

# Bemessung von Betonauskleidungen von Druckstollen und Schächten unter Aussenwasserdruck

Autor(en): **Schleiss, Anton**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **89 (1997)**

Heft 7-8

PDF erstellt am: **08.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-940197>

## **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.

# Bemessung von Betonauskleidungen von Druckstollen und Schächten unter Aussenwasserdruck

Anton Schleiss

## Zusammenfassung

Während Entleerungen von Druckstollen und Schächten werden deren Betonauskleidungen durch einen Aussenwasserdruck belastet. Dessen tatsächlich wirksame Grösse wird stark vom Verhältnis der Auskleidungs- zur Felsdurchlässigkeit beeinflusst. Die oft verwendete Annahme, dass die Auskleidung absolut dicht und der Aussenwasserdruck voll wirksam ist – also der Bergwasserspiegelhöhe entspricht –, führt zu einer sehr konservativen Bemessung der Auskleidungsstärke. Auflockerungszonen mit hoher Durchlässigkeit in der Stollenumgebung erhöhen den auf die Auskleidung wirksamen Aussenwasserdruck beträchtlich. In solchen Fällen kann mit Konsolidationsinjektionen der an der Auskleidungsaussenseite wirksame Wasserdruck erheblich reduziert werden.

## Abstract: Design of concrete linings of pressure tunnels and shafts for external water pressure

The loading on concrete linings of pressure tunnels and shafts by external water pressure is strongly influenced by the permeability conditions of the lining and rock mass. The outdated assumption, that the concrete lining is absolutely tight and the external pressure is fully acting on the lining, results in a very conservative design of the lining thickness. The herein described design approach shows, that if loosened rock zones with increased permeability in the vicinity of the tunnel are present, the external water pressure effectively acting on the lining increases and the limit has a value equal to the water head. Therefore, it is in such situations even more important to carry out consolidation grouting, which considerably reduces the external water pressure effectively acting on the lining.

## Résumé: Dimensionnement des revêtements en béton des galeries et puits en charge à une pression hydraulique extérieure

Pendant la vidange des galeries ou puits en charge, les revêtements en béton de ceux-ci sont soumis à une pression extérieure dont la valeur effectivement active est fortement influencée par la relation entre la perméabilité du

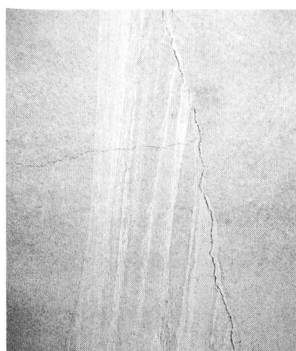


Bild 1. Radial- und Längsrisse infolge Schwindens in einer Betonauskleidung.

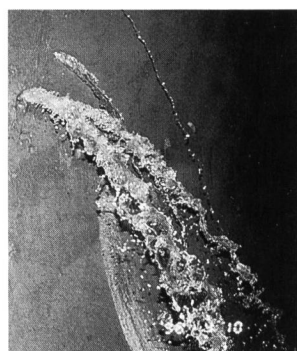


Bild 2. Lokale Wassereintritte durch die Risse einer Betonauskleidung während der Stollentleerung (Bild EKW).

revêtement et de la roche. L'hypothèse souvent adoptée, admettant que le revêtement est absolument étanche et que par conséquent la pression d'eau extérieure est entièrement effective – c'est à dire égale à la hauteur de la nappe phréatique –, conduit à un dimensionnement de l'épaisseur du revêtement très conservatif. La pression d'eau extérieure effectivement active est augmentée considérablement quand des zones ameublées, avec des perméabilités plus hautes, existent autour de la galerie. Dans ces cas la pression extérieure active peut être diminuée considérablement par des injections de consolidation.

## 1. Einleitung

Betonauskleidungen von Druckstollen und Druckschächten, welche in einem mit Bergwasser gesättigten Gebirge liegen, werden bei Entleerungen durch einen Aussenwasserdruck beansprucht. Auskleidungen von Wasserschlössern können auch im Betrieb, nämlich während des Abschwungs des Wasserspiegels unter Aussenwasserdruck geraten. Bei der Bemessung der Auskleidungsstärke wird der wirksame Aussenwasserdruck oftmals dem Bergwasserdruck gleichgesetzt. Diese konservative Annahme trifft streng genommen nur bei absolut dichten Auskleidungen wie Stahlpanzerungen zu. Betonauskleidungen weisen aber immer eine gewisse Durchlässigkeit auf, sei es infolge der Durchlässigkeit des Betons selbst oder infolge vorhandener Risse (Bild 1). Somit kann während Entleerungen eine vom Gebirge in den Stollen gerichtete Sickerströmung entstehen (Bild 2). Dabei verringert der Druckabbau der Sickerströmung im Fels den wirksamen Wasserdruck auf die Auskleidungsaussenseite. Je dichter der Fels im Vergleich zur Auskleidung ist, desto weniger stark wird diese durch den Bergwasserdruck belastet.

Das nachfolgend vorgestellte Bemessungskonzept erlaubt eine wirklichkeitsnahe Bestimmung des wirksamen Aussenwasserdruckes, indem die Durchlässigkeitsverhältnisse von Auskleidung und Gebirge berücksichtigt werden.

## 2. Berechnungsmodell und Durchlässigkeitsannahmen

Das Berechnungsmodell gilt für radialsymmetrische Problemstellungen, wobei folgende drei Zonen getrennt betrachtet werden (Bild 3):

- Betonauskleidung
- injizierte oder aufgelockerte Felszone
- ungestörtes Gebirge innerhalb der Reichweite der Sickerströmung.

Die Durchlässigkeit der Betonauskleidung wird vorwiegend durch die Risse bestimmt. Die Durchlässigkeit der Betonmatrix zwischen den Rissen ist gering und liegt im Normalfall unter  $10^{-8}$  m/s. Die Auskleidung kann grundsätzlich zwei Arten von Rissen aufweisen (Bild 1):

- Radial- bzw. Querrisse infolge Schwindens und Betonierfugen
- Längsrisse, welche unter Innenwasserdruck, allenfalls auch durch Schwinden, entstanden sind.

Risse können auch durch Temperaturspannungen entstehen, wenn die Betonauskleidung bei der Erstfüllung durch das Triebwasser stark abgekühlt wird. Im Sinne eines eher konservativen Ansatzes können die Weiten und Abstände der Risse in den Betonauskleidungen für die Ermittlung des wirksamen Aussenwasserdruckes wie folgt angenommen werden:

Mit den Werten in der Tabelle 1 dürfte die Auskleidungsdurchlässigkeit eher unterschätzt sein. Berücksichtigt wurde auch, dass sich die unter Innenwasserdruck entstandene

Tabelle 1. Konservative Annahmen von Rissweiten und -abständen bei Betonauskleidungen.

	Radialrisse		Längsrisse	
	Rissweite	Abstände	Rissweite	Abstände
Unarmierte Betonauskleidung	0,5 – 1,0 mm	6 – 12 m*	0,2 – 0,5 mm	mindestens zwei Risse
Armierte Betonauskleidung	0,1 – 0,3 mm	0,3 – 0,6 m**	0 – 0,1 mm	mehrere Risse im Abstand von 0,3 bis 0,6 m*

\* vom Schwindmass und von Betonierfugen abhängig

\*\* von der Art der Bewehrung (Stabdicken und -abstände) abhängig

nen Längsrisse bei Entleerungen als Folge des Aussenwasserdrucks ganz oder teilweise wieder schliessen. Die Rissabstände in einer armierten Auskleidung werden durch die Art der Bewehrung (Stabdurchmesser und -abstände) sowie durch die Entstehungsgeschichte der Risse beeinflusst (Schleiss, 1990).

Werden hinter der Auskleidung systematische Konsolidationsinjektionen ausgeführt, so erhöht sich die Dichtigkeit dieser Zone. Erfahrungsgemäss kann aber die Felsdurchlässigkeit mit Zementinjektionen nicht unter  $k_f = 10^{-7}$  m/s, also etwa 1 Lugeon, gedrückt werden (Witke, 1984).

Durch Sprengerschütterungen während des Ausbruchs, Spannungumlagerungen und allenfalls durch plastische Deformationen kann um den Hohlraum ein aufgelockerter Felsbereich entstehen, welcher gegenüber dem ungestörten Gebirge eine erhöhte Durchlässigkeit aufweist.

### 3. Druckverluste der Sickerströmung in den verschiedenen Zonen

#### 3.1 Allgemeines

Der Druckabbau der Sickerströmung in den verschiedenen Zonen (vgl. Bild 3) und somit der am Aussenrand jeder Zone wirkende Aussenwasserdruck kann mit der Kontinuitätsbedingung bestimmt werden. Diese besagt, dass jede Zone von derselben Sickerwassermenge durchsickert werden muss. Nachfolgend werden diese Wassermengen für jede Zone ermittelt, wobei die verwendeten Bezeichnungen am Schluss des Artikels zusammengestellt sind.

#### 3.2 Wasserzutritt aus dem Gebirge

Verläuft die Stollen- oder Druckschachtachse in etwa parallel zur Bergwasserspiegeloberfläche (Bild 4), so berechnet sich der Wasserzutritt aus dem Gebirge in die injizierte oder aufgelockerte Felszone pro Laufmeter nach folgender Formel (Schleiss, 1985):

$$q_F = \frac{2\pi \cdot k_F \cdot [b - p_c / (\rho_w \cdot g)]}{\ln [b/r_c \cdot (1 + \sqrt{1 - r_c^2/b^2})]} = C_1 [b - p_c / (\rho_w \cdot g)] \quad (1)$$

Bei vertikalen Schächten ergibt sich folgender Wasserzutritt (Bild 4):

$$q_F = \frac{2\pi \cdot k_F \cdot [b - p_c / (\rho_w \cdot g)]}{\ln(R/r_c)} = C_2 [b - p_c / (\rho_w \cdot g)] \quad (2)$$

Die Reichweite der Sickerströmung dürfte näherungsweise etwa zwischen  $R = 10 r_a$  im eher dichten Fels ( $k_f \leq k_B$ ) und  $R = 100 r_a$  im eher durchlässigen Fels ( $k_f \geq 100 k_B$ ) liegen.

#### 3.3 Sickerströmung durch injizierte oder aufgelockerte Felszone

Die Sickerströmung durch eine radialsymmetrische, injizierte oder aufgelockerte Felszone, welche die Betonauskleidung umgibt, bewirkt folgenden Wasserzutritt:

$$q_c = \frac{2\pi \cdot k_c \cdot (p_c - p_a) / (\rho_w \cdot g)}{\ln(r_c/r_a)} = C_3 (p_c - p_a) / (\rho_w \cdot g) \quad (3)$$

#### 3.4 Sickerströmung durch Betonauskleidung

Die Sickerströmung durch die Auskleidung wird wie erwähnt durch die Betondurchlässigkeit und insbesondere durch die Risse bestimmt.

Der Wasserzutritt durch die ungerissene Betonmatrix zwischen den Rissen beträgt:

$$q_{B1} = \frac{2\pi \cdot k_B \cdot p_a / (\rho_w \cdot g)}{\ln(r_a/r_i)} = C_{41} \cdot p_a / (\rho_w \cdot g) \quad (4)$$

Die Radial- bzw. Längsrisse in der Auskleidung ermöglichen folgenden Wasserzutritt:

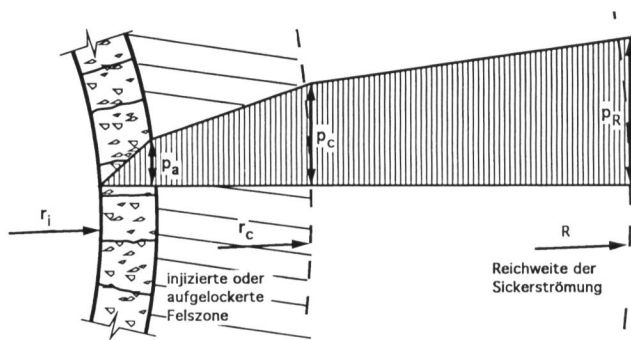


Bild 3. Sickerströmung vom Gebirge durch die Auskleidung in den Stollen oder Schacht (schematisch, Druckabbau nicht linear).

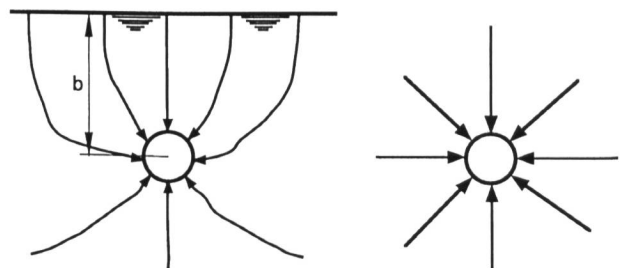


Bild 4. Strömungsbild bei einem nahezu horizontalen Stollen (links) oder bei einem vertikalen Schacht (rechts).

$$q_{B2} = \frac{2\pi \cdot r_i \cdot (2a_1)^3 \cdot g \cdot p_a / (\rho_w \cdot g)}{12v_w \cdot (r_a - r_i) \cdot d} = C_{42} \cdot p_a / (\rho_w \cdot g) \quad (5)$$

$$q_{B3} = \frac{n \cdot (2a_2)^3 \cdot g \cdot p_a / (\rho_w \cdot g)}{12v_w \cdot (r_a - r_i)} = C_{43} \cdot p_a / (\rho_w \cdot g) \quad (6)$$

Die totale Sickerwassermenge durch die Auskleidung ergibt sich somit zu:

$$q_B = q_{B1} + q_{B2} + q_{B3} = (C_{41} + C_{42} + C_{43}) \cdot p_a / (\rho_w \cdot g) = C_4 \cdot p_a / (\rho_w \cdot g) \quad (7)$$

### 3.5 Wirksamer Aussenwasserdruck an der Auskleidungsaussenseite

Die wirksame Aussenwasserdruckhöhe an der Auskleidungsaussenseite errechnet sich aus den Kontinuitätsbedingungen  $q_F = q_C = q_B$ . Daraus folgt:

$$p_a / (\rho_w \cdot g) = \frac{C_{1(2)} \cdot b}{[(C_3 + C_4) / C_3] (C_{1(2)} + C_3) - C_3} \quad (8)$$

Ist keine injizierte oder gestörte Felszone vorhanden, so ergibt sich die Aussenwasserdruckhöhe direkt aus  $q_F = q_B$  unter Verwendung von  $r_c = r_a$  und  $p_c = p_a$  in Gleichung 1 oder 2:

$$p_a / (\rho_w \cdot g) = \frac{C_{1(2)} \cdot b}{C_{1(2)} + C_4} \quad (9)$$

### 3.6 Aussenwasserdruck an der Aussenseite der injizierten oder aufgelockerten Felszone

Die wirksame Wasserdruckhöhe an der Aussenseite der injizierten oder aufgelockerten Felszone wird ebenfalls mit der Kontinuitätsbedingung bestimmt:

$$p_c / (\rho_w \cdot g) = \frac{p_a / (\rho_w \cdot g) (C_3 + C_4)}{C_3} \quad (10)$$

## 4. Maximale Druckspannungen in der Betonauskleidung und Bemessungskriterien

Unter der Annahme eines linearen Druckabbaus der Sickerströmung durch die Betonauskleidung ergibt sich gemäss der Theorie der durchlässigen Medien folgende maximale tangentielle Druckspannung an der Auskleidungsaussenseite (Schleiss, 1987):

$$\sigma_{\max}(r_i) = \frac{p_a (2 - v_B)}{3(1 - v_B)} \left\{ \frac{1 + (r_a / r_i)^2}{(r_a / r_i)^2 - 1} + \frac{1 - r_i (1 + v_B) / [r_a (2 - v_B)]}{1 - (r_i / r_a)} \right\} \quad (11)$$

Die maximalen Druckspannungen in der Betonauskleidung infolge Aussenwasserdrucks sollten gegenüber der Betondruckfestigkeit eine genügende Sicherheit aufweisen:

$$\sigma_{\max}(r_i) \leq \beta_w / S \quad (12)$$

Als Sicherheit gegenüber der Würfeldruckfestigkeit werden in den verschiedenen Normen etwa  $S = 1,8$  (armierter Beton) bis  $S = 2,5$  (unarmierter Beton) verlangt. Bei seltenen und kurzzeitigen Entleerungen kann allenfalls auch eine geringere Sicherheit akzeptiert werden (z.B.  $S = 1,2$  bis  $1,5$ ), insbesondere wenn die Durchlässigkeitsverhältnisse von Auskleidung und Fels auf konservativen Annahmen beruhen.

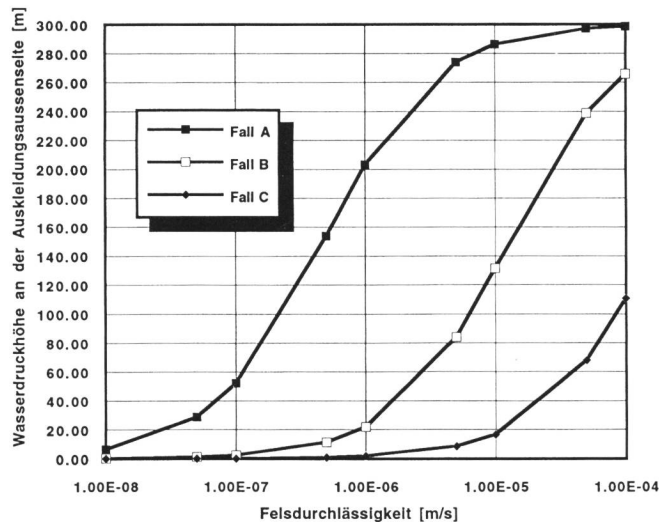


Bild 5. Wirksamer Wasserdruck an der Aussenseite der Betonauskleidung in Abhängigkeit der Felsdurchlässigkeit (ohne injizierte oder aufgelockerte Felszone).

Bei den üblichen Schlankheitsgraden von Betonauskleidungen  $[r_a / (r_a - r)] < 40$  treten unter Aussenwasserdruck normalerweise keine Stabilitätsprobleme auf. Der kritische Beuldruck solcher Betonauskleidungen ist durchwegs höher als der wirksame Aussenwasserdruck, welcher zum Betonversagen führt (Überschreiten der Betondruckfestigkeit).

## 5. Diskussion der massgebenden Parameter an einem Berechnungsbeispiel

### 5.1 Berechnungsbeispiel

Im folgenden wird ein schwach geneigter, 300 m tief unter dem Bergwasserspiegel liegender Druckstollen betrachtet:

Geometrie:  $r_i = 5,0$  m;  $r_a = 5,5$  m;  $r_c = 6,5$  m (aufgelockerte Felszone) bzw.  $r_c = 8,5$  m (injizierte Felszone)

Felsdurchlässigkeit:  $k_F = 10^{-4}$  m/s bis  $10^{-8}$  m/s; aufgelockerte Felszone  $k_C = 10 k_F$ , aber mindestens  $k_C = 10^{-6}$  m/s; injizierte Felszone:  $k_C = 10^{-7}$  m/s (ca. 1 Lugeon; bestmögliche, praktisch erreichbare Injektionswirkung)

Bezüglich der Auskleidungsdurchlässigkeit werden drei verschiedene Fälle untersucht:

Fall A: ungerissene Betonauskleidung  $k_B = 10^{-8}$  m/s

Fall B: gerissene, armierte Betonauskleidung  $k_B = 10^{-6}$  m/s;  $2a_1 = 0,1$  mm (Radialrisse infolge Betonschwindens);  $d = 3,0$  m;  $2a_2 = 0$  mm (Risse infolge Innenwasserdrucks bei Entleerung vollständig geschlossen)

Fall C: gerissene, unarmierte Betonauskleidung  $k_B = 10^{-8}$  m/s;  $2a_1 = 0,3$  mm;  $d = 6,0$  m;  $2a_2 = 0,1$  mm;  $n = 3$

### 5.2 Einfluss der Auskleidungsdurchlässigkeit

Der Einfluss der Auskleidungsdurchlässigkeit ist in Bild 5 für einen Stollen ohne injizierte oder aufgelockerte Felszone verdeutlicht. Selbst wenn die Auskleidung ungerissen ist (Fall A), wird sie nur im extrem durchlässigen Gebirge ( $k_F > 10^{-4}$  m/s) durch den vollen Aussenwasserdruck beansprucht (Bergwasserspiegelhöhe 300 m). Die radialen Schwindrisse in einer armierten Auskleidung reduzieren den Aussenwasserdruck auch in sehr durchlässigem Gebirge bereits beträchtlich (Fall B). Beispielsweise beträgt der wirksame Aussenwasserdruck bei einer Felsdurchlässigkeit von  $k_F = 10^{-5}$  m/s nur 129 m (43% der Bergwasserspiegelhöhe), was vergleichsweise erheblich weniger ist als 286 m im Falle der ungerissenen Auskleidung. Sind die Risse etwas grösser, wie dies bei einer unarmierten Aus-

kleidung der Fall ist (Fall C), so erreicht der Aussenwasserdruck auch im extrem durchlässigen Fels ( $k_f = 10^{-4}$  m/s) nur 108 m (36% der Bergwasserspiegelhöhe). Falls gegenüber der Würfeldruckfestigkeit (Annahme 30 N/mm<sup>2</sup>) eine Sicherheit von 2,0 verlangt wird, ist eine wirksame Wasserdruckhöhe von 137 m an der Auskleidungsaussenseite zulässig (s. h. Grenzlinie in Bild 5).

### 5.3 Wirkung einer aufgelockerten, durchlässigen Felszone

Durch den drainierenden Effekt einer aufgelockerten Felszone in der Stollenumgebung erhöht sich der an der Auskleidungsaussenseite wirksame Aussenwasserdruck. Selbst unter der Annahme einer relativ hohen Durchlässigkeit in der aufgelockerten Felszone ( $k_c = 10 k_f$ , minimaler Wert  $k_c = 10^{-5}$  m/s) beträgt diese Erhöhung nur 1% (vgl. Bild 5 mit Bild 6). Falls die Durchlässigkeit in der aufgelockerten Zone theoretisch unendlich gross wäre, also beispielsweise ein offener Spalt um die Betonauskleidung vorhanden wäre, würde der Aussenwasserdruck dem Bergwasserdruck entsprechen (100% wirksam).

### 5.4 Wirkung von Konsolidationsinjektionen

Mit Konsolidationsinjektionen in der Stollenumgebung kann der auf die Auskleidung wirksame Aussenwasserdruck am wirkungsvollsten reduziert werden (vgl. Bild 7 mit Bildern 5 und 6). Selbst bei ungerissenen Auskleidungen (Fall A) und bei einer extrem hohen Felsdurchlässigkeit ( $k_f = 10^{-4}$  m/s vor Injektion) erreicht der wirksame Aussenwasserdruck nur 205 m (68% der Bergwasserspiegelhöhe). Gerissene Auskleidungen werden durch die Injektion vom Aussendruck nahezu vollständig entlastet (Fälle B und C).

## 6. Drainage der Betonauskleidung

Mit Drainagebohrungen kann der an der Aussenseite der Betonauskleidung wirkende Wasserdruck fast gänzlich abgebaut werden. Diese erhöhen nämlich die Auskleidungsdurchlässigkeit so stark, dass sämtlicher Druckabbau der Sickerströmung im vergleichsweise dichten Fels stattfindet.

Drainagebohrungen in Betonauskleidungen sind aber nur zulässig, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- 1) Das Gebirge ist so dicht, dass unter Innenwasserdruck

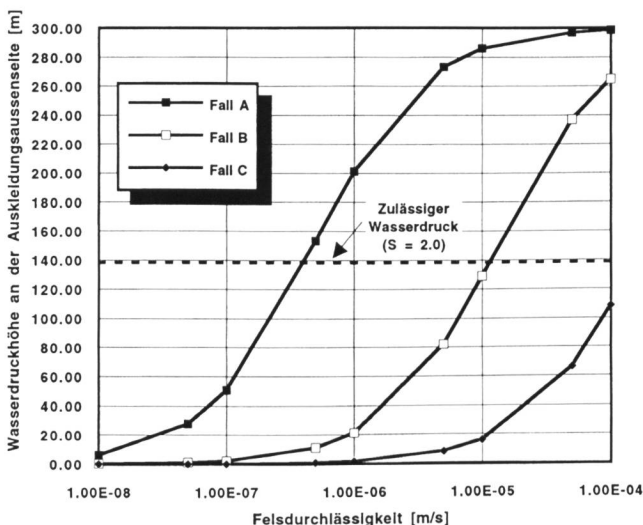


Bild 6. Wirksamer Wasserdruck an der Aussenseite der Betonauskleidung in Abhängigkeit der Felsdurchlässigkeit unter Berücksichtigung einer durchlässigeren Auflockerungszone.

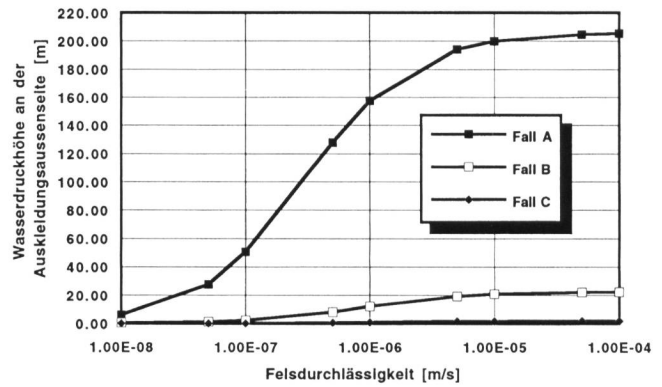


Bild 7. Wirksamer Wasserdruck an der Aussenseite der Betonauskleidung in Abhängigkeit der Felsdurchlässigkeit unter Berücksichtigung einer injizierten Felszone mit geringerer Durchlässigkeit.

keine unzulässigen Wasserverluste aus dem Stollen entstehen.

- 2) Es besteht keine Auswaschungsgefahr von Kluffüllungen oder Feinmaterial aus der Felsmatrix.

Die letztere Bedingung ist von besonderer Bedeutung, da ein sukzessives Auswaschen von Feinmaterial hinter der Auskleidung nicht nur die Felsdurchlässigkeit erhöht, sondern auch die Standfestigkeit des Gebirges verringert. Im Extremfall kann dies zu einem Versagen der Auskleidung infolge Gebirgsbruchs führen.

Der Raster der Drainagebohrungen hat der Durchlässigkeit des Gebirges sowie dem Durchmesser des Stollens Rechnung zu tragen. Im Normalfall sollten für grössere Durchmesser (> 5 m) im Querschnitt mindestens drei bis vier Drainagelöcher durch die Auskleidung gebohrt werden. Diese sind vorzugsweise bei 9, 12 und 3 Uhr, an der Sohle wegen Verstopfungsgefahr bei 5 oder 7 Uhr anzuordnen. In Stollenlängsrichtung sollten die Abstände der Drainagebohrungen, je nach Felsdurchlässigkeit, 3 bis 6 m nicht überschreiten. Die Entlastungsbohrungen sollten zudem etwa 0,5 bis 1,0 m tief in den Fels reichen.

## 7. Schlussfolgerungen

Falls Betonauskleidungen als absolut dicht betrachtet werden, führt dies zu einer sehr konservativen und unwirtschaftlichen Bemessung der Auskleidungsstärke für den Lastfall Aussenwasserdruck. Der auf die Auskleidung tatsächlich wirksame Aussenwasserdruck wird selbst durch eine vergleichsweise geringe Auskleidungsdurchlässigkeit beträchtlich reduziert. Mit Konsolidationsinjektionen kann der wirksame Aussenwasserdruck im durchlässigen Gebirge noch zusätzlich verringert werden. Aufgelockerte Zonen mit erhöhter Durchlässigkeit in der Umgebung des Druckstollens hingegen bewirken eine höhere Belastung der Auskleidung. Bei solchen Verhältnissen ist es besonders wichtig, die Auflockerungszone mit Injektionen abzdichten.

### Literaturverzeichnis

- Schleiss, A. (1987): Bemessung von Druckstollen. Teil I: Literatur, Grundlagen, Felshydraulik, insbesondere Sickerströmungen durch Auskleidung und Fels. Mitteilung Nr. 78 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Zürich.
- Schleiss, A. (1987): Einfluss der Sickerströmung in Betonauskleidung und Fels auf die Bemessung von durchlässigen Druckstollen. «Österreichische Wasserwirtschaft», Jg. 39, Heft 1/2, S. 39–50.
- Schleiss, A. (1990): Beitrag zur Bemessung von bewehrten Druckstollenauskleidungen. «Bauingenieur» 65, S. 351–357.
- Wittke W. (1984): Felsmechanik. Grundlagen für wirtschaftliches Bauen im Fels. Springer Verlag, Berlin – Heidelberg – München – Tokyo.



## Bezeichnungen

$(2a_1)$	=	Mittlere Öffnungsweite der Radialrisse
$(2a_2)$	=	Mittlere Öffnungsweite der Längsrisse
$b$	=	Höhe des Bergwasserspiegels über Stollen
$C_{1,2,\dots}$	=	Hilfswerte
$d$	=	Mittlerer Abstand der Radialrisse
$g$	=	Erdbeschleunigung
$k_B$	=	Durchlässigkeit des ungerissenen Betons
$k_F$	=	Felsdurchlässigkeit
$k_C$	=	Durchlässigkeit der aufgelockerten oder injizierten Felszone
$n$	=	Anzahl Längsrisse
$p_a$	=	Wasserdruck an der Auskleidungsaussenseite
$p_c$	=	Wasserdruck am Aussenrand der aufgelockerten oder injizierten Felszone
$r_i$	=	Innenradius der Betonauskleidung
$r_a$	=	Aussenradius der Betonauskleidung
$r_c$	=	Aussenradius der injizierten oder aufgelockerten Felszone

$R$	=	Aussenradius der von der Sickerströmung beeinflussten Felszone
$S$	=	Sicherheitsfaktor
$q$	=	Wasserzutritt pro Laufmeter Stollen bzw. Schacht
$\beta_w$	=	Würfeldruckfestigkeit von Beton
$\nu$	=	Poissonzahl (Indices wie für E)
$\nu_w$	=	Kinematische Viskosität von Wasser
$\rho_w$	=	Dichte von Wasser
$\sigma_{\max}(r)$	=	Maximale tangentielle Druckspannungen in der Betonauskleidung (Innenseite)

Erweiterte deutsche Fassung eines Beitrages für das Symposium Tunneling Asia '97, 20. – 24. Januar 1997 in New Delhi, Indien.

Adresse des Verfassers: Anton Schleiss, Dr. sc. techn., dipl. Bauing. ETH, Electrowatt Engineering AG, Leiter der Sektion Hydraulische Bauwerke, Bellerivestr. 36, Postfach, CH-8034 Zürich (seit 1. Januar 1997: Professeur au Laboratoire de constructions hydrauliques, Département de génie civil, Ecole polytechnique fédéral de Lausanne, CH-1015 Lausanne).

## Wasserkraftanlage Langschede

Der Neubau der Wasserkraftanlage Langschede bei Fröndenberg im Sauerland ist für die Stadtwerke Fröndenberg ein weiterer Schritt zur Nutzung der heimischen regenerierbaren Energiequellen. Der Neubau besteht aus Krafthaus und zweifeldriger Wehranlage.

Das Krafthaus einschliesslich des Betriebshofes befindet sich am südlichen Ruhrufer. In das Krafthaus wurden zwei Kaplan-Rohrturbinen mit 9° Neigung eingebaut, die eine axiale Durchströmung ohne Umlenkung des Wassers ermöglichen. Bei einem Laufraddurchmesser von 1,90 m beträgt das Schluckvermögen je Turbine 20 m<sup>3</sup>/s. Die Fallhöhe im Einlauf des Krafthauses beträgt 3,18 m. Sowohl der Einlauf als auch der Auslauf der beiden Turbinen muss-

ten entsprechend den Vorgaben des Turbinenherstellers hydraulisch günstig ausgebildet werden.

Die beiden installierten Turbinen mit je 523 kW Leistung erzeugen jährlich über 5 Mio kWh. Für Montage- und Revisionsarbeiten können die Saugschläuche im Ober- und Unterwasser mittels Dammbalken abgeschlossen werden.

Zur Durchflussregelung im Krafthaus und der Ruhr wurde eine zweifeldrige Wehranlage mit zwei je 25 m langen Feldern erstellt. Die Stahlbetonwehrpfeiler dienen gleichzeitig als Lager für die beiden hydraulisch regulierbaren Wehrklappen. Die Wehranlage regelt sich selbsttätig über ständige Pegelmessungen.

Zur Erhaltung und Verbesserung des Fischbestandes ist zwischen Krafthaus und südlichem Wehrpfeiler ein Vertikal-Slot-Fischpass angeordnet, der im Gegensatz zur be-

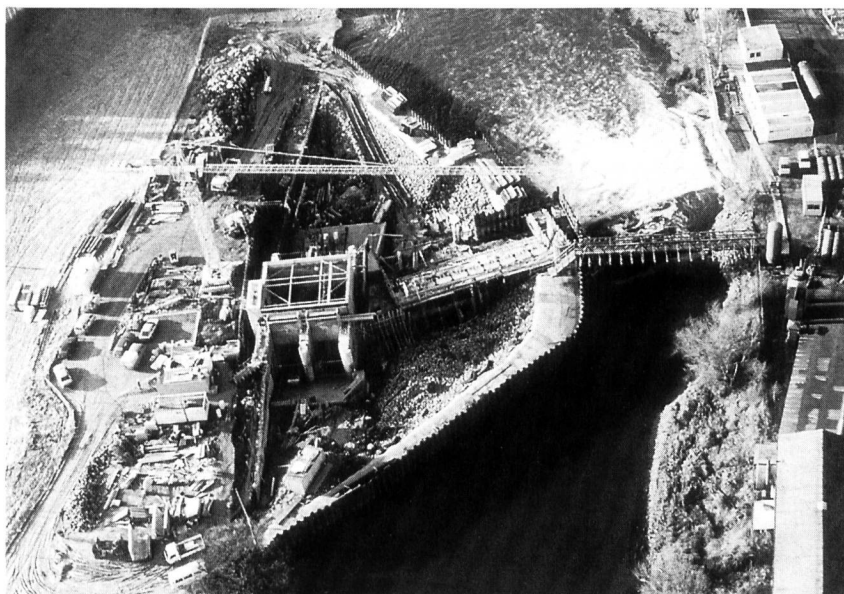


Bild 1. Erstellung des Krafthauses mit einem Wehrfeld (Bauzustand).

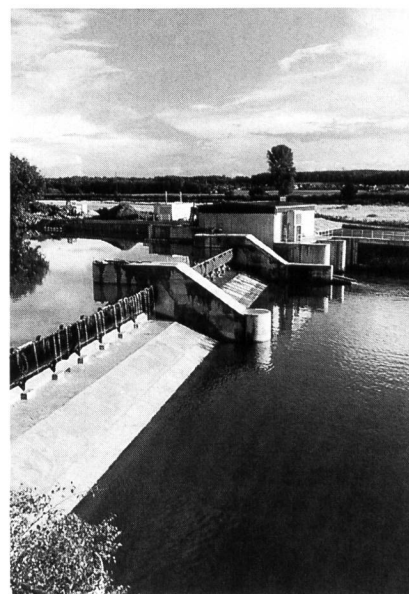


Bild 2. Fertiges Krafthaus mit Wehranlage.