



Manuel Brenner, BSc

Historische Entwicklung des Druckstollenbaus in Österreich

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Geotechnik und Wasserbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerald Zenz

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Mitbetreuende Assistenten

Dipl.-Ing. Wolfgang Richter

Dipl.-Ing. Franz Georg Pikel

Graz, Mai 2018

Eidesstattliche Erklärung

Affidavit

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Betreuer der Diplomarbeit:
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerald ZENZ

Mitbetreuende Assistenten:
Dipl.-Ing. Wolfgang Richter

Dipl.-Ing. Franz Georg Pikel

Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während meinem Studium und vor allem in den letzten Monaten beim Verfassen dieser Arbeit unterstützt haben.

Mein Dank gilt dem Wasserbau Institut der Technischen Universität Graz für die Zuverfügungstellung von Räumlichkeiten und Literatur sowie für die einwandfreie Betreuung durch Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerald Zenz, Dipl.-Ing. Wolfgang Richter und Dipl.-Ing. Franz Georg Pikel, die bei jeglichen Fragen und Problemen sofort Hilfe leisteten.

Für die gesamte Studienzeit und die damit in Verbindung zu bringenden Momente, wie den vielen Ausflüge und verbrachten Abende, möchte ich mich bei allen Mitgliedern des Beton- und Holzbauzeichensaals bedanken, ohne die mir vermutlich ein Stück an Studentenleben fehlen würde. Explizit zu erwähnen sind dabei Andi, Akis, Florian, Lukas und mein Mitbewohner Julius, mit denen ich so manches erleben durfte.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern Rosemarie und Gerhard, die mich vom ersten Tag an über das ganze Studium hinweg unterstützt haben. Ohne euch wär dies wohl nur schwer möglich gewesen.

Zusätzlich möchte ich meiner langjährigen Freundin Alessandra für ihr Verständnis und die moralische Unterstützung in jeder Situation danken.

Kurzfassung

Das letzte Jahrhundert war im Hinblick auf den Druckstollenbau in Österreich sehr bewegend. Große Wasserbauprojekte haben die Entwicklung entscheidend geprägt und stets zu einer Verbesserung der Bauweisen geführt.

Über die Jahre hinweg ist es in den Bereichen der Bemessung, Auskleidung, Größenordnung, Vortriebsarten zu neuen Aufschlüssen gekommen, welche die Arbeit erleichtert, die Kosten gesenkt und die Dauerhaftigkeit verbessert haben.

Diese Masterarbeit hat das Ziel, wichtige Ereignisse dieser Zeitspanne übersichtlich zusammenzufassen. So wurde eine Zeitachse erstellt, die graphisch einen Überblick der Entwicklung von Querschnittsformen, Auskleidungsarten sowie Vortriebsmethoden und historischen Ereignissen schafft.

Des Weiteren wird auf die Entwicklungsschritte genauer eingegangen. Dabei werden neben technischen Details der Ausführung, zusätzlich Anwendungsbeispiele von gebauten Kraftwerken mit Kennwerten wie der vorhandenen Geologie, hydraulischen Verhältnissen, verwendeten Injektionen und Verortungen in Längenschnitten dargestellt.

Abstract

The development of pressure tunnels in Austria has been very progressing over the last century. The research of hydraulic engineering and rock mechanics was characterized through many different sizes in that field.

Over the years many changes in the section of calculations, linings, magnitudes and advances have been lead to new developments, which have improved the operation, lowered the costs of construction and maintenance.

The goal of the master thesis is to summarise the milestones over this period of time. So a timeline was created to give an graphical overview about the development of cross-sectional shapes, kind of linings as well as advance techniques and historical events.

Furthermore, single developing steps are gone through more in detail. Thereby technical details of the implementation have been illustrated beside typical applications of constructed power plants with characteristic values of the existing geology, hydraulic conditions, used injections and localization at longitudinal sections.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Druckstollen und Druckschächte	1
1.3	Aufgaben der Druckstollen- und Druckschachtauskleidung	3
2	Die Entwicklung der Druckstollenauskleidung	5
2.1	Die Anfänge	5
2.1.1	Stiftsarmstollen Mönchsberg	5
2.2	Unausgekleideter Druckstollen	7
2.3	Bauweisen ohne Vorspannung	9
2.3.1	Putzauskleidungen	9
2.3.1.1	Pichlerwerke bei Weiz (1911)	10
2.3.2	Kombinierte Auskleidung	12
2.3.2.1	Mühlkraftwerk Partenstein (1924)	13
2.3.3	Einfache unbewehrte Betonauskleidung	16
2.3.3.1	Strubklammwerk (1925)	16
2.3.4	Bewehrte Betonauskleidung	19
2.3.4.1	KW Vermunt (1931)	20
2.3.5	Auskleidung durch Spritzbeton	22
2.3.5.1	Möllüberleitungsstollen - Oberstufe Kaprun (1955)	23
2.4	Bauweisen mit Vorspannung	25
2.4.1	Aktive Vorspannung mittels Bewehrung	25
2.4.1.1	System Wayss-Freytag	26
2.4.1.1.1	Hauptstufe Kaprun (1944)	28

2.4.1.2	System Dywidag	30
2.4.1.2.1	KW Lünensee (1958)	31
2.4.2	Passive Vorspannung durch Abstützung auf das Gebirge	33
2.4.2.1	Vorspannung durch Bohrlochinjektion	33
2.4.2.2	Vorspannverfahren nach Kieser	35
2.4.2.2.1	Druckstollen Kops-Vallüla (1950)	38
2.4.2.3	TIWAG - Spaltinjektionsverfahren	40
2.4.2.3.1	KW Kaunertal (1964)	43
2.4.3	Vorgespannte Betonauskleidung mit Dichthaut	47
2.4.3.1	Vorgespannte Betonauskleidung mit Dichtfolie	48
2.4.3.1.1	KWG Sellrain-Silz (1981)	51
2.4.3.2	Vorgespannte Betonauskleidung mit dünnwandiger Pan- zerung	53
2.4.3.3	Vorgespannte Betonauskleidung mit GFK-Rohren	55
2.4.3.3.1	KW Feldsee (2011)	57
2.5	Panzerung aus Stahl	60
2.6	Sohltübbinge	63
2.6.1	Walgauwerk(1984)	64
3	Meilensteine im Druckstollenbau	67
3.1	Cement-Gun (1910)	67
3.2	Das Torkretverfahren (1921)	69
3.3	Walch'sche Grenze (1926)	71
3.4	Kraftwerk Achensee (1927)	73
3.5	Schneckenmaschine (1946)	78
3.6	Erste offizielle Verwendung der NÖT (1953)	79
3.6.1	KW Prutz-Imst (1956)	82
3.7	Tiwag Radialpresse (1954)	85
3.8	Rotormaschine (1957)	88
3.9	Bemessungsverfahren nach Seeber (1960er Jahre)	89
3.10	Beginn des Fräsvortriebes (1967)	92
3.10.1	Floitenbachbeileitung (1967)	95

4 Zusammenfassung	96
Literaturverzeichnis	100
Abbildungsverzeichnis	105
Tabellenverzeichnis	108

Abkürzungen

DS	.....	Druckstollen
GFK	.....	Glasfaserverstärkter Kunststoff
kW	.....	Kilowatt
KW	.....	Kraftwerk
KWG	.....	Kraftwerksgruppe
MW	.....	Megawatt
PSKW	.....	Pumpspeicherkraftwerk
TBM	.....	Tunnelbohrmaschine
TIWAG	.....	Tiroler Wasserkraft AG
VIW	.....	Vorarlberger Illwerke AG

1 Einleitung

1.1 Motivation

Durch die Forschung von verschiedenen Größen im Bereich des Wasserbaus und der Felsmechanik ist es im letzten Jahrhundert zu vielen Veränderungen im österreichischen Druckstollenbau gekommen. Die Auskleidungsarten samt ihren Dimensionen haben sich verändert, neue Vortriebsmethoden sind entstanden und richtungsweisende Schlüsse sind gezogen worden, wodurch die Arbeit erleichtert, Kosten gesenkt und die Dauerhaftigkeit verbessert wurden.

Die folgende Arbeit soll durch das letzte Jahrhundert Druckstollenbau in Österreich führen und einen derzeitigen Überblick sowie einen Ausblick für die Zukunft schaffen.

1.2 Druckstollen und Druckschächte

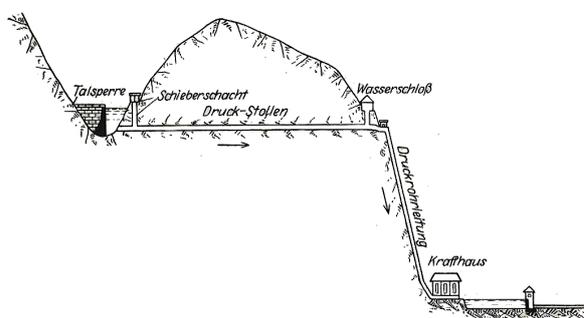
Als "Druckstollen" bezeichnet man Hohlräume, die von einem Gebirge umschlossen werden, entlang einer Achse gerichtet sind und von einer Flüssigkeit oder einem Gas unter Druck gesetzt werden können. [24]

Hauptaufgabe ist der Transport von Wasser bei Wasserversorgungs- und Kraftwerksanlagen. Üblicherweise wird der schwach geneigte Teil des Triebwasserweges als Druckstollen und der stark geneigte, teilweise vertikal ausgeführte Abschnitt, als Druckschacht bezeichnet. In der traditionellen Anordnung eines Drucksystems befindet sich der Druckstollen zwischen der Wasserfassung und dem Wasserschloss. Demnach ist der Druckschacht zwischen dem Wasserschloss und dem Krafthaus angeordnet. Zweck

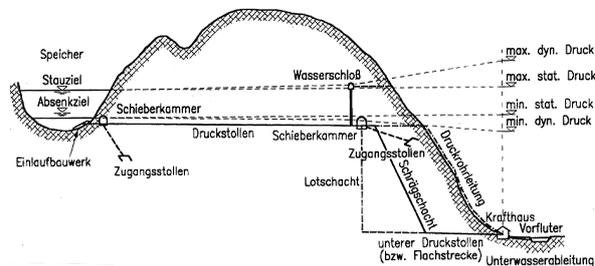
des Wasserschlosses ist es, den Innendruck im langen Druckstollen im Vergleich zum kurzen Druckschacht so gering wie möglich zu halten. Der Stollen wird von der Belastung des Druckstoßes geschützt und das Wasserschloss ermöglicht durch die Entkopplung der Wassermassen überhaupt den netzgekoppelten Betrieb der Kraftwerksanlagen. Dieser Unterschied zwischen Stollen und Schacht spiegelt sich wieder in der Ausführung der Auskleidung. Der stark beanspruchte Druckschacht ist üblicherweise mit einer Stahlpanzerung zu versehen, insbesondere weil dieser im Hangbereich weniger Überlagerungshöhe zur Verfügung hat. Hingegen kann der Druckstollen mit einer kostengünstigeren Betonauskleidung oder sogar unverkleidet ausgeführt werden. Beim Druckstollen wird die Tatsache der Gebirgsüberlagerung durch Ausbaukonzepte berücksichtigt und genutzt. Weitere Auskleidungsoptionen werden in Kapitel 2 erläutert. [42]

Trotz zahlreichen Änderungen im Kraftwerksbau hat sich im letzten Jahrhundert am Grundprinzip nichts verändert. Heute, wie damals, besteht ein Wasserkraftwerk aus 3 Anlageteilen (siehe Abb. 1.1): [45]

- der Wasserfassung bzw. dem Speicher
- dem Triebwasserweg (Druckstollen, Wasserschloss, Druckrohrleitung bzw. Druckschacht)
- dem Krafthaus



(a) Prinzip Walch [53]



(b) Prinzip Seeber [45]

Abbildung 1.1: Vergleich der Prinzipie

1.3 Aufgaben der Druckstollen- und Druckschachtauskleidung

Ein Druckstollen und ein Druckschacht, muss über eine komplette Trasse gesehen, den unterschiedlichsten Einwirkungen standhalten. Dabei hat die Auskleidung folgende Aufgaben zu erfüllen:

1. Verhinderung von Wasserverlusten [43]
2. Minimierung der hydraulischen Rauigkeit [43]
3. Abstützung und endgültige Sicherung des Gebirges [45]
4. Schutz des Gebirges vor Erosion [45]
5. Dauerhaftigkeit [42]

Für die Einhaltung der oben genannten Punkte ist die Linienführung der Trasse von großer Bedeutung. Wirtschaftlich gesehen wäre es am besten die Trasse unterhalb des tiefsten Berwasserspiegels und mit hoher Felsüberdeckung durch das Gebirge zu führen. Bei einer Zunahme der Felsüberdeckung erhöht sich die Mittragwirkung des angrenzenden Gebirges und eine wirtschaftlichere Auskleidung kann gewählt werden. [43]

Die Druckstollenauskleidung muss nicht absolut dicht sein. Ziel ist es oft nur die Wasserverluste möglichst klein zu halten. Durch einen zu hohen Wasserverlust, kann die Stabilität des Hohlraums gefährdet werden. Neben den Wasserverlusten, ist auch ein möglicher Wasserzutritt zu berücksichtigen. Dieser kann zu einem Versiegen von Trinkwasser -und Thermalquellen führen. Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit spielen neben den Herstellungskosten, die Druckverluste, welche mit der Rauigkeit einhergehen, sowie die Erhaltungskosten eine große Rolle. Die gewählte Auskleidung sollte möglichst preiswert sein und eine lange Lebensdauer aufweisen. [42]

Aufgrund von Spiegelschwankungen in den Staubecken, Belastungsänderungen von Turbinen und Pumpen, kann es zu raschen Änderungen des Innendrucks, innerhalb weiter Grenzen, kommen. Dies wird bei der Konstruktion der Auskleidung, in Hinsicht auf ihre Sicherheit und Lebensdauer, ebenfalls nicht außer Acht gelassen. [24]

Bis heute ist es nicht gelungen eine Druckstollenauskleidung zu finden, die alle oben genannten Anforderungen erfüllt. Abschließend ist zu sagen, dass bei der Wahl einer Auskleidungsart immer ein gewisser Kompromiss einzugehen ist, da sich gewisse Anforderungen zum Teil widersprechen. [42]

2 Die Entwicklung der Druckstollenauskleidung

2.1 Die Anfänge

2.1.1 Stiftsarmstollen Mönchsberg

Die Versorgung von Trink- und Nutzwasser für Ballungsräume spielte in Mitteleuropa schon früh eine Rolle. Durch die Besetzung des Römischen Reiches, drang das technische Wissen der Wasserversorgung, in Form von Wasserleitungen (Aquädukte) für neue militärische Zentren von Rom bis nach Österreich vor. Im Mittelalter, um das Jahr 1130, wurde der erste Wassertunnel von den Mönchen des Stift St. Peter in Salzburg durch den Mönchsberg errichtet, um Wasser aus der Königsseeache zu beziehen. [51]

Mitten in der Stadt Salzburg, gegenüber dem bekannten Festungsberg, welcher in erster Linie von Dolomit und Dachsteinkalk aufgebaut ist, befindet sich der Mönchsberg. Dieser ist aus der Mindel-Riß-Zwischeneiszeit durch Ablagerungen von Konglomerat entstanden und wird durch die Salzburger Nagelfluh aufgebaut. Eine kleine, steil geneigte, ungleichmäßige Einschiebung von schwachem Gosaumergel, verklemmt zwischen dem Hauptdolomit und dem Nagelfluh, war damals der perfekte Fels für Tunnelarbeiten mit primitivem Werkzeug. [19]

Folgende Informationen kommen von der Wasserwerksgenossenschaft Almhauptkanal durch Almmeister Dipl. Ing. Wolfgang Peter.

Aufgrund der damals noch nicht so fortgeschrittenen Vortriebstechnologie musste man den harten Gesteinszonen ausweichen und erreichte dabei eine Stollenlänge von 400 m bei einer Luftlinie von 250 m. Durch Auswaschungen, Einstürze und Sanierungen im Laufe der Jahrhunderte gibt es kein einheitliches Stollenprofil, sondern zahlreiche unterschiedliche Ausbauformen (siehe Abb. 2.1).



Abbildung 2.1: Stollenabschnitt mit unverbauter Firste - Mönchsberg

2.2 Unausgekleideter Druckstollen

Der unausgekleidete Druckstollen bildet prinzipiell die einfachste Form der Ausführung (siehe Abb. 2.2). Von *Kieser* auch als nackte Felsröhre bezeichnet, wird er nur in standfestem, dichtem und erosionssicherem Gebirge, bei dem die kleinste Primärspannung größer als der Innendruck ist, verwendet. Somit stellt diese Auskleidung große und komplexe Anforderungen an das Gebirge und die Beurteilung von möglichen Störzonen. Um keinen Wasserverlust zu erzielen, muss bei undichtem Gebirge der Bergwasserspiegel höher als der Innendruck sein. Die Querschnittsform ist beliebig zu wählen. Aufgrund der besten statischen und hydraulischen Eigenschaften ist ein Kreisprofil zu empfehlen. [24, 42, 43, 45, 53]

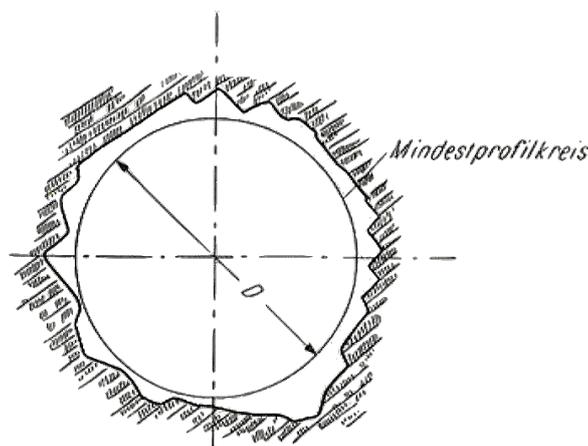


Abbildung 2.2: Unausgekleideter Druckstollen [24]

Durch den heutigen, für das Gebirge schonenderen, maschinellen Vortrieb erhöht sich die Standfestigkeit des Gebirges erheblich, wodurch, im Vergleich zum zyklischen Vortrieb, weitaus längere Stollenabschnitte ohne Auskleidung möglich sind. Um die höheren Reibungsverluste eines unausgekleideten Druckstollens auszugleichen, ist ein größerer Ausbruchdurchmesser zu wählen. Wirtschaftlich gesehen ist hier die Anwendung einer Tunnelbohrmaschine ebenfalls dem Sprengvortrieb vorzuziehen. Beim Sprengvortrieb ist der Innendurchmesser um das 1,5-fache zu vergrößern. Im Vergleich dazu ist beim mechanischen Ausbruch nur mit einer Vergrößerung von ca. 17 % des Durchmessers zu rechnen, was ungefähr der Dicke einer Betonauskleidung entspricht. Bezüglich der Kosten spricht bereits *Walch* vom unausgekleideten Druckstollen als Ideal, da

ein Großteil der Gesamtkosten (bis zu 50 %) auf die Auskleidung fallen. Hinsichtlich technischer Gründe ist zu lesen, dass er gegen einen unausgekleideten Stollen ist, da die Leistungsfähigkeit bei einem unregelmäßigen Profil stark nach unten gesetzt wird. Zusätzlich kann die Betriebssicherheit durch das Lösen von Gesteinsmassen gestört werden. Dadurch sind Einengungen der Profile sowie Zerstörungen der Turbinen möglich. Aus diesem Grund sind Einsparungen bei der Auskleidung genau abzuwiegen, da nachträgliche Sanierungen zu erheblichen Mehrkosten führen. [24, 42, 43, 45, 53]

Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts sind Druckstollen nach dem Ausbruch ganz selten völlig unberührt geblieben. Auftretende Risse wurden zumindest mit einem Zementmörtel ausgeschmiert. Erster unausgekleideter Druckstollen in Österreich war der Raabklammstollen der Pichlerwerke bei Weiz (1911) (siehe Kapitel 2.3.1.1), welcher nachträglich mit einer Putzauskleidung, zur Herabsetzung der Wasserverluste, versehen wurde. Ein weiteres Beispiel ist der **Walgaustollen (1984), mit einer 1,5 km langen unausgekleideten Teilstrecke**. Macht man einen Blick über die Landesgrenzen hinaus, kann man aufgrund der guten Gebirgsverhältnisse in Skandinavien zahlreiche, konventionell ausgebrochene, unausgekleidete Druckstollen vorfinden. Vor allem in Norwegen werden für große Innendrucke unausgekleidete Druckstollen gebaut. [24, 42, 43, 45, 53]

Beim KW Kaunertal (1964) der Tiwag wurde versucht, einen Teil des Triebwasserweges in standfestem Gneis (Augengneis, Schiefergneis) unausgekleidet auszuführen. Bei einem Test der 1.374 m langen Teststrecke wurde der Innendruck auf einen Maximalwert von 12 bar gehoben und über 7 Tage lang gehalten. Darauf wurde er über zwei Wochen wieder vorsichtig auf null gesenkt, was an fünf Stellen zu Verbrüchen führte. Die dabei entstandenen Hohlräume wurden bei Sanierungsarbeiten gesichert und mit Beton verfüllt. Insgesamt wurde der Stollen durch 1.500 m³ Gestein versperrt. Als Grund für die entstandenen Hohlräume wird eine Kombination aus dem beim Abstau nachdrängenden Wasserdruck mit lehmigen Kluffüllungen vermutet. Für das Kraftwerk wurde die gesamte unausgekleidete Teststrecke mit Schalbeton ausgekleidet. [8]

2.3 Bauweisen ohne Vorspannung

2.3.1 Putzauskleidungen

Neben der Verwendung als Dichtungsmittel kann ein Putzüberzug zur Abgleichung von Unebenheiten an Gesteinsoberflächen dienen, wodurch die Wandrauigkeit vermindert wird. Hauptaufgabe der Putzauskleidung ist es, einen Schutz für das Gebirge zu schaffen, wodurch zusätzlich hydraulische Vorteile entstehen. Vorzugsweise dient er zum Abdichten von kleineren Undichtigkeiten und einzelnen Klüften, wobei er in nicht dichtem Gestein und bei zu hohen Drücken an seine Grenzen stößt. Aufgetragen werden kann der Putz per Hand oder maschinell, was eine nachfolgende Glättung mit sich zieht. Eine **Putzauskleidung als Dichtungsmittel wurde erstmals in den Jahren 1908-1911 beim Bau des Raabklammstollens** (siehe Kapitel 2.3.1.1) in Österreich verwendet. Beim genannten Fall sind das sehr gute Gebirge sowie die stets niedrigen Drücke zu erwähnen. Zu einem späteren Zeitpunkt wurden Putzanstriche zusätzlich an der Innenleibung gewöhnlicher Auskleidungen als Glattstriche ausgeführt (siehe Abb. 2.3). In diesen Fällen beträgt die Stärke des Putzes 2 bis 3 cm. [24, 53]

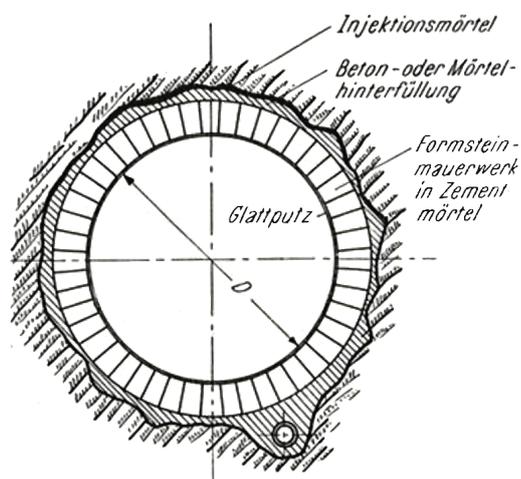


Abbildung 2.3: Auskleidung aus Formsteinmauerwerk mit zusätzlichem Glattputz [24]

2.3.1.1 Pichlerwerke bei Weiz (1911)

Zur Abdeckung des höheren Energiebedarfs rund um die Stadtgemeinde Weiz wurde 1911 ein Laufkraftwerk mit Schwellbetrieb, das erste seiner Art in der Steiermark, am Eingang der Raabklamm samt Druckstollen gebaut. Der Druckstollen wurde größtenteils durch sehr festen, quarzreichen Zentralgneis, welcher über kurze Strecken Klüfte aufwies, geführt. Aufgrund guter Geologie und einem Wasserdruck von höchstens 2,5 m wurde der Druckstollen zunächst unausgekleidet ausgeführt, was bei der Inbetriebnahme zu einigen Wasserverlusten führte. Als Grund für die Wasserverluste wird die relativ geringe Überlagerung genannt, die sich mit Rissen bis an die Gebirgsoberfläche und durch Hangrutschungen bemerkbar machte. Zum Herabsetzen dieser Verluste wurde, nach gründlicher Reinigung der Stollenwände, ein 25 mm starker Putz händisch aufgetragen. Als Ausbruchsquerschnitt wurde eine fast rechteckige Form gewählt, welche vortriebstechnisch am einfachsten auszuführen war und auch bei höherem Innendruck zulässig ist (siehe Abb. 2.4). Bei einer tieferen Linienführung wäre auch eine vollständige Auskleidung ohne Putz möglich gewesen. [1, 31, 53, 55]

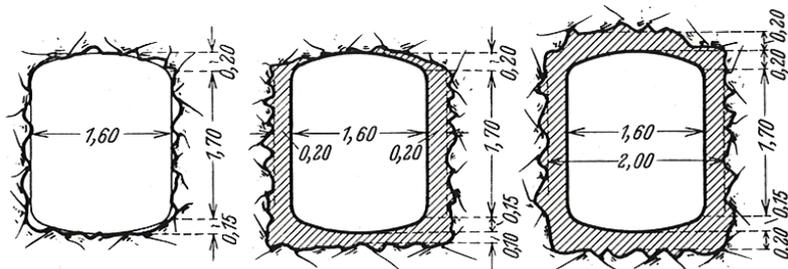


Abbildung 2.4: Mindeststollenquerschnitte - Raabklamm bei Weiz [31]

Tabelle 2.1: Kennwerte - Raabklammstollen Pichler Werke

Allgemein		Auskleidung	
Kraftwerk	<i>Pichler Werke</i>	Art	<i>Putz im M.V. 1:3</i>
Stollen	<i>Raabklammstollen</i>	Stärke [cm]	<i>2,5</i>
Inbetriebnahme	<i>1911</i>	Injektion	
Länge [m]	<i>2.269</i>	Hinterspritzung	<i>nein</i>
Neigung [%]	-	Art d. Inj.	-
Ausbauleistung [kW]	<i>1.300</i>	Hydraulische Verhältnisse	
Fallhöhe [m]	<i>60</i>	max. Innendruck [bar]	<i>0,253</i>
Querschnitt		Ausbauwassermenge [m ³ /s]	<i>2,60</i>
Form	<i>fast rechteckig</i>	Fließgeschwindigkeit [m/s]	<i>0,81</i>
Fläche [m ²]	<i>3,20</i>	Geologie	
Verortung		Gesteinsart	<i>Zentralgneis, meist sehr fest</i>
-		Überlagerung [m]	-

2.3.2 Kombinierte Auskleidung

Grundidee der kombinierten Auskleidung ist es, eine Kombination von äußerer und innerer Auskleidung zu schaffen (siehe Abb. 2.5). Die äußere Auskleidung, deren Hauptaufgabe die Aufnahme des Gebirgsdrucks darstellt, kann als Betonmantel oder an druckhaften Stellen mit Formsteinen (siehe Kapitel 2.3.2.1 Mühlkraftwerk Partenstein, Profil III) ausgeführt werden. Ein weiteres Beispiel dieser Art von Auskleidung bildet der Stollen des Kraftwerkes Teigitsch in der Steiermark. [53]

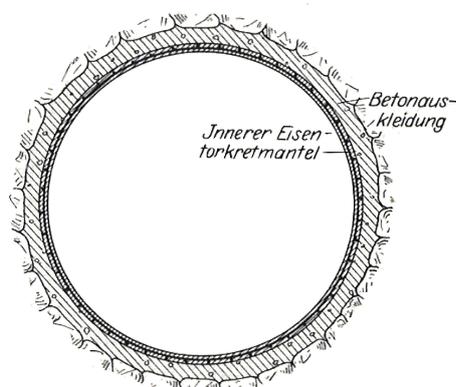


Abbildung 2.5: Kombinierte Auskleidung [53]

Je nach Gebirgsbeschaffenheit ist eine entsprechende Stärke zu wählen. Um einen festen Verbund mit dem Gebirge herzustellen, ist eine sorgfältige Hinterspritzung der äußeren Auskleidung vonnöten. Hauptaufgabe der inneren Auskleidungen ist die Dichtung. Diese wird durch Aufbringen einer Zementputzschicht mittels Spritzverfahren erreicht. Zusätzlich kann innerhalb dieser Putzschicht ein Eisenbetonmantel, aus Spritz- oder Stampfbeton, hergestellt werden. Bei der Dimensionierung der Bewehrung muss berücksichtigt werden, dass die Verschiebungen des inneren Mantels von der äußeren Auskleidung begrenzt sind. Dem zufolge darf der Eisenbetonmantel nicht so stark bewehrt werden, dass der komplette Wasserdruck aufgenommen werden kann. Die Bewehrungsstärke ist ebenfalls abhängig vom inneren Wasserdruck und dem Widerstand des angrenzenden Gebirges. [53]

2.3.2.1 Mühlkraftwerk Partenstein (1924)

Durch die Erschließung des Mühlviertels mittels Autolinien hat man sich Anfang der zwanziger Jahre dazu entschlossen, die Wasserkraft in diesem Gebiet weiter auszubauen. Dabei entstanden das „Rannawerk“ in der Kramesau sowie das „Mühlkraftwerk Partenstein“. Um die Wasserkräfte der Großen Mühl perfekt zu verwerten, wurde ein 5.740 m langer Druckstollen errichtet. Mit der Inbetriebnahme im Jahr 1924 war es damals das größte Kraftwerk der Republik Österreich. Technische Neuerungen, wie die **erstmalige Verwendung von kreisförmigen Profilen** eines Druckstollens oder die **erste geschweißte Druckrohrleitung**, feierten hier ihre Premiere. Bis nach dem 1. Weltkrieg wurden hauptsächlich hufeisen- und eiförmige Querschnitte im Druckstollenbau angewendet wie es beim KW Erlaufboden (1924) in Niederösterreich der Fall war. Der 3.500 m lange Druckstollen, mit einer eiförmigen Form, wurde im Jahr 1911 angeschlagen und mit 25 cm starken Beton ausgekleidet (siehe 2.6). Für den Wechsel zum kreisförmigen Profil ist hauptsächlich das Versagen des Ritomstollens (1920) in der Schweiz verantwortlich. Hier wurde ein von der Kreisform abweichender Querschnitt herangezogen, dem der Schaden zwar nur untergeordnet zugewiesen werden konnte, aber nach einigen Erkenntnissen die Sicherheit auf alle Fälle herabsetzte. Aus diesem Grund wurde, bis auf einige Ausnahmen, nur noch auf den, in hydraulischer und wirtschaftlicher Hinsicht, kreisförmigen Idealfall zurückgegriffen. [7, 26, 36, 42, 53]

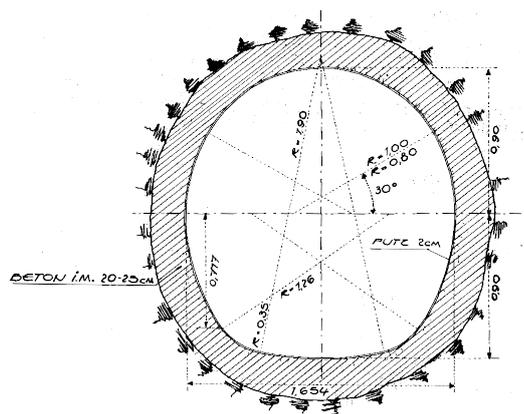


Abbildung 2.6: Querschnitt - Druckstollen Erlaufboden [7]

Über die hauptsächlich von hartem, standfestem Granit umgebene Trasse wurden drei verschiedene Profile ausgeführt (siehe Abb. 2.7). Profil I zeigt eine reine Stampfbetonauskleidung mit einer Mindeststärke von 20 cm für normale Strecken. Für eine ungenügend ausgekleidet befundene Strecke von 800 m wurde dieses Profil zusätzlich mit einem inneren Eisentorkretring verstärkt (siehe Profil II). Profil III stellt eine auf Druckstrecken ausgeführte kombinierte Auskleidung dar. Hier wurde für die Auskleidung ein 25 cm starker Betonmantel, mit 40 cm starken, außen liegenden Betonformsteinen herangezogen. Um einen perfekte Verbund zwischen Auskleidung und Gebirge zu schaffen, wurde der komplette Stollen mit einem Zementmörtel hinterspritzt. Bei unzureichender Hinterspritzung wurde diese wiederholt und zuletzt noch mit reiner Zementmilch ausgepresst. [26, 36, 53]

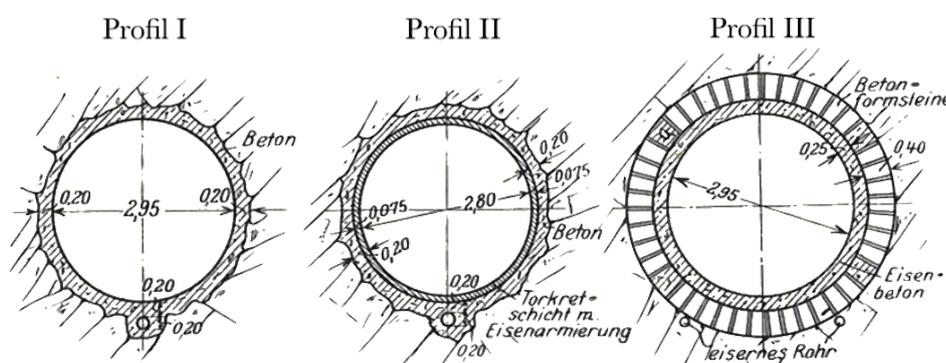


Abbildung 2.7: Profile - Stollen Partenstein [53]

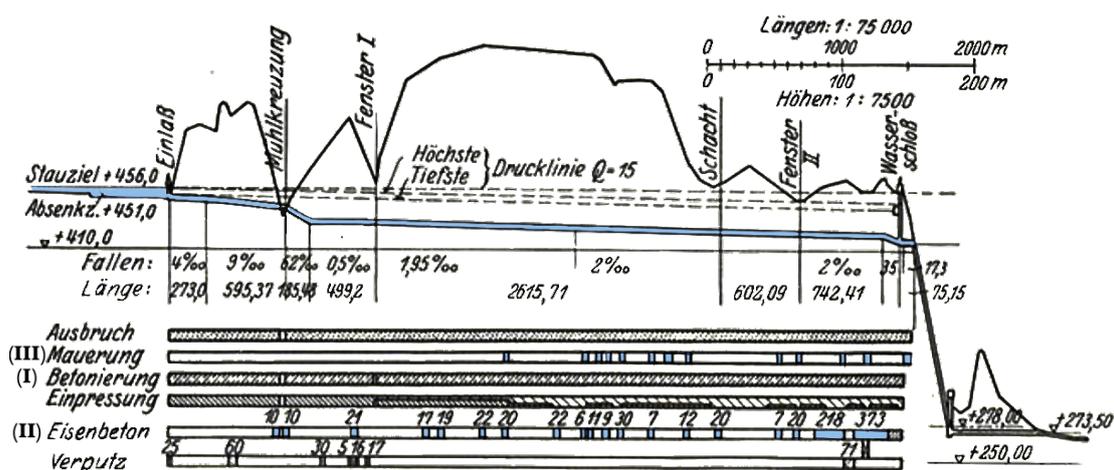


Abbildung 2.8: Längenschnitt - Stollen Partenstein [31]

Tabelle 2.2: Kennwerte - Druckstollen Mühlpark Partenstein

Allgemein		Auskleidung	
Kraftwerk	<i>Partenstein</i>	Profil II	
Stollen	<i>Partenstein</i>	Art	<i>Kombinierte</i>
Inbetriebnahme	<i>1924</i>	Aufbau/ Stärke [cm]	<i>7,5 Torkret m. Eisenarmierung</i>
Länge [m]	<i>5.740</i>		<i>20 Beton</i>
Neigung [%]	<i>0,2</i>	Profil III	
Ausbauleistung [kW]	<i>29.500</i>	Art	<i>Kombinierte</i>
Bruttofallhöhe [m]	<i>182,5</i>	Aufbau/ Stärke [cm]	<i>25 Eisenbeton</i>
Querschnitt			<i>40 Betonformsteine</i>
Form	<i>Kreisförmig</i>	Injektion	
Fläche [m ²]	<i>6,15-6,80</i>	Hinterspritzung	<i>ja</i>
Geologie		Art d. Inj.	<i>Zementmörtel 2:1</i>
Gesteinsart	<i>Granit</i>	Hydraulische Verhältnisse	
Überlagerung [m]	<i>im min. ca. 30</i>	max. Innendruck [bar]	<i>4,053</i>
Verortung		Ausbauwassermenge [m ³ /s]	<i>22,5</i>
<i>siehe Abb.2.8</i>		Fließgeschwindigkeit [m/s]	<i>3,30-3,65</i>

2.3.3 Einfache unbewehrte Betonauskleidung

Kieser spricht über die Ortbetonauskleidung als die am häufigsten verwendete Auskleidung seit den Anfängen des Druckstollenbaues. Sie zeichnet sich durch ihre hohe Wirtschaftlichkeit aus und kommt normal in Kombination mit Injektionen vor. Beim Betonieren kann es aufgrund der Schwerkraft zu Absetzungen des Gebirges im Bereich der Firste kommen, welche einen sichelförmigen Hohlraum hinterlassen. Zum Ausfüllen dieser Hohlräume und zur Herstellung einer sattten Bettung zwischen Auskleidung und Gebirge dienen übliche Mörtel- und Zementinjektionen. Durch die beim Druckstollen aufgrund des Innendrucks entstehenden Zugspannungen kann die einfache Betonauskleidung nur bei kaum auf Zug beanspruchten Teilabschnitten eingesetzt werden. Hauptsächlich wird sie in standfestem Gebirge, mit hohem Bergwasserspiegel, zur Senkung der Reibungsverluste eingebaut und dient zusätzlich zur Ausbruchsicherung von erosionsgefährdetem Gebirge. [24, 45]

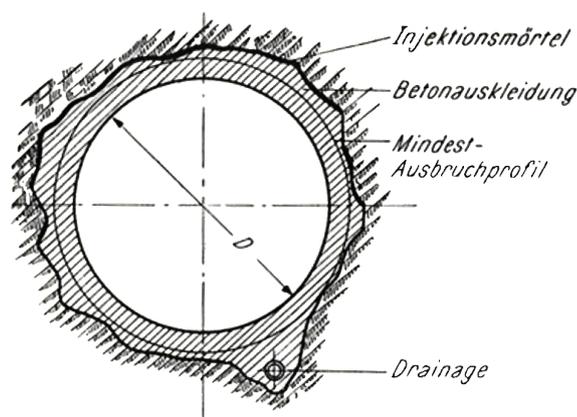


Abbildung 2.9: Unbewehrte Betonauskleidung [24]

2.3.3.1 Strubklammwerk (1925)

Das Strubklammwerk der Stadt Salzburg wurde zeitlich parallel zum KW Partenstein gebaut. Es wurde als Spitzenwerk oberhalb des Wiestalwerkes, welches den ersten Ausbau einer dreistufigen Anlage darstellt, errichtet (siehe Abb. 2.10). Der 2.450 m lange Druckstollen wurde durchgehend mit einer im Mittel 30 cm starken Stampfbetonauskleidung, mit innen liegendem Glattstrich, versehen (siehe Abb. 2.11). [31, 53]

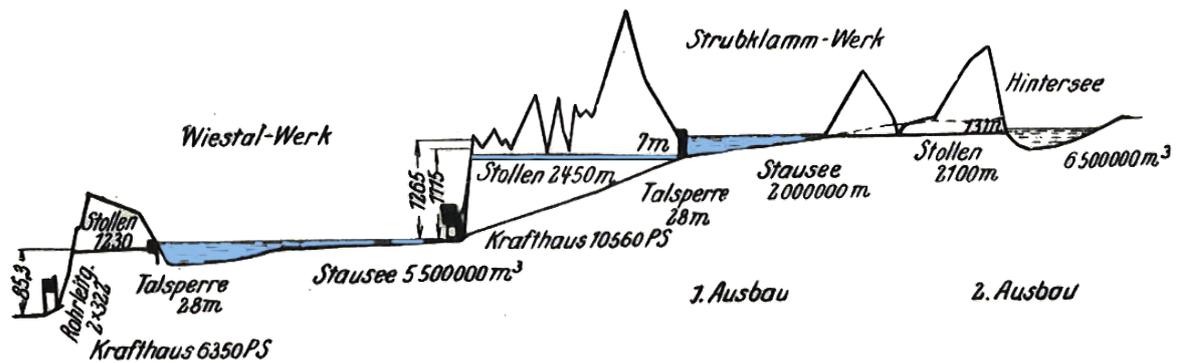


Abbildung 2.10: Längenschnitt - Strubklammwerk [53]

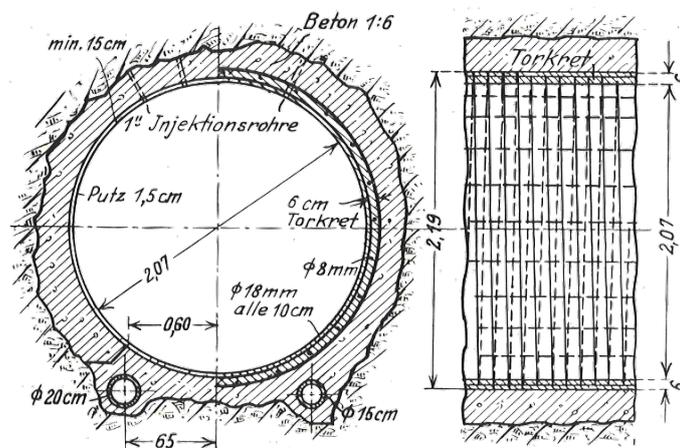


Abbildung 2.11: Druckstollenquerschnitt - Strubklammwerk [31]

Treffen beim Ausbetonieren der Betonauskleidung zwei Betoniertruppen aufeinander ist ein meistens mit Schleuderbeton ausgeführter „Kunstschluss“ notwendig. Bei dieser Ausführung kann es in der Firste zu einem Luftraum zwischen Beton und Fels kommen, der schon bei niedrigem Innenwasserdruck zu einem Einreißen der Betonschale führen kann. Diese Fuge gilt es mit einer Mischung aus Zement und Sand und abschließender Einpressung von Zementmilch möglichst satt auszufüllen (siehe Abb. 2.12). Im Vergleich zum Partensteinstollen, der nur auf normaler Strecke mit Stampfbeton ausgekleidet worden ist, weist der Druckstollen des Strubklammwerkes mit einem maximalen Innendruck von 2,45 bar einen durchschnittlich deutlich niedrigeren Druck auf. Dies erklärt die kombinierte Auskleidung des Partensteinstollens auf Druckstrecken mit bis zu 4,05 bar Innendruck. [31, 53]

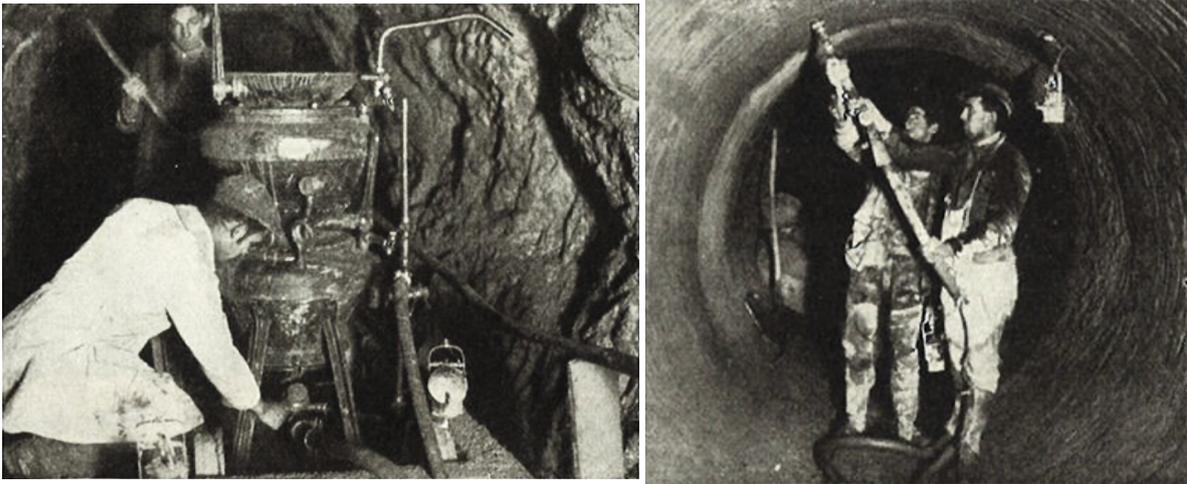


Abbildung 2.12: Zementeinpressung des Stollenscheitels am Strubklammwerk [31]

Tabelle 2.3: Kennwerte - Druckstollen Strubklammwerk

Allgemein		Auskleidung	
Kraftwerk	<i>Strubklamm</i>	Art	<i>Unbewehrte Betonauskleidung</i>
Stollen	<i>Strubklamm</i>	Aufbau/ Stärke [cm]	<i>1,5 Putz 30 Beton i.M.</i>
Inbetriebnahme	<i>1925</i>	Injektion	
Länge [m]	<i>2.450</i>	Hinterspritzung	<i>mit 2-5 bar</i>
Neigung [%]	<i>0,1</i>	Art d. Inj.	<i>Zement : Sand 1:2 / 1:1 + reine Zementmilch</i>
Ausbauleistung [kW]	<i>7.800</i>	Hydraulische Verhältnisse	
Bruttofallhöhe [m]	<i>1.265</i>	max. Innendruck [bar]	<i>2,45</i>
Querschnitt		Ausbauwassermenge [m ³ /s]	<i>18,4</i>
Form	<i>Kreisförmig</i>	Fließgeschwindigkeit [m/s]	<i>5,46</i>
Fläche [m ²]	<i>3,37</i>	Geologie	
Verortung		Gesteinsart	<i>Hauptdolomit</i>
siehe Abb. 2.10		Überlagerung [m]	<i>-</i>

2.3.4 Bewehrte Betonauskleidung

Die Verwendung einer bewehrten Betonauskleidung (siehe Abb. 2.13) gewährleistet neben der Stabilität des Druckstollens eine Verringerung der Reibungsverluste, wobei nie eine gänzlich wasserdichte Stollenröhre erzielt werden kann. Hauptaufgabe der Bewehrung ist es, aus großen Rissen mehrere kleine Risse mit geringerer Rissbreite zu bilden, was einen drosselnden Einfluss auf die Wasserverluste hat. Was vorerst nach einem großen Vorteil klingt, bringt auch erhebliche Nachteile mit sich. Bei geringen Wandstärken stört die Bewehrung beim Einbringen und Verdichten des Betons, sodass die erforderliche Betongüte zum Teil nicht erreicht wird und in Bereichen von Kiesnestern wasserdurchlässig ist. Laut *Schleiss* werden armierte Betonauskleidungen als abdichtende Maßnahme, aufgrund ihrer technischen und wirtschaftlichen Eigenschaften, heute kaum noch verwendet. Ohne Injektionen sind bewehrte Betonauskleidungen im Stollenbau nicht mehr denkbar. Ihre Aufgabe ist es, Hohlräume zwischen der Auskleidung und dem Fels zu verpressen. Zusätzlich sollen aufgelockerte Felspartien im Stollen vergütet werden. [24, 42, 45]

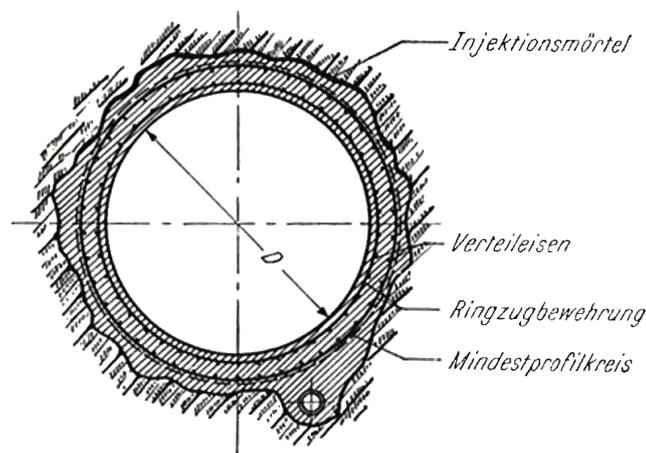


Abbildung 2.13: Stahlbetonauskleidung [24]

2.3.4.1 KW Vermunt (1931)

Das Kraftwerk Vermunt war zum damaligen Zeitpunkt das größte Wasserkraftwerk Österreichs und nutzte dabei einen Höhenunterschied von 714,40 m zwischen dem Vermuntsee bis auf die Partenen. Für den 2,5 km langen Druckstollen (siehe Abb. 2.15) wurde, auf einer Strecke von 600 m in gestörtem Gneisgebirge, eine 25 cm starke Stahlbetonauskleidung (Profil IV u. V), welche als doppelte Ringbewehrung ausgeführt wurde, herangezogen. Aufgrund der wechselnden Gebirgsverhältnisse wurden zwei weitere Auskleidungstypen verwendet. Einerseits eine unbewehrte Betonauskleidung (Profil II) über eine Länge von 1.330 m und andererseits ein Beton mit innenbewehrtem Gunitring (Profil III) über eine Länge von 440 m. Alle drei Profilarten sind in Abb. 2.14 zusehen. Im Bereich der Firste wurde der Auskleidungsbeton ausreichend mit Zementmörtel verpresst, um vorhandene Hohlräume entsprechend auszufüllen. [2, 4, 24]

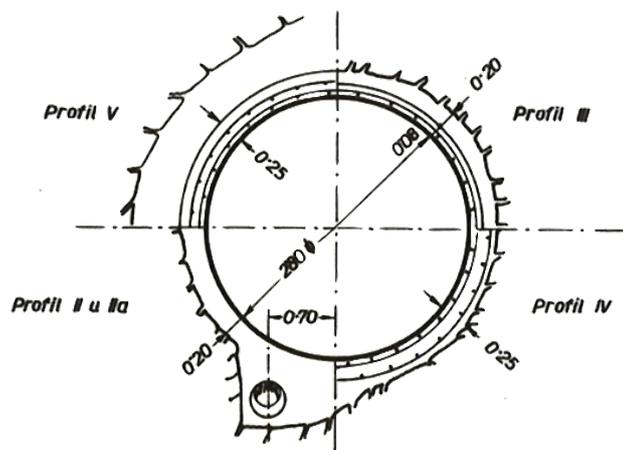


Abbildung 2.14: Längenschnitt - Druckstollen Vermunt [4]

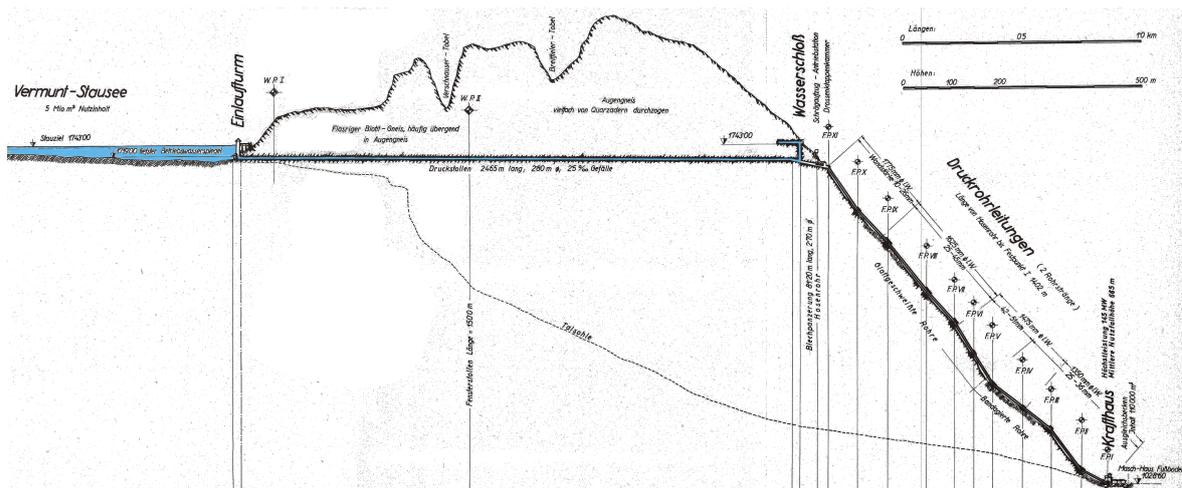


Abbildung 2.15: Querschnitt - Druckstollen Vermunt [46]

Tabelle 2.4: Kennwerte - Druckstollen KW Vermunt

Allgemein		Auskleidung	
Kraftwerk	<i>Vermunt</i>	Profil IV u. V	
Stollen	<i>Vermunt</i>	Art	<i>Stahlbeton</i>
Inbetriebnahme	<i>1931</i>	Aufbau/ Stärke [cm]	<i>25 Stahlbeton mit doppelter Ringbewehrung</i>
Länge [m]	<i>2.465</i>		
Neigung [%]	<i>0,25</i>	Injektion	
Ausbauleistung [kW]	<i>90.000</i>	Hinterspritzung	<i>ja</i>
Bruttofallhöhe [m]	<i>714,40</i>	Art d. Inj.	<i>Zementmörtel</i>
Querschnitt		Hydraulische Verhältnisse	
Form	<i>Kreisförmig</i>	max. Innendruck [bar]	<i>3,43</i>
Fläche [m ²]	<i>6,16</i>	Ausbauwassermenge [m ³ /s]	<i>26</i>
Verortung		Fließgeschwindigkeit [m/s]	<i>3,57</i>
<i>siehe Abb. 2.15</i>		Geologie	
		Gesteinsart	<i>Biotitaugengneis</i>
		Überlagerung [m]	<i>i.M. 150</i>

2.3.5 Auskleidung durch Spritzbeton

In gutem und standfestem Gestein bezweckt eine Druckstollenauskleidung durch Spritzbeton (siehe Abb. 2.16) hauptsächlich eine Sicherung gegen Nachbrüche sowie ein Herabsetzen der Stollenrauigkeit. Der k-Wert nach Strickler wird dabei von 30 auf 40-45 erhöht. Die Abdichtung gegen Wasserverluste hält, solange der Fels dem Innendruck standhält und rissfrei bleibt. Entstehen Risse reißt der Bewurf und das komplette Dichtungsvermögen geht verloren. Als Spritzbetonstärke kann ein Wert zwischen 3-10 cm gewählt werden, der sich je nach Anforderung ändert. Durch den zusätzlichen Einbau von Stahlfasern ist es möglich, die Zug- und Biegezugfestigkeit sowie die Dichtigkeit der Spritzbetonauskleidung zu erhöhen. Die **erste Anwendung von Spritzbeton in Österreich war von 1950 bis 1952 beim Bau des Möllüberleitungsstollens** (siehe Kapitel 2.3.5.1) der Werksgruppe Glockner-Kaprun. Hier wurden durch den Einsatz von Schneckenmaschinen rund 80.000 m² Spritzbeton eingebaut. [24, 42, 50]

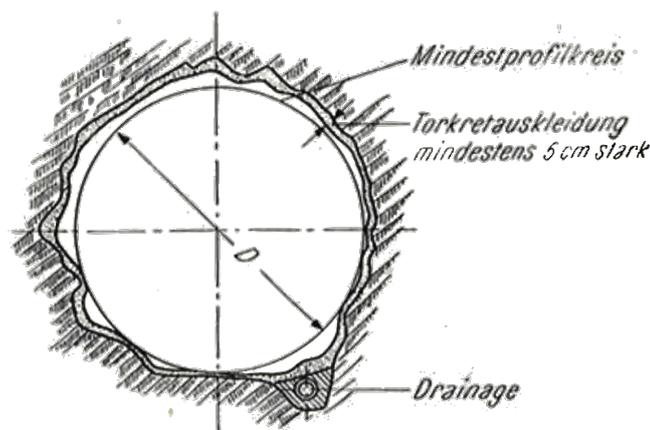


Abbildung 2.16: Druckstollenprofil mit Felssicherung durch Spritzbeton [24]

2.3.5.1 Möllüberleitungsstollen - Oberstufe Kaprun (1955)

Im Jahre 1952 wurde die Oberstufe Kaprun der Kraftwerksgruppe Glockner-Kaprun (siehe Abb. 2.22) mit dem Durchschlag des Möllüberleitungsstollens erweitert. Das Wasser wird aus dem Speicher Magaritze, welcher aus dem oberen Einzugsgebiet der Möll gespeist wird, in den 11,6 km langen Druckstollen eingeleitet und bis in das Speicherbecken Moserboden geführt. Von dort aus soll es in zwei Stufen, bei den Kraftwerken Limberg und Kaprun, verarbeitet werden. Geologisch gesehen, befindet sich der größte Teil des Stollens in Kalkglimmerschiefer mit verschiedener Standfestigkeit und Härte. Durch das Vorkommen von starken Klüften und Bergschlägen (siehe Abb. 2.17) ergaben sich Überprofile im Mittel von 26 % des Ausbruchsquerschnittes bei unverkleideten bzw. standfesten und 40 % bei verkleideten Strecken. So musste in Bereichen des Bergschlages mehr als das dreifache der theoretischen Betonkubatur eingebracht werden. Im Baulos Käfertal, welches den mittleren Bauabschnitt des Druckstollen bildet, kam mit Profiltyp 1, auf einer Strecke von 3.272 m für standfestes Gebirge, **erstmalig Spritzbeton in Österreich zur Anwendung**. Im Bereich des Bergschlages wurde, auf 1.041 m, der Profiltyp 2 mit einer innenliegenden 25 cm starken Betonauskleidung ausgewählt. [31, 34, 38, 49]



Abbildung 2.17: Bergschlag im Möllüberleitungsstollen [21]

Beide Auskleidungsarten wurden zusammen auf rund einem Viertel der Hauptstollenlänge eingesetzt. Als Querschnittsform hat man hier durch den kleinen Querschnitt, mäßigen Wasserinnendruck, sowie druckhaften Gebirge, auf ein **kreisnahes Hufeisenprofil** gesetzt (siehe Abb. 2.18). [31, 34, 38, 49]

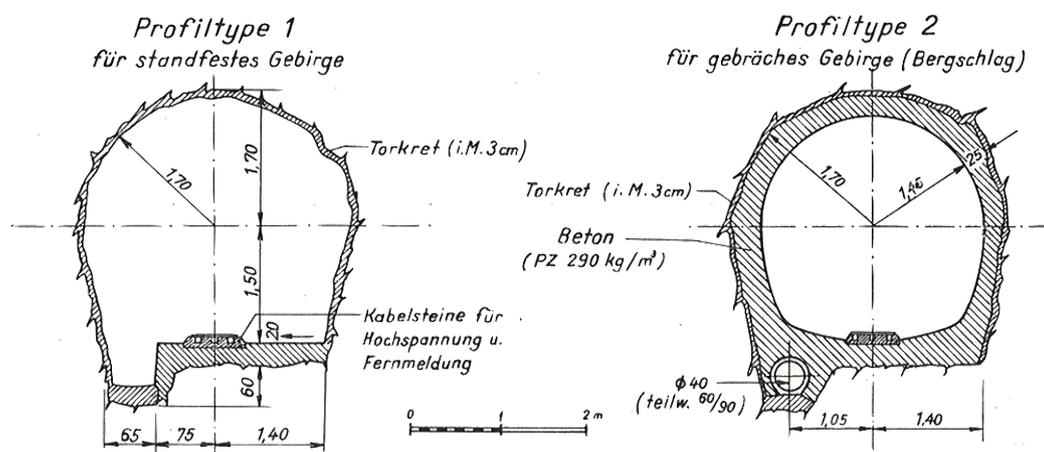


Abbildung 2.18: Regelprofile - Möllüberleitungsstollen Oberstufe Kaprun [49]

Tabelle 2.5: Kennwerte - Möllüberleitungsstollen Oberstufe Kaprun

Allgemein		Auskleidung	
Kraftwerk	<i>Limberg/Kaprun</i>	Profiltype I	
Stollen	<i>Möllüberleitung</i>	Art	<i>Spritzbeton</i>
Inbetriebnahme	<i>1955</i>	Stärke [cm]	<i>3</i>
Länge [m]	<i>11.680</i>	Injektion	
Neigung [%]	<i>0,34</i>	Hinterspritzung	<i>ja</i>
Ausbauleistung [kW]	<i>112.000</i>	Art d. Inj.	<i>Zementmilch</i>
Bruttofallhöhe [m]	<i>328</i>	Hydraulische Verhältnisse	
Querschnitt		max. Innendruck [bar]	<i>6,57</i>
Form	<i>kreisnahe Hufeisenform</i>	Ausbauwassermenge [m ³ /s]	<i>36</i>
Fläche [m ²]	<i>~6,60-9,08</i>	Fließgeschwindigkeit [m/s]	<i>2,20-3,03</i>
Verortung		Geologie	
<i>siehe Abb. 2.22</i>		Gesteinsart	<i>Biotitaugengneis</i>
		Überlagerung [m]	<i>-</i>

2.4 Bauweisen mit Vorspannung

Die im Stollenbau hauptsächlich für die Auskleidung verwendeten Baustoffe Beton und Zementmörtel weisen nur eine sehr geringe Zugfestigkeit auf. Bei der Vorspannung wird die Betonauskleidung soweit auf Druck vorgespannt, dass die durch den Innendruck entstehenden Zugspannungen die Druckvorspannung abbauen und so einen Zugbruch vermeiden. Abbildung 2.19 zeigt die Unterschiede zwischen den Bauweisen ohne Vorspannung (Fall a) und mit Vorspannung (Fall b) hinsichtlich der Beanspruchung und Bruchsicherheit des Baustoffes in Zug- bzw. Druckrichtung. [24, 45]

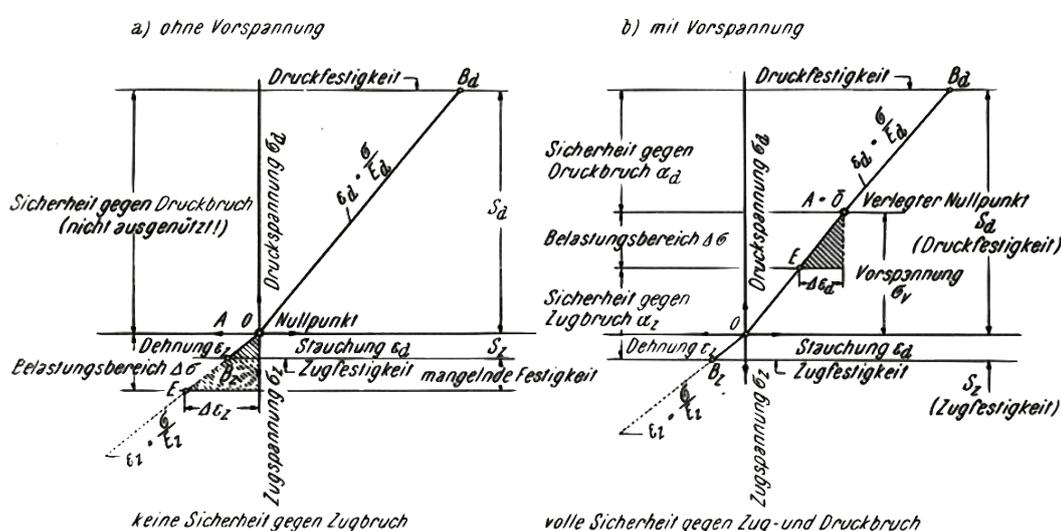


Abbildung 2.19: Zusammenhang zwischen Materialbeanspruchung und Sicherheit [24]

2.4.1 Aktive Vorspannung mittels Bewehrung

Ist durch das Gebirge rund um den Druckstollen keine Mittragwirkung gegeben, bildet die aktive Vorspannung mittels Bewehrung eine gute Alternative. Durch eine mögliche Einsparung bei Stahlverbrauch und Transport kann sie ebenfalls eine gute Alternative zur Stahlpanzerung darstellen. Ein weiterer Vorteil der Spannbetonauskleidung ist, dass diese, im Gegensatz zur Stahlpanzerung, nicht durch Beulen gefährdet ist. Zudem können die bei einer Überbelastung entstehenden Risse, durch die vollständige Erholung der Spannglieder, wieder geschlossen werden. [42]

Aufgrund dieser Dimensionen mussten die Spannbetonrohre vor Ort hergestellt und versetzt werden. Nach Fertigstellung der Drainage und der Betonierung, der auf beiden Seiten vorkommenden Auflager-Längsschwellen, wurde das Rohr aus Betonringen zusammengebaut. Zur Herstellung der Ringe, mit einer Stärke von 30 cm und einer Länge von 34 cm, wurde eine extra für diesen Fall konzipierte Wickel- und Versetzmaschine mit dem Spitznamen "Teufelsrad" verwendet (siehe Abb. 2.21). [24]

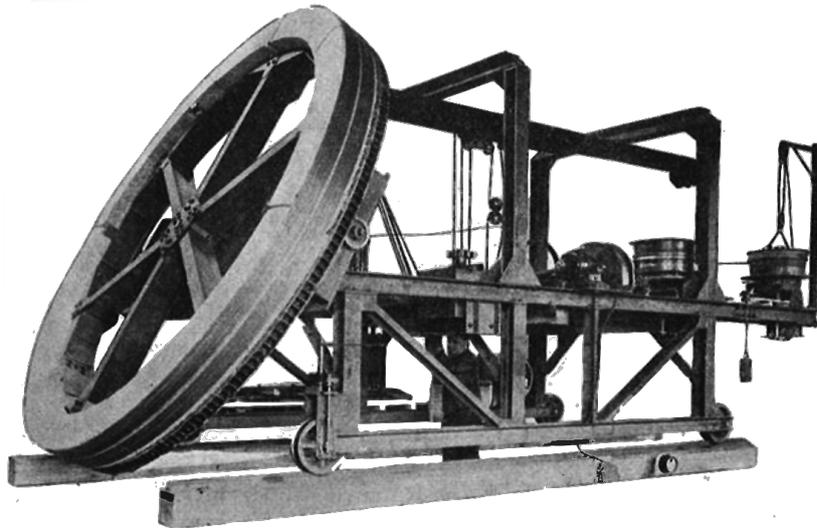


Abbildung 2.21: Wickel- und Versetzmaschine [24]

2.4.1.1.1 Hauptstufe Kaprun (1944)

Auf den Vorschlag der Firma Wayss und Freytag AG hin wurde in Österreich **erstmalig** im Jahre 1944, bei der von der Tauernkraftwerke Aktiengesellschaft übernommenen Hauptstufe Kaprun, eine **aktive Vorspannung** verwendet. Bevor das Triebwassersystem (siehe Abb. 2.22) in den gepanzerten Druckschacht übergeht, befindet sich beim 7,10 km langen Druckstollen ein 1.316 m langer Stollenabschnitt, bei dem das Vorspannsystem angewandt wurde. Zusätzlich wurde eine 165 m lange Strecke des Druckschachtes ebenfalls mit der gleichen Methode ausgekleidet. [24]

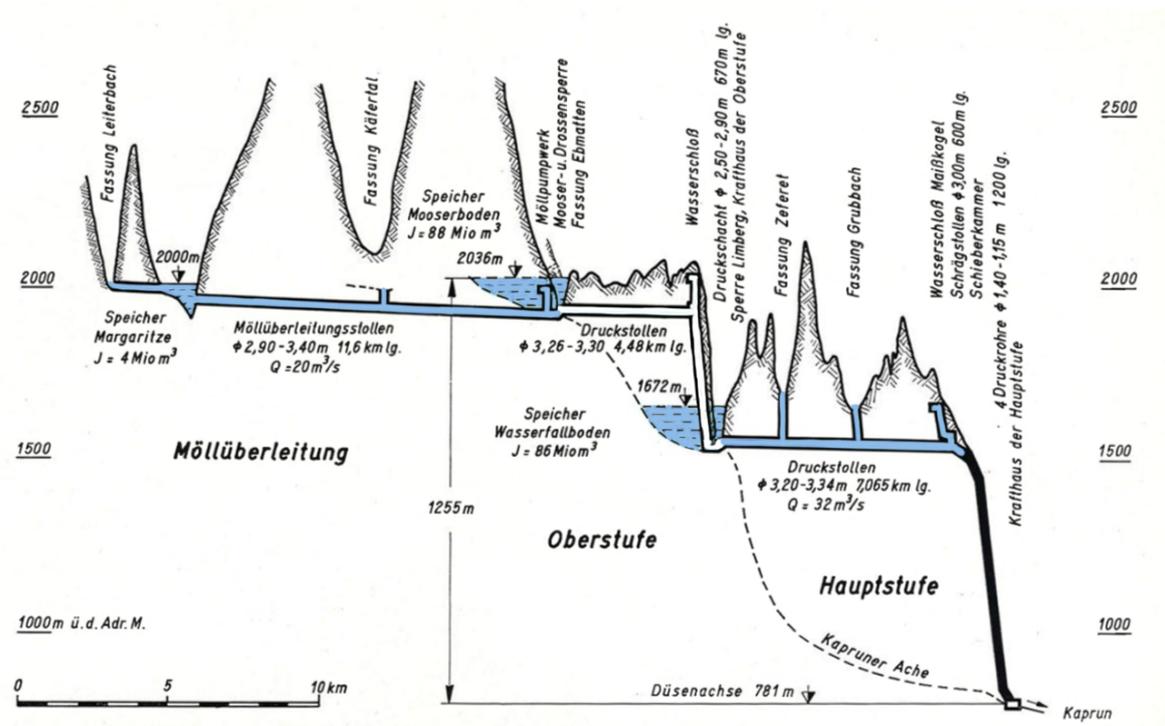


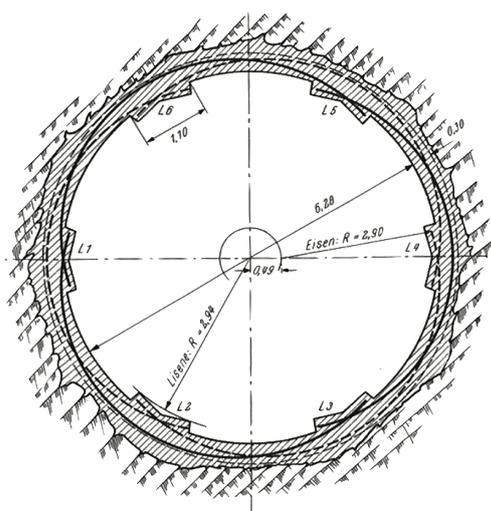
Abbildung 2.22: Übersichtshöhenplan der Werksgruppe "Glockner-Kaprun" [17]

Tabelle 2.6: Kennwerte - Druckstollen Hauptstufe Kaprun

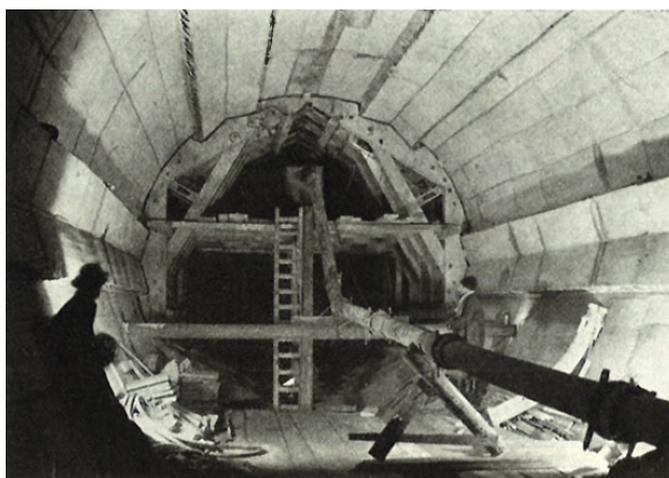
Allgemein		Auskleidung	
Kraftwerk	<i>Kaprun</i>	Art	<i>System Wayss-Freytag</i>
Stollen	<i>Hauptstufe Kaprun</i>	Aufbau/ Stärke [cm]	<i>2,5 Torkretmanschette</i> <i>30 Betonrohr</i>
Inbetriebnahme	<i>1944</i>	Injektion	
Länge [m]	<i>7.065</i>	Hinterspritzung	<i>ja</i>
Neigung [%]	<i>0,26</i>	Art d. Inj.	<i>Pressmörtel</i>
Ausbauleistung [kW]	<i>200.000</i>	Hydraulische Verhältnisse	
Bruttofallhöhe [m]	<i>891</i>	max. Innendruck [bar]	<i>11,08</i>
Querschnitt		Ausbauwassermenge [m ³ /s]	<i>32</i>
Form	<i>Kreisförmig</i>	Fließgeschwindigkeit [m/s]	<i>3,65-3,98</i>
Fläche [m ²]	<i>8,04-8,76</i>	Geologie	
Verortung		Gesteinsart	<i>Schwarzphyllite</i>
<i>siehe Abb. 2.22</i>		Überlagerung [m]	<i>120-550</i>

2.4.1.2 System Dywidag

Das von der deutschen Firma Dyckerhoff und Widmann entwickelte Spannbetonverfahren bietet eine weitere Lösung, bei der Stahl als Spannmittel verwendet wird. Das System besteht aus vorstehenden Betonleisten, sogenannten Linsen, deren Flanken zum Herausführen der Kabelköpfe dienen (siehe Abb. 2.23 (a)). Bei der Bauweise soll die Länge eines Spannstabes mehr als ein Drittel des Rohrumfanges betragen, damit ein Ring aus drei, sich überlappenden Stahlstäben besteht. Die Übergreifung soll etwa einen halben Meter betragen. Die Bewehrung ist in zwei Lagen versetzt zueinander anzuordnen. Entsteht beim Spannen zwischen Betonring und Felswand ein Spalt, ist dieser mit Zementmörtel auszupressen. Der vorzuspannende Auskleidungsring wird an Ort und Stelle direkt gegen das Gebirge oder gegen eine Vorauskleidung ausbetoniert. Dabei dient das Hüllrohr für die Spannstäbe als Bewehrung. [24, 45]



(a) Regelprofil Schrägschacht



(b) Betonierung der unteren Kammer

Abbildung 2.23: Spannbetonstrecke - KW Lünersee[24]

Diese Art von Auskleidung kann die gesamten Innendrucke ohne Gebirgstragwirkung aufnehmen und eignet sich für niedrige bis mittlere Drücke. Will man zusätzlich eine gewisse Gebirgsmitttragwirkung erreichen, ist eine Kontaktinjektion zu empfehlen. Aufgrund des hohen technischen Aufwandes des Systems wurde es nur auf wenigen kurzen Strecken eingesetzt. Ein Beispiel dafür bildet eine 201,5 m lange Spannbetonstrecke im Wasserschlossbereich (siehe Abb. 2.24) des KW Lünersee (siehe Kapitel 2.4.1.2.1) der

Vorarlberger Illwerke. Diese setzt sich aus einer unteren Kammer, dem Übergangsknie und einem Schrägschacht zusammen. Hier hat man durch die Verwendung von Stahl als Spannmittel auf die Oberflächennähe des Bauwerkes Rücksicht genommen, um den dort liegenden Fels vom Innendruck großteils zu entlasten. [24, 45]

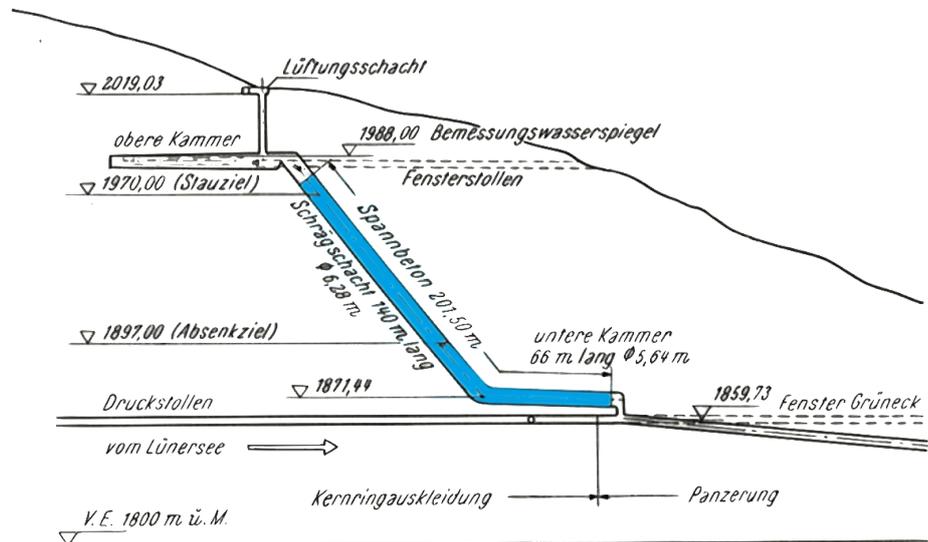


Abbildung 2.24: Wasserschloss des Lünenseewerkes [24]

2.4.1.2.1 KW Lünensee (1958)

Das Mitte der 50er-Jahre errichtete Kraftwerk Lünensee der Vorarlberger Illwerke bildet einen Teil der Werksgruppe Obere Ill-Lünensee (siehe Abb. 2.25). Zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme im Jahre 1958 war es das leistungsstärkste Pumpspeicherkraftwerk (280 MW Turbinenleistung und 224 MW Pumpenleistung) der Welt. Hier wurde **zum ersten Mal eine Vorspannung mittels Einzelspannglieder** im Bereich des Wasserschlosses verwendet. Zur Absicherung des Arbeitsraumes diente eine Kombination aus Spritzbeton und Felsankern. Das System der Vorspannung mit Einzelspanngliedern hat sich, wie ähnliche Methoden dieser Art, jedoch nie richtig durchgesetzt. Wie man in Abb. 2.25 sehen kann, wurde für die Druckstollenauskleidung hauptsächlich eine normale Betonauskleidung verwendet. In sechs Teilabschnitten, wo eine gewöhnliche Betonauskleidung aufgrund der schlechten Gebirgsbeschaffenheit nicht in Frage kam, kam eine Kernring-Auskleidung zum Einsatz. Im Bereich des Zulaufs und kurz vor dem Druckschacht bediente man sich einer Panzerung. [3, 24, 32, 47]

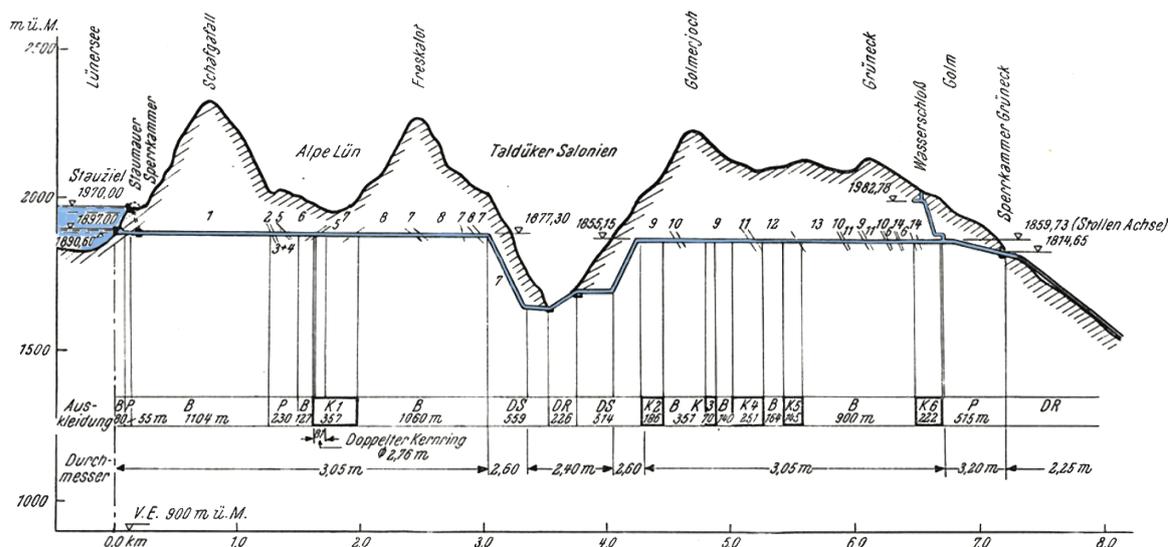


Abb. 103. Druckstollen des Lünenseewerkes; Längenschnitt.

- Gesteinsart:**
- 1 Hauptdolomit,
 - 2 Raibler-Rauhwanke,
 - 3 Gips,
 - 4 Anhydrit,
 - 5 Tektonische Mischzone (Rauhwanke mit Buntsandstein),
 - 6 Buntsandstein,
 - 7 Muschelkalk,
 - 8 Partnachschiefer,
 - 9 Phyllitgneis,
 - 10 Mylonitzone,
 - 11 Muskovitgranitgneis,
 - 12 Chloritschiefer,
 - 13 Glimmerschiefer,
 - 14 Porphyrit.
- Auskleidung:**
- B Normale Betonauskleidung,
 - K 1 bis K 6 Teilstrecken mit Kernring-Auskleidung,
 - P Panzerstollen,
 - DS Gepanzerter Druckschacht,
 - DR Druckrohrleitung

Abbildung 2.25: Längenschnitt - KW Lünensee [24]

Tabelle 2.7: Kennwerte - Schrägschacht Wasserschloss KW Lünensee

Allgemein		Auskleidung	
Kraftwerk	Lünensee	Art	System Dywidag
Stollen	Schrägschacht Wasserschloss	Aufbau/ Stärke [cm]	30 Betonrohr Einzelspannglieder
Inbetriebnahme	1958	Injektion	
Länge [m]	201,5		
Neigung [%]	55	Hinterspritzung	ja
Ausbauleistung [kW]	280.000	Art d. Inj.	Zementmörtel
Fallhöhe [m]	974	Hydraulische Verhältnisse	
Querschnitt		max. Innendruck [bar]	12
Form	Kreisförmig	Ausbauwassermenge [m ³ /s]	31,5
Fläche [m ²]	24,98-30,97	Fließgeschwindigkeit [m/s]	-
Verortung		Geologie	
siehe Abb. 2.24 u. 2.25		Gesteinsart	ungestörter Phyllit
		Überlagerung [m]	30-160

2.4.2 Passive Vorspannung durch Abstützung auf das Gebirge

2.4.2.1 Vorspannung durch Bohrlochinjektion

Früh im zwanzigsten Jahrhundert wurden schon Bohrlochinjektionen mittels Zementmilch angewendet. Diese hatten den Zweck, den Hohlraum zwischen Holzzimmerung und Gebirge auszufüllen, ohne eine Vorspannung der Betonauskleidung zu erzielen. Hauptsächlich sollte das schlechte Gebirge hinter dem Rissbereich durch Verpressung der Hohlräume verfestigt werden. Ziel dabei ist es, die Wasserverluste zu reduzieren. Anfang der 1920er Jahre wurde durch *Mühlhofer* die statische Wirkung der Injektionen für Betonauskleidungen im Druckstollen erkannt und als notwendiges Konstruktionsprinzip dargestellt. In weiterer Folge zählte die Bohrlochinjektion zur Standardausführung, wobei nie von einer Vorspannung die Rede war. [45]

Bis die Bohrlochinjektion bewusst für das Erzeugen einer Vorspannung eingesetzt wurde, verstrichen etliche Jahre. Dies geschah erstmals beim Bau des Reisach-Stollen des KW Reisach-Rabenleithe Anfang der 1950er Jahre im Auftrag der Energieversorgung Ostbayer AG. Beispiele für die Verwendung in Österreich stellen das KW Kaunertal (1964) sowie das KW Kops I (1968) dar. In Kops wurde mit dem weiterentwickelten Kernring-Verfahren gearbeitet. Um dort das Abfließen des Injiziergutes in das Gebirge zu vermeiden, wurde das angrenzende Gebirge durch eine Kombination aus einer vorher ausgeführten Spritzbetonauskleidung mit tiefen Bohrlochinjektionen weitestgehend verdichtet (siehe Abb. 2.26). [13, 45]

Durchführungen von Versuchen der Tiwag haben gezeigt, dass 3 bis 4 Injektionsvorgänge erforderlich sind, um eine wirksame gleichmäßige Vorspannung zu erreichen. Hier ist es notwendig, die Bohrlöcher auf Lücke zu bohren, was einen Raster mit Bohrlochabständen von 1,0 m ergibt. Die Tiefe der Bohrlöcher soll i.d.R. den Radius nicht überschreiten und entspricht im Normalfall 2 bis 3 m. Abb. 2.27 zeigt die Anordnung von Injektionsbohrlöchern, wie sie beim Reisach-Stollen der Fall war. Bei Auflockerungszonen werden nur kurze Bohrlöcher von rund 1,0 m verwendet, um auch tiefer liegende klüftige Bereiche zu erfassen. In der heutigen Zeit sind aufgrund des mechanischen Vortriebes kaum mehr Auflockerungszonen vorhanden. Bei hohem

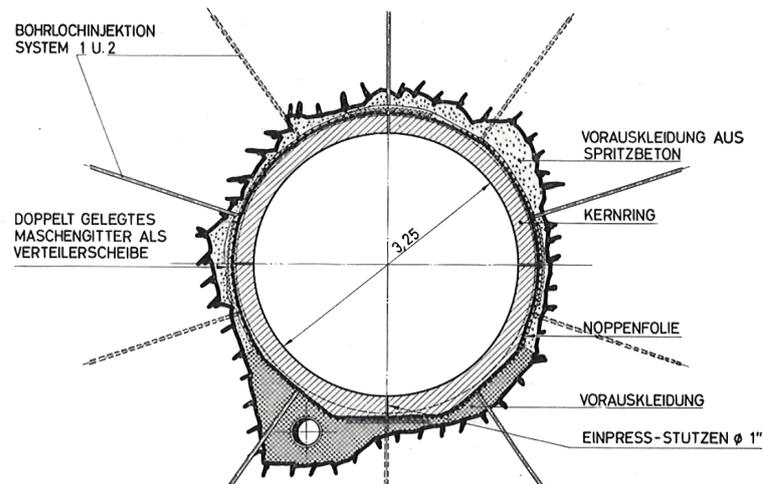


Abbildung 2.26: Kernring-Auskleidung mit eingebauter Kunststoff-Noppenfolie [13]

Gebirgsdruck und/oder schlechtem Gebirge kann es zu ähnlichen Verhältnissen kommen. In diesem Fall, sind kurze Bohrlöcher zu empfehlen, um den Ringspalt und die Bruchzone zu erreichen. Durch das Aufbringen einer Trennschicht, wie es beim Tiwag-Spaltinjektionsverfahren der Fall ist, wird ein Öffnen des Ringspaltes begünstigt. So kann der Injektionsdruck gleichmäßig auf den Umfang verteilt werden. [45]

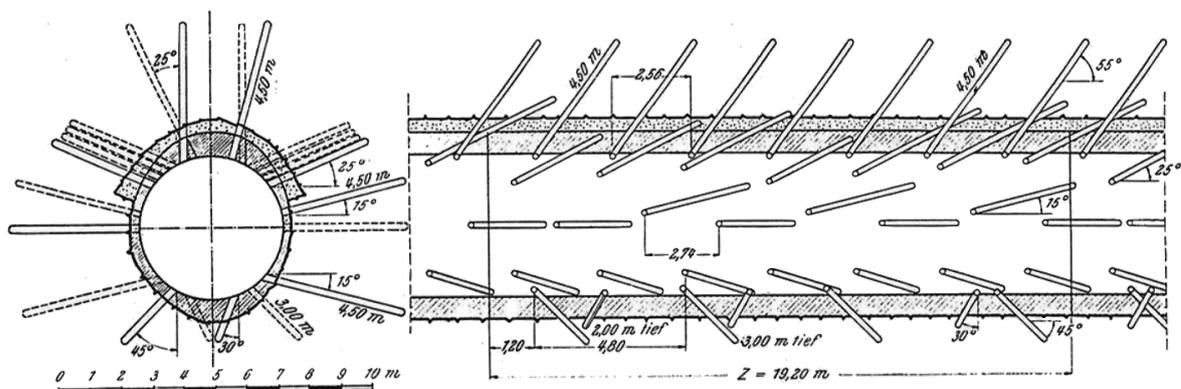


Abbildung 2.27: Anordnung Injektionsbohrlöcher im Reisach-Stollen [45]

Abschließend ist zu sagen, dass bei einer wirklich notwendigen echten Vorspannung Bohrlochinjektionen einen sehr hohen Aufwand mit sich bringen. Die beliebige Verdichtung eines Rasters, bis eine gewünschte Vorspannung erreicht wird, stellt jedoch einen großen Vorteil dieser Methode dar. [45]

2.4.2.2 Vorspannverfahren nach Kieser

Bei den bisher genannten Auskleidungsmethoden für Druckstollen und Druckschächte soll ein meist aus Beton bestehender Auskleidungsring für die notwendige Wasserdichtigkeit sorgen. Beton, als spröder Baustoff bekannt, ist jedoch nicht sonderlich für die Aufnahme der im Druckstollen entstehenden Zugkräfte geeignet. Die im Druckstollen auftretenden Beanspruchungen sind viel zu groß, um von der vorhandenen Ringzugfestigkeit aufgenommen zu werden. Die theoretische Zugfestigkeit beträgt bestenfalls 20 bis 30 kg/cm² und geht in vorhandenen Arbeitsfugen gegen null. Um das Druckstollenproblem zu lösen, ist man zur Erkenntnis gekommen, das große Widerstandsvermögen des Betons gegen Druck auszunützen und somit vorgespannten Beton für eine rissichere Auskleidung heranzuziehen. Wird die Auskleidung von tragfähigem Gebirge umgeben, ist es möglich, eine auf das Gebirge abgestützte Zwangsbettung als Vorspannung zu erzielen. Dabei kann auf den Einsatz von Stahl verzichtet werden. Ziel der **Kernringauskleidung** (siehe Abb. 2.28) ist es, die Rissicherheit maßgebend zu erhöhen. Dies wird durch einen einfach hergestellten bautechnischen Verbund zwischen Auskleidung und Gebirge erzielt. [22]

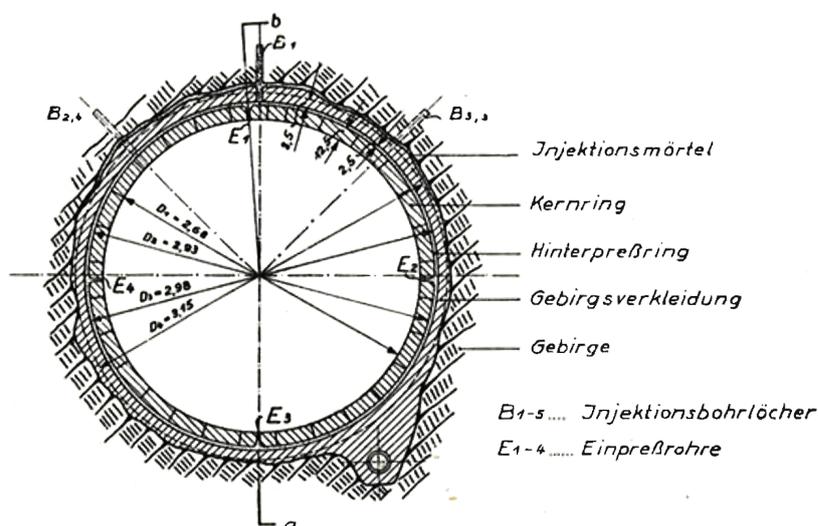


Abbildung 2.28: Regelprofil - Kernring-Auskleidung [23]

Einen unentbehrlichen Bestandteil des **Konstruktionsprinzipes** bildet eine Gebirgsverkleidung mit kreisförmigem Querschnitt, deren Hauptfunktion es ist, einen standfesten und trockenen Arbeitsraum für den darauffolgenden Einbau eines Kernringes zu schaffen. Zusätzlich muss die Gebirgsverkleidung dem, aus Nockensteinen gemauerten, Kernring als Widerlager dienen (siehe Abb. 2.30). Eine bestimmte Zonenabgrenzung wird ebenfalls durch die Gebirgsverkleidung geschafft und dient als Aussparung für einen möglichst engen Hinterpressraum. Dieser ist meist 5 m lang (siehe Abb. 2.29) und wird mit Stahlringen abgegrenzt, die in die Gebirgsverkleidung und in den Kernring eingebunden sind. Dadurch wird ein Durchbruch des Injektionsgutes von benachbarten, nicht verpressten Zonen verhindert. Übereidies erhält man an den Zonengrenzen eine Abdichtung der, durch die Vorspannung entstehenden Scherrisse. Ist der Hinterpressring vollständig mit Pressmörtel verfüllt, dient er dem, den Zonen entlang fortschreitenden Ansatz des hydraulischen Druckes. [24, 45]

Für dieses neuartige Spannverfahren wurde von A. Kieser die Bezeichnung „Kernringhinterpressung“ oder kurz „Hinterpressung“ geprägt. [24]

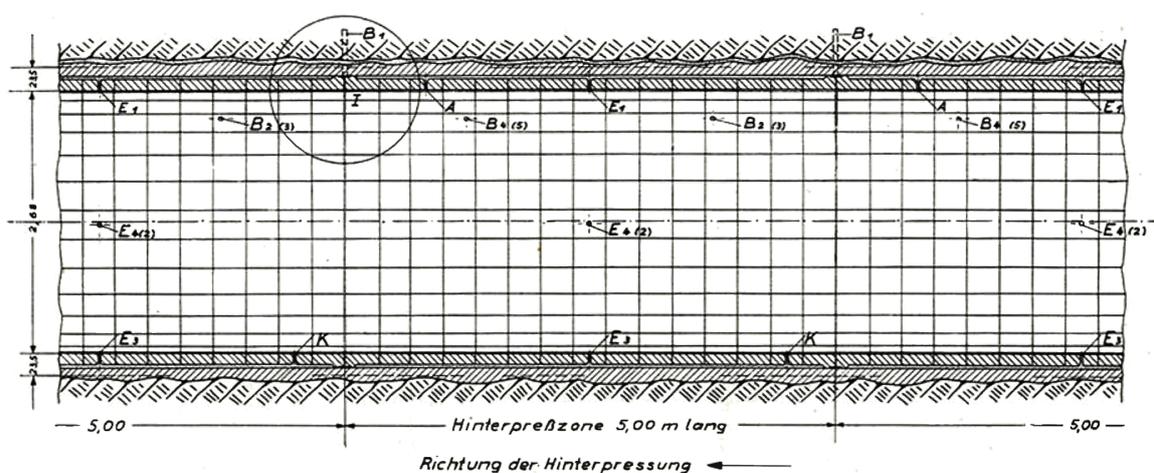


Abbildung 2.29: Längsschnitt a-b Kernring-Auskleidung [23]

Durch Verfüllung mit Mörtel wird die als Vorfluter dienende Drainage komplett ausgeschaltet. Wurde die Hinterpressung vollzogen, findet das Bergwasser keinen Zutritt mehr in die Stollenröhre und wird dadurch in seine alten Fließwege abgedrängt. Ist jedoch eine wasserdichte Stollenröhre auszuführen und eine Gebirgsbruchgefahr durch genügend Überdeckung ausgeschlossen, kann mit der Kernring-Auskleidung eine technische und wirtschaftliche Überlegenheit begründet werden. Dies geschieht anhand der

Grundlage, dass Stahl als Spannmittel durch eine einfache Zementinjektion ersetzt wird, welche alle möglichen Hohlräume und Risse der Gebirgsverkleidung auspresst. [24]



Abbildung 2.30: Mauerung des Gewölbes - Kernringstrecke Kops-Vallüla [24]

Nachdem die Tiwag einige Erfahrungen mit dem Spaltinjektionsverfahren gesammelt hat, wurde das Kernringverfahren weiterentwickelt. Zunächst wurden Kunststoff-Noppenfolien mit 3 mm hohen Noppen, anstelle der oben erwähnten Nockensteine, eingebaut (siehe Abb. 2.26). Der Spalt blieb jedoch auch hier so groß, dass weiterhin in alter Weise injiziert werden musste. Eine wesentliche Verringerung des Aufwands hat sich durch das Auftragen der Noppenfolie, auf einen mit Spritzbeton gesicherten Außenring, ergeben, wie es beim KW Kops I (1968) der Fall war (siehe Abb. 2.26). Seit der Verwendung von glatten Folien ist das Kernringverfahren mit dem Tiwag-Spaltinjektionsverfahren (vgl. Kapitel 2.4.2.3) gleichzusetzen. [13, 45]

2.4.2.2.1 Druckstollen Kops-Vallüla (1950)

Das Bauvorhaben "Wasserüberleitungen aus Tirol", unter der Schirmherrschaft der Vorarlberger Illwerke, wurde bereits 1942 in Angriff genommen. Da Rücksicht auf eine geplante Anlage in Kops genommen wurde, hat man einen Druckstollen von Kops nach Vermunt über Vallüla geführt, der die beiden Stauseen unter ihrem Absenkziel verbinden sollte. Dieser Druckstollen bildet dabei einen kleinen Teil der insgesamt 16 km langen Strecke Jambachfassung - Vermuntstausee. Direkt an das Kopsbecken schließt ein erster Teil des Stollens (siehe Abb. 2.31) an, der aufgrund seiner geringen Überlagerung, dem erhöhten Ausbauzustand von bis zu 9,80 bar und der teilweise starken Störung des Gebirges, mit einer wasserdichten Auskleidung versehen werden sollte. Erste Überlegung war es, eine bis zu dieser Zeit übliche Betonauskleidung, inklusive bewehrtem Torkretring, anzuwenden. Ein durch die Vorarlberger Illwerke unterstützte Erprobung der bis dahin noch unbekanntenen Kernringauskleidung, im Versuchsstollen Muleritsch (1948/49) war jedoch zu diesem Zeitpunkt bereits abgeschlossen und wurde aufgrund seiner Überlegenheit im Vergleich zu bisher verwendeten Bauweisen als Ausbaumethode für die ersten 390 m verwendet. [23, 45]

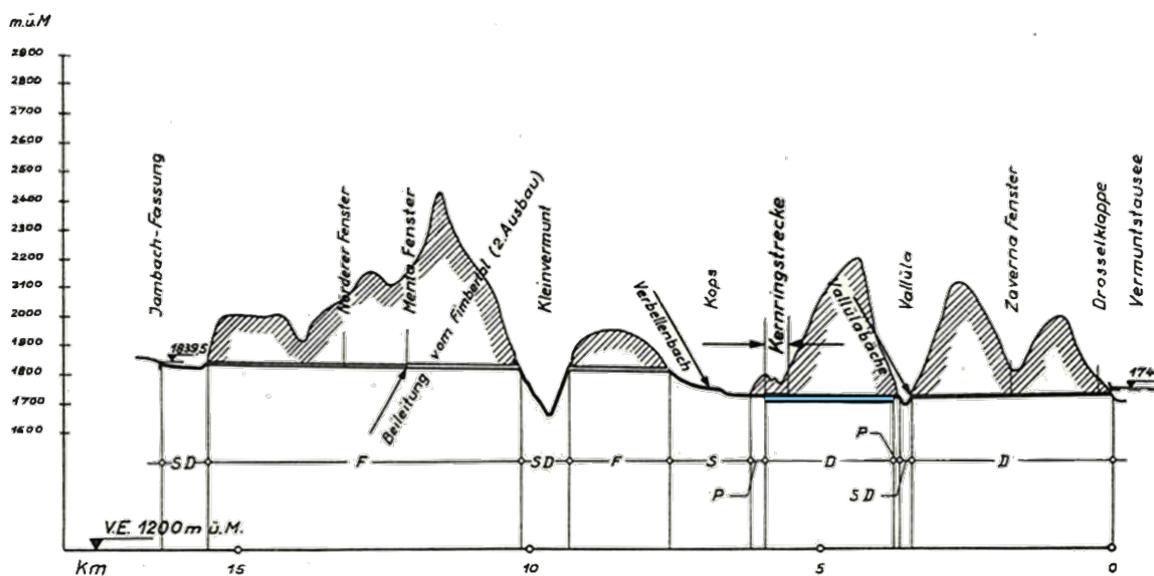


Abbildung 2.31: Übersichtslängenschnitt der Wasserüberleitungen aus Tirol [23]

Tabelle 2.8: Kennwerte - Druckstollen Kops-Vallüla

Allgemein		Auskleidung	
Kraftwerk	<i>Vermunt</i>	Art	<i>Kernringkonstruktion</i>
Stollen	<i>Kops-Vallüla</i>	Aufbau/ Stärke [cm]	<i>12,5 Kernring aus Nockensteinen gemauert</i>
Inbetriebnahme	<i>1950</i>		<i>2,5 Hinterpresshohlring</i>
Länge [m]	-		<i>5-8,5 Gebirgsverkleidung</i>
Neigung [%]	<i>0,10-0,15</i>	Injektion	
Ausbauleistung [kW]	<i>90.000</i>	Hinterspritzung	<i>ja</i>
Bruttofallhöhe [m]	<i>714,40</i>	Art d. Inj.	<i>Zementmörtel</i>
Querschnitt		Hydraulische Verhältnisse	
Form	<i>Kreisförmig</i>	max. Innendruck [bar]	<i>9,81</i>
Fläche [m ²]	<i>5,64</i>	Ausbauwassermenge [m ³ /s]	<i>20</i>
Verortung		Fließgeschwindigkeit [m/s]	<i>3,55</i>
<i>siehe Abb. 2.31</i>		Geologie	
		Gesteinsarten	<i>96 m Amphibolit 160 m Glimmerschiefer 134 m Biotitaugengneis</i>
		Überlagerung [m]	<i><100 m</i>

2.4.2.3 TIWAG - Spaltinjektionsverfahren

Beim Druckstollen des Kaunertalkraftwerkes (1964) fand man aufgrund des schlechten Gesteins und der hohen Innendrucke keine optimalen Verhältnisse vor. Um sich den Gegebenheiten anzupassen und dabei nicht auf die Wirtschaftlichkeit zu verzichten, wurde das Tiwag Spaltinjektionsverfahren entwickelt. Ziel war es, ein Vorspannverfahren zu entwickeln, bei dem ein einziger Ring ausreicht. Durch die Anwendung von Injektionsleitungen mit Ventilen war es das Ziel, Injektionsgut in den, zwischen Betonring und Gebirge liegenden Spalt, zu injizieren. Erstmals wurde dieses System beim Verpressen der Verteilleitung des KW Prutz-Imst (1956) angewendet. [32, 45]

Bei der Anwendung des Verfahrens stellte sich die Frage, ob die Injektion selbst reicht, um die Auskleidung vom Fels zu lösen und den dabei entstehenden Spalt zu verpressen. Wie die Durchführung einiger Versuchsreihen zeigte, ist dies, bei schiefrigen Gesteinen mit erhöhtem Druck bis zu 20 bar, möglich. Durch die Anwendung von Trennmitteln, wie Kalkmilch und Dispersionsfarbe, konnten wesentliche Verbesserungen erzielt werden. Der größte Fortschritt wurde durch PVC-Folien erlangt, mit denen eine vollständige Trennung möglich war. Diese Methode ähnelt zudem sehr der zuvor dargestellten Kieser-Methode. [32, 45]



Abbildung 2.32: Bohrkern aus der Auskleidung des Druckstollens Kaunertal [45]

Das **Spaltinjektionsverfahren** (siehe Abb. 2.33), dessen Ablauf wie folgt beschrieben wird, geht auf seine Erfinder *Lauffer, Seeber und Kaindl* zurück. Vor der Betonierung des Betonrings ist es wichtig, die Haftung des Felses bzw. Spritzbetons am Betonring zu unterbinden, was mit einem aufzusprühenden Trennmittel (Kalkmilch, Dispersionsfarbe) oder einer Kunststoffolie ausgeführt werden kann. Darauf folgt die ringförmige Verlegung der Injektionsleitungen, welche mittels Blechlaschen und Schußbolzen, am Fels bzw. Spritzbeton befestigt wird. Um das Injektionsgut gleichmäßig im Querschnitt zu verteilen, sind die als Kunststoffschläuche ausgeführten Injektionsleitungen alle 1 bis 1,5 m mit Manschettenventilen versehen. Durch die Öffnung des Injektionsdruckes erfolgt die Injektion über die Injektionsleitung direkt in die Kontaktfuge, wodurch der einige mm große Spalt (siehe Abb.2.32) in Längsrichtung immer mehr aufgekeilt wird. Neben dem angrenzenden aufgelockerten Felsbereich erfaßt die Injektion hauptsächlich den Spalt selbst. Wenn der Spalt einmal aufgerissen ist, weitert er sich in der Regel genug auf, um eine entsprechende Injektion mit Zementmilch durchführen zu können. [32, 45]

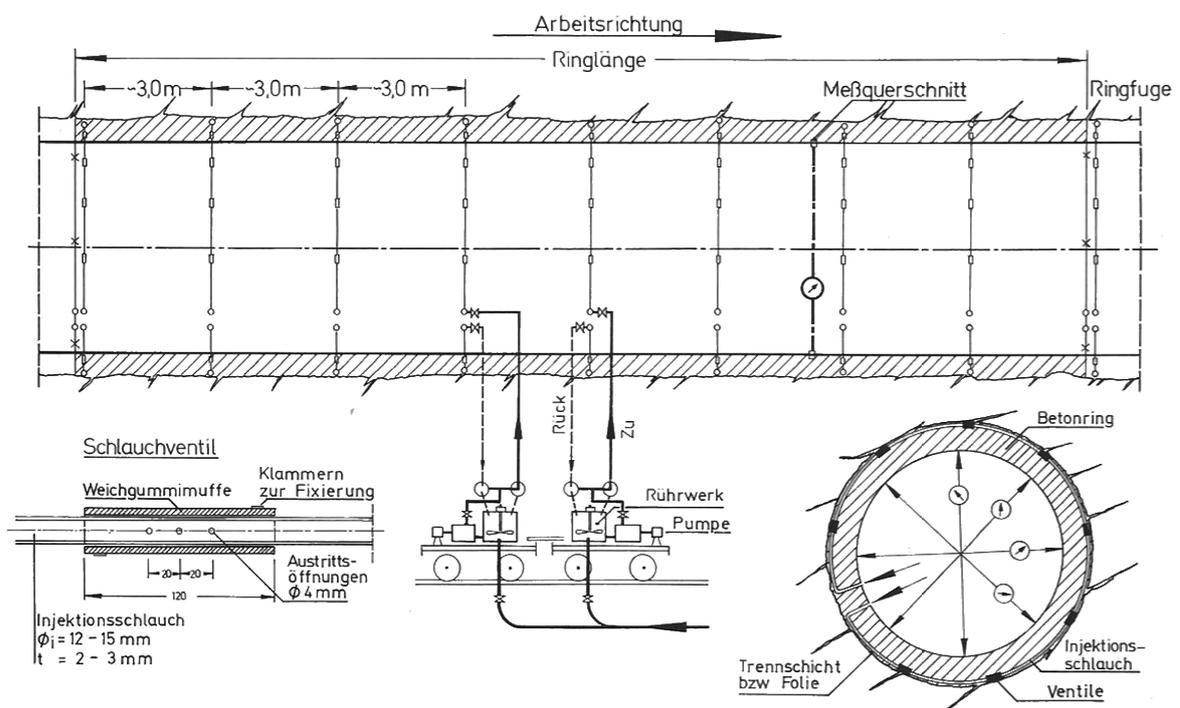


Abbildung 2.33: Spaltinjektionsverfahren - Arbeitsvorgang [44]

Bei der Injektion spricht man von einem Filtervorgang, der neben den Undichtheiten des Betonringes auch alle schneidenden Klüfte des Spaltes mit dicht gelagertem Zement verfüllt. Daraus resultiert eine Abdichtung des Betonringes, sowie, besonders im Bereich der Auflockerungszone, eine Gebirgsverfestigung. Dort wo der Fels nachgiebig ist, kommt es zum Einreißen von Klüften und Spritzbeton. So werden schlechte, nachgiebige Felsbereiche automatisch gezielt injiziert. Nachdem der Zement vollständig ausgehärtet ist, wird der Spannungszustand „einzementiert“. Beim Auftreten von Vorspannverlusten kann ein zweites Mal nachinjiziert werden. [32, 45]

2.4.2.3.1 KW Kaunertal (1964)

Ein Übersichtslängenschnitt des beschriebenen Kaunertal Druckstollens, samt seinen Auskleidungstypen, ist in Abb. 2.36 zu sehen.

Durch die beim KW Prutz-Imst (siehe Kapitel 3.6.1) gesammelte Erfahrung im Bereich des Vortriebes erfolgte auch beim 13,2 km langen Kaunertal-Druckstollen der Ausbruch nach der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise. Dabei wurde ein Vollprofil mit einem Durchmesser von 4,0 m ausgewählt. Der Druckstollen kann geologisch in zwei Bereiche (siehe Abb. 2.36) geteilt werden. Bis km 9,5 ist von einer Gneisstrecke die Rede, welche durch das Ötztaler Altkristallin (hauptsächlich Schiefer- und Granitgneise) geprägt wird und nach einer Überschiebungsfläche in die Bündner Schiefer übergeht. Den zweiten Abschnitt bildet eine völlig anders zu beurteilende, von km 8 weg, immer mehr zu Phyllit und Mylonit werdene Strecke. Bevor der bis km 7,5 als Hangstollen ausgeführte Druckstollen an diesem Punkt das Fenster Feichten erreicht, beträgt die Überlagerung zwischen 400 und 500 m. Von diesem Fenster aus wird der Druckstollen durch einen Kamm, mit einer weitaus höheren Überlagerung von rund 1.100 m, bis zum Wasserschloss geführt. Neben den Schwierigkeiten beim Ausbruch im relativ weichen Bündner Schiefer kam es bei einer 700 m langen, in den Gneisen vor der Überschiebungsfläche befindenen Mylonitstrecke, die durch tektonische Beanspruchungen in Mitleidenschaft gezogen wurde, zu den größten Turbulenzen. [45]

Zusätzlich bereiteten die hohen Innendrucke (statisch 16 bar, dynamisch 18 bar) einige Schwierigkeiten, denen im festen Kristallin mit einer einfachen 20-30 cm starken Betonauskleidung in Kombination mit einer 40 bar hohen Bohrlochinjektion (Typ I, II), entgegen gewirkt wurde. Entlastend auf die Auskleidung wirkte der, im Bereich der Gneisstrecke, höher als der Triebwasserdruck liegende Bergwasserdruck. Betrachtet man den zweiten Abschnitt des Druckstollens, so sieht man, dass durch die große Nachgiebigkeit der Gesteine auf der Phyllit- und Mylonitstrecke, mit Rissen einer Betonauskleidung zu rechnen ist. Hinzu kommt der über den letzten 800 m vor dem Wasserschloss liegende Rutschhang, wo Wasseraustritte aus dem Stollen auf alle Fälle zu vermeiden sind. Erste Varianten für eine mögliche Auskleidung waren eine vorgespannte Betonauskleidung (Kernring-Auskleidung) oder dünnwandige Panzerung.

Nach einem Kostenvergleich hat man sich für den Einsatz einer dünnwandigen Panzerung (Typ V) in Kombination mit dem Tiwag-Spaltinjektionsverfahren für die kritischen 800 m vor dem Wasserschloss entschieden. Bei gleichen Kosten bietet diese eine viel größere Sicherheit. [45]

Im Bereich der restlichen 4 km mit Phyllit und Mylonitvorkommnissen, zwischen dem Fenster Feichten und dem Wasserschloss beim Fenster Burghofen (siehe Abb. 2.34), wurde das Ziel verfolgt, eine wirtschaftliche Auskleidung, die im Vergleich zur Kernring-Auskleidung mit nur einem einzigen Betonring auskommt, zu entwickeln. So hat man einen 25-40 cm starken Betonring in Kombination mit dem **Tiwag-Spaltinjektionsverfahren** angewendet. Nach einer Druckprobe, bei der die Auskleidung keine Risse zeigte und praktisch dicht war, kann die mit 40 bar vorgespannte Betonauskleidung (Typen III a, III b, IV) als voller Erfolg angesehen werden. [45]

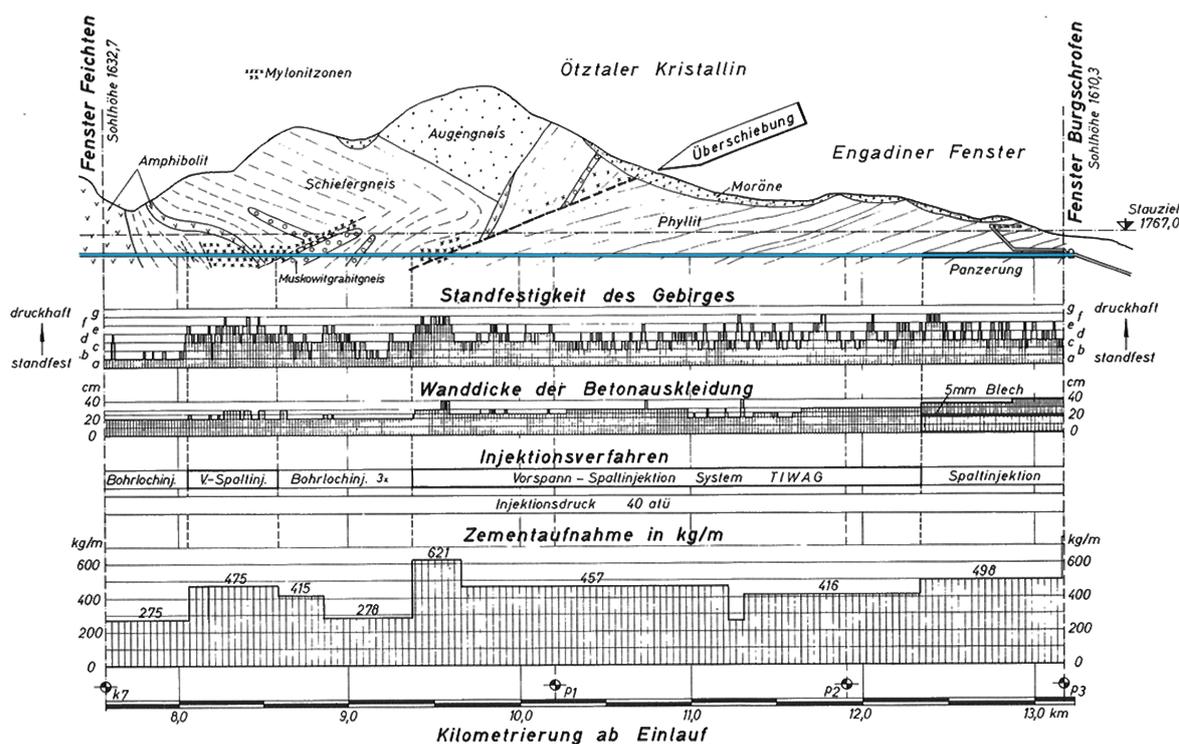


Abbildung 2.34: Detaillängenschnitt Fenster Feichten - Fenster Burghofen - KW Kau-
nertal [40]

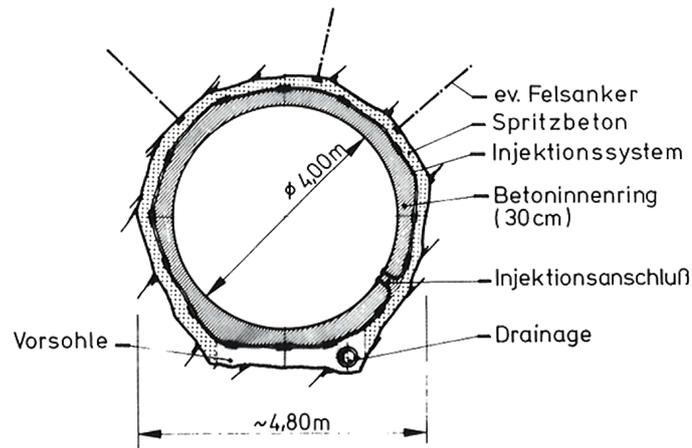


Abbildung 2.35: Regelprofil - KW Kaunertal [40]

Tabelle 2.9: Kennwerte - Druckstollen KW Kaunertal

Allgemein		Auskleidung	
Kraftwerk	<i>Kaunertal</i>	Typ III b u. IV	
Stollen	<i>Kaunertal</i>	Art	<i>Kombination Betonauskleidung mit Tiwag Spaltinjektion</i>
Inbetriebnahme	<i>1964</i>	Stärke [cm]	<i>25-40 Betonring</i>
Länge [m]	<i>13.200</i>	Typ V	
Neigung [%]	<i>0,37</i>	Art	<i>Kombination Dünnwandige Panzerung mit Tiwag Spaltinjektion</i>
Ausbauleistung [kW]	<i>390.000</i>	Aufbau/ Stärke [cm]	<i>20 Betoninnenring</i>
Bruttofallhöhe [m]	<i>895</i>		<i>0,5 Stahlblech</i>
Querschnitt		Injektion	
Form	<i>Kreisförmig</i>	Hinterspritzung	<i>ja</i>
Fläche [m ²]	<i>12,57</i>	Art d. Inj.	<i>40 bar Spaltinjektion</i>
Verortung		Hydraulische Verhältnisse	
<i>siehe Abb. 2.34 u. 2.36</i>		max. Innendruck [bar]	<i>18</i>
		Ausbauwassermenge [m ³ /s]	<i>50</i>
		Fließgeschwindigkeit [m/s]	<i>3,98</i>
		Geologie	
		Gesteinsarten	<i>Phyllit Mylonit</i>
		Überlagerung [m]	<i>400-1100 m</i>

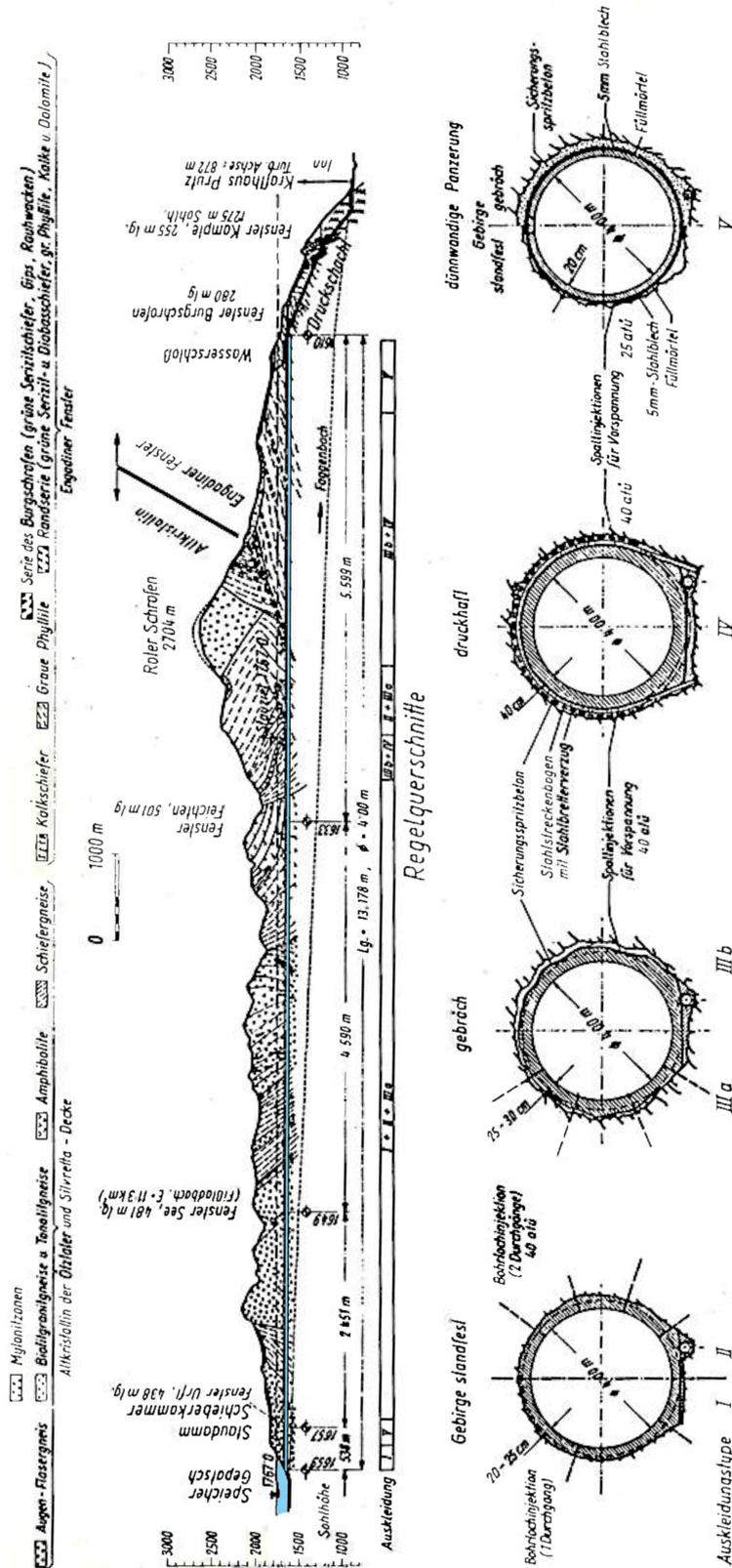


Abbildung 2.36: Übersichtslängenschnitt inklusive Auskleidungstypen - KW Kaunertal

[45]

2.4.3 Vorgespannte Betonauskleidung mit Dichthaut

Aufgrund geringer Überlagerungshöhen bzw. Primärspannungen kann ein Teil der Vorspannung verloren gehen, was zu einer Dehnung der Betonauskleidung führt und die Rissebildung fördert. Tritt dieser Fall ein, ist die Gebirgsmitwirkung bei weitem noch nicht erschöpft. Um die abdichtende Funktion der Auskleidung auch bei größeren Deformationen zu gewährleisten, muss diese ein zusätzliches Dichtelement erhalten. Bestens geeignet dafür sind **dünnwandige Panzerungen und Kunststofffolien** (siehe Abb. 2.37), die durch ihre hohe Dehnbarkeit keinen Schaden mit sich tragen. Die Kombination aus Dichthaut und Betonauskleidung wird gerne auch als „Sandwichbauweise“ bezeichnet. [42, 45]

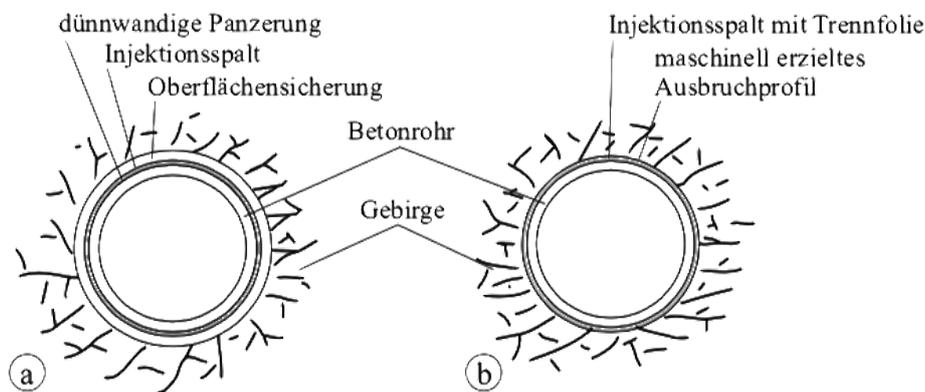


Abbildung 2.37: Vorgespannte Betonauskleidung mit (a) dünnwandiger Stollenpanzerung und (b) Dichtfolie [14]

Kunststofffolien können aus PVC oder PE ausgeführt werden und haben eine Rissdehnung von 100 %. Bei Stahlblechen liegt diese hingegen nur bei 10 %, was kein Hindernis für die Aufnahme einer Dehnung von einigen Promille darstellt. Aufgrund erhöhter Außendrucke bei Injektionen und Stollenentleerungen sind die dünnen, sehr empfindlichen Dichthäute außerhalb der Betonauskleidung anzuordnen. Gegenüber den Dichthäuten ist die Betonauskleidung aufgrund Rissbildung undicht, wodurch das Triebwasser an die Dichthaut gelangt. Durch den Aufbau des vollen Innendruckes auf der Dichthaut geht dieser direkt auf das Gebirge über und führt zu einer vollständigen Entlastung des Betonrings. Dünnwandige Panzerungen können im Vergleich zu Kunststoffdichthäuten, bei denen die Aufnahme des Druckes vernachlässigbar klein ist, einen entsprechenden

Innendruckanteil aufnehmen. Dieser statische Vorteil spiegelt sich auch bei den Kosten wieder. Bei der Verwendung einer Auskleidung mit Kunststoffolie sind die Kosten etwas niedriger als bei einer dünnwandigen Panzerung. [42, 45]

Mit Hilfe der Dichthautauskleidung ist ein kostengünstiges System gegeben. Es bildet eine gute Alternative für den Übergangsbereich zwischen der Betonauskleidung und der wesentlich teureren, aber in vielen Bereichen unerlässlichen Vollpanzerung. [42, 45]

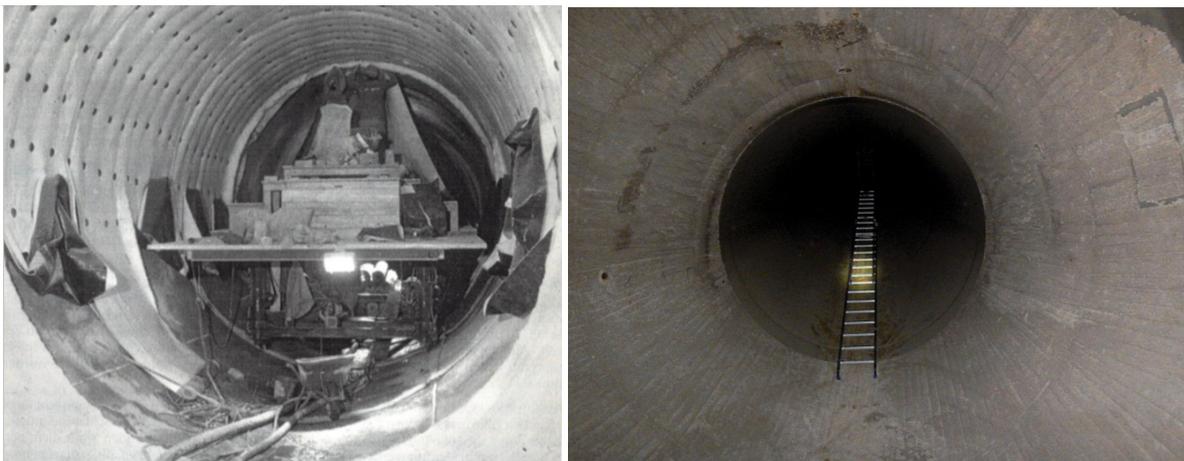
2.4.3.1 Vorgespannte Betonauskleidung mit Dichtfolie

Im Zuge des Tiwag-Spaltinjektionsverfahren hat man zur leichteren Spaltöffnung eine Trennschicht, im Normalfall bestehend aus einem Kalkmilchanstrich, verwendet. Alternativ kann hier auch eine Kunststoffolie angebracht werden, wo es von Vorteil wäre, diese etwas stärker auszubilden (2 bis 3 mm), um zusätzlich eine Dichtfunktion zu schaffen. Beim Auswählen der richtigen Stärke muss einerseits auf eine ausreichende Dehnbarkeit Acht gegeben werden, um sich dem sehr unregelmäßigen Ausbruchsquerschnitt anzupassen und andererseits muss die Folie stark genug sein, um genügend Widerstand gegen Spitzen der Felsoberfläche zu haben. Ist die Folie zu schwach ausgelegt, kann es bei einem zu hohen Innendruck zu Rissen an der Folie kommen, da diese extrem auf die raue Felsoberfläche gedrückt wird. [8, 45]

Die Verwendung des Tiwag-Spaltinjektionsverfahren in Kombination mit einer Kunststoffolie bringt den Vorteil einer reduzierten Beanspruchung für die Folie mit sich. Nur beim Betonieren, durch den entstehenden Betondruck und während des Verdichtes wird die Folie gegen vorhandene Felsspitzen gedrückt. Durch das darauffolgende Injizieren des Spaltes, entsteht durch die Zementschicht bergseitig eine glatte Bettung der Folie. Die Verwendung einer Schutzunterlage, um einen Schutz gegen Beschädigungen zu schaffen, ist mit Sicherheit vorteilhaft. Diese kann als Polypropylen-Vlies (Geotextil) ausgeführt werden. Das Vlies hat den Nachteil, beim Spaltinjektionsverfahren als Filter zu dienen, was die Ausbreitung des Injektionsgutes maßgeblich erschwert. Aus diesem Grund ist auf der Rückseite des Vlieses eine 0,1 mm dünne PVC-Folie anzuordnen. [8, 45]

Über längere Zeit hinweg brachte die Befestigung der Folie am Gebirge große Probleme mit sich. Bei der ersten Anwendung zog man eine doppelschalige Betonauskleidung heran, wie sie beim KW Rifa (1969) der VIW angewendet wurde. Eine Folie mit T-Stegen wurde beim Betonieren des Außenringes auf der Schalung befestigt, um danach im Beton zu hängen. Zusätzlich wurde ein Betoninnenring zur Sicherung des Außendruckes eingebaut. [8, 45]

Bei der Befestigung, wie es bei der Oberstufe Kühtai des KW Sellrain-Silz zur Anwendung kam (siehe Abb. 2.38 (a)), wird eine Schutzfolie (meistens aus Vlies) am Fels bzw. Spritzbeton befestigt. Dazu werden, mit einer Folie taschenartig überzogene, Scheiben und Schussbolzen aus Blech verwendet. Dann wird die eigentliche Dichtfolie an die Folientasche mittels Heißluft angeschweißt. Erstmals von der Tiwag beim KW Sellrain-Silz verwendet, wurde eine 3 mm dicke Dichtfolie aus PVC angebracht, um den Übergang zwischen Betonauskleidung, Drossel und Panzerung im Wasserschloss (siehe Abb. 2.38 (b) u. Kapitel 2.4.3.1.1) dauerhaft dicht abzuschließen. [8, 45]



(a) Befestigung Kunststoff-Dichtfolie [45] (b) Übergang Betonauskleidung-Panzerung [8]

Abbildung 2.38: Anwendung der vorgespannten Betonauskleidung mit Dichtfolie - KWG Sellrain-Silz

Heute wird hauptsächlich Polyvinylchlorid (PVC) als Folienmaterial verwendet. Wird eine größere Sicherheit gegen Alterung gebraucht, wird das alterungsbeständige, teurere Polyäthylen (PE) verwendet. [8, 45]

Ungefähr seit dem Jahr 1980 werden die meisten Druckstollen maschinell aufgeföhren, außer PSKW Obervermuntwerk II. Durch die Verwendung des mechanischen Ausbruchs kommt es zu gleichmäßigen zylindrischen Ausbruchsprofilen, sodass eine hohe Dehnfähigkeit der Folien nicht mehr von Nöten ist. Dadurch gewinnt man den Vorteil, die Festigkeit des Folienmaterials soweit nach oben zu schrauben, um die Rissüberbrückung leichter zu gewährleisten. Beim KW Langenegg der VIW wurde dieser Entwicklungsschritt durch den Einbau einer 5 mm starken PE-Folie, die nahezu als Kunststoff-Panzerung bezeichnet werden kann, fortgeführt. Hier ist eine Schutzunterlage durch Vlies nicht notwendig. Dafür sind Injektionssperren, ähnlich dem Kieserverfahren, anzuordnen, um das Fortschreiten des Injektionsgutes im Spalt zwischen Folie und Gebirge zu stoppen. [8, 9, 45]

2.4.3.1.1 KWG Sellrain-Silz (1981)

Westlich von Innsbruck in den Stubaier Alpen gelegen, befindet sich die 760 MW Kraftwerksgruppe Sellrain-Silz (siehe Abb. 2.39). Sie wird unterteilt in die Oberstufe Kühtai mit dem 300 MW Pumpspeicherkraftwerk Kühtai und mit dem in Silz gelegenen 460 MW Kraftwerk der Hauptstufe. Insgesamt befinden sich in der Kraftwerksgruppe 40 km lange Stollen und Schächte. Beim Druckstollen Hemerwald der Hauptstufe wurde aufgrund der geringen Überlagerung **erstmalig von der Tiwag eine Dichtfolie** im 400 m langen Übergangsbereich von der Betonauskleidung zu dem gepanzerten Druckschacht ausgeführt. Die 3 mm starke Dichtfolie aus PVC sollte den hauptsächlich von standfesten Gneis umgebenen 4.680 m langen Druckstollen dauerhaft dicht abschließen (siehe Abb. 2.40). [37, 45]

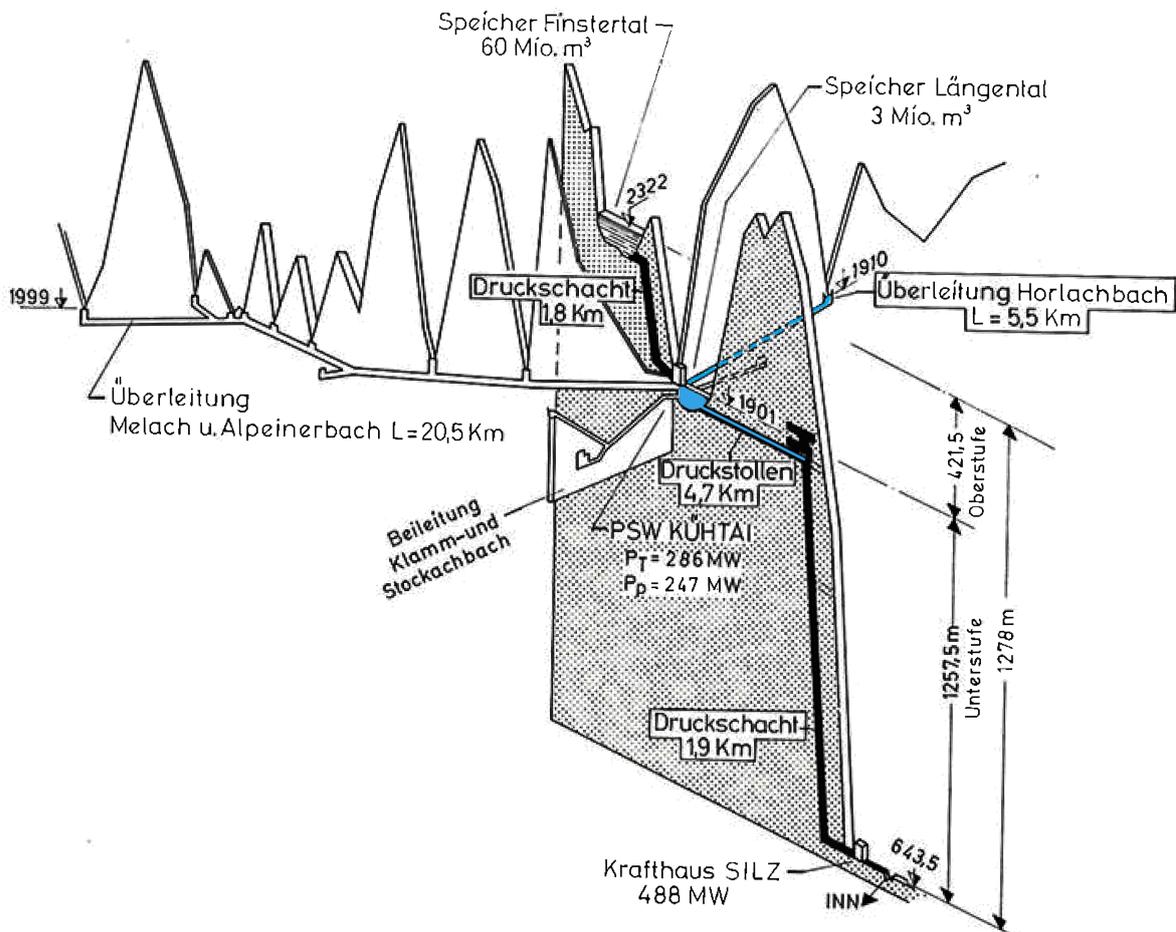


Abbildung 2.39: Übersichtsplan - KWG Sellrain-Silz [37]

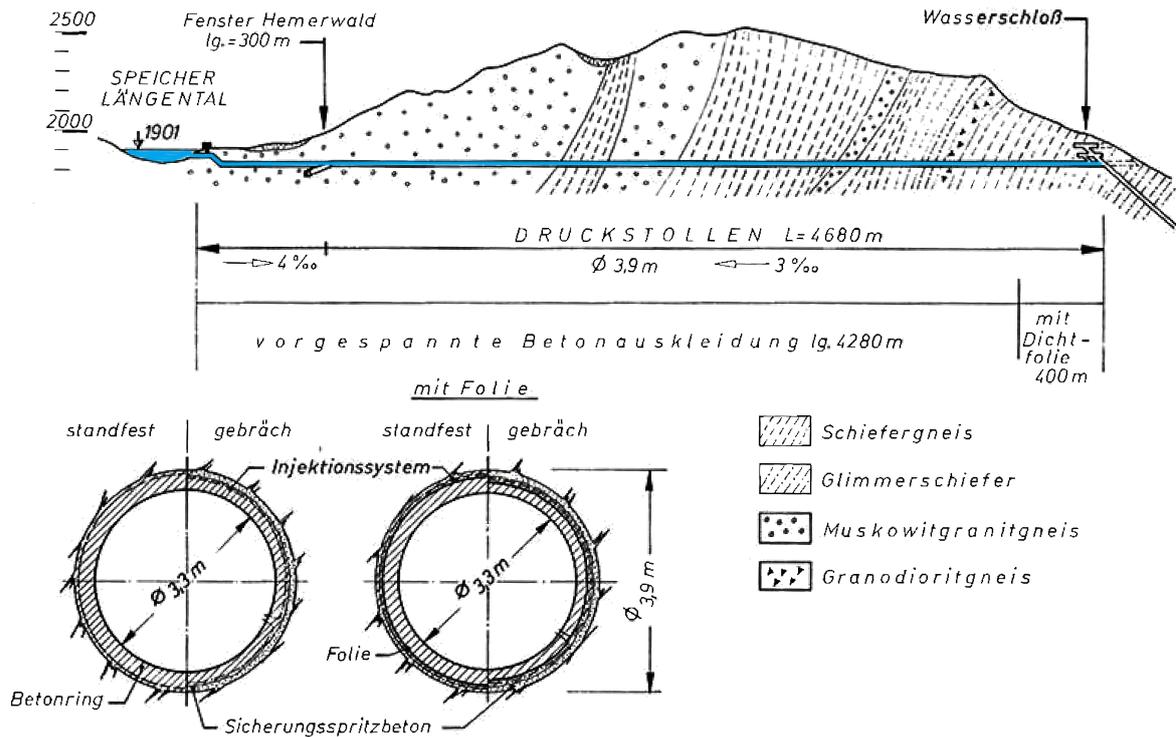


Abbildung 2.40: Längenschnitt + Profile - Druckstollen Hemerwald [37]

Tabelle 2.10: Kennwerte - Druckstollen Hemerwald KWG Sellrain-Silz

Allgemein		Auskleidung	
Kraftwerk	Silz	Art	vorgespannte Betonauskleidung mit Dichtfolie
Stollen	Hemerwald	Aufbau/ Stärke [cm]	Betonring 0,3 PVC Dichtfolie
Inbetriebnahme	1981		
Länge [m]	4.680	Injektion	
Neigung [%]	0,3-0,44	Hinterspritzung	ja
Ausbauleistung [kW]	460.000	Art d. Inj.	-
Bruttofallhöhe [m]	1257,5	Hydraulische Verhältnisse	
Querschnitt		max. Innendruck [bar]	-
Form	Kreisförmig	Ausbauwassermenge [m ³ /s]	48
Fläche [m ²]	8,55	Fließgeschwindigkeit [m/s]	5,61
Verortung		Geologie	
siehe Abb. 2.39 u. 2.40		Gesteinsarten	Muskowitgranitgneis Schiefergneis
		Überlagerung [m]	bis 400 m

2.4.3.2 Vorgespannte Betonauskleidung mit dünnwandiger Panzerung

Bereits Anfang der 20er Jahre ist man auf die Idee gekommen, dünne, als Dichthaut verwendete, Bleche zu verwenden, um so den Innendruck auf das Gebirge zu übertragen. Auf Innendruck beansprucht, funktionierte diese Auskleidung einwandfrei. Probleme traten bei Entleerungen auf, da die nicht ausgesteifte Dichthaut vom Bergwasserspiegel eingebeult wurde. Bei dünnen Blechen spricht man über Stärken von 5 bis 6 mm. Normale Verankerungen bzw. Aussteifungen (Ringe, Dübel, Schlaufen), wie sie bei konventionellen Panzerungen (siehe nächstes Kapitel 2.46) angewendet werden, kommen hier, aufgrund der geringen Steifigkeit des Bleches, nicht in Frage. Um eine Beulsicherheit zu gewährleisten, ist ein Betoninnenring auszuführen. Die übliche Stärke von 20 cm eines Ortbetonringes hat normalerweise eine ausreichende Festigkeit, um den entstehenden Bergwasserdruck, sowie den bei der Vorspannung auftretenden relativ hohen Injektionsdruck, aufzunehmen. [8, 45]

Bei der Herstellung der dünnwandigen Panzerung, einschließlich Betonring, gibt es üblicherweise zwei Optionen. Die Montage des Bleches im Stollen, mit anschließender Ausführung des Betoninnenringes (siehe Abb. 2.41), wie es beim Druckstollen Kautertal der Fall war. Zweite Möglichkeit ist es, den Betonring samt den Blechmantel außerhalb des Stollens vorzufertigen, bevor er im Stollen verlegt wird und der vorhandene Spalt mit Mörtel verfüllt wird. [8, 45]

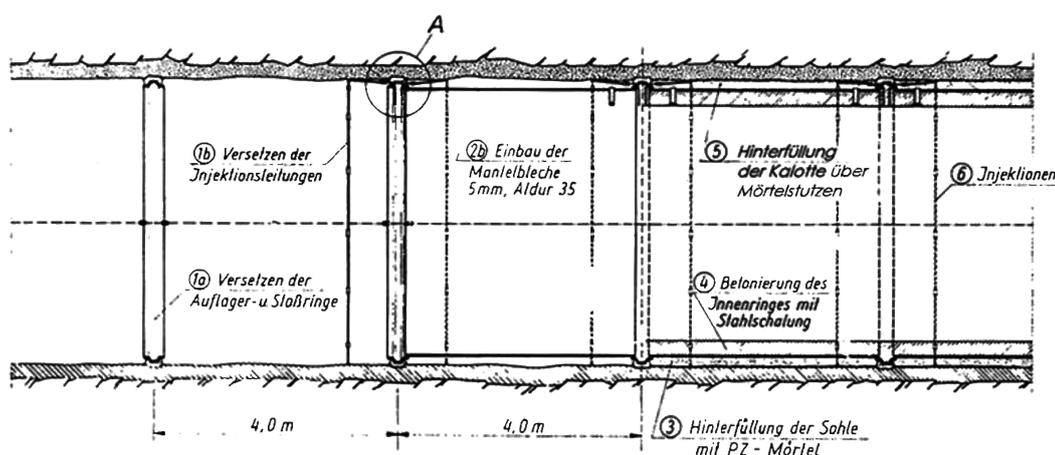


Abbildung 2.41: Längenschnitt + Arbeitsreihenfolge einer dünnwandigen Panzerung

[45]

Wird der Betoninnenring im Stollen ausbetoniert, ist es schwierig, die Aussteifung des dünnen Bleches während des Betoniervorgangs zu gewährleisten. Hier kann der Einbau einer innenliegenden Aussteifung mittels Ringen oder Gitterträgern Abhilfe schaffen. Ebenfalls ist ein Verankern von Ringträgern im Gebirge möglich. Hier werden die Bleche mit den Trägern verschweißt und bilden ein ausgesteiftes Rohr. Ein Beispiel für die Verankerung der dünnen Mantelbleche bildet der Druckstollen Kaunertal (vgl. Kapitel 2.4.2.3.1). Hier wurden 5 mm dicke Stahlbleche wie eine Dichtfolie als Abdichtungsmaßnahme in Kombination mit dem Tiwag-Spaltinjektionsverfahren verwendet (siehe Abb. 2.42). Die genaue Verortung des Druckstollenabschnittes gibt Abb. 2.36 wieder. [8, 45]

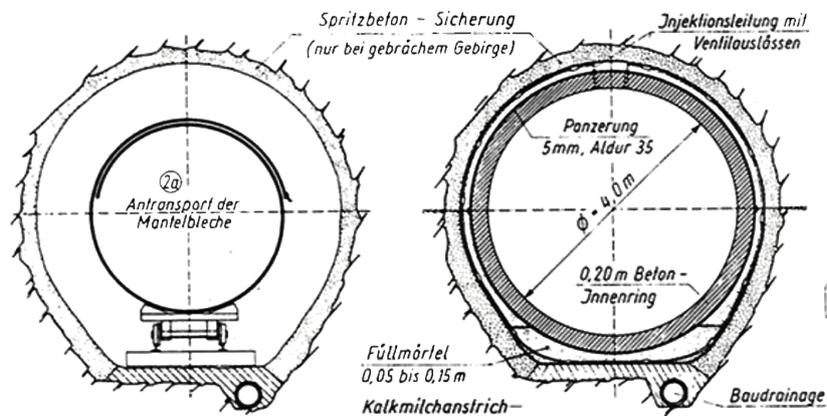


Abbildung 2.42: Querschnitte der dünnwandigen Panzerung - KW Kaunertal [45]

2.4.3.3 Vorgespannte Betonauskleidung mit GFK-Rohren

Die vorgespannte Betonauskleidung mit glasfaserverstärkten (GFK) Rohren (siehe Abb. 2.43) gilt als innovatives System für Druckstollen ab bestimmten Druckhöhen. Eine Stahlpanzerung vorzuspanssen, um den Innendruck auf das umliegende Gebirge zu übertragen und so die Stahlhaut zu entlasten, wird bereits seit einigen Jahrzehnten angewendet und hat das einfache Hinterbetonieren der Panzerung größtenteils abgelöst. Das von der TU Graz gemeinsam mit der Kelag Kärntner Elektrizitäts-AG entwickelte System, besteht hauptsächlich aus einer, durch Injektionen im Hinterfüllbereich, verfeinerten Vorspanntechnik und dem Erhöhen der Mittragwirkung des Gebirges bis zu 100 %. Dadurch soll eine Reduzierung des Stahls und eine damit verbundene Kostenreduktion geschaffen werden, wie es beim KW Feldsee (siehe Kapitel 2.4.3.3.1) erstmals der Fall war. Damit das System überhaupt umgesetzt werden kann, muss eine gute bis sehr gute Geologie gegeben sein, um den vorhandenen Innendruck vollständig aufnehmen zu können. Im Vergleich zum Stahl stellt die GFK-Dichthaut, durch ihren niedrigen E-modul und die hohe Versagensdehnung, auch bei wechselhaft, schwierigen Gebirgsverhältnissen eine sehr gute Option dar. Stahl hat eine hohe Steifigkeit und wirkt sich in Verbindung mit der Vorspanninjektion negativ aus. Bei wesentlich höheren Innendruckverhältnissen kann eine Auskleidung mit GFK als Dichtelement, im Vergleich zu Stahl, eine Rissefreiheit des Gebirges gewährleisten. [16]

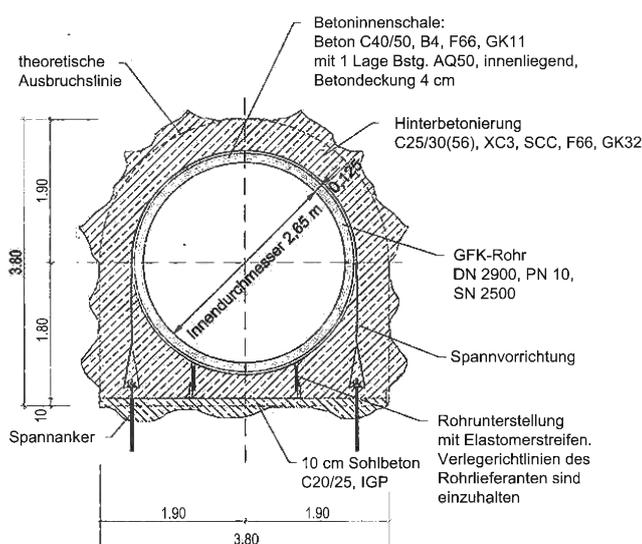


Abbildung 2.43: Querschnitt GFK-Rohr mit Betoninnenring - KW Feldsee [11]

Durch die definierte Geometrie bei Frässtollen bilden diese eine ideale Voraussetzung für eine Panzerung durch GFK. Wie das KW Feldsee zeigt, kann eine GFK-Panzerung auch bei konventionell vorgetriebenen Stollen angeordnet werden. Mittels Muffenverbindung werden die GFK-Rohre mit vorgefertigter Betoninnenschale abschnittsweise verlegt, betonhinterfüllt und injiziert. Insgesamt werden drei Injektionsvorgänge mit steigendem Druck durchgeführt. Um den Spalt zwischen Gebirge und Beton zu schließen, wird eine erste Injektionsreihe ausgeführt. Daraufhin wird der vorhandene Schwindspalt zwischen Rohr und Hinterfüllbeton mittels zweitem Injektionsvorgang geschlossen. Die Hauptinjektion erfolgt zum Schluss und dient zur Aufbringung der endgültigen Vorspannung. Dabei wird abermals der Spalt zwischen Hinterfüllbeton und Gebirge aufgefüllt. [16]

2.4.3.3.1 KW Feldsee (2011)

Die Kraftwerksgruppe Fragant wurde zwischen den Jahren 1962-1986 errichtet und mit dem zuletzt ausgeführten Projekt des KW Feldsee im Jahr 2011 vorübergehend fertiggestellt. Überwiegend befinden sich die einzelnen Bauwerke des Pumpspeicherkraftwerkes im Bereich eines Zentralgneiskomplexes. Dieser gehört geologisch gesehen zum präalpinen Kristallinsockel der Hohen Tauern. Bevor der Druckstollen in den Druckschacht übergeht, wird dieser über einen Bereich von 80 m von der Oscheniksee Störung durchörtert. Hier wurde eine Ausbruchssicherung mittels Bögen, Gitter und Spritzbeton ausgeführt. Für den Triebwasserweg der den Speicher Feldsee mit dem Krafthaus Feldsee verbindet kamen zunächst alle möglichen, klassischen Varianten in Frage. In der ursprünglich ausgeschriebenen Variante wurde ein Schrägschacht mit klassischer Stahlpanzerung als Dichtelement eingeplant (siehe Abb. 2.44). Durch die große Mittragwirkung des angrenzenden Gebirges konnte bei der vorgesehenen Stahlpanzerung erheblich Material gespart werden, was eine Senkung der Gesamtkosten des Projektes mit sich brachte. Aufgrund des in den betreffenden Jahren des Baus dieses Kraftwerkes enorm gestiegenen Stahlpreises, waren die Kosten jedoch trotzdem weit erhöht, was zur Auslotung von diversen Einsparungsmöglichkeiten führte. [11]

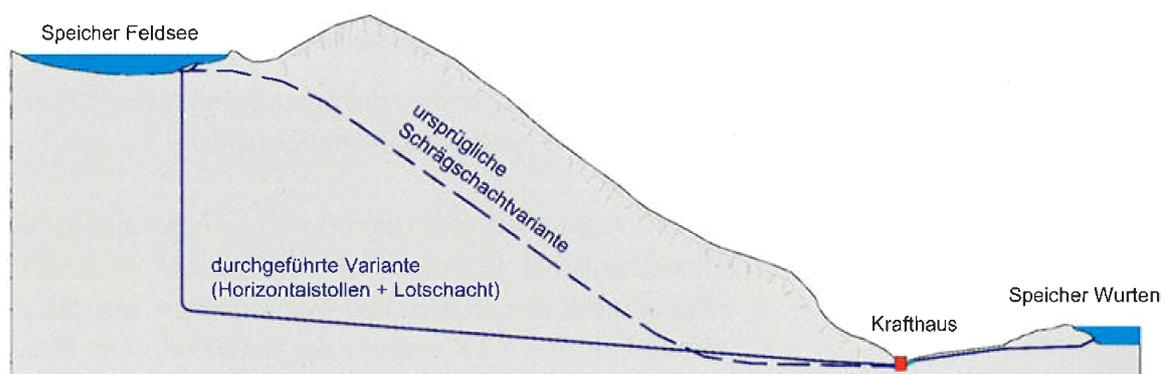


Abbildung 2.44: Variantenvergleich - KW Feldsee [11]

Ziel war es, eine kostengünstige Alternative für die ausgeführte Stahlpanzerung zu finden. Durch die geringe Überlagerung im Bereich des Krafthauses, war klar, dass zumindest dort, eine Stahlpanzerung unumgänglich ist. Für die restliche Strecke des Druckstollens waren, unter der Annahme einer vollkommenen Mittragwirkung des Ge-

birges, folgende Auskleidungen für möglich erachtet worden: [11]

- dünnwandige Stahlpanzerung inkl. Hinterfüllbeton und Betoninnenring
- vorgespannte Betonauskleidung mit Folienauskleidung
- vorgespannte dickwandige Betonauskleidung

Durch die vorhandenen felsmechanischen Eigenschaften des Gebirges und den derzeitigen technischen Möglichkeiten hat man erkannt, dass, außer im kraftwerksnahen Bereich, eine eingebaute Dichthaut keinen dynamischen Innendruck aufnehmen muss. In Verbindung mit der technologischen Entwicklung im Rohrleitungsbau von glasfaserverstärkten Kunststoffen, bei dem mittlerweile Durchmesser bis zu 5,0 m möglich waren, haben sich zusätzlich neue Optionen angeboten. So hat man direkt nach der, nicht zu verhindernen, Stahlpanzerung eine Auskleidungsvariante **mit glasfaserverstärktem Kunststoff als Dichtelement** angeordnet. Diese bietet eine kostengünstige Alternative zur dünnwandigen Stahlpanzerung. [11]

Um die gebirgsmitttragwirkende Eigenschaft weiter zu erhöhen, sowie Einsparungen hinsichtlich der Kosten für Auftraggeber und Auftragnehmer zu schaffen, wurde kurz nach der Festlegung für das neue Innenausbaukonzept, eine neue Linienführung gesucht und auch gefunden. Von dem bisherigen Schrägschacht wechselte man auf einen lotrechten Schacht in Kombination mit einem leicht schrägen Druckstollen. Durch den dadurch entstehenden längeren Triebwasserweg, kommt es zu einer Erhöhung des Druckstoßes, was bei den vielen konstruktiven Vorteilen, einen hydraulischen Nachteil ergibt. [11]

Das entgeltige Konzept der Linienführung (siehe Abb. 2.45) besteht nun aus einem 450 m tiefen Lotschacht, der im Raiseboring-Verfahren ausgebrochen wurde, und direkt in einen 8 % geneigten 1.370 m langen, in konventioneller Bauweise vorgetriebenen, Schrägstollen übergeht. Neben der 200 m langen Stahlpanzerung im krafthausnahem Bereich und der 600 m langen Strecke mit GFK als Dichtelement, welche einem maximalen Innendruck von 76 bar standhalten muss, wurden die restlichen 570 m des Druckstollens, sowie auch der Lotschacht vollständig mit Beton ausgekleidet. Um die Gebirgsmitttragung auf dem gesamten Triebwasserweg zu gewährleisten, war eine Vorphanninjektion unerlässlich. [11, 39]

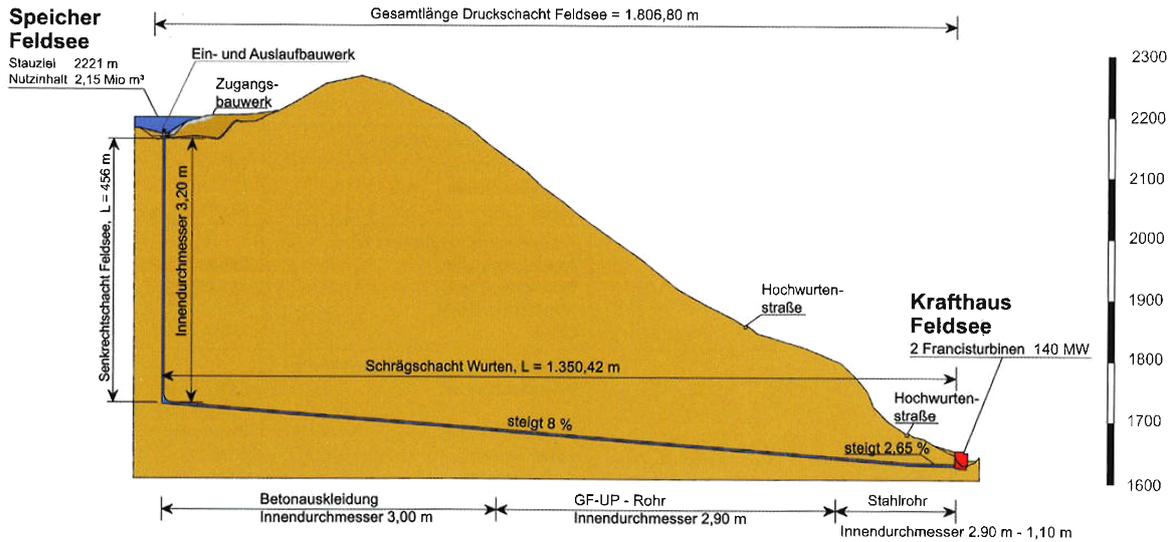


Abbildung 2.45: Längenschnitt - KW Feldsee [11]

Tabelle 2.11: Kennwerte - Druckstollen Feldsee KW Feldsee

Allgemein		Auskleidung	
Kraftwerk	Feldsee	Art	Vorgespannte Betonauskleidung mit GFK-Rohr
Stollen	Feldsee	Aufbau/ Stärke [cm]	12,5 Betoninnenschale mit GFK-Rohr
Inbetriebnahme	2011		Hinterbetonierung
Länge [m]	1.370	Injektion	
Neigung [%]	0,8	Hinterspritzung	ja
Ausbauleistung [kW]	70.000	Art d. Inj.	-
Bruttofallhöhe [m]	524	Hydraulische Verhältnisse	
Querschnitt		max. Innendruck [bar]	76
Form	Kreisförmig	Ausbauwassermenge [m³/s]	14,7
Fläche [m²]	5,52	Fließgeschwindigkeit [m/s]	5,44
Verortung		Geologie	
siehe Abb. 2.45		Gesteinsarten	Zentralgneis
		Überlagerung [m]	100-600

2.5 Panzerung aus Stahl

Eine konventionelle, dickwandige Panzerung, wie die Panzerung noch genannt wird, ist eine zugfeste Auskleidung (siehe Abb. 2.46). Sie wird bei einer hohen Beanspruchung durch Innendruck oder bei schlechtem Gebirge, ohne mittragende Wirkung, angewendet. Bei sehr hohen Innendrücker bieten passive Vorspannbauweisen eine gute Alternative. In Bereichen mit schlechten Gebirgseigenschaften und geringen Überlagerungen kann auch über eine aktive Vorspannung der Auskleidung diskutiert werden. Wird jedoch eine absolute Dichtheit gewünscht, ist immer eine Panzerung aus Stahl heranzuziehen. Diese ist auch bei möglichen Überbeanspruchungen absolut dicht. [24, 42, 45]

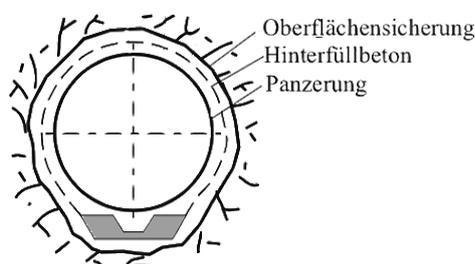


Abbildung 2.46: Vollpanzerung aus Stahl [14]

Panzerungen kommen hauptsächlich bei Druckschächten zum Einsatz. Kleine Felsüberdeckungen und hohe Drücke führen dazu, dass in diesem Fall der gesamte Innendruck von einer zugfesten Auskleidung aufzunehmen ist. Bei der Wahl der Linienführung ist man bestrebt, kleinen Überlagerungen und schlechtem Gebirge auszuweichen. So sind nur in wenigen Ausnahmefällen komplette Stahlpanzerungen im Druckstollenbau anzutreffen. Wird der Druckstollen sehr nahe an der Gebirgsoberfläche geführt, wird die Gebirgsmitragwirkung kontinuierlich herabgesetzt und eine Panzerung ist anzuordnen. Dies ist oft in Bereichen von Wasserschlössern, oberflächennahen Teilstrecken, an Stollenenden vor dem Übergang in Rohrleitungen und Unterquerungen von Tälern (Dükern) der Fall. [24, 42, 45]

Die Panzerung aus Stahl gilt als die aufwendigste Auskleidung. Wird sie verwendet, ist eine ausreichende Verankerung der Panzerung im Beton vorzusehen, damit ein Einbeulen durch den vom Bergwasser entstehenden Aussendruck, beim Entleeren der Stollen, auszuschließen ist. [14]

Ein gutes Beispiel für die Anwendung von Panzerungen bildet das KW Lünensee (1958) (vgl. 2.4.1.2.1), bei dem gleich zwei verschiedene Arten von Panzerstollen eingesetzt wurden. [24]

Zwischen dem Wasserschloss und der Sperrkammer Grüneck wurde ein 480 m langer Panzerstollen mit einem Durchmesser von 3,20 m eingebaut, dessen Sohlgefälle 9 % beträgt. Die Stahlauskleidung setzt sich aus 10 m langen, geschweißten Rohren, mit Wandstärken von 15 bis 19 mm zusammen (siehe Abb. 2.47 (a)). Vom Wasserschloss ausgehend, erfolgte der Einbau, in Fallrichtung. Der über die ganze Länge mit einer injizierten Vorauskleidung versehene Stollen, war von gebrächtigem Glimmerschiefer umgeben. [24]

Die zweite Panzerung wurde im Berginneren vollzogen und betrifft eine 230 m lange Teilstrecke des Stollens vom Lünensee Richtung Taldüker Salonien. Im Bereich von Gips und Anhydrit wurde der 4 % geneigte Stollen mit einer Spezialmaßnahme ausgekleidet. Die aus einer betonierten Sohle bestehende Vorauskleidung beinhaltet ein eingebautes Montagegleis, sowie einen 30 cm starken Stützring aus Betonformsteinen (siehe Abb. 2.47 (b)). Die Panzerrohre selbst haben einen Durchmesser von 3,05 m bei einer Wandstärke von 12 mm. [24]

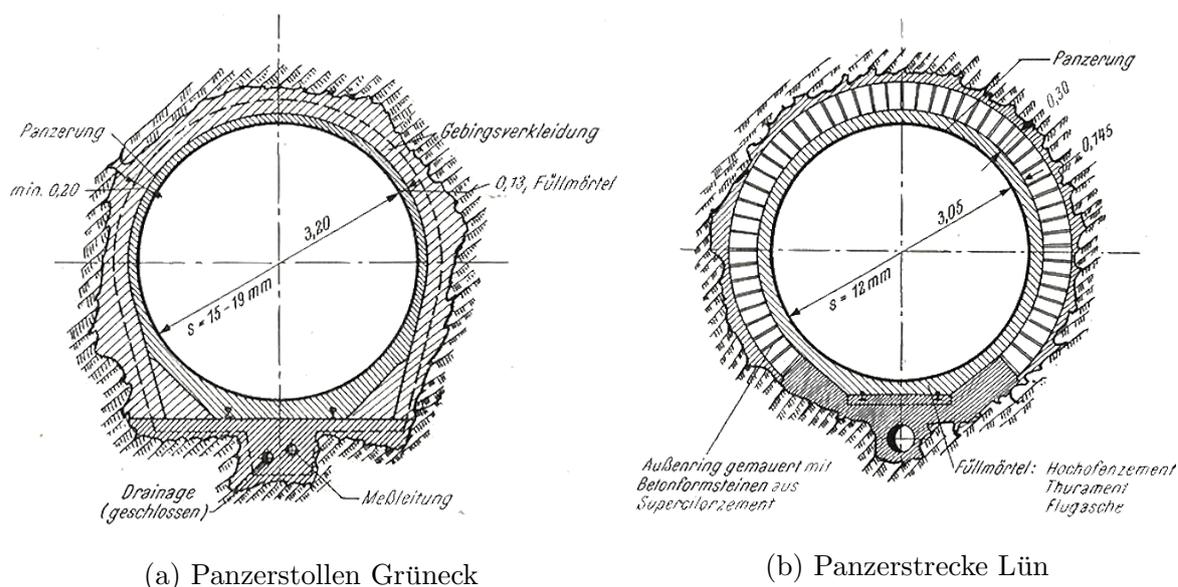


Abbildung 2.47: Beispiele Vollpanzerung - Querschnitte [24]

Tabelle 2.12: Kennwerte - Panzerstollen Grüneck KW Lünenersee

Allgemein		Auskleidung	
Kraftwerk	<i>Lünenersee</i>	Art	<i>Vollpanzerung</i>
Panzerstollen	<i>Grüneck</i>	Aufbau/ Stärke [cm]	<i>0,15-0,19 Stahl</i>
Inbetriebnahme	<i>1958</i>		<i>13 Füllmörtel</i>
Länge [m]	<i>480</i>	Injektion	
Neigung [%]	<i>9</i>	Hinterspritzung	<i>ja</i>
Ausbauleistung [kW]	<i>280.000</i>	Art d. Inj.	<i>injizierte Vorkauskleidung</i>
Bruttofallhöhe [m]	<i>974</i>	Hydraulische Verhältnisse	
Querschnitt		max. Innendruck [bar]	<i>~12</i>
Form	<i>Kreisförmig</i>	Ausbauwassermenge [m ³ /s]	<i>31,5</i>
Fläche [m ²]	<i>8,04</i>	Fließgeschwindigkeit [m/s]	<i>3,92</i>
Verortung		Geologie	
<i>siehe Abb. 2.25</i>		Gesteinsarten	<i>gebrüchiger Glimmerschiefer</i>
		Überlagerung [m]	<i>bis 100 m</i>

Tabelle 2.13: Kennwerte - Panzerstrecke Lün KW Lünenersee

Allgemein		Auskleidung	
Kraftwerk	<i>Lünenersee</i>	Art	<i>Vollpanzerung</i>
Panzerstrecke	<i>Lün</i>	Aufbau/ Stärke [cm]	<i>0,12 Stahl</i>
Inbetriebnahme	<i>1958</i>		<i>15 Füllmörtel</i>
Länge [m]	<i>230</i>		<i>30 Betonformsteine</i>
Neigung [%]	<i>4</i>	Injektion	
Ausbauleistung [kW]	<i>280.000</i>	Hinterspritzung	<i>ja</i>
Bruttofallhöhe [m]	<i>974</i>	Art d. Inj.	<i>Mörtelverpressung</i>
Querschnitt		Hydraulische Verhältnisse	
Form	<i>Kreisförmig</i>	max. Innendruck [bar]	<i>10</i>
Fläche [m ²]	<i>7,31</i>	Ausbauwassermenge [m ³ /s]	<i>31,5</i>
Verortung		Fließgeschwindigkeit [m/s]	<i>4,31</i>
<i>siehe Abb. 2.25</i>		Geologie	
		Gesteinsarten	<i>Gips Anhydrit</i>
		Überlagerung [m]	<i>bis 100 m</i>

2.6 Sohlübbinge

Spätestens mit Beginn des maschinellen Vortriebes in Österreich im Jahre 1967 (vgl. Kapitel 3.10) und der sich bis dahin ebenfalls durchgesetzten vorgespannten Auskleidung wurde weitestgehend ein kreisförmiger Querschnitt verlangt. Davor wurden beim konventionellen Vortrieb auch Hufeisenprofile ausgebrochen, die durch ihre horizontale Sohle wesentliche Vorteile bei der Herstellung hatten und mit dem darauffolgenden Einbau einer Auskleidung wieder eine Kreisform erhielten. Um zusätzliche Drainagen und eine durch den vorkommenden Fahrbetrieb entstehende Auflockerung des Gesteins im Bereich der Sohle zu vermeiden, kam es immer mehr zur Anordnung von vorgefertigten Sohlübbingen (siehe Abb. 2.48) wie es beim Walgaustollen des Walgauwerkes (siehe Kapitel 2.6.1) der Fall ist. Zusätzlich dient der Sohlübbing häufig als Gleisfahrbahn für den Nachläufer einer TBM. [15, 42, 43]

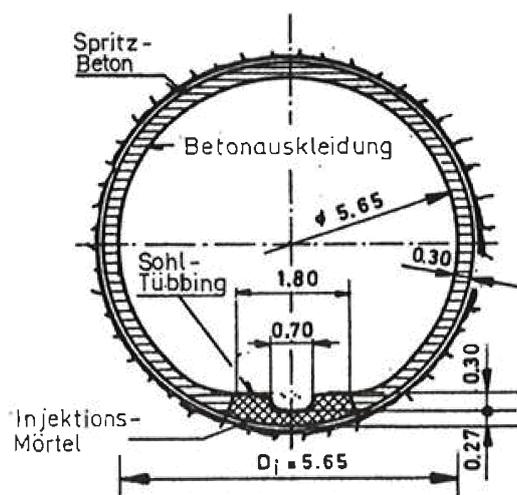


Abbildung 2.48: Betonauskleidung mit Sohlübbing - Walgaustollen [43]

Bei der Anwendung von Sohlübbingen ist aufgrund der vorkommenden Längsfugen keine Lastaufteilung zwischen Auskleidung und Gebirge möglich. Wird eine Ortbetonauskleidung an den Sohlstein angeschlossen erfordert der Arbeitsvorgang höchste Sorgfalt. In die Fugen eintretender Spritzbeton und zusätzlich anfallender Schmutz sowie Wasser sind sorgfältig zu entfernen bzw. abzuschlauchen. Ein dichter Anschluss ist bei entsprechender Ausführung, im Gegenteil zur Bildung einer Zugfestigkeit der Fuge, auf jeden Fall möglich. Um Schwindrisse zu vermeiden sind Anschlussbewehrungen im

Bereich der Arbeitsfugen einzulegen, welche eine Rissbildung durch den vorhandenen Innendruck jedoch nicht unterdrücken können. [42, 43]

2.6.1 Walgauwerk(1984)

Für das Walgauwerk der VIW wird das vorhandene Unterwasser bei Rodund der Werksgruppe Obere Ill - Lünensee genutzt und über eine Fallhöhe von 150 m bis zum Krafthaus Beschling geführt. Dabei werden die Rest-Ill und die Meng zusätzlich über eine Beileitung in den für eine Ausbauwassermenge von $68 \text{ m}^3/\text{s}$ konzipierten Druckstollen eingeleitet. Das Herzstück der Anlage bildet der 21 km lange Walgaustollen der mit zwei Tunnelbohrmaschinen mechanisch ausgebrochen wurde. Um die Reibungsverluste gering zu halten wurde ein großer Rohdurchmesser von 6,25 m gewählt. Am Anfang führt der Druckstollen durch das Kristallin der Silvrettadecke und gelangt über das Mesozoikum der nördlichen Kalkalpen schlussendlich in den Flysch. Von Dolomit bis hin zu veränderlich-festen Mergel sowie harten Sandgesteinen und Kalk war auf der Druckstollenstrecke alles anzutreffen. Hinsichtlich der Linienführung wurde der Stollen tief ins Berginnere gelegt, damit der Bergwasserdruck den Innendruck des Stollens weit überragt. Zusätzlich hat man versucht ungünstige Gebirgszonen auf kurzem Weg zu durchqueren. Auskleidungstechnisch wurde in nachbrechenden und druckhaften Gebirge nach der Aufbringung einer Spritzbetonsicherung je nach Erfordernis eine Betonauskleidung ausgeführt. Rein wirtschaftlich hätte ein Verzicht der Betonauskleidung nur bei glatter Stollenlaibung einen Sinn ergeben, da ohne Auskleidung zu hohe Reibungsverluste eingetreten wären. Teilweise war es möglich den Druckstollen in standfestem Gebirge unverkleidet auszubilden. In Kombination mit dem Fräsvortrieb hat es sich angeboten über die gesamte Länge des Stollens einen Sohltübbing mit leistungsfähigem Wassergraben auszuführen. [20]

Durch eine gute geologische Vorarbeit war es möglich den Stollen in 21 Monaten mittels zwei Robbins-Vollschnittmaschinen aufzufahren. Zu dem Erfolg beigesteuert hat mit Sicherheit die zeittechnisch günstige Verwendung von Sohltübbingungen sofort hinter der Ortsbrust. Die eingebauten Fertigteile wurden direkt mit Injektionsmörtel injiziert, um Unterläufigkeiten zu vermeiden. Der im Tübbing eingebaute Wassergraben, diente als Drainage und leitete eintretendes Bergwasser ideal ab. [20, 43]

Tabelle 2.14: Kennwerte - Walgaustollen Walgauwerk

Allgemein		Auskleidung	
Kraftwerk	<i>Walgauwerk</i>	Profil I	
Stollen	<i>Walgaustollen</i>	Art	<i>Unausgekleidet</i>
Inbetriebnahme	<i>1984</i>	Aufbau/ Stärke [m]	<i>Spritzbeton bei Bedarf</i>
Länge [m]	<i>21.000</i>		<i>Sohltübbing</i>
Neigung [%]	<i>0,63-0,87</i>	Profil II	
Ausbauleistung [kW]	<i>86.000</i>	Art	<i>Betonauskleidung</i>
Bruttofallhöhe [m]	<i>~150</i>	Aufbau/ Stärke [m]	<i>20-30 Beton</i>
Querschnitt			<i>Sohltübbing</i>
Form	<i>Kreisförmig</i>	Injektion	
Fläche [m ²]	<i>21,0-30,68</i>	Hinterspritzung	<i>ja</i>
Geologie		Art d. Inj.	<i>Injektionsmörtel beim Sohltübbing</i>
Gesteinsarten	<i>Dolomit, Mergel, Kalk, Sandstein</i>	Hydraulische Verhältnisse	
Überlagerung [m]	<i>bis 1.300</i>	max. Innendruck [bar]	-
Verortung		Ausbauwassermenge [m ³ /s]	<i>68</i>
<i>siehe Abb. 2.49</i>		Fließgeschwindigkeit [m/s]	<i>2,22-3,24</i>

Darstellung 2,5-fach überhöht

Walgaustollen - Regelprofile

Profil II
mit Betonauskleidung

Profil I
standfest
mit fallweiser Sicherung

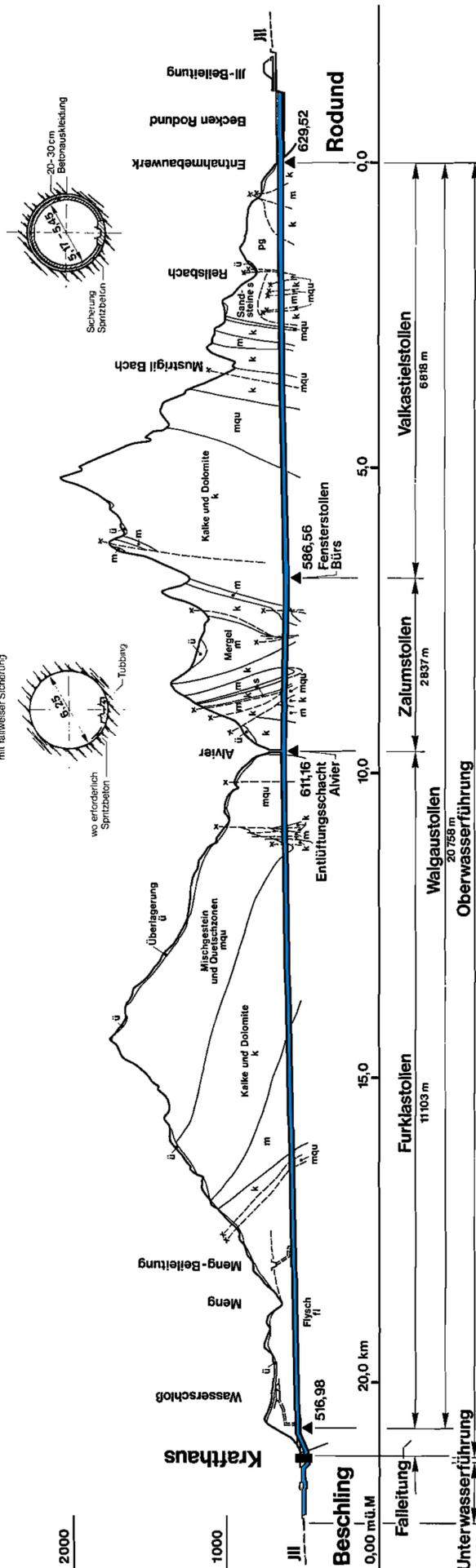


Abbildung 2.49: Längenschnitt + Profile - Walgaustollen [42]

3 Meilensteine im Druckstollenbau

3.1 Cement-Gun (1910)

Das aus zwei Kammern aufgebaute System leitet trockenen Gips über eine Schlauchleitung, mittels Druckluft, weiter bis zu einer Düse, wo nötiges Wasser über eine zusätzliche Leitung hinzugefügt wird. Dieses, als **Zweikammersystem** bezeichnete, Prinzip wird bis heute verwendet. Der damalige Präsident der Vereinigten Staaten, Theodore Roosevelt und guter Freund vom Erfinder Carl Ethan Akeley, erkannte einen möglichen Nutzen der Gipspritze im Baugewerbe, was diese zu einer Weiterentwicklung des bisherigen Gerätes bewegte. Schlussendlich wurde das neue Gerät im Dezember 1910, bei einer Cement Show im Madison Square Garden von New York, der Öffentlichkeit als „Cement Gun“ (siehe Abb. 3.1) vorgestellt. [50]

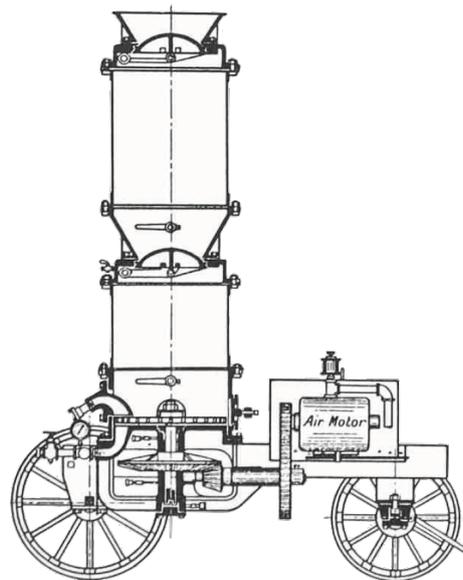


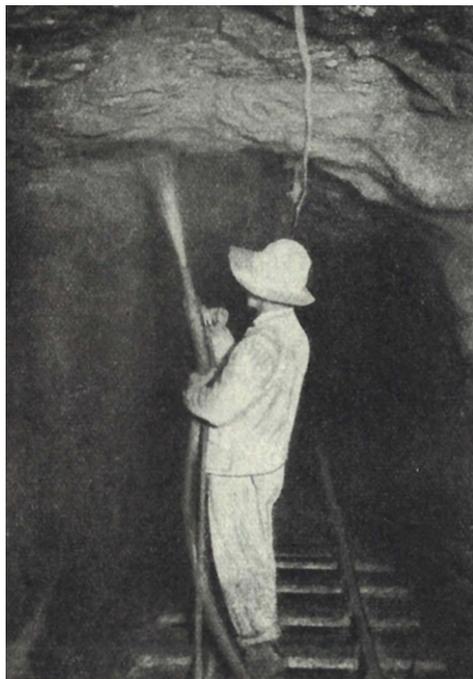
Abbildung 3.1: Schnitt der ersten Cement Gun (1910) [50]

Um die Jahrhundertwende bis 1920, wurden in Deutschland sowie in den USA weitere Maschinen von unterschiedlichen Unternehmen bzw. Ingenieuren entwickelt, wovon sich über kurz oder lang gesehen keine gegen das bewährte Zweikammersystem der Cement Gun durchsetzen konnte. In weiterer Folge entstanden vielversprechende Erneuerungen im Bauwesen, von denen keiner geahnt hätte. [50]

Durch die Cement Gun war es möglich ein Gemisch im Verhältnis 1:4 aus Zement und trockenem Sand, sogenannten Spritzmörtel, bei einem Größtkorn von 10 mm, zu verarbeiten. Die Begrenzung der Korngröße und die Anforderung von sehr trockenen Zuschlagstoffen, um ein mögliches Verstopfen zu vermeiden, bilden erhebliche Nachteile. Der Spritzmörtel ist jedoch dichter und fester als mit Hand aufgetragene Putze und hat eine bessere Haftung auf den Auftragsflächen. Nach dem Erhärten einer 1,5 cm starken aufgetragenen Mörtelschicht, ist es möglich weitere Schichten aufzuspritzen und so beliebige Gesamtstärken aufzubauen. S. W. Taylor kaufte die Rechte der Cement Gun und gab dem **Spritzmörtel mit „Gunitite“** einen neuen markenrechtlich geschützten Namen, wodurch die Begriffe Gunit, Gunitmaschine, gunitieren und Gunitieur (Düsenführer) entstanden. Vorerst kam der Gunitite hauptsächlich in Amerika zum Einsatz. Aufgrund der billigen Stahlpreise und des beim Spritzen auftauchenden Staubes, konnte sich dieser vorerst aber nicht durchsetzen. Beim Druckstollen des Kraftwerk Amsteg 1921 in der Schweiz wurden Maschinen der Cement Company und der Torkret-Gesellschaft mbH getestet. Durchsetzen konnte sich in der Schweiz schlussendlich die Cement Gun (später als Gunitkanone bezeichnet und lizenziert) mit dem Produkt Gunitite, weil der deutsche Begriff Torkret in der Schweiz nie richtig eingebürgert wurde. [27, 50]

3.2 Das Torkretverfahren (1921)

Bereits 1908 hatte der deutsche Ingenieur Carl Weber mit Akeley, dem Vater der Cement Gun, zutun gehabt. Webers damaliges Unternehmen, die New Yorker Torcrete Shipbuilding Corp., befasste sich hauptsächlich mit dem Bau von Betonschiffen. Weber erwarb mehrere Patente für Spritzgeräte zum Verputzen von Wänden bzw. zum Bau von Betonwänden, dazu ein weiteres Patent für ein Zweikammer-Gerät, welches der Cement-Gun sehr ähnelte und in weiterer Folge den Namen „Tector-Maschine“ (lat. „tectorium“ = Mörtelschicht, Schutzdecke) erhielt. Einziger Unterschied ist eine andere Einführung des Spritzgutes in die Förderleitung. Da sich das neue Gerät (siehe Abb. 3.2 (b)) in Amerika nicht durchsetzen konnte, führte dies nach Zusammenschließung mehrerer Unternehmen 1921 zur Gründung einer neuen Firma in Deutschland, der „Torkret-Gesellschaft mbH“ („Tor“ von lat. „tector“ = Verputzer von Wänden und „cret“ von lat. „concretum“ = Mörtel bzw. Beton). [50]



(a) Torkretarbeiten im Stollen



(b) Torkretapparat

Abbildung 3.2: Torkretverfahren [53]

Nach einiger Zeit setzte sich die Bezeichnung **Torkret für Spritzmörtel** in Deutschland durch und führte ähnlich wie bei Guniten zu weiteren Begriffen wie torkretieren, Torkretierung und Torkreteur. Um der Cement Gun Company nicht in die Quere zu kommen, kam es zu einer Vereinbarung. Diese beschränkte den Bereich von Torkret auf Deutschland, Mittel- und Osteuropa sowie Japan. England und die übrigen außereuropäischen Länder gehörten in den Bereich der Cement Gun Company. In Deutschland erstmals verwendet wurde der Torkret-Spritzmörtel 1921 für die Auskleidung des in Bayern gelegenen 1,2 km langen Kesselbergstollens des Walchenseekraftwerkes. [50]

Die Torkretierung des Felses galt als einfachste Auskleidungsmethode eines Druckstollens und wurde in Österreich ebenfalls Anfang der 20er Jahre bei den Druckstollen Partenstein (1924) und Strubklamm (1925) verwendet. Durch die Verwendung des maschinellen Spritzverfahrens war es nun möglich höhere Festigkeiten (auch Zugfestigkeiten) im Vergleich zum händischen Verfahren zu erzielen. Bei Untersuchungen von Torkret auf seine Wasserundurchlässigkeit, hat sich gezeigt, dass Torkretproben von 0,5-2,0 cm Stärke bei einem Wasserdruck von 35 atm (entspricht 35,5 bar) komplett dicht geblieben sind. Gleiche mit Hand aufgetragene Putzproben waren hingegen wasserdurchlässig. Beim **Torkretverfahren** werden die Bestandteile, Sand, Kies und Zement ohne Wasserzusatz bis ans Ende der Schlauchleitung befördert, wo schlussendlich eine Wassereinspritzung an der Düse erfolgt. Hier wird die Zugabe der Wassermenge von einem Düsenführer, dem Torkreteur, geregelt (siehe Abb.3.2 (a)). Spricht man von einem speckigen Torkret, kann man von einer einwandfreien Herstellung ausgehen. Dabei sind die richtige Wasserzugabe und die Entfernung zur zu bespritzenden Fläche entscheidend. Die Erfahrung und Geschicklichkeit des Düsenführers sind daher von größter Bedeutung. Bei matten Torkret, wurde zu wenig Wasser beigemischt, was sich in geringer Festigkeit widerspiegelt. Je nach Maschinentyp sind 60-220 m²/8 Std, bei einer Putzstärke von 2 cm, möglich. Neben dem Typ, ist die erzielbare Leistung, auch von der Lage der zu bearbeitenden Flächen abhängig. [53]

3.3 Walch'sche Grenze (1926)

Der Bergwasserspiegel ist seit jeher ein wichtiges Mittel, um Wasserverluste zu vermeiden. Er kann zwar nicht künstlich geschaffen werden, durch richtige Anordnung der Stollenlage kann aber sehr wohl ein Nutzen daraus gezogen werden. Der Stollen sollte so tief gelegt werden, dass er komplett vom Gebirgswasser umgeben ist, wie es bei der Herstellung der Wasserversorgung in New York bereits Ende des 19. Jahrhunderts geschah. *O. Walch* gilt als einer der Pioniere im Druckstollenbau, der in der **Durchführung von Großversuchen**, die einzige Dimensionierungsgrundlage sieht. So sprach dieser in seinem Buch *Auskleidung von Druckstollen (1926)*, als einer der Ersten von der Wichtigkeit des Bergwasserspiegels im Hinblick auf die Sicherheit und Auskleidung von Druckstollen, wie folgt: [42, 53]

Liegt ein Stollen nunmehr in einem Gebirge, das wasserhaltend ist und das unter einem gewissen Druck steht, so wird aus dem Stollen kein Wasser zum Abfluß in das Gebirge kommen, selbst wenn die Auskleidung wasser-durchlässig wäre, solange der Wasserdruck im Gebirge größer ist als der Wasserdruck im Inneren des Stollens. [53]

*Aus diesem Grunde wird der Ort im Längenschnitt eines Druckstollens, wo sich Innen- und Aussenwasserdruck gerade die Waage halten, auch die **Walch'sche Grenze** genannt. [42]*

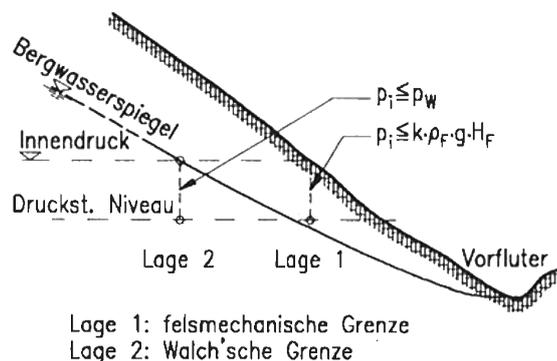


Abbildung 3.3: Lage des Druckstollens bei Grenzbedingungen: 1. Primärspannung > Innendruck, 2. Walch'sche Grenze: Innendruck < Bergwasserdruck [45]

Bei der genauen Bestimmung der Lage des Druckstollens ist neben Höhe des Bergwasserspiegels, welche höher als der Innendruck sein sollte, ebenfalls auf eine ausreichende Gebirgsüberdeckung Rücksicht zu nehmen (siehe Abb. 3.3). Befindet sich der Druckstollen innerhalb der **Walch'schen Grenze** $p_w \geq p_i$, kann auch bei einer größeren Stollenlänge, kostengünstig gebaut werden. Dies ist durch Verzicht der Dichtigkeit der Auskleidung bzw. durch Ausführung eines komplett unverkleideten Druckstollens möglich. [45]

3.4 Kraftwerk Achensee (1927)

Der Achensee ist nordwestlich von Jenbach gelegen und befindet sich 400 m über dem Inntal. Durch seine landschaftliche Schönheit bildet er ein besonderes Ausflugsziel für Touristen. Angesichts seiner Größe, mit einer Oberfläche von 6,8 km² und Tiefe von 133 m ist er in energiewirtschaftlicher Hinsicht als Speicher interessant. Der ursprünglich nach Norden zur Isar abfließende See wird durch die Wasserkraftnutzung südlich, auf einer verhältnismäßig kurzen Strecke, über einen offenen Unterwasserkanal Richtung Inn umgeleitet. Über einen Triebwasserweg bestehend aus einem 4,6 km langen Druckstollen und einem 0,5 km langen Druckschacht wird das Betriebswasser über eine Rohfallhöhe von rund 400 m zu dem bei Jenbach befindlichen Krafthaus geführt (siehe Abb. 3.4). [12]

Nachdem Zerfall der österreichisch-ungarischen Monarchie und den damit in Verbindung stehenden Verlust an kohleproduzierenden Standorten mussten neue Methoden für die Energiegewinnung gesucht werden, die in der Entwicklung der Wasserkräfte gefunden wurde. So bot sich der Ausbau des Achensees, für die sich die 1924 neu gegründete Tiroler Wasserkraftwerke A. G. (TIWAG) als Träger herauskristallisierte, sehr gut an. Die erste Baustufe, bei der die Anzapfung des Speichersees sowie der der Triebwasserweg im Fokus standen, wurde von 1924 - 1927 durchgeführt. [5, 12]

Die geologischen Verhältnisse der Umgebung rund um den Achensee hängen sehr mit der vorhandenen Topographie zusammen und gehen einher mit der Entstehungsgeschichte des Sees. Während dem Ausklingen der letzten Eiszeit und dem gleichzeitigen verschwinden ihrer Gletscher, wurde eine ausgeschürfte Wanne mit Wasser von umgebenen Bergen gefüllt und bildete so den Speichersee. Um eine ideale Linie für den Stollen zu finden, wurden vor Baubeginn an der Entnahmestelle einige Versuchsbohrungen und -schürfungen durchgeführt. Unter einer ersten Seeschlammschicht befand sich lehmige Grundmoräne die direkt an wasserdurchlässigen Innschotter angrenzte. Das vom Druckstollen durchbohrte Gebirge (Bärenkopf, Schwarzegg, Weihnachtsegg) liegt im Inneren der Stanserjochgruppe und setzt sich aus diversen Kalk- und Dolomitgesteinen zusammen. Den Hauptteil, neben Rauhacke und Muschelkalk, bildet eindeutig der Wettersteinkalk. [5, 12]

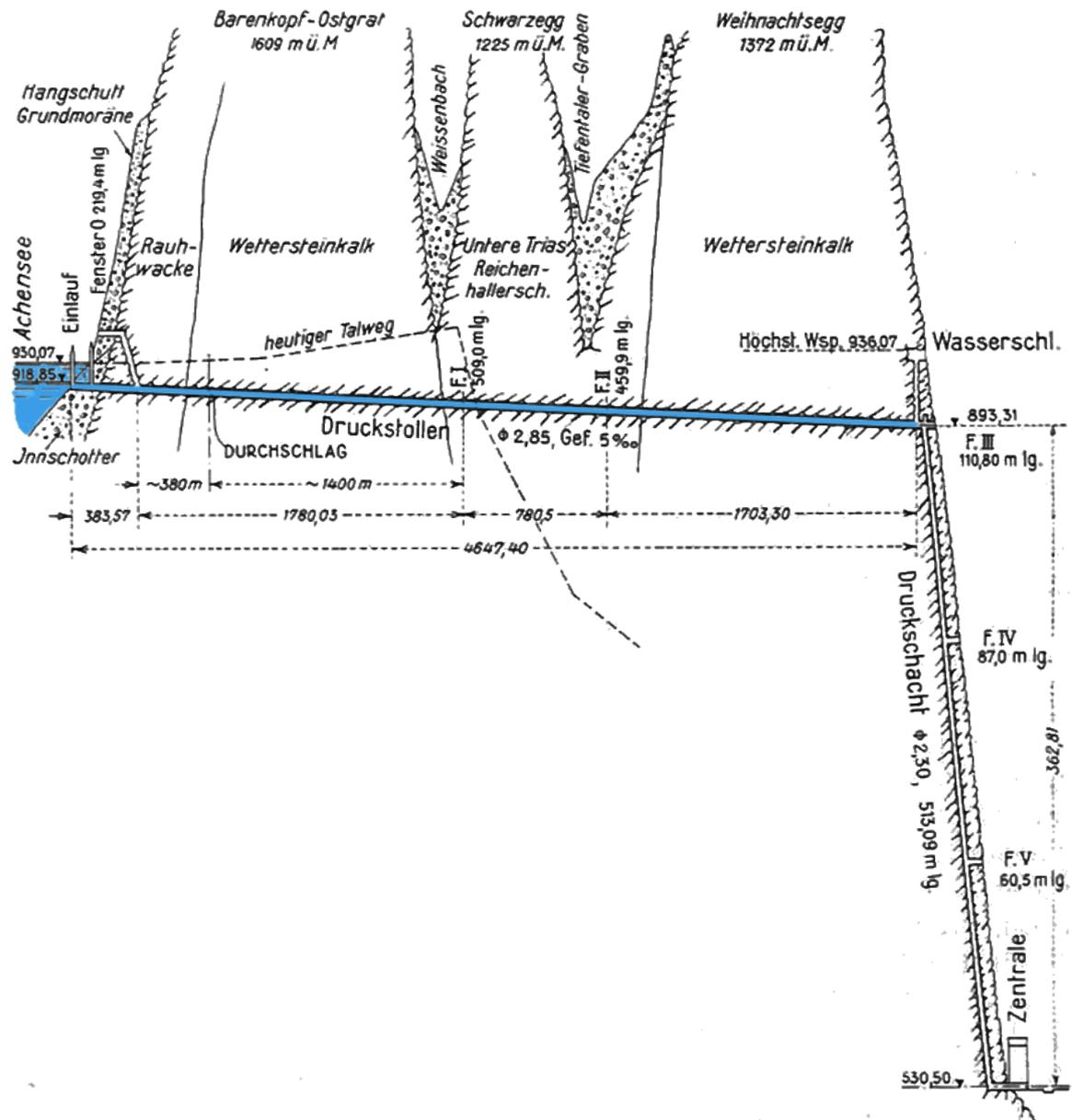


Abbildung 3.4: Längenschnitt - KW Achensee [25]

Die **Fassung eines natürlichen Sees** macht das Achenseekraftwerk zu einem der bedeutendsten Ingenieurbaue Österreichs, dementsprechend viele Fragen waren zu Beginn offen. Insgesamt wurden fünf Fensterstollen für den endgültigen Druckstollenbau gebraucht. Mit einer mittleren Breite von 2,0 m und einer lichten Höhe von 2,20 m hatten alle Fenster, bis auf die Fester III und IV, die gleichen Abmessungen. Diese mussten, um zur Apparatkammer zu gelangen und um den Transportweg für Blechröhre der Druckschachtauskleidung zu vereinfachen, etwas größer ausgebrochen werden. Für die Entnahme hat man sich für einen Anstich ohne vorherige Absenkung des Sees entschieden. Die Verbindung des Einlaufbauwerkes mit dem Druckstollen erfolgte im Schildverfahren (siehe Abb. 3.5). Ausgeführt wurde eine 127,30 m lange Caissonstrecke (Senkkästenverfahren), bei dem die einzelnen Pressluftkästen mittels Hilfsbrücke (siehe Abb. 3.6) nach unten abgesenkt wurden. Darauf folgen ein Schildvortrieb mit 38,15 m und ein 13,37 m langer Druckluftstollen, der mittels druckluftsicherer Tür abgeschlossen wurde. Der von der bergseite vorgetriebene Stollen konnte aufgrund der geringen Wasserführung, deutlich kleiner und ohne Druckluftbetrieb gestaltet werden, als zuvor angenommen. Um einen gepanzerten Übergang zwischen den Senkkästen und dem Fels zu schaffen, wurde danach ein Schild von der Seeseite aus mittels Druckluft, soweit wie möglich, in den vorhandenen Fels getrieben. [5, 12, 31]

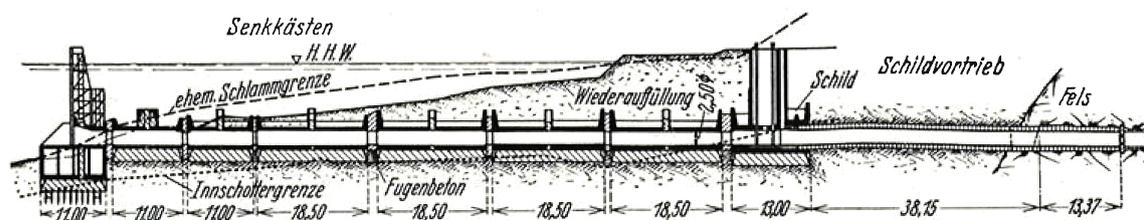


Abbildung 3.5: Längenschnitt Schildvortrieb - KW Achensee [31]

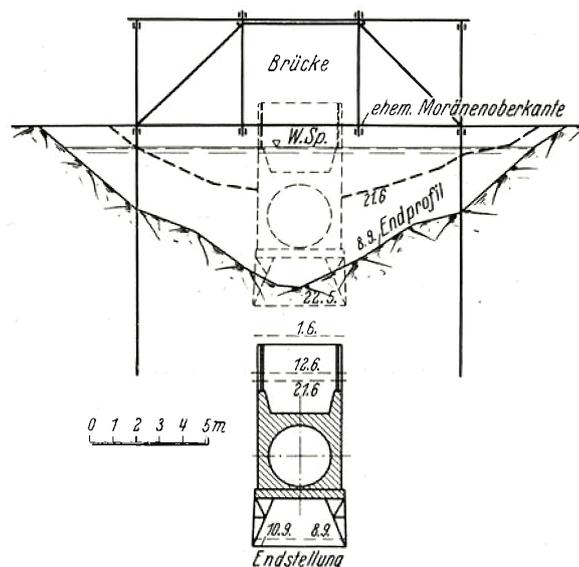


Abbildung 3.6: Absenken eines Pressluftkastens - KW Achensee [31]

Über die gesamte Druckstollenstrecke wurden mehrere Auskleidungsarten (siehe Abb. 3.7) verwendet. Eine einfache Stampfbetonauskleidung wurde für standfeste Strecken, eine kombinierte Auskleidung, bestehend aus Betonformsteinen und einem Innenring, bei druckhaften Abschnitten angeordnet. Zum Teil wurden noch, durch das Torkretverfahren hergestellte, armierte Betonmanschetten verwendet. Für die Herstellung der 20-30 cm starken Betonauskleidung konnte das ausgezeichnete Stollenausbruchsmaterial herangezogen werden. Je nach Wasservorkommen, wurden 1-2 Drainageleitungen in der Stollensohle angeordnet. Nach Ausführung der Widerlager und dem Gewölbe wurde am Schluss die Sohle in einem Zug konstruiert. Eine anschließende Hinterpressung erfolgte in der Firste mittels Zementmörtel. [12]

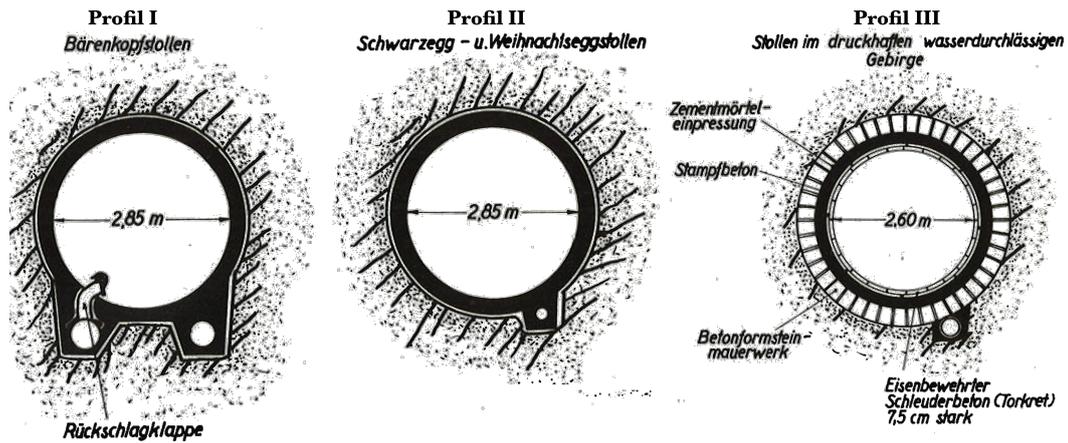


Abbildung 3.7: Profile - Druckstollen Achensee [12]

Tabelle 3.1: Kennwerte - Druckstollen Achenseekraftwerk

Allgemein		Auskleidung	
Kraftwerk	<i>Achensee</i>	Profil I/II	
Stollen	<i>Achensee</i>	Art	<i>Beton</i>
Inbetriebnahme	<i>1927</i>	Aufbau/ Stärke [cm]	<i>20-30 Beton</i>
Länge [m]	<i>4.647</i>	Profil III	
Neigung [%]	<i>0,5</i>	Art	<i>Kombinierte</i>
Ausbauleistung [kW]	<i>78.800</i>	Aufbau/ Stärke [cm]	<i>20-30 Beton</i>
Bruttofallhöhe [m]	<i>400</i>		<i>7,5 armierte Torkretmanschett</i>
Querschnitt		Injektion	
Form	<i>Kreisförmig</i>	Hinterspritzung	<i>ja</i>
Fläche [m ²]	<i>5,31-6,34</i>	Art d. Inj.	<i>in der Firste Zementmörtel</i>
Geologie		Hydraulische Verhältnisse	
Gesteinsart	<i>Kalk, Dolomit</i>	max. Innendruck [bar]	<i>-</i>
Überlagerung [m]	<i>bis 700</i>	Ausbauwassermenge [m ³ /s]	<i>28</i>
Verortung		Fließgeschwindigkeit [m/s]	<i>4,42-5,27</i>
<i>siehe Abb. 3.4</i>			

3.5 Schneckenmaschine (1946)

Spricht man von den Gemischen Gunit und Torkret, geht es in ersten Linie um Spritzmörtel mit Korngrößen bis zu 10 mm. Auch, wenn der Begriff Spritzbeton bereits 1920 in deutscher Literatur auftauchte, gibt es **Spritzbeton** in der Form, wie man ihn heute kennt, erst seit dem Jahre 1946. Hier setzte sich die vom gelernten Schweizer Mechaniker Georg Senn erbaute Schneckenmaschine (siehe Abb. 3.8) in der Maschinenteknik durch. [18, 27, 50]

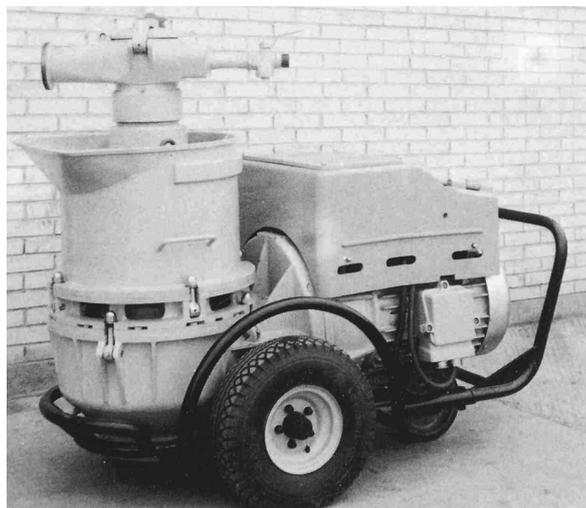


Abbildung 3.8: Schneckenmaschine BS-12 [50]

Mit ihr war es im Vergleich zum Zweikammersystem der Cement Gun erstmals möglich naturfeuchte Zuschlagstoffe von 15 bis 25 mm Korngröße zu verarbeiten und dabei eine Stundenleistung von 3 m³ zu erzielen. Durch eine, sich im senkrechten Rohr drehende, Schnecke, die trockenes Spritzgut vom Einfüllbehälter zur oben angeführten Ausblas-kammer befördert und dort mittels Druckluft zur Düse gebracht wird, wo ebenfalls Wasser beigefügt wird, unterscheidet sich das System der neuen Maschine weitestgehend vom bekannten Zweikammersystem. Aufgrund zeitgleicher Fortschritte in der Bauchemie bezüglich Schnellbindern, war es nun möglich, in einem Arbeitsgang dickere Spritzbetonschalen im Vergleich zu den dünnen bis 1,5 cm starken Mörtelschichten beim Gunitieren bzw. Torkretieren herzustellen, was einen großen Technologiesprung bedeutete. **Erster Einsatz der Schneckenmaschine in Österreich war beim Bau des Möllüberleitungsstollens (1955)** für die Herstellung einer endgültigen

Druckstollenauskleidung aus Spritzbeton (siehe Kapitel 2.3.5.1). [18, 27, 50]

3.6 Erste offizielle Verwendung der NÖT (1953)

Bereits 1948 hatte Rabcewicz ein Verfahren patentiert, bei dem ein schwaches Hilfs-gewölbe aus Beton laufend mit dem Ausbruch eingezogen werden sollte. Zum damaligen Stand der Technik, wäre bei nicht standfestem Gebirge aber weiterhin eine Stützung durch eine Holzpöhlung bzw. durch einen Stahleinbau notwendig gewesen. Die Weiterentwicklung von Spritzmaschinen hinsichtlich ihrer Leistung und Tunneltauglichkeit, nach dem zweiten Weltkrieg, sowie die Idee von Prof. Rabcewicz waren essenziell für die NÖT. Auf den Vorschlag von Prof. Rabcewicz hin, wurde die NÖT **erstmal systematisch beim Vortrieb des Druckstollens Prutz-Imst (siehe Kapitel 3.6.1), zwischen 1953 und 1956, eingesetzt**. Durch die systematische Anwendung der Felsanker (siehe Abb. 3.9) wurde durch Rabcewicz der geankerte Gebirgstragring entwickelt, welcher dem Gebirge, im Vergleich zum reinen Spritzbeton, eine größere Entspannungsdeformation erlaubt. [28, 45]

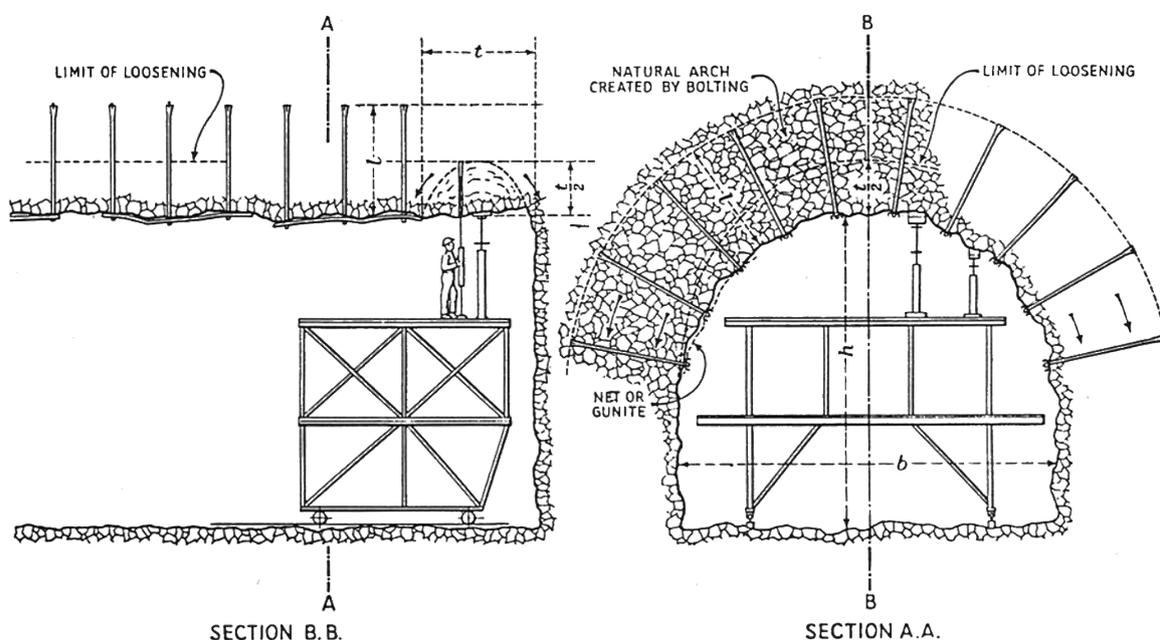


Abbildung 3.9: Schema der Felsnagelung nach Rabcewicz [45]

Anstelle vom ursprünglich geplanten traditionellen, zeitaufwendigen und gefährlichen Stahleinbau, welcher in Imst nur bei extrem schwierigen Gebirgsverhältnissen angewendet wurde, hat man sich auf die Sicherung der Ausbruchsröhre durch Spritzbeton und Felsanker (siehe Abb. 3.10) bzw. auf eine Kombination beider Verfahren konzentriert. Dies war nur durch eine vorbildliche Zusammenarbeit zwischen Bauherrn und der ausführenden Arbeitsgemeinschaft möglich. Durch die neue Baumethode wurde ein gewaltiger Fortschritt hinsichtlich der Vortriebsleistung und Sicherheit gemacht. Das gefährliche Auswechseln der Pölzungen fällt weg und bietet gleichzeitig Platz für den Einsatz von leistungsfähigen Maschinen. Aufgrund der guten Erfahrungen mit der NÖT wurde die neue Bauweise gleich bei weiteren Druckstollen angewendet. Beispiele dafür bilden die Kraftwerke Lünensee (1958) (siehe Kapitel 2.4.1.2.1) und Schwarzach (1959). Nachdem bei den kleineren Querschnitten der Druckstollen gute Erfolge erzielt wurden, hat man sich an Verkehrstunnel mit größeren Durchmessern, wie den Autobahntunnel Massenbergl (1964-1965) bei Leoben, gewagt. Einen Höhepunkt der NÖT, stellt der von 1970 bis 1975 gebaute Tauerntunnel, dar. [28, 45]



Abbildung 3.10: Spritzbetonsicherung des Druckstollen Prutz-Imst Baulos Runserau

[35]

Bei einem Vortrag des XIII. Geomechanik Kolloquium in Salzburg (1962) durch Prof. Rabcewicz wurde der Begriff „**Neue Österreichische Tunnelbauweise**“ erstmals offiziell verwendet und führt seitdem zu einer Trennung von der Alten Österreichischen Tunnelbauweise. [28, 45]

Bei der alten Bauweise wurde der ganze Tunnelquerschnitt von kleinen zuerst vorge-triebenen First- und Sohlestollen ausgebrochen (siehe Abb. 3.11). Bis schlussendlich die Ausmauerung des tragenden Gewölbes erfolgte, wurde der Querschnitt mittels umfangreichen Stützgerüsten aus Holz gesichert. Erster Schritt der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise ist der Ausbruch der obersten Tunnelwölbung, der sogenannten Kallotte, die anschließend sofort mit Stahlbögen, Felsankern und Spritzbeton gesichert wird. Unter diesem Schutz erfolgt der Ausbruch der Strosse bis hin zur Sohle (siehe Abb. 3.12). Obwohl der provisorische Verbau durch Abstützungen wegfällt, bleibt die Gesteinsfestigkeit großteils erhalten. [30]

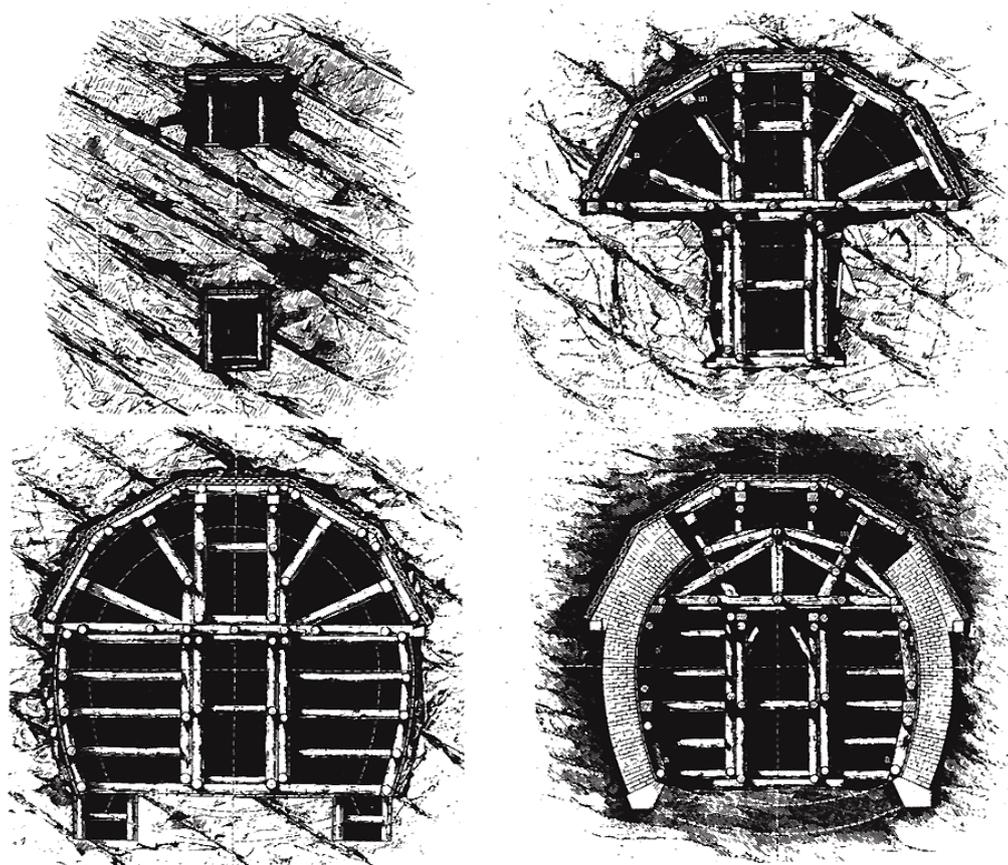


Abbildung 3.11: Alte Österreichische Tunnelbauweise - Vortrieb [30]

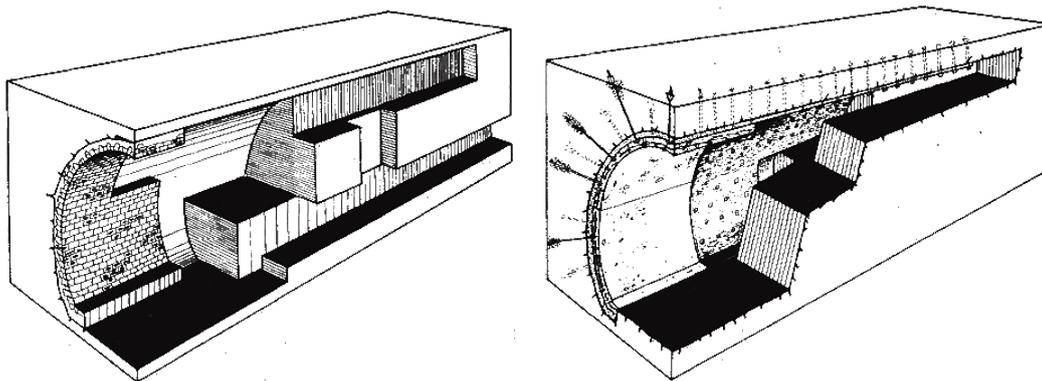


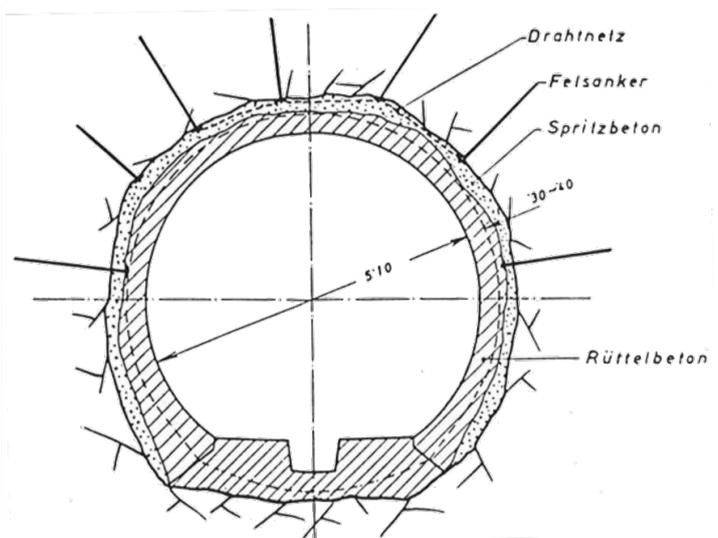
Abbildung 3.12: Vergleich der Alten Österreichischen Bauweise mit der NÖT [30]

3.6.1 KW Prutz-Imst (1956)

Das Kraftwerk Imst bildete einst die wichtigste Stütze der Tiroler Elektrizitätsversorgung und hielt die Strompreise im Vergleich zum restlichen Land relativ niedrig. Durch die Ausnutzung des natürlichen Gefälles des Inn und den Bau eines 12,3 km langen Druckstollens, mit Durchmessern von 5,1 bis 5,3 m, war es möglich eine, für Laufkraftwerke, hohe Fallhöhe von 144,9 m zu erzielen, womit Spitzenleistungen bis zu 89 MW möglich waren. Der Vortrieb des Druckstollens erfolgte aufgrund von Terminzwängen in zwei Teilquerschnitten. Zuerst wurde ein Sohlstollen vorgetrieben, auf den eine Aufweitung des Querschnittes erfolgte (siehe Abb. 3.13 (a)). Abb. 3.13 (b) zeigt den kombinierten Ausbau (bewehrter Spritzbeton-Felsanker) des Druckstollen Imst, im Bereich des Bauloses Wenus. Betrachtet man die Geologie, so liegt der Druckstollen hauptsächlich in den sogenannten Landecker Phylliten. Die vor Ort hauptsächlich vorkommende Gesteinsart bildet Quarzphyllit von mittlerer bis mäßiger Güte. Nur die letzten 1,5 km liegen in den nördlichen Kalkalpen, die von einer Wechsellagerungen mit Dolomit, Kalk und Tonschiefer geprägt wird. In standfesten bis gebrächen Strecken hat man sich für die Ausführung einer einfachen Auskleidung aus Rüttelbeton mit Wandstärken von 20-40 cm entschieden. In Bereichen mit sehr gebrächen und druckhaften Eigenschaften, musste eine doppelte Auskleidung angewendet werden. Diese setzt sich aus einem 20-30 cm starken Innenring und einem 30-60 cm dicken Außenring aus Rüttelbeton oder gemauerten Formsteinen zusammen. [8, 35, 45, 54]



(a) Baulos Runserau [28]



(b) Kombiniertes Ausbau, Baulos Wenns [45]

Abbildung 3.13: Druckstollen Prutz-Imst

Tabelle 3.2: Kennwerte - Druckstollen Prutz-Imst

Allgemein		Auskleidung	
Kraftwerk	<i>Imst</i>	Art	<i>einfacher Rüttelbeton</i>
Stollen	<i>Prutz-Imst</i>	Aufbau/ Stärke [cm]	<i>20-40 Innenring</i> <i>optional 30-60 Außenring</i> <i>(Rüttelbeton/Formsteine)</i>
Inbetriebnahme	<i>1956</i>		
Länge [m]	<i>12.300</i>	Injektion	
Neigung [%]	<i>0,16-0,29</i>	Hinterspritzung	<i>ja</i>
Ausbauleistung [kW]	<i>89.000</i>	Art d. Inj.	<i>Zementmörtel (Firstbereich)</i> <i>Zementmilch (ganzer Umfang)</i>
Bruttofallhöhe [m]	<i>144,9</i>	Hydraulische Verhältnisse	
Querschnitt		max. Innendruck [bar]	<i>3,92</i>
Form	<i>Kreisförmig</i>	Ausbauwassermenge [m ³ /s]	<i>81</i>
Fläche [m ²]	<i>20,43-22,06</i>	Fließgeschwindigkeit [m/s]	<i>3,85-4,16</i>
Verortung		Geologie	
<i>siehe Abb. 3.14</i>		Gesteinsarten	<i>Quarzphyllit, Dolomit,</i> <i>Kalk, Tonschiefer</i>
		Überlagerung [m]	<i>bis 1000 m</i>

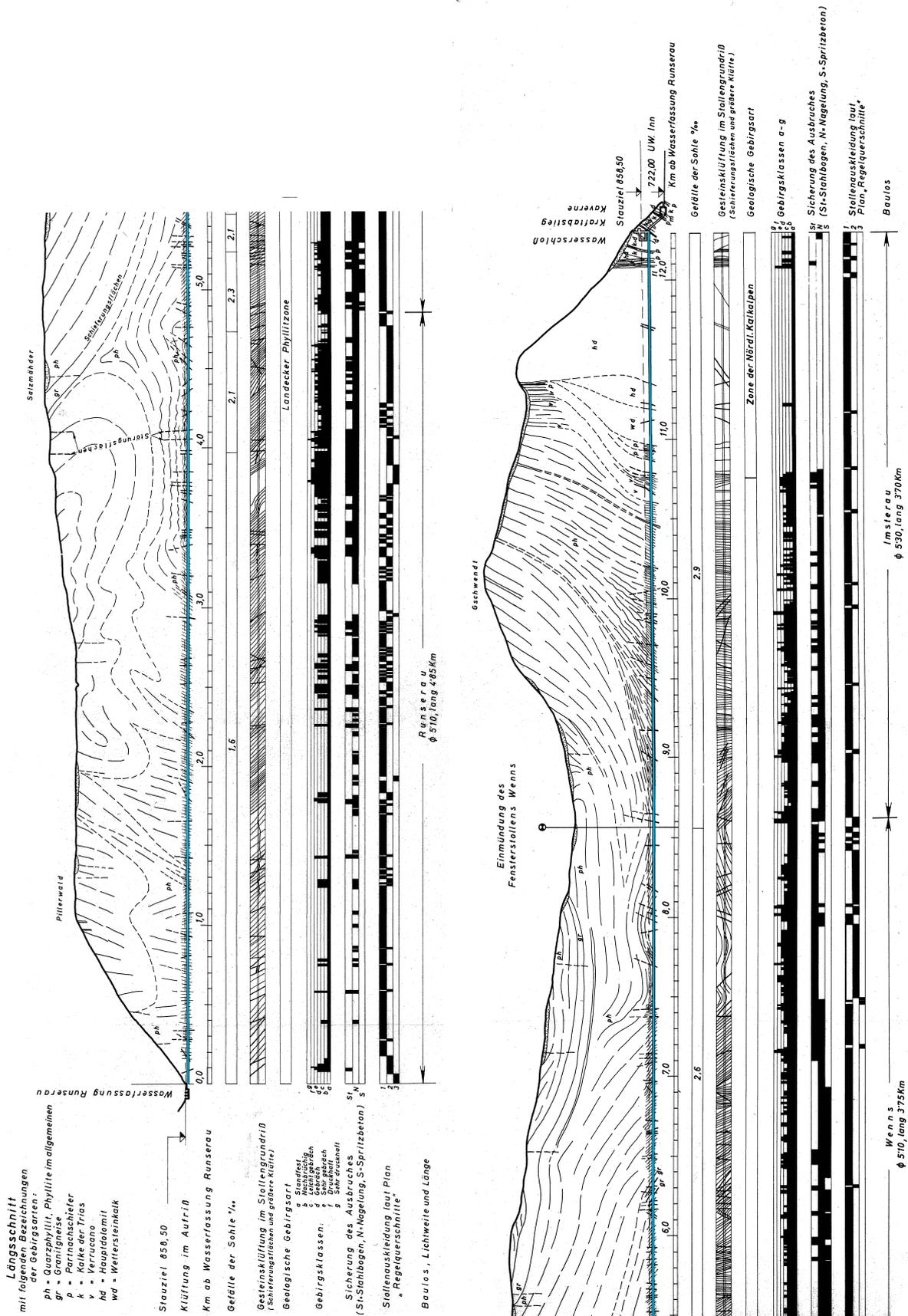


Abbildung 3.14: Längenschnitt - KW Prutz-Imst [35]

3.7 Tiwag Radialpresse (1954)

Für die Bemessung einer Druckstollenauskleidung sind neben den Materialkennwerten des gewünschten Auskleidungsmaterials auch felsmechanische Kennwerte erforderlich. Die aus der Massenkraft zu berechnende vertikale Primärspannung $\sigma_v = \rho * g * H$ ist in der Regel relativ genau und muss deshalb nicht gemessen werden. Im Gegensatz dazu ist für eine genaue Erfassung der horizontalen Primärspannung $\sigma_h = k * \rho * g * H$ eine Messung notwendig, da diese bei extremen Topographien und wechselnden Gebirgsfestigkeiten, sowie beim Vorkommen von tektonischen Spannungen meist unsicher ist. In Auflockerungszonen die der Oberfläche nahe sind und bei sichtbar offenen Klüften ist σ_h mit null anzunehmen. Um die für eine kontinuumsmechanische Berechnung der Deformation zusätzlich erforderlichen Parameter wie den V- u. E-modul genau ermitteln zu können, ist eine Radialpresse für die Messung heranzuziehen. Diese wurde von der Tiwag aus einer vorhandenen Messeinrichtung im Jahre 1954 weiterentwickelt (siehe Abb. 3.15), um Kennwerte für die Bemessung der hochbeanspruchten Druckschächte- und stollen des KW Kaunertal (1964) von 1958-1962 auszuloten. [10, 45]

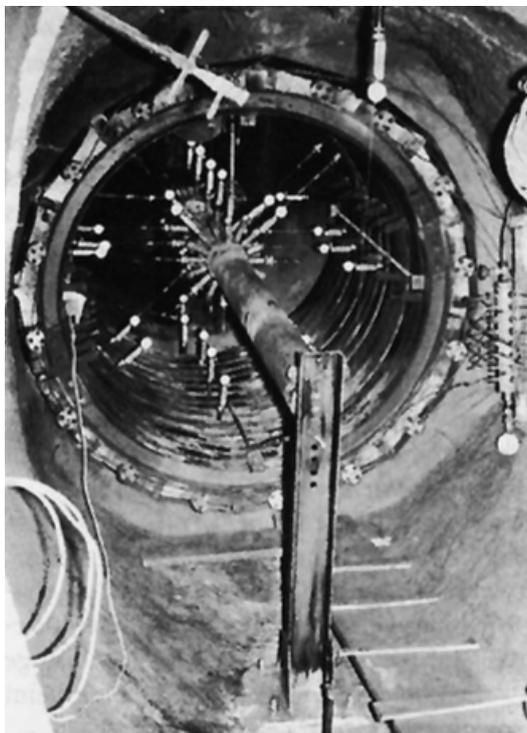


Abbildung 3.15: Tiwag-Radialpresse im KW Kaunertal [10]

Hintergedanke war es durch die genaue Ermittlung von Gebirgseigenschaften, eine maximale Ausnutzung der Gebirgsmitwirkung zu erzielen und so einen kostenoptimierten Einsatz von Stahlpanzerungen zu gewährleisten, sowie die Rissbildung bei vorgespannten Betonauskleidungen zu minimieren. Am besten geeignet dafür wären Druckkammerversuche oder eigens errichtete Versuchs-Druckschächte, die aufgrund ihres hohen Aufwandes von der leicht versetzbaren Tiwag-Radialpresse, die exakt die gleichen Ergebnisse liefert, ersetzt wurden. Neben der Ermittlung von gewissen Parametern kann die Radialpresse auch als großer Modellversuch angesehen werden. Bei einem Durchmesser von 2,20 m wird ein Stollenabschnitt von 2,0 m Länge von einer hydraulischen Presse belastet und gibt so unter einer nachgestellten Innendruckbelastung die radiale Verschiebung des vorhandenen Gebirges in Form einer Arbeitslinie aus. Die gemessene Arbeitslinie dient direkt als Bemessungsgrundlage für das von Seeber darauf abgestimmte Bemessungsverfahren für Druckschacht- und stollenauskleidungen (siehe Kapitel 3.9). Folgende Einflüsse werden durch die Arbeitslinie wiedergegeben: [10, 45]

- Elastische und plastische Verformungsanteile [45]
- durch Sprengung und Spannungsumlagerung entstehende Auflockerungen [45]
- Einflüsse von Stützmaßnahmen und Injektionen [45]
- Einfluss des sekundären Spannungszustandes [45]

Bei der Konstruktion der Radialpresse (siehe Abb. 3.16 u. 3.17) erhält der kreisförmige Ausbruch eine 15 cm starke Spritzbeton- oder Ortbetonauskleidung, deren Innenlaibung 16-eckig ausgeprägt ist. Dieses 16-Eck ergibt sich genau aus der gleichen Anzahl an Druckkissen, die durch Stahlringe über ausgleichende Holzbohlen abgestützt werden und einen Innendruck bis zu 100 bar erzeugen können. Solch extrem hohe Drücke sind für Arbeitslinien von hochbeanspruchten Druckschächten notwendig. Druckkissen und Holzbohlen werden so angeordnet, dass 5 cm breite Spalten für das Hindurchführen der Messanker entstehen. Die mit Messuhren bestückten Messanker dienen zur Messung der radialen Verschiebung gegenüber einem festen in der Bezugsachse liegenden ca. 6 m langen Zentralrohr, welches außerhalb des Einflussbereiches der Belastung, abgestützt wird. Durch die Messung an maximal 16 möglichen Punkten, kann ein gutes Bild hinsichtlich der Anisotropie des Gebirges gegeben werden. [10, 45]

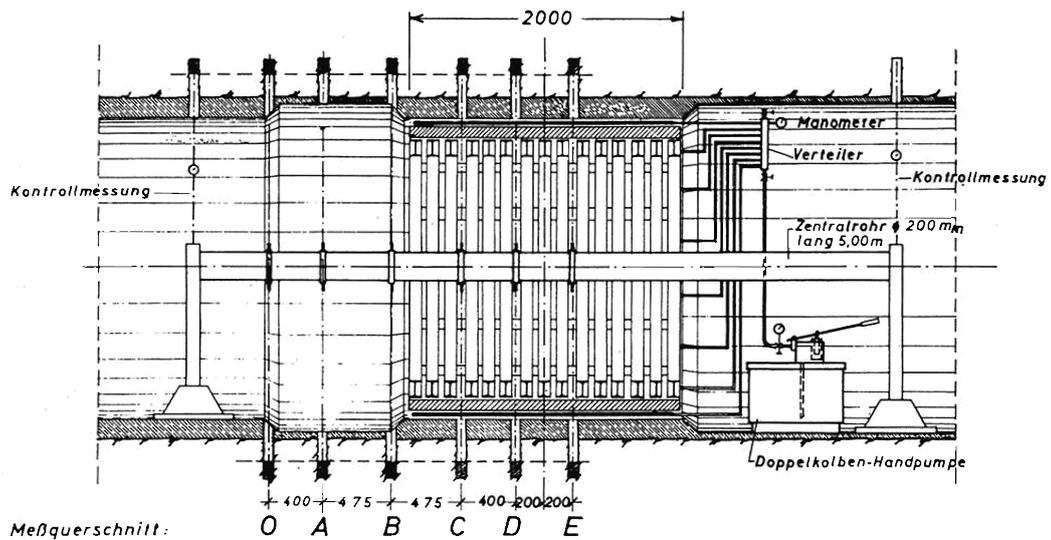


Abbildung 3.16: Tiwag-Radialpresse - Längsschnitt [45]

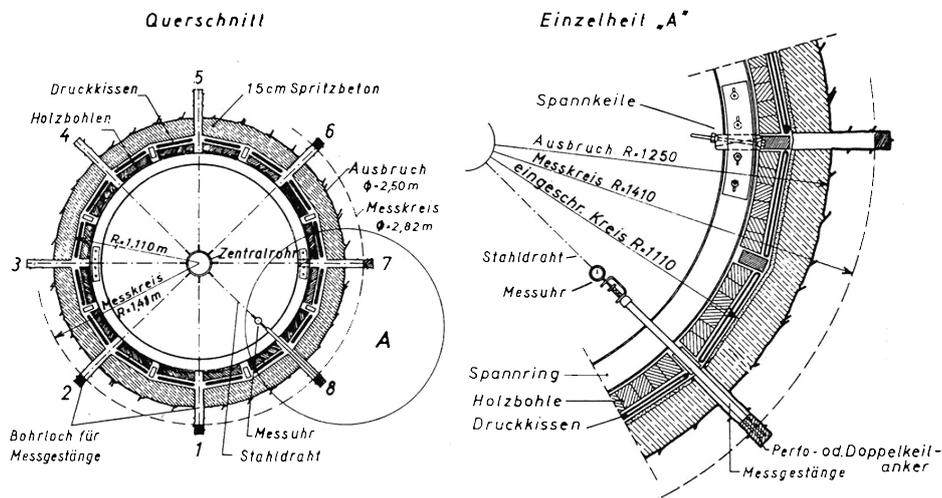


Abbildung 3.17: Tiwag-Radialpresse - Querschnitt und Detail [45]

Nach dem Aufbringen des vorgesehenen Enddrucks mittels drei Stufen, kommt es nach jeder einzelnen Stufe zu einer Zwischenablesung. Die Geschwindigkeit der Belastung wird je nach Felsqualität gewählt und darf bei gutem elastischen Fels dem höchstmöglichen Wert der Pumpe entsprechen. Findet man ein weiches, kriechendes Gebirge vor, ist dieses möglichst langsam zu belasten. Dabei ist der Druck in jeder Druckstufe solange zu halten, bis über eine Stunde gesehen, keine Deformation messbar ist. Der Druck ist nach jeder Stufe auf Null zu senken, um eine Nulllesung durchzuführen. Danach wird der Druck stufenweise erhöht bis er die nächste Druckstufe erreicht. [45]

3.8 Rotormaschine (1957)

Der nächste Entwicklungsschub im Bereich der Spritzbetontechnik gelang 1957 mit dem endgültigen Aufkommen der Rotormaschinen. Diese basieren auf der Erfindung eines Holländers (1929) und der in Amerika entstandenen „Jetcreter“ Maschine. Mit der Übernahme des amerikanischen Patents durch die Firma Meynadier konnte eine 950 kg leichte Maschine, namens „Meyco GM 57“ (siehe 3.18) entwickelt werden. Die Maschine ist einfach zu bedienen, robust und leistungsfähig. Mit ihr konnte die Stundenleistung im Vergleich zur Schneckenmaschine von 3 m³ auf bis zu 5 m³ pro Stunde gesteigert werden, was einen Einsatz bei weitestgehend allen alpinen Baustellen bis in die 90er Jahre gewährleistete. Eine weitere Rotormaschine wurde bereits 1953 von der Firma ALIVA auf den Markt gebracht. Was mit der Schneckenmaschine von Senn begann, wurde mit den Rotormaschinen perfekt fortgesetzt und prägte den weltweiten Aufschwung des Spritzbetons im Untertagebau. [27, 45, 50]



Abbildung 3.18: Rotormaschine Meyco GM 57 [50]

3.9 Bemessungsverfahren nach Seeber (1960er Jahre)

Aufbauend auf verschiedenste Gleichungen und Kompatibilitätsbedingungen sowie durch gesammelte Erfahrungen haben *Lauffer* und *Seeber* über Jahre eine **grafische Lösung** für Druckschacht- und Druckstollenauskleidungen entwickelt. Eine Gleichung für die Verformung des Gebirges wird dabei durch eine mittels Tiwag-Radialpresse bestimmte Arbeitslinie ausgetauscht. Mit der leicht versetzbaren Radialpresse ist es möglich Gebirgseigenschaften verschiedener Profile zu messen, wodurch bei einer Verwendung der schlechtesten Arbeitslinie eine vorhandene Anisotropie des angrenzenden Felses mit in die Bemessung einbezogen werden kann. [14, 43]

Abb. 3.19 zeigt das Bemessungsdiagramm für Stahlpanzerungen nach Seeber. Dieses wird in zwei Hälften unterteilt. Die mittels Radialpresse bestimmten Arbeitslinien bzw. angenommenen V-module des Gebirges sind oben eingezeichnet. Unten sind von der Kesselformel abstammende Arbeitslinien für verschiedene Stärken einer Stahlpanzerung dargestellt. Um eine Stahlpanzerung zu bemessen ist der vom gegebenen Stahl aufnehmbare Innendruck von der Arbeitslinie des Gebirges nach unten abzutragen. Danach ist die Mindestwanddicke der Stahlblechauskleidung s/r an der Blecharbeitslinie abzulesen. Anhand dieser Darstellung können aufgenommene Druckanteile von Gebirge und Panzerung sehr gut veranschaulicht werden. Ist zwischen Auskleidung und Stollenlaibung ein Spalt vorhanden oder gibt es eine temperaturabhängige Deformation der Panzerung ist dies durch ein Parallelverschieben der Gebirgsarbeitslinie zu berücksichtigen. [14]

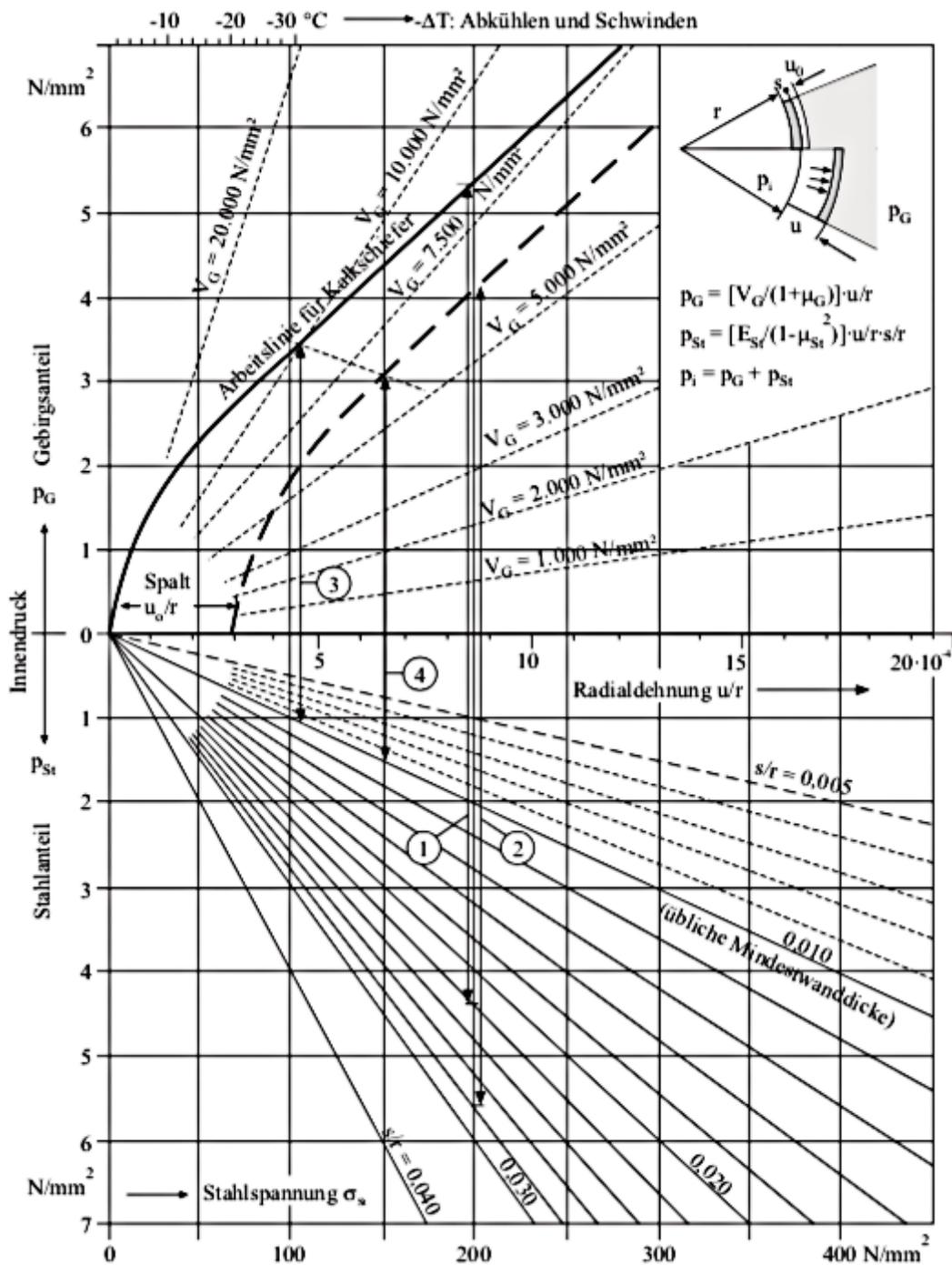


Abbildung 3.19: Bemessungsdiagramm für Stahlpanzerung [14]

Für vorgespannte Betondruckstollen wurde von *Seeber* ein ähnliches, aus vier Quadranten bestehendes, Diagramm entwickelt (siehe Abb. 3.20). So befindet sich im ersten Quadranten die Arbeitslinie des Gebirges. Die Arbeitslinie einer Betonauskleidung mit der Dicke d wird aufgrund des Zusammenpressens des Betonringes bis in den zweiten Quadranten in den Bereich der negativen Dehnung verlängert. Dies resultiert aus der Vorspannungswirkung einer Injektion, die zusätzlich das Gebirge nach außen verformt. Deshalb ist die Arbeitslinie des Gebirges so weit parallel nach links zu verschieben, bis sich der wirksame Injektionsdruck im Spalt mit der Arbeitslinie des Betons schneidet. Dadurch kann die Spaltweite aufgrund von Gebirgs- u. Betonverformung abgelesen werden. Kommen weitere Einflüsse wie Kriechen oder Temperaturänderungen hinzu, ist die Arbeitslinie des Gebirges nach rechts zu verschieben. Am Schnittpunkt der Arbeitslinien kann der Innendruck abgelesen werden, der durch die Vorspannung aufgenommen werden kann. [14]

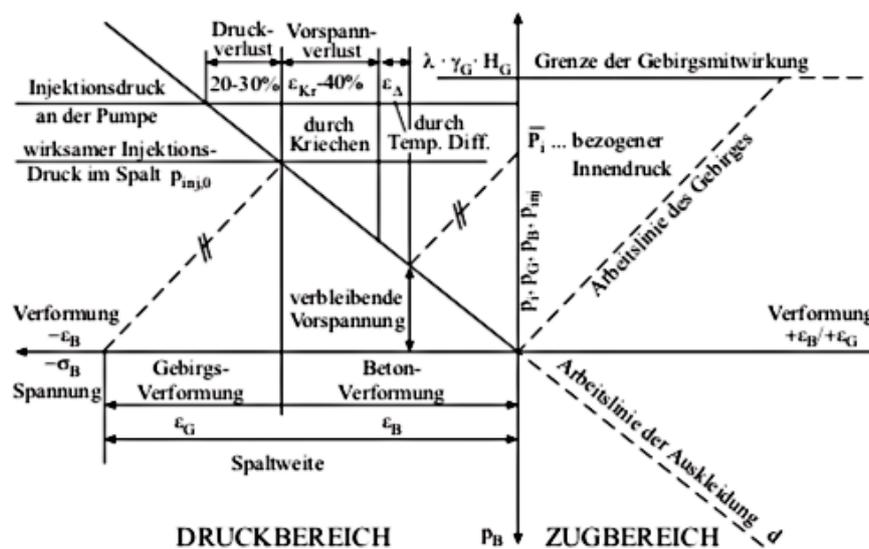


Abbildung 3.20: Bemessungsdiagramm für vorgespannte Betondruckstollen [14]

3.10 Beginn des Fräsvortriebes (1967)

Ein wesentlicher Unterschied eines Druckstollens zu anderen Tunneln, ist die zusätzliche Belastung durch den Innendruck während dem Betriebszustand. Dies verlangt einen weitaus schonenderen Umgang mit dem Gebirge während dem Vortrieb, was ideal mit dem Einsatz von mechanischen Vortriebsverfahren umgesetzt werden kann. Über lange Strecken kann so ohne Profilwechsel der gewünschte kreisförmige Querschnitt (vgl. Kapitel 2.6) erreicht werden. Oft wird die Herstellung des Stollens als kritischer Termin eines Druckstollenprojektes bezeichnet. So kann mit der Verwendung einer TBM eine mittlere Vortriebsleistungen von 15-35 m/Tag erreicht werden, was sich weit von den 6-10 m/Tag des konventionellen Vortriebes abhebt. Da ein langer Stollen in ein bis zwei Abschnitten hergestellt werden kann, ist es möglich durch den Wegfall zusätzlicher Fensterstollen und Baustelleneinrichtungen an Kosten zu sparen. Der größtmögliche mit einer TBM aufzufahrene Stollenabschnitt beträgt bis zu 15 km. Aus baubetrieblichen Argumenten, wie der Schutterung und Bewetterung, ist die mögliche Länge eines konventionell vorgetriebenen Stollens mit 7 km begrenzt. Ist eine Maschine mit geforderten Durchmesser vorhanden, kann ein TBM-Vortrieb auch für einen kürzeren Stollen wirtschaftlich sein. Eine Anwendbarkeit hängt jedoch wesentlich mit den geologischen Eigenschaften zusammen. Bei schlechter Schneidbarkeit des Felses und vielen Störungszonen ist möglicherweise von einem maschinellen Vortrieb Abstand zu nehmen. [43]

Durch den Einsatz eines mechanischen Vortriebes ergeben sich zusätzlich folgende neue Möglichkeiten und Vorteile hinsichtlich der Auskleidung: [43]

- Unausgekleidete Druckstollen [43] (vgl. Kapitel 2.2)
- Wirtschaftlichkeit von Auskleidungen mit Dichthaut [43] (vgl. Kapitel 2.4.3)
- Statische Vorteile durch das genaue Kreisprofil [43]
- Eine Vorspannung von Betonauskleidungen ist leichter möglich [43]
- Eine Verkleinerung des Spaltes für das Hinterbetonieren bei Auskleidungssystemen mit Fertigteilen und Panzerungen [43]

Der erstmalige planmäßige Einsatz einer Vollschnittfräse war 1969 beim Triebwasserweg des Industriekraftwerkes Wattenbach. Schauplatz für den **ersten Einsatz einer Tunnelbohrmaschine in Österreich** überhaupt war die Floitenbachbeileitung im Jahre 1967 (siehe Kapitel 3.10.1). Hier wurde ein Stollen mit einem Ausbruchdurchmesser von 2,14 m über eine Länge von 264 lfm mit einem Prototyp der Firma Wirth aufgefahren. Was dort als Versuch angedacht war, leitete eine Wende im Druckstollenbau ein. Insgesamt wurden in Österreich in den 12 darauffolgenden Jahren 24 Stollen oder Schächte maschinell aufgefahren und fertiggestellt. [6, 29]

Die KWG Sellrain-Silz (1981) (siehe Kapitel 2.4.3.1.1) der Tiwag gilt als erster massiver Einsatz eines maschinellen Vortriebes im österreichischen Kraftwerksbau. Insgesamt wurden dort 13,5 km Stollen mit zeitweise vier gleichzeitig betriebenen Fräsen aufgefahren. Bei Einzelleistungen von 65 m/Tag hat man es teilweise auf eine Vortriebsleistung von über 100 m/Tag gebracht. Neben zwei Druckschächten wurden der Druckstollen Hemerwald (siehe auch Kapitel 2.4.3.1.1) sowie der Überleitungsstollen Horlachbach (siehe Abb. 3.21) maschinell aufgefahren. [6, 29]

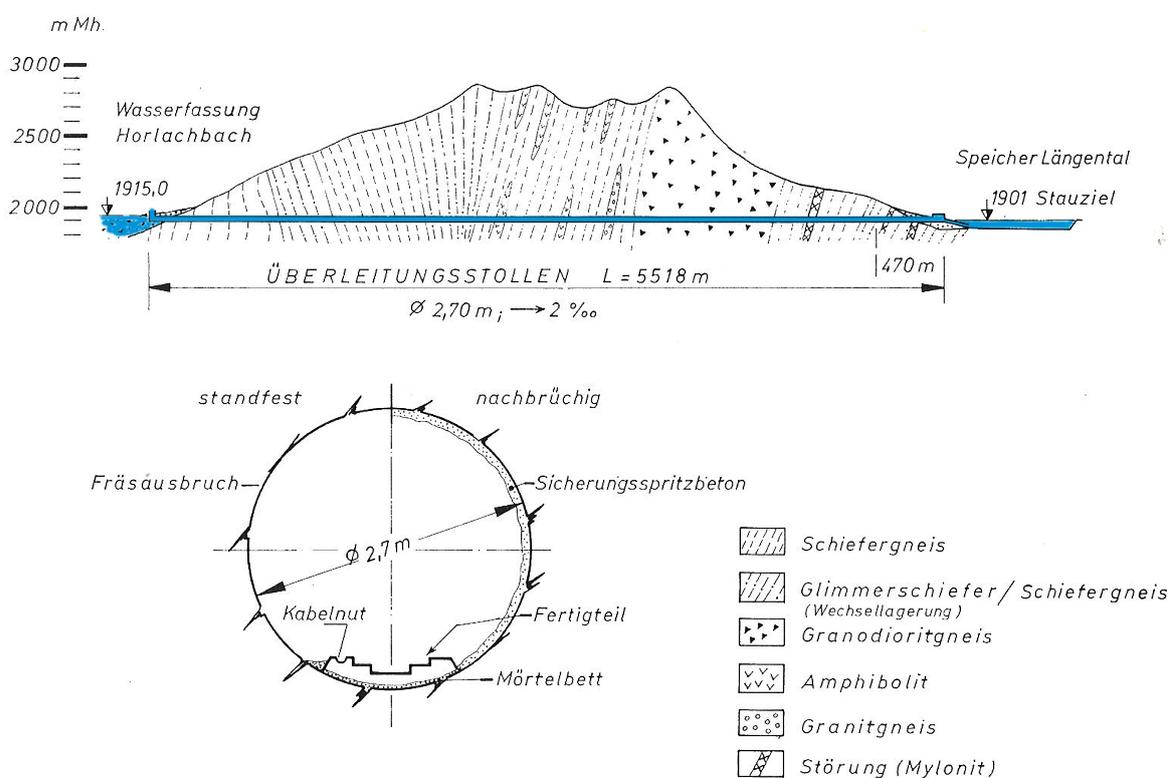
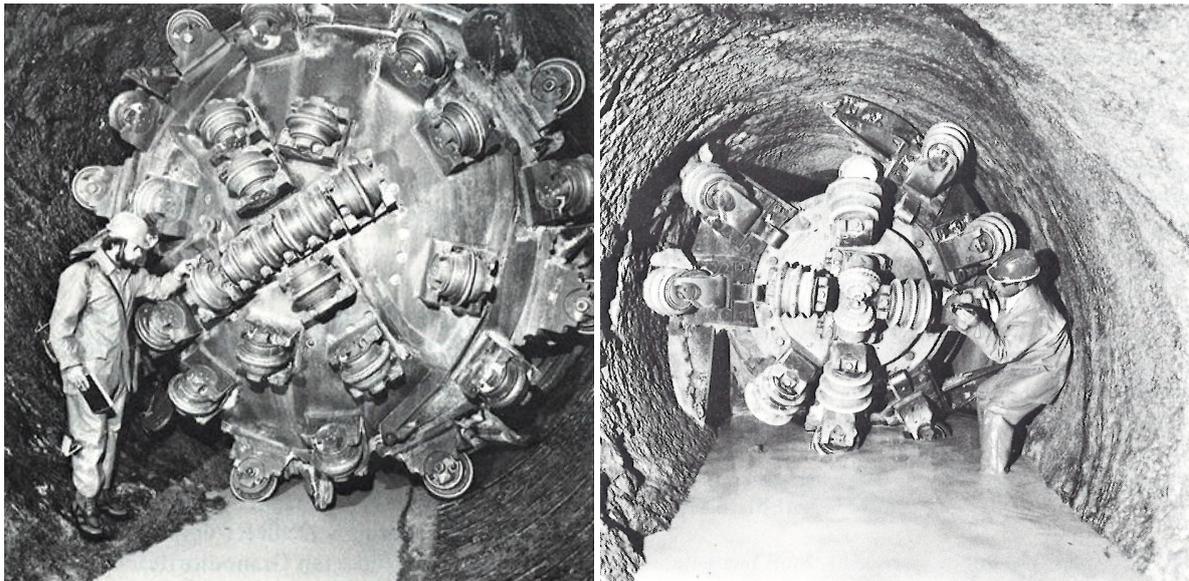


Abbildung 3.21: Längenschnitt + Profil - Überleitungsstollen Horlachbach [37]



(a) Hemerwald - Robbins 120

(b) Horlachbach - DEMAG 24 - 27 H

Abbildung 3.22: Fräsköpfe maschineller Vortrieb - KWG Sellrain-Silz[37]

Tabelle 3.3: Kennwerte - Fräsvortrieb KWG Sellrain-Silz

Fräsvortrieb KWG Sellrain-Silz		
Kraftwerksgruppe	<i>Sellrain-Silz</i>	
Auftraggeber	<i>Tiwag</i>	
Druckstollen	<i>Hemerwald</i>	<i>Horlachbach</i>
Baubeginn	<i>1977</i>	<i>1978</i>
Länge [m]	<i>4.470</i>	<i>5.500</i>
Neigung [%]	<i>0,3-0,44</i>	<i>0,2</i>
Ausbruchdurchmesser [m]	<i>3,9</i>	<i>2,7</i>
Querschnitt	<i>Kreisförmig</i>	
Auskleidung	<i>Betonring mit PVC-Folie</i>	<i>Sicherungsspritzbeton mit Sohlübbing (Fertigteil)</i>
Geologie	<i>Muskowitgranit -u. Schiefergneis</i>	<i>Schiefergneis, Glimmerzonen</i>
Maschinentyp	<i>Robbins 120</i>	<i>DEMAG TVM 24-27 H</i>
Verortung	<i>siehe Abb. 2.39 u. 2.40</i>	<i>siehe Abb. 2.39 u. 3.21</i>

3.10.1 Floitenbachbeileitung (1967)

Die Kraftwerksgruppe Zemm-Ziller (siehe Abb. 3.23) besteht aus den zwischen den Jahren 1965 bis 1971 errichteten Kraftwerken Rosshag und Mayrhofen und wurde zwischen 1974 bis 1987 durch das KW Häusling erweitert. Gemeinsam bilden sie die leistungsstärkste Kraftwerksgruppe Österreichs mit einer Ausbauleistung von 935 MW. Die Floitenbachbeileitung dient dabei durch seine Einleitung in den 8,7 km langen Druckstollen vom KW Rosshag zum Speicher Stillup zur Vergrößerung des Einzugsgebietes für das KW Mayrhofen. Durch die Einleitung des Floitenbaches in den Druckstollen kommt es zu einer Erhöhung der Durchflussmenge von $58 \text{ m}^3/\text{s}$ auf $65 \text{ m}^3/\text{s}$. Beim Aufahren der Beileitung musste die Tunnelbohrmaschine der Firma Wirth hauptsächlich Schiefer- und Bändergneise durchqueren. [41, 48, 52]

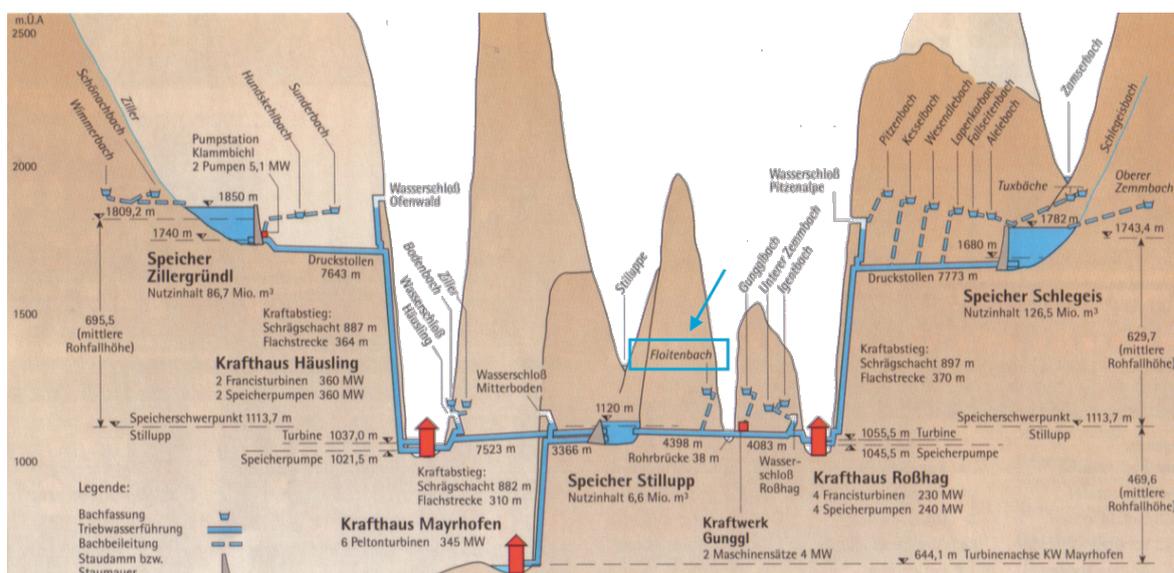


Abbildung 3.23: Übersichtslängenschnitt - KWG Zemm-Ziller mit Floitenbachbeileitung [33]

4 Zusammenfassung

Die Entwicklung des Druckstollenbaus in Österreich hängt mit vielen Faktoren zusammen welche über die Jahrzehnte stets Erhöhungen zu verzeichnen haben, wie steigende Innendrucke, Verbesserung der Bauweisen und steigende Durchmesser. Einer der ersten Druckstollen überhaupt war der Raabklammstollen bei Weiz. Nachdem der Stollen anfänglich keine Auskleidung erhielt, wurde dieser bei einem Innendruck von 0,253 bar nachträglich mit einem Putz zur Herabsetzung der Wasserverluste versehen. [53]

Anfang der 1920er Jahre brachten zwei Ereignisse einen ersten Entwicklungsschritt. Der 1920 eingebrochene Ritomstollen in der Schweiz führte zu einer Änderung der Querschnittsformen. Vom hufeisenförmigen bzw. eiförmigen ging die Querschnittsform auf den in hydraulischer und wirtschaftlicher Hinsicht idealen kreisförmigen Querschnitt über. Zusätzlich brachte das Torkretverfahren neue Möglichkeiten. Bei Innendrücken von bis zu 4 bar kam teilweise die am häufigsten verwendete und wirtschaftlichste Betonauskleidung in Kombination mit einer innen liegenden zum Teil armierten Torkretschale zum Einsatz. Dies war jedoch nur in kaum auf Zug beanspruchten Abschnitten der Fall. [42, 45, 53]

Durch die 1931 in Kraft getretene Verwendung von bewehrten Betonauskleidungen war es möglich, die durch zu hohe Zugbeanspruchung entstehenden großen Risse, in mehrere kleine Risse zu verwandeln und so einen drosselnden Einfluss auf die Wasserverluste zu erzielen. Der von *O. Walch* 1926 betrachtete Bergwasserspiegel ist ebenfalls ein wichtiges Mittel um Wasserverluste zu vermeiden. Berücksichtigt man die sogenannte Walch'sche Grenze, kann durch Verzicht von Auskleidungen kostengünstig gebaut werden. [42, 45]

Ab Mitte der 1940er Jahre konnte durch die Erfindung von verschiedensten Vorspannverfahren, ein maximaler Innendruck von über 10 bar aufgenommen werden. Mit dem von der Tiwag in den 1960er Jahren beim Bau des KW Kaunertal entwickelten Spaltinjektionsverfahren war es möglich Innendrucke von bis zu 18 bar standzuhalten. [45]

Durch die Weiterentwicklung von Spritzmaschinen wie der Schneckenmaschine und einer Idee von Prof. Rabcewicz kam es zur Anwendung einer Kombination aus Felsankern und Spritzbeton. Diese neue Vorgehensweise wird 1953 erstmals systematisch beim Druckstollen Prutz-Imst angewendet und wird als Neue Österreichische Tunnelbauweise bezeichnet. Sie dient zur Ausbruchssicherung und ersetzt die alte gefährlichere Bauweise. [45, 50]

1967 trat mit Beginn des Fräsvortriebes der Floitenbachbeileitung des KW Mayrhofer ein neues Zeitalter hinsichtlich der Vortriebsleistungen ein. Mit der Verwendung einer TBM, in diesem Fall eine offene Tunnelbohrmaschine für Hartgestein, konnten nun Vortriebsleistungen von 15-35 m/Tag erreicht werden, was sich weit von den 6-10 m/Tag des konventionellen Vortriebes abhebt. Ungefähr seit dem Jahr 1980 werden die meisten Druckstollen maschinell aufgeföhren. Beispiele für seitdem konventionell vorgetriebene Druckstollen bilden das PSKW Obervermuntwerk II (2018) und das KW Feldsee (2011), bei dem eine Kombination aus vorgespannter Betonauskleidung mit GFK-Röhren einen Innendruck von 76 bar standhält. Eine Anwendbarkeit hängt wesentlich mit den geologischen Eigenschaften zusammen. Bei schlechter Schneidbarkeit des Felses und vielen Störungszonen ist möglicherweise von einem maschinellen Vortrieb Abstand zu nehmen. In Kombination mit dem mechnischen Vortrieb ist es immer mehr zur Anwendung von Sohlübblingen gekommen, die zur Vermeidung von zusätzlichen Drainagen und gegen die Auflockerung an der Sohle verwendet werden. [6, 9, 11, 43]

Um Druckstollen in Zunkuft für größere Durchmesser und schlechtes Gebirge wirtschaftlich zu machen sind weitere Entwicklungen notwendig. Abschließend ist zu sagen, dass die Entwicklungen in Österreich bezüglich Druckstollen in der ganzen Welt erfolgreich angewendet werden. Zusätzlich hängt die Entwicklung des Stollenbaus sehr eng mit der Entwicklung des Druckstollen im Wasserbau zusammen.

Zusammenfassend werden ein Liniendiagramm (siehe Abb. 4.1) mit der vorhandenen Querschnittsfläche A , dem maximalen aufnehmbaren Innendruck p_i und der Ausbauwassermenge Q_A aller bearbeiteten Druckstollen, sowie für alle wichtigen Ereignisse eine Timeline (siehe Abb. 4.2) über die historische Entwicklung des Druckstollenbaus in Österreich graphisch dargestellt:

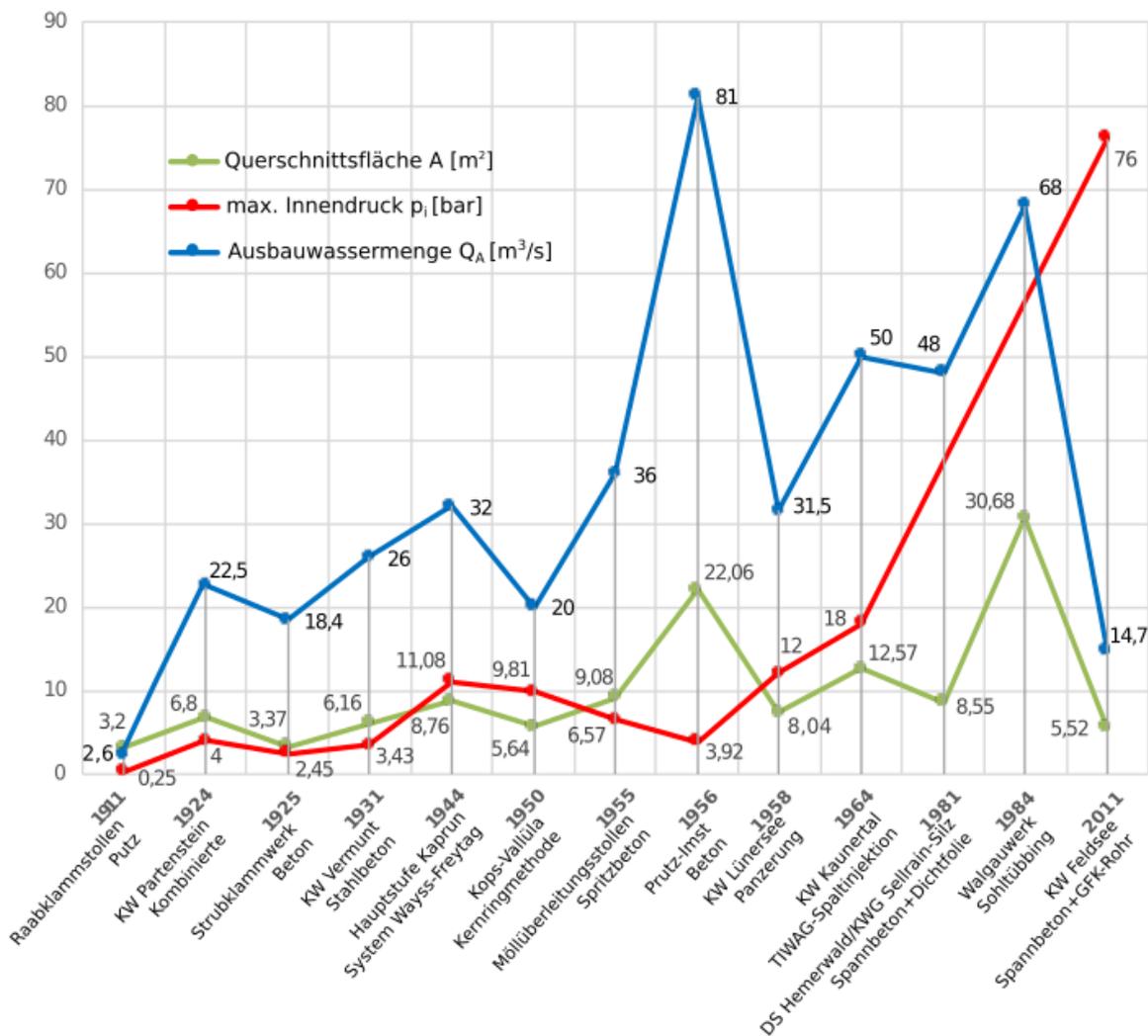


Abbildung 4.1: Liniendiagramm - Querschnittsfläche A , Innendruck p_i , Ausbauwassermenge Q_A

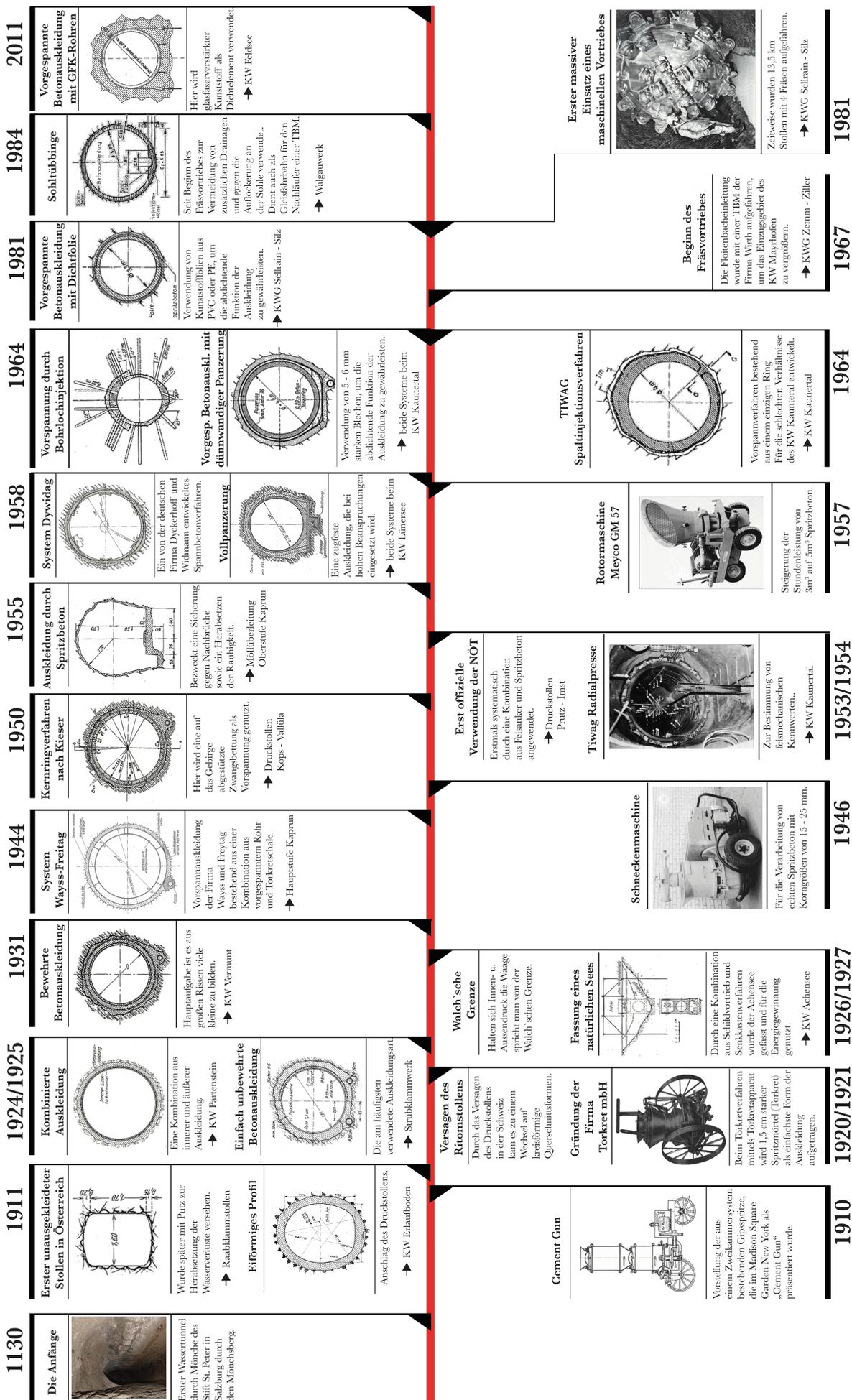


Abbildung 4.2: Timeline - Historische Entwicklung des Druckstollenbaus in Österreich

Literaturverzeichnis

- [1] Kraftwerksbeschreibung Raabklamm / Green Power Steiermark GmbH. – Forschungsbericht
- [2] AG, Voralrberger I.: *Vermuntwerk @ONLINE*. März 2018. – URL <https://www.illwerke.at/vermuntwerk.htm>
- [3] AG, Voralrberger I.: *Vermuntwerk @ONLINE*. März 2018. – URL <https://www.illwerke.at/lunerseewerk.htm>
- [4] AG, Voralrberger I. ; NEUBURGER, O: *Kraftwerk Vermunt mit den Bachüberleitungen nach Vermunt*. Bundesministerium für Verkehr und verstaatlichte Betriebe, 1956
- [5] AMPFERER, Otto ; PINTER, Karl: *Über geologische und technische Erfahrungen beim Bau des Achenseewerkes in Tirol*. Geologische Bundesanstalt, 1927
- [6] ANGERER, Karl: Gefräste Stollen in Österreich von 1979–1981, Erfahrungen und Vergleiche. In: *Ingenieurgeologie und Geomechanik als Grundlagen des Felsbaues/Engineering Geology and Geomechanics as Fundamentals of Rock Engineering*. Springer, 1982, S. 247–261
- [7] BAUABTEILUNG, NEWAG N.Ö. Elektrizitätswirtschafts-A.G.: Ausführungspläne Kraftwerk XI. Erlaufboden / EVN Naturkraft. 1923 (845-19). – Forschungsbericht
- [8] BONAPACE, Paul ; HOFER, Bernhard: Headrace tunnels at Tiwag–Experience, examples, existing tunnels and projects under consideration/Erfahrungen, Beispiele, Bestand und Neubauüberlegungen zu Triebwasserwegen der Tiwag. In: *Geomechanics and Tunnelling* 8 (2015), Nr. 1, S. 35–49

- [9] DICH, Christopher ; BARWART, Christian: Headrace system of HPP Obervermuntwerk II–Geotechnical design and experience. In: *Geomechanics and Tunnelling* 10 (2017), Nr. 5, S. 591–601
- [10] EIBL, Frank ; MÄHR, Markus ; VÖGELE, Dominik: Automated rock strain measurements for the planned pumped storage plant Kühtai using the “TIWAG-Radial Press”/Automatisierte Felsdehnungsmessungen mit der Tiwag-Radialpresse für das geplante Speicherkraftwerk Kühtai. In: *Geomechanics and Tunnelling* 5 (2012), Nr. 1, S. 31–40
- [11] ELEKTRIZITÄTS-AKTIENGESELLSCHAFT, KELAG K.: *Pumpspeicherkraftwerk Feldsee: von der Kunst, ein Kraftwerk zu bauen*. Klagenfurt am Wörthersee : KELAG-Kärntner Elektrizitäts-Aktienges, 2014
- [12] FIECHTL, J ; HAMANN, F ; HÖRMANN, W ; SCHAFFER, A: *Kraftwerk Achensee*. Bundesministerium für Verkehr und verstaatlichte Betriebe, 1956
- [13] FINGER, Wilhelm: Die Baudurchführung des Druckstollens, des Wasserschlosses und des Druckschachtes des Kopswerkes. In: *ÖZE. Österreichische Zeitschrift für Elektrizitätswirtschaft* (1973), Nr. 7, S. 376–388
- [14] GIESECKE, Jürgen ; MOSONYI, Emil: Grundsätze der Planung und Projektierung. In: *Wasserkraftanlagen: Planung, Bau und Betrieb* (2009)
- [15] GIRMSCHIED, Gerhard: *Bauprozesse und Bauverfahren des Tunnelbaus*. John Wiley & Sons, 2013
- [16] GOBER, Hansjörg ; NACKLER, Karl: First operational experience with a high-pressure tunnel with innovative lining methods/Erste Betriebserfahrungen bei einem Hochdruckstollen mit innovativen Ausbaumethoden. In: *Geomechanics and Tunnelling* 4 (2011), Nr. 2, S. 129–140
- [17] GÖTZ, J.: *Die Hauptstufe des Tauernkraftwerkes Glockner-Kaprun*. 1962
- [18] HERZOG, M.: Meilensteine des Tunnelbaus. In: *Bautechnik* 70 (1993), Nr. 3, S. 132–154. ISBN 0932-8351

- [19] HORNINGER, Georg ; WEISS, Ernst H.: Engineering geology in mountainous regions. In: *Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt* 34 (1980), S. 257–286
- [20] INNERHOFER, G: Der Walgaustollen-Projekt und Bauerfahrung. In: *Felsbau* 1 (1983), Nr. 12
- [21] KASTNER, Hermann: Statik des Tunnel und Stollenbaues. (1962)
- [22] KIESER, A.: Wasserdichte Druckstollen und Druckschächte mit Kernring-Auskleidung. In: *Schweizerische Bauzeitung* (1950)
- [23] KIESER, Alois: Kernringstrecke. In: *Die „Kernring-Auskleidung“ im Druckstollen „Kops—Vallüla“ der Vorarlberger Illwerke Aktiengesellschaft*. Springer, 1951
- [24] KIESER, Alois: Der Druckstollen als Bauaufgabe. In: *Druckstollenbau*. Springer, 1960
- [25] KOCHER-PREISWERK, H.F.: Erfahrungen aus dem Druckstollenbau. In: *Schweizerische Bauzeitung* 107/108 (1936), Nr. 8
- [26] KÖLBL, L ; BEURLE, G: Geologische Untersuchung der Wasserkraftstollen im oberösterreichischen Mühlviertel. In: *Jahrb. d. geolog. BA, Wien* (1925)
- [27] KUSTERLE, Wolfgang ; JÄGER, Johannes ; JOHN, Max ; NEUMANN, Christian ; RÖCK, Rudolf: Spritzbeton im Tunnelbau. In: *Beton-Kalender 2014: Schwerpunkte: Unterirdisches Bauen-Grundbau-Eurocode 7* (2014), S. 303–390
- [28] LAUFFER, Harald: The development of the NATM—a historical review/Die Entwicklung der NÖT—ein geschichtlicher Rückblick. In: *Geomechanics and Tunneling* 3 (2010), Nr. 6, S. 763–772
- [29] LEHRMEISTER, Meinem ; SCHMIDEGG, O: Die Baugeologie im Wasserkraftbau Tirols.
- [30] LEOPOLD, Müller-Salzburg ; FECKER, Edwin ; GÖTZ, Hans-Peter: Trotz 3000 Jahren Erfahrung, Risiko im Tunnelbau.
- [31] LUDIN, Adolf ; OTZEN, Robert: *Wasserkraftanlagen: Erste Hälfte Planung, Triebwasserleitungen und Kraftwerke*. Bd. 8. Springer-Verlag, 1934

- [32] MATT, P ; THURHERR, F ; UHERKOVICH, I: Vorgespannte Druckstollen. In: *Schweizerische Bauzeitung* 96 (1978), Nr. 5
- [33] MAULER, Manfred: *Information zur Clubstation*. April 2018. – URL <http://archiv.oe7.oevsv.at/ortsstellen/adl713/Clubstation/?print=true>
- [34] MEYER, Willy: Die Möllüberleitung des Tauernkraftwerks. In: *Schweizerische Bauzeitung* 70 (1952), Nr. 28
- [35] NEUBURGER, O: *Innkraftwerk Prutz-Imst*. Bundesministerium für Verkehr und verstaatlichte Betriebe, 1961
- [36] OBERÖSTERREICH, Energie A.: *Wasserkraftwerk Partenstein*. Juli 2016. – URL <https://www.energieag.at/KW-Partenstein-Broschuere.pdf?hp=1;2;de>
- [37] PIRCHER, Wolfgang: Erfahrungen im Fräsvortrieb bei der Kraftwerksgruppe Sellrain-Silz. In: *Baugeologie, Felsbau, Erdbeben und rezente Tektonik—Mechanisierung im Tunnelvortrieb—Risikenverteilung im Felsbau/Engineering Geology, Rock Engineering, Earthquakes, and Actual Tectonics—Mechanization in Tunnel Driving—Sharing of Risks in Rock Engineering*. Springer, 1980, S. 127–154
- [38] PREY, Siegmund ; KARTEN, Geologische: VII. Tauernfenster (Großglocknerstraße). In: *Verhandlungen der Geologischen Bundesanstalt: Sonderheft* (1951), S. 95
- [39] RADONČIĆ, Nedim ; GROSSAUER, Karl ; SCHUBERT, Wulf ; GOBER, Hans-Jörg ; HEIGERTH, Günther: Improved Design Method for Pre-stressed Water Tunnels. In: *Geomechanics and Tunneling* 1 (2008), Nr. 5, S. 383–389
- [40] RICHARD, Widmann: *Druckstollen und Druckschächte, gewidmet Herrn Lauffer Harald*. Österreichische Gesellschaft für Geomechanik, 1989
- [41] SASS, Ingo ; SCHÄFFER, Rafael ; HELDMANN, Claus-Dieter: *Wasserkraftwerk*. April 2018. – URL https://www.geo.tu-darmstadt.de/media/geowissenschaften/fachgebiete/angewandtegeothermie/pdf_2/hgue_ii/19_28_Wasserkraft.pdf

- [42] SCHLEISS, Anton: *Bemessung von Druckstollen*. Eidg. Technische Hochschule, 1985
- [43] SCHWARZ, Jürgen: *Druckstollen und Druckschächte: Bemessung und Konstruktion*. Techn. Univ. München, 1985
- [44] SEEBER, G: Möglichkeiten und Grenzen im Druckstollenbau. In: *Schweizer Ingenieur und Architekt* (1981), Nr. 29
- [45] SEEBER, Gerhard: *Druckstollen und Druckschächte*. Enke, 1999
- [46] s.n.: Die Hochdruck-Wasserkraftanlage Vermunt im Vorarlberg. In: *Illustrierte schweizerische Handwerker-Zeitung: unabhängiges Geschäftsblatt der gesamten Meisterschaft aller Handwerke und Gewerbe* (1931)
- [47] s.n.: Das Lünenseekraftwerk. In: *Schweizerische Bauzeitung* 78 (1960), Nr. 45
- [48] s.n.: Die Zemmkraftwerke in den Zillertaleralpen. In: *Schweizerische Bauzeitung* 85 (1967), Nr. 7
- [49] TAUERNKRAFTWERKE, AG ; SEE, Zell am: *Die Oberstufe des Tauernkraftwerkes Glockner-Kaprun*. 1955
- [50] TEICHERT, P: Die Geschichte des Spritzbetons. In: *Sonderdruck aus Schweizer Ingenieur und Architekt* 47 (1979), S. 1–12
- [51] TENTSCHEIT, E.H.: *Engineering Geology in Austria: An Outline*. (2000)
- [52] VERBUND: *Pumpspeicherkraftwerk Mayrhofen @ONLINE*. 2018. – URL <https://www.verbund.com/de-de/ueber-verbund/kraftwerke/unsere-kraftwerke/mayrhofen>
- [53] WALCH, Otto: *Die Auskleidung von Druckstollen und Druckschächten*. J. Springer, 1926
- [54] WASSERKRAFTWERKE, Tiroler: *Die Kraftwerke der Tiroler Wasserkraft*
- [55] WEIZ, Stadtgemeinde: *Pichlerwerke @ONLINE*. Januar 2018. – URL <http://www.weiz.at/bildung/weiz-lexikon/detail/alias/Pichlerwerke>

Abbildungsverzeichnis

1.1	Vergleich der Prinzipie	2
2.1	Stollenabschnitt mit unverbaute Firste - Mönchsberg	6
2.2	Unausgekleideter Druckstollen [24]	7
2.3	Auskleidung aus Formsteinmauerwerk mit zusätzlichem Glattputz [24] .	9
2.4	Mindeststollenquerschnitte - Raabklamm bei Weiz [31]	10
2.5	Kombinierte Auskleidung [53]	12
2.6	Querschnitt - Druckstollen Erlaufboden [7]	13
2.7	Profile - Stollen Partenstein [53]	14
2.8	Längenschnitt - Stollen Partenstein [31]	14
2.9	Unbewehrte Betonauskleidung [24]	16
2.10	Längenschnitt - Strubklammwerk [53]	17
2.11	Druckstollenquerschnitt - Strubklammwerk [31]	17
2.12	Zementeinpressung des Stollenscheitels am Strubklammwerk [31]	18
2.13	Stahlbetonauskleidung [24]	19
2.14	Längenschnitt - Druckstollen Vermunt [4]	20
2.15	Querschnitt - Druckstollen Vermunt [46]	21
2.16	Druckstollenprofil mit Felssicherung durch Spritzbeton [24]	22
2.17	Bergschlag im Möllüberleitungsstollen [21]	23
2.18	Regelprofile - Möllüberleitungsstollen Oberstufe Kaprun [49]	24
2.19	Zusammenhang zwischen Materialbeanspruchung und Sicherheit [24] . .	25
2.20	Spannbetonauskleidung nach Wayss und Freytag - Hauptstufe Kaprun [24]	26
2.21	Wickel- und Versetzmaschine [24]	27
2.22	Übersichtshöhenplan der Werksgruppe "Glockner-Kaprun" [17]	28
2.23	Spannbetonstrecke - KW Lünensee[24]	30

2.24	Wasserschloss des Lünenseewerkes [24]	31
2.25	Längenschnitt - KW Lünensee [24]	32
2.26	Kernring-Auskleidung mit eingebauter Kunststoff-Noppenfolie [13]	34
2.27	Anordnung Injektionsbohrlöcher im Reisach-Stollen [45]	34
2.28	Regelprofil - Kernring-Auskleidung [23]	35
2.29	Längsschnitt a-b Kernring-Auskleidung [23]	36
2.30	Mauerung des Gewölbes - Kernringstrecke Kops-Vallüla [24]	37
2.31	Übersichtslängenschnitt der Wasserüberleitungen aus Tirol [23]	38
2.32	Bohrkern aus der Auskleidung des Druckstollens Kaunertal [45]	40
2.33	Spaltinjektionsverfahren - Arbeitsvorgang [44]	41
2.34	Detaillängenschnitt Fenster Feichten - Fenster Burghofen - KW Kaunertal [40]	44
2.35	Regelprofil - KW Kaunertal [40]	45
2.36	Übersichtslängenschnitt inklusive Auskleidungstypen - KW Kaunertal [45]	46
2.37	Vorgespannte Betonauskleidung mit (a) dünnwandiger Stollenpanzerung und (b) Dichtfolie [14]	47
2.38	Anwendung der vorgespannten Betonauskleidung mit Dichtfolie - KWG Sellrain-Silz	49
2.39	Übersichtsplan - KWG Sellrain-Silz [37]	51
2.40	Längenschnitt + Profile - Druckstollen Hemerwald [37]	52
2.41	Längenschnitt + Arbeitsreihenfolge einer dünnwandigen Panzerung [45]	53
2.42	Querschnitte der dünnwandigen Panzerung - KW Kaunertal [45]	54
2.43	Querschnitt GFK-Rohr mit Betoninnenring - KW Feldsee [11]	55
2.44	Variantenvergleich - KW Feldsee [11]	57
2.45	Längenschnitt - KW Feldsee [11]	59
2.46	Vollpanzerung aus Stahl [14]	60
2.47	Beispiele Vollpanzerung - Querschnitte [24]	61
2.48	Betonauskleidung mit Sohlübbing - Walgaustollen [43]	63
2.49	Längenschnitt + Profile - Walgaustollen [42]	66
3.1	Schnitt der ersten Cement Gun (1910) [50]	67
3.2	Torkretverfahren [53]	69

3.3	Lage des Druckstollens bei Grenzbedingungen: 1. Primärspannung > Innendruck, 2. Walch'sche Grenze: Innendruck < Bergwasserdruck [45]	71
3.4	Längenschnitt - KW Achensee [25]	74
3.5	Längenschnitt Schildvortrieb - KW Achensee [31]	75
3.6	Absenken eines Pressluftkastens - KW Achensee [31]	76
3.7	Profile - Druckstollen Achensee [12]	77
3.8	Schneckenmaschine BS-12 [50]	78
3.9	Schema der Felsnagelung nach Rabcewicz [45]	79
3.10	Spritzbetonsicherung des Druckstollen Prutz-Imst Baulos Runserau [35]	80
3.11	Alte Österreichische Tunnelbauweise - Vortrieb [30]	81
3.12	Vergleich der Alten Österreichischen Bauweise mit der NÖT [30]	82
3.13	Druckstollen Prutz-Imst	83
3.14	Längenschnitt - KW Prutz-Imst [35]	84
3.15	Tiwag-Radialpresse im KW Kaunertal [10]	85
3.16	Tiwag-Radialpresse - Längsschnitt [45]	87
3.17	Tiwag-Radialpresse - Querschnitt und Detail [45]	87
3.18	Rotormaschine Meyco GM 57 [50]	88
3.19	Bemessungsdiagramm für Stahlpanzerung [14]	90
3.20	Bemessungsdiagramm für vorgespannte Betondruckstollen [14]	91
3.21	Längenschnitt + Profil - Überleitungsstollen Horlachbach [37]	93
3.22	Fräsköpfe maschineller Vortrieb - KWG Sellrain-Silz[37]	94
3.23	Übersichtslängenschnitt - KWG Zemm-Ziller mit Floitenbachbeileitung [33]	95
4.1	Liniendiagramm - Querschnittsfläche A, Innendruck p_i , Ausbauwassermenge Q_A	98
4.2	Timeline - Historische Entwicklung des Druckstollenbaus in Österreich	99

Tabellenverzeichnis

2.1	Kennwerte - Raabklammstollen Pichler Werke	11
2.2	Kennwerte - Druckstollen Mühlkraftwerk Partenstein	15
2.3	Kennwerte - Druckstollen Strubklammwerk	18
2.4	Kennwerte - Druckstollen KW Vermunt	21
2.5	Kennwerte - Möllüberleitungsstollen Oberstufe Kaprun	24
2.6	Kennwerte - Druckstollen Hauptstufe Kaprun	29
2.7	Kennwerte - Schrägschacht Wasserschloss KW Lünersee	32
2.8	Kennwerte - Druckstollen Kops-Vallüla	39
2.9	Kennwerte - Druckstollen KW Kaunertal	45
2.10	Kennwerte - Druckstollen Hemerwald KWG Sellrain-Silz	52
2.11	Kennwerte - Druckstollen Feldsee KW Feldsee	59
2.12	Kennwerte - Panzerstollen Grüneck KW Lünersee	62
2.13	Kennwerte - Panzerstrecke Lün KW Lünersee	62
2.14	Kennwerte - Walgaustollen Walgauwerk	65
3.1	Kennwerte - Druckstollen Achenseekraftwerk	77
3.2	Kennwerte - Druckstollen Prutz-Imst	83
3.3	Kennwerte - Fräsvortrieb KWG Sellrain-Silz	94