

# Gaspermeabilität von Betonen

Autor(en): **Hermann, Kurt**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Cementbulletin**

Band (Jahr): **68 (2000)**

Heft 11

PDF erstellt am: **11.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-153865>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Gaspermeabilität von Betonen

Die Gaspermeabilität ist eine wichtige Eigenschaft von Festbetonen.

Die Gasdurchlässigkeit von Betonen ist im Allgemeinen grösser als die Wasserpermeabilität. Sie spielt beispielsweise bei der Speicherung von Gasen in Betonbehältern, bei radioaktiven Endlagern oder bei Gashäusern über Faulbehältern von Kläranlagen eine Rolle. Sie kann zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Betonen verwendet werden, vor allem bei Fragen der Karbonatisierung und der Korrosion [1] und wird zur Qualitätskontrolle von Betonbauten herangezogen.

Einen wesentlichen Faktor spielt die Gasdurchlässigkeit von Betonen auch beim Swissmetro-Projekt: Dereinst sollen Züge in teilweise evakuierten Tunneln Schweizer Städte mit Hoch-

geschwindigkeit verbinden (siehe Kasten «Gasdichter Beton für die Swissmetro» auf Seite 7).

## Der spezifische Permeabilitätskoeffizient $k$

Die Gasdurchlässigkeit eines Mörtels oder Betons wird mit Gasen wie Sauerstoff oder Stickstoff gemessen, die gegenüber den Werkstoffen inert sind; Luft, die Kohlendioxid enthält, ist ungeeignet. Die Gasdurchlässigkeit kann durch den spezifischen Permeabilitätskoeffizienten  $k$  (im Folgenden als Gaspermeabilität bezeichnet) angegeben werden. Dieser ist von mehreren Parametern abhängig, auf die im weiteren Verlauf dieses Artikels

teilweise eingegangen wird. Der Gastransport in gerissenen Betonen wird in einem späteren *Cementbulletin* behandelt werden. Die Gaspermeabilität ist ein Mass für die offene Porosität eines Betons. Die offene Porosität wiederum entspricht im Wesentlichen der Kapillarporosität (siehe [2]). In trockenen Betonen beträgt die Gaspermeabilität  $10^{-14}$  bis  $10^{-19}$   $m^2$ . Aus dem *Hagen-Poiseuilleschen* Gesetz für Strömung gasförmiger Medien durch poröse Körper mit engen Kapillaren folgt, wenn die Komprimierbarkeit des strömenden Gases berücksichtigt wird [3]:

$$k = \eta \frac{2 Q p_0 l}{A (p^2 - p_a^2)} \quad [m^2] \quad (1)$$

- $k$  spezifischer Permeabilitätskoeffizient [ $m^2$ ] (Gaspermeabilität)
  - $A$  Querschnittsfläche des Prüfkörpers [ $m^2$ ]
  - $Q$  Durchflussrate des Gases [ $m^3/s$ ]
  - $l$  Dicke des Probenkörpers in Durchflussrichtung [ $m$ ]
  - $\eta$  dynamische Viskosität des Prüf-gases [ $Ns/m^2$ ] (Sauerstoff bei 20 °C:  $\eta = 2,02 \cdot 10^{-5} Ns/m^2$ )
  - $p$  Eingangsdruck, absolut [ $N/m^2$ ]
  - $p_a$  Ausgangsdruck, absolut [ $N/m^2$ ]
  - $p_0$  Druck, bei dem Durchflussrate gemessen wird [ $N/m^2$ ]; üblicherweise gilt:  $p_0 = p$
- Anmerkung:  $10^5 N/m^2 = 1 \text{ bar}$

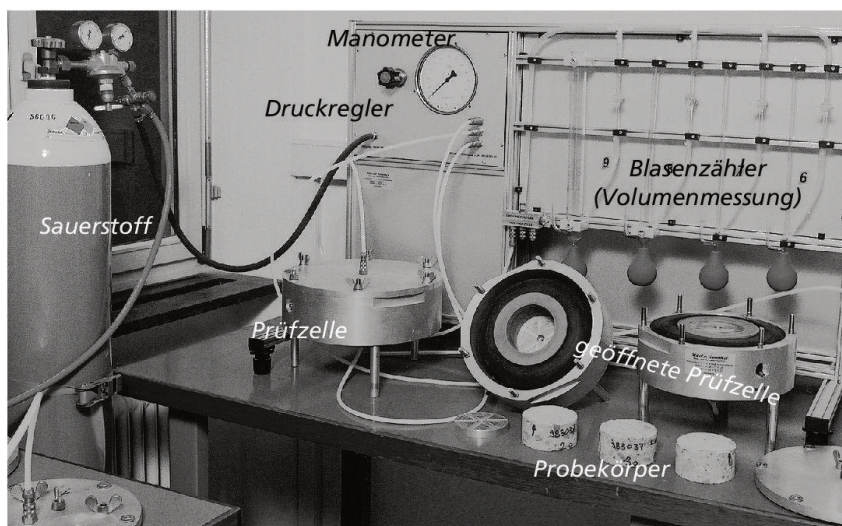


Abb. 1 Messung der Gaspermeabilität nach dem Cembureau-Verfahren.

Foto: Herbert Odermatt, TFB

### Permeabilitätsmessung an Probekörpern

Zu den Standard-Laborverfahren zur Bestimmung der Gasdurchlässigkeit eines Betons gehört die so genannte Cembureau-Methode [4], die in verschiedenen Modifikationen eingesetzt wird (siehe z.B. [2], [3], [5]): In Prüfzellen, die eine vollständige Abdichtung der Mantelflächen erlauben, werden zylindrische Scheiben einseitig mit einem inerten Gas (meist Sauerstoff) unter erhöhtem Druck (1,5 bis 3,5 bar) beaufschlagt. Auf der gegenüberliegenden Seite wird das Volumen des durchströmenden Gases gemessen (siehe *Abbildung 1*). Für die Messkörper werden ein Durchmesser von 150 mm und eine Höhe von 50 mm empfohlen [5].

### Permeabilitätsmessungen vor Ort

In der Literatur sind verschiedene Verfahren beschrieben, bei denen die Gaspermeabilität vor Ort mittels Überdruck in einem Bohrloch bestimmt wird [6]. Ein Beispiel stammt von *Reinhardt* und *Dinku* [7] (siehe auch *Abbildung 2*): Unter einem Druck von 11 bar wird während einigen Sekunden Stickstoff in ein 45 mm tiefes Bohrloch mit einem Durchmesser von 14 mm gepresst.

Anschliessend wird der zeitliche Verlauf des Druckabfalls in Intervallen von 0,5 bar (Normalbeton) bzw. 0,1 bar (sehr dichter Beton) gemessen. Aus der Druckabnahmezeit und der Geometrie des Bohrlochs lässt sich unter Verwendung des *Hagen-*

*Poiseuilleschen* Gesetzes und verschiedener Annahmen auch die Gaspermeabilität bestimmen [7].

Im Bohrloch wird vor der Durchlässigkeitsmessung zudem die relative Feuchte im Beton bestimmt. Dies ist notwendig, da die Feuchtigkeit des Betons einen grossen Einfluss auf die Gaspermeabilität hat.

Der Vorteil des hier beschriebenen Verfahrens gegenüber des Cembureau-Verfahrens besteht darin, dass es auch auf der Baustelle anwendbar ist.

### Torrent Permeability Tester

Mit dem Torrent-Verfahren [8, 9] wird die Permeabilität eines Überdeckungsbetons zerstörungsfrei

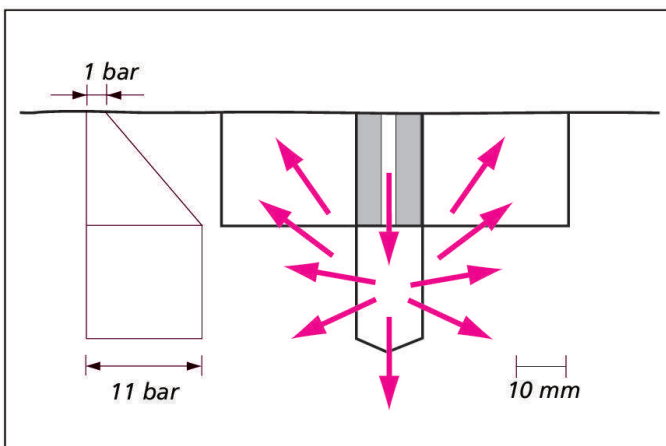


Abb. 2 Schematische Darstellung des Gasflusses und der Druckverteilung in einem Bohrloch (nach [7]).

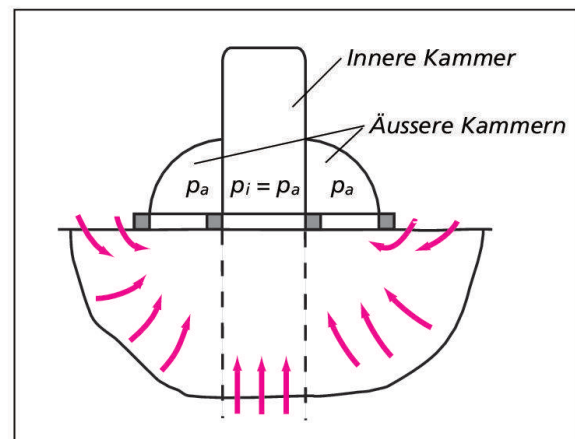


Abb. 3 Schema der Zwei-Kammer-Vakuumpumpe im Torrent-Gerät (nach [9]).



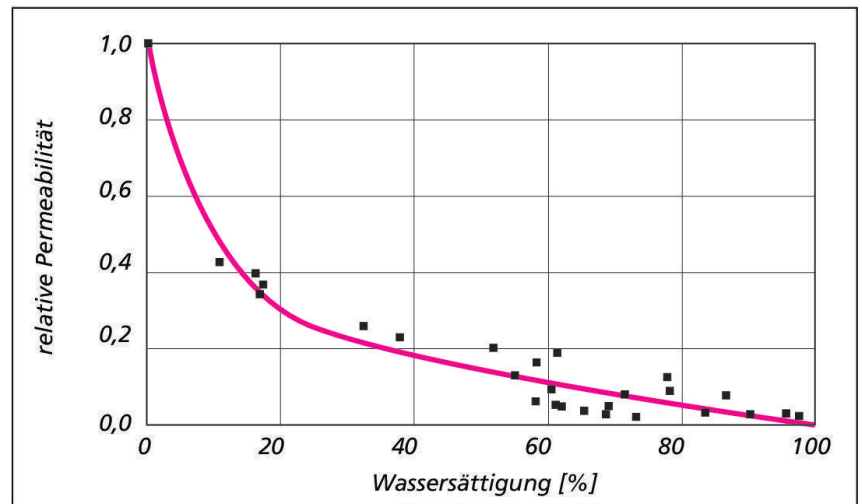
ermittelt. Dabei wird in einer Zwei-Kammer-Vakuumpumpe, die durch Gummiringe luftdicht auf der Betonoberfläche haftet, ein Unterdruck erzeugt (siehe *Abbildung 3*). Durch die spezielle Konstruktion des Apparates wird dafür gesorgt, dass in der Innenzelle nur Luft aus dem direkt darunter liegenden Bereich eindimensional angesaugt wird. Wenn ein bestimmtes Vakuum erreicht ist, wird die Vakuumpumpe abgestellt. Aus der Geschwindigkeit des Druckanstiegs in der inneren Zelle kann die Luftpermeabilität des Betons unterhalb der Zelle berechnet werden.

Die spezifischen Permeabilitätskoeffizienten  $k$  sind von der gleichen Größenordnung und korrelieren gut mit den nach der Cembureau-Methode ermittelten Koeffizienten [8].

### Einflüsse auf die Gaspermeabilität

Vereinfacht kann gesagt werden, dass durchschnittlich zusammengesetzte Betone im feuchten Zustand weitgehend gas- und luftdicht sind, wenn ihr Wasserzementwert  $< 0,65$  ist [10]. Mit sinkendem Feuchtegehalt steigt die Durchlässigkeit eines Betons (*Abbildung 4*).

Ein poröser (schlechter) Beton mit einer hohen Wassersättigung kann



**Abb. 4 Einfluss der Wassersättigung auf die relative Gaspermeabilität von Normalbetonen (W/Z = 0,45) nach [6].**

eine niedrigere Gaspermeabilität aufweisen als ein trockener, wenig poröser hochwertiger Beton. Die Proben müssen deshalb wenn möglich vor einer Messung getrocknet werden.

Übliche Trocknungstemperaturen sind 50 bis 105 °C. Ein Konsens über das «richtige» Verfahren fehlt.

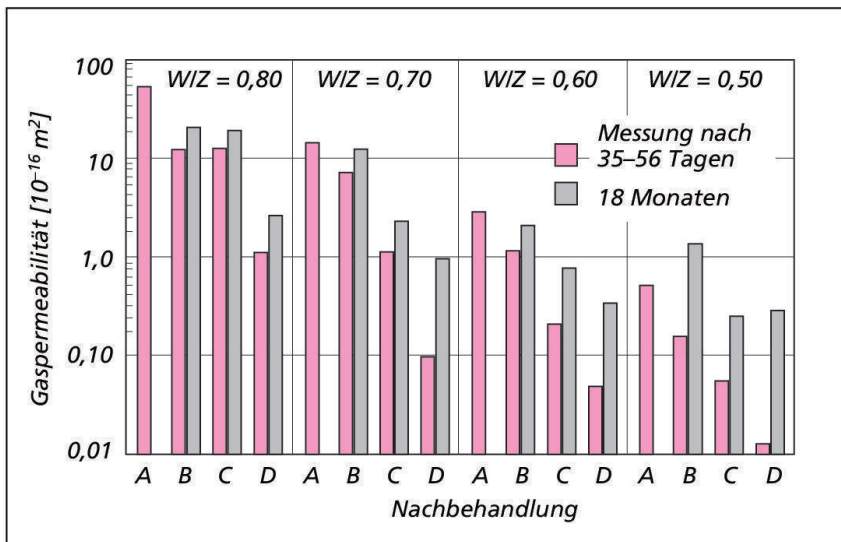
Es ist nicht immer ganz leicht, die einzelnen Einflüsse auf die Gaspermeabilität aufzuzeigen, da sich diese überlagern.

### Zuschlagmaterial

Bei konstantem Zuschlagsvolumen ist die Permeabilität umso kleiner, je höher der Feinanteil des Zuschlagmaterials ist [11].

	Matrixvolumen [%]	Gaspermeabilität $k$ [m <sup>2</sup> ] bei W/Z-Wert			
		0,40	0,50	0,60	0,70
Zementstein	100	91 $10^{-17}$	220 $10^{-17}$	260 $10^{-17}$	340 $10^{-17}$
Mörtel	46	2,2 $10^{-17}$	3,3 $10^{-17}$	31 $10^{-17}$	33 $10^{-17}$
Normalbeton	32	1,9 $10^{-17}$	2,1 $10^{-17}$	6,4 $10^{-17}$	15 $10^{-17}$

**Tab. 1 Einfluss des W/Z-Werts auf die Gaspermeabilität  $k$  (Proben 29 Tage in Wasser und anschliessend 63 Tage bei 20 °C/35 % r.F. gelagert) [6].**



**Abb. 5 Einfluss der Nachbehandlung (s. Tabelle 2) auf die nach 35–56 Tagen bzw. 18 Monaten gemessene Gaspermeabilität von Laborbetonen mit W/Z-Werten zwischen 0,50 und 0,80 (nach [12]).**

Art	Durchführung (Temperatur = 20 °C)	Anschliessende Lagerung (20 °C)
A	2 Tage in Schalung, der 1. Tag mit abgedeckter Betonoberseite, der 2. Tag unbedeckt und bei Zugluft	Bis zu einem Jahr bei 65% r.F., danach bei ca. 55% r.F.
B	1 Tag in Schalung mit abgedeckter Betonoberseite	
C	1 Tag in Schalung, dann 2 Tage mit luftdichter Folie gelagert	
D	1 Tag in Schalung, dann 27 Tage mit luftdichter Folie gelagert	

**Tab. 2 Nachbehandlungsarten der in Abbildung 5 besprochenen Betone (nach [12]).**

## LITERATUR

- [1] Gräf, H., und Bonzel, J., «Über den Einfluss der Porosität des erhärteten Betons auf seine Gebrauchseigenschaften», Beton 40 [7], 297–302 (1990).
- [2] Hermann, K., «Betonfeuchte», Cementbulletin 68 [10], 3–7 (2000).
- [3] Gräf, H. und Grube, H., «Verfahren zur Prüfung von Mörtel und Beton gegenüber Gasen und Wasser», Beton 36 [5], 184–187 und [6], 222–226 (1986).
- [4] Kollek, J. J., «The determination of the permeability of concrete to oxygen by the Cembureau method – a recommendation», Materials and Structures 22, 225–230 (1989).
- [5] Bunke, H., «Prüfung von Beton – Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048», Deutscher Ausschuss für Stahlbeton 422, 32–33 (1991).
- [6] Jacobs, F. P., «Permeabilität und Porengefüge zementgebundener Werkstoffe», Building Materials Report 7 (1994).
- [7] Reinhardt, H.-W., und Dinku, A., «Ermittlung der Gasdurchlässigkeit der Betonrandzone mit hohem Überdruck», Betonwerk + Fertigteil-Technik 62 [11], 86–93 (1996).
- [8] Wolter, H., «Bestimmung der Permeabilität von Betonen in Labor und an Bauwerken», schriftliche Unterlagen zur TFB-Fachveranstaltung 955 271 «Permeabilität von Betonen» vom 14.02.1996 in Wildeggen.
- [9] Torrent, R. J., «A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site», Materials and Structures 25, 358–365 (1992).
- [10] Weigler H., und Karl, S. «Beton: Arten – Herstellung – Eigenschaften», Verlag Ernst & Sohn, Berlin (1989).
- [11] Jacobs, F., «Einflüsse auf die Permeabilität von Beton», schriftliche Unterlagen zur TFB-Fachveranstaltung 955 271 «Permeabilität von Betonen» vom 14.02.1996 in Wildeggen.
- [12] Jacobs, F., «Dauerhaftigkeitseigenschaften von Betonen», Beton 49 [5], 276–282 (1999).
- [13] Badawy, M. und Honegger, E., «Swissmetro – Tests on air permeability of concrete», Berichts-CD vom 16. IABSE-Kongress in Luzern (2000).
- [14] Badoux, M., und Fellay, N., «Air permeability tests on cracked reinforced concrete wall elements», Berichts-CD vom 16. IABSE-Kongress in Luzern (2000).
- [15] Swissmetro-Infocentre NTB, <http://www.ntb.ch/Other/Swissmetro/Techn.html>.

### Zementart

Die Zementart kann die Gaspermeabilität von Betonen beeinflussen [6, 11].

### Wasserzementwert

Mit steigendem W/Z-Wert nimmt auch der zusammenhängende Kapillarporenraum zu. Deshalb sind die Gasdurchlässigkeiten vergleichbarer Betone um so grösser, je höher deren W/Z-Werte sind (Tabelle 1). Aus der gleichen Zusammenstellung geht auch hervor, dass die Gaspermeabilität umso grösser ist, je höher der Zementsteinanteil im Beton ist [6].

### Nachbehandlung

Durch eine längere Nachbehandlungszeit kann die Gasdichte eines



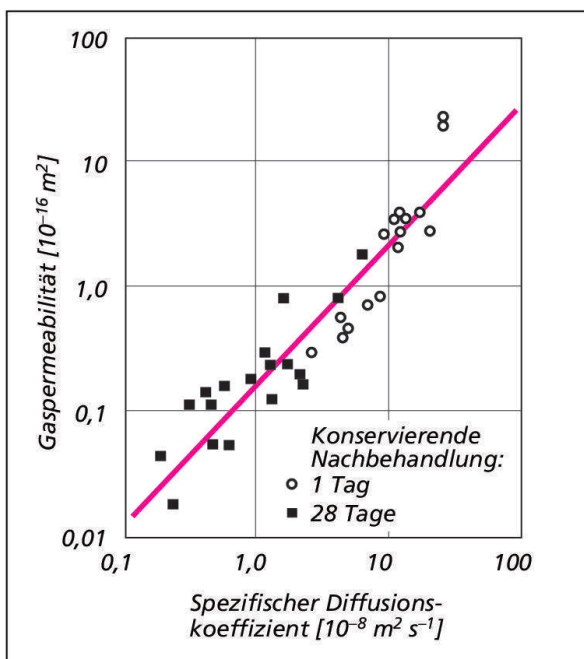


Abb. 6 Beziehung zwischen der Gaspermeabilität und dem spezifischen Diffusionskoeffizienten für Betone [3].

Betons verbessert werden. *Abbildung 5/Tabelle 2* [12] zeigen den Einfluss der Nachbehandlungsdauer und des W/Z-Werts auf die Gaspermeabilität von «Normalbetonen» (Zuschlaggrösstkorn 16 mm, Portlandzement CEM I, Zementleimgehalt 300 l/m<sup>3</sup>) [12].

Neben der Nachbehandlungsdauer und dem W/Z-Wert spielt bei den jüngeren Betonen auch der Wassergehalt eine wichtige Rolle: Je länger nachbehandelt wurde, desto mehr Wasser befand sich in den Poren (Erniedrigung der Gaspermeabilität).

### Diffusion inerter Gase

Für das Eindringen von Sauerstoff und Kohlendioxid in Betone ist vor allem die Gasdurchlässigkeit entscheidend. Zwischen dem spezifischen Permeabilitätskoeffizienten  $k$  und dem spezifischen Diffusionskoeffizienten  $D$  eines Betons (hängt vom Partialdruckunterschied der Gase im Beton und in der umgebenden Luft ab), besteht eine lineare Beziehung (siehe *Abbildung 6*). Die Sauerstoff-Diffusionskoeffizienten üblicher Betone liegen im Bereich von  $10^{-6}$  bis  $10^{-9}$  m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup> [3].

**Luftporengehalt**  
Betone, die künstlich erzeugte Luftporen im Bereich von 3 bis 5 Vol.-% enthalten, weisen keine höhere Gaspermeabilität als vergleichbare Betone ohne Luftporen auf. Erklären lässt sich dies damit, dass Luftporen bei diesen geringen Gehalten untereinander nicht verbunden sind. Die Gaspermeabilität nimmt erst ab Luftporengehalten > 11 Vol.-% deutlich zu [11].

### Gasdichter Beton für die Swissmetro

Die Swissmetro ist ein Hochgeschwindigkeits-Bahnsystem, das – so hoffen die Initianten – einmal die wichtigsten Schweizer Städte auf der West-Ost- und der Nord-Süd-Achse verbinden wird. Vier komplementäre Technologien sollen ein wesentlicher Bestandteil der Swissmetro sein:

- vollständig unterirdisch, zwei Tunneln im Abstand von 25 m, die einen Durchmesser von nur 5 m aufweisen
- Teilvakuum (100 mbar) im Tunnel zur Verminderung der Antriebsenergie
- Antrieb durch fest in den Fahrzeugen installierte lineare Elektromotoren
- magnetisches Trag- und Führungssystem, das Geschwindigkeiten von 400 km/Std. ermöglicht.

Das erforderliche Teilvakuum kann nur mit einer möglichst dichten Tunnelauskleidung erzielt werden. Zur Diskussion stehen:

- einschaliger Ausbau
- auf Betriebsseite beschichteter Betonring
- zweischaliger Ausbau mit dazwischen liegender Abdichtung

Der einschalige Ausbau stellt die höchsten Anforderungen an die Gasdichtigkeit. Aber selbst die zweischalige Konstruktion erfordert lokal gasdichten Auskleidungsbeton, da Leckagen der eingebauten Abdichtung über eine Zeitdauer von 100 Jahren (geforderte Lebensdauer) nicht auszuschliessen sind.

Obwohl die Realisierung der Swissmetro noch nicht absehbar ist, werden bereits jetzt Vorstudien gemacht, u.a. in der TFB in Wildegg (Gaspermeabilitätstests von Betonen [13]) und an der EPFL in Lausanne (Permeabilität von gerissenen Betonwandelementen [14]).

Quellen: [13]–[15]