-Ing. Sebastian Schwaiger  
Ingenieurbüro Müller+Hereth, Freilassing

Dipl.-Ing. Marc Meissner, M.BC.  
Arbeitskreis Tunnelabdichtung e.V.

## **1. Einleitung**

Verkehrstunnel und unterirdische Bauwerke werden immer häufiger unter geologisch und bautechnisch schwierigen Gegebenheiten geplant und ausgeführt. Um die volle Funktionsfähigkeit über einen Zeitraum von mindestens 100 Jahren zu gewährleisten, müssen Tunnelbauwerke gegen die Einwirkung von Grund- und Bergwasser geschützt werden oder der Einwirkung von Grund- und Bergwasser widerstehen. Entsprechend hoch sind die Anforderungen an das Bauwerk und an die Abdichtung gerade im Bezug auf die Lebensdauer und die Funktionstüchtigkeit.

Um den gestiegenen Umweltschutzanforderungen zu genügen und um den Wartungs- bzw. Unterhaltungsaufwand der Tunnelbauwerke zu minimieren werden mehr und mehr Tunnel als undrainierte Tunnel konzipiert. Undrainierte Tunnel sind entweder mit einer druckwasserhaltenden Abdichtung, in der Regel bestehend aus einem Abdichtungssystem mit Kunststoffdichtungsbahnen ausgestattet oder werden als wasserundurchlässige Betonkonstruktion konzipiert. Mit dem vorliegenden Artikel werden nur Tunnels mit Abdichtungssystem mit KDB betrachtet.

Um eine dauerhafte Druckdichtigkeit zu gewährleisten sind folgende Voraussetzungen einzuhalten:

- Dauerhaft beständiges Material der KDB
- Dichte nachprüfbar verschweißte Bahnen untereinander
- Ausreichender Widerstand des Abdichtungssystems gegen alle Einwirkungen beim Bau und im Betriebszustand.

Bisher wurde das Hauptaugenmerk zur Sicherstellung der Funktionsfähigkeit des Abdichtungssystems auf folgende Punkte gelegt:

- Sachgerechten Einbau und Befestigung des Abdichtungssystems
- Dichte Verschweißung der Bahnen untereinander
- Schutz gegen luftseitige Verletzungen beim Einbau der Bewehrung, stellen der Schalung etc.
- Schutz gegen bergseitige Beschädigung der KDB durch ausreichend ebenflächige Spritzbetonoberfläche und durch den Einbau eines Schutz- und Drainagevlieses.

Bei druckdichten Tunnels kommt die Belastung durch den Wasserdruck von außen hinzu. Bei einer bisher (zumindest gedanklich bei den meisten Projektbeteiligten) unterstellten, glatten Außenseite der Ortbetoninnenschale halten KDBs dieser Belastung problemlos stand.

## **2. Übersicht Abdichtungssysteme**

Im Wesentlichen übernehmen Abdichtungsstrukturen im Tunnelbau drei Funktionen:

- Schutz des Verkehrsraums vor Bergwasserzutritten
- Schutz der Tragkonstruktion (Innenschale) im Fall von aggressivem Bergwasser
- Trennung der endgültigen Tragkonstruktion von der Vortriebssicherung zur Vermeidung von Zwängungsspannungen.

Entsprechend den unterschiedlichen hydrologischen Gegebenheiten sowie den bautechnischen Anforderungen werden Abdichtungssysteme in unterschiedliche Kategorien eingeteilt. Grundsätzlich unterscheidet man in Abdichtungssysteme für drainierte - und für undrainierte Tunnels. Des Weiteren wird die Bauweise in die geschlossene (bergmännische) und die offene Bauweise unterteilt.

Die Wahl des Abdichtungssystems wird durch die Faktoren Geologie, Hydrologie und die chemische Beschaffenheit des Bergwassers bestimmt. Die Anforderungen an das Tunnelbauwerk wie zum Beispiel die Dichtigkeitsklasse und die meistens umweltschutzbedingten Vorgaben drainiert oder undrainiert wirken sich ebenfalls auf die Wahl des Abdichtungssystems aus.

Grundsätzlich kann der Schichtenaufbau jedes Abdichtungssystems wie folgt beschrieben werden:

- a) **bergseitiges Schutzgeotextil**  
Da während des Betonierens der Innenschale die KDB gegen den Abdichtungsträger aus Spritzbeton gedrückt wird, ist an dieser Stelle ein Schutz notwendig. Als bergseitiges Schutzgeotextil wird ein mechanisch verfestigter Vliesstoff mit einem Flächengewicht von mindestens  $900 \text{ g/m}^2$  verwendet. In drainierten Tunnels übernimmt das Schutzgeotextil auch die Funktion des flächigen Drainierens zur Vermeidung örtlich begrenzter Wasserdrücke und zur leichteren Ableitung der Bergwasserzutritte in die Drainagen.
- b) **Befestigungssystem**  
Das Befestigungssystem dient der temporären Fixierung des Abdichtungssystems an der Spritzbetonaußenschale. Unabhängig von der Art der Befestigung muss sie so beschaffen sein, dass im Belastungsfall die KDB nicht beschädigt wird. Die Fixierungen müssen mit einer nachgewiesenen Sollbruchstelle ausgerüstet sein.
- c) **Kunststoffdichtungsbahn**  
Kunststoffdichtungsbahnen müssen aus langzeitbeständigen und weichmacherfreien Kunststoffen wie zum Beispiel VLDPE (very low density polyethylene) bestehen, um die geforderte Mindestlebensdauer von mehr als 100 Jahren sicher zu erreichen. In drainierten Tunnels werden mindestens 2 mm - und in druckdichten Tunnels mindestens 3 mm dicke KDB verwendet. KDB im Tunnelbau sind mit einer hellen Signalschicht ausgestattet um Beschädigungen schnell zu finden und die Lichtverhältnisse im Tunnel während der Verlege arbeiten zu verbessern. Die Signalschicht sollte aus artgleichem Kunststoff bestehen, um eine dauerhafte Verschweißung der KDB sicher gewährleisten zu können. Die Dicke der Signalschicht ist kleiner gleich 0,2 mm.
- d) **Fugenband**  
Fugenbänder werden hauptsächlich im Arbeitsfugenbereich als außenliegende Fugenbänder eingesetzt. Sie werden direkt auf die KDB geschweißt und sind deshalb aus dem gleichen Kunststoff wie die KDB. Die Hauptfunktion von außenliegenden Fugenbändern besteht darin, die KDB Dichtebene in abgegrenzte Felder zu unterteilen. Bei einer Undichtigkeit kann die Leckage eingegrenzt und gezielt nachgedichtet werden.

e) Schutzbahn

Bei Druckwasserdichten Tunnels mit einer rundum angeordneten KDB ist im Sohlbereich ein zusätzlicher Schutz der KDB vor Beschädigungen erforderlich. Gebräuchlich sind folgende Schutzsysteme:

- Zusätzliche Kunststoffschutzbahn mit einer Dicke von 3 mm als Schutzbahn. Die Kunststoffschutzbahnen müssen mit der Kunststoffdichtungsbahn verschweißbar sein und sind ebenfalls mit einer Signalschicht ausgestattet
- Einbau einer Bauschutzmatte (je nach Beanspruchung zw. 8 mm und 12 mm)
- Schutzbeton (meist zu aufwändig in der Herstellung).

f) Integriertes Injektionssystem / Hinterlegungssystem

Bei druckdichten Tunnels mit einer Druckhöhe von mindestens 1 Bar (gemessen ab Tunnelsohle) wird gem. ZTV-ING. ein integriertes Kontroll- und Injektionssystem vorgesehen. Gemäß ZTV-ING. soll das System als Kontrollsystem eingebaut werden. Undichtigkeiten können durch Wasseraustritte aus den Kontroll-/ Injektionsöffnungen unmittelbar festgestellt werden. Im Schadensfall (Undichtigkeit der Dichtungsbahn) soll mit diesem System die Möglichkeit geschaffen werden, das jeweils schadhafte Dichtungsfeld durch verpressen mit Kunstharz oder Gel abzudichten. Eine Variante des in der ZTV-ING. vorgeschriebenen Systems sieht die Hinterlegung des Innenschalenblockes mit Zement (Suspension) vor, noch ehe die Bergwasserdrainage verpresst wird und der Wasserdruck auf die KDB wirken kann (vollständige Betonage der Innenschale).

Die spezifischen Eigenschaften aller Materialien werden insbesondere für den deutschen Tunnelbau in der ZTV-ING TL/TP definiert.

Nachfolgend werden die wichtigsten Systeme der hier relevanten geschlossenen Bauweise tabellarisch aufgeführt:

<b>Geschlossene Bauweise</b>						
Darstellung der Tunnel Abdichtungssysteme mit steigenden Abdichtungsabforderungen und steigender Dichtungssicherheit						
Nr. (mit steigenden Abdichtungs- anforderungen)	hydrostatischer Druck über Tunnelsohle in m WS	KDB- Abdichtungs- geometrie	Abdichtungssystem (chemischer Betonangriff, XA-Expositionsklasse)		erforderliche Zusatzmaßnahmen	
			schwach, mäßig XA1, XA2	stark, XA3	Fugenbänder (innen- oder außenliegend)	integriertes Injektionssystem
1	ohne	-	WUB-KO	-	ja	nein
2	ohne	Regenschirm	KDB 2mm	-	nein	nein
3	ohne	Rundum	-	KDB 2mm	nein	nein
4	< 10	-	WUB-KO	-	ja	nein
5	< 10	Rundum	KDB 3mm		ja	nein
6	< 30	-	WUB-KO	-	ja	nein
7	< 30	Rundum	KDB 3mm		ja	ja
8	< 60	Rundum	WUB-KO + KDB 3mm (optional KDB 4mm)		ja	ja
9	< 60	Rundum	WUB-KO + KDB 3mm + Leckageortungssystem		ja	ja
10	< 60	Rundum	Doppellagige KDB (3mm + 2mm)		ja	ja
11	< 60	Rundum	Doppellagige KDB (3mm + 2mm) + Leckageortungssystem		ja	ja
12	> 60	Rundum	WUB-KO + Doppellagige KDB (3mm + 2mm)		ja	ja
13	> 60	Rundum	WUB-KO + Doppellagige KDB (3mm + 2mm) + Leckageortungssystem		ja	ja

(Es handelt sich um eine qualitative Klasseneinteilung der verschiedenen Tunnel Abdichtungssysteme. Die Planung und Spezifizierung sollte projektspezifisch und unter Berücksichtigung der jeweils gültigen Norm oder Empfehlung (ZTV-ING, RVS 8T, SIA 272, DB-Rili 853, EAG-EDT) erfolgen.)

Tabelle 1: Übersicht Abdichtungssysteme (AK Tunnelabdichtung e.V.)

### Beispielhafte Ausbildung von Abdichtungssystemen mit KDB im Tunnelbau

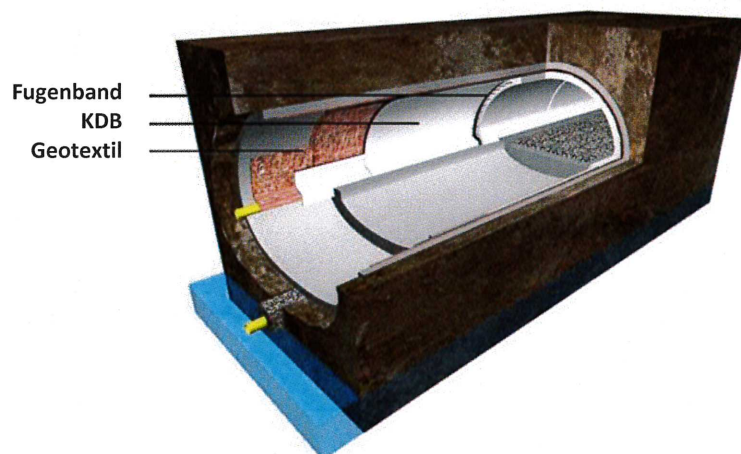


Abbildung 1: Bergmännischer Tunnel, drainiert

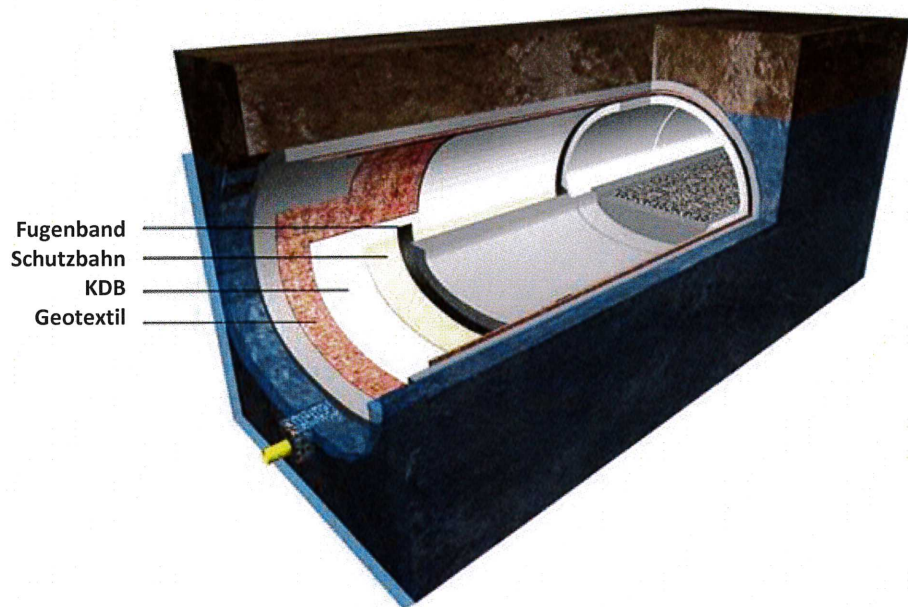


Abbildung 2: Bergmännischer Tunnel, druckdicht

### Abdichtungsmaterialien KDB

In der Regel werden im Tunnelbau verschweissbare thermoplastische Dichtungsbahnen eingesetzt. Es werden im Wesentlichen folgende zwei Arten von KDB-Materialien eingesetzt:

- a. Thermoplastisches Polyolefin (TPO)
 

Ein Polyolefin ist ein Polymer aus einem einfachen Olefin mit der allgemeinen Formel  $C_nH_{2n}$ . Zum Beispiel entsteht das Polyolefin Polyethylen durch Polymerisieren des Olefins Ethylen. Da Polyolefine weitestgehend reine Kohlenwasserstoffverbindungen sind, ist es nicht möglich diese zu verkleben. Sie können ausschließlich durch thermoplastische Fügeverfahren geschweißt werden. Dichtungsbahnen im Tunnel basieren meist auf Polyethylen (VLDPE Very Low Density Polyethyl). Sie haben eine natürliche Flexibilität und können daher ohne Weichmacher hergestellt werden. TPO-Dichtungsbahnen für den Tunnelbau sind sehr widerstandsfähig gegen Chemikalien und ökologisch unbedenklich. Die erwartete Lebensdauer dieser Art von KDB beträgt mehr als 100 Jahre.

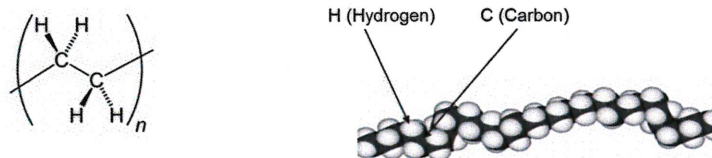


Abbildung 3: Chemische Formel Polyolefin

- b. Polyvinylchlorid, weich (PVC-P)  
 Polyvinylchlorid (PVC-U) ist ein von Natur aus harter spröder thermoplastischer Werkstoff der erst durch den Einsatz von Weichmachern für die Verarbeitung als KDB geeignet ist. Für Kunststoffdichtungsbahnen im Tunnelbau werden aus Kostengründen in der Regel Monomer-Weichmacher verwendet. Weichmacher können aus PVC-P KDB entweichen. Dabei tritt eine Versprödung und Schrumpfung des Ausgangsmaterials ein. Die Geschwindigkeit wird durch innere und äußere Faktoren beeinflusst. Die inneren Faktoren betreffen hauptsächlich die Art des Weichmachers. So zum Beispiel weisen PVC-P Dichtungsbahnen mit Polymerweichmachern eine höhere Lebensdauer als Monomer Weichmacher auf. Die äußeren Einflüsse sind Umweltfaktoren wie die Umgebungstemperatur, Kontakt mit Luft, Flüssigkeiten, Chemikalien und Mikroorganismen.

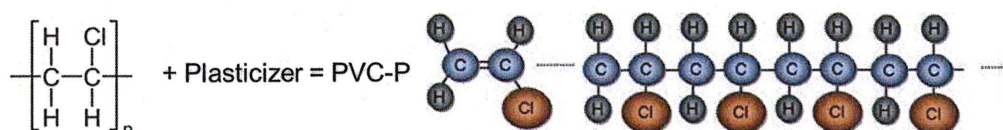


Abbildung 4: Chemische Formel PVC

- c. Empfehlung des Einsatzes von Dichtungsbahnen aus PVC und TPO (VLDPE).  
 Die nachfolgenden Empfehlungen des Einsatzes von Dichtungsbahnen aus PVC und TPO werden von folgenden Parametern bestimmt:
- konstante Bauwerkstemperatur
  - dauerhafter Druck auf die Abdichtung
  - chemische Beschaffenheit und Strömungsintensität des Bergwassers.

		PVC-P / TPO	TPO
temperature resistance	[°C]	<23°C	>23°C
pressure resistance	[N/mm <sup>2</sup> ]	<1N/mm <sup>2</sup>	>1N/mm <sup>2</sup>
chemical resistance	[mg/l]	Sulphates <1500 mg/l Sodium <100 mg/l Chloride <50 mg/l	Sulphates >1500 mg/l Sodium >100 mg/l Chloride >50 mg/l
water flow intensity		Medium water flow	Strong water flow

Quelle: Bindschedler, Urs Dauerhaftigkeit von flexiblen Abdichtungssystemen

Tabelle 2: Empfehlung zur Materialauswahl von KDB

In Tunnelprojekten werden weltweit beide Materialien eingesetzt. Der Vorteil von PVC-P ist die höhere Flexibilität und die leichtere Verschweißbarkeit. Im Hinblick auf im Allgemeinen geforderte Lebensdauer der Tunnelbauwerke von mindestens 100 Jahren und unter Berücksichtigung, dass eine Sanierung oder ein Austausch undichter KDB nicht bzw. nur mit erheblichem Aufwand möglich ist, sollten für Verkehrstunnelbauwerke aus Gründen der Dauerhaftigkeit TPO-Dichtungsbahnen verwendet werden.

Die Kosten für das Abdichtungssystem betragen durchschnittlich ca. 3 % der Bauwerkskosten. Der Materialeinfluss zwischen PVC-P und TPO wirkt sich in der Gesamtbetrachtung mit ca. 0,5 % der Bauwerkskosten aus. Verglichen dazu können Reparatur- bzw. Sanierungsmaßnahmen ein Vielfaches betragen. Während der Sanierung ist meist nur eine eingeschränkte Nutzung des Tunnelbauwerkes möglich.

### 3. Anforderungen an die Verlegung der Dichtungsbahn

Vor Beginn der den eigentlichen Abdichtungsarbeiten wird die Qualität des Spritzbetonabdichtungsträgers überprüft. Die Anforderungen an den Abdichtungsträger länderspezifisch in den jeweiligen Richtlinien (ZTV-ING Teil 5 Abschnitt 1, RVS 8T) geregelt. Es gelten folgende Anforderungen gem. ZTV-ING<sup>1</sup>:

- Zuschlagstoffe aus Kies (Rundkorn) oder kubisch gebrochenem Korn (Edelsplitt),
- Dicke mindestens 3 cm,
- Größtkorn maximal 8 mm ZTV-ING,
- Unebenheiten dürfen ein Maß von 1:20 (Tiefe zu Basis), das entspricht einer Neigung von 1:10, nicht überschreiten,
- Mindestradius der Ausrundungen von Unebenheiten und bei Nischen, Anschlüssen und Pannenbuchten, 20 cm,
- ausreichende Festigkeits- und Formbeständigkeit,
- alle Wasserzutritte müssen in die Dränage eingeleitet werden.

Die Anforderungen nach RVS 8T sind vergleichbar.

Die Eigenschaften des Abdichtungsträgers müssen auf die Befestigungsmittel des Abdichtungssystems abgestimmt sein. Für Blockfugenbereiche mit Fugenbändern sollte der Abdichtungsträger radial in Fugenbandrichtung gleichmäßig gekrümmt sein. Ein wichtiger Punkt der Eigenschaft des Abdichtungsträgers ist die Oberflächenrauigkeit. Diese ist derzeit noch nicht in den Regelwerken definiert oder festgelegt worden. Bei der Abnahme des Abdichtungsträgers werden derzeit die Anforderungen an die Rauigkeit subjektiv festgelegt. Derzeit beschäftigt sich der Arbeitskreis AK 5.1 der Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT) mit diesem Thema. Eine Definition oder Lösung dieser Problematik wird entsprechend mittelfristig präsentiert werden können. Um den Baustellenablauf nicht unnötig zu behindern, sollte in diesem Zusammenhang vor Abdichtungsbeginn eine Referenzfläche von allen Beteiligten (Bauüberwachung, Baufirma, Abdichtungsunternehmen) begutachtet und abgenommen werden.

---

<sup>1</sup> ZTV-ING Teil 5 Abschnitt 1 - 12/2007



Nach Abnahme des Abdichtungsträgers kann mit dem Einbau des Abdichtungssystems begonnen werden. Im druckdichten Tunnel besteht die Abdichtung aus einem bergseitigem Geotextil mit einem Flächengewicht von  $>900 \text{ g/m}^2$  und einer Kunststoffdichtungsbahn (KDB) mit  $>3 \text{ mm}$ . Die KDB ist mit einer Signalschicht ausgestattet. Zur temporären Befestigung werden Rondellen verwendet.

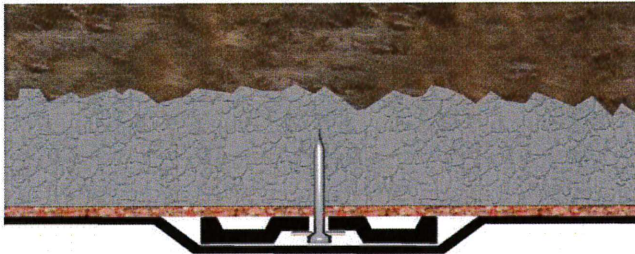


Abbildung 5: Befestigungsrondelle



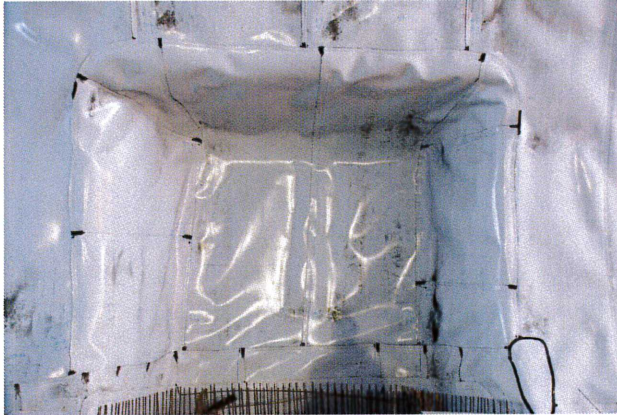
Die Rondellen müssen mit einer nachgewiesenen Sollbruchstelle ausgerüstet sein, um Beschädigungen während des Betonierens der Innenschale zu vermeiden.

Da es sich bei dem Abdichtungsträger um eine ungleichmäßig wellige Oberfläche handelt, sollten die Geotextilien und die KDB eine Rollenbreite von circa 2 m aufweisen, um eine möglichst flächennahe Verlegung zu gewährleisten.



Abbildung 6: Befestigung Schutzvlies

Nach Verlegung werden die KDB mit Schweißautomaten miteinander verschweißt. Die Nähte werden als prüfbare Doppelnähte mit Prüfkanal ausgeführt, die im Nachgang mittels Luftdruckprüfung auf ihre Dichtigkeit geprüft werden.



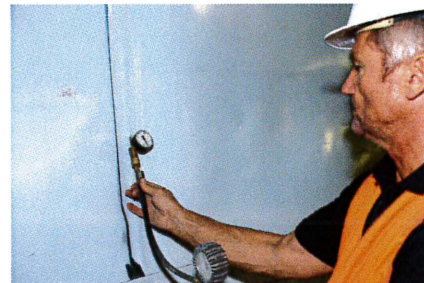
Richtig  
Abbildung 7: Abdichtung von Nischen



Falsch



Abbildung 8: Schweißung und Prüfung



Um das Abdichtungsergebnis zu verbessern sollten automatengeführte Doppelnähte möglichst auch in Verschneidungs- und Nischenbereichen ausgeführt werden. Der Nahtanteil an handgeführten Nähten sollte minimiert werden.

- Güteüberwachung der Installation der Abdichtung und die Qualitätssicherung der Produkte

Die Ausführung der Installationsarbeiten darf ausschließlich von erfahrenen Fachunternehmen durchgeführt werden. Der Nachweis der erforderlichen Kompetenz kann durch eine entsprechende Güteüberwachung geführt werden. Zum Beispiel besteht die Möglichkeit für Tunnel Abdichtungsunternehmen sich im Arbeitskreis für Tunnelabdichtung e.V. entsprechend der aktuell gültigen Überwachungsordnung zertifizieren zu lassen. Mit der Prüfung ist derzeit die STUVA e.V. beauftragt.

Die Qualitätssicherung der Produkte und der Bauausführung des Dichtungssystems erfolgt grundsätzlich durch<sup>2</sup>:

- Qualitätssicherungsplanung (QS-Plan)
- Eignungsprüfung (Eignungsnachweis)
- Eigenüberwachung der Produktion
- Fremdüberwachung der Produktion
- Eigenüberwachung der Bauausführung einschließlich Baustoffeingangsprüfung
- Örtliche Bauüberwachung
- Fremdüberwachung der Bauausführung

Das Qualitätssicherungssystem sollte sich zur Erreichung der gewünschten dauerhaften Dichtwirkung lückenlos mit der beginnenden Rohstoffeingangskontrolle des Dichtungsbahnherstellers bis zur gemeinsamen Schweißnahtprüfung und Abnahme der Abdichtungsarbeiten erstrecken.

#### **4. Bisherige Erfahrungen mit druckdichten Tunnels**

Bei druckdichten Tunnels muss die Innenschale neben dem Gebirgsdruck und dem Eigengewicht auch die zum Teil erheblichen Wasserlasten aufnehmen. Aus statischen Gründen sind daher meist dickere, und stärker bewehrte Innenschalen als bei drainierten Tunnels notwendig.

Es ist eine absolute Dichtheit der KDB erforderlich, da jede Schadstelle auch zu einem Schaden führt. Bei drainierten Tunnels führt nicht jede Schadstelle in der Abdichtung automatisch zu einem undichten Tunnel.

Grundsätzlich können Schadensbilder entsprechend ihrer Ursachen in primäre (vor Betonage Innenschale) und sekundäre (nach Betonage Innenschale) Einwirkungen eingeteilt werden. Der maßgebende Unterschied besteht darin, dass vor der Betonage noch eine direkte Eingriffsmöglichkeit besteht, sofern der Schaden erkannt wird.

Nach der Betonage kann dann nur noch auf die vorbereiteten, bereits eingebauten Systeme zurückgegriffen werden. Weiterhin besteht lediglich die indirekte Möglichkeit über Leckagen eine Undichtigkeit in der Abdichtung zu erkennen. Die genaue Ortung der Fehlstelle ist in der Regel nicht möglich.

---

<sup>2</sup> Empfehlungen zu Dichtungssystemen im Tunnelbau (EAG-EDT) - 2005

Folgende primäre Schadenbilder können auftreten (und wie folgt beseitigt werden, in Klammern):

- Fehlerhafte Dichtungsbahnen (Qualitätssicherung der Produkte, werks- und bauseitig)
- Mangelhafte Installation (Qualitätssicherungsplan, Einsatz güteüberwachter Tunnel Abdichtungsunternehmen)
- Beschädigung der Abdichtung während des Bewehrungseinbaus (Partieller Rückbau Bewehrung und Sanierung der Schadstelle mittels verschweißten Zuschnitt durch Warmgasextrusionsschweißung).

Mögliche sekundäre Schadensbilder stellen sich wie folgt dar:

- Nicht ausreichende Ebenheit des Abdichtungsträgers, herausstehende Ankerköpfe oder zu hohe Rauigkeit des Abdichtungsträgers – während des Betonagevorgangs wird die KDB an den Abdichtungsträger gepresst. Dabei können Beschädigungen an der KDB auftreten.
- Die Innenschale wird nicht ausreichend ausbetoniert. Der Wasserdruck presst die KDB auf die Oberfläche der Innenschalenaußenseite. Dabei können Beschädigungen auftreten, wenn keine glatte Oberfläche hergestellt wurde.

Die Maßnahmen zum Schutz der KDB bis inkl. Einbau des Betons entsprechen den bekannten Vorsichtsmaßnahmen bei drainierten Tunnels. Im Folgenden soll deshalb insbesondere auf die mögliche Beschädigung der Abdichtung nach dem Einbau der Innenschale eingegangen werden.

Beobachtung bei druckdichten Tunnels:

Auch in Tunnels die nach dem Verpressen der Baudrainage zunächst dicht waren, traten in manchen Fällen, insbesondere bei hohen Wasserdrücken, nach einigen Wochen oder Monaten Undichtigkeiten auf.

Ursache:

Die Ursache der Leckagen nach dem Aufstau des Tunnels ist in den allermeisten Fällen in Fehlstellen an der Außenseite der Innenschale zu suchen.

Der Wasserdruck presst die KDB von außen gegen die Innenschale und damit gegen evtl. vorhandene Fehlstellen. Durch die ständige und nachdrängende Wasserlast besteht die Gefahr von Beschädigungen, die z.T. auch erst nach einigen Wochen oder Monaten auftreten können. Als Fehlstellen an der Außenseite der Tunnelinnenschale sind insbesondere zu nennen:

- „Kiesnester“ durch unsachgemäßen Betoneinbau, Entmischung und/oder schlechter Verdichtung
- Fehlender Beton und freiliegende Bewehrung, insbesondere bei hohen Bewehrungsgehalten
- Lunker (insbesondere in der oberen Querschnittshälfte kann die Luft aus dem Beton nicht entweichen und bildet Lunker).

Die Verdichtung des Betons erfolgt überwiegend mit Schalungsrüttlern, die nur eine begrenzte Wirkungstiefe aufweisen. Deshalb ergeben sich die o.g. „Problemstellen“ verstärkt bei:

- Großen Innenbetondicken
- Hohen Bewehrungsgehalten
- Unterbrechungen bei der Betonage (z.B. Geräteschäden, kontinuierliche Betonlieferung nicht gewährleistet, etc.)
- Schlecht verarbeitbarem Beton (Rezeptur)
- Im Beton vorhandene Luftblasen führen an der Abdichtungsfolie im First- und Ulmenbereich zu Lunkerbildung, da die Luft nicht entweichen kann (ähnlich dem Ulmeneinzug an der Tunnelinnenseite).

Durch die nach dem Verpressen der Baudrainage auftretende Wasserdruckbelastung auf die KDB wird diese auf eine unebene äußere Innenschalenoberfläche gedrückt. Es besteht die Gefahr, dass die KDB dadurch unmittelbar, möglicherweise jedoch erst nach Monaten beschädigt wird.

Ursachenanalyse:

- Belastung der KDB im Bau- und Endzustand
  - Bauzustand: Betonierdruck, Schutz durch bergseitiges Vlies, ausreichende Ebenflächigkeit des Abdichtungsträgers  
Zerrungen beim Betonieren, Schutz durch sorgfältige, an das Ausbruchprofil gut angepasste Verlegung der Folie.
  - Endzustand: Wasserdruck, Folie wird ohne weiteren Schutz gegen Innenschale gedrückt. Oberflächenbeschaffenheit der Außenseite der Innenschale häufig nicht glatt, sondern Unebenheiten, freiliegende Bewehrung, Kiesnester und Lunker (begünstigt durch dicke Innenschalen, hohe Bewehrungsgehalte, ungenügende Verdichtungsmöglichkeit, erschwerte Einbaubedingungen des Betons, Gefahr von Entmischung, „eingesperrte Luftblasen“).

Beschädigungen des Abdichtungssystems können sich wie folgt darstellen:



Abbildung 9: Beispiel für freiliegende Bewehrung<sup>3</sup>

- Gegenmaßnahmen und Effekte  
Normung: Vlies 900 g/m<sup>2</sup> an Stelle 500 g/m<sup>2</sup> - Schutz gegen rauen Spritzbeton bei Belastung durch Betonierdruck, Erhöhung der Drainagewirkung  
Dickenmessung Innenschale vor dem Verpressen der Baudrainage – Erkennen von zu geringen Betonstärken und Gefahr freiliegender Bewehrung an der Außenseite, Sanierung durch anbohren der Fehlstelle und nachträgliches Verpressen (hohe Verletzungsgefahr der KDB während des Anbohrens)
- Sanierungsansätze  
Problem: Ortung Fehlstelle (WU Beton – KDB)  
Ein wesentlicher Vorteil der WU-Beton Innenschale gegenüber einem KDB Abdichtungssystem ist die leichtere Lokalisierung von Fehlstellen. Dort wo die WU-Beton Innenschale undicht ist, tritt entsprechend das Wasser in den Tunnel ein. Bei einem KDB Abdichtungssystem können Fehlstelle und Wassereintritt in den Tunnel unter Umständen weit voneinander entfernt sein.

Sanierung WU-Beton: Verpressen vorhandener Risse

Sanierung Folie: Aktivierung Fugenbänder über Verpressschläuche, flächige, blockweise Injektion mit Zementsuspension, Gel od. Kunstharz; teuer, zeitaufwendig  
Die Grundlage einer effektiven Sanierung ist eine möglichst genaue Lokalisierung der Fehlstelle. Ein wichtiges Element hierfür ist die Segmentierung beziehungsweise Abschottung durch die außenliegenden Arbeitsfugenbänder im Blockfugenbereich. Die Schottfunktion kann jedoch nur bei vollkommener Einbettung der Fugenbandstege in den Innenschalenbeton erreicht werden. Um dies sicherzustellen werden die Fugenbänder mit Entlüftungs- und Nachbetoniereinrichtungen versehen. Nach vollständiger Betonage der

---

<sup>3</sup> Bilfinger Berger AG, Zentrales Labor für Baustofftechnik, Bericht: Impact Echo

Innenschale werden die Fugenbänder aktiviert, das heißt mittels Zementsuspension nachbetoniert. Danach kann der entsprechend lokalisierte Block vollflächig nachgedichtet werden. Als gängige Variante kommt die Schleierinjektion mit Acrylatgel zum Tragen. Sollten Einzelrisse bei zum Beispiel einer WU-Beton Innenschale saniert werden, kann dies durch eine flexible oder kraftschlüssige Rissinjektion mittels Acrylatgel, Injektionsharz auf Polyurethan- oder Epoxidharzbasis geschehen.

## 5. Weiterentwicklung aus den bisherigen Erfahrungen

In der ZTV-ING Teil 5 (Stand 12/2007) wurde ein Prüf- und Injektionssystem für druckdichte Tunnelbauwerke ab 10 m Wassersäule aufgenommen.

*Unter 5.2.4 Fugenausbildung steht für wasserdruckhaltende Abdichtungen:*

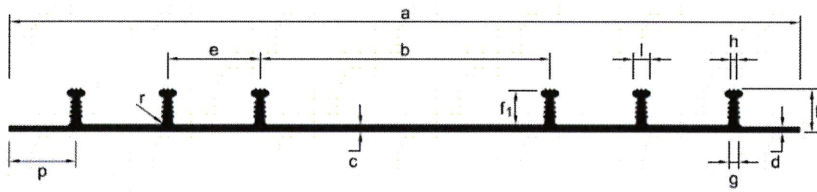
*(2) Bei wasserdruckhaltenden Abdichtungen ist ein mindestens 0,60 m breites 6-stegiges außenliegendes Fugenband (Schottfugenband) mit den Abmessungen gemäß Bild 5.5.3 anzuordnen. Das Fugenband ist an beiden Rändern mit einer mindestens 30 mm breiten Fugenabt auf die zuvor verlegten und gefügten KDB aufzuschweißen. Die Verbindung muss so fest sein, dass ein nachträgliches Ablösen des Fugenbandes von der Abdichtung ausgeschlossen ist.*

*Weiterhin steht unter 5.2.6 Prüf- und Injektionseinrichtungen:*

*(1) Zum Entlüften und Nachbetonieren im Bereich der Blockfugen sind beiderseits der Blockfuge jeweils mindestens sechs radial eingebaute Schläuche oder Rohre mit ca. 20 mm Innendurchmesser in die Zwischenräume der Sperranker zu führen (siehe Nr. 5.2.4). Die Anordnung der Nachbetonier- und Entlüftungsschläuche ist Bild 5.5.4 und Bild 5.5.5 zu entnehmen.*

*(2) Beiderseits der Blockfugen sind im First- und Ulmenbereich zusätzlich jeweils drei radial eingebaute Injektionsschläuche für eine eventuell erforderliche Nachdichtung des Schottfugenbandes in jeweils einen Sperrankerzwischenraum zu führen. Die Anordnung der Injektionseinrichtungen im Bereich der Blockfugen ist den nachfolgenden Querschnittsskizzen zu entnehmen.*

*(3) Ab einem Wasserdruck von 10 m WS sind die durch die Blockfugenbänder begrenzten Felder mit einem Prüf- und Injektionssystem auszustatten. Die Prüf- und Injektionsöffnungen sollen durch frei gehaltene Aussparungen, Schläuche oder Rohre gebildet werden und sind gegen Verschließen beim Betonieren und bei der Firstspaltverfüllung zu schützen. Bei einer Undichtigkeit der KDB muss sowohl die Möglichkeit des Wasseraustritts, als auch der Injektion durch die Öffnungen gegeben sein. Der gegenseitige Abstand der Öffnungen in Längs- und Ringrichtung darf höchstens 5 m betragen. Die Öffnungen müssen wasserdicht verschließbar sein, bei Leitungen auch gegen den angrenzenden Beton.*



Breiten			Dicken		Profilierung							
a	b	p	c	d	n	e	f	f <sub>1</sub>	g	h	i	r
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
600	200-220	50-60	4-5	3-4	6	70	30-35	≥26	≥5	≥4	12-14	≥3

Abbildung 10: Fugenband

Während die Zwickelbereiche zwischen den Fugenbandstegen planmäßig über die Nachbetonieröffnungen verfüllt werden, sollen die Injektionsschläuche nur im Fall von Undichtigkeiten verpresst werden.

Eine planmäßige Hinterlegung der KDB mit Zementsuspension ist nicht vorgesehen. So steht in ZTV-ING unter 4.4.3 Prüf- und Injektionseinrichtungen:

*(2) Im Fall einer Undichtigkeit der Abdichtung muss durch diese Injektionseinrichtungen sowohl die Möglichkeit des Wasseraustritts als auch der Injektion gegeben sein.*

In den nachfolgenden Skizzen ist die prinzipielle Anordnung des Prüf- und Injektionssystems zu sehen.

Isometrie Abdichtungssystem mit integriertem Injektionssystem

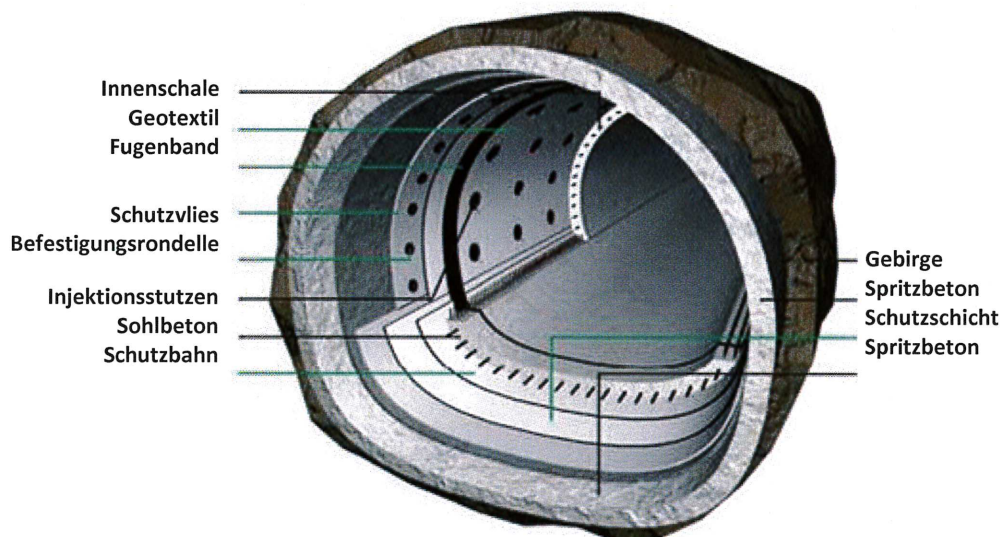


Abbildung 11: Isometrie Abdichtungssystem mit integriertem Injektionssystem



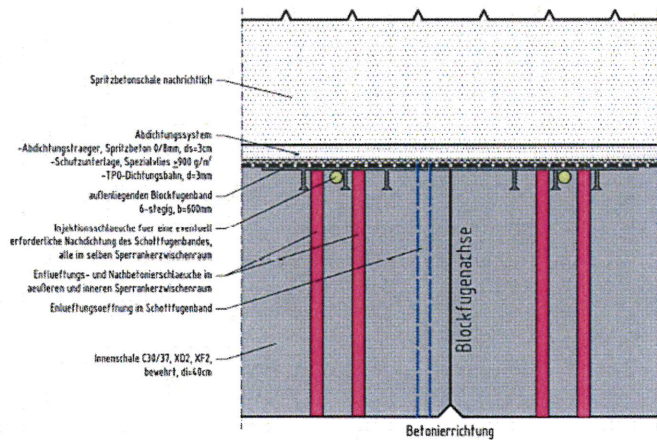


Abbildung 12: Bild x: Blockfugenausbildung bei druckdichten Tunnels

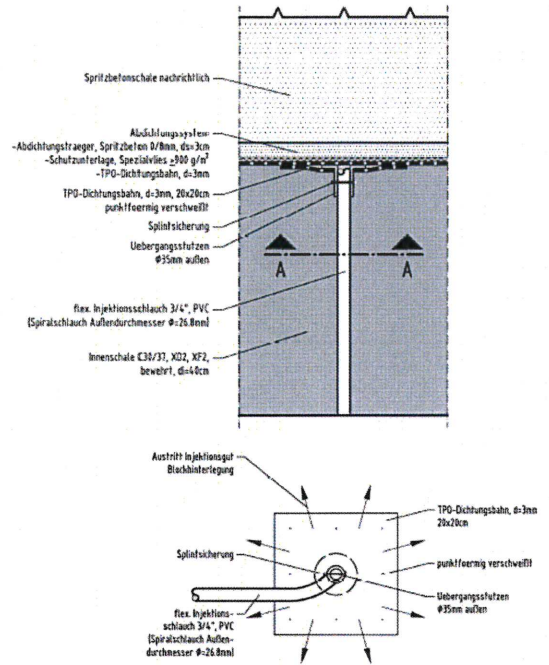


Abbildung 13: Kontroll- und Injektionsschlauch

Die konstruktive Gestaltung der Fugenbänder mit Nachbetoniermöglichkeit und zusätzlichen Verpressschläuchen stellt eine wesentliche Verbesserung gegenüber früheren Ausführungen dar.

Das Kontroll- und Injektionssystem im Bereich der Abdichtungsfelder soll zum einen eine mögliche Undichtigkeit durch Wasseraustritte anzeigen und in diesem Fall die Möglichkeit bieten die Schadstelle durch nachträgliche Injektionen zu sanieren.

In der Praxis ergeben sich dabei folgende Anforderungen:

- 1) Vor dem Verpressen der Baudrainage muss die Verpressung des Firstspaltes erfolgen.
- 2) Es ist deshalb notwendig, dass die Verpressschläuche des integrierten Kontroll- und Injektionssystems dicht gegen die Folie abschließen, um ein Eindringen der Zementsuspension beim Verpressen des Firstspaltes zu verhindern.
- 3) Im Fall einer Undichtigkeit der KDB muss ein Wasseraustritt über die Verpressschläuche gewährleistet und eine spätere Verpressung über das „Kontroll- und Injektionssystem“ möglich sein.
- 4) Ein pragmatischer Lösungsansatz stellt die umlaufende Verklebung des Folienstückes mit Klebestreifen dar. Es muss gewährleistet sein, dass einerseits ein Eindringen der Zementsuspension beim Verpressen des Firstspaltes verhindert wird, und andererseits eine Durchgängigkeit für Wasser und Injektionsmittel gegeben ist.

- 5) Dazu ist nach dem Verpressen des Firstspaltes eine „Aktivierung“ des Verpressstutzens erforderlich. Dazu wird über den Verpressschlauch die Verklebung des Folienstücker mit Wasser oder Druckluft aufgesprengt und so durchgängig für Wasser bzw. Injektionsgut gemacht.
- 6) In der Praxis zeigt sich dabei, dass es nur schwer gelingt beim Verpressen des Firstspaltes den Austritt von Zementsuspension durch die Verpressschläuche zu verhindern. Durch den Fließdruck des Betons kann trotz sorgfältiger Verlegung der Verpressschläuche nicht ganz ausgeschlossen werden, dass die Befestigungslaschen über die Verpressschläuche gezogen werden und dadurch gegenüber der KDB undicht werden. Das System ist in diesem Fall sowohl für die Kontrolle einer Fehlstelle als auch für mögliche Sanierungsmaßnahmen unbrauchbar.

Aus den bisherigen Erfahrungen ist zu folgern, dass das in der ZTV-Ing vorgesehene Kontroll- und Injektionssystem mit einigen technischen Weiterentwicklungen sicher herstellbar ist. Ob es sinnvoll ist, ein aufwendiges System zu installieren um einen Schaden leichter bzw. früher feststellen zu können, gilt es zu hinterfragen. Die Sanierung einer Fehlstelle über dieses Injektionssystem ist nicht gesichert gewährleistet. Eine Qualitätsverbesserung der eigentlichen Abdichtung kann durch den Einbau eines Kontrollsystems nicht erreicht werden.

Die logische Konsequenz aus dem o.a. Punkten ist die Maßnahme so zu erweitern, dass ein Schaden der KDB durch den Wasserdruck vermieden werden kann. Die logische Konsequenz ist die planmäßige Hinterlegung der Tunnelinnenschale mit Zementsuspension.

#### **Literatur:**

- (1) Boehning M., Robertson D., Schroeder H.F. 2008, Autoclave testing a new Approach for the Evaluation of Oxidative Long-Term Resistance of Geosynthetics. Proceeding EuroGeo4, Edinburgh
- (2) tBU Newsletter17. www.tBU-gmbh.de 2008, Prüfungen zur Langzeitbeständigkeit von Geokunststoffen im Autoklaven (testing of durability of geosynthetics by autoclave tests)
- (3) BAST (Bundesanstalt für Straßenwesen) 2007, ZTV-ING Part 5, Tunnel Construction
- (4) Deutsche Bahn AG 2007, Guideline 853.4101 Waterproofing and Drainage
- (5) DVS (German Plastic Welding Association) 2011, DVS 2225-5 Welding of thermoplastic membranes in tunnel constructions
- (6) Timothy D. Stark, Hangseok Choi, Patrick W. Diebel, Plasticiser Molecular weight and plasticizer retention in PVC Geomembranes, 57th Canadian Geotechnical Conference
- (7) Bindschedler, Urs; Permanence of flexible Waterproofing Systems, 1999
- (8) NAUE GmbH & Co.KG, Tunnel Construction, 2008
- (9) Technische Vertragsbedingungen Tunnelbau RVS 8T, FSV, 1. August 2004