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

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 76 (1984)

Heft: 7-8

Artikel: Bestimmung der Felsdurchlässigkeit aufgrund von Stollen-Abpresseversuchen

Autor: Gysel, Martin

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941211

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 06.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Bestimmung der Felsdurchlässigkeit aufgrund von Stollen-Abpressversuchen

Auswertung ausgewählter schweizerischer Druckstollen

Martin Gysel

1. Einleitung

Durch viele Druckstollen der Hochdruckanlagen im schweizerischen Alpenraum wird Wasser unter hohem Druck von den Speicherseen oder Wasserfassungen zum Bereich der Kraftwerkszentralen geleitet. Dabei werden die anstehenden geologischen Formationen jeweils auf Längen von vielen Kilometern durchquert.

Es liegt auf der Hand, die Erfahrungen mit diesen Stollen auszuwerten, um Hinweise über die Wasserdurchlässigkeit der betreffenden geologischen Formationen und allenfalls auch über die Betonauskleidung der Stollen zu erhalten.

Das verfügbare Material besteht aus Wasserverlustmessungen an vielen schweizerischen Druckstollen. Die Verluste wurden in Abpressversuchen für Stollenteile oder ganze Stollen gesamthaft ermittelt. Somit handelte es sich um eigentliche Grossversuche, welche jeweils eine bis mehrere geologische Formationen oder Einheiten erfassten. Alle Einflüsse aus Klüften, Störungszonen usw. kamen dabei zur Wirkung.

Diese Versuchsanordnung unterscheidet sich ganz wesentlich von punktweisen Abpressversuchen nach *Lugeon* im Bohrloch, aber auch von lokalen Abpress-Kammern.

Die Stollen-Abpressversuche ergeben Mittelwerte über grosse Felsbereiche. Für Berechnungen von Sickerströmungen im Gebirge sind solche Mittelwerte geeignet, um das wirkliche Verhalten zu erfassen.

Das im vorliegenden Bericht zusammengestellte Messmaterial stammt aus den Archiven der Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG, der Nordostschweizerischen Kraftwerke AG, der Blenio Kraftwerke AG bzw. der AG Ingenieurbüro Maggia sowie der Elektrizitätswerke der Stadt Zürich (EWZ) bzw. des Ingenieurbüros für bauliche Anlagen (IBA). Nach Ansicht des Verfassers ist das in seiner Art einmalige Material von grossem Wert.

Die nachfolgenden Zusammenstellungen wurden für die Nagra – Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle – neu ausgewertet. Denn es ist für die Nagra aufschlussreich, Messdaten über das Durchlässigkeitsverhalten ganzer geologischer Formationen zu erhalten. Zum Teil liegen bei den erfassten Druckstollen gleiche geologische Verhältnisse wie bei potentiellen Endlagerstandorten vor. Zum Teil ist wenigstens eine Verwandtschaft zu möglichen Wirtgesteinen vorhanden. In diesen Fällen können immerhin Grössenordnungen für die Durchlässigkeit von in Frage kommenden Wirtgesteinen angegeben werden.

Da auch die Kraftwerksbetreiber selbst und die Druckstollen und andere unterirdische Anlagen bearbeitenden Ingenieure und Geologen ein Interesse an den zusammengestellten Wasserverlustmessungen und den daraus abgeleiteten Gebirgsdurchlässigkeiten haben dürften, wird das vorhandene Material nachfolgend veröffentlicht.

Der NAGRA sei für ihr Einverständnis zu dieser Publikation bestens gedankt.

2. Lage der Druckstollen

Die getesteten und hier ausgewerteten Stollen verteilen sich gemäss Tabelle 1 über den schweizerischen Alpenraum.

Die geologischen Verhältnisse sind im Wallis (penninische Decken) meist durch Gneise, kristalline Schiefer und teils durch Bündner Schiefer gekennzeichnet. Auch im Bereich der Kraftwerke Zervreila und Hinterrhein liegen grösstenteils recht ähnliche Verhältnisse vor.

Der Stollen Nalps–Tgom der Kraftwerke Vorderrhein durchquert Gotthardmassiv, Garveramulde und das Tavetscher Zwischenmassiv.

Der Stollen Luzzone–Olivone liegt im Sostoschiefer (Bündner Schiefer).

Der Stollen Albigna durchquert Granite des Bergeller Massivs.

Die Stollen der Engadiner Kraftwerke liegen in den Unterengadiner Dolomiten, d.h. in der Sedimentstufe der Unterengadiner Decken.

Der Stollen im Prättigau liegt grösstenteils im Flysch.

Die Druckstollen der Kraftwerke Linth-Limmern und Sarganserland liegen vorwiegend in autochthonem und parautochthonem Mesozoikum, das auf dem nach Osten abtauchenden Aarmassiv liegt.

Die Stollen im Wägital befinden sich in Kalken, Flyschgesteinen und in der aufgeschobenen Molasse.

Somit ergeben die ausgewählten Beispiele einen informativen Querschnitt über kristalline Gesteine, Bündner Schiefer, Flysch, Kalke, Dolomite sowie Mergel und Sandsteine der aufgeschobenen Molasse.

3. Prinzip der Druckstollen-Abpressversuche

Der Stollen wird – in schematischer Darstellung (Bild 1) – am unteren Ende durch eine Drosselklappe abgeschlossen. Vom oberen Ende her wird das Wasser in den Stollen geleitet bis der Stollen vollständig gefüllt ist. Der Druck wird bis auf den maximalen späteren Betriebsdruck (max. Stauspiegel) gesteigert. Nun wird auch die Einlaufschütze geschlossen.

Tabelle 1. Die Lage der Druckstollen.

Kraftwerk	Druckstollen	Geographische Lage und tektonische Einheit
KW Pallazuit	Les Toules-Pallazuit	Val d'Entremont; Bernharddecke
KW Mauvoisin	Mauvoisin-Bocheresse Bocheresse-Fionnay	Val de Bagnes; Bernharddecke und Bündnerschiefer
KW Gougra	Moiry-Motec Motec-Vissoie	Val d'Anniviers; Bernharddecke und Bündnerschiefer/Ophiolite
KW Ackersand I	Mattsand-Ackersand	Mattertal/Vispertal; Bernharddecke
KW Zervreila	Safien-Balveins	Safiental/Domleschg; Bündnerschiefer
KW Hinterrhein	Valle di Lei-Grenze Niemet-Ferrera Sufers-Bärenburg Bärenburg-Pignia Pignia-Reischen Reischen-Sils	Valle di Lei, Hinterrhein, Schams, Sils i. Domleschg; Surettadecke, Schamser Decken, Bündnerschiefer
KW Vorderrhein	Nalps-Tgom	Vorderrhein; Gotthardmassiv, Garvera Mulde, Tavetscher Zwischenmassiv
KW Blenio	Luzzone-Olivone	Val Blenio/Val di Campo; Bündnerschiefer
Bergeller Kraftwerke	Albigna-Murtaira	Bergell; Bergeller Massiv
Engadiner Kraftwerke	Punt dal Gall-Ova Spin	Spöltal; Sedimente (Engadiner Dolomiten) im Bereich Quattervalsdecke/Silvretta-Scarl-Decke
Bündnerkraftwerke	Klosters-Küblis	Prättigau; Flysch
KW Lindt-Limmern	Limmern Tierfehd-Linthal	Linthal, Kt. Glarus; antochthones Mesozoikum
KW Sarganserland	Gigerwald-Mapragg	Taminagebiet; parautochthones und autochthones Mesozoikum
KW Wägital	Schräh-Rempen Rempen-Siebnen	Wägital; Säntisdecke, Einsiedler Schuppenzone, Flysch und aufgeschobene Molasse

Tabelle 2. Wasserverluste in Druckstollen bei Erstfüllung (Wasser-Abpressversuche).

Stollen	Abmessungen		Versuch		Verlust		Bemerkungen
	Länge[1] km	Durchmesser m	Druck[2] bar	Dauer Tage	Gesamt l/s	Spezifisch l/s·km·bar	
Bocheresse-Fionnay	2.7	3.20	17.0	-	0.30	0.01	-
Mattsand-Ackersand	12.1	2.50	3.2	-	0.95	0.02	-
Valle di Lei-Grenze	1.5	4.30	12.5	0.5	0.63	0.03	Versuchsdauer zu kurz
Motec-Vissoie	5.8	2.40	2.9	7.0	1.00	0.06	stationärer Verlust
Nalps-Tgom	3.0	3.40	10.3	3.5	2.24	0.07	nicht stat. Endverlust
Pignia-Reischen	4.3	5.40	5.3	7.0	3.60	0.16	nicht stat. Endverlust
Schräh-Rempen	3.7	3.60	6.3	-	-	0.27	-
Gigerwald-Mapragg	6.4	4.70	11.5	-	22.10	0.30	-
Les Toules-Pallazuit	5.7	2.10	8.2	-	15.00	0.32	-
Luzzone-Olivone	2.0	2.80	18.7	7.0	12.00	0.32	quasistat. Endverlust
Reischen-Sils	5.9	5.40	7.1	5.0	13.60	0.33	nicht stat. Endverlust
Bärenburg-Pignia	2.9	5.40	4.2	5.5	4.20	0.35	nicht stat. Endverlust
Klosters-Küblis	10.5	2.24	2.0	-	12.00	0.59	-
Moiry-Motec	3.1	2.40	11.2	3.0	23.00	0.66	stationärer Verlust
Tierfehd-Linthal	3.9	3.30	2.7	-	7.10	0.67	-
Safien-Balveins	11.5	3.15	3.7	-	28.50	0.67	stat. Verlust Dez. 1957
Niemet-Ferrera	3.0	4.30	12.5	4.0	38.00	1.01	stationärer Verlust
Sufers-Bärenburg	3.3	5.60	5.1	11.5	18.00	1.07	quasistat. Endverlust
Punt dal Gall-Ova Spin	7.6	3.70	14.5	4.0	133.00	1.21	stationärer Verlust
Albigna-Murtaira	4.8	2.50	8.0	-	50.00	1.30	-
Limmern	2.3	3.10	11.3	-	48.00	1.85	-
Rempen-Siebnen	2.5	3.60	2.3	-	-	2.80	-
Mauvoisin-Bocheresse	2.0	3.20	16.0	-	246.00	7.70	vor Einziehen Gunitring

1) ohne gepanzerte Strecken 2) Mittel in Stollenachse

In vorhandenen Vertikalschächten (z.B. Einlauf und Wasserschloss) wird der Wasserspiegel über einige Tage beobachtet. Aus dem allfälligen Absinken des Wasserspiegels kann der gesamte Wasserverlust berechnet werden. Der Versuch sollte unter periodischem Nachfüllen von Wasser so lange andauern, bis der stationäre Verlust gemessen werden kann. Verluste durch Schützen, Klappen, Panzertüren werden in Abzug gebracht, um den Nettoverlust durch den Fels zu bestimmen.

Nach Druckprobe und Entleerung wird der Stollen sofort kontrolliert. Neue Risse, Wassereintritte usw. werden registriert. Allfällige Schäden werden repariert. In seltenen Fällen mit hohen Verlusten werden noch Verstärkungen (z.B. ein Innenring) ausgeführt. Mit einer neuen Druckprobe wird der Erfolg von Reparaturen oder Verstärkungen überprüft.

4. Bauliche Ausführung der überprüften Druckstollen

Die untersuchten Druckstollen wurden mit Ausnahme des gefrästen Stollens Gigerwald-Mapragg in konventionellem Sprengvortrieb erstellt. Die Stollen sind mit unbewehrtem Beton von 25 bis 35 (zum Teil 50) cm Stärke ausgekleidet. Die entstandenen Sprengauflockerungen sind durch Zementinjektionen wieder verbessert, d.h. abgedichtet worden. Diese Injektionen bilden einen Bestandteil der meistens vorgesehenen Injektionsprogramme, wobei Füll-, Kontakt- und Konsolidationsinjektionen unterschieden werden.

Länge und Innendurchmesser der Stollen gehen aus Tabelle 2 hervor.

5. Gemessene Wasserverluste

Die gemessenen Wasserverluste sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Als Vergleichswert von Stollen zu Stollen und von Gestein zu Gestein dient der spezifische Verlust in l/s km bar. Der Gesamtverlust wird somit durch die Stollenlänge sowie durch den aufgebrachten Druck, bezogen auf die mittlere Höhe der Stollenachse, geteilt.

In Tabelle 2 sind die Stollen in der Reihenfolge der zunehmenden spezifischen Verluste aufgeführt. Zum Verständnis der Grössenordnung der gemessenen Verluste sei angeführt, dass für den Kraftwerksbetrieb im allgemeinen Resultate bis zu 1 l/s km bar gerade noch als tragbar betrachtet werden.

6. Interpretation der Wasserverluste

6.1 Grundlagen zur Berechnung der Felsdurchlässigkeit

Im folgenden wird versucht, die gemessenen Wasserverluste mit der Wasserdurchlässigkeit des Gebirges und der Stollenauskleidung in Beziehung zu setzen. Sodann werden globale Durchlässigkeitswerte für das Gebirge berechnet.

Zu diesem Zweck kann die Sickerströmung aus dem Druckstollen ins Gebirge näherungsweise als Umkehrung des Vorganges am unendlich langen Brunnen aufgefasst werden.

Für den unendlich langen Brunnen gilt:

$$q = \frac{2\pi \; k_F \; p}{\ln (R/r)} \qquad (1)$$

mit

q Sickerwassermenge pro Längeneinheit
k_F Durchlässigkeitskoeffizient des Bodens (Felsens)
p Über- bzw. Unterdruck im Brunnen (Stollen)
R Brunnenwirkradius
r Radius des Brunnens (Stollens)

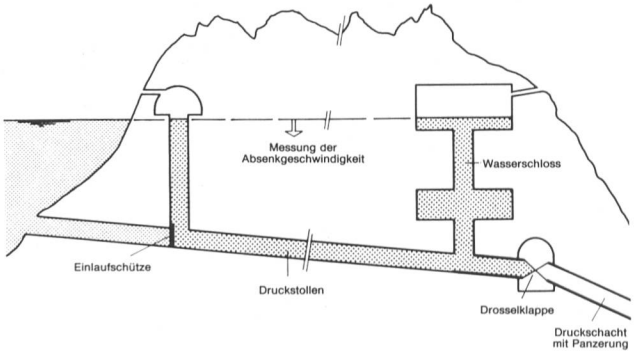

Bild 1. Prinzipskizze eines Druckstollen-Abpressversuchs.

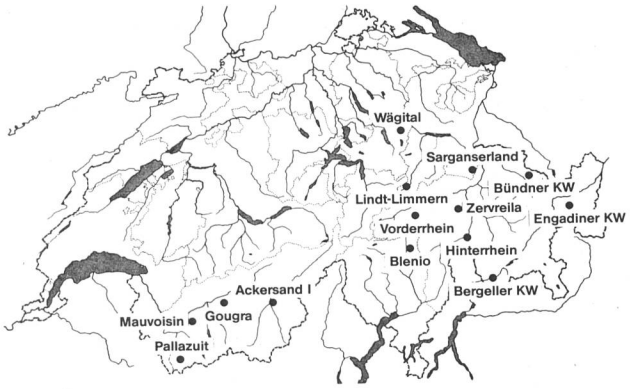

Bild 2. Übersichtskarte mit den Wasserkraftanlagen, von denen Abpressversuche ausgewertet werden konnten.

Für den dem mit Beton verkleideten Stollen entsprechenden Fall gibt *M. Muskat* [1] folgende veränderte Brunnengleichung:

$$q = \frac{2\pi \; k_B \; p}{\ln[(r+d)/r] + \ln[R/(r+d)]\, k_B/k_F} \qquad (2)$$

mit neu

k_B Durchlässigkeitskoeffizient des Betons

d Betonstärke

Die Wasserverluste pro Stollenlängeneinheit sind somit direkt proportional zum Innendruck. Dies gilt auch für die Zugspannungen bzw. allfälligen Rissbildungen an der Stollenwandung, die neben der reinen Materialdurchlässigkeit oft die wichtigste Ursache für das Auftreten von Wasserverlusten sind.

Wird in vorgenannter veränderter Brunnengleichung für den Wirkradius R der übliche Wert von 500 r bzw. 500 $(r + d)$ eingeführt und die Betonstärke d zu 0,2 r festgesetzt, so ergibt sich für den spezifischen Wasserverlust in l/s pro km Stollen und bar Überdruck:

$$q \; [\text{in l/s km bar}] = \frac{6{,}3 \;\; 10^5 k_B}{0{,}18 + 6{,}2 \; k_B/k_F} \qquad (3)$$

wobei k_B und k_F in cm/s einzuführen sind.

Aus der Auswertung der Formel (3) für verschiedene Verhältnisse von k_{Beton} zu k_{Fels} können folgende Schlüsse gezogen werden:

1. Bei schlechten bis mittleren Felsverhältnissen (Wasserdurchlässigkeit) hat die Dichtigkeit der Betonverkleidung einen wesentlichen Einfluss auf die Wasserverluste aus dem Stollen.
2. Bei sehr dichtem Fels spielt die Qualität der Verkleidung nur eine untergeordnete Rolle, so dass sie ohne weiteres entbehrt werden kann, wenn sie nicht aus Gründen der Wandrauhigkeit benötigt wird (Standsicherheitserwägungen dürften bei guten Felsverhältnissen ohnehin entfallen).
3. Bei einer guten Betondichtigkeit sind andererseits die Felsverhältnisse von geringem Einfluss auf die Wasserverluste.

Diese Folgerungen sind für die vorliegende Auswertung von Bedeutung: Um die Felsdurchlässigkeiten zu berechnen, muss zuerst die Durchlässigkeit der Betonauskleidung angenommen werden. Von dieser Annahme hängt die berechnete Felsdurchlässigkeit ab. Es zeigt sich, dass die berechnete Felsdurchlässigkeit um so weniger von der Betondurchlässigkeit abhängt, je kleiner die Felsdurchlässigkeit selbst ist.

Mathematisch kann dies durch Auflösung der Beziehung (3) nach k_F gezeigt werden:

$$k_F = \frac{6{,}2 \; k_B q}{6{,}3 \; 10^5 \; k_B - 0{,}18 \; q} \qquad (4)$$

mit k_F, k_B in cm/s und q in l/s km bar

Grenzfälle

Durch jeweilige Betrachtung des Nenners von (4) und nachher der Gesamtformel (4) ergeben sich die Grenzwerte für k_F wie folgt:

a) $k_B \to 0 \to k_F = -\dfrac{6{,}2 \; k_B}{0{,}18}$ keine Aussage über k_F möglich, wenn Auskleidung zu dicht ist

b) $k_B \to \infty \to k_F = \dfrac{6{,}2 \; q}{6{,}3 \; 10^5}$ k_F strebt gegen einen Grenzwert, der nur noch von q abhängig ist

c) $q \to 0 \to k_F = \dfrac{6{,}2 \; q}{6{,}3 \; 10^5}$ siehe b)

Tabelle 3. Berechnung der Felsdurchlässigkeit.

Stollen	Spez. Verlust l/s·km·bar	Felsdurchlässigkeit k_F (cm/s)					
		($k_B=10^{-8}$ cm/s)	($k_B=10^{-7}$ cm/s)	($k_B=10^{-6}$ cm/s)	($k_B=10^{-5}$ cm/s)	($k_B=10^{-4}$ cm/s)	(k_B = 1 cm/s)
Bocheresse-Fionnay	0.01	$1.37 \cdot 10^{-7}$	$1.01 \cdot 10^{-7}$	$0.99 \cdot 10^{-7}$	$0.98 \cdot 10^{-7}$	$0.98 \cdot 10^{-7}$	$0.98 \cdot 10^{-7}$
Mattsand-Ackersand	0.02	$4.59 \cdot 10^{-7}$	$2.08 \cdot 10^{-7}$	$1.98 \cdot 10^{-7}$	$1.97 \cdot 10^{-7}$	$1.97 \cdot 10^{-7}$	
Valle di Lei-Grenze	0.03	$2.07 \cdot 10^{-6}$	$3.23 \cdot 10^{-7}$	$2.98 \cdot 10^{-7}$	$2.95 \cdot 10^{-7}$	$2.95 \cdot 10^{-7}$	
Motec-Vissoie	0.06	$- 0.83 \cdot 10^{-6}$	$7.13 \cdot 10^{-7}$	$6.00 \cdot 10^{-7}$	$5.91 \cdot 10^{-7}$	$5.91 \cdot 10^{-7}$	
Nalps-Tgom	0.07	$- 0.69 \cdot 10^{-6}$	$8.61 \cdot 10^{-7}$	$7.03 \cdot 10^{-7}$	$6.90 \cdot 10^{-7}$	$6.89 \cdot 10^{-7}$	
Pignia-Reischen	0.16	$- 0.44 \cdot 10^{-6}$	$2.90 \cdot 10^{-6}$	$1.65 \cdot 10^{-6}$	$1.58 \cdot 10^{-6}$	$1.58 \cdot 10^{-6}$	
Schräh-Rempen	0.27	$- 0.39 \cdot 10^{-6}$	$1.16 \cdot 10^{-5}$	$2.88 \cdot 10^{-6}$	$2.68 \cdot 10^{-6}$	$2.66 \cdot 10^{-6}$	
Gigerwald-Mapragg	0.30	$- 0.39 \cdot 10^{-6}$	$2.06 \cdot 10^{-5}$	$3.23 \cdot 10^{-6}$	$2.98 \cdot 10^{-6}$	$2.95 \cdot 10^{-6}$	
Les Toules-Pallazuit	0.32	$- 0.39 \cdot 10^{-6}$	$3.67 \cdot 10^{-5}$	$3.47 \cdot 10^{-6}$	$3.18 \cdot 10^{-6}$	$3.15 \cdot 10^{-6}$	
Luzzone-Olivone	0.32	$- 0.39 \cdot 10^{-6}$	$3.67 \cdot 10^{-5}$	$3.47 \cdot 10^{-6}$	$3.18 \cdot 10^{-6}$	$3.15 \cdot 10^{-6}$	
Reischen-Sils	0.33	$- 0.39 \cdot 10^{-6}$	$5.68 \cdot 10^{-5}$	$3.59 \cdot 10^{-6}$	$3.28 \cdot 10^{-6}$	$3.25 \cdot 10^{-6}$	
Bärenburg-Pignia	0.35	$- 0.38 \cdot 10^{-6}$	?	$3.83 \cdot 10^{-6}$	$3.48 \cdot 10^{-6}$	$3.45 \cdot 10^{-6}$	
Klosters-Küblis	0.59	$- 0.37 \cdot 10^{-6}$	$- 0.85 \cdot 10^{-5}$	$6.98 \cdot 10^{-6}$	$5.91 \cdot 10^{-6}$	$5.82 \cdot 10^{-6}$	
Moiry-Motec	0.66	$- 0.36 \cdot 10^{-6}$	$- 0.73 \cdot 10^{-5}$	$0.80 \cdot 10^{-5}$	$0.66 \cdot 10^{-5}$	$0.65 \cdot 10^{-5}$	
Safien-Balveins	0.67	$- 0.36 \cdot 10^{-6}$	$- 0.72 \cdot 10^{-5}$	$0.82 \cdot 10^{-5}$	$0.67 \cdot 10^{-5}$	$0.66 \cdot 10^{-5}$	
Tierfehd-Linthal	0.67	$- 0.36 \cdot 10^{-6}$	$- 0.72 \cdot 10^{-5}$	$0.82 \cdot 10^{-5}$	$0.67 \cdot 10^{-5}$	$0.66 \cdot 10^{-5}$	
Niemet-Ferrera	1.01	$- 0.36 \cdot 10^{-6}$	$- 0.52 \cdot 10^{-5}$	$1.40 \cdot 10^{-5}$	$1.02 \cdot 10^{-5}$	$1.00 \cdot 10^{-5}$	
Sufers-Bärenburg	1.07	$- 0.36 \cdot 10^{-6}$	$- 0.51 \cdot 10^{-5}$	$1.52 \cdot 10^{-5}$	$1.08 \cdot 10^{-5}$	$1.06 \cdot 10^{-5}$	
Punt dal Gall-Ova Spin	1.21	$- 0.35 \cdot 10^{-6}$	$- 0.48 \cdot 10^{-5}$	$1.82 \cdot 10^{-5}$	$1.23 \cdot 10^{-5}$	$1.19 \cdot 10^{-5}$	
Albigna-Murtaira	1.30	$- 0.35 \cdot 10^{-6}$	$- 0.47 \cdot 10^{-5}$	$2.04 \cdot 10^{-5}$	$1.33 \cdot 10^{-5}$	$1.28 \cdot 10^{-5}$	
Limmern	1.85	$- 0.35 \cdot 10^{-6}$	$- 0.42 \cdot 10^{-5}$	$3.86 \cdot 10^{-5}$	$1.92 \cdot 10^{-5}$	$1.83 \cdot 10^{-5}$	
Rempen-Siebnen	2.80	$- 0.35 \cdot 10^{-6}$	$- 0.39 \cdot 10^{-5}$	$1.38 \cdot 10^{-4}$	$3.00 \cdot 10^{-5}$	$2.78 \cdot 10^{-5}$	
Mauvoisin-Bocheresse	7.70	$- 0.35 \cdot 10^{-6}$	$- 0.36 \cdot 10^{-5}$	- ...	$0.97 \cdot 10^{-4}$	$0.77 \cdot 10^{-4}$	$0.76 \cdot 10^{-4}$

6.2 Einfluss der Betonauskleidung

Wenn im Fall b) die Betondurchlässigkeit gross ist, so hängt die Bestimmung von k_F wenig bis gar nicht von k_B ab. Für sehr geringe Messwerte von q im Fall c) trifft dasselbe zu. Dies ist der schon erwähnte Fall der an sich geringen Felsdurchlässigkeit.
Nur im Fall a) mit zu grosser Betondichtigkeit versagt die Auswertungsmethode. Es kann nichts mehr über den Fels ausgesagt werden, wenn die Stollenauskleidung praktisch wasserdicht ist.
Bei den ausgewerteten Stollen wurde meistens nur eine unbewehrte Betonauskleidung vorgesehen. Deshalb entstehen im Betrieb unter dem Wasserinnendruck feine oder manchmal auch gröbere Risse, die sich bei Entleerung des Stollens wieder schliessen. Deshalb dürften übliche Laborwerte der Betondurchlässigkeit (Bereich 10^{-7} bis 10^{-9} cm/s) sehr selten erreicht werden.
Bei der Berechnung der k_F-Werte für jeden Stollen in Tabelle 3 wurde k_B in weiten Grenzen variiert, um das eben Gesagte numerisch zu veranschaulichen.

6.3 Einfluss des Bergwasserspiegels

Ein weiterer Einflussfaktor bei der Bestimmung von k_F ist der Bergwasserspiegel. In Beziehung (2) ist der Druck p als Differenz zwischen dem Wasserdruck im Stollen und dem Bergwasserdruck einzusetzen.
Solange die Stollen eindeutig über einem durchgehenden Bergwasserspiegel liegen, kann der Innendruck ohne Abzug eingesetzt werden. Dies dürfte bei den untersuchten Stollen oft so sein, da die Stollen hoch über der Talsohle flach zum jeweiligen Wasserschloss führen, von welchem her dann das konzentrierte Gefälle ausgenützt wird.
Immerhin sind auch aus der Schweiz einige Stollen bekannt, bei denen die Zuflüsse grösser waren als die Verluste. Diese Stollen (z.B. ein Stollen im Vorderrheintal) wurden für die vorliegende Studie nicht berücksichtigt.
Diejenigen Fälle, bei denen der Innendruck durch den Aussendruck nur teilweise reduziert wird, sind schwieriger zu erkennen.
Quantitative Aussagen können nur gemacht werden, wenn Piezometermessungen zur Erfassung des Bergwasserspiegels vorhanden sind.
Zur Abschätzung des Fehlers, der entstanden sein kann, wenn im einen oder anderen Fall die Wirkung eines Bergwasserspiegels nicht entdeckt wurde, wird Formel (4) betrachtet.
In (4) hat der spezifische Verlust q die Einheit l/s km bar. Für die wirksame Druckdifferenz Δp ergibt sich der Verlust $q^* = q\ \Delta p$ in l/s km. Es gilt somit

$$q = q^*/\Delta p \qquad (5)$$

Einsetzen von (5) in (4) ergibt

$$k_F = \frac{6{,}2\ k_B\ q^*/\Delta p}{6{,}3\ 10^5\ k_B - 0{,}18\ q^*/\Delta p}$$

bzw.

$$k_F = \frac{6{,}2\ k_B\ q^*}{6{,}3\ 10^5\ k_B\ \Delta p - 0{,}18\ q^*}$$

Grenzwert

Für $\Delta p \rightarrow 0 \rightarrow k_F = -6{,}2\ k_B/0{,}18$

Wie für den Fall $k_B \rightarrow 0$ ist auch hier keine Aussage mehr über k_F möglich (keine Strömung mehr).

Numerisches Beispiel für einen Fall mit reduziertem Δp (Druckstollen Reischen–Sils):

Δp = 7,1 bar (voller Druck)
q = 0,33 l/s km bar
q^* = $q\ \Delta p$ = 2,34 l/s km
k_B = 10^{-6} cm/s

Δp (bar)	Δp (%)	k_F (cm/s)
7,1	100	3,59 10^{-6}
3,55	50	7,99 10^{-6}
1,775	25	20,81 10^{-6}
0,8875	12,5	85 10^{-6}

Das Beispiel zeigt, dass Druckabweichungen bis zu rund 50% die Grössenordnung der berechneten Felsdurchlässigkeit k_F nicht verändern. Bei grösseren Abweichungen nimmt der Fehler allerdings exponentiell zu.
Für die Belange der vorliegenden Auswertung werden allfällige Fehler aus der Wirkung des Bergwasserspiegels für tragbar betrachtet, da die berechnete Grössenordnung von k_F als gesichert gelten kann.

6.4 Einfluss des Brunnenwirkradius

Gleichung (2) zeigt, dass der Brunnenwirkradius R einen Einfluss auf die Berechnung von k_F ausübt.
Eine Variation des Verhältnisses $R/(r + d)$ soll diesen Einfluss aufzeigen.
Als typisches Beispiel wird gewählt:

q = 0,30 l/s km bar
k_B = 10^{-6} cm/s
$R/(r + d)$ = 100, 200, 500, 1000

Mit diesen Werten erhält man:

$R/(r + d)$	k_F (cm/s)
100	2,40 10^{-6}
200	2,76 10^{-6}
500*	3,23 10^{-6}
1000	3,60 10^{-6}

* für Auswertung gewählt

Für die Praxis sind Wirkungsradien von weniger als 500 $(r + d)$ von Interesse, wobei an eine nahe Geländeoberfläche gedacht wird. In diesem Fall ist der Druckgradient des Felswassers grösser als bei durchschnittlichen Verhältnissen ($R/[r + d]$ = 500), so dass die Felsdurchlässigkeit in Wirklichkeit kleiner sein muss. Die Variation der k_F-Werte ist jedoch bescheiden, wie die Tabelle zeigt.

6.5 Einfluss der Stollen-Endzonen

Die bisherigen Überlegungen beruhen alle auf einem zweidimensionalen Modell, worin die Strömungsvorgänge in Querschnittsebenen betrachtet werden, die normal zur Stollenachse stehen.
Für die Stollen mit überragender Längenausdehnung ist dies richtig, zumal der statische Druck während des Abpressversuchs von Ort zu Ort im Stollen kaum ändert, da die Stollen mehr oder weniger horizontal verlaufen. Somit bestehen für Wasser, welches in den Fels austritt, in verschiedenen Querschnitten die gleichen Druckbedingungen (Risse in Beton gleichmässig verteilt). Es ist also hydraulisch nicht möglich, dass Wasser beispielsweise in einer angenommenen Auflockerungszone hinter der Betonauskleidung in Längsrichtung (parallel zur Stollenachse) strömt, da kein Druckgradient vorhanden ist.
Hingegen muss überlegt werden, ob in den Stollen-Endzonen singuläre Wasserverluste stattfinden durch Entweichen von Wasser parallel zur Stollenachse hin zur freien Oberfläche.

Durch bauliche Massnahmen sind solche Endverluste weitgehend unterbunden, indem die Endzonen eine durchgehende Stahlpanzerung aufzuweisen pflegen. Je nach Hangneigung und Standort des Wasserschlosses beträgt die Länge der Stahlpanzerung 100 bis 200 m oder mehr. Mit der Panzerung kann man Endverluste meistens unterbinden. Drainagebohrungen dienen zur genauen Kontrolle, da Wasseraustritte im Bereich von Wasserschloss und Beginn der Druckleitung/Druckschacht unbedingt vermieden werden müssen wegen möglicher Hangrutschungen usw. Falls bei Abpressversuchen Drainagewasser festgestellt wurde, wurde dieses zur Berechnung des Nettoverlustes vom Bruttoverlust abgezogen.

6.6 Berechnung der Felsdurchlässigkeit

Aus Formel (4) ergeben sich nach Einsetzen der gemessenen spezifischen Verluste gemäss Tabelle 2 die globalen Felsdurchlässigkeiten k_F der getesteten geologischen Einheiten. Die Berechnung erfolgte in Tabelle 3 für einen weiten Bereich der Betondurchlässigkeit k_B (10^{-8} bis 10^{-4} cm/s und als Extremwert 1 cm/s).

Das Zahlenfeld für k_F in Tabelle 3 zeigt numerisch deutlich die bereits festgestellten Grenzfälle:

– Am rechten Rand mit grosser Durchlässigkeit des Betons strebt k_F sehr bald gegen einen Grenzwert, der nur von q abhängig ist.

– Am oberen Rand mit kleinem q hat k_B ebenfalls einen geringen Einfluss auf k_F.

Tabelle 4. Zuordnung der Felsdurchlässigkeiten zu den geologischen Verhältnissen.

Druckstollen	Felsdurchlässigkeit k_F cm/s	Geolog. Verhältnisse	Stollenauskleidung[1)]
Bocheresse-Fionnay	$1.0 \cdot 10^{-7}$	Casannaschiefer, Gneis	25 cm Beton
Mattsand-Ackersand	$2.0 \cdot 10^{-7}$	Gneis u. untergeordnet Bündnerschiefer	Betonauskleidung
Valle di Lei-Grenze	$3.0 \cdot 10^{-7}$	Casannaschiefer	Betonauskleidung
Motec-Vissoie	$6.0 \cdot 10^{-7}$	Casannaschiefer; grosse Mylonitzonen	Betonauskleidung
Nalps-Tgom	$7.0 \cdot 10^{-7}$	vorwiegend Paragneis, untergeordnet Tonschiefer, Sandkalk u. Dolomit	Betonauskleidung
Pignia-Reischen	$1.7 \cdot 10^{-6}$	Flysch u. Gneis sowie Kalke, Dolomite, Brekzien, Schiefer, Gips, Tonschiefer (z.T. Bündnerschiefer) in Tschera- und Gelbhornzone	Betonauskleidung
Schräh-Rempen	$2.9 \cdot 10^{-6}$	Kalk, Flyschgesteine, Molasse	20-50 cm Beton, z.T. Innenring, 8 cm bewehrter Spritzbeton
Gigerwald-Mapragg	$3.2 \cdot 10^{-6}$	Kalk	Betonauskleidung
Les Toules-Pallazuit	$3.5 \cdot 10^{-6}$	Gneise	-
Luzzone-Olivone	$3.5 \cdot 10^{-6}$	Bündnerschiefer	20-32 cm Beton
Reischen-Sils	$3.6 \cdot 10^{-6}$	Bündnerschiefer (Tonschiefer, Kalkschiefer), Kalke	Betonauskleidung
Bärenburg-Pignia	$3.8 \cdot 10^{-6}$	Porphyr u. Augengneis	Betonauskleidung
Klosters-Küblis	$0.7 \cdot 10^{-5}$	Flysch	dito, z.T. Innenring
Moiry-Motec	$0.8 \cdot 10^{-5}$	Casannaschiefer u. Triasgesteine	Betonauskleidung u. sehr viel Injektionen
Safien-Balveins	$0.8 \cdot 10^{-5}$	Bündnerschiefer	Betonauskleidung
Tierfehd-Linthal	$0.8 \cdot 10^{-5}$	Kalk, Dachschiefer, Sandstein	Betonauskleidung
Niemet-Ferrera	$1.4 \cdot 10^{-5}$	Porphyr- u. Casannaschiefer sowie eine Zone mit Triasgesteinen	Betonauskleidung
Sufers-Bärenburg	$1.5 \cdot 10^{-5}$	vorwiegend Porphyr	Betonauskleidung
Punt dal Gall-Ova Spin	$1.8 \cdot 10^{-5}$	Dolomit	Betonauskleidung
Albigna-Murtaira	$2.0 \cdot 10^{-5}$	Granit	Betonauskleidung
Limmern	$3.9 \cdot 10^{-5}$	Kalk	Betonauskleidung
Rempen-Siebnen	$1.4 \cdot 10^{-4}$	Mergel u. Sandsteine (Molasse)	50 cm Beton und z.T. 7-8 cm Spritzbeton armiert
Mauvoisin-Bocheresse	$2.0 \cdot 10^{-4}$	Bündnerschiefer, Quarzite, Dolomite	25 cm Beton u. bewehrter Spritzbeton

1) Wenn keine Stärke angegeben ist, handelt es sich im Normalfall um 25-35 cm Beton

– Am linken Rand gerät man mit zunehmendem q bald in den Bereich negativer k_F-Werte. k_B ist hier zu klein (Beton zu dicht), um eine Aussage bezüglich k_F zu erlauben.

– Der untere Rand, charakterisiert durch grosse q bzw. grosse Felsdurchlässigkeit, zeigt durch die Kombination von grossem k_F und kleinem k_B vermehrt die unbestimmte Situation, in der k_F nicht angegeben werden kann.

Aus dem bereits geschilderten Verhalten der Stollenauskleidungen, die unter Innendruck Zugrisse aufweisen, wird abgeleitet, dass k_B erheblich grösser ist als für Laborverhältnisse (10^{-7} bis 10^{-9} cm/s). Es wird ein Bereich von 10^{-5} bis 10^{-6} cm/s gewählt. Für die weiteren Betrachtungen wird im Normalfall, wenn nicht besondere Kenntnisse über die Durchlässigkeit vorliegen, von $k_B = 10^{-6}$ cm/s ausgegangen.

Tabelle 3 zeigt, dass noch stärker durchlässige k_B-Werte die Ergebnisse von k_F nur unwesentlich verändern.

6.7 Felsklassifikation nach Durchlässigkeit aufgrund der Stollen-Abpressversuche

Die berechneten k_F-Werte sind in Tabelle 4 zusammengefasst und den jeweiligen geologischen Verhältnissen zugeordnet.

Die ermittelten Werte stellen die globalen Felsdurchlässigkeiten über die ganzen Stollenlängen dar, wobei ein Wertbereich von 10^{-4} bis 10^{-7} cm/s resultiert. Pro Stollen wurden zum Teil mehrere geologische Einheiten in den Globaltest einbezogen, so dass ein Rückschluss auf das Verhalten einer bestimmten geologischen Einheit nicht immer leicht ist. Durch das Studium der einzelnen geologischen Profile längs der untersuchten Druckstollen konnten aber doch einige einzelne Gebirgsformationen mit den zugehörigen Durchlässigkeiten k_F bestimmt werden. Diese etwas allgemeiner verwendbaren Resultate der in der Studie berücksichtigten schweizerischen Druckstollen (Auswahl) sind in der Tabelle 5 zusammengefasst.

7. Schlussfolgerungen

Die ermittelten k_F-Werte liegen nach *Heitfeld* [2] im Bereich «deutlich durchlässig» beim Sandstein bzw. «gering durchlässig» bei den kristallinen Schiefern und Gneisen. Zum Vergleich mit dem ganzen Schwankungsbereich des k_F-Wertes wird die entsprechende Gliederung nach Heitfeld herangezogen:

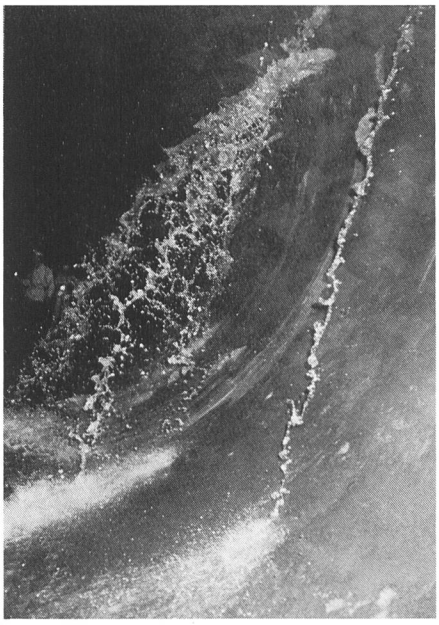

Bild 3. Starke Wassereintritte in einen schweizerischen Druckstollen infolge eines hohen Bergwasserspiegels. Beobachtung anlässlich der Stollenentleerung im Frühling 1984 (Foto H. Bärtschi, Gruner AG).

Gestein	k_F-Wert
sehr gering durchlässig	$\leqq 1 \cdot 10^{-8}$ cm/s
gering durchlässig	$> 1 \cdot 10^{-8}$ bis $1 \cdot 10^{-5}$ cm/s
deutlich durchlässig	$> 1 \cdot 10^{-5}$ cm/s bis $5 \cdot 10^{-3}$ cm/s
stark durchlässig	$> 5 \cdot 10^{-3}$ cm/s bis $1 \cdot 10^{-1}$ cm/s
sehr stark durchlässig	$> 1 \cdot 10^{-1}$ cm/s

Zu Tabelle 5 im einzelnen sei folgender Kommentar angefügt:

1. Die getesteten kristallinen Schiefer und Gneise gehören vorwiegend den penninischen Decken an. Die tektonische Vorgeschichte dieser Decken hat meistens eine recht ausgeprägte Klüftung erzeugt. Die Durchlässigkeit in den autochthonen Massiven und im Grundkristallin dürfte zum Teil geringer sein.
2. Die recht günstigen Resultate im Bündner Schiefer, aber auch im Flysch, rufen nach einem Quervergleich mit den Mergeln, welche je nach Tongehalt und Klüftung ein ähnliches Durchlässigkeitsverhalten wie die Bündner Schiefer aufweisen mögen. In wenig geklüfteten, plastischen, stark tonhaltigen Mergeln dürfte jedoch die Durchlässigkeit erheblich kleiner als im Bündner Schiefer sein.
3. Aus den Versuchen in Granit und Porphyr ist zu schliessen, dass eine deutliche Klüftung wie erwartet eine erhebliche Durchlässigkeit erzeugt (deutliche Zerrklüfte im Bergeller Granit und Zerr-/Druckklüfte im Rofna-Porphyr). Eine Übertragung auf andere Granite ist nur bedingt möglich.
4. Die getesteten Kalke und Dolomite zeigen entsprechend ihrer Bankung und Klüftung ebenfalls eine deutliche Durchlässigkeit.
5. Noch durchlässiger sind die Sandsteine der aufgeschobenen Molasse. Es wird angenommen, dass flach liegende Sandsteine (Mittelland) mit weniger ausgeprägter Klüftung meist auch eine geringere Durchlässigkeit aufweisen.

Bezüglich der Durchlässigkeit der Sandsteine ist der Einfluss des Alters des Gesteins zu erwähnen. *Karrenberg* [2] berichtet z.B. von Sandsteinen des Devon mit $k_F = 2 \cdot 10^{-11}$ bis 10^{-12} cm/s.

Meistens gilt die Regel, dass die älteren Gesteine undurchlässiger sind als die jüngeren.

Der Unterschied zwischen der Gesteinsdurchlässigkeit und derjenigen des Gebirges samt allen Klüften, Schichtfugen usw. ist augenfällig. Als Beispiel sei eine Aufstellung von *Louis* in [2] zitiert:

Gestein		Fels mit einer Kluft/lfdm	
Gesteinsart	k_G (cm/s)	Spaltweite (mm)	k_F (cm/s) in der Kluftrichtung
1. Kalksteine	$0.36 - 23 \cdot 10^{-13}$	0.1	$0.7 \cdot 10^{-4}$
2. Sandsteine			
. Karbon	$0.29 - 6 \cdot 10^{-11}$	0.2	$0.6 \cdot 10^{-3}$
. Devon	$0.21 - 2 \cdot 10^{-11}$	0.4	$0.5 \cdot 10^{-2}$
3. Mischgesteine			
. sandig-kalkig	$0.33 - 33 \cdot 10^{-12}$	0.7	$2.5 \cdot 10^{-2}$
. tonig-kalkig	$0.85 - 130 \cdot 10^{-13}$	1.0	$0.7 \cdot 10^{-1}$
. kalkig-tonig	$0.27 - 80 \cdot 10^{-12}$		
4. Granit	$0.5 - 2 \cdot 10^{-10}$	2.0	0.6
5. Schiefer	$0.7 - 1.6 \cdot 10^{-10}$	4.0	$0.5 \cdot 10^{1}$
6. Kalkstein	$0.7 - 120 \cdot 10^{-9}$		
7. Dolomit	$0.5 - 1.2 \cdot 10^{-8}$	6.0	$1.6 \cdot 10^{1}$

Die effektive Durchlässigkeit eines Gebirgskörpers kann deshalb nur in situ bestimmt werden. Zur Bestimmung von repräsentativen Durchschnittswerten eignen sich nur grossräumige Versuchsanordnungen, wie z.B. Stollen-Abpressversuche. Lugeon-Abpressversuche im Bohrloch oder Abpressversuche von Druckkammern geben punktweise Aussagen und erfassen oft zu geringe Gebirgsvolumina oder nur ganz lokale Verhältnisse. Auch bei Ausführung von vielen einzelnen Punktmessungen dürfte der Schluss auf grossräumig wirksame Durchlässigkeiten nicht leicht sein. Zudem ist beim Vergleich von k_F-Werten, die aus verschiedenen Quellen stammen, grosse Vorsicht am Platz. Es können grosse Abweichungen auftreten, die zum Teil aus den ganz unterschiedlichen Versuchsanordnungen herrühren (Gestein/Gebirgsverband).

Tabelle 5. Felsklassifikation nach Durchlässigkeit aufgrund der Stollen-Abpressversuche. Seltene Extremwerte sind in Klammern gesetzt.

Felsdurchlässigkeit k_F (in cm/s)	Felsformation
10^{-7} bis 10^{-6} ($5 \cdot 10^{-6}$)	kristalline Schiefer (z. B. Casanna-schiefer), Gneise
(10^{-6}) $5 \cdot 10^{-6}$ bis 10^{-5}	Bündnerschiefer (Tonschiefer, Kalkschiefer) und Flysch
10^{-5} bis $5 \cdot 10^{-5}$	stark geklüfteter Granit u. Porphyr
($5 \cdot 10^{-6}$) 10^{-5} bis $5 \cdot 10^{-5}$	Dolomit, Kalk; nicht verkarstet
10^{-4} bis $5 \cdot 10^{-4}$	Sandstein (Molasse)

Die vorliegende Bestimmung von Felsdurchlässigkeiten k_F an Formationen der Schweizer Alpen dürfte von Interesse sein, da bisher ausser an Druckstollen unseres Wissens im betrachteten Raum überhaupt noch keine anderen grossräumigen Messungen ausgeführt worden sind.

Literatur

[1] *Muskat, M.* (1946): The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media, McGraw-Hill, New York und London

[2] *Karrenberg, H.* (1981): Hydrogeologie der nichtverkarstungsfähigen Festgesteine, Springer Verlag

Adresse des Verfassers: Dr. *Martin Gysel,* dipl. Bauing. ETH, Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG, Parkstrasse 27, CH-5401 Baden.

Türkei baut Grosskraftwerk «Atatürk»

Das schweizerische Firmenkonsortium Sulzer-Escher Wyss AG, Zürich, und BBC Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie., Baden, hat kürzlich den Auftrag zur Lieferung der hydraulischen und elektrischen Ausrüstung für das 2400-MW-Wasserkraftwerk «Atatürk» erhalten. Der Auftragswert beträgt 960 Mio Schweizer Franken. Die ersten Maschinen sollen 1991 den Betrieb aufnehmen.

Die BBC Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie., Baden, liefert zusammen mit den Tochtergesellschaften in Deutschland (BBC Mannheim) und Italien (Tecnomasio Italiano Brown Boveri, Mailand) die gesamte elektrische Kraft-

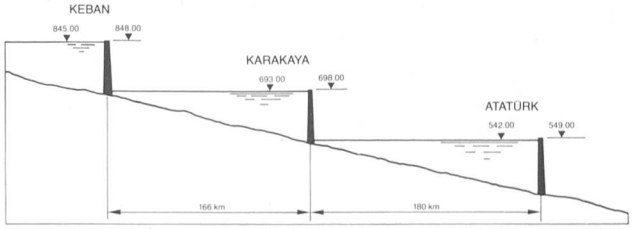

Bild 1. Die drei Euphrat-Staustufen im Schnitt. Das schweizerische Firmenkonsortium Sulzer-Escher Wyss und BBC Brown Boveri liefert die gesamte hydraulische und elektrische Ausrüstung für die Wasserkraftwerke Karakaya und «Atatürk». Karakaya, das 1986 mit der ersten Maschine den Betrieb aufnimmt, weist eine installierte Leistung von 1800 MW auf, «Atatürk» eine solche von 2400 MW.