Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (http://www.ub.tuwien.ac.at).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/).

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

UNIVERSITÄT FÜR ARCHITEKTUR, BAUWESEN UND GEODÄSIE - SOFIA

DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

PROJEKTSSTUDIE 07/08, FÜR DAS PUMPSPEICHERKRAFTWERK SEEKAR (SALZBURG, ÖSTERREICH)

DESIGN OF A PUMPED STORAGE POWER PLANT SEEKAR (SALZBURG, AUSTRIA)

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs
unter der Leitung von

Ao. Univ. Prof. Dipl.- Ing. Dr. techn. Reinhard Prenner

am

Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Ivelina Dencheva Ivanova
0227379

Sofia, März 2008

.....
(Ivelina Ivanova)

DANKSAGUNG

Vorweg möchte ich mich an dieser Stelle bei SALZBURG AG für die sehr praktischorientierte Aufgabestellung dieser Diplomarbeit bedanken.

Vielen Dank gilt dem Betreuer meiner Diplomarbeit, Herrn Ao. Univ. Prof. Dipl. Ing. R. Prenner, dessen Anregungen zum Gelingen dieser Arbeit wesentlich beigetragen haben. Herrn Dozent D. Kissliakov möchte ich meinen herzlichen Dank für seine Hilfe bei der Durchführung der Berechnungen diese Projektsstudie ausdrücken. Auch allen Professoren der TU Wien und der Universität für Architektur, Bauwesen und Geodäsie – Sofia, die dieses internationale Studium mir ermöglicht haben, sind in diesem Dank inbegriffen.

Weiters möchte ich mich bei meinen Familienangehörigen für ihre Unterstützung während des Studiums bedanken.

KURZFASSUNG

In der vorliegenden Diplomarbeit wurden verschiedene Varianten für die Errichtung des Pumpspeicherkraftwerkes Seekar entworfen. Für eine ausgewählte optimierte Variante wurde ein Detailprojekt ausgearbeitet. Dieses beinhaltet die hydraulisch – wirtschaftliche sowie die statische Berechnung der Triebwasserleitung. Die Darstellung der Hauptbauwerke erfolgt in einem Planband. Am Beginn der Arbeit wird die energiewirtschaftliche Situation in Österreich, Deutschland, Bulgarien und weltweit beleuchtet und die derzeitige Bedeutung der hydraulischen Pumpspeicherung im europäischen Verbundnetz beschrieben.

ABSTRACT

This current diploma thesis deals with the design of several variants of a planned pumped storage power plant Seekar in Austria. An optimized variante was proposed and carried out in detail. This suggested design contains hydraulic economic and static calculations for the power conduit. The detailed project is presented in a draft compendium.

At the begin of the thesis the energetic situation in Austria, Germany, Bulgaria and a number of other worldwide countries has been analyzed. The role of the pumped storage within the European energy grid has been described as well.

INHALTSVERZEICHNISS

1 EINLEITUNG UND GEGENSTAND DER UNTERSUCHUNG.....1
2 ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE SITUATION IN ÖSTERREICH, DEUTSCHLAND, BULGARIEN UND WELTWEIT.....1
2.1 ÖSTERREICH …….1
2.2 DEUTSCHLAND.....4
2.3 BULGARIEN.....8
2.4 WELTWEIT.....11
2.5 DIE ROLLE DER HYDRAULISCHEN PUMPSPEICHERUNG IN EUROPÄISCHE VERBUNDNETZ.....13
3 ALLGEMEINE ENTWURFSGRUNDSÄTZE FÜR DEN BAU EINES PUMPSPEICHEKRAFTWERKS.....14
3.1 HAUPTTEILE UND BETRIEBSARTEN.....15
3.2 KRAFTHAUSTYPEN UND MASCHINELLE AUSRÜSTUNG.....16
4 VARIANTENSTUDIUM FÜR DAS UNTERSUCHTE PROJEKT…….17
4.1 PROJEKTSGESCHICHTE.....17
4.2 VARIANTEN.....19
4.3 VOR- UND NACHTEILE DER VARIANTEN.....20
5 WAHL DES OPTIMALEN STOLLEN- BZW. SCHACHTDURCHMESSERS.....21
5.1 VORBEMESSUNG DER SCHACHTAUSKLEIDUNG 21
5.2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN FÜR DIE ERMITTLUNG DES WIRTSCHAFTLICHSTEN DURCHMESSERS.....24
5.3 BERECHNUNG DES WIRTSCHAFTLICHSTEN DURCHMESSERS.....25
6 BESCHREIBUNG DER HAUPTBAUWERKE DER AUSGEWÄHLTEN VARIANTE V3.....31
6.1OBERBECKEN.....31
6.2EINLAUFBAUWERK.....32
6.3TRIEBWASSERLEITUNG.....34
6.4.KAVERNENKRAFTHAUS.....35

6.5 UNTERWASSERSTOLLEN……36
6.6 AUSLAUFBAUWERK.....37
6.7 UNTERBECKEN.....38
7 HYDRAULISCHE BERECHNUNGEN.....39
7.1 HYDRAULISCHE BERECHNUNGEN FÜR STATIONÄREN BETRIEB DES PUMPSPEICHERWERKES.....39
7.2 HYDRAULISCHE BERECHNUNGEN BEIM INSTATIONÄREN BETRIEB DES PUMPSPEICHERKRAFTWERKES.....60
8 STATISCHE BERECHNUNG DER TRIEBWASSERLEITUNG……...73
8.1 SICHERUNGSMASSNAHMEN.....73
8.2 ALLGEMEINES ZUR BERECHNUNG DER AUSKLEIDUNG.....73
9 ZUSAMMENFASSUNG.....87

LITERATUR UND QUELLENVERZEICHNISS.....89
ANHANG: PLANBEILAGE.....90

1 EINLEITUNG UND GEGENSTAND DER UNTERSUCHUNG

Die zunehmende Industrialisierung und steigende Weltbevölkerung setzen weltweiten Anstieg des Energiekonsums bzw. Stromverbrauchs voraus. Diese Situation bedingt die Errichtung von neuen Kraftwerken. Viele Länder haben erkannt, dass ein aktiver Umweltschutz betrieben werden muss und verpflichten sich die Schadstoffemissionen zu reduzieren. Aus diesem Grund ist die Ausnutzung von regenerativen Energiequellen realisiert, deren Bedeutung an der zukünftigen Energiegewinnung steigern wird /1/.

Im Unterschied zu anderen erneuerbaren Energieträger wie Wind – oder Sonnenenergie passt die Wasserkraft, aufgrund ihrer kontinuierlichen Verfügbarkeit und Regelmäßigkeit zum bestehenden Elektrizitätssystem /2/.

Im Zuge der Einhaltung des Kyoto – Protokolls werden in Europa insbesonders in Deutschland viele Windkraftwerke gebaut. In diesen Zusammenhang hat die Errichtung von Pumpspeicherkraftwerken in den letzten Jahren wieder stark an Bedeutung gewonnen.

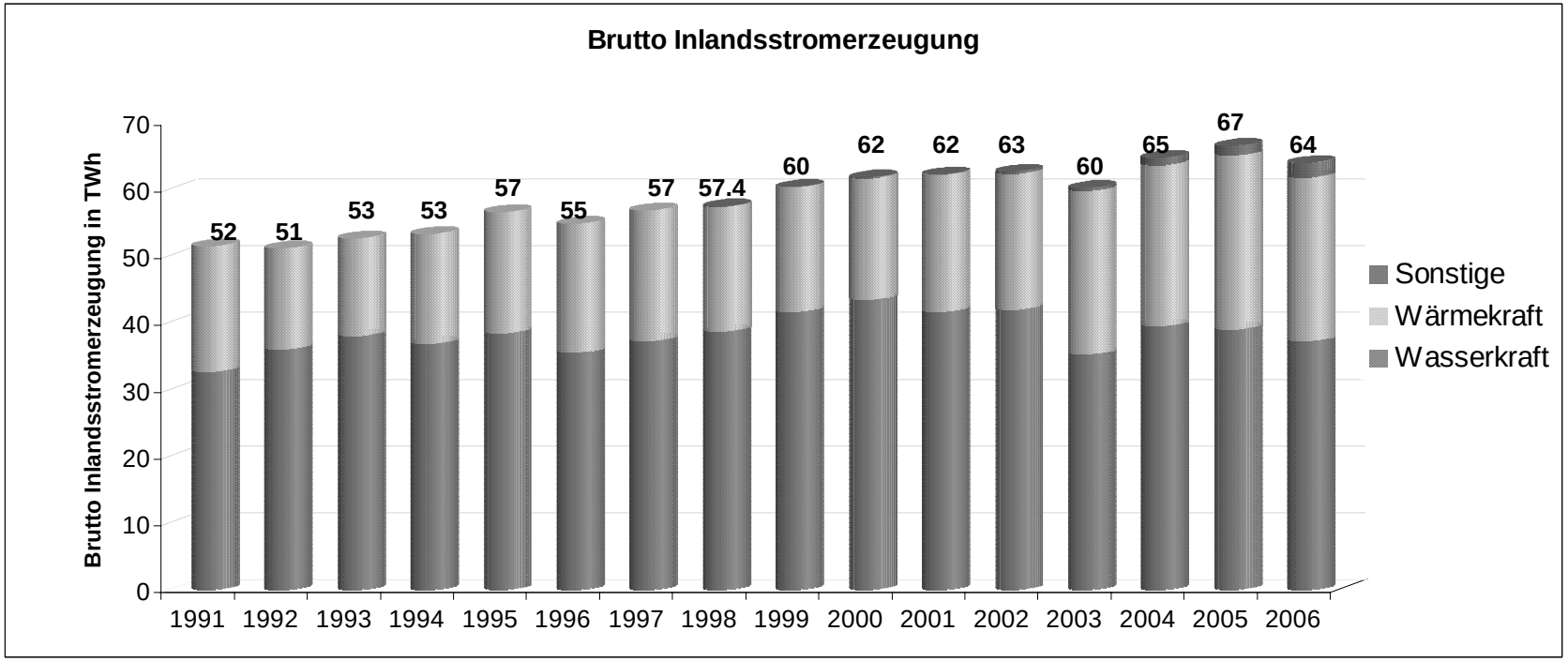
In vorliegender Diplomarbeit wird daher im Zuge einer Projektstudie die Planung eines Pumpspeicherkraftwerks durchgeführt. Es werden verschiedene Varianten miteinander verglichen und eine ausgewählte Variante detailliert ausgearbeitet.

2 ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE SITUATION IN ÖSTERREICH, DEUTSCHLAND, BULGARIEN UND WELTWEIT

In diesem Abschnitt wird die energiewirtschaftliche Situation und speziell die Elektrizitätswirtschaft in ausgewählten Ländern behandelt sowie auch die Rolle der hydraulischen Pumpspeicherung im Europäischen Verbundnetz dargestellt.

2.1 ÖSTERREICH

Die österreichische Stromerzeugung ist stark von der Wasserkraft dominiert, die sich seit Anfang der 70er Jahre etwa verdoppelt hat. Im langjährigen Durchschnitt stammen etwa 70% der inländischen Stromerzeugung aus Wasserkraft.
Der Anteil der Wärmekraftwerke liegt dementsprechend im langjährigen Mittel bei etwa 30 % und konzentriert sich auf die großen Anlagen im Wiener Raum und in den Landeshauptstädten Linz, Graz und Salzburg sowie bei den energieintensiven Industrieanlagen (Abb. 2.1) /3/.



Quelle: e - control

Abb.: 2.1 Österreichische Brutto-Inlandsstromerzeugung – Jahresreihe (1991 – 2006)

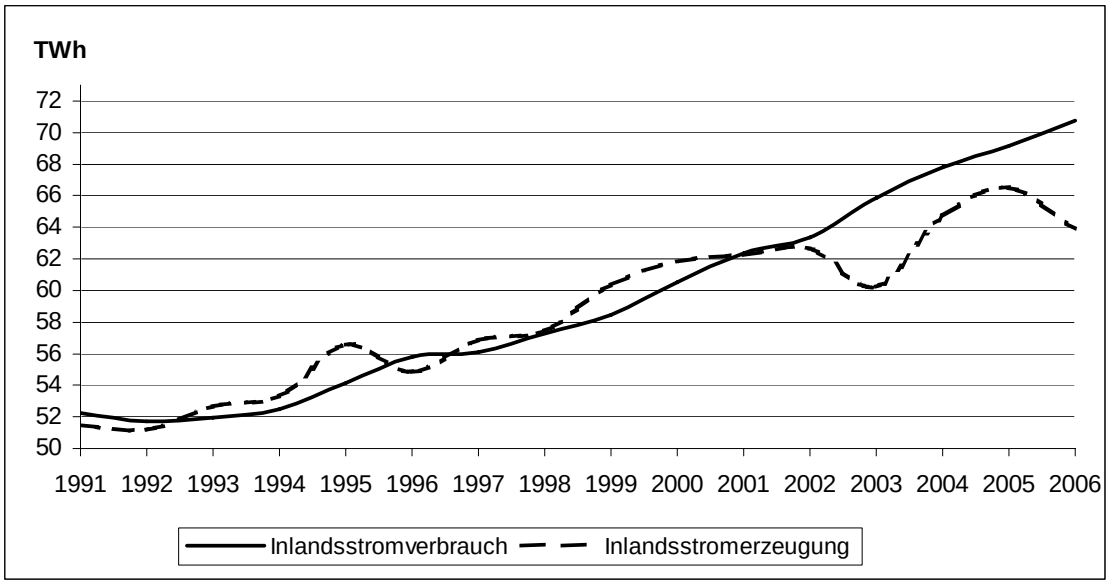
In letzten Jahren steigert sich die Stromproduktion aus sonstigen Energieträgern (Wind, Photovoltaik, Biomasse), wobei rund zwei Drittel der anerkannten Ökostromanlagen auf Basis Windenergie und fester Biomasse sind.

Stein – und Braunkohlekraftwerke decken knapp 10 % des Stromverbrauchs. Heizöl trägt 4 % und Erdgas etwa 14% zur Erzeugung bei. Annähernd 50% der inländischen Stromerzeugung stammen aus Lauf – und 20% aus Speicherkraftwerken. Der Anteil der sonstigen Energieträgern liegt derzeit bei 2%.

Rund 80% der Stromerzeugung der Wärmekraftwerke stammen aus Anlagen mit Kraft – Wärme – Kopplung (KWK) /3/. In die KWK – Anlagen wird die bei der Stromerzeugung anfallende Wärme nicht wie bei konventionellen Kraftwerke an die Umwelt abgegeben, sondern für andere Zwecke (z. B. industrielle) genutzt. Die gemeinsame Nutzung der elektrischen Energie und der Wärme führt zu einer Primärenergieeinsparung und auch zu einer Emissionsreduktion /4/.

In Österreich die Stromerzeugung aus Kraft – Wärme – Kopplungsanlagen erfolgt fast zur Hälfte aus Naturgas, und wird ergänzt durch die Energieträger Erdöl (25%), flüssige Biomasse (14%) und Steinkohle (7%) /3/.

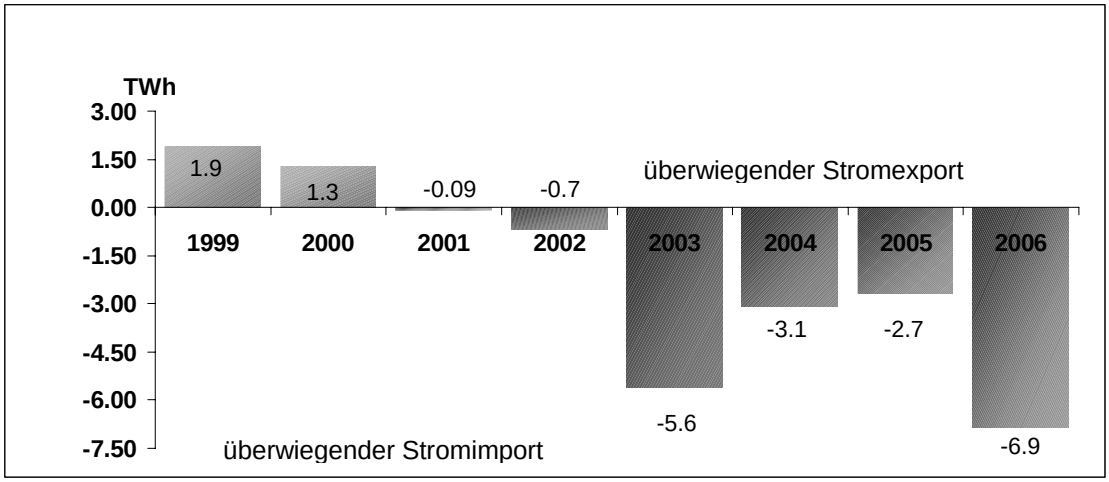
Bis in die 90-er Jahre hat Österreich mehr Strom erzeugt, als das Land verbraucht. Der Strombedarf aber steigt kontinuierlich mit der Fortentwicklung des Lebensstandards. Der Verbrauchsanstieg über die vergangenen 6 Jahre beträgt durchschnittlich 2.6 % pro Jahr, während der Stromproduktion kaum 0.5 % jährlich gestiegen ist (Abb. 2.2).



Quelle: e - control

Abb.: 2.2 Österreichischer Inlandsstrombedarf – Jahresreihe (1991 – 2006)

Die Stromerzeugung ist nicht mit dem Verbrauch mitgewachsen, d.h. Österreich muss viel mehr Strom importieren, damit es den Bedarf decken kann. Ein größter Teil von dem bezogenen Strom kommt aus Deutschland, Tschechien, Ungarn und der Schweiz. Abb. 2.3 veranschaulicht der Austauschsaldo der Stromexporte und –importe.



Quelle: e – control

Abb.: 2.3 Saldo der Stromexporte und –importe

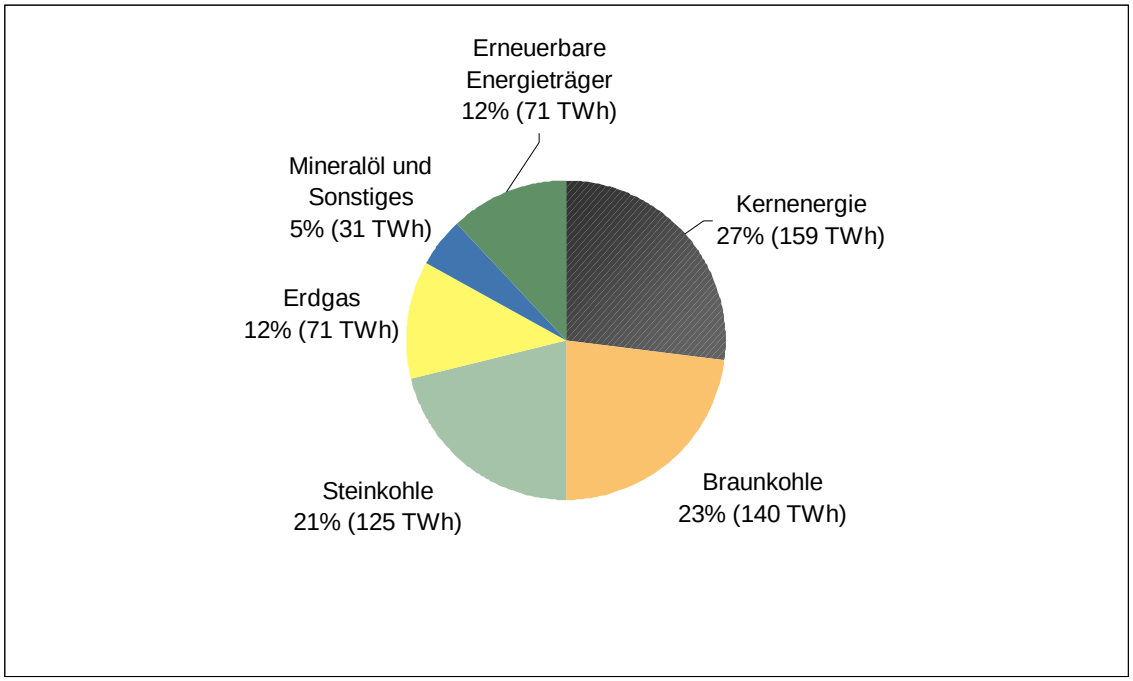
2.2 DEUTSCHLAND

Eine hohe Versorgungssicherheit wird in Deutschland durch einen vielfältigen Energiemix garantiert.

In dieser Vielfalt deckt die Kernenergie einen großen Anteil ab, sowie auch die Stromerzeugung aus Braunkohle und Steinkohle. Seit Mitte der 90er Jahre hat sich die Stromproduktion aus regenerativen Energien kräftig erhöht. Eine Publikation der Verband der Elektrizitätswirtschaft (VDEW) zeigt einen Anstieg der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen von 15 % für ein Jahr.

Nach ersten Erhebungen hat VDEW (Verband der Elektrizitätswirtschaft) ermittelt, dass die gesamte deutsche Netto-Stromproduktion im Jahr 2006 im Vergleich mit 2005 um 2.6 % auf 596.1 TWh gestiegen ist. Die Stromerzeugung in 2006 ist zwischen den verschiedenen Energieträger wie folgt geteilt /5/:

- Kernenergie – 159 TWh
- Braunkohle – 140 TWh
- Steinkohle – 125 TWh
- Erdgas – 71 TWh
- Mineralölprodukte und Sonstiges – 31 TWh
- Aus regenerativen Energie – 71 TWh



Quelle: VDEW

Abb.: 2.4 Deutsche Netto-Stromerzeugung im Jahr 2006 /5/

Unter Netto-Stromerzeugung ist die an den Generatorklemmen gemessenen Stromerzeugung einer Anlage abzüglich des für ihren Betrieb erforderlichen Energieverbrauchs zu verstehen.

Die Netto-Stromerzeugung aus regenerativen Energie für 2006 beträgt 71 TWh, wobei 30.5 TWh aus Windenergie, 21.3 TWh aus Wasserkraft, 17.6 TWh aus Biomasse und 2.0 TWh aus Photovoltaik produziert sind (Abb.: 2.5) /5/.

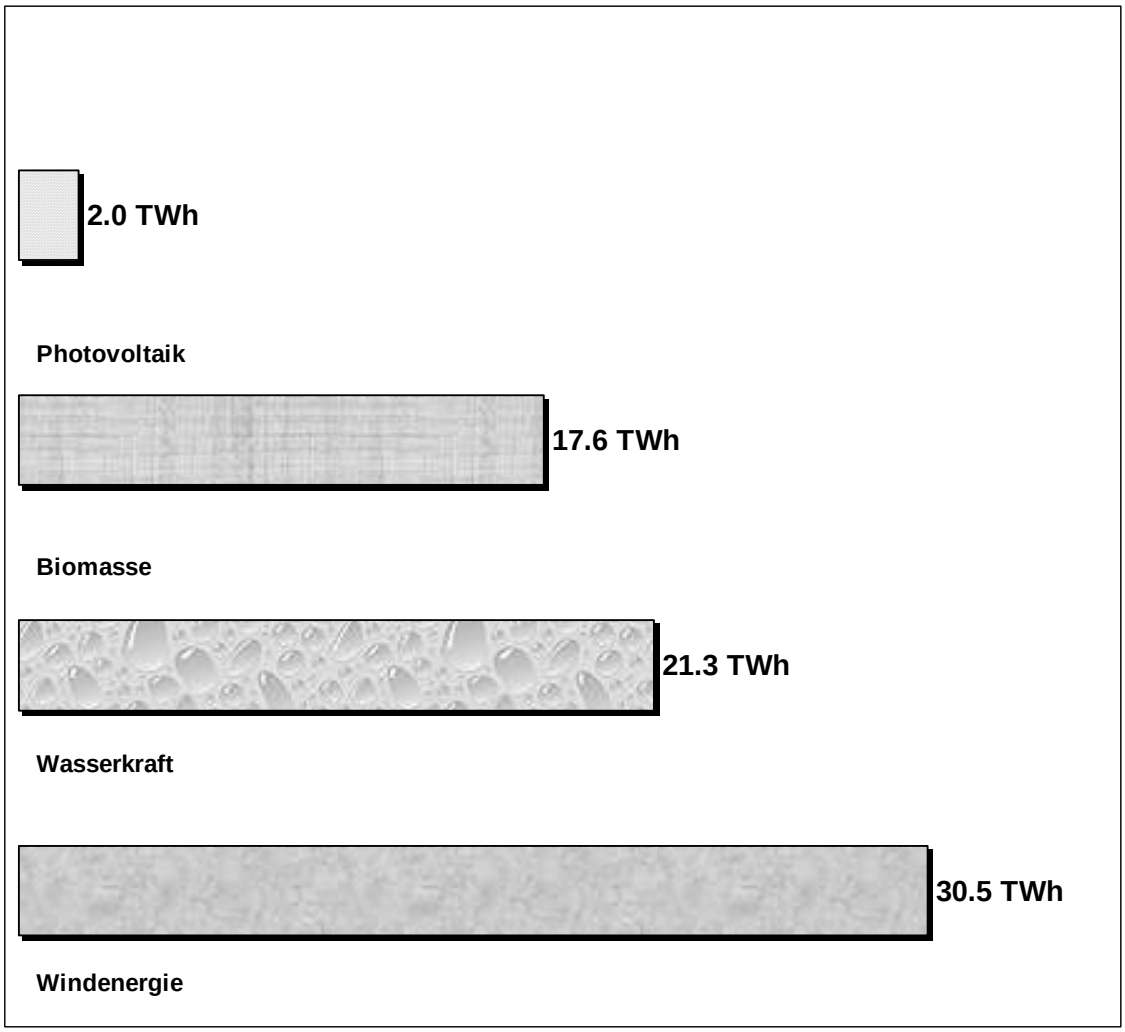
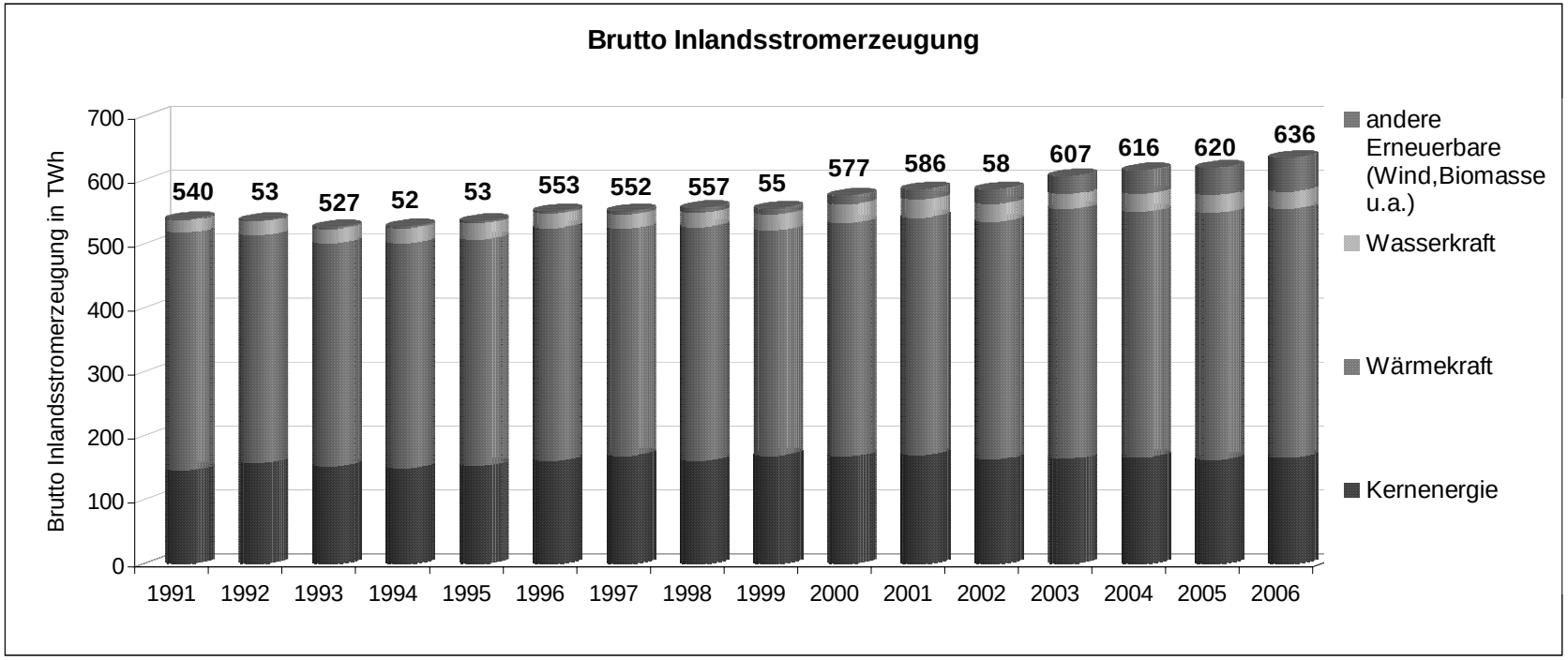


Abb.: 2.5 Verteilung der Netto-Ökostromproduktion zwischen den entsprechenden Energieträgern – 2006 /5/

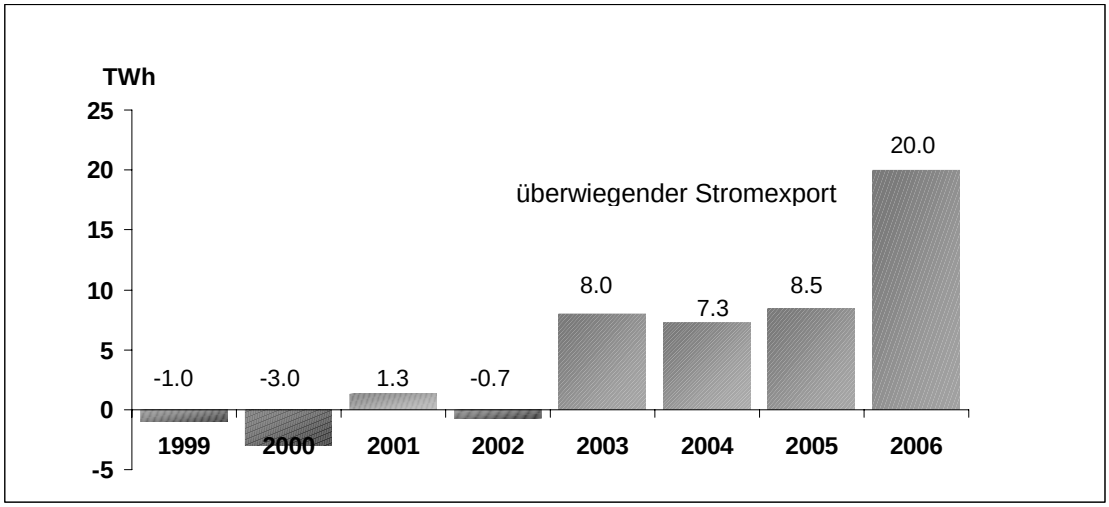
In der Abb.: 2.6 ist eine Jahresreihe der gesamten deutschen Stromproduktion dargestellt, wo der starke Anstieg der Erzeugung aus regenerativen Energie deutlich erkennbar ist.



Quelle: BMWi – Energiedaten

Abb.: 2.6 Deutsche Brutto-Inlandsstromerzeugung – Jahresreihe (1991 – 2006) /6/

Das Wachstum des Stromverbrauchs ist ziemlich konstant (ca. 1%) und liegt unter dem Anstieg der Brutto-Inlandserzeugung von 2.7% pro Jahr. Dies gibt Deutschland die Möglichkeit mehr Strom ins Ausland zu liefern (Abb.: 2.7). Wichtige Abnehmer sind Niederlande, die Schweiz, Österreich und Luxemburg.

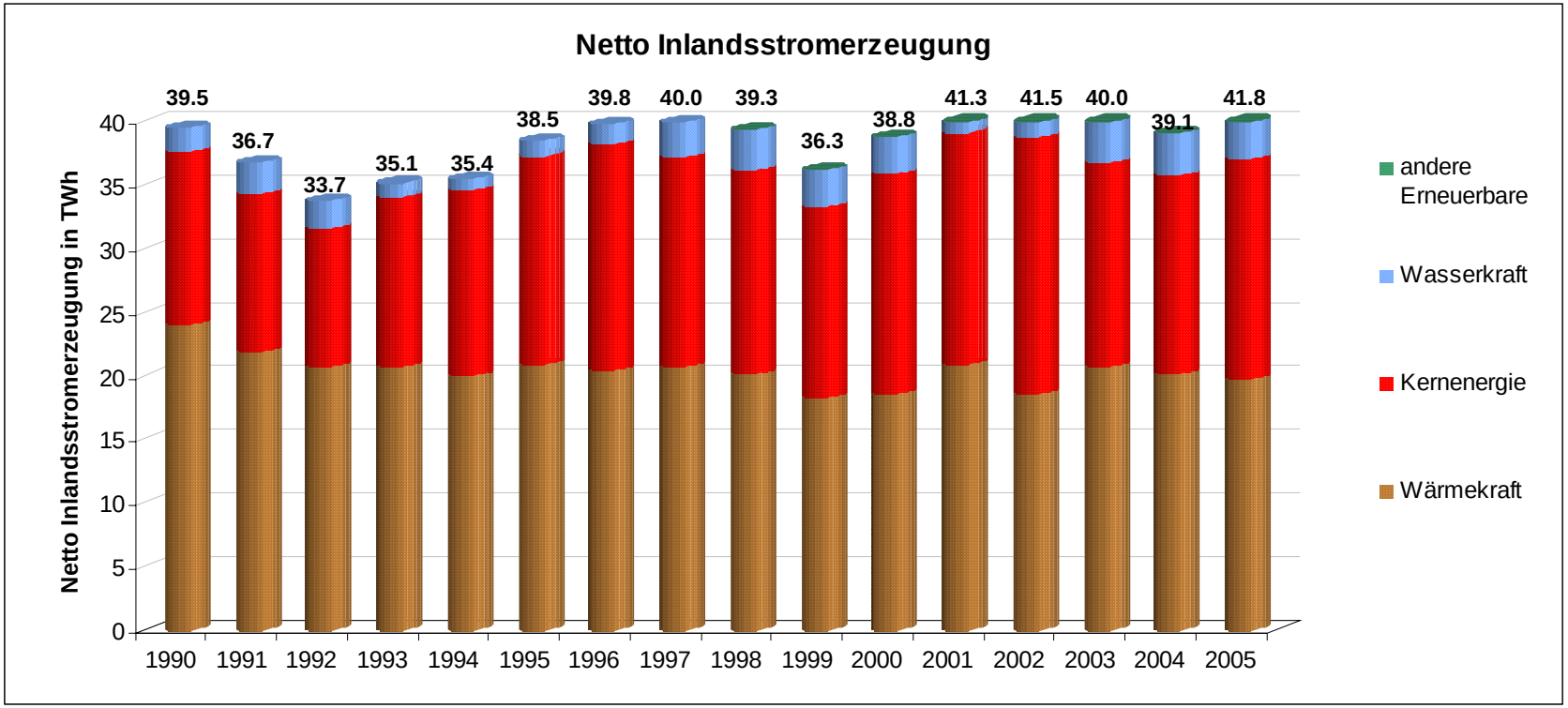


Quelle: BMWi – Energiedaten /6/

Abb.: 2.7 Austauschsaldo der Stromexporte und –importe

2.3 BULGARIEN

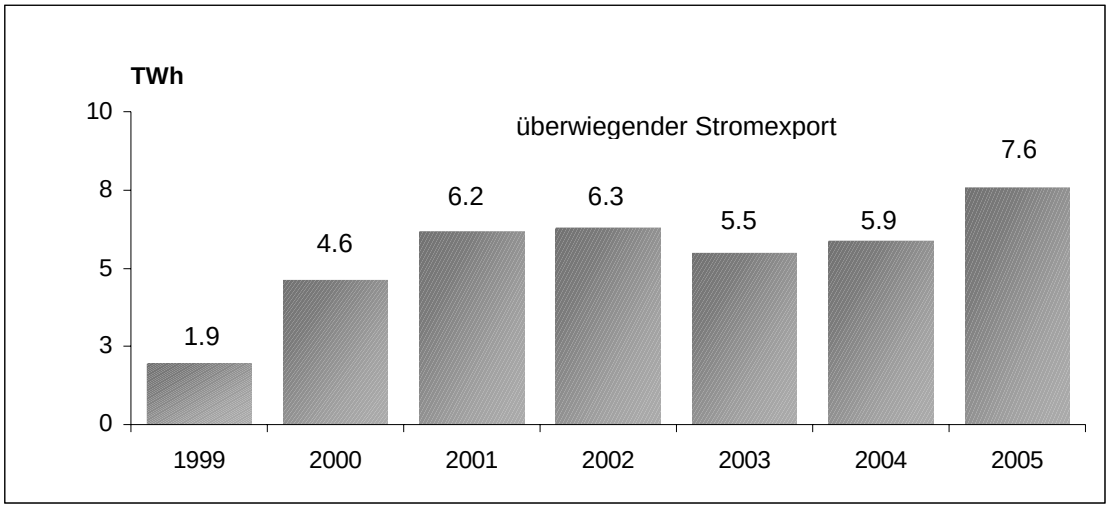
Die Stromerzeugung in Bulgarien stammt vorwiegend aus Wärmekraft und Kernenergie. Die Wärmekraftwerke produzieren etwa 47% des Energiebedarfs des Landes und werden mit Steinkohle, Braunkohle und Erdöl betrieben. Der zweitbedeutendste Energieträger ist die Kernenergie mit einem Anteil von 41% der gesamten Inlandstromproduktion. Darüber hinaus ist auch die Nutzung der Wasserkraft von Bedeutung. Die andere erneuerbare Energiequellen haben zur Zeit geringfügige Teilnahme an der Deckung des Strombedarfes. Deren Ausbau in der Zukunft ist ein Schwerpunkt der bulgarischen Energiepolitik (Abb.: 2.8).



Quelle: EIA

Abb.: 2.8 Bulgarische Netto-Inlandserzeugung – Jahresreihe (1990 – 2005)

Dank dem gleichmäßigen Stromverbrauch und steigender Erzeugung ist Bulgarien ein Stromexportland. Gemäß EIA (Energy Information Administration) wird seit 1999 überwiegenden Strom exportiert (Abb.: 2.9).



Quelle: EIA

Abb.: 2.9 Saldo der Stromexporte und –importe für Bulgarien

2.4 WELTWEIT

Die weltweite energiewirtschaftliche Situation in bezug auf die Stromproduktion ist in Abb.: 2.10 und Abb.: 2.11 dargestellt. Hierbei wird die Netto-Stromproduktion von verschiedenen Ländern mit dem Anteil der Wasserkraft an der Deckung des Strombedarfs verglichen.

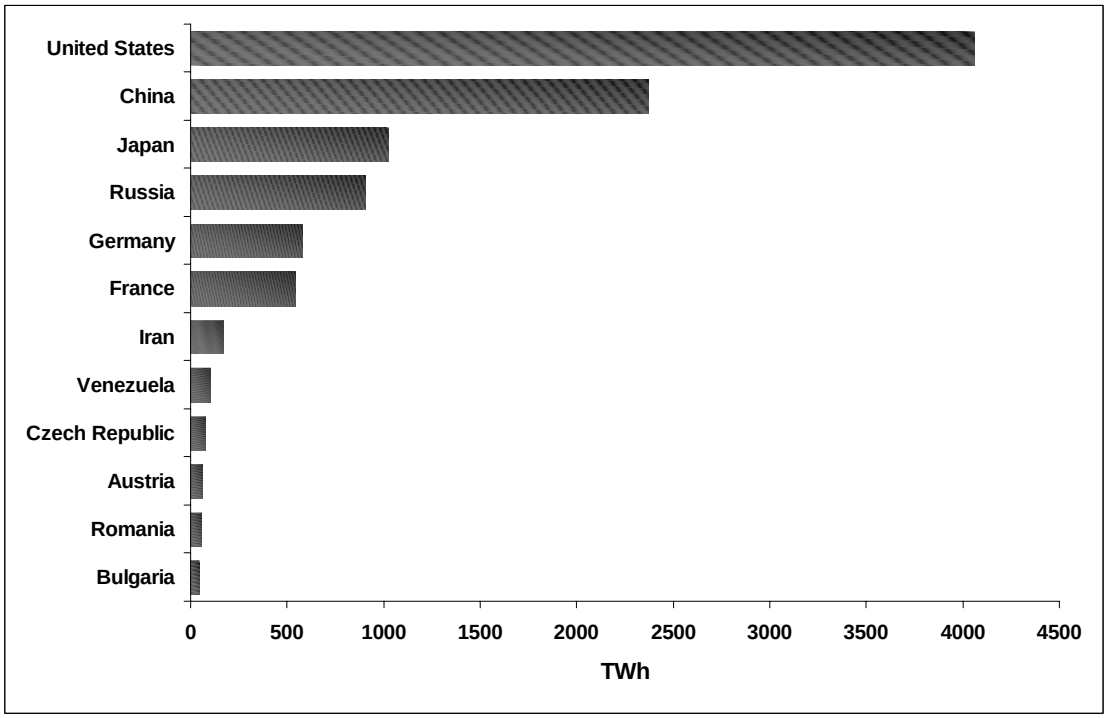


Abb.: 2.10 Weltweite Netto-Stromproduktion im Jahr 2005 Quelle: EIA

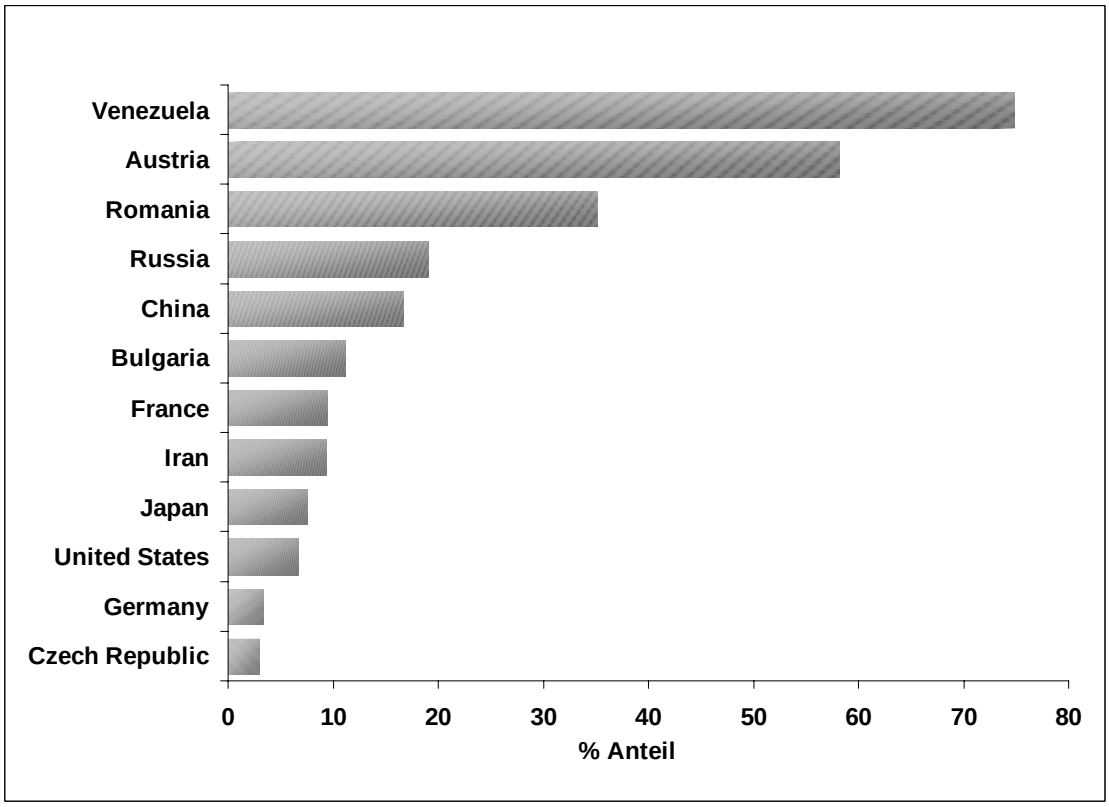


Abb.: 2.11 Wasserkraftnutzung für Stromerzeugung als Prozentanteil (2005)

2.5 DIE ROLLE DER HYDRAULISCHEN PUMPSPEICHERUNG IN EUROPÄISCHE VERBUNDNETZ

Der Bedarf an elektrische Energie ändert sich auch im Laufe eines Tages ständig und teilt sich in Grund-, Mittel-, und Spitzenbedarf. Die Grund-, und Mittellast ist von Lauf-, Wärme-, und Speicherkraftwerke gedeckt, während die Pumpspeicherkraftwerke Spitzenlast abdecken. Die Pumpspeicherkraftwerke verwirklichen einen Ausgleich zwischen Energieüberschuss und Energiebedarf im regionalen, überregionalen und internationalen Verbundnetzen (Abb.: 2.12).

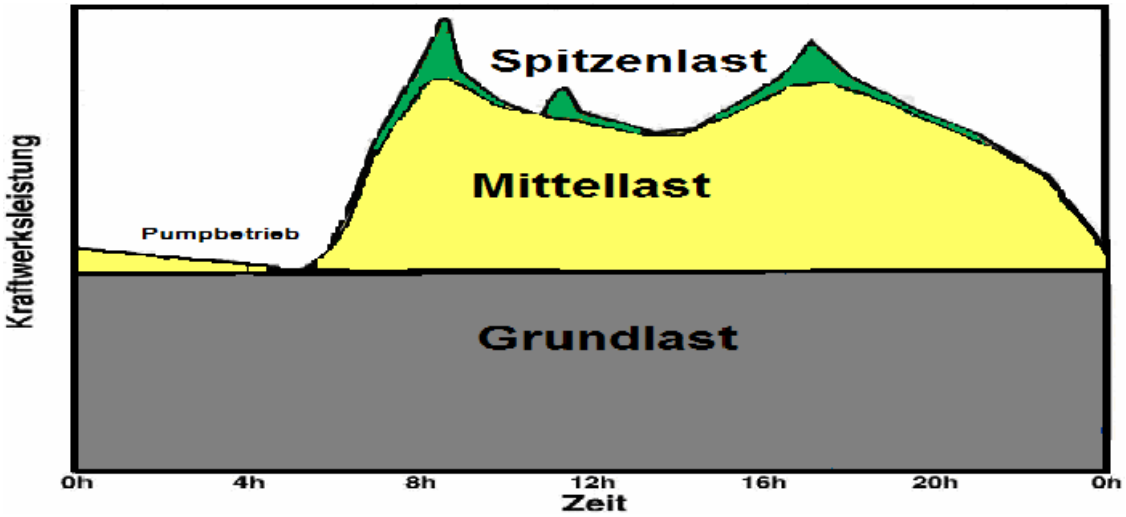


Abb.: 2.12 Schema eines Tagesbelastungsdiagramms

Die Pumpspeicherkraftwerke verwerten die Überschussstrom aus Grundlastbereich, um Spitzenenergie zu erzeugen. Auf diese Wiese realisiert sich eine Energieveredelung. Beim plötzlichen Ausfall großer Abnehmer nehmen die Pumpspeicherkraftwerke schnell die Überschussleistung auf. Diese Anlagen sind auch für die Netzregulierung gut geeignet. Die kurzzeitige Inbetriebnahme einer Pumpspeicheranlage ermöglicht die Überbrückung von Kraftwerksausfälle (z.B. Windkraftwerke) im Verbundnetz.
Die Differenz zwischen dem niedrigen Aufwand für den Pumpbetrieb und dem hohen Einkommen aus der Stromlieferung begründet die Wirtschaftlichkeit der Pumpspeicherkraftwerke /7/.

3 ALLGEMEINE ENTWURFSGRUNDSÄTZE FÜR DEN BAU EINES PUMPSPEICHEKRAFTWERKS

Wie schon erwähnt ist die Nutzung der überschüssigen elektrischen Energie des Verbundnetzes für Speicherung von hochwertiger Spitzenenergie in Form hydraulischer Lageenergie die Hauptaufgabe eines Pumpspeicherwerkes. Die gespeicherte potentielle Energie wird wieder in elektrischen Strom umgewandelt und ins Netz gespeist, wenn die Bedarfsspitzen sonst nicht gedeckt werden können.

Das Arbeitsprinzip eines Pumpspeicherwerkes ist laut E.Mosonyi / Wasserkraftwerke Bd. II, Budapest 1959 / folgendermaßen definiert:

„Zu Zeiten geringen Leistungsbedarfes nutzt die Pumpe die überschüssige elektrische Energie des Netzes, um durch Förderung von Wasser aus dem *unteren Becken* das obere Becken aufzufüllen. Treten dagegen im Strombedarf Spitzen auf, setzt der Kraftwerksbetrieb ein, aus *dem oberen Becken* strömt das Wasser in der Regel durch dasselbe Druckrohr auf die Turbinen und gelangt, elektrische Energie erzeugend, in das untere Becken zurück. Diese Aufgabe wird durch Vereinigung einer Pumpanlage, zweier Speicherbecken und eines Wasserkraftwerkes zu einer Anlage gelöst, die ebendeshalb»Pumpspeicherwerk« genannt wird.“

Diese Definition gibt eine klare Vorstellung sowohl für das Arbeitsprinzip als auch für den Begriff Pumpspeicherwerk.

Abb. 3.1 veranschaulicht das Kraftwerksprinzip, wobei mit **1** der Turbinenbetrieb und mit **2** der Pumpbetrieb der Anlage beschrieben ist /8/.

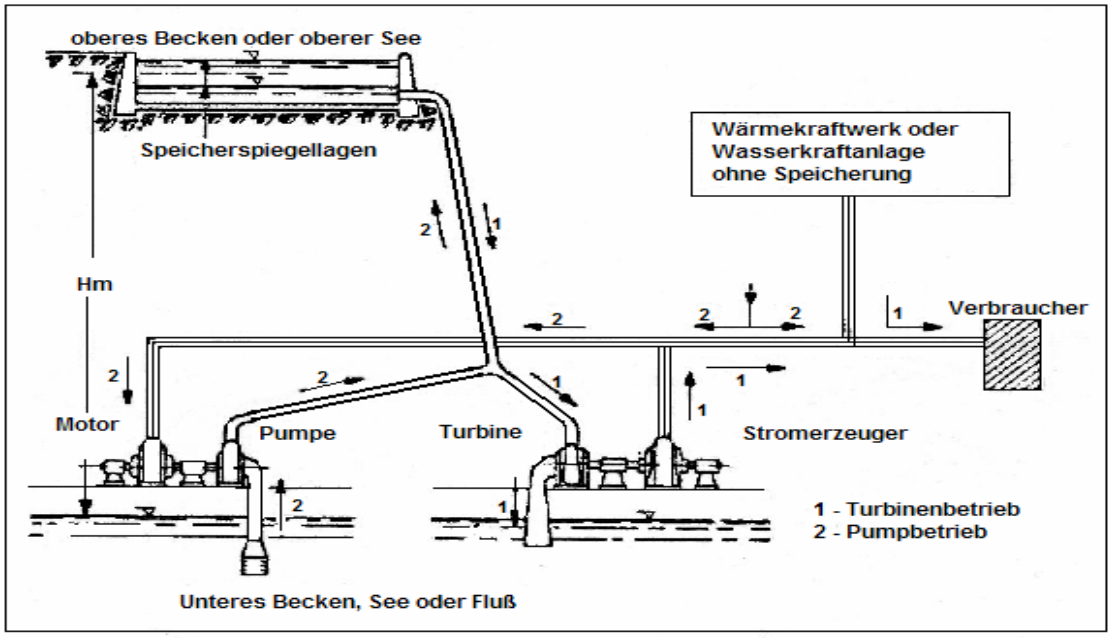


Abb.: 2.1 Prinzipskizze eines Pumpspeicherkraftwerkes

3.1 HAUPTTEILE UND BETRIEBSARTEN

In der Praxis sind zwei Hauptgruppen von Pumpspeicherkraftwerke zu unterscheiden:

a) Reine Pumpspeicherwerke, bei denen die Spitzenenergie nur mit dem vom Unter – ins Oberbecken hochgepumpten Wasser erzeugt wird, d.h. ins Becken gibt es keinen natürlichen Zufluss.

b) Gemischte Pumpspeicherwerke – in diesem Fall wird ein Teil von dem brauchbaren Wasservolumen vom Unter – ins Oberbecken hochgepumpt und auch natürliche Zuflüsse im Oberbecken gesammelt. Üblicherweise sind diese Pumpspeicherwerke mit einer Hochdruckanlage kombiniert.

In Abhängigkeit der Spitzenlast, die bewältigt werden soll, kann eine Einteilung der Pumpspeicherwerke auch folgendermaßen getroffen werden:

a) Tagespumpspeicherwerke, die zusätzliche Leistungen während des Tagesspitzenverbrauchs übernehmen

b) Pumpspeicherwerke mit Wochenendespeicherung – größere Beckeninhalte

c) Jahrespumpspeicherwerke

Folgende Hauptbauwerke bilden das System eines Pumpspeicherkraftwerkes:

- Oberbecken und Unterbecken
- Einlauf – bzw. Auslaufbauwerk
- Stollen und Triebwasserleitung
- Unterwasserleitung
- Krafthaus

Als Ober – und Unterbecken können sowohl natürliche Becken (fließende oder eingestaute Gewässer), als auch künstliche Becken dienen. Aus wirtschaftlichem Gesichtspunkt ist es günstiger Seen oder Flüsse als Reservoirs zu benutzen. In vielen Fällen bieten aber die Naturgegebenheiten keine solche Möglichkeit und die Errichtung von künstlichen Becken ist erforderlich. Künstliche Becken auf Plateaus oder Höhenzügen sollen den topographischen Verhältnissen folgen und werden durch Ringdämme ausgebildet.

Ein weiteres bedeutsamen Hauptbauwerk ist die Triebwasserleitung. Die kann als Druckrohrleitung oder als Stollen bzw. Schacht (vertikal oder geneigt) ausgeführt werden. Aus wirtschaftlichen Gründen wird die Kombination zwischen Schacht und Stollen bevorzugt. In Abhängigkeit von den geologischen und topographischen Standortfaktoren werden die Lage und der Typ des Krafthauses gewählt.

3.2 KRAFTHAUSTYPEN UND MASCHINELLE AUSRÜSTUNG

Die Größe und die Standortwahl des Krafthauses ist sowohl von der Geologie und Geomorphologie des Gebietes als auch von der Entfernung zwischen den Becken und von dem Aufbau und Anzahl der Maschinensätze abhängig. Die Errichtung der Kraftstation als Kaverne oder in offener Bauweise als Schacht– oder Unterflurkraftwerk ist eine individuelle Lösung.

Bei großen Wasserspiegelschwankungen im Unterbecken sind unterirdische Krafthäuser bevorzugt. Diese Krafthausanordnung ist auch bei guten felsmechanischen Verhältnisse wirtschaftlich. Falls die Triebwasserleitung oberirdisch geplant ist, kommt in der Regel nur noch eine Schachtlösung zur Anwendung /8/, /9/.

Die Querschnittgestaltung des Krafthauses hängt von der Wellenanordnung (vertikale oder horizontale) der Maschinensätze ab. Beide Ausführungstypen besitzen Vor– und Nachteile. Die horizontalachsige Anordnung vereinfacht die Konstruktion des Gebäudes.

Bei diesen Typ ist eine geringe Gründungstiefe bzw. beim Kavernenkrafthaus eine geringe Ausbruchshöhe erforderlich. Größe Vorteile sind die Übersichtlichkeit im Betrieb und der einfache Ein– und Ausbau der Maschinen. Anderseits vergrößert sich die Grundfläche des Krafthauses. Im Vergleich dazu, ist die vertikalachsige Ausführung leicht anpassbar und hat eine geringere Grundfläche. Die Nachteile hier sind die geringere Übersichtlichkeit des Betriebes, die tiefe Gründung und die besondere Hilfseinrichtungen für den Ein– und Ausbau der Maschinen, die diese Anordnung erfordert (Abb. 2.2) /8/.

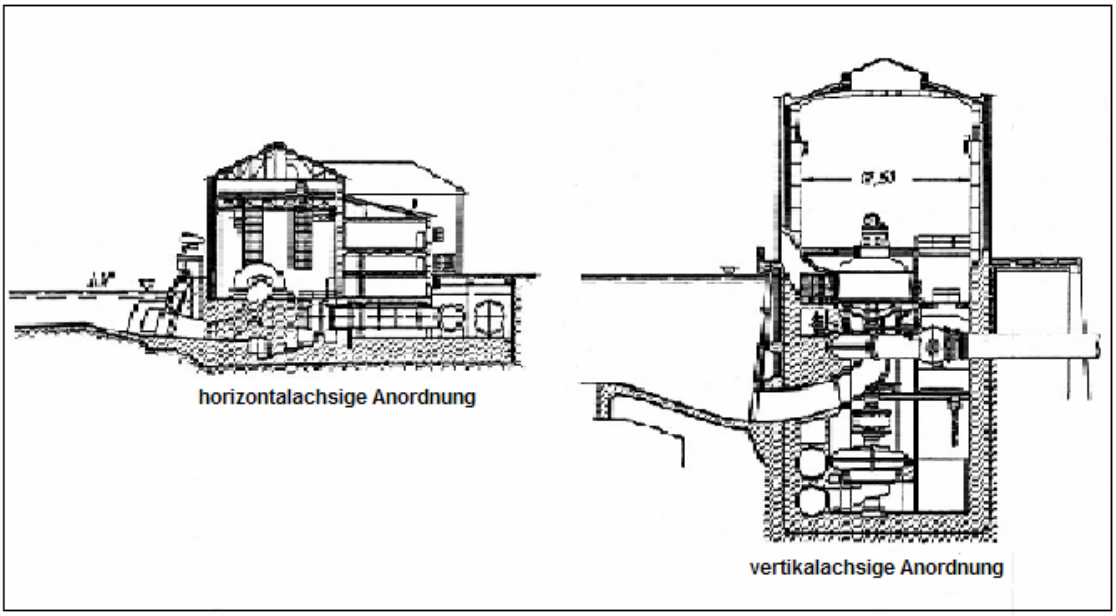


Abb. 2.2 Horizontale und vertikale Wellenanordnung der Maschinensätze

Die Abmessungen des Krafthauses werden durch Größe, Anzahl, Bauform und Anordnung des Maschinensatzes bestimmt.

Die übliche Bauformen von Maschinensätzen sind:

a) Zweimaschinensätze – bestehen sich aus hydraulischen reversiblen Pumpturbinen (Umkehrmaschine), die mit einem Motorgenerator gekuppelt ist.
b) Dreimaschinensätze – der Motorgenerator ist mit getrennten Pumpen und Turbinen gekuppelt
c) Viermaschinensätze – aus selbständigen hydraulischen und elektrischen Maschinen (sowohl getrennten Pumpen und Turbinen, als auch einzelne Motoren und Generatoren)

4 VARIANTENSTUDIUM FÜR DAS UNTERSUCHTE PROJEKT

Im Zuge dieser Projektstudie wurden verschiedene Varianten untersucht und ihre Vor- und Nachteile verglichen. Danach ist eine nach herstellungstechnischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten „Optimierte“ Variante detaillierter ausgearbeitet worden.

4.1 PROJEKTSGESCHICHTE

Die SALZBURG AG hat die Errichtung eines Pumpspeicherkraftwerks im Gebiet Zauchensee in Bundesland Salzburg ins Auge gefasst. Als Oberbecken soll der Seekarsee genutzt werden (Abb.: 4.1). Zur Zeit dient dieser See für die Beschneiung des angrenzenden Skigebietes, er besitzt ein Wasservolumen von 450000 m^3. Durch den Aufbau einer Betonmauer soll der Inhalt auf $3*10^6$ m^3 vergrößert werden.

Abb. 4.1 Oberbecken Seekarsee

Das Unterbecken ist am Pleißlingbach neben Napfwald und Schauphof geplant. Ein Nutzvolumen von ca. 1Mio. m^3 ist vorgesehen. Das erforderliche Betriebswasser wird aus dem Pleißlingbach ins Ausgleichsbecken geführt. Die Kenndaten für die Becken sind wie folgt:

- Unterbecken
  - Stauziel (STZ) 1070 m ü.A.
  - Absenkziel (ASZ) 1040 m ü.A.

- Oberbecken
  - Stauziel (STZ) 1980 m ü.A
  - Absenkziel (ASZ) 1935 m ü.A.

Die maschinelle Ausrüstung des Krafthauses mit 2 Pumpturbinensätzen mit vertikaler Welle ist von Seiten der SALZBURG AG vorgesehen. Als Planungsgrundlagen für die vorliegende Variantenuntersuchung dienen die folgenden hydraulischen und maschinellen Kenndaten:

Max. Bruttofallhöhe	940 m
Min. Bruttofallhöhe	870 m
Turbinentype	Francis-Pumpturbine Reversible, vertikal 4-stufig, unreguliert
Anzahl der Turbinen	2

Nenndrehzahl	600	rpm
Durchgangsdrehzahl - statisch	850	rpm
Durchgangsdrehzahl - dynamisch	870	rpm
Nennleistung Turbine	103.4	MW
Nennfallhöhe Turbine	885	m
Nenndurchfluss Turbine	13.0	m^3/s
Max. Turbinenleistung	111.7	MW
Nennförderhöhe Pumpe	915	m
Nennmotorleistung Pumpe	118.2	MW
Nennfördermenge Pumpe	11.9	m^3/s
Max. Motorleistung Pumpe inkl. Reserve	124	MW
Laufraddurchmesser D1	2.20	m
Laufraddurchmesser D2	1.39	m
Laufschaufelanzahl	7	-
Stützschaufelhöhe b3	0.192	m
Stützschaufelanzahl z3	12	-
Umlenkschaufelanzahl	12	-
Kugelschieberdurchmesser NW	1.2	m
Einbautiefe Hs	-45.0	m

4.2 VARIANTEN

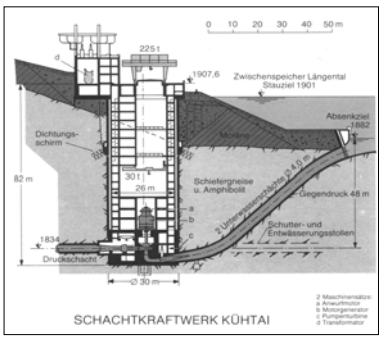
Auf Wunsch der SALZBURG AG wurde die Variantenuntersuchung für das Pumpspeicherkraftwerk Seekar auf die Ausarbeitung von Varianten alleine auf die Führung des Triebwasserweges im Längsprofil und auf die Lage des Krafthauses beschränkt.

Die horizontale Lage der Triebwasserleitung war bereits in einer Vorstudie der SALZBURG AG festgelegt worden.

Die topographischen Gegebenheiten begünstigen eine unterirdische Lösung des Kraftabstieges. Daher wurde die Ausarbeitung einer Variante mit einer oberirdisch verlegten Druckrohrleitung aus technischen und Umweltschutzgründen nicht näher ausgeführt. Das Krafthaus kann als Kaverne oder als Schacht ausgeführt werden.

4.2.1 VARIANTEN 1 UND 2 (SCHRÄGSCHACHT)

Über das Entnahmebauwerk gelangt das Wasser in einen geneigten Schacht. Aus bauverfahrenstechnischen Gründen (Ausbruchsmaterial rutscht selbstständig ab) soll der Schrägschacht mit einer Neigung von 35 bis 40° ausgeführt sein. Über dem Schacht soll auch eine ausreichende Felsüberdeckung gewährleistet sein. Bei der Planung der 2 Varianten mit Schrägschacht sind diese Anforderungen berücksichtigt.
Am Ende des Schrägschachtes beginnt ein nahezu horizontaler Stollen, der das Wasser zum Kraffthaus zuführt. Diese Strecke bei der Variante 2 mit dem Schachtkraftwerk ist länger als bei der Kavernenlösung (Variante 1), dafür verkürzt sich die Unterwasserleitung beim Schachtkrafthaus.



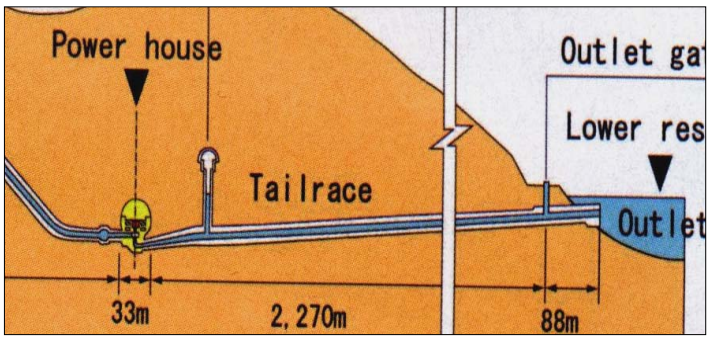


Abb.: 4.2 Ausführung der Unterwasserleitung bei Schachtkrafthaus und Kaverne /10/

4.2.2 VARIANTEN 3 UND 4 (LOTSCHACHT)

Wie bei modernen Pumpspeicherkraftwerken üblich weisen diese Varianten eine Ausführung des Triebwasserkanals mit Lotschacht und leicht geneigtem Druckstollen auf.
Nach dem Entnahmebauwerk beginnt ein tiefer Lotschacht der in einem beinahe horizontalen Druckstollen übergeht. Als Krafthaustypen sind wieder eine Kaverne (Variante 3) bzw. ein Schachtkrafthaus (Variante 4) vorgeschlagen worden.

4.3 VOR- UND NACHTEILE DER VARIANTEN

Die Wirtschaftlichkeit der Herstellung von Schrägschächte ist durch die Anforderungen der Ausführung bestimmt. Für eine einfache Schutterung von selbstständig herunterfallenden Ausbruchsmaterial ist damit eine Mindestneigung von 35° erforderlich, dass auch entsprechende Einsparungen realisiert werden können. In den untersuchten Varianten besitzt der Schrägschacht eine Länge von 1450 m. Der Bau von so langen (stark) geneigten Schächten ist üblicherweise aufwendiger (Fräs- oder mit Alimakvortrieb) als ein mit dem Raise – Boring – Verfahren hergestellter Lotschacht.

Bei den Varianten 2 und 4 mit dem Schachtkraftwerk ist der Unterwasserweg kürzer als bei den Kavernenvarianten 1 und 3. Die Lösung mit den Schachtkrafthausvarianten wäre wirtschaftlicher, wenn die Einbautiefe der Pumpturbine kleiner als die erforderliche (45m) ist. Aus diesem Grund wurde die Errichtung eines Schachtkrafthauses verworfen und die Variante 3 für die detailliertere Ausarbeitung gewählt.

5 WAHL DES OPTIMALEN STOLLEN- BZW. SCHACHTDURCHMESSERS

Die Bestimmung des Stollendurchmessers erfolgt durch eine Wirtschaftlichkeitsberechnung bei der die Summe der Stollenherstellungskosten und der Erlöse (Energiegewinn) durch Reduktion der hydraulischen Verluste ein Minimum ergeben.

5.1 VORBEMESSUNG DER SCHACHTAUSKLEIDUNG

Vor den Berechnungen für die Bestimmung des optimalen Leitungsdurchmessers ist eine Vorabschätzung für die Belastbarkeit der Triebwasserleitungsauskleidung vorzunehmen. Auf diese Weise können die Kosten des Triebwasserweges ermittelt werden, die für die Bestimmung des optimalen Durchmessers notwendig sind. Aufgrund des von der SALZBURG AG zur Verfügung gestellten geologischen Gutachtens werden folgende Festigkeitsbeiwerte für den Felsen angenommen. Im Bereich des Lotschachtes beträgt dieser Wert f_{PR} = 9 (RMR = 70 ÷ 90 für Kalkschiefer und Kalkmarmor) und im Bereich des Stollens f_{PR} = 8 (RMR = 70 ÷ 90 für Kalkschiefer mit Phyllit und Quarzit).

Bis zu welchem Wasserinnendruck (p_i) die Leitung mit einer **Beton- bzw. Stahlbetonauskleidung** mit maximaler Dicke (h_{max}) ausgeführt werden kann, berechnet sich nach /11/ folgendermaßen:

Es wird vorweg ein erforderlicher Durchmesser D berechnet in Abhängigkeit von einer gewählten mittleren (wirtschaftlichen) Fließgeschwindigkeit v_T = 3.0 m/s mit

$$\left| \begin{array}{l} D = \sqrt{\dfrac{4 * F}{\pi}} \\ F = \dfrac{Q_A^T}{v_T} = \dfrac{26}{3} = 8.67\,m^2 \end{array} \right. \Rightarrow D = 3.30m$$

Q_A^T=26m^3/s - Ausbaudurchfluss für die Pumpturbine

Für eine Betonauskleidung ergibt sich nach folgender Faustformel eine maximale Auskleidungsdicke von

$$h_{max} = 0.15 * r_1 = 0.25m$$

$$h = \frac{r_1 * (p_i - K_o * e)}{\gamma_c * R_b + K_o * e} \; [cm] - \text{ Betonauskleidungsstärke} \qquad (Gl.5.1)$$

$$p_i = \gamma_W * H \; [MPa] - \text{ Wasserdruck innen}$$

$$r_1 = \frac{D}{2} = 1.65m$$

$$K_o = 5100 N/cm^3 \text{ (für } f_{PR} = 9) - \text{ Felswiderstand}$$

$$e = 0.25 * 10^{-4} * \gamma_c * R_b * lg(0.05 * K_o + 10) \; - \text{Beiwert} \qquad (Gl.5.1.1)$$

$$\gamma_c = 1 - \text{ für Betonauskleidung } - \text{ Beiwert für Betriebsbedingungen}$$

$$R_b \; [MPa] - \text{ Zugfestigkeit des Betons}$$

Die zulässige (für h_{max}) Wasserdruckhöhe (H) in der Triebwasserleitung (Lotschacht) errechnet sich damit aus Gl. 5.1 mit

$$H = \frac{h_{max} * (\gamma_c * R_b + K_o * e) + r_1 * K_o * e}{r_1 * \gamma_w} \quad [m]$$

Die Berechnungen ergeben in Abhängigkeit der gewählten Betonfestigkeitsklasse

<u>für B30</u>

$$\left| \begin{array}{l} R_b = 1.2 MPa \\ \text{Aus Gl. 5.1.1} \Rightarrow e = 7.3 * 10^{-5} \end{array} \right. \Rightarrow H = 60.6m$$

<u>für B50</u>

$$\left| \begin{array}{l} R_b = 1.55 MPa \\ \text{Aus Gl. 5.1.1} \Rightarrow e = 9.4 * 10^{-5} \end{array} \right. \Rightarrow H = 78.3m$$

Eine reine Betonauskleidung kann somit unter den getroffenen Annahmen bis zu einer Innendruckhöhe von rund 78 m ausgeführt werden.

Die Berechnung für eine Stahlbetonauskleidung ergibt in Abhängigkeit der Betonfestigkeitsklassen und des Bewehrungsgrades folgende zulässigen Innendrücke:

Für Stahlbetonauskleidung:

$$h = \frac{r_1 * (p_i - K_o * e)}{\gamma_c * R_b * (1 + 30\mu / R_b) + K_o * e} \; [cm] - \text{ Betonauskleidungsstärke} \qquad (Gl.5.2)$$

μ – Bewehrungsbeiwert, angenommen : $\mu = 2\%$

$p_i = \gamma_W * H \; [MPa] -$ Wasserdruck innen

$r_1 = \frac{D}{2} = 1.65m$

$K_o = 5100 N/cm^3$ (für $f_{PR} = 9$) – Felswiderstand

$$e = 0.25 * 10^{-4} * \gamma_c * R_b * \lg(0.05 * K_o + 10) - \text{ Beiwert} \qquad (Gl.5.2.1)$$

$\gamma_c = 1.1 -$ für Stahlbetonauskleidung

$R_b \; [MPa] -$ Zugfestigkeit des Betons

Aus Gl. 5.2 folgt

$$H = \frac{h_{max} * (\gamma_c * R_b * (1 + 30 * \mu / R_b) + K_o * e) + r_1 * K_o * e}{r_1 * \gamma_w} \; [m]$$

für B30:

$$\left| \begin{array}{l} R_b = 1.2 MPa \\ \text{Aus Gl. 5.2.1} \Rightarrow e = 8.0 * 10^{-5} \end{array} \right. \Rightarrow H = 81.4m$$

für B50:

$$\left| \begin{array}{l} R_b = 1.55 MPa \\ \text{Aus Gl. 5.2.1} \Rightarrow e = 10.3 * 10^{-5} \end{array} \right. \Rightarrow H = 105.3m$$

Die Auskleidung mit Stahlbeton in Betonklasse (B50) und einem Bewehrungsgrad von 2% ist für einen Wasserinnendruck von 1.053 MPa geeignet.

Über den Lotschachteinlauf ist bereits eine max. Wasserdruckhöhe (H) von ca. 73m im Oberbecken vorhanden (siehe Plan N....).

Daher wird aus hydrodynamischen (Druckstoß) und herstellungstechnischen Überlegungen der gesamte Triebwasserweg mit einer Panzerung versehen.

5.2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN FÜR DIE ERMITTLUNG DES WIRTSCHAFTLICHSTEN DURCHMESSERS

Der Berechnung des optimalen Stollen- bzw. Schachtdurchmessers basiert auf folgendem Grundsatz /9/:

$$\sum K_{TR.I.} + \sum Z_{T.} + \sum Z_{P.} = \text{Minimum} \qquad \text{Gl. 5.3}$$

Das heißt, die Summe der jährlichen Kosten für die Triebwasserleitung, die möglichen Erlöse aus der Energiemenge, die infolge von zunehmenden Fallhöhenverlusten (Δh_T) nicht erzielt werden kann und die Kosten der jährlichen Energiemenge, die zur Überwindung des Rohrleitungswiderstandes (Δh_P) im Pumpbetrieb benötigt werden, soll ein Minimum betragen.

Die Jahreskosten und die Gegenwertsverluste (mögliche Erlöse) werden folgendermaßen errechnet:

- **Mittlere Jahreskosten für die Triebwasserleitung** $\sum K_{TR.I}$

$$\sum K_{TR.I.} = \left(\frac{p}{100} + \frac{1}{T}\right) * K_{TR.I} \qquad \text{Gl. 5.4}$$

wobei p der Prozentanteil der jährlichen Abschreibung und des jährlichen betriebsbedingten Aufwands ist. Annahme: p = 3% für unterirdische Triebwasserleitung

T – Tilgungsdauer (Rückkaufzeit) der Anlage

Annahme: $T = 10$ Jahren

$$\Rightarrow \sum K_{TR.I} = \left(\frac{3}{100} + \frac{1}{10}\right) * K_{TR.I} = 0.13 * K_{TR.I}$$

$K_{TR,I}$ – Investitionskosten für die Triebwasserleitung

$K_{TR.I} = k' * L$ wo: k'- Investitionskosten für 1 lfm Triebwasserleitung
L - Länge der Triebwasserleitung

- **Gegenwertsverluste infolge nicht erzeugte elektrische Energie**

$$\sum Z_T = W_T * e_T \qquad \text{Gl. 5.5}$$

e_T – Verkaufspreis für 1 kWh erzeugte Spitzenenergie

W_T – nicht erzeugte elektrische Energie infolge Fallhöhenverluste

$$W_T = \frac{V_T * \Delta h_T}{C_T^{'}}$$

Δh_T – Fallhöhenverluste im Turbinenbetrieb
V_T – jährlich genutztes Wasservolumen im Turbinenbetrieb
$C_T^{'}$ – Beiwert der den Turbinengesamtwirkungsgrad berücksichtigt

- **Jahreskosten an Energie, die für die Überwindung des Strömungswiderstandes beim Pumpen aufgewendet werden**

$$\sum Z_P = W_P * e_P \qquad \text{Gl. 5.6}$$

e_P – Kaufpreis für 1 kWh Pumpenergie
W_P –aufgewendete Pumpenergie

$$W_P = \frac{V_P * \Delta h_P}{C_P^{'}}$$

Δh_T – hydraulische Verluste im Pumpbetrieb
V_T – jährlich gepumptes Wasservolumen
$C_P^{'}$ – Beiwert der den Pumpengesamtwirkungsgrad berücksichtigt

5.3 BERECHNUNG DES WIRTSCHAFTLICHSTEN DURCHMESSERS

Es wurden für verschiedene Durchmessers die Herstellungskosten berechnet. Die Triebwasserleitung hat eine Länge von 2670m. Als Ausbauwassermengen des Pumpspeicherkraftwerkes wurde seitens der SALZBURG AG - 26 m^3/s im Turbinenbetrieb und 20 m^3/s im Pumpbetrieb - festgelegt. Das Pumpspeicherkraftwerk soll 6 Stunden im Turbinen- und 7 Stunden im Pumpbetrieb arbeiten.

Die Berechnungen sind in den Tabl. 5.1, Tab. 5.2 und Tabl. 5.3 dargestellt.

- **Kosten für die Triebwasserleitung**

Für die Ausführung des Triebwasserweges wurde ein Preis von 250 €/m^3 angenommen. Der Preis für 1 t Panzerung beträgt 3500 €.

$$\sum K_{TR.I} = 0.13 * K_{TR.I} \quad [€]$$

$$K_{TR.I} = k' * L \quad [€]$$

$$k' = k'_{Ausf.} + k'_{Panz.} \quad [€/m]$$

$$k'_{Ausf.} = 250 * F \quad [€/m]$$

$$F = \frac{\pi * D^2}{4} \quad [m^2] - \text{Fläche}$$

$$k'_{Panz.} = 3500 * G_{Panz.} \quad [€/m]$$

$$G_{Panz.} = \gamma_{St} * \pi * d * D \quad [t/m] - \text{Gewicht der Panzerung}$$

γ_{St} – spezifisches Stahlgewicht, $\gamma_{St} = 7.85 t/m^3$

d – Stärke der Panzerung im Mittel (Annahme: $d = 3cm = 0.03m$)

D – Triebwasserleitungsdurchmesser

D m	$G_{panz.}$ t/m	k'_{panz} €/m	F m^2	$k'_{ausf.}$ €/m	k' €/m	$K_{TR.I}$ Milln.€	$\Sigma K_{TR.I}$ Milln.€
2	1.48	5176.29	3.14	785.00	5961.29	15.92	2.07
3	2.22	7764.44	7.07	1766.25	9530.69	25.45	3.31
4	2.96	10352.6	12.56	3140.00	13492.6	36.03	4.68
5	3.70	12940.7	19.63	4906.25	17847	47.65	6.19

Tabl. 5.1 Ermittlung der mittleren Jahreskosten für die Triebwasserleitung

- **Gegenwertsverluste infolge nicht erzeugter Spitzenenergie**

$$\sum Z_T = W_T * e_T \quad [€]$$

$$W_T = \frac{V_T * \Delta h_T}{C'_T} \quad [kWh]$$

$e_T = 0.08\ €/kWh$ (von SALZBUR AG)

$V_T = Q_A^T * 6 * 3600 * 360\ \left[m^3\right] -$ jährliche Wasserlvolumen für 6h Turbinenbetrieb

$\Delta h_T = 1.05 \frac{L * v_T^2}{C^2 * R}\ \left[m\right] -$ Fallhöhenverluste $\begin{cases} \text{die örtlichen Verluste werden mit 5\%} \\ \text{der Längsverluste angenommen} \end{cases}$

$L -$ Länge der Triebwasserleitung

$v_T = \frac{Q_A^T}{F}\ \left[m/s\right] -$ Fließgeschwindigkeit in der Triebwasserleitung

$C = \frac{1}{n} * R^{\frac{1}{6}}\ \left[m^{1/2}/s\right] -$ Manning Beiwert

$n = 0.012 -$ Rauhigkeitsbeiwert für Stahlrohr ($K_{St} = 83$ nach Strickler)

$R = \frac{D}{4}\ \left[m\right] -$ hydraulischer Radius

$C_T^{'} = \frac{3600}{9.81 * \eta_T}\quad \begin{cases} \eta_T - \text{Gesamtwirkungsgrad im Turbinenbetrieb} \\ \eta_T = \eta_{Turb.} * \eta_{Gen.} = 0.9 * 0.97 = 0.873 \end{cases}$

D m	F m^2	v_T m/s	R m	C $m^{1/2}/s$	Δh_T m	V m^3	C'_T -	W_T kWh	ΣZ_T €
2	3.14	8.28025	0.50	74.2416	69.7467	202176000	420.36	33545489	2683639
3	7.07	3.68011	0.75	79.432	8.02362	202176000	420.36	3859053	308724
4	12.56	2.07006	1.00	83.3333	1.72994	202176000	420.36	832033.5	66562.7
5	19.63	1.32484	1.25	86.4909	0.52623	202176000	420.36	253097.2	20247.8

Tabl. 5.2 Ermittlung der Gegenwertsverluste infolge nicht erzeugter elektrischer Energie

- **Jahreskosten der Energiemenge, die für die Überwindung der Strömungsverluste beim Pumpen aufgewendet werden**

$$\sum Z_P = W_P * e_P\ \left[€\right]$$

$$W_P = \frac{V_P * \Delta h_P}{C_P^{'}}\ \left[kWh\right]$$

$e_P = 0.045\ €/kWh$ (von SALZBURG AG)

$V_P = Q_A^P * 7 * 3600 * 360\ \left[m^3\right] -$ jährlich gepumptes Wasservolumen bei täglich 7h Pumpbetrieb

$\Delta h_P = 1.05 \frac{L * v_P^2}{C^2 * R}\ \left[m\right] -$ Fallhöhenverluste $\begin{cases} \text{die örtliche Verluste werden mit 5\%} \\ \text{der Längsverluste angenommen} \end{cases}$

$L -$ Länge der Triebwasserleitung

$v_P = \frac{Q_A^P}{F}\ \left[m/s\right] -$ Fließgeschwindigkeit in der Triebwasserleitung

$C = \frac{1}{n} * R^{\frac{1}{6}}\ \left[m^{1/2}/s\right] -$ Manning Beiwert

$n = 0.012 -$ Rauhigkeitsbeiwert für Stahlrohr ($K_{St} = 83$ nach Strickler)

$R = \frac{D}{4}\ \left[m\right] -$ hydraulischer Radius

$C_P^{'} = \frac{3600}{9.81 * \eta_P}\quad \begin{cases} \eta_P - \text{Gesamtwirkungsgrad im Turbinenbetrieb} \\ \eta_P = 0.85 \end{cases}$

D m	F m^2	v_P m/s	R m	C $m^{1/2}/s$	Δh_P m	V m^3	C'_P -	W_T kWh	ΣZ_P €
2	3.14	6.36943	0.50	74.2416	41.2702	181440000	311.93	24005883	1080265
3	7.065	2.83086	0.75	79.432	4.7477	181440000	311.93	2761622	124273
4	12.56	1.59236	1.00	83.3333	1.02363	181440000	311.93	595421.3	26794
5	19.625	1.01911	1.25	86.4909	0.31138	181440000	311.93	181121.9	8150.49

Tabl. 5.3 Berechnung der Jahreskosten der angewendeten Energiemenge

Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Abb. 5.1 dargestellt, wo der nach wirtschaftlichen Kriterien optimierte Triebwasserleitungsdurchmesser abgelesen werden kann. Dieser ergibt sich mit den getroffenen Annahmen mit ca. 3.10 m.

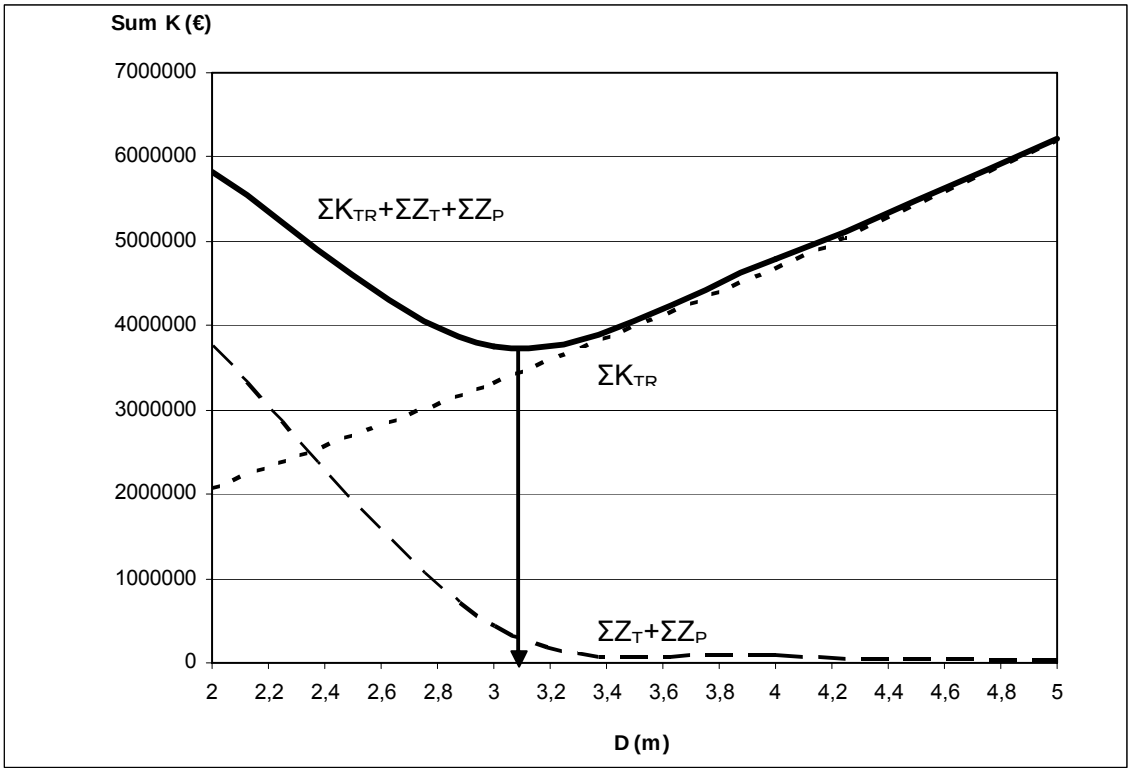


Abb. 5.1 Ermittlung des wirtschaftlichsten Durchmessers der Triebwasserleitung

Es wird vorgeschlagen den ca. 880 m langen Lotschacht mit D = 3.10 m auszuführen. Die Blechdicke der Panzerung ist entsprechend der hydrodynamischen Belastung abschnittsweise konstant auszuführen. Für den ca. 1673 m langen Stollen wäre es unter Umständen auch zweckmäßig aus weiteren wirtschaftlichen Überlegungen (kleiner Durchmesser erfordert auch geringere Blechdicke – die hydraulischen Verluste im Stollen erhöhen sich ca. um ⅓) einen Stollendurchmesser von 2.8 m zu wählen, für dessen Blechstärke gilt das bereits für den Lotschacht Gesagte.

In Abhängigkeit vom Betriebszustand der Anlage ergeben sich damit folgende Geschwindigkeiten im:

- **Lotschacht:**

$$\left| \begin{array}{l} D_{Sch.} = 3.10m \\ F_{Sch} = \dfrac{\pi D_{Sch}^2}{4} = 7.54m^2 \end{array} \right. \Rightarrow \left| \begin{array}{l} \text{im Turbinenbetrieb:} \\ v_T = \dfrac{Q_A^T}{F_{Sch.}} = \dfrac{26}{7.54} = 3.45m/s \\ \text{im Pumpbetrieb:} \\ v_P = \dfrac{Q_A^P}{F_{Sch.}} = \dfrac{20}{7.54} = 2.65m/s \end{array} \right.$$

- **Stollen:**

$$\left| \begin{array}{l} D_{St.} = 2.80m \\ F_{St.} = \dfrac{\pi D_{Sch}^2}{4} = 6.15m^2 \end{array} \right. \Rightarrow \left| \begin{array}{l} \text{in Turbinenbetrieb:} \\ v_T = \dfrac{Q_A^T}{F_{St.}} = \dfrac{26}{6.15} = 4.225m/s \\ \text{in Pumpbetrieb:} \\ v_P = \dfrac{Q_A^P}{F_{St.}} = \dfrac{20}{6.15} = 3.25m/s \end{array} \right.$$

Die tatsächliche Wahl des Lotschacht- bzw. Stollendurchmessers wird letztendlich aber erst in der Angebotsphase zur Bauausführung zu entscheiden sein. In dieser Phase kann auch der Bauherr aufgrund der Angebote (ev. Alternativen) einen besseren optimalen Durchmesser bestimmen, da die Annahmen über die Herstellungskosten wegfallen.

6 BESCHREIBUNG DER HAUPTBAUWERKE DER AUSGEWÄHLTEN VARIANTE V3

Von der gewählten Variante V3 sind die Triebwasserleitung und das Krafthaus planlich ausgearbeitet. Die Becken sind nur generell beschrieben.

6.1 OBERBECKEN

Wie schon erwähnt, dient als Oberbecken der Seekarsee. Zur Zeit besitzt dieser ein Wasservolumen von 450000m^3. Mittels der Errichtung einer Betonstaumauer wird der Inhalt auf etwa 3*10^6 m^3 vergrößert. Die Konstruktion dieser Mauer ist nicht Inhalt der vorliegenden Diplomarbeit.

Zur Reduzierung von Sickerverlusten ist geplant das Becken mit einer Abdichtung aus Asphalt oder Asphaltbeton auszuführen. Die Abb. 6.1 zeigt den möglichen Aufbau einer Asphaltbetondichtung. Im Zuge der Detailplanung werden die Abdichtungsmaßnahmen präzisiert.

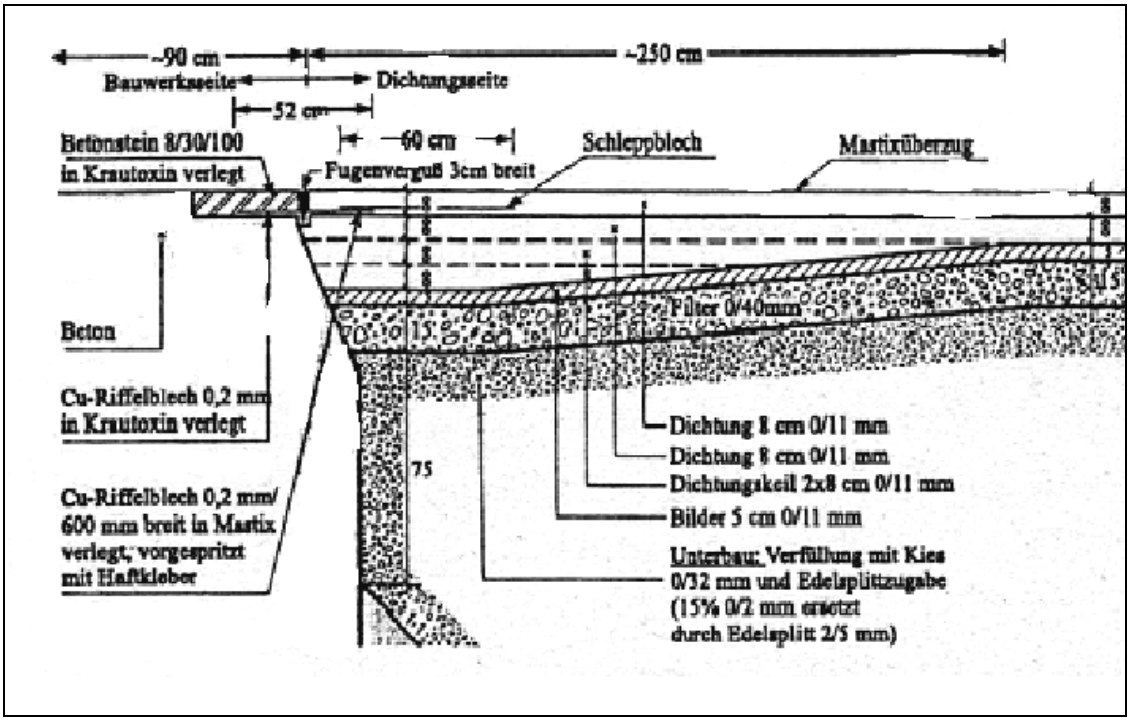


Abb. 6.1 Dichtungsaufbau am Hornbergbecken /10/

6.2 EINLAUFBAUWERK

Das Einlaufbauwerk wurde in Absprache mit der SALZBURG AG seitlich angeordnet.
Der Einlaufbereich des Entnamebauwerkes weist einen rechteckigen Querschnitt auf. Dieses rechteckige Profil wird innerhalb einer ca. 8m langen Verzugstrecke auf das D_{opt} =3.10m weite Kreisprofil übergeführt (Abb. 6.2).

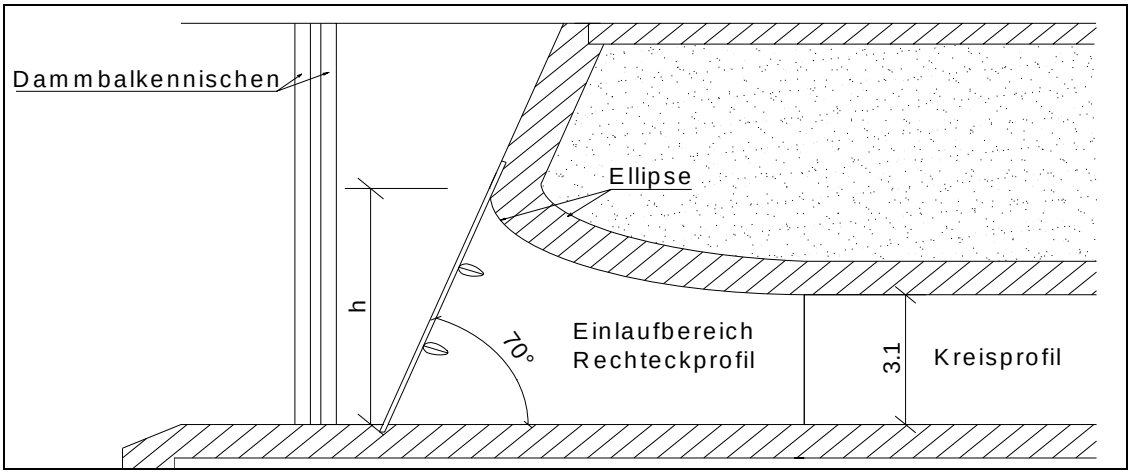


Abb. 6.2 Einlaufbereich des Entnahmebauwerkes

Zur Vermeidung von Lufteinzug muss die Einlaufbauwerksfirste eine entsprechend hohe Überdeckungshöhe über dem Absenkziel aufweisen.

$$h_{Erf.L.Einz.} = 1.6 * \left(1 + \zeta_{Einl.}\right) * \frac{v_T^2}{2g} \qquad \text{(Gl. 6.1)}$$

$\zeta_{Einl.} = 0.3 - \text{Widerstandsbeiwert}$

$v_T = 3.45 m/s - \text{Geschwindigkeit nach dem Einlaufbereich}$

Aus Gl. 6.1 $\Rightarrow h_{Erf.L.Einz.} = 1.30m$

angenommen: $h_{Erf.L.Einz.} = 2.5m$

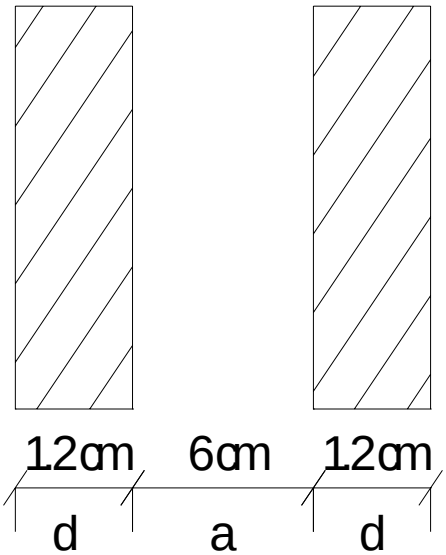
Mit der angenommenen Überdeckungstiefe (2.5m unter ASZ) sollte die Entstehung eines lufteinziehenden Wirbels vermieden werden. Zur Überprüfung dieser Annahme sowie zur strömungstechnischen Optimierung ist die Durchführung eines hydraulischen Modellversuches sinnvoll.

Der Einlauf ist zwecks Vergleichmäßigung der Strömung ellipsenförmig gestaltet. Zur Verhinderung des Einzuges von abgerutschten Steinen (kein natürlicher Zufluss) bzw. Treibzeug, ist der Einbau eines Feinrechens (Rechteckprofil 1.2 /18 cm, Stababstand 6 cm) vorgesehen. Für Revisionszwecke können vor dem Rechen Dammbalken in die Dammbalkennischen eingesetzt werden.

<u>Bestimmung der Abmessungen des Rechens:</u>

$$\text{Angenommen:}\left|\begin{array}{l} v_R = 1.0\,m/s - \text{Geschwindigkeit beim Rechen} \\ h_R = 6.0\,m - \text{Rechenhöhe} \\ \alpha = 70^\circ - \text{Rechenneigung} \end{array}\right.$$

$$F_{R,Br.} = F_{R,Nt.} * \left(1 + \frac{d}{a}\right) \qquad \text{(Gl. 6.2)}$$



$$F_{R,Nt.} = \frac{Q_A^T}{v_R} = \frac{26}{1} = 26m^2$$

$$\text{Aus Gl. 6.2} \Rightarrow F_{R,Br.} = 26 * \left(1 + \frac{1.2}{6}\right) = 31.2m^2$$

$$B_{R,Br} = \frac{F_{R,Br.}}{h_R} = \frac{31.2}{6} = 5.2m$$

Geschwindigkeiten:

$$v_R^T = \frac{Q_A^T}{F_{R,Br.}} = \frac{26}{31.2} = 0.833\,m/s - \text{in Turbinenbetrieb}$$

$$v_R^P = \frac{Q_A^P}{F_{R,Br.}} = \frac{20}{31.2} = 0.641\,m/s - \text{in Pumpbetrieb}$$

Aus betrieblichen Sicherheitsgründen ist der oberwasserseitige Einbau von zwei ständig einsatzfähigen Abschlussorganen (2xDrosselklappen) erforderlich /12/. Diese beiden Drosselklappen sind in einer Schieberkaverne untergebracht, die von oben, durch einen Vertikalschacht zugängig ist. Zur Senkung der Kosten der Drosselklappen werden diese mit einem Durchmesser von 2.20m ausgeführt. Eine genauere Festlegung dieses gewählten Durchmessers kann erst im Zuge des Vorliegens von entgültigen Kosten für die Verschlussorgane getroffen werden. Weiters sind die für die Klappen erforderlichen Bypass-, Be- und Entlüftungsleitungen vorzusehen.

6.3 TRIEBWASSERLEITUNG

Die Triebwasserleitung setzt sich aus einem Lotschacht und einen leicht geneigten Druckstollen zusammen. In **Abschnitt 5** wurde der optimale Durchmesser für den Lotschacht mit 3.10 m und für den Druckstollen mit 2.80 m bestimmt. Die Triebwasserleitung wird über die gesamte Länge gepanzert ausgeführt, wobei die genaueren Blechstärken im **Punkt 8** genauer berechnet werden. Der Druckstollen ist mit einer Neigung von 6‰ ausgeführt. Vor den Pumpturbinen erfolgt die Durchflussaufteilung mittels eines Hosenrohres (Abb. 6.3). Diese Rohrverzweigung soll eine gleichmäßige Anströmung der Maschinen sicherstellen. Der Durchmesser der Verteilrohre mit den zugehörigen Fließgeschwindigkeiten wurden folgendermaßen bestimmt:

$$\left|\begin{array}{l} D_{St.} = 2.80\text{m} \\ F_{St.} = \dfrac{\pi D_{Sch}^2}{4} = 6.15\text{m}^2 \\ F_{Vert.R.} = \dfrac{F_{St.}}{2} = 3.14\text{m}^2 \\ \Rightarrow D_{Vert.R.} = \sqrt{\dfrac{4F_{Vert.R.}}{\pi}} = 1.98 \square 2.0\text{m} \end{array}\right. \Rightarrow \left|\begin{array}{l} \text{in Turbinenbetrieb:} \\ v_{Vert.R.}^{T} = \dfrac{Q_{A,Vert.R.}^{T}}{F_{Vert.R}} = \dfrac{13}{3.14} = 4.14\text{m/s} \\ \text{in Pumpbetrieb:} \\ v_{Vert.R.}^{P} = \dfrac{Q_{A,Vert.R.}^{P}}{F_{Vert.R.}} = \dfrac{10}{3.14} = 3.185\text{m/s} \end{array}\right.$$

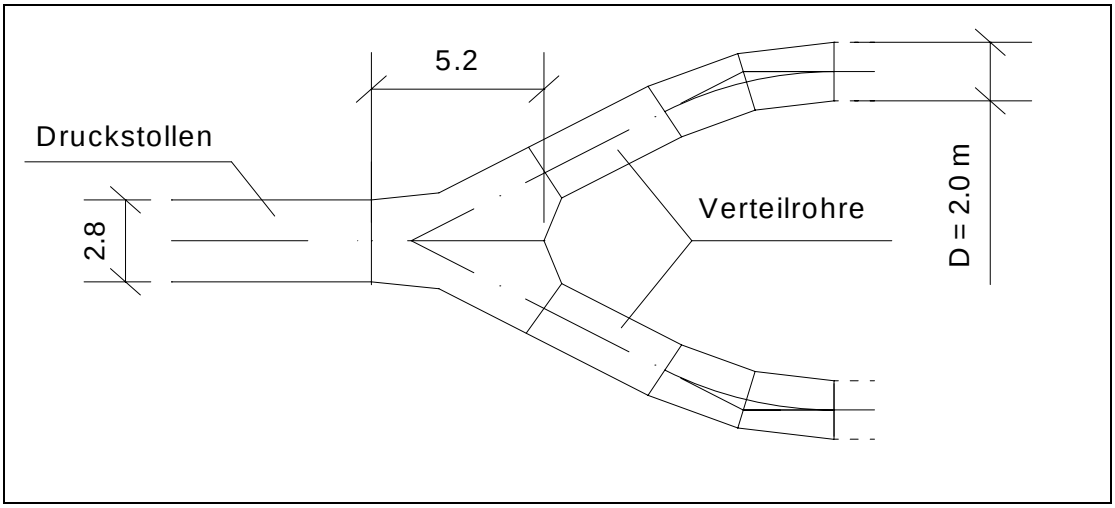


Abb. 6.3 Hosenrohrausführung

6.4 KAVERNENKRAFTHAUS (s. Plan N.....)

Das Krafthaus des Pumpspeicherkraftwerkes wurde als Kaverne geplant, die genaue Lage und Form des Hohlraumes wird erst zu einem späteren Zeitpunkt der Planung – bei vorliegen entsprechender geologischer Grundlagen – festzulegen sein. Von Seiten der SALZBURG AG wurde vorweg die elektromaschinelle Ausrüstung mit der Wellenanordnung festgelegt. Die beiden in der Kaverne vorgesehenen Pumpturbinen (reversible Francisturbine) werden mit zwei Pelton-Hilfsturbinen (6 Düsen) angefahren. Die Energiewandlung erfolgt in einem Motor – Generator mit folgenden Abmessungen (Abb. 6.4):

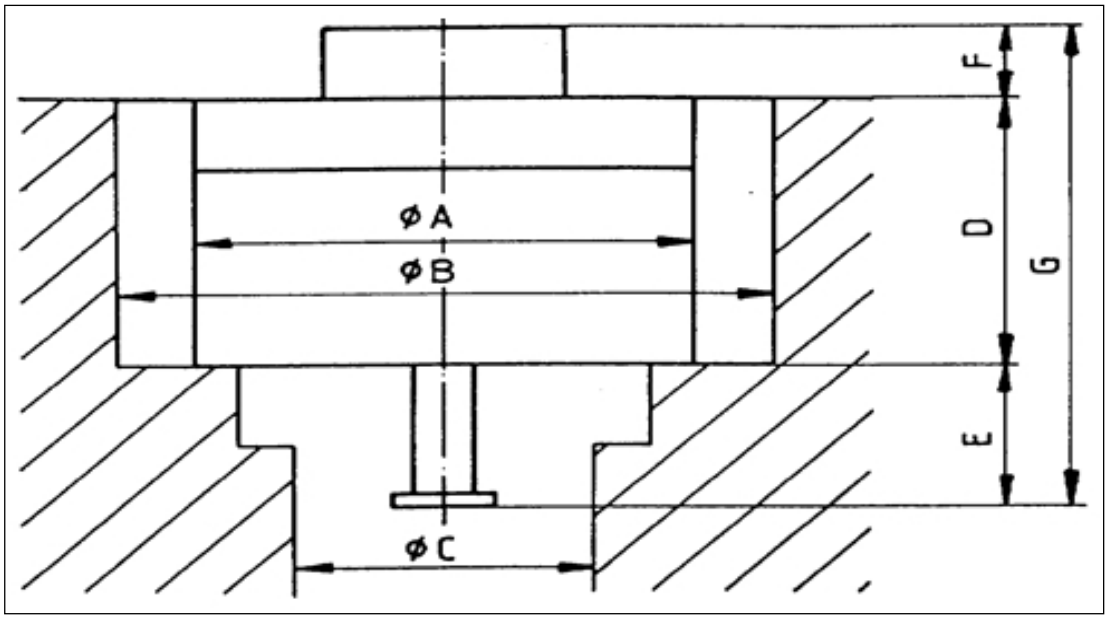


Abb. 6.4 Motor - Generator

Abmessungen:

A = 5800mm

B = 8100mm

C = 3050mm

D = 4350mm

E = 1800mm

F = 900mm

G = 7050mm

Die Maschinen sind auf einer vertikalen Welle gelagert. Am unteren Ende dieser Welle hängt die Anfahrturbine über einen Unterwasserkanal mit einem Volumen von 1300 m^3. Das von der Peltonturbine anfallende Wasser wird mittels 6 Pumpen (3 für jede Turbine) ins Unterbecken hochgepumpt. In der Kaverne werden auch die Verschlussorgane angeordnet. Vor den Pumpturbinen ist jeweils ein Kugelschieber (D = 1.20m) geplant, während die Saugrohre jeweils mit zwei Tafelschützen ausgerüstet sind. Neben den beiden Pumpturbinen ist in der Kaverne ebenfalls ein Platz für Maschinenmontage bzw. einer eventuell späteren Erweiterung der Anlage um einen Maschinensatz vorgesehen.
Die Verbindung der Kaverne mit der Aussenwelt erfolgt durch einen Zugangstunnel mit D= 8.0m, dessen Linienführung erst in einer späteren Planungsphase festgelegt wird. Im Zugangstunnel ist eine Nische für die Unterbringung des Transformators vorgesehen, dieser wird mittels eines Lotschachtes mit der Freiluftschaltanlage verbunden. Entsprechende Be- und Entlüftungen sind ebenfalls im Zugangsstollen untergebracht. Ein zusätzlicher Fluchtstollen (oder Schacht) ist noch einzuplanen.

6.5 UNTERWASSERSTOLLEN

Die unterwasserseitige Wasserabführung ist ähnlich der Wasserzuführung mit einem Hosenrohr nach den Saugrohren, dieses führt das Turbinenwasser der beiden Pumpturbinen in den Unterwasserstollen zusammen. Dieser weist dieselben Abmessungen wie der Druckstollen mit einem Durchmesser von 2.8m, einer Neigung von 6° (□ 10%) auf und hat eine Gesamtlänge von 412.90m. Die Auskleidung des UW-Stollens kann erst nach der Durchführung einer hydrodynamischen Berechnung erfolgen, bei der das entsprechende Pumpenkennfeld bekannt ist. In Ermangelung dieser Daten wurden in dieser Arbeit diesbezüglich keine weiteren Berechnungen durchgeführt, da der Druckstoß zufolge Pumpenausfall wahrscheinlich für die statische Berechnung der Stollenauskleidung nicht maßgebend ist. Hier sind noch weitere detaillierte Festlegungen über die Schwungmasse der Pumpe bzw. der Kennlinie einer eventuellen Rückstromklappe erforderlich.

6.6 AUSLAUFBAUWERK

Die Planung des unterwasserseitigen Einlauf –bzw. Auslaufbauwerkes erfolgte analog dem oberwasserseitigen Entnahmebauwerkes mit einer entsprechenden Überdeckungshöhe zur Vermeidung von lufteinziehnden Wirbeln. (Abb. 6.5)

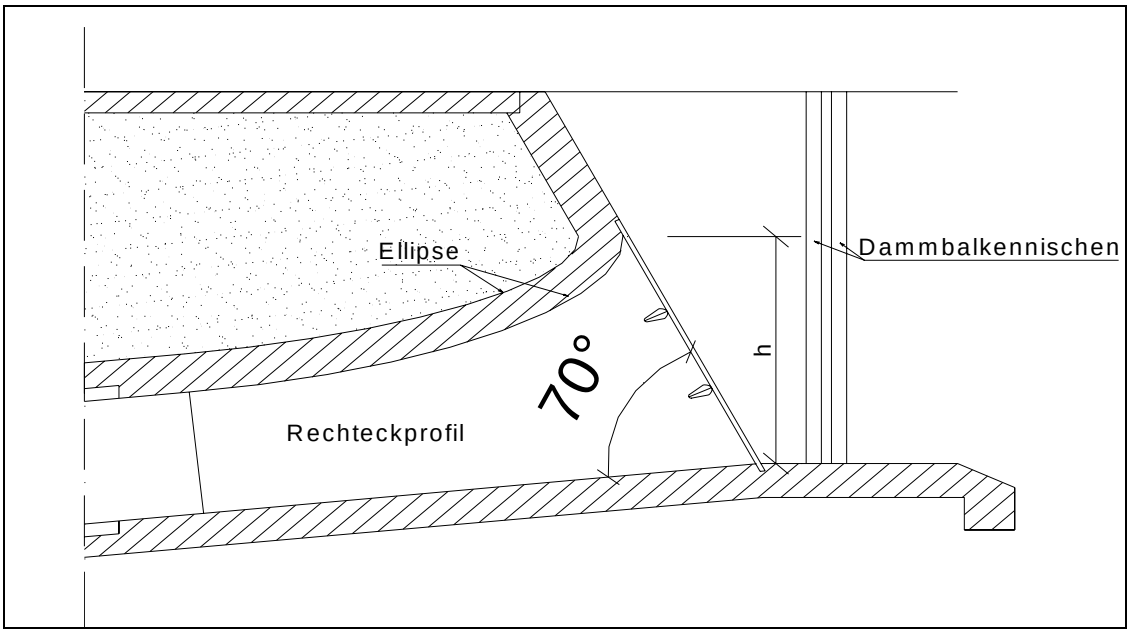


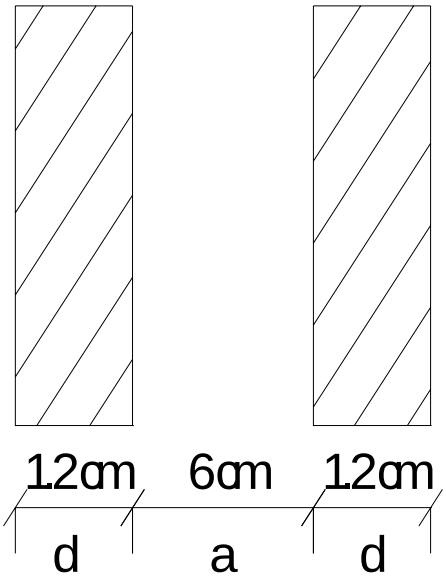
Abb:6.5 Auslaufbauwerk

Für Revisionszwecke können am Auslauf Dammbalken eingesetzt werden, und der oberwasserseitige Abschluss durch die beiden Saugrohrschützen erfolgen.

Die Abmessungen des Rechens ergeben sich aufgrund geringfügiger geänderter Abmessungen des Auslaufbauwerkes folgendermaßen:

$$\text{Angenommen:}\left|\begin{array}{l} v_R = 1.0\,m/s - \text{Geschwindigkeit beim Rechen} \\ h_R = 5.40\,m - \text{Rechenhöhe} \\ \alpha = 70^\circ - \text{Rechenneigung} \end{array}\right.$$

$$F_{R,Br.} = F_{R,Nt.} * \left(1 + \frac{d}{a}\right) \qquad \text{(Gl. 6.2)}$$



$$F_{R,Nt.} = \frac{Q_A^T}{v_R} = \frac{26}{1} = 26m^2$$

$$\text{Aus Gl. 6.2} \Rightarrow F_{R,Br.} = 26 * \left(1 + \frac{1.2}{6}\right) = 31.2m^2$$

$$B_{R,Br} = \frac{F_{R,Br.}}{h_R} = \frac{31.2}{5.40} = 5.77 \square 5.80m$$

$$\Rightarrow F_{R,Br.} = 5.40 * 5.80 = 31.32m$$

Geschwindigkeiten:

$$v_R^T = \frac{Q_A^T}{F_{R,Br.}} = \frac{26}{31.32} = 0.83m/s - \text{in Turbinenbetrieb}$$

$$v_R^P = \frac{Q_A^P}{F_{R,Br.}} = \frac{20}{31.32} = 0.639m/s - \text{in Pumpbetrieb}$$

6.7 UNTERBECKEN

Das Unterbecken wird in den Talfüllungen des Pleißlingtales aus Ringdämme errichtet (Abb 6.6). Die Dämme sind nur schematisch dargestellt, die Detailausführung ist nicht Inhalt der vorliegenden Diplomarbeit.

Abb.6.6 Geplante Lage des Unterbeckens im Pleißlingtal

Das Ausgleichsbecken liegt auf einer Lockersedimentfüllung, daher ist die Ausführung mit einer Asphaltbetondichtung zweckmäßig.

Im Zuge der Errichtung des Unterbeckens sind Maßnahmen am bestehenden Straßennetz erforderlich (Dammschüttungen).

7 HYDRAULISCHE BERECHNUNGEN

Die hydraulischen Berechnungen wurden für den stationären Turbinen- und Pumpbetrieb durchgeführt. Die instationäre Berechnung des Pumpspeicherkraftwerkes beschränkte sich aufgrund von offenen pumpentechnischen Angaben auf den Turbinenbetrieb.

7.1 HYDRAULISCHE BERECHNUNGEN FÜR STATIONÄREN BETRIEB DES PUMPSPEICHERWERKES

Die stationären Berechnungen der Verlusthöhen gliedern sich in die Bestimmung der kontinuierlichen als auch der lokalen Widerstände des Triebwassersystems.

7.1.1 Basisdaten:

Oberbecken	Unterbecken
STZ = 1980m	STZ = 1070m
ASZ = 1935m	ASZ = 1040m

$Q_A^T = 26\,m^3/s$ – Ausbaudurchfluss für die Pumpturbine

$Q_A^P = 20\,m^3/s$ – Ausbauwassermenge für Pumpbetrieb

$D_{Einlaufbauw.} = 3.10\,m \Rightarrow F_{Einlaufbauw.} = \frac{\pi D^2}{4} = 7.54\,m^2$ (**s. Abschnitt 6**)

$D_{Schacht} = 3.10\,m \Rightarrow F_{Schacht} = \frac{\pi D^2}{4} = 7.54\,m^2$ (**s. Abschnitt 5**)

$D_{Stollen} = 2.80\,m \Rightarrow F_{Stollen} = \frac{\pi D^2}{4} = 6.154\,m^2$ (**s. Abschnitt 5**)

$D_{UW.Stollen} = 2.80\,m \Rightarrow F_{UW.Stollen} = \frac{\pi D^2}{4} = 6.154\,m^2$ (**s. Abschnitt 6**)

Turbinenbetrieb:

$$\Rightarrow \left| \begin{array}{l} v_{Einl.bauw.}^T = v_{Schacht}^T = \frac{Q_A^T}{F} = \frac{26}{7.54} = 3.45\,m/s \\ v_{Stollen}^T = v_{Stollen}^T = \frac{Q_A^T}{F} = \frac{26}{6.154} = 4.225\,m/s \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow \left| \begin{array}{l} \text{Pumpbetrieb:} \\ v^P_{Einl.bauw.} = v^P_{Schacht} = \frac{Q^P_A}{F} = \frac{20}{7.54} = 2.65\,m/s \\ v^T_{Stollen} = v^T_{Stollen} = \frac{Q^T_A}{F} = \frac{20}{6.154} = 3.25\,m/s \end{array} \right.$$

7.1.2 Berechnung der Verlusthöhen:

- **Einlaufbauwerk**

  — **Kontinuierliche Rohrreibungsverluste**

$$\Delta h_{Einl.b} = \frac{L_{Einl.b.} * v^2_{Einl.b}}{C^2 * R} \left[m\right]$$

$C = \frac{1}{n} * R^{\frac{1}{6}} \left[m^{1/2}/s\right]$ – Manning's Beiwert

$n = 0.014\,(K_{St} = 71.42)$ – Rauhigkeitsbeiwert für Betonoberfläche

$R = \frac{D}{4}\left[m\right]$ – hydraulischer Radius

$v = \frac{Q_A}{F_{Einl.}}\left[m/s\right]$ – Fließgeschwindigkeit im Entnahmebauwerk

$L = 117.4m$ – Länge des Einlaufbauwerkes

<u>Turbinenbetrieb:</u>

$$\Delta h_{Einl.b.T} = \frac{L_{Einl.b.} * v^2_T}{C^2 * R} = \frac{117.4 * 3.45^2}{68.46^2 * 0.775} = 0.39m$$

<u>Pumpbetrieb:</u>

$$\Delta h_{Einl.b.,P} = \frac{L_{Einl.b.} * v^2_P}{C^2 * R} = \frac{117.4 * 2.65^2}{68.46^2 * 0.775} = 0.23m$$

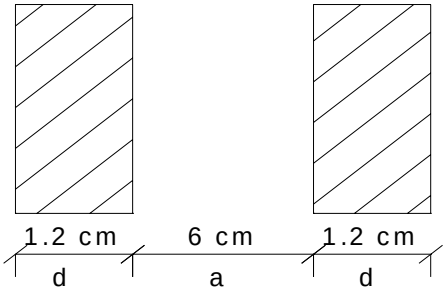
— **Verlusthöhen infolge örtlicher Widerstände**

- **Rechen (s. Abschnitt 6)**

$$\Delta h_R = \xi_R * \frac{v_R^2}{2g}\,[m]$$

$v_R\,[m/s]$ – Fließgeschwindigkeit vor dem Rechen

$\xi_R = \beta \sin\alpha \left(\frac{d}{a}\right)^{\frac{4}{3}}$ – Widerstandsbeiwert – bestimmt nach Kirschmer /13/



$\beta = 2.42$ – für rechteckige Stäbe

$\alpha = 70^\circ$

$a = 6cm$

$d = 1.2cm$

$\Rightarrow \xi_R = 0.27$

<u>Turbinenbetrieb:</u>

$$\Delta h_{R,T} = \xi_R * \frac{v_{R,T}^2}{2g} = 0.27 * \frac{0.833^2}{2 * 9.81} = 0.009m$$

<u>Pumpbetrieb:</u>

$$\Delta h_{R,P} = \xi_R * \frac{v_{R,P}^2}{2g} = 0.27 * \frac{0.641^2}{2 * 9.81} = 0.006m$$

- **Einlaufbereich**

$$\Delta h_E = \xi_E * \frac{v_E^2}{2g}\,[m]$$

<u>Turbinenbetrieb:</u>

$\xi_{E,T} = 0.3$ /13/

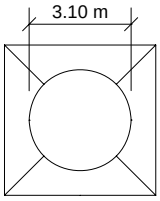
$$\Delta h_{E,T} = \xi_{E,T} * \frac{v_{R,T}^2}{2g} = 0.3 * \frac{0.833^2}{2 * 9.81} = 0.01m$$

<u>Pumpbetrieb:</u>

$\xi_{E,P} = 1.0$ – als Auslauf im Pumpbetrieb /13/

$$\Delta h_{E,P} = \xi_{E,P} * \frac{v_{R,P}^2}{2g} = 1 * \frac{0.641^2}{2 * 9.81} = 0.02m$$

- **Übergangsbereich zwischen Rechteck- und Kreisprofil**



$$\Delta h_{Überg.} = \xi_{Überg.} * \frac{v^2_{Einl.bauw.}}{2g}$$

$$\xi_{Überg.} = 0.20 \text{ bei } \frac{l}{D} = 3 - \text{ Widerstandsbeiwert}$$

$$\xi_{Überg.} = 0.25 \text{ bei } \frac{l}{D} = 2 - \text{ Widerstandsbeiwert}$$

Die Werte von $\xi_{Überg.}$ wurde im hydraulischen Labor von UACG – Sofia bei ähnlichen Übergängen festgestellt.

$$\left| \begin{array}{l} l = 8m \\ D_{Einlaufb.} = 3.10m \quad \Rightarrow \xi_{Überg.} = 0.221 \\ \frac{l}{D} = \frac{8}{3.10} = 2.58 \end{array} \right.$$

<u>Turbinenbetrieb:</u>

$$\Delta h_{Überg.,T} = \xi_{Überg.} * \frac{v_T^2}{2g} = 0.22 * \frac{3.45^2}{2 * 9.81} = 0.13m$$

<u>Pumpbetrieb:</u>

$$\Delta h_{Überg.,P} = \xi_{Überg.} * \frac{v_P^2}{2g} = 0.22 * \frac{2.65^2}{2 * 9.81} = 0.08m$$

- **Allmähliche Verengung**

Die Verengung vor der Drosselklappe wird mittels einem Konfusor ausgeführt (**sieh Abschnitt 6**) (Abb.7.1).

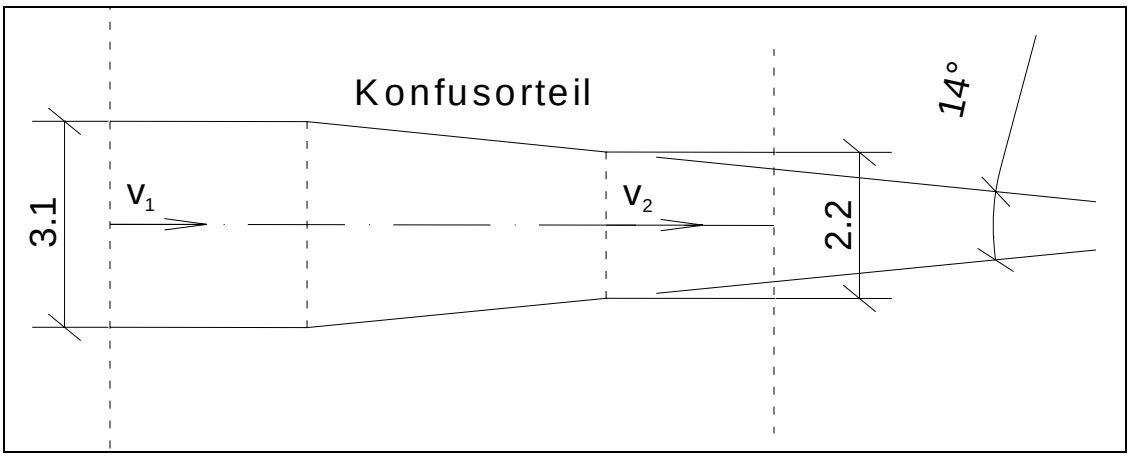


Abb. 7.1 Konfusor vor der Drosselklappe

$$\Delta h_{Konf.} = \xi_{Konf.} * \frac{v_2^{\,2}}{2g}\,[m]$$

v_2 – Fließgeschwindigkeit im verengten Bereich

$$v_2 = \frac{Q_A}{F_2}\,[m/s]$$

$$F_2 = \frac{\pi D_2^2}{4}\,[m^2];\; D_2^2 = 2.20\,m \Rightarrow F_2 = 3.80\,m$$

$$\Rightarrow \left| \begin{array}{l} v_2^T = \dfrac{Q_A^T}{F_2} = \dfrac{26}{3.80} = 6.84\,m/s \\ v_2^P = \dfrac{Q_A^P}{F_2} = \dfrac{20}{3.80} = 5.26\,m/s \end{array} \right.$$

$\xi_{Konf.}$ – Widerstandsbeiwert für das Konfusorteil

$$\left| \begin{array}{l} \text{für } \dfrac{D_2}{D_1} = \dfrac{2.20}{3.10} = 0.71 \\ \text{und } \dfrac{\alpha}{2} = 7^\circ \end{array} \right. \Rightarrow \xi_{Konf.} = 0.019 - \text{abgelesen} \quad /14/$$

<u>Turbinenbetrieb:</u>

$$\Delta h_{Konf.,T} = \xi_{Konf.} * \frac{v_{2T}^{\,2}}{2g} = 0.019 * \frac{6.84^2}{2 * 9.81} = 0.045m$$

Pumpbetrieb:

Im Pumpbetrieb arbeitet der Konfusor als Diffusor (umgekehrte Fließrichtung des Wassers).

$$\Delta h_{Diff.,P} = \xi_{Diff.} * \frac{(v_{2,P} - v_{1,P})^2}{2g}$$

für $\alpha = 14^\circ \Rightarrow \xi_{Diff.} = 0.25$ – abgelesen /13/

$$\Delta h_{Diff.} = 0.25 * \frac{(5.26 - 2.65)^2}{2 * 9.81} = 0.09m$$

- **Diffusor**

Nach der zweite Drosselklappe der Übergang zwischen dem verengten Teil und dem Durchmesser des Entnahmebauwerkes wird durch ein Diffusor realisiert (Abb. 7.2).

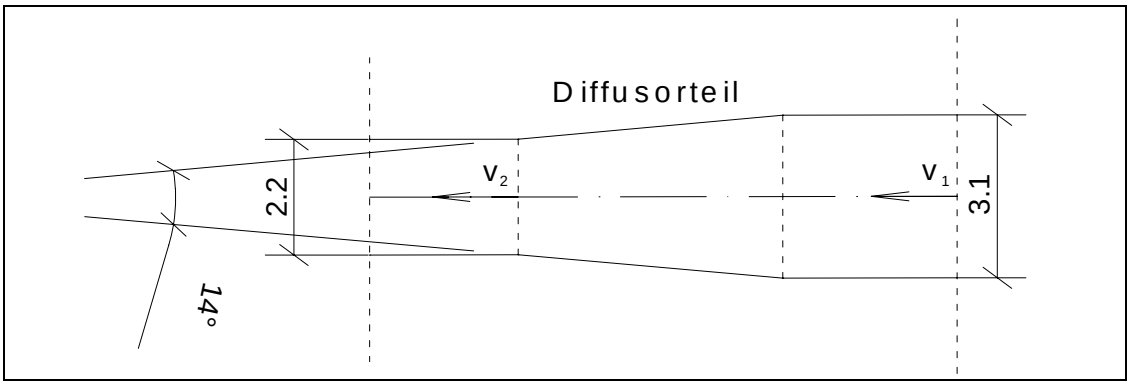


Abb. 7.2 Diffusor nach der zweite Drosselklappe

$$\Delta h_{Diff.} = \xi_{Diff.} * \frac{(v_2 - v_1)^2}{2g} \; [m]$$

Die Widerstandsbeiwerte und die Fließgeschwindigkeiten sind im vorigen Punkt bestimmt.

Turbinenbetrieb:

$$\Delta h_{Diff.,T} = \xi_{Diff.} * \frac{(v_{2,T} - v_{1,T})^2}{2g} = 0.25 * \frac{(6.84 - 3.45)^2}{2 * 9.81} = 0.15m$$

Pumpbetrieb:

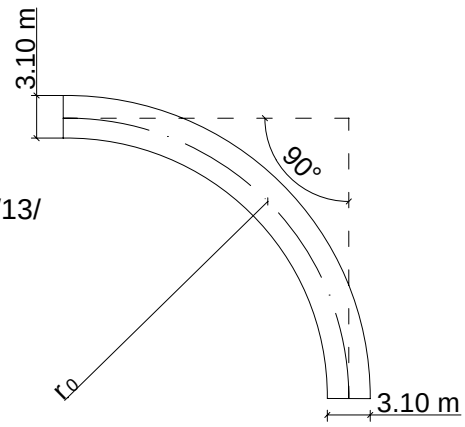
Im Pumpbetrieb arbeitet der Diffusort als Konfusor (umgekehrte Fließrichtung des Wassers).

$$\Delta h_{Konf.,P} = \xi_{Konf.} * \frac{v_{2,P}^2}{2g} = 0.019 * \frac{5.26^2}{2 * 9.81} = 0.03m$$

- **Drosselklappe**

Die örtlichen Verluste der Drosselklappen wurden hier im Vorprojekt vernachlässigt ($\xi_{Drosselkl.} = 0$).

- **Bogen 1**



$$\Delta h_{B1} = \xi_{B1} * \frac{v_{Einl.bauw.}^2}{2g} \; [m]$$

$$\xi_{B1} = \left[0.131 + 2.54 \left(\frac{d}{2r_o} \right)^{2.5} \right] \frac{\alpha°}{90°}$$ – nach Weißbach /13/

$d = 3.10\,m$ – Durchmesser

$r_0 = 21.3\,m$ – Bogenradien

$\alpha = 90^\circ$ – Bogenwinkel

$$\xi_{B1} = \left[0.131 + 2.54 \left(\frac{3.10}{2 * 21.3} \right)^{2.5} \right] \frac{90°}{90°} = 0.135$$

Turbinenbetrieb:

$$\Delta h_{B1,T} = \xi_{B1} * \frac{v_{Einl.bauw.,T}^2}{2g} = 0.135 * \frac{3.45^2}{2 * 9.81} = 0.08m$$

Pumpbetrieb:

$$\Delta h_{B1,P} = \xi_{B1} * \frac{v_{Einl.bauw.,P}^2}{2g} = 0.135 * \frac{2.65^2}{2 * 9.81} = 0.05m$$

Summe der örtlichen Verluste im Einlaufbauwerk

Turbinenbetrieb:

$$\sum \Delta h_{Ortsverluste,T} = \Delta h_{R,T} + \Delta h_{E,T} + \Delta h_{Überg,T} + \Delta h_{Konf.,T} + \Delta h_{Diff.,T} + \Delta h_{B1,T} \; [m]$$

$$\sum \Delta h_{Ortsverluste,T} = 0.009 + 0.01 + 0.13 + 0.045 + 0.15 + 0.08 = 0.42m$$

Pumpbetrieb:

$$\sum \Delta h_{Ortsverluste,P} = \Delta h_{R,P} + \Delta h_{E,P} + \Delta h_{Überg,P} + \Delta h_{Konf.,P} + \Delta h_{Diff.,P} + \Delta h_{B1,P} \; [m]$$

$$\sum \Delta h_{Ortsverluste,P} = 0.006 + 0.02 + 0.08 + 0.09 + 0.03 + 0.05 = 0.27m$$

Gesamtverluste im Einlaufbauwerk:

Turbinenbetrieb:

$$\sum \Delta h_{Einl.b.,T} = \Delta h_{Einl.b.,T} + \sum \Delta h_{Ortsverluste,T} \; [m]$$

$$\sum \Delta h_{Einl.b.,T} = 0.39 + 0.42 = 0.81m$$

Pumpbetrieb:

$$\sum \Delta h_{Einl.b.,P} = \Delta h_{Einl.b.,P} + \sum \Delta h_{Ortsverluste,P} \; [m]$$

$$\sum \Delta h_{Einl.b.,P} = 0.23 + 0.27 = 0.5\,m$$

- **Lotschacht**

  - **Kontinuierliche Rohrreibungsverluste**

$$\Delta h_{Sch.} = \frac{L_{Sch..} * v_{Sch.}^2}{C^2 * R} \; [m]$$

$$C = \frac{1}{n} * R^{\frac{1}{6}} \left[m^{1/2} / s \right] - \text{Manning's Beiwert}$$

$$n = 0.012 (K_{St} = 83.33) - \text{Rauhigkeitsbeiwert für Stahl}$$

$$R = \frac{D}{4} [m] - \text{hydraulischer Radius}$$

$$v_{Sch.} = \frac{Q_A}{F_{Sch.}} [m/s] - \text{Fließgeschwindigkeit im Lotschacht}$$

$$L_{Sch.} = 880.3m - \text{Länge des Lotschachtes}$$

<u>Turbinenbetrieb:</u>

$$\Delta h_{Sch.,T} = \frac{L_{Sch..} * v_{Sch.,T}^2}{C^2 * R} = \frac{880.3 * 3.45^2}{79.87^2 * 0.775} = 2.12m$$

<u>Pumpbetrieb:</u>

$$\Delta h_{Sch.,P} = \frac{L_{Sch..} * v_{Sch.,P}^2}{C^2 * R} = \frac{880.3 * 2.65^2}{79.87^2 * 0.775} = 1.25m$$

  - **Örtliche Verluste**

    - **Bogen 2**

Die lokalen Verluste durch den gekrümmten Konfusor werden nachfolgend nur durch den Bogenverlust berücksichtigt, da der Verengungswinkel des Konfusors mit 1° vernachlässigbar klein ist.

$$\Delta h_{B2} = \xi_{B2} * \frac{v_{B2}^2}{2g} \; [m]$$

$$v_{B2} = \frac{v_{Schacht} + v_{Stollen}}{3} [m/s] - \text{mittlere Fließgeschwindigkeit}$$

$$\Rightarrow \left| \begin{array}{l} v_{B2}^T = 3.94 m/s \\ v_{B2}^P = 3.03 m/s \end{array} \right.$$

$$\xi_{B2} = \left[0.131 + 2.54 \left(\frac{d}{2r_o} \right)^{2.5} \right] \frac{\alpha°}{90°} \quad - \text{ nach Weißbach} \qquad /13/$$

$$d = \frac{D_{Schacht} + 2D_{Stollen}}{3} = 2.90m - \text{mittlere Durchmesser}$$

$$r_0 = 21.22m - \text{Bogenradien}$$

$$\alpha = 90^\circ - \text{Bogenwinkel}$$

$$\xi_{B2} = \left[0.131 + 2.54\left(\frac{2.9}{2 * 21.22}\right)^{2.5}\right]\frac{90°}{90°} = 0.134$$

<u>Turbinenbetrieb:</u>

$$\Delta h_{B2,T} = \xi_{B2} * \frac{v_{B2,T}^2}{2g} = 0.134 * \frac{3.94^2}{2 * 9.81} = 0.11m$$

<u>Pumpbetrieb:</u>

$$\Delta h_{B2,P} = \xi_{B2} * \frac{v_{B2,P}^2}{2g} = 0.134 * \frac{3.03^2}{2 * 9.81} = 0.063m$$

<u>Gesamtverluste im Lotschacht:</u>

<u>Turbinenbetrieb:</u>

$$\sum \Delta h_{Sch.,T} = \Delta h_{Sch.,T} + \Delta h_{B2.,T} + \Delta h_{Konf.,B2.,T} \; [m]$$

$$\sum \Delta h_{Sch.,T} = 2.12 + 0.11 + 0 = 2.23m$$

<u>Pumpbetrieb:</u>

$$\sum \Delta h_{Sch.,P} = \Delta h_{Sch.,P} + \Delta h_{B2.,P} + \Delta h_{Diff.,B2.,P} \; [m]$$

$$\sum \Delta h_{Sch.,P} = 1.25 + 0.063 + 0.001 = 1.31m$$

- **Druckstollen**

  - **Kontinuierliche Rohrreibungsverluste**

$$\Delta h_{St.} = \frac{L_{St...} * v_{St.}^2}{C^2 * R} \left[m\right]$$

$$C = \frac{1}{n} * R^{\frac{1}{6}} \left[m^{1/2}/s\right] - \text{Manning's Beiwert}$$

$$n = 0.012 (K_{St} = 83.33) - \text{Rauhigkeitsbeiwert für Stahl}$$

$$R = \frac{D}{4} \left[m\right] - \text{hydraulischer Radius}$$

$$v_{St} = \frac{Q_A}{F_{St}} \left[m/s\right]$$

$$L = 1615.48m - \text{Länge des Stollens}$$

<u>Turbinenbetrieb:</u>

$$\Delta h_{St.,T} = \frac{L_{St.} * v_{St.,T}^2}{C^2 * R} = \frac{1615.48 * 4.225^2}{78.52^2 * 0.7} = 6.68m$$

<u>Pumpbetrieb:</u>

$$\Delta h_{St.,P} = \frac{L_{St.} * v_{St.,P}^2}{C^2 * R} = \frac{1615.48 * 3.25^2}{78.52^2 * 0.7} = 3.95m$$

  - **Örtliche Verluste**

    - **Im Verzweigung (Abb. 7.3)**

$$\Delta h_{Verzw.} = \xi_{Verzw.} * \frac{v_{St.}^2}{2g} \left[m\right]$$

$$\xi_{Verzw} = 0.946 \sin^2 \frac{\alpha}{2} + 2.047 \sin^4 \frac{\alpha}{2} - \text{ nach Darcy – Weißbach /13/}$$

$$\xi_{Verzw.} = 0.946 \sin^2 \frac{60}{2} + 2.047 \sin^4 \frac{60}{2} = 0.36$$

<u>Turbinenbetrieb:</u>

$$\Delta h_{Verzw.,T} = \xi_{Verzw.} * \frac{v_{St.,T}^2}{2g} = 0.36 * \frac{4.225^2}{2 * 9.81} = 0.33m$$

Pumpbetrieb:

$$\Delta h_{Verzw.,P} = \xi_{Verzw.} * \frac{v_{St.,P}^2}{2g} = 0.36 * \frac{3.25^2}{2 * 9.81} = 0.196m$$

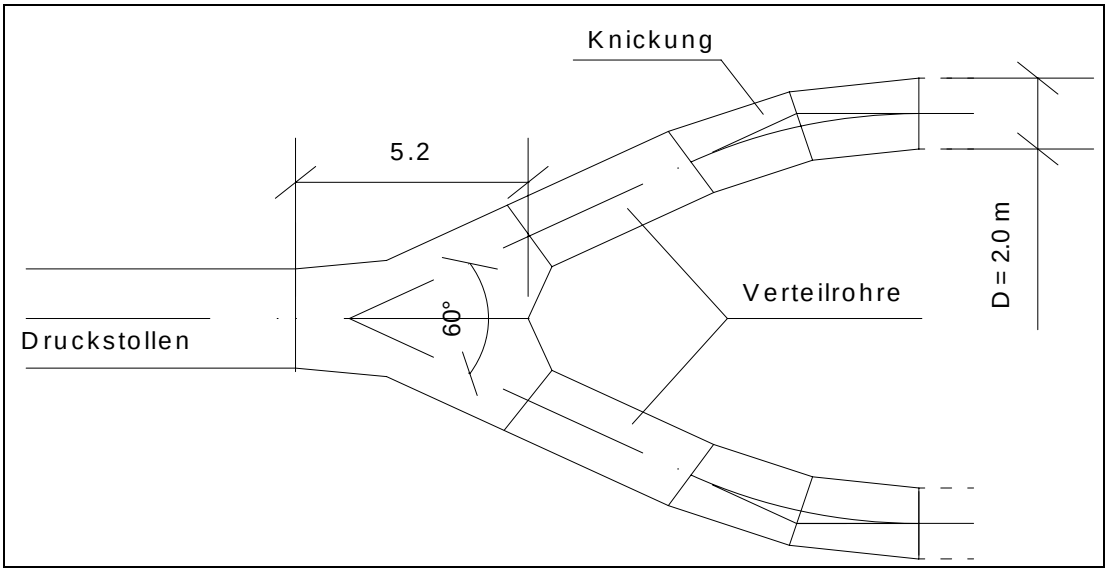


Abb. 7.3 Hosenrohrausführung

— **Rohrreibungsverluste im Hosenrohr**

$$\Delta h_1 = \frac{L_1 * v_{Verzw.}^2}{C^2 * R} \left[m\right]$$

$$C = \frac{1}{n} * R^{\frac{1}{6}} \left[m^{1/2}/s\right] - \text{Manning's Beiwert}$$

$$n = 0.012 (K_{St} = 83.33) - \text{Rauhigkeitsbeiwert für Stahl}$$

$$R = \frac{D}{4} \left[m\right] - \text{hydraulischer Radius}$$

$$v_{Vert.rohr} = \frac{Q_A^{Vert.rohr}}{F_{Verteilrohr}} \left[m/s\right]$$

$$\Rightarrow \left| \begin{array}{l} v_{Vert.rohr}^T = \frac{13}{3.14} = 4.14 m/s \\ v_{Vert.rohr}^P = \frac{10}{3.14} = 3.185 m/s \end{array} \right.$$

$L_{Vert.rohr} = 15.9m$ (Abb. 7.3)

Turbinenbetrieb:

$$\Delta h_{1T} = \frac{L_{Vert.rohr} * v^2_{Vert.rohr,T}}{C^2 * R} = \frac{15.9 * 4.14^2}{74.24^2 * 0.5} = 0.1m$$

Pumpbetrieb:

$$\Delta h_{1P} = \frac{L_{Vert.rohr} * v^2_{Vert.rohr,P}}{C^2 * R} = \frac{15.9 * 3.185^2}{74.24^2 * 0.5} = 0.06m$$

— **Örtliche Verluste im Hosenrohr (Abb.7.3)**

- **Knickverluste**

$$\Delta h_{Knickung} = \xi_{Knickung} * \frac{v^2_{Vert.rohr}}{2g} \; [m]$$

Die geknickten Rohrstücke werden als Gesamtbogen nach Weißbach berechnet.

$$\xi_{Knickung} = \left[0.131 + 2.54 \left(\frac{d}{2r_o} \right)^{2.5} \right] \frac{\alpha°}{90°} \quad - \quad \text{nach Weißbach /13/}$$

$d = 2.0m$ – Durchmesser des Verteilrohrs

$r_0 = 10.34m$ – Bogenradien

$\alpha = 30^\circ$ – Bogenwinkel

$$\xi_{Knickung} = \left[0.131 + 2.54 \left(\frac{2}{2 * 10.34} \right)^{2.5} \right] \frac{30°}{90°} = 0.046$$

Turbinenbetrieb:

$$\Delta h_{Knickung,T} = \xi_{Knickung} * \frac{v^2_{Vert.rohr,T}}{2g} = 0.046 * \frac{4.14^2}{2 * 9.81} = 0.04m$$

Pumpbetrieb:

$$\Delta h_{Knickung,P} = \xi_{Knickung} * \frac{v^2_{Vert.rohr,P}}{2g} = 0.046 * \frac{3.185^2}{2 * 9.81} = 0.024m$$

- **Konfusor vor dem Kugelschieber (Abb. 7.4)**

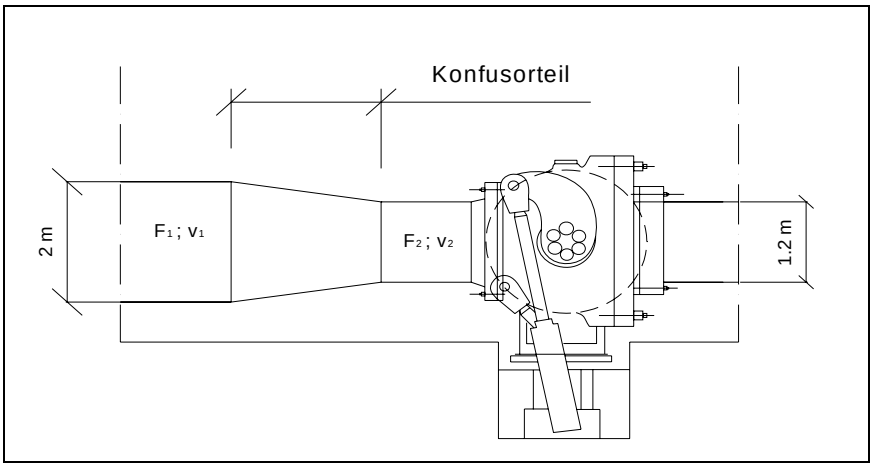


Abb. 7.4 Konfusort vor Kugelschieber

$$\Delta h_{Konf.} = \xi_{Konf.} * \frac{v_2^2}{2g} \; [m]$$

$$\left| \begin{array}{l} D_1 = 2.0\,m \\ D_2 = 1.20\,m \\ \Rightarrow F_2 = \frac{\pi D_2^2}{4} = 1.13\,m^2 \end{array} \right. \Rightarrow \left| \begin{array}{l} v_2^T = \frac{Q^T_{A,Vert.rohr}}{F_2} = \frac{13}{1.13} = 11.5\,m/s \\ v_2^P = \frac{Q^P_{A,Vert.rohr}}{F_2} = \frac{10}{1.13} = 8.85\,m/s \end{array} \right.$$

$$\left| \begin{array}{l} \text{für } \frac{D_2}{D_1} = \frac{1.20}{2.00} = 0.6 \\ \text{und } \frac{\alpha}{2} = 11.5^\circ \end{array} \right. \Rightarrow \xi_{Konf.} = 0.024 - \text{abgelesen} \quad /14/$$

Turbinenbetrieb:

$$\Delta h_{Konf.,T} = \xi_{Konf.} * \frac{v_{2,T}^2}{2g} = 0.024 * \frac{11.5^2}{2 * 9.81} = 0.16m$$

Pumpbetrieb:

Im Pumpbetrieb arbeitet der Konfusor als Diffusor (umgekehrte Fließrichtung des Wassers).

$$\Delta h_{Diff.} = \xi_{Diff.} * \frac{(v_2 - v_1)^2}{2g} \; [m]$$

$$\Delta h_{Diff.,P} = 0.504 * \frac{(8.85 - 3.185)^2}{2 * 9.81} = 0.824m$$

- **Kugelschieber**

Die örtliche Verluste im Kugelschieber sind vernachlässigt ($\xi_{Kugelsch.} = 0$).

- **Rohrreibungsverluste nach Konfusor bis Turbine**

Turbinenbetrieb:

$$\Delta h_{1^*T} = \frac{L_{1^*} * v_T^2}{C^2 * R} = \frac{8.25 * 11.5^2}{68.18^2 * 0.3} = 0.78m$$

Pumpbetrieb:

$$\Delta h_{1^*P} = \frac{L_{1^*} * v_P^2}{C^2 * R} = \frac{8.25 * 8.85^2}{68.18^2 * 0.3} = 0.46m$$

Gesamtverluste im Druckstollen:

Turbinenbetrieb:

$$\sum \Delta h_{St.,T} = \Delta h_{St.,T} + \Delta h_{Verzw.,T} + \Delta h_{1,T} + \Delta h_{Knickung.,T} + \Delta h_{Konf.,T} + \Delta h_{1^*,T} \; [m]$$

$$\sum \Delta h_{St.,T} = 6.68 + 0.33 + 0.1 + 0.04 + 0.16 + 0.78 = 8.09\,m$$

Pumpbetrieb:

$$\sum \Delta h_{St.,P} = \Delta h_{St.,P} + \Delta h_{Verzw.,P} + \Delta h_{1,P} + \Delta h_{Knickung.,P} + \Delta h_{Diff.,T} + \Delta h_{1^*,T} \; [m]$$

$$\sum \Delta h_{St.,P} = 3.95 + 0.2 + 0.06 + 0.024 + 0.82 + 0.46 = 5.51m$$

Gesamtverluste in der Triebwasserleitung:

Turbinenbetrieb:

$$\sum \Delta h_{TR.L.,T} = \sum \Delta h_{Einl.b.,T} + \sum \Delta h_{Sch.,T} + \sum \Delta h_{St.,T} \; [m]$$

$$\sum \Delta h_{TR.L.,T} = 0.81 + 2.23 + 8.09 = 11.25\,m$$

Pumpbetrieb:

$$\sum \Delta h_{TR.L.,P} = \sum \Delta h_{Einl.b.,P} + \sum \Delta h_{Sch.,P} + \sum \Delta h_{St.,P} \; [m]$$

$$\sum \Delta h_{TR.L.,P} = 0.5 + 1.31 + 5.51 = 7.40\,m$$

Die Ungenauigkeit in der Summe der Verlusthöhen kommt aus Rundungsfehlern der Excelberechnung.

- **Unterwasserstollen**

  — **Rohrreibungsverluste im Verteilrohr**

Das Hosenrohr beim Unterwasserstollen wird ähnlich dem Hosenrohr des Druckstollens ausgeführt (Abb.7.3).

$$\Delta h_1 = \frac{L_1 * v^2_{Vert.rohr.}}{C^2 * R} \left[m\right]$$

$$C = \frac{1}{n} * R^{\frac{1}{6}} \left[m^{1/2}/s\right] - \text{Manning's Beiwert}$$

$$n = 0.012 (K_{St} = 83.33) - \text{Rauhigkeitsbeiwert für Stahl}$$

$$R = \frac{D}{4}\left[m\right] - \text{hydraulischer Radius}$$

$v_{Vert.rohr.} = \frac{Q_A}{F}\left[m/s\right]$ (dieselben Fließgeschwindigkeiten wie im Verteilrohr des Druckstollens)

$$L_1 = 13.7m$$

<u>Turbinenbetrieb:</u>

$$\Delta h_{1T} = \frac{L_1 * v^2_{Vert.rohr,T}}{C^2 * R} = \frac{13.7 * 4.14^2}{74.24^2 * 0.5} = 0.085m$$

<u>Pumpbetrieb:</u>

$$\Delta h_{1P} = \frac{L_1 * v^2_{Verzw.P}}{C^2 * R} = \frac{13.7 * 3.185^2}{74.24^2 * 0.5} = 0.05m$$

— **Örtliche Verluste im Hosenrohr**

- **Konfusor nach Saugrohr**

Der Übergang zwischen dem Saugrohr und dem Hosenrohr wird mittels einem Konfusor realisiert.

$$\Delta h_{Konf.} = \xi_{Konf.} * \frac{v_2^2}{2g}\left[m\right]$$

$$\left| \begin{array}{l} \text{für } \frac{D_2}{B_1} = \frac{2.00}{2.80} = 0.714 \\ \text{und } \frac{\alpha}{2} = 5.5^\circ \end{array} \right. \Rightarrow \left| \begin{array}{l} \xi_{Konf.} = 0.02 - \text{abgelesen} \\ \xi_{Konf.} = 0.19 - \text{abgelesen} \end{array} \right. \quad /14/$$

Turbinenbetrieb:

$$\Delta h_{Konf.,T} = \xi_{Konf.} * \frac{v_{2,T}^2}{2g} = 0.02 * \frac{4.14^2}{2 * 9.81} = 0.017m$$

Pumpbetrieb:

Im Pumpbetrieb arbeitet das Konfusor als Diffusor (umgekehrte Fließrichtung des Wassers).

$$\Delta h_{Diff.} = \xi_{Diff.} * \frac{(v_2 - v_1)^2}{2g} \; [m]$$

$$\Delta h_{Diff.,P} = 0.19 * \frac{(3.185 - 1.625)^2}{2 * 9.81} = 0.024m$$

- **Knickverluste (Abb. 7.3)**

$$\Delta h_{Knickung} = \xi_{Knickung} * \frac{v_{Vert.rohr}^2}{2g}$$

Die geknickten Rohrstücke werden als Gesamtbogen nach Weißbach berechnet.

$$\xi_{Knickung} = \left[0.131 + 2.54 \left(\frac{d}{2r_o} \right)^{2.5} \right] \frac{\alpha°}{90°} \quad \text{Weißbach} \quad /13/$$

$$\xi_{Knickung} = \left[0.131 + 2.54 \left(\frac{2}{2 * 10.34} \right)^{2.5} \right] \frac{30°}{90°} = 0.046 \quad (\text{s. } \xi_{Knickung} \text{ bei Hosenrohr 1})$$

Turbinenbetrieb:

$$\Delta h_{Knickung,T} = \xi_{Knickung} * \frac{v_{Knickung,T}^2}{2g} = 0.046 * \frac{4.14^2}{2 * 9.81} = 0.04m$$

Pumpbetrieb:

$$\Delta h_{Knickung,P} = \xi_{Knickung} * \frac{v_{Knickung,P}^2}{2g} = 0.046 * \frac{3.185^2}{2 * 9.81} = 0.024m$$

- **Rohrverzweigung**

$$\Delta h_{Verzw.} = \xi_{Verzw.} * \frac{v^2_{UW.St.}}{2g} \left[m\right]$$

$$\xi_{Verzw} = 0.946 \sin^2 \frac{\alpha}{2} + 2.047 \sin^4 \frac{\alpha}{2} - \quad \text{Darcy – Weißbach /13/}$$

$$\xi_{Verzw.} = 0.946 \sin^2 \frac{60}{2} + 2.047 \sin^4 \frac{60}{2} = 0.36$$

<u>Turbinenbetrieb:</u>

$$\Delta h_{Verzw.,T} = \xi_{Verzw.} * \frac{v^2_{UW.St.,T}}{2g} = 0.36 * \frac{4.23^2}{2 * 9.81} = 0.33m$$

<u>Pumpbetrieb:</u>

$$\Delta h_{Verzw.,P} = \xi_{Verzw.} * \frac{v^2_{UW.St.,P}}{2g} = 0.36 * \frac{3.25^2}{2 * 9.81} = 0.196m$$

— **Rohrreibungsverluste im Unterwasserstollen**

$$\Delta h_{UW.St.} = \frac{L_{UW.St.} * v^2_{UW.St.}}{C^2 * R} \left[m\right]$$

$$C = \frac{1}{n} * R^{\frac{1}{6}} \left[m^{1/2}/s\right] - \text{Manning's Beiwert}$$

$$n = 0.012 (K_{St} = 83.33) - \text{Rauhigkeitsbeiwert für Stahl}$$

$$R = \frac{D}{4} \left[m\right] - \text{hydraulischer Radius}$$

$$v_{UW.St.} = \frac{Q_A}{F_{UW.St.}} \left[m/s\right]$$

$$L_{UW.St.} = 394.80m - \text{Länge des Unterwasserstollens}$$

<u>Turbinenbetrieb:</u>

$$\Delta h_{UW.St.T} = \frac{L_{UW.St.} * v^2_{UW.St.T}}{C^2 * R} = \frac{394.35 * 4.23^2}{78.52^2 * 0.7} = 1.63m$$

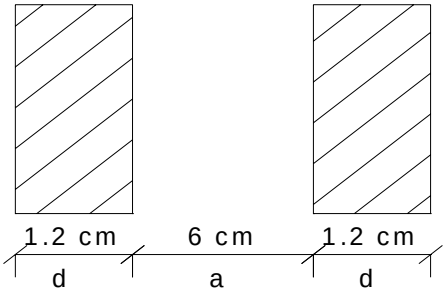
<u>Pumpbetrieb:</u>

$$\Delta h_{UW.St.P} = \frac{L_{UW.St.} * v^2_{UW.St.P}}{C^2 * R} = \frac{394.35 * 3.25^2}{78.52^2 * 0.7} = 0.97m$$

- **Auslaufbauwerk (Entnahmebauwerk)**
  - **Örtliche Verluste**
    - **Rechen (sieh Abschnitt 6)**

$$\Delta h_R = \xi_R * \frac{v_R^2}{2g}\,[m]$$

$$\xi_R = \beta \sin\alpha \left(\frac{d}{a}\right)^{\frac{4}{3}} - \text{nach Kirschmer} \quad /13/$$



$$\left.\begin{array}{l} \beta = 2.42 - \text{für rechteckige Stäbe} \\ \alpha = 70^\circ \\ a = 6cm \\ d = 1.2cm \end{array}\right. \qquad \Rightarrow \xi_R = 0.27$$

<u>Turbinenbetrieb:</u>

$$\Delta h_{R,T} = \xi_R * \frac{v_{R,T}^2}{2g} = 0.27 * \frac{0.83^2}{2 * 9.81} = 0.0095m$$

<u>Pumpbetrieb:</u>

$$\Delta h_{R,P} = \xi_R * \frac{v_{R,P}^2}{2g} = 0.27 * \frac{0.639^2}{2 * 9.81} = 0.006m$$

- **Einlaufbereich**

$$\Delta h_E = \xi_E * \frac{v_E^2}{2g}\,[m]$$

<u>Turbinenbetrieb:</u>

$$\xi_{E,T} = 1.0 - \text{als Auslauf im Turbinenbetrieb}$$

$$\Delta h_{E,T} = \xi_{E,T} * \frac{v_{R,T}^2}{2g} = 1 * \frac{0.83^2}{2 * 9.81} = 0.035m$$

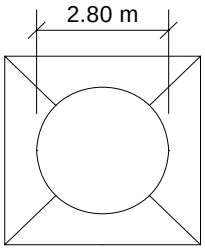
Pumpbetrieb:

$$\xi_{E,P} = 0.3$$

$$\Delta h_{E,P} = \xi_{E,P} * \frac{v_{R,P}^2}{2g} = 0.3 * \frac{0.639^2}{2 * 9.81} = 0.006m$$

- **Übergangsbereich zwischen Rechteck- und Kreisprofil**

$$\Delta h_{Überg.} = \xi_{Überg.} * \frac{v_{UW.Stollen}^2}{2g}$$



$$\xi_{Überg.} = 0.20 \text{ bei } \frac{l}{D} = 3$$

$$\xi_{Überg.} = 0.25 \text{ bei } \frac{l}{D} = 2$$

Die Werte von $\xi_{Überg.}$ wurde im hydraulischen Labor von UACG – Sofia bei ähnlichen Übergängen festgestellt.

$$\left| \begin{array}{l} l = 11m \\ D_{Einlaufb.} = 2.80m \quad \Rightarrow \xi_{Überg.} = 0.15 \\ \frac{l}{D} = \frac{11}{2.80} = 3.93 \end{array} \right.$$

Turbinenbetrieb:

$$\Delta h_{Überg.,T} = \xi_{Überg.} * \frac{v_T^2}{2g} = 0.15 * \frac{4.225^2}{2 * 9.81} = 0.14m$$

Pumpbetrieb:

$$\Delta h_{Überg.,P} = \xi_{Überg.} * \frac{v_P^2}{2g} = 0.15 * \frac{3.25^2}{2 * 9.81} = 0.08m$$

Gesamtverluste im Auslaufbauwerk:

Turbinenbetrieb:

$$\sum \Delta h_{Einlaufb.,T} = \Delta h_{R,T} + \Delta h_{E.,T} + \Delta h_{Überg.,T} \; [m]$$

$$\sum \Delta h_{Einlaufb.,T} = 0.0095 + 0.035 + 0.14 = 0.185 m$$

Pumpbetrieb:

$$\sum \Delta h_{Einlaufb.,P} = \Delta h_{R,P} + \Delta h_{E.,P} + \Delta h_{Überg.,P} \; [m]$$

$$\sum \Delta h_{Einlaufb.,P} = 0.006 + 0.006 + 0.08 = 0.092 m$$

Gesamtverluste im Unterwasserstollen:

Turbinenbetrieb:

$$\sum \Delta h_{UW.,T} = \Delta h_{1T} + \Delta h_{Konf.,T} + \Delta h_{Knick.,T} + \Delta h_{Verzw.,T} + \Delta h_{UW.St.,T} + \sum \Delta h_{Einlaufb.,T} \; [m]$$

$$\sum \Delta h_{UW,T} = 0.085 + 0.017 + 0.04 + 0.33 + 1.63 + 0.185 = 2.29 m$$

Pumpbetrieb:

$$\sum \Delta h_{UW.,P} = \Delta h_{1P} + \Delta h_{Konf.,P} + \Delta h_{Knick.,P} + \Delta h_{Verzw.,P} + \Delta h_{UW.St.,P} + \sum \Delta h_{Einlaufb.,P} \; [m]$$

$$\sum \Delta h_{UW,T} = 0.05 + 0.024 + 0.024 + 0.2 + 0.97 + 0.092 = 1.35 m$$

Gesamtverluste in den Leitungen (Triebwasserleitung und Unterwasserstollen):

Turbinenbetrieb:

$$\sum \Delta h_{Leitung,T} = \sum \Delta h_{TR.L.,T} + \sum \Delta h_{UW.,T} + [m]$$

$$\sum \Delta h_{Leitung,T} = 11.25 + 2.29 = 13.54 m$$

Pumpbetrieb:

$$\sum \Delta h_{Leitung.,P} = \sum \Delta h_{TR.L,P} + \sum \Delta h_{UW.,P} \; [m]$$

$$\sum \Delta h_{Leitung.,P} = 7.40 + 1.35 = 8.75 m$$

7.2 HYDRAULISCHE BERECHNUNGEN BEIM INSTATIONÄREN BETRIEB DES PUMPSPEICHERKRAFTWERKES

Die hydraulischen Berechnungen wurden im Rahmen dieser Vorprojektstudie nur für den ungünstigsten Betriebsfall (Netzzusammenbruch im Turbinenbetrieb) durchgeführt. Bei diesen Betriebsbedingungen entsteht vermutlich der für die Bemessung der Auskleidung maßgebende maximale Rohrinnendruck (Druckstoß).

Die Berechnungen wurden nur für den Turbinenbetrieb des PSKWs mittels eines am UACG – Sofia erarbeitetem Berechnungsprogramms HIUD durchgeführt.

7.2.1 Basisdaten der Triebwasserleitung:

Oberbecken	Unterbecken
STZ = 1980m	STZ = 1070m
ASZ = 1935m	ASZ = 1040m

$Q_A^T = 26\,m^3/s$ – Ausbaudurchfluss für die Pumpturbine

$D_{Einlaufbauw.} = 3.10\,m \Rightarrow F_{Einlaufbauw.} = \frac{\pi D^2}{4} = 7.54\,m^2$ (**s. Abschnitt 6**)

$D_{Schacht} = 3.10\,m \Rightarrow F_{Schacht} = \frac{\pi D^2}{4} = 7.54\,m^2$ (**s. Abschnitt 5**)

$D_{Stollen} = 2.80\,m \Rightarrow F_{Stollen} = \frac{\pi D^2}{4} = 6.154\,m^2$ (**s. Abschnitt 5**)

$L_{Gesamt} = 2670\,m$ – Gesamtlänge der Triebwasserleitung

$$\Rightarrow \left| \begin{array}{l} \text{in Turbinenbetrieb:} \\ v^T_{Einl.bauw.} = v^T_{Schacht} = \frac{Q_A^T}{F} = \frac{26}{7.54} = 3.45\,m/s \\ v^T_{Stollen} = v^T_{Stollen} = \frac{Q_A^T}{F} = \frac{26}{6.154} = 4.225\,m/s \end{array} \right.$$

$n = 0.014\,(K_{St} = 71.42)$ – Rauhigkeitsbeiwert für Betonoberfläche

$n = 0.012\,(K_{St} = 83.33)$ – Rauhigkeitsbeiwert für Stahl

$H_{BR} = 983.90\,m$ – Bruttofallhöhe vor der Pumpturbine (sieh Plan Nr.6)

$\sum \Delta h^{T}_{TR.L.} = 11.3\,m$ – Verlusthöhen in der Triebwasserleitun

$H_{NT} = H_{BR} - \sum \Delta h^{T}_{TR.L.}$ – Nettofallhöhe vor der Pumpturbine

$H_{NT} = 983.9 - 11.3 = 972.60m$

Mittlere Werte:

$v_{mittl.} = \frac{\sum v_i * L_i}{L_{Gesamt}} [m/s]$ – Mittlere Fließgeschwindigkeit in der Triebwasserleitung

	L m	v m/s	$\Sigma v_i * L_i$
Einlaufbauwerk	117.4	3.45	405.099
Lotschacht	880.3	3.45	3037.04
Druckstollen	1672.8	4.225	7067.66
Σ	2670.5		10509.8

Tabl. 7.1 Ermittlung der mittleren Geschwindigkeit

$$v_{mittl.} = \frac{10509.8}{2671} = 3.935\,m/s$$

$$F_{mittl.} = \frac{Q^{T}_{A}}{v_{mittl}} = \frac{26}{3.935} = 6.61m^2$$

$$\Rightarrow D_{mittl.} = \sqrt{\frac{4F_{mittl.}}{\pi}} = 2.9\,m$$ – mittlere Durchmesser der Triebwasserleitung

$$n_{mittl.} = \frac{n_{Betonoberfl.} + n_{Stahl}}{2} = 0.013$$ – mittlere Rauhigkeitsbeiwert

7.2.2 Geometrische Bedingungen in der Triebwasserleitung

Laut der Berechnungen im **Abschnitt 5** ist es erforderlich die Triebwasserleitung zu panzern. Der Raum zwischen der Panzerung und dem Fels soll mindestens 30cm betragen, damit die einzelnen Rohrschüsse einseitig verschweißt werden können ($d_{Hinterfüllbet.} = 0.30\,m$). Es ist auch eine Spritzbetonschicht mit Dicke 5 cm vorgesehen, die als Sicherung während der Hohlraumherstellung dient. Für die Verfestigung des Felsens sind Injektionsmaßnahmen mit einer angenommene Injektionstiefe von 1.5m ($l_{inj.} = 1.5\,m$) vorgesehen (Abb. 7.5).

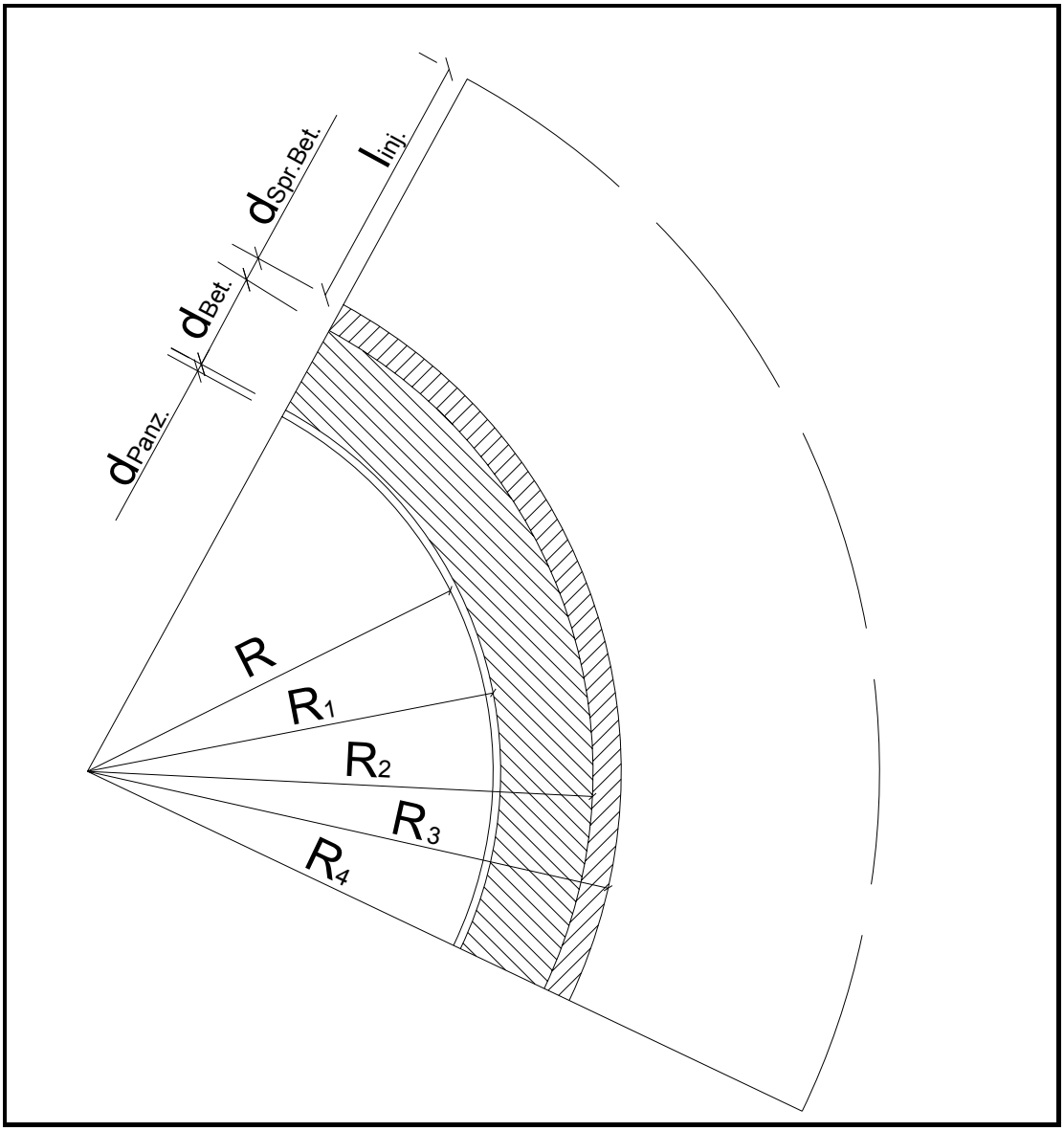


Abb. 7.5 Geometrische Bedingungen in der Triebwasserleitung

- **Vorbemessung der Rohrblechdicke ($d_{Panz.}$) /11/**

Die Vorabschätzung der Blechdicke ermöglicht die Ermittlung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Druckwelle.

Für eine angenommene Blechstärke ist die entsprechende zulässige Wasserdruckhöhe (H_{max}) berechnet.

$$d_{Panz.} = r_0 * \left[\frac{\gamma_n * \left(p_{max} + 0.0003 * K_o^{'}\right)}{\gamma_c * R} - 4.33 * 10^{-6} * K_o^{'} \right] [cm] - \text{ Blechstärke} \quad \text{(Gl. 7.1)}$$

$p_{max} = \gamma_W * H_{max}$ $[MPa]$ – maximale Wasserdruck innen

$r_0 = r + \frac{d_{Panz.}}{2} [cm]$ – Achsradien der Panzerung

$K_o^{'} = \frac{1}{\frac{1}{E_{Bet.}} * \ln\left(\frac{r_2}{r_0}\right) + \frac{1}{K_o}} \left[N/cm^3\right]$ – verminderte Felswiderstand

$r_2 = r + d_{Hinterfüllbet.} + d_{Panz.} + d_{Spritzbet.} [cm]$ – Radien des Aushubsprofil

$r = \frac{D}{2} [cm]$ – Radien der Triebwasserleitung

$R = 0.77 R_u$ $[MPa]$ – Bemessungsspannung des Stahles

$R_u [MPa]$ – Stahlwiderstand

$R_u = 700 MPa$ – angenommene Stahl 14X2GMRB – nach russische Normen GOST

$\gamma_c = 0.75$ – für Stahl – Beiwert für Betriebsbedingungen

$\gamma_n = 1.25$ – Beiwert für Anlagen I Klasse

Aus Gl. 7.1 folgt

$$H_{max} = \frac{\gamma_c * R * \left(d_{Panz.} + 4.33 * 10^{-6} * K_o^{'} * r_0\right) - 0.0003 * K_o^{'} * r_0 * \gamma_n}{r_0 * \gamma_n * \gamma_W} \; [m] \qquad \text{(Gl.7.2)}$$

— **Lotschacht**

$d_{Panz.} = 2.2 cm$ – angenommen

$r_0 = r + \frac{d_{Panz.}}{2} = \frac{310}{2} + \frac{2.2}{2} = 156.1 cm$

$K_o^{'} = \frac{1}{\frac{1}{E_{Bet.}} * \ln\left(\frac{r_2}{r_0}\right) + \frac{1}{K_o}} = 4933.82 \; N/cm^3$

$E_{Bet.} = 31500 MPa$ – für Beton B30

$K_o = 5100 N/cm^3$ – $f_{PR} = 9$ (RMR 70 – 90)

$r_2 = r + d_{Hinterfüllbet.} + d_{Panz.} + d_{Spritzbet.} = 155 + 30 + 2.2 + 5 = 192.2 cm$

$R = 0.77 R_u = 539 MPa$

aus Gl.7.2 $\Rightarrow H_{max} = 998.7 m$

Im Lotschacht wird keinen übergroßen dynamischen Wasserdruck erwartet. Aus diesem Grund wird angenommen eine Blechstärke von 2.2 cm als ausreichend.

— **Druckstollen**

$d_{Panz.} = 3.4\,cm -$ angenommen

$$r_0 = r + \frac{d_{Panz.}}{2} = \frac{280}{2} + \frac{3.4}{2} = 141.7\,cm$$

$$K_o^{'} = \frac{1}{\frac{1}{E_{Bet.}} * \ln\left(\frac{r_2}{r_0}\right) + \frac{1}{K_o}} = 4074.9\ N/cm^3$$

$E_{Bet.} = 31500\,MPa -$ für Beton B30

$K_o = 4200\,N/cm^3 - f_{PR} = 8$ (RMR $70 - 90$)

$r_2 = r + d_{Hinterfüllbet.} + d_{Panz.} + d_{Spritzbet.} = 140 + 30 + 3.4 + 5 = 178.4\,cm$

$R = 0.77 R_u = 539\,MPa$

aus Gl.7.2 $\Rightarrow H_{max} = 1224.3\,m$

Einen dynamischen Wasserdruck größer als der berechneten von $H_{max} = 1224.3\,m$ wird nicht erwartet.

7.2.3 Ausbreitungsgeschwindigkeit der Druckwelle

$$a = \frac{c_{Schallg.}}{\sqrt{1 + \frac{k_W}{k_{TR}}}}\ [m/s]$$

$c_{Schallg.} = 1425\,m/s -$ Schallgeschwindigkeit im Wasser

$k_W = 2 * 10^5\,N/cm^2 -$ Beiwert der Volumenelastizität des Wassers

$k_{TR}\left[N/cm^2\right] -$ Beiwert für die Elastizität der Triebwasserleitung inkl. Fels

Dieser Beiwert ist mit der Formel von Dipl.Ing. L.N. Kurek berechnet (Gl.7.3).

$$k_{TR} = \frac{1}{2}\left(A_0 + B_1 + B_2 + C + N\right)\left[N/cm^2\right] \qquad \text{(Gl.7.3)}$$

$$A_0 = \frac{E_{Stahl} * d_{Panz.}}{r_1}\left[N/cm^2\right] - \text{Beiwert der Panzerung} \qquad \text{(Gl.7.4)}$$

$$B_1 = \frac{E_{Bet.} * \ln\frac{r_2}{r_1}}{1-\mu_{Bet.}^2}\left[N/cm^2\right] - \text{Beiwert des Hinterfüllbetons} \qquad \text{(Gl.7.5)}$$

$$B_2 = \frac{E_{Bet.} * \ln\frac{r_3}{r_2}}{1-\mu_{Bet.}^2}\left[N/cm^2\right] - \text{Beiwert des Spritzbetons} \qquad \text{(Gl.7.6)}$$

$$C = \frac{E_{inj.Fels.} * \ln\frac{r_4}{r_3}}{1-\mu_{inj.Fels.}^2}\left[N/cm^2\right] - \text{Beiwert des injizierten Felsens} \qquad \text{(Gl.7.7)}$$

$$N = \frac{E_{Fels.}}{1+\mu_{Fels.}}\left[N/cm^2\right] - \text{Beiwert des natürlichen Felsens} \qquad \text{(Gl.7.8)}$$

$E_{Stahl} = 21 * 10^6\ N/cm^2$ – Elastizitätsmodul des Stahles

$E_{Bet.} = 31.5 * 10^5\ N/cm^2$ – Elastizitätsmodul des Betons für Beton B30

$E_{Fels.} = 100 * K_o * \left(1+\mu_{Fels}\right) N/cm^2$ – Elastizitätsmodul des Felsens

μ_{Fels} – Poisson's Beiwert für den Felsen

$\mu_{Bet.} = 0.20$ – Poisson's Beiwert für Beton

$\mu_{inj.Fels} = 0.22$ – Poisson's Beiwert für den injizierten Felsen

angenommen: $\frac{E_{inj.Fels.}}{E_{Fels.}} = 1.2$

$\Rightarrow E_{inj.Fels.} = E_{Fels.}\ N/cm^2$ – Elastizitätsmodul des injizierten Felsens

- **Entnahmebauwerk**

$D = 310\,cm$	$r = 155\,cm$	
$d_{Hinterfüllbet.} = 20cm$	$r_1 = r + d_{Panz.} = 155cm$	
$d_{Spritzbet.} = 5cm$	$r_2 = r_1 + d_{Hinterfüllbet.} = 175cm$	(sieh Abb.7.5)
$l_{inj.} = 150cm$	$r_3 = r_2 + d_{Spritzbet.} = 180cm$	
$d_{Panz.} = 0$	$r_4 = r_3 + l_{inj.} = 330cm$	

$$E_{Fels.} = 100 * K_o * (1 + \mu_{Fels})\ N/cm^2$$

$$K_o = 5100\ N/cm^3 - f_{PR} = 9\ (RMR\ 70 - 90)$$

$$\mu_{Fels} = 0.25$$

$$\Rightarrow E_{Fels.} = 637500\,N/cm^2$$

$$\frac{E_{inj.Fels.}}{E_{Fels.}} = 1.2$$

$$\Rightarrow E_{inj.Fels.} = 765000\,N/cm^2$$

$$\text{Aus Gl.7.4} \Rightarrow A_0 = 0\ \ N/cm^2$$

$$\text{Aus Gl.7.5} \Rightarrow B_1 = 398215.3\ N/cm^2$$

$$\text{Aus Gl.7.6} \Rightarrow B_2 = 92435.69\ N/cm^2$$

$$\text{Aus Gl.7.7} \Rightarrow C = 594479.3\ N/cm^2$$

$$\text{Aus Gl.7.8} \Rightarrow N = 510000\,N/cm^2$$

$$\text{Aus Gl.7.3} \Rightarrow k_{TR} = 797565.2\ N/cm^2$$

$$\Rightarrow a = \frac{c_{Schallg.}}{\sqrt{1 + \frac{k_W}{k_{TR}}}} = \frac{1425}{\sqrt{1 + \frac{2 * 10^5}{797565.2}}} = 1274.17\,m/s$$

- **Lotschacht**

$D = 310\,cm$	$r = 155\,cm$	
$d_{Hinterfüllbet.} = 30cm$	$r_1 = r + d_{Panz.} = 157.2cm$	
$d_{Spritzbet.} = 5cm$	$r_2 = r_1 + d_{Hinterfüllbet.} = 187.2cm$	(s. Abb.7.5)
$l_{inj.} = 150cm$	$r_3 = r_2 + d_{Spritzbet.} = 192.2cm$	
$d_{Panz.} = 2.2\,cm$	$r_4 = r_3 + l_{inj.} = 342.2cm$	

$$E_{Fels.} = 100 * K_o * (1 + \mu_{Fels})\ N/cm^2$$

$$K_o = 5100\ N/cm^3 - f_{PR} = 9\ (RMR\ 70 - 90)$$

$$\mu_{Fels} = 0.25$$

$$\Rightarrow E_{Fels.} = 637500\,N/cm^2$$

$$\frac{E_{inj.Fels.}}{E_{Fels.}} = 1.2$$

$$\Rightarrow E_{inj.Fels.} = 765000\,N/cm^2$$

$$\text{Aus Gl.7.4} \Rightarrow A_0 = 293893.1\ N/cm^2$$

$$\text{Aus Gl.7.5} \Rightarrow B_1 = 573098.8\ N/cm^2$$

$$\text{Aus Gl.7.6} \Rightarrow B_2 = 86490.25\ N/cm^2$$

$$\text{Aus Gl.7.7} \Rightarrow C = 565765.4\ N/cm^2$$

$$\text{Aus Gl.7.8} \Rightarrow N = 510000\,N/cm^2$$

$$\text{Aus Gl.7.3} \Rightarrow k_{TR} = 1014624\ N/cm^2$$

$$\Rightarrow a = \frac{c_{Schallg.}}{\sqrt{1+\frac{k_W}{k_{TR}}}} = \frac{1425}{\sqrt{1+\frac{2*10^5}{1014624}}} = 1302.41\,m/s$$

- **Druckstollen**

$D = 280\,cm$	$r = 140\,cm$	
$d_{Hinterfüllbet.} = 30cm$	$r_1 = r + d_{Panz.} = 143.4cm$	
$d_{Spritzbet.} = 5cm$	$r_2 = r_1 + d_{Hinterfüllbet.} = 173.4cm$	(s. Abb.7.5)
$l_{inj.} = 150cm$	$r_3 = r_2 + d_{Spritzbet.} = 178.4cm$	
$d_{Panz.} = 3.4\,cm$	$r_4 = r_3 + l_{inj.} = 328.4cm$	

$$E_{Fels.} = 100 * K_o * \left(1+\mu_{Fels}\right)\ N/cm^2$$

$$K_o = 4200\ N/cm^3 - f_{PR} = 8\ (\text{RMR } 70-90)$$

$$\mu_{Fels} = 0.27$$

$$\Rightarrow E_{Fels.} = 533400\,N/cm^2$$

$$\frac{E_{inj.Fels.}}{E_{Fels.}} = 1.2$$

$$\Rightarrow E_{inj.Fels.} = 640080\,N/cm^2$$

$$\text{Aus Gl.7.4} \Rightarrow A_0 = 497907.9\ N/cm^2$$

$$\text{Aus Gl.7.5} \Rightarrow B_1 = 623316.5\ N/cm^2$$

$$\text{Aus Gl.7.6} \Rightarrow B_2 = 93276.6\ N/cm^2$$

$$\text{Aus Gl.7.7} \Rightarrow C = 500742.9\ N/cm^2$$

$$\text{Aus Gl.7.8} \Rightarrow N = 420000\,N/cm^2$$

$$\text{Aus Gl.7.3} \Rightarrow k_{TR} = 1067622\ N/cm^2$$

$$\Rightarrow a = \frac{c_{Schallg.}}{\sqrt{1+\frac{k_W}{k_{TR}}}} = \frac{1425}{\sqrt{1+\frac{2*10^5}{1067622}}} = 1307.76\,m/s$$

- **Mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit der Druckwelle**

$$a_{mittl.} = \frac{L_{Gesamt}}{\sum \frac{a_i}{L_i}} [m/s] - \text{Mittlere Ausbreitungsschwindigkeit der Druckwelle}$$

	L m	a_i m/s	$\Sigma a_i/L_i$
Einlaufbauwerk	117.4	1274.17	0.092154
Lotschacht	880.3	1302.40	0.675903
Druckstollen	1672.8	1307.76	1.279147
Σ	2670.5		2.047204

Tabl. 7.2 Ermittlung der mittleren Ausbreitungsgeschwindigkeit der Druckwelle

$$a_{mittl.} = \frac{2670.5}{2.0472} = 1304.5\,m/s$$

7.2.4 Schließzeit des Leitapparates der Pumpturbine

Die Schließzeit ist von SALZBURG AG vorbestimmt —— $T_S^T = 25\,s$

7.2.5 Druckstoßphase

$$T_{Ph.} = \frac{2L_{Gesamt}}{a_{mittl}} = 4.09\,s$$

$$T_S^T = 25\,s \square\ T_{Ph.} = 4.09\,s - \text{indirekter Druckstoß}$$

7.2.6 Pumpturbinenbeiwert

$$\kappa = \frac{\Delta Q_l^I / \Delta Q_{l,0}^I}{\Delta n_l^I / \Delta n_l^I} = -0.2$$

Da auch keine Turbinenkennlinien zu Verfügung standen wurde ein mittlerer Beiwert k in Analogie mit einer Francis-Turbine angenommen.

Die instationäre Berechnung mit dem Programm HIUD wurde unter Voraussetzung folgender Randbedingungen durchgeführt. Die oberwasserseitige Randbedingung stellt das maximale Stauziel im Oberbecken dar, welches als konstant angenommen wird. Die unterwasserseitige Randbedingung wird durch die Turbine dargestellt, welche in Abhängigkeit der Zeit den Durchfluss regelt (Schließgesetz).

Druckstoßberechnung

Eingangsdaten

Anzahl der Rohrabschnitte: 51

Berechnungszeitschritt: 0.2 s

Gesamtlänge = 2671.00m

Mittlere Durchmesser = 2.900m

Ausbreitungsgeschwindigkeit = 1304.50m/s

Mittlere Rauhigkeitsbeiwert = 0.013

Q_A^T = 26.000m3/s

H_{BR} = 983.90m

H_{NT} = 972.60m

Z Pumpe = 0.00m

T Ende = 133.s

Schließgesetz

Zeit	T(s)
0.	1.000
25.	0.000
133.	0.000

Die Ergebnisse für die maximale dynamische Drucklinie sind im Tabl. 7.3 angegeben.

S m	Hmin m	Hmax m
0.0	983.90	983.90
53.4	982.94	985.22
106.8	981.99	986.53
160.2	981.03	987.84
213.6	980.08	989.15
267.0	979.13	990.45
320.4	978.50	991.75
373.8	977.85	993.04
427.2	977.20	994.33
480.6	976.55	995.61
534.0	975.89	996.90
587.4	975.22	998.17
640.8	974.54	999.45
694.2	973.78	1000.71
747.6	973.02	1001.98
801.0	972.26	1003.24
854.4	971.50	1004.49
907.8	970.75	1005.75
961.2	970.00	1006.99
1014.6	969.26	1008.24
1068.0	968.52	1009.48
1121.4	967.78	1010.71
1174.8	967.04	1011.95
1228.2	966.31	1013.17
1281.6	965.58	1014.40
1335.0	964.86	1015.62
1388.4	964.14	1016.83
1441.8	963.42	1018.04
1495.2	962.71	1019.25
1548.6	962.00	1020.45
1602.0	961.29	1021.65
1655.4	960.59	1022.85
1708.8	959.89	1024.04
1762.2	959.20	1025.22
1815.6	958.51	1026.41
1869.0	957.83	1027.58
1922.4	957.15	1028.76
1975.8	956.47	1029.93
2029.2	955.77	1031.10
2082.6	955.00	1032.26
2136.0	954.23	1033.42
2189.4	953.46	1034.57
2242.8	952.68	1035.72
2296.2	951.90	1036.87
2349.6	951.12	1038.01
2403.0	950.34	1039.15
2456.4	949.55	1040.28
2509.8	948.77	1041.41
2563.2	947.98	1042.54
2616.6	947.18	1043.66
2671.0	946.56	1044.48

Abb. 7.3 Ergebnisse für die Druckhöhenänderung

Die berechneten Ergebnisse sind am Abb. 7.6, Abb. 7.7 und Abb. 7.8 visualisiert.

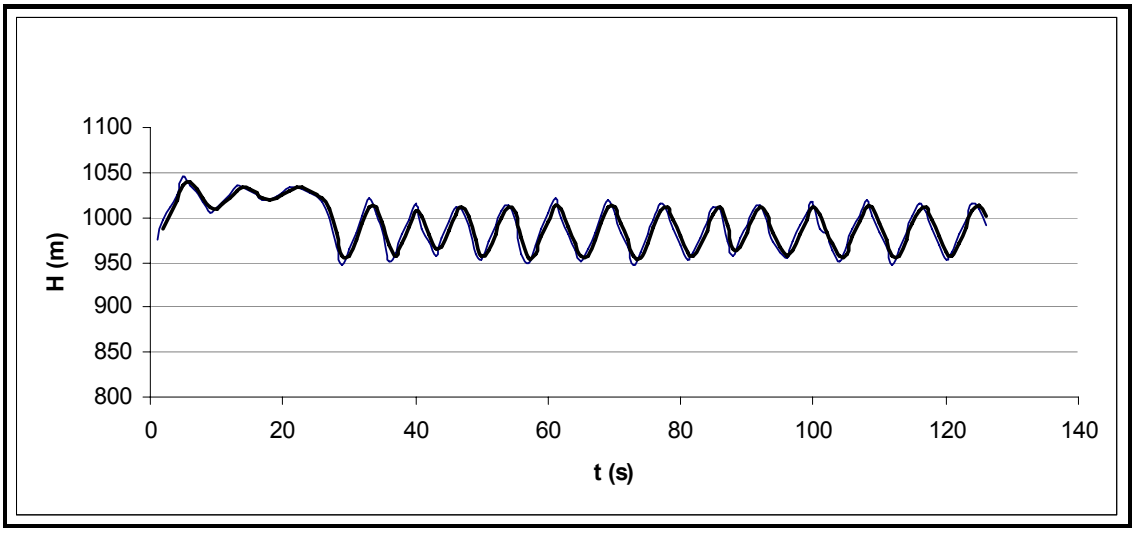


Abb. 7.6 Änderung der Druckhöhe

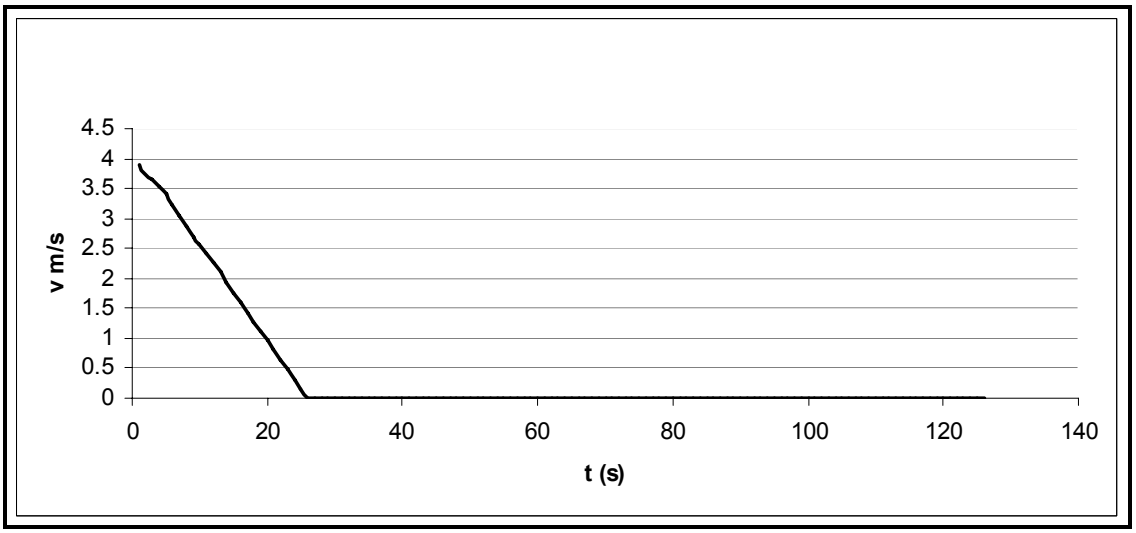


Abb. 7.7 Änderung der Fließgeschwindigkeit an der Turbine

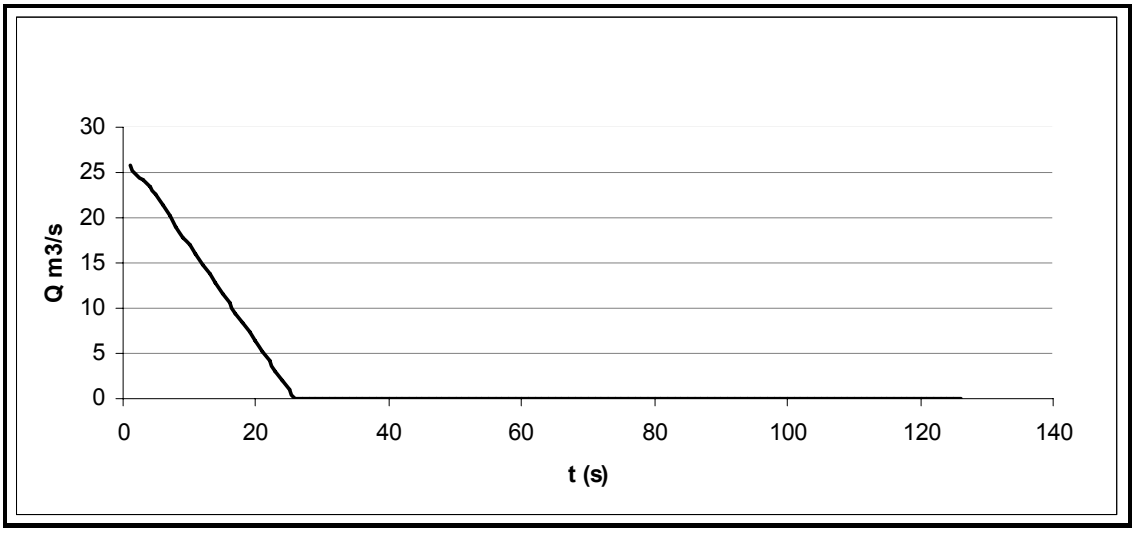


Abb. 7.8 Änderung des Wasserdurchflusses an der Turbine

Die dynamische Berechnung ergibt eine Wasserdruckerhöhung von ca. 6% der statischen Fallhöhe vor der Pumpturbine.

8 STATISCHE BERECHNUNG DER TRIEBWASSERLEITUNG

In diesem Kapitel wird die Auskleidung der Triebwasserleitung dimensioniert. Zur Vereinfachung der statischen Berechnungen wird vorweg eine Stärke der Auskleidung angenommen, für die der Spannungsnachweiß für die entsprechenden Belastungen durchgeführt wird.

8.1 SICHERUNGSMASSNAHMEN

Die unmittelbaren Sicherungsmaßnahmen nach Ausbruch des Hohlraums sollen das Ausbruchsprofil vor Zerstörung infolge Gebirgsdruck schützen, sie hängen im Wesentlichen von der Geologie des Gebirges, der Größe des Ausbruchsprofils und von der Art des Vortriebes ab.

Beim gegenständlichen Projekt wird das Gebirge mit relativ hoher Festigkeit (**s. Abschnitt 5**) angenommen, dies soll einen wirtschaftlichen mechanischen Vortrieb (Tunnelfräse, Raise- Boring-Verfahren) der Triebwasserleitung ermöglichen. Zur Sicherung des Ausbruchsprofils ist eine 5 cm dicke Spritzbetonschicht geplant.

8.2 ALLGEMEINES ZUR BERECHNUNG DER AUSKLEIDUNG /15/

Wie bereits erwähnt, soll die Triebwasserleitung gepanzert ausgeführt werden. Es werden dabei die Stahlrohrschüsse in den Hohlraum eingebracht und mit Beton (30cm für einseitig verschweißte Stahlrohre) hinterfüllt. Für die Zeit der Bauherstellung (leere Triebwasserleitung) wird die Auskleidung unter der Voraussetzung bemessen, dass die Belastung nur vom Hinterfüllbeton übernommen wird. Die Stärke des Füllbetonrings soll den Gebirgsdruck, das Eigengewicht und den Injektionsdruck aufnehmen. Bei Gebirge mit guten mechanischen Eigenschaften ($f_{PR} > 6$ (RMR $>$ 70)) wird die Dicke des Hinterfüllbetons für die wirkenden Lasten üblicherweise nicht nachgewiesen, da der Gebirgsdruck nur geringfügiges Ausmaß besitzt und das Eigengewicht durch Kohäsion auf den Felsen übertragen wird /15/. Aus diesen Gründen ist die Bemessung des Hinterfüllbetons in der vorliegenden Studie nicht durchgeführt worden.

Die Stärke der Panzerung ist auf die Belastung infolge Innenwasserdruck (max. dynamisch), Außenwasserdruck (Belastung von Bergwasser), Temperaturänderungen und Belastung infolge Poisson Effekt bemessen.

Für die Berechnung der Panzerungsstärke im Betriebszustand (gefüllter Triebwasserleitung) wird angenommen, dass der Innenwasserdruck nur teilweise von der Panzerung bzw. vom Felsen übernommen wird. Der Hinterfüllbeton wird als gerissen vorausgesetzt und kann deshalb nur Druckkräfte auf den Felsen übertragen. Der infolge Kriechen, Schwinden und Temperaturänderungen, entstehenden Spalt zwischen Panzerrohr und Hinterfüllbeton wird durch den angewandten Berechnungsalgorithmus entsprechend berücksichtigt

Die Bemessung der Auskleidung erfolgt auf eine zulässige Spannung, d.h. die in der Panzerung auftretenden Schub- und Normalspannungen sollen kleiner als die zulässigen Spannungen sein.

$$\sigma_{zul.} = \frac{\gamma_c * R}{\gamma_n} \; [MPa]$$

$R = 0.77 R_u \; [MPa] -$ Bemessungsspannung des Stahles

$R_u [MPa] -$ Stahlwiderstand

$R_u = 700 MPa -$ angenommene Stahl 14X2GMRB – nach russischer Norm GOST

$\gamma_c = 0.75 -$ für Stahl – Beiwert für Betriebsbedingungen

$\gamma_n = 1.25 -$ Beiwert für Anlagen I Klasse

$$\Rightarrow \sigma_{zul} = \frac{0.75 * 0.77 * 700}{1.25} = 323.4 MPa$$

$$\sigma_x \leq \frac{\gamma_c * R}{\gamma_n} \; [MPa] - \text{Normalspannung}$$

$$\sigma_z \leq \frac{\gamma_c * R}{\gamma_n} \; [MPa] - \text{Schubspannung}$$

$$\sigma_{Equiv.} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_z + \sigma_z^2} \leq \frac{\gamma_c * R}{\gamma_n} \; [MPa]$$

8.3 STATISCHE BERECHNUNG DES LOTSCHACHTES UND DES DRUCKSTOLLENS

Der Lotschacht wird in 18 Bereiche geteilt, jeder außer dem letzten, besitzt eine Tiefe (Länge) von 50m. Der Druckstollen wird ebenfalls in Bereiche mit je einer Länge von 100m unterteilt. Die Spannungen werden an den Knotenpunkten bestimmt (s.Plan Nr.6). Die Kenndaten für die einzelnen Rohrbereiche sind in den folgenden Tabellen dargestellt.

— **Für den Lotschacht (Tabl. 8.1,Tabl. 8.2 und Tabl. 8.3)**

Bereich No	L m	D m	Ko N/cm³	RMR	$H_{dyn.}$ m
1	50	3.1	5100	90	125
2	50	3.1	5100	90	175
3	50	3.1	5100	90	225
4	50	3.1	5100	90	275
5	50	3.1	5100	90	325
6	50	3.1	5100	90	375
7	50	3.1	5100	90	425
8	50	3.1	5100	90	475
9	50	3.1	5100	90	525
10	50	3.1	5100	90	575
11	50	3.1	5100	90	625
12	50	3.1	5100	90	675
13	50	3.1	5100	90	725
14	50	3.1	5100	90	775
15	50	3.1	5100	90	825
16	50	3.1	5100	90	875
17	50	3.1	5100	90	925
18	30.3	3.1	5100	90	955.6

Tabl. 8.1 Daten für die Lotschachtbereiche

Bereich No	r m	r_1 m	r_2 m	r_0 m	a_r m	$d_{Panz.}$ m	$d_{Hinterfüllbet.}$ m
1	1.55	1.572	1.922	1.561	0.000468	0.022	0.3
2	1.55	1.572	1.922	1.561	0.000468	0.022	0.3
3	1.55	1.572	1.922	1.561	0.000468	0.022	0.3
4	1.55	1.572	1.922	1.561	0.000468	0.022	0.3
5	1.55	1.572	1.922	1.561	0.000468	0.022	0.3
6	1.55	1.572	1.922	1.561	0.000468	0.022	0.3
7	1.55	1.572	1.922	1.561	0.000468	0.022	0.3
8	1.55	1.572	1.922	1.561	0.000468	0.022	0.3
9	1.55	1.572	1.922	1.561	0.000468	0.022	0.3
10	1.55	1.572	1.922	1.561	0.000468	0.022	0.3
11	1.55	1.572	1.922	1.561	0.000468	0.022	0.3
12	1.55	1.572	1.922	1.561	0.000468	0.022	0.3
13	1.55	1.572	1.922	1.561	0.000468	0.022	0.3
14	1.55	1.572	1.922	1.561	0.000468	0.022	0.3
15	1.55	1.576	1.926	1.563	0.000469	0.026	0.3
16	1.55	1.576	1.926	1.563	0.000469	0.026	0.3
17	1.55	1.58	1.930	1.565	0.00047	0.03	0.3
18	1.55	1.58	1.930	1.565	0.00047	0.03	0.3

Tabl. 8.2 Daten für die Lotschachtbereiche

Bereich No	$E_{bet.}$ B30 MPa	r_2 cm	r_0 cm	K_o N/cm³	K_o' N/cm³
1	31500	192.24683	156.1	5100	4933.628
2	31500	192.24683	156.1	5100	4933.628
3	31500	192.64689	156.3	5100	4933.011
4	31500	192.64689	156.3	5100	4933.011
5	31500	193.04695	156.5	5100	4932.396
6	31500	192.24683	156.1	5100	4933.628
7	31500	192.24683	156.1	5100	4933.628
8	31500	192.24683	156.1	5100	4933.628
9	31500	192.24683	156.1	5100	4933.628
10	31500	192.24683	156.1	5100	4933.628
11	31500	192.24683	156.1	5100	4933.628
12	31500	192.24683	156.1	5100	4933.628
13	31500	192.24683	156.1	5100	4933.628
14	31500	192.24683	156.1	5100	4933.628
15	31500	192.64689	156.3	5100	4933.011
16	31500	192.64689	156.3	5100	4933.011
17	31500	193.04695	156.5	5100	4932.396
18	31500	193.04695	156.5	5100	4932.396

Tabl. 8.3 Daten für die Lotschachtbereiche

— **Für den Druckstollen (Tabl. 8.4, Tabl. 8.5 und Tabl. 8.6)**

Bereich No	L m	D m	Ko N/cm³	RMR	$H_{überd.}$ m	H_{dyn} m
19	34	2.8	4200	80	992.3	974.44
20	100	2.8	4200	80	1002.6	980.52
21	100	2.8	4200	80	1053.3	984
22	100	2.8	4200	80	1103.7	988.67
23	100	2.8	4200	80	1080.4	992.75
24	100	2.8	4200	80	1014.4	996.82
25	100	2.8	4200	80	947.1	1000.9
26	100	2.8	4200	80	879.6	1005
27	100	2.8	4200	80	814.9	1009.05
28	100	2.8	4200	80	754.6	1013.13
29	100	2.8	4200	80	632.2	1017.2
30	100	2.8	4200	80	554.5	1021.28
31	100	2.8	4200	80	457.1	1025.35
32	100	2.8	4200	80	349.2	1029.43
33	100	2.8	4200	80	258.2	1033.5
34	100	2.8	4200	80	200.2	1037.6
35	100	2.8	4200	80	153.4	1041.65

Tabl. 8.4 Daten für die Druckstollenbereiche

Bereich No	r m	r_1 m	r_2 m	r_0 m	a_r m	$d_{Panz.}$ m	$d_{Hinterfüllbet.}$ m
19	1.4	1.43	1.730	1.415	0.000425	0.03	0.3
20	1.4	1.43	1.730	1.415	0.000425	0.03	0.3
21	1.4	1.43	1.730	1.415	0.000425	0.03	0.3
22	1.4	1.43	1.730	1.415	0.000425	0.03	0.3
23	1.4	1.43	1.730	1.415	0.000425	0.03	0.3
24	1.4	1.43	1.730	1.415	0.000425	0.03	0.3
25	1.4	1.43	1.730	1.415	0.000425	0.03	0.3
26	1.4	1.43	1.730	1.415	0.000425	0.03	0.3
27	1.4	1.43	1.730	1.415	0.000425	0.03	0.3
28	1.4	1.43	1.730	1.415	0.000425	0.03	0.3
29	1.4	1.43	1.730	1.415	0.000425	0.03	0.3
30	1.4	1.43	1.730	1.415	0.000425	0.03	0.3
31	1.4	1.43	1.730	1.415	0.000425	0.03	0.3
32	1.4	1.43	1.730	1.415	0.000425	0.03	0.3
33	1.4	1.43	1.730	1.415	0.000425	0.03	0.3
34	1.4	1.43	1.730	1.415	0.000425	0.03	0.3
35	1.4	1.43	1.730	1.415	0.000425	0.03	0.3

Tabl. 8.5 Daten für die Druckstollenbereiche

Bereich No	E_{Bet} B30 MPa	r_2 cm	r_0 cm	K_o N/cm³	K_o' N/cm³
19	31500	173.04245	141.5	4200	4090.252
20	31500	173.04245	141.5	4200	4090.252
21	31500	173.04245	141.5	4200	4090.252
22	31500	173.04245	141.5	4200	4090.252
23	31500	173.04245	141.5	4200	4090.252
24	31500	173.04245	141.5	4200	4090.252
25	31500	173.04245	141.5	4200	4090.252
26	31500	173.04245	141.5	4200	4090.252
27	31500	173.04245	141.5	4200	4090.252
28	31500	173.04245	141.5	4200	4090.252
29	31500	173.04245	141.5	4200	4090.252
30	31500	173.04245	141.5	4200	4090.252
31	31500	173.04245	141.5	4200	4090.252
32	31500	173.04245	141.5	4200	4090.252
33	31500	173.04245	141.5	4200	4090.252
34	31500	173.04245	141.5	4200	4090.252
35	31500	173.04245	141.5	4200	4090.252

Tabl. 8.6 Daten für die Druckstollenbereiche

- **Schubspannungen infolge Innenwasserdruck mit Berücksichtigung der Gebirgsmitwirkung ($K_0 > 1000 N/cm^3$)**

$$\sigma_{z_0} = \frac{p_{wi} * r_0 + a_r * K_o'}{d_{Panz.} + 4.33 * 10^{-6} * r_0 * K_o'} \leq \frac{\gamma_c * R}{\gamma_n} \; [MPa]$$

$p_{wi} = \gamma_W * H_{dyn.} \; [MPa]$ – Innenwasserdruck

$r_0 = r + \frac{d_{Panz.}}{2} [cm]$ – Achsradien der Panzerung

$K_o' = \frac{1}{\frac{1}{E_{Bet.}} * \ln\left(\frac{r_2}{r_0}\right) + \frac{1}{K_o}} \; [N/cm^3]$ – verminderte Felswiderstand

$r_2 = r + d_{Hinterfüllbet.} + d_{Panz.} + d_{Spritzbet.} + a_r \; [cm]$ – Radien des Aushubsprofil

$r = \frac{D}{2} [cm]$ – Radien der Triebwasserleitung

$d_{Panz.} [cm]$ – Panzerrohrstärke

$a_r = 4.33 * 10^{-4} * r_0 [cm]$ – Spalt zwischwen Panzerrohr und Füllbeton

— **Für den Lotschacht (Tabl. 8.7)**

Bereich No	p_{wi} MPa	r_0 cm	a_r cm	K_o' N/cm³	$d_{panz.}$ cm	$\sigma_{z.o}$ MPa	γcR/γn MPa
1	1.25	156.1	0.04683	4933.628	2.2	77.00	323.4
2	1.75	156.1	0.04683	4933.628	2.2	91.10	323.4
3	2.25	156.3	0.04689	4933.011	2.2	105.26	323.4
4	2.75	156.3	0.04689	4933.011	2.2	119.37	323.4
5	3.25	156.5	0.04695	4932.396	2.2	133.55	323.4
6	3.75	156.1	0.04683	4933.628	2.2	147.51	323.4
7	4.25	156.1	0.04683	4933.628	2.2	161.61	323.4
8	4.75	156.1	0.04683	4933.628	2.2	175.71	323.4
9	5.25	156.1	0.04683	4933.628	2.2	189.81	323.4
10	5.75	156.1	0.04683	4933.628	2.2	203.92	323.4
11	6.25	156.1	0.04683	4933.628	2.2	218.02	323.4
12	6.75	156.1	0.04683	4933.628	2.2	232.12	323.4
13	7.25	156.1	0.04683	4933.628	2.2	246.22	323.4
14	7.75	156.1	0.04683	4933.628	2.2	260.32	323.4
15	8.25	156.3	0.04689	4933.011	2.6	256.09	323.4
16	8.75	156.3	0.04689	4933.011	2.6	269.25	323.4
17	9.25	156.5	0.04695	4932.396	3.0	264.76	323.4
18	9.556	156.5	0.04695	4932.396	3.0	272.31	323.4

Tabl. 8.7 Ermittlung der Schubspannungen infolge Innenwasserdruck

— **Für den Druckstollen (Tabl. 8.8)**

Bereich No	p_{wi} MPa	r_0 cm	a_r cm	K_o' N/cm³	$d_{panyz.}$ cm	$\sigma_{z\cdot o}$ MPa	γcR/γn MPa
19	9.74	141.5	0.04245	4090.25	3.0	281.95	323.4
20	9.81	141.5	0.04245	4090.25	3.0	283.52	323.4
21	9.84	141.5	0.04245	4090.25	3.0	284.41	323.4
22	9.89	141.5	0.04245	4090.25	3.0	285.61	323.4
23	9.93	141.5	0.04245	4090.25	3.0	286.66	323.4
24	9.97	141.5	0.04245	4090.25	3.0	287.71	323.4
25	10.01	141.5	0.04245	4090.25	3.0	288.75	323.4
26	10.05	141.5	0.04245	4090.25	3.0	289.81	323.4
27	10.09	141.5	0.04245	4090.25	3.0	290.85	323.4
28	10.13	141.5	0.04245	4090.25	3.0	291.90	323.4
29	10.17	141.5	0.04245	4090.25	3.0	292.94	323.4
30	10.21	141.5	0.04245	4090.25	3.0	293.99	323.4
31	10.25	141.5	0.04245	4090.25	3.0	295.04	323.4
32	10.29	141.5	0.04245	4090.25	3.0	296.09	323.4
33	10.34	141.5	0.04245	4090.25	3.0	297.13	323.4
34	10.38	141.5	0.04245	4090.25	3.0	298.19	323.4
35	10.42	141.5	0.04245	4090.25	3.0	299.23	323.4

Tabl. 8.8 Ermittlung der Schubspannungen infolge Innenwasserdruck

- **Schubspannungen infolge Außenwasserdruck (Belastung von Bergwasser)**

In Ermangelung von Information bezüglich der tatsächlichen Lage des Bergwasserspiegels werden die Berechnungen der Schubspannungen infolge Außenwasserdruck nur für einen sehr ungünstig gewählten Fall durchgeführt. Für diesen wird angenommen, dass der Außenwasserdruck 50% der Felsüberdeckung über den einzelnen Druckstollenbereichen ist ($p_{wa} = 0.5 * H_{Überd.}\,[MPa]$). Mit dieser Annahme bestimmt sich ein Bergwasserspiegel im Bereich des Lotschachtes auf der Höhe von 1502.03 m ü.A.

$$\sigma_{z_n} = \frac{p_{wa} * r_0}{d_{Panz.}}\,[MPa]$$

$$p_{wa} = 0.5 * H_{Überd.}\,[MPa] - \text{Außenwasserdruck}$$

— **Für den Lotschacht (Tabl. 8.9)**

Bereich No	H_{GW} m	p_{wa} MPa	r_0 cm	$d_{panz.}$ cm	σ_{zn} MPa	γcR/γn MPa
1	0	0	156.1	2.2	0	323.4
2	0	0	156.3	2.2	0	323.4
3	0	0	156.3	2.2	0	323.4
4	0	0	156.5	2.2	0	323.4
5	0	0	156.5	2.2	0	323.4
6	0	0	156.1	2.2	0	323.4
7	0	0	156.1	2.2	0	323.4
8	0	0	156.1	2.2	0	323.4
9	45.3	0.453	156.1	2.2	32.14241	323.4
10	95.3	0.953	156.1	2.2	67.61968	323.4
11	145.3	1.453	156.1	2.2	103.097	323.4
12	195.3	1.953	156.1	2.2	138.5742	323.4
13	245.3	2.453	156.1	2.2	174.0515	323.4
14	295.3	2.953	156.3	2.2	209.7972	323.4
15	345.3	3.453	156.3	2.6	207.5784	323.4
16	395.3	3.953	156.5	2.6	237.9402	323.4
17	445.3	4.453	156.5	3.0	232.2982	323.4
18	475.9	4.759	156.1	3.0	247.6266	323.4

Tabl. 8.9 Ermittlung der Schubspannungen infolge Außenwasserdruck

— **Für den Druckstollen (Tabl. 8.10)**

Bereich No	$H_{Überd.}$ m	p_{wa} MPa	r_0 cm	$d_{panz.}$ cm	σ_{zn} MPa	γcR/γn MPa
19	992.3	4.96	141.5	3.0	234.02	323.4
20	1002.6	5.01	141.5	3.0	236.45	323.4
21	1053.3	5.27	141.5	3.0	248.40	323.4
22	1103.7	5.52	141.5	3.0	260.29	323.4
23	1080.4	5.40	141.5	3.0	254.79	323.4
24	1014.4	5.07	141.5	3.0	239.23	323.4
25	947.1	4.74	141.5	3.0	223.36	323.4
26	879.6	4.40	141.5	3.0	207.44	323.4
27	814.9	4.07	141.5	3.0	192.18	323.4
28	754.6	3.77	141.5	3.0	177.96	323.4
29	632.2	3.16	141.5	3.0	149.09	323.4
30	554.5	2.77	141.5	3.0	130.77	323.4
31	457.1	2.29	141.5	3.0	107.80	323.4
32	349.2	1.75	141.5	3.0	82.35	323.4
33	258.2	1.29	141.5	3.0	60.89	323.4
34	200.2	1.00	141.5	3.0	47.21	323.4
35	153.4	0.77	141.5	3.0	36.18	323.4

Tabl. 8.10 Ermittlung der Schubspannungen infolge Außenwasserdruck

- **Normalspannungen infolge Poisson Effekt**

$\sigma_{x,1} = -\nu * \sigma_z \left[\text{MPa}\right]$

$\nu = 0.3 - \text{Poisson Beiwert für Stahl}$

— **Für den Lotschacht (Tabl. 8.11)**

Bereich No	σ_{zo} MPa	$\sigma_{x1\ \text{innenwasserdr.}}$ MPa	σ_{zn} MPa	$\sigma_{x1\ \text{aussenwasserdr.}}$ MPa
1	77.00	-23.10	0	0
2	91.10	-27.33	0	0
3	105.26	-31.58	0	0
4	119.37	-35.81	0	0
5	133.55	-40.07	0	0
6	147.51	-44.25	0	0
7	161.61	-48.48	0	0
8	175.71	-52.71	0	0
9	189.81	-56.94	32.14	-9.64
10	203.92	-61.17	67.62	-20.29
11	218.02	-65.41	103.10	-30.93
12	232.12	-69.64	138.57	-41.57
13	246.22	-73.87	174.05	-52.22
14	260.32	-78.10	209.80	-62.94
15	256.09	-76.83	207.58	-62.27
16	269.25	-80.77	237.94	-71.38
17	264.76	-79.43	232.30	-69.69
18	272.31	-81.69	247.63	-74.29

Tabl. 8.11 Ermittlung der Normalspannungen infolge Poisson Effekt

— **Für den Druckstollen (Tabl. 8.12)**

Bereich No	σ_{zo} MPa	$\sigma_{x1\ innenwasserdr.}$ MPa	σ_{zn} MPa	$\sigma_{x1\ aussenwasserdr.}$ MPa
19	281.95	-84.59	234.02	-70.21
20	283.52	-85.06	236.45	-70.93
21	284.41	-85.32	248.40	-74.52
22	285.61	-85.68	260.29	-78.09
23	286.66	-86.00	254.79	-76.44
24	287.71	-86.31	239.23	-71.77
25	288.75	-86.63	223.36	-67.01
26	289.81	-86.94	207.44	-62.23
27	290.85	-87.25	192.18	-57.65
28	291.90	-87.57	177.96	-53.39
29	292.94	-87.88	149.09	-44.73
30	293.99	-88.20	130.77	-39.23
31	295.04	-88.51	107.80	-32.34
32	296.09	-88.83	82.35	-24.71
33	297.13	-89.14	60.89	-18.27
34	298.19	-89.46	47.21	-14.16
35	299.23	-89.77	36.18	-10.85

Tabl. 8.12 Ermittlung der Normalspannungen infolge Poisson Effekt

- **Normalspannungen infolge Temperaturänderungen**

$$\sigma_{x,2} = -\beta * E_{St.} * \Delta T \left[MPa\right]$$

$\beta = 1.2 * 10^{-5}$ – Temperaturausdehnungsbeiwert des Materials

$E_{St.} = 0.21 * 10^{6}$ MPa – Elastizitätsmodul des Stahles

Der Hinterfüllbeton erwärmt beim Abbinden auch die Panzerung auf ca. $20^{\circ}C$, die Triebwassertemperatur ist im Minimum $0^{\circ}C$. Daraus folgt, dass die Temperaturdifferenz ΔT ungefähr $20^{\circ}C$ ist ($\Delta T = 20^{\circ}C$) /16/.

$$\Rightarrow \sigma_{x,2} = -1.2 * 10^{-5} * 0.21 * 10^{6} * 20 = -50.4\,MPa$$

- **Normalspannungen infolge Eigengewicht**

Die Normalspannungen infolge Eigengewicht sind nicht berücksichtigt. Es wird angenommen, dass sich das Eigengewicht der Panzerung im Lotschacht durch Kohäsion auf den Hinterfüllbeton und Felsen überträgt. Aufgrund der geringen Neigung des Druckstollens (kleiner als 10%) können auch die Normalspannungen infolge Eigengewicht vernachlässigt werden /15/.

$$\sigma_{x,3} = 0\,[\mathrm{MPa}]$$

- **Normalspannungen (Tabl. 8.13 und Tabl.8.14)**

$$\sigma_x = \sigma_{x,1} + \sigma_{x,2} + \sigma_{x,3} \leq \frac{\gamma_c * R}{\gamma_n}\,[\mathrm{MPa}]$$

- **Gesamtspannungen (Tabl. 8.13 und Tabl.8.14)**

$$\sigma_{Equiv.} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_z + \sigma_z^2} \leq \frac{\gamma_c * R}{\gamma_n}\,[\mathrm{MPa}]$$

— **Für den Lotschacht (Tabl. 8.13)**

Bereich No	$\sigma_{zo.}$ MPa	σ_{zn} MPa	σ_{x1} innenw. MPa	σ_{x1} außenw. MPa	σ_{x2} MPa	σ_{x3} MPa	σ_x innenw. MPa	σ_x außenw. MPa	$\sigma_{eq\,1}$ innenw. MPa	$\sigma_{eq\,2}$ außenw. MPa	γcR/γn MPa
1	77.00	0	-23.10	0	-50.4	0.00	-73.50	-50.40	75.31	50.40	323.4
2	91.10	0	-27.33	0	-50.4	0.00	-77.73	-50.40	85.21	50.40	323.4
3	105.26	0	-31.58	0	-50.4	0.00	-81.98	-50.40	95.76	50.40	323.4
4	119.37	0	-35.81	0	-50.4	0.00	-86.21	-50.40	106.73	50.40	323.4
5	133.55	0	-40.07	0	-50.4	0.00	-90.47	-50.40	118.06	50.40	323.4
6	147.51	0	-44.25	0	-50.4	0.00	-94.65	-50.40	129.44	50.40	323.4
7	161.61	0	-48.48	0	-50.4	0.00	-98.88	-50.40	141.12	50.40	323.4
8	175.71	0	-52.71	0	-50.4	0.00	-103.11	-50.40	152.93	50.40	323.4
9	189.81	32.14	-56.94	-9.64	-50.4	0.00	-107.34	-60.04	164.85	52.04	323.4
10	203.92	67.62	-61.17	-20.29	-50.4	0.00	-111.57	-70.69	176.86	69.20	323.4
11	218.02	103.10	-65.41	-30.93	-50.4	0.00	-115.81	-81.33	188.93	94.12	323.4
12	232.12	138.57	-69.64	-41.57	-50.4	0.00	-120.04	-91.97	201.06	122.13	323.4
13	246.22	174.05	-73.87	-52.22	-50.4	0.00	-124.27	-102.62	213.24	151.54	323.4
14	260.32	209.80	-78.10	-62.94	-50.4	0.00	-128.50	-113.34	225.45	181.89	323.4
15	256.09	207.58	-76.83	-62.27	-50.4	0.00	-127.23	-112.67	221.78	179.99	323.4
16	269.25	237.94	-80.77	-71.38	-50.4	0.00	-131.17	-121.78	233.20	206.08	323.4
17	264.76	232.30	-79.43	-69.69	-50.4	0.00	-129.83	-120.09	229.30	201.21	323.4
18	272.31	247.63	-81.69	-74.29	-50.4	0.00	-132.09	-124.69	235.86	214.45	323.4

Tabl. 8.13 Ermittlung der Spannungen für den Lotschacht

— **Für den Druckstollen (Tabl. 8.14)**

Bereich No	$\sigma_{zo.}$ MPa	σ_{zn} MPa	σ_{x1} innenw. MPa	σ_{x1} außenw. MPa	σ_{x2} MPa	σ_{x3} MPa	σ_x innenw. MPa	σ_x außenw. MPa	$\sigma_{eq\ 1}$ innenw. MPa	$\sigma_{eq\ 2}$ außenw. MPa	$\gamma cR/\gamma n$ MPa
19	281.95	234.02	-84.59	-70.21	-50.4	0	-134.99	-120.61	244.25	202.70	323.4
20	283.52	236.45	-85.06	-70.93	-50.4	0	-135.46	-121.33	245.61	204.79	323.4
21	284.41	248.40	-85.32	-74.52	-50.4	0	-135.72	-124.92	246.39	215.12	323.4
22	285.61	260.29	-85.68	-78.09	-50.4	0	-136.08	-128.49	247.44	225.42	323.4
23	286.66	254.79	-86.00	-76.44	-50.4	0	-136.40	-126.84	248.35	220.66	323.4
24	287.71	239.23	-86.31	-71.77	-50.4	0	-136.71	-122.17	249.26	207.19	323.4
25	288.75	223.36	-86.63	-67.01	-50.4	0	-137.03	-117.41	250.18	193.52	323.4
26	289.81	207.44	-86.94	-62.23	-50.4	0	-137.34	-112.63	251.10	179.87	323.4
27	290.85	192.18	-87.25	-57.65	-50.4	0	-137.65	-108.05	252.00	166.86	323.4
28	291.90	177.96	-87.57	-53.39	-50.4	0	-137.97	-103.79	252.92	154.83	323.4
29	292.94	149.09	-87.88	-44.73	-50.4	0	-138.28	-95.13	253.83	130.75	323.4
30	293.99	130.77	-88.20	-39.23	-50.4	0	-138.60	-89.63	254.74	115.82	323.4
31	295.04	107.80	-88.51	-32.34	-50.4	0	-138.91	-82.74	255.66	97.71	323.4
32	296.09	82.35	-88.83	-24.71	-50.4	0	-139.23	-75.11	256.57	78.98	323.4
33	297.13	60.89	-89.14	-18.27	-50.4	0	-139.54	-68.67	257.48	65.13	323.4
34	298.19	47.21	-89.46	-14.16	-50.4	0	-139.86	-64.56	258.40	57.87	323.4
35	299.23	36.18	-89.77	-10.85	-50.4	0	-140.17	-61.25	259.31	53.34	323.4

Tabl. 8.14 Ermittlung der Spannungen für den Druckstollen

- **Beulberechnung der Auskleidung**

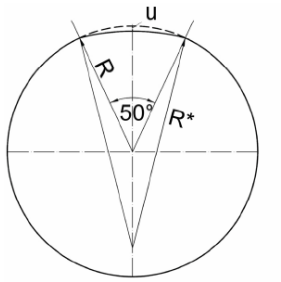
Die Panzerung ist durch den hydraulischen Außendruck beim Entleeren der Triebwasserleitung beulungsgefährdet. Die Außendruckbelastung tritt in Form des Bergwasserdruckes auf.

Damit die Panzerung nicht einbeult, darf der Bergwasserdruck einen kritischen Wert nicht überschreiten ($p_{wa} < p_{cr}$) /16/.

Der kritische Beuldruck wird mit der Beulformel von Montel bestimmt.

$$p_{cr} = \frac{5 * R_y}{\left(\frac{r_e}{t}\right)^{3/2} * \left[1 + 1.2 * \left(\eta + 2.a_r\right) * \frac{1}{t}\right]} \ [\text{MPa}] \text{ , wo:}$$

$$\eta \equiv u = w_1 . \left[1 - \cos\left(\frac{50^\circ . \pi}{180^\circ}\right)\right] [\text{m}] \text{ und } w_1 = 5 * 10^{-4} . r_e$$



$\eta \equiv u$ - Unrundheit gemessen auf der Montelschablone (50°)

$r_e \equiv r_1 = r + d_{Panz.} \left[m\right]$

$t \equiv d_{Panz.} \left[m\right]$ – Blechstärke

$R_y = 600 MPa \left(Stahl 14X2GMRB\right)$ – Fließgrenze des Stahles /17/

$a_r \left[m\right]$ – Spalt zwischen Blech und Beton

Montel gibt für die empirisch entwickelte Formel folgende Gültigkeitsgrenzen an:

$$30 \le \frac{r_e}{t} \le 170$$

$$250 \text{ [MPa]} \le R_y \le 500 \text{ [MPa]}$$

$$0.1 \le \frac{\eta}{t} \le 0.5$$

$$\frac{a_r}{t} \le 0.25$$

$$\frac{a_r}{r_e} \le 0.025$$

Da die Gültigkeitsbedingungen nicht vollkommen erfüllbar sind, wird der kritischen Beuldruck durch einen Sicherheitsbeiwert vermindert (k_s = 1.5).

Die Berechnungen sind in Tabl. 8.15 und Tabl. 8.16 dargestellt.

— **Für den Lotschacht (Tabl. 8.15)**

Bereich No	a_r m	η m	$d_{panz.}$ m	p_{cr} MPa	p_{cr}/k_s MPa	p_{wa} MPa
1	0.0004683	9.10737E-08	0.022	4.725	3.150	0
2	0.0004683	9.10737E-08	0.022	4.725	3.150	0
3	0.0004683	9.10737E-08	0.022	4.725	3.150	0
4	0.0004683	9.10737E-08	0.022	4.725	3.150	0
5	0.0004683	9.10737E-08	0.022	4.725	3.150	0
6	0.0004683	9.10737E-08	0.022	4.725	3.150	0
7	0.0004683	9.10737E-08	0.022	4.725	3.150	0
8	0.0004683	9.10737E-08	0.022	4.725	3.150	0
9	0.0004683	9.10737E-08	0.022	4.725	3.150	0.453
10	0.0004683	9.10737E-08	0.022	4.725	3.150	0.953
11	0.0004683	9.10737E-08	0.022	4.725	3.150	1.453
12	0.0004683	9.10737E-08	0.022	4.725	3.150	1.953
13	0.0004683	9.10737E-08	0.022	4.725	3.150	2.453
14	0.0004683	9.10737E-08	0.022	4.725	3.150	2.953
15	0.0004689	9.13055E-08	0.026	6.093	4.062	3.453
16	0.0004689	9.13055E-08	0.026	6.093	4.062	3.953
17	0.0004695	9.15372E-08	0.03	7.565	5.043	4.453
18	0.0004695	9.15372E-08	0.03	7.565	5.043	4.759

Tabl. 8.15 Beulberechnung der Auskleidung für den Lotschacht

— **Für den Druckstollen (Tabl. 8.16)**

Bereich No	a_r m	η m	$d_{panz.}$ m	p_{cr} MPa	p_{cr}/k_s MPa	p_{wa} MPa
19	0.000425	8.2847E-08	0.03	8.816	5.878	4.962
20	0.000425	8.2847E-08	0.03	8.816	5.878	5.013
21	0.000425	8.2847E-08	0.03	8.816	5.878	5.267
22	0.000425	8.2847E-08	0.03	8.816	5.878	5.519
23	0.000425	8.2847E-08	0.03	8.816	5.878	5.402
24	0.000425	8.2847E-08	0.03	8.816	5.878	5.072
25	0.000425	8.2847E-08	0.03	8.816	5.878	4.736
26	0.000425	8.2847E-08	0.03	8.816	5.878	4.398
27	0.000425	8.2847E-08	0.03	8.816	5.878	4.075
28	0.000425	8.2847E-08	0.03	8.816	5.878	3.773
29	0.000425	8.2847E-08	0.03	8.816	5.878	3.161
30	0.000425	8.2847E-08	0.03	8.816	5.878	2.773
31	0.000425	8.2847E-08	0.03	8.816	5.878	2.286
32	0.000425	8.2847E-08	0.03	8.816	5.878	1.746
33	0.000425	8.2847E-08	0.03	8.816	5.878	1.291
34	0.000425	8.2847E-08	0.03	8.816	5.878	1.001
35	0.000425	8.2847E-08	0.03	8.816	5.878	0.767

Tabl. 8.16 Beulberechnung der Auskleidung für den Druckstollen

Da die Belastung der Panzerung durch den angenommenen Bergwasserdruck ($0.5xHÜ_{berd.}$) kleiner als die kritische Belastung ist, ist die Beulsicherheit dieser garantiert.

9 ZUSAMMENFASSUNG

Die Pumpspeicherkraftwerke dienen als sehr umweltfreundlicher und wirtschaftlicher Ausgleich zwischen elektrischen Energieüberschuss und Energiebedarf. Die kurzzeitige Inbetriebnahme und die leichte Regelfähigkeit dieser Anlagen ermöglichen die Überbrückung von Kraftwerksausfälle (Windkraftwerke) und leisten einen wesentlichen Beitrag zur Stabilität des Verbundnetzes. Das Verhältniss zwischen den niedrigen Kosten für den Pumpbetrieb und den höheren Erlösen aus der Stromlieferung begründet ihre Wirtschaftlichkeit.

In der vorliegenden Projektstudie wurde die Planung des Pumpspeicherkraftwerkes Seekar durchgeführt. Verschiedene Basisdaten wie horizontale Lage der Triebwasserleitung, Lage des Krafthauses, sowohl Stauziele und Absenkziele im Ober- und Unterbecken, als auch die elektromaschinelle Ausrüstung wurden von der SALZBURG AG vorgegeben.

Nach einem Vergleich von bereits ausgeführten Pumpspeicherkraftwerken wurden 4 generelle Varianten für die Anordnung des Pumpspeicherkraftwerkes ausgearbeitet.
In ersten 2 Varianten wurde das Wasser zum Schachtkrafthaus bzw. zur Kaverne mittels eines Schrägschachtes zugeführt. In der 3. und 4. Variante ist die Triebwasserleitung als Kombination von Lotschacht und Druckstollen vorgesehen, während das Krafthaus wieder als Kaverne bzw. als Schacht ausgearbeitet wurde.
Nach der Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile der ausgearbeiteten Varianten wurde Variante 3 (Krafthaus als Kaverne, Triebwasserleitung – Kombination zwischen Lotschacht und Druckstollen) für die weitere detailliertere Ausarbeitung ausgewählt.

Für die „optimierte“ Variante wurde die Triebwasserleitung detailliert ausgearbeitet. Dieses Detailprojekt beinhaltet die Bestimmung des optimalen Durchmessers, der durch eine Wirtschaftlichkeitsberechnung, bei der die Summe der Stollenherstellungskosten und der Erlöse (Energiegewinn) durch Reduktion der hydraulischen Verluste ein Minimum ergibt, ermittelt wird.

Für diesen Durchmesser wurden die hydraulischen Berechnungen für den stationären und instationären Betrieb des Pumpspeicherkraftwerkes durchgeführt.
Die hydraulischen Berechnungen für stationären Turbinen- und Pumpbetrieb beinhalten die Verlusthöhen in der Triebwasserleitung infolge kontinuierlicher und örtlicher Widerstände. Die instationäre Berechnung wurde nur für den ungünstigsten Betriebsfall (Netzzusammenbruch im Turbinenbetrieb) durchgeführt, wobei auch der für die Rohrbemessung maximale Rohrinnendruck (Druckstoß) entsteht.

Die Bestimmung der Auskleidungsstärke der Triebwasserleitung erfolgte in der statischen Berechnung. Zur Vereinfachung der Berechnung wurde eine angenommene Auskleidungsstärke für die entsprechenden Belastungen nachgewiesen. Zur detaillierteren Berechnung der Triebwasserleitung wurde diese in 35 Abschnitte geteilt, für die die Spannungen infolge Innenwasserdruck, Bergwasser, Temperaturänderungen und Poisson Effekt bestimmt wurden. In der statischen Berechnung wurde auch die Beulsicherheit der Triebwasserauskleidung bei leerem Rohr berücksichtigt.

Die planliche Darstellung des Variantenstudiums bzw. des Detailprojekts mit Krafthaus und der Triebwasserleitung erfolgt im Anhang.

LITERATUR UND QUELLENVERZEICHNISS

/ 1 / **QUELLE:** www.eeh.ee.ethz.ch
PPS – Seminararbeit im WS 2004/2005 am Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik „Forderung erneuerbarer Energien im liberalisierten Strommarkt“ Autor: Maurice Gölde

/ 2 / **QUELLE:** „Weltweiter und Deutscher Stromverbrauch“ Verfasser: Fabian Polzer und Jacob Wachtel

/ 3 / **QUELLE:** www.bmwa.gv.at – „Energiebericht 2003“

/ 4 / **QUELLE:** www.e-control.at

/ 5 / **QUELLE:** www.strom.de

/ 6 / **QUELLE:** www.bmwi.de - Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie

/ 7 / **GIESECKE, J.; MOSONYI, E.:** Wasserkraftanlagen: Planung, Bau und Betrieb (1997)

/ 8 / **MOSONYI, E.:** Wasserkraftwerke Bd. II, Budapest 1959

/ 9 / **MILOSLAVOV, S.:** Wasserkraftwerke und Triebwasserleitungen, Sofia 1976

/ 10 / **VORLESEUNGEN WS** (2005/2006): Wasserkraftanlagen und Pumpspeicherwerke

/ 11 / **GEORGIEV, L.:** Tunnelbau – dritte Band , Sofia 2004

/ 12 / **AVRAMOV, G.:** Wasserfassungen und Entnahmebauwerke, Sofia 1975

/ 13 / **MARINOV, E.:** Hydraulik, Sofia 2003

/ 14 / **IVANOV, I.:** Verlusthöhen in der Triebwasserleitungen infolge örtliche Widerstände, Sofia 1985

/ 15 / **GEORGIEV, L.:** Unterirdischen Wasserbau, Sofia 1974

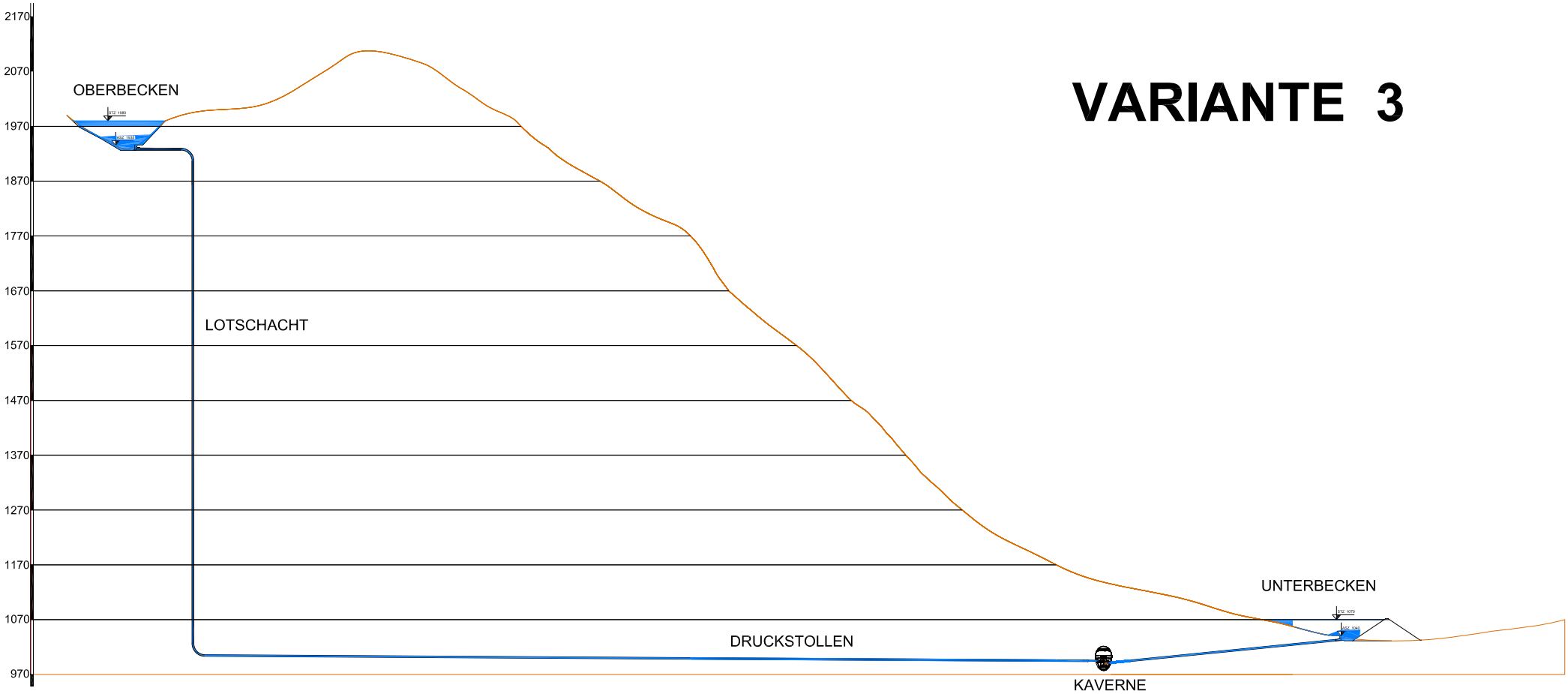
/ 16 / **SEEBER, G.:** Druckstollen und Druckschächte, Stuttgart – New York 1999

/ 17 / **ZOLOVSKI, Z.; NIKOLAEVA, R.:** Taschenbuch für Entwurf von Wasserkraftwerke und Wasserkraftanlagen, Sofia 1991

ANHANG

PLANBEILAGE

PLAN Nr. 1	VARIANTE 1	
PLAN Nr. 2	VARIANTE 2	
PLAN Nr. 3	VARIANTE 3	
PLAN Nr. 4	VARIANTE 4	
PLAN Nr. 5	LAGEPLAN	M1:5000
PLAN Nr. 6	LÄNGSPROFIL	M1:5000
PLAN Nr. 7	LAGEPLAN DER KAVERNE	M1:200
PLAN Nr. 8	QUERSCHNITT DER KAVERNE	M1:200
PLAN Nr. 9	LÄNGSSCHNITT DER KAVERNE	M1:200
PLAN Nr. 10	AUSKLEIDUNG DER TRIEBWASSERLEITUNG	M1:50

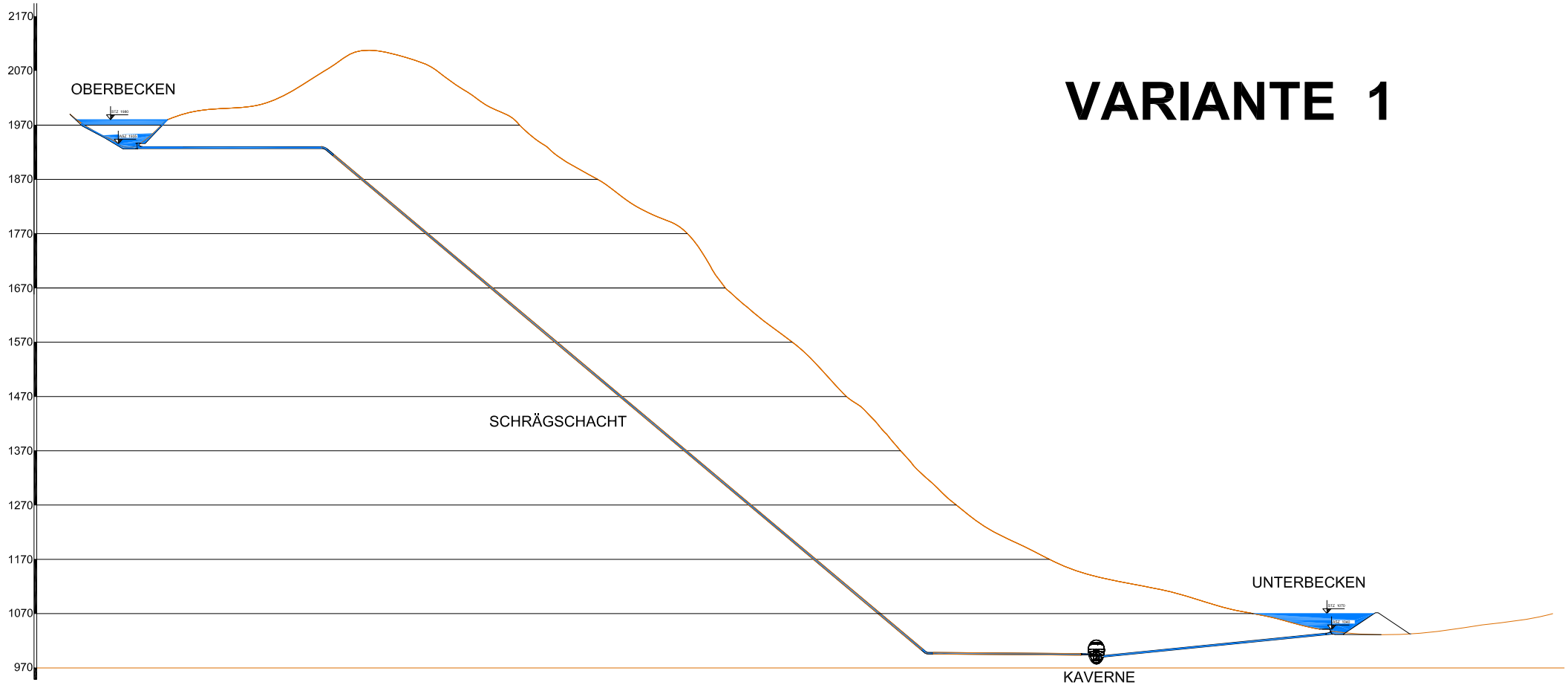


VARIANTE 3

TECHNISCHE UNIVERSITÄT - WIEN
INSTITUT FÜR WASSERBAU UND INGENIEURHYDROLOGIE

PUMPSPEICHERKRAFTWERK SEEKAR (SALZBURG)			März 2008r.
PLAN	3	VARIANTE 3	
DIPLOMAND		**Ivelina Dencheva Ivanova**	Matr. Nr. 0227379
BETREUER		**Ao.Univ.Prof.Dipl.Ing R. Prenner**	

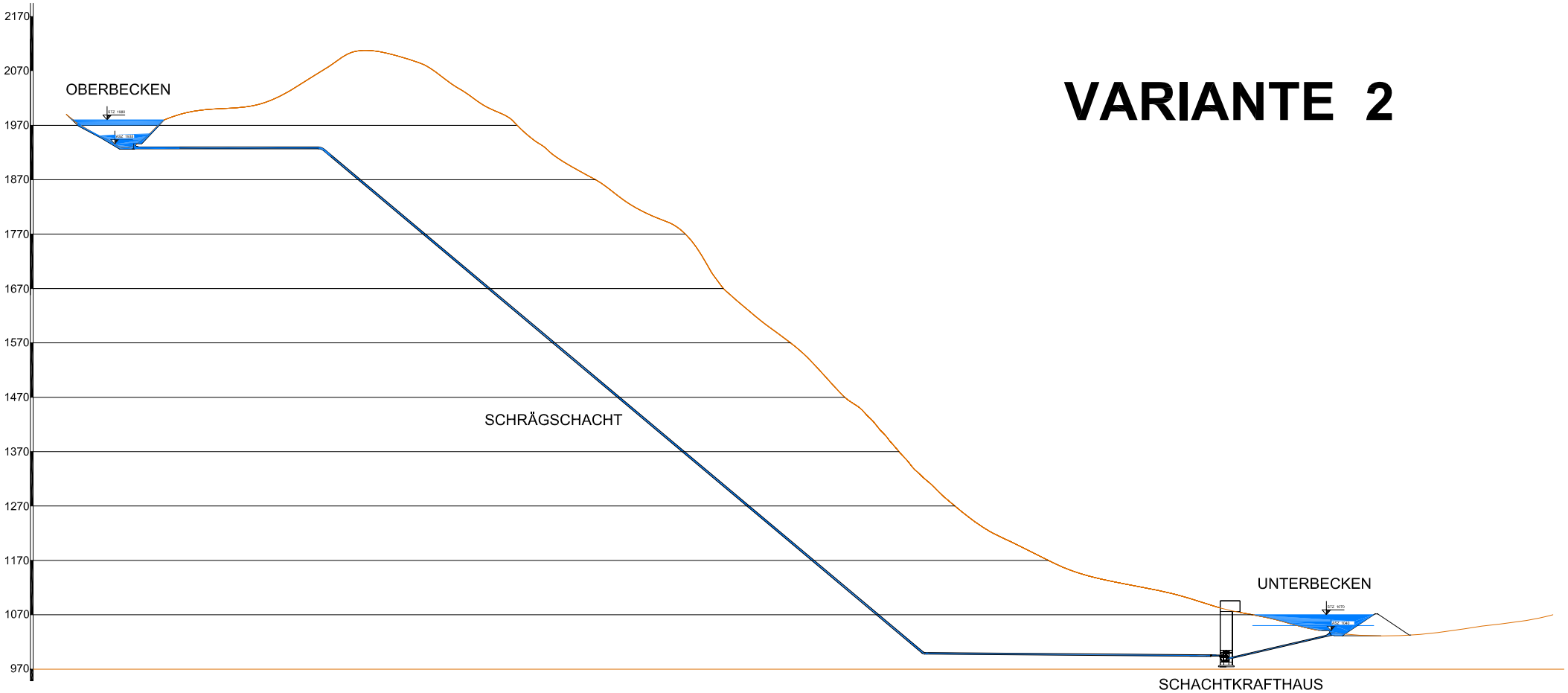
VARIANTE 1



TECHNISCHE UNIVERSITÄT - WIEN
INSTITUT FÜR WASSERBAU UND INGENIEURHYDROLOGIE

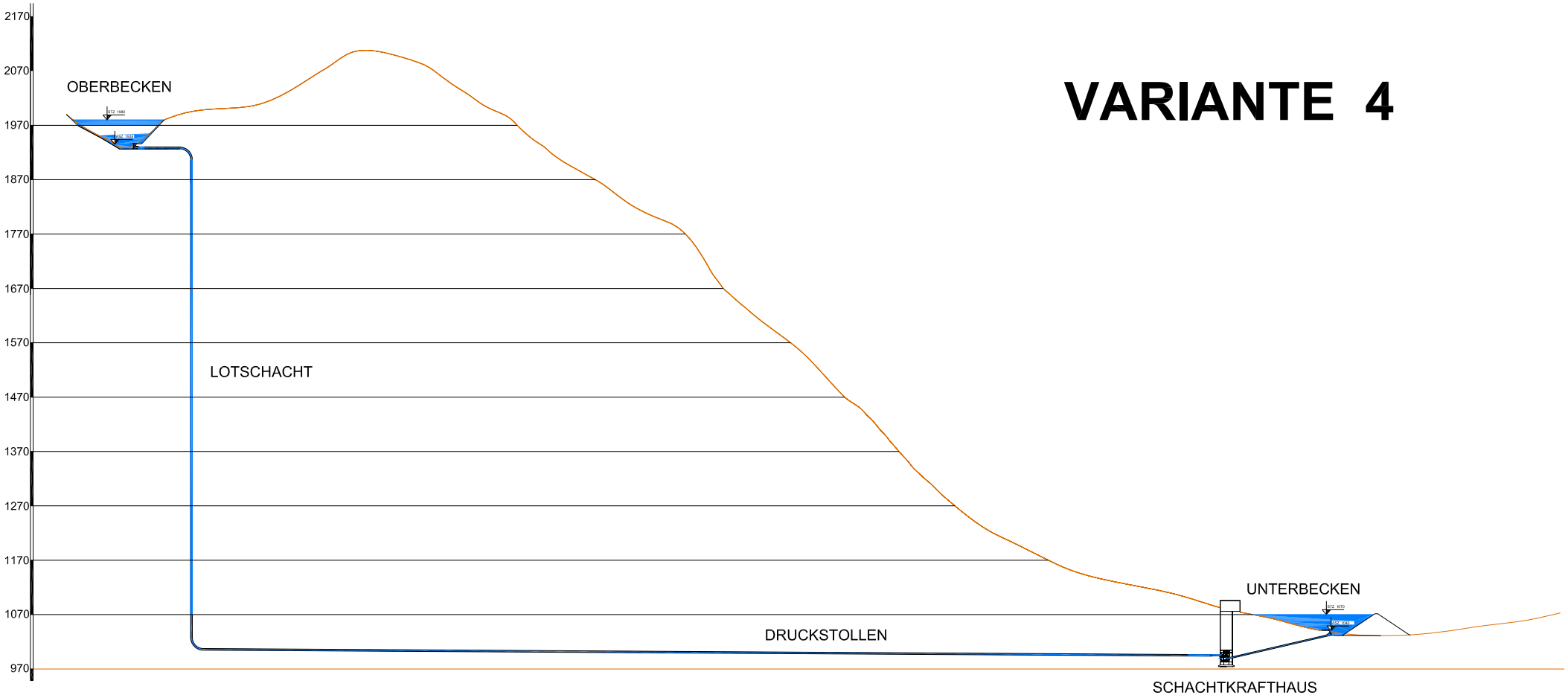
PUMPSPEICHERKRAFTWERK SEEKAR (SALZBURG)			März 2008r.
PLAN	1	VARIANTE 1	
DIPLOMAND		**Ivelina Dencheva Ivanova**	Matr. Nr. 0227379
BETREUER		**Ao.Univ.Prof.Dipl.Ing R. Prenner**	

VARIANTE 2



TECHNISCHE UNIVERSITÄT - WIEN
INSTITUT FÜR WASSERBAU UND INGENIEURHYDROLOGIE

PUMPSPEICHERKRAFTWERK SEEKAR (SALZBURG)			März 2008r.
PLAN	2	VARIANTE 2	
DIPLOMAND		**Ivelina Dencheva Ivanova**	Matr. Nr. 0227379
BETREUER		**Ao.Univ.Prof.Dipl.Ing R. Prenner**	

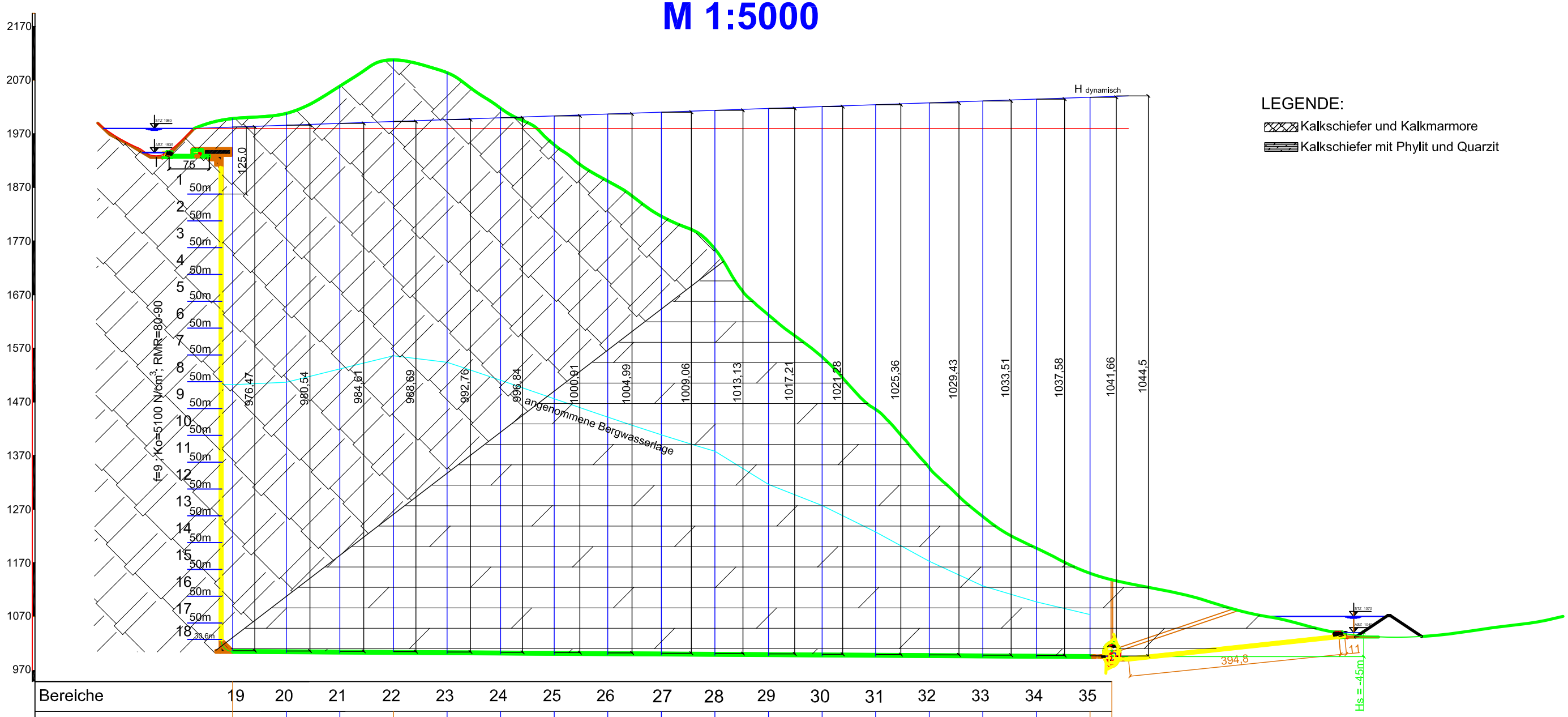


VARIANTE 4

TECHNISCHE UNIVERSITÄT - WIEN
INSTITUT FÜR WASSERBAU UND INGENIEURHYDROLOGIE

PUMPSPEICHERKRAFTWERK SEEKAR (SALZBURG)			März 2008r.
PLAN	4	VARIANTE 4	
DIPLOMAND		**Ivelina Dencheva Ivanova**	Matr. Nr. 0227379
BETREUER		**Ao.Univ.Prof.Dipl.Ing R. Prenner**	

LÄNGSPROFIL
M 1:5000



LEGENDE:

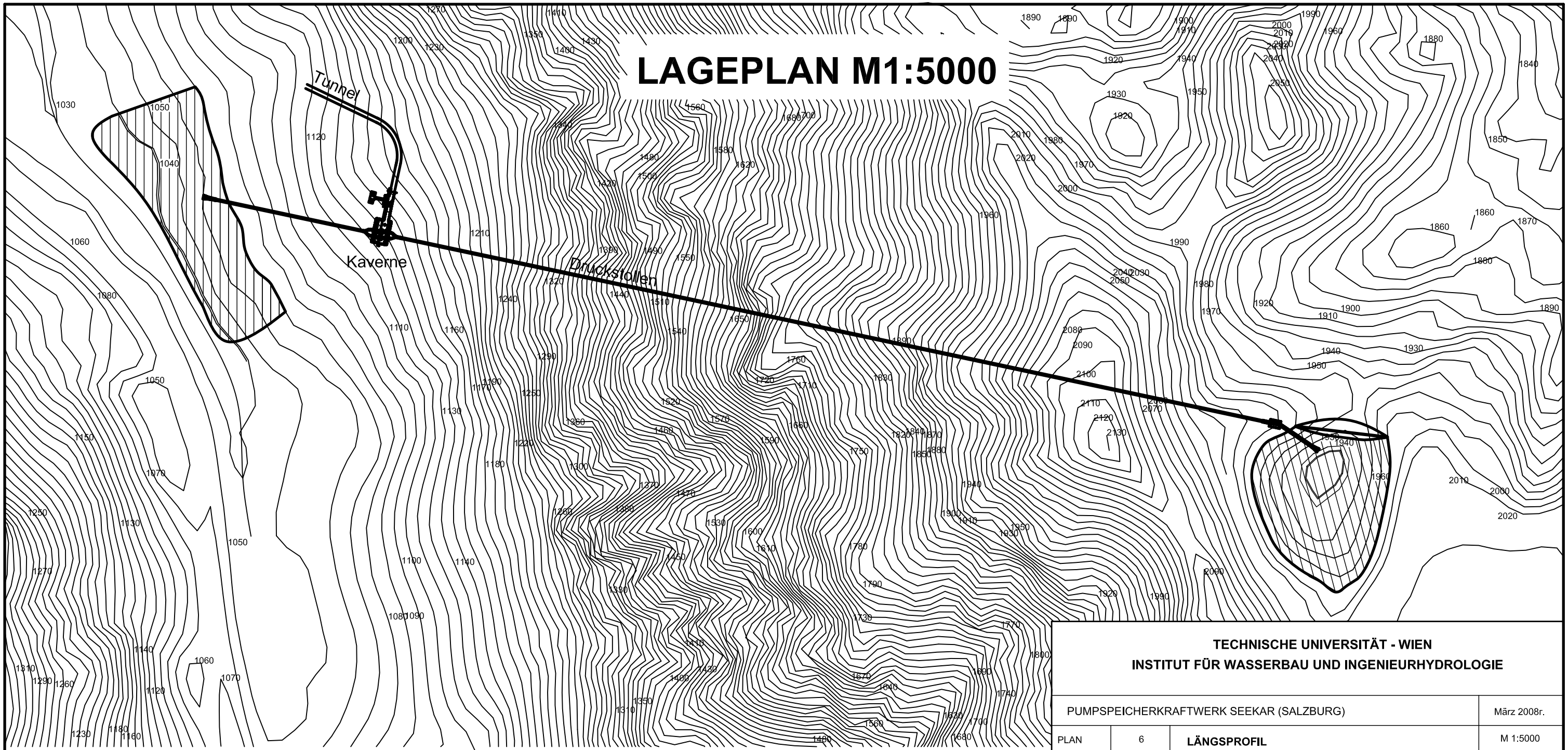
- Kalkschiefer und Kalkmarmore
- Kalkschiefer mit Phylit und Quarzit

Bereiche		19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
Abstand [m]			100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Höhe [m ü.A.]	Oberfläche	1996.93	2006.63	2056.73	2106.53	2082.63	2016.03	1948.13	1880.03	1814.73	1753.83	1630.83	1552.53	1454.53	1346.03	1254.43	1195.83	1148.43
	Achse des Druckstollens	1004.63	1004.03	1003.43	1002.83	1002.23	1001.63	1001.03	1000.43	999.83	999.23	998.63	998.03	997.43	996.83	996.23	995.63	995.03
Felseigenschaften		f=8 ; Ko=4200 N/cm^3; RMR=80-90																
Länge/Neigung		L=1615.5 m														i=0.6%		

TECHNISCHE UNIVERSITÄT - WIEN
INSTITUT FÜR WASSERBAU UND INGENIEURHYDROLOGIE

PUMPSPEICHERKRAFTWERK SEEKAR (SALZBURG)			März 2008r.
PLAN	6	LÄNGSPROFIL	M 1:5000
DIPLOMAND		Ivelina Dencheva Ivanova	Matr. Nr. 0227379
BETREUER		Ao.Univ.Prof.Dipl.Ing R. Prenner	

LAGEPLAN M1:5000

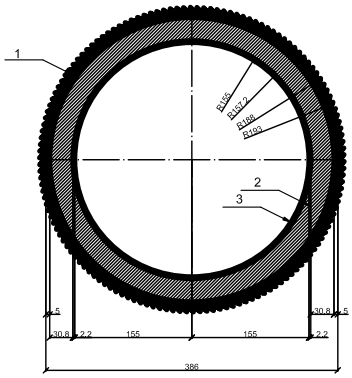


TECHNISCHE UNIVERSITÄT - WIEN
INSTITUT FÜR WASSERBAU UND INGENIEURHYDROLOGIE

PUMPSPEICHERKRAFTWERK SEEKAR (SALZBURG)			März 2008r.
PLAN	6	**LÄNGSPROFIL**	M 1:5000
DIPLOMAND		**Ivelina Dencheva Ivanova**	Matr. Nr. 0227379
BETREUER		**Ao.Univ.Prof.Dipl.Ing R. Prenner**	

AUSKLEIDUNG DER TRIEBWASSERLEITUNG
M 1:50

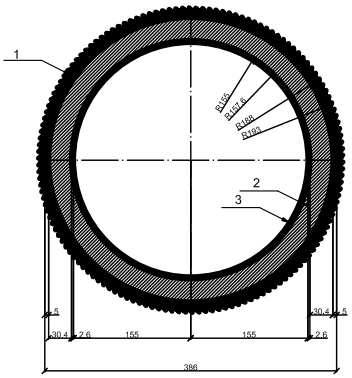
Bereich 2 - Lotschacht



Bemerkung:

1. Spritzbeton $d_{spr.bet.}$=5cm
2. HInterfüllbeton B30 $d_{Hinterfüllbet.}$=30.8cm
3. Stahlrohr 14X2GMRB $d_{panz.}$=22mm

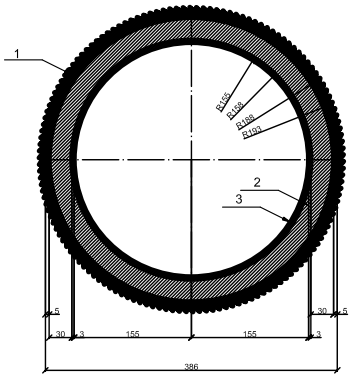
Bereich15 - Lotschacht



Bemerkung:

1. Spritzbeton $d_{spr.bet.}$=5cm
2. HInterfüllbeton B30 $d_{Hinterfüllbet.}$=30.4cm
3. Stahlrohr 14X2GMRB $d_{panz.}$=26mm

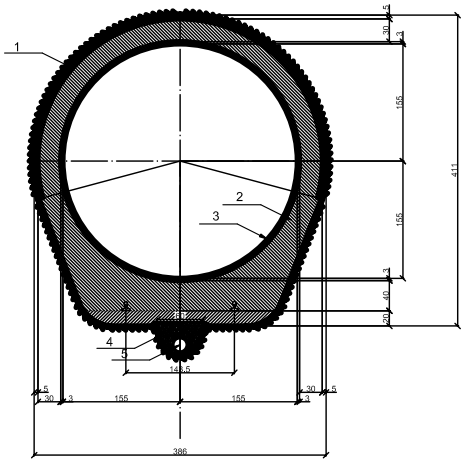
Bereich 17 - Lotschacht



Bemerkung:

1. Spritzbeton $d_{spr.bet.}$=5cm
2. HInterfüllbeton B30 $d_{Hinterfüllbet.}$=30cm
3.Stahlrohr 14X2GMRB $d_{panz.}$=30mm

Bereich 20 - Druckstollen

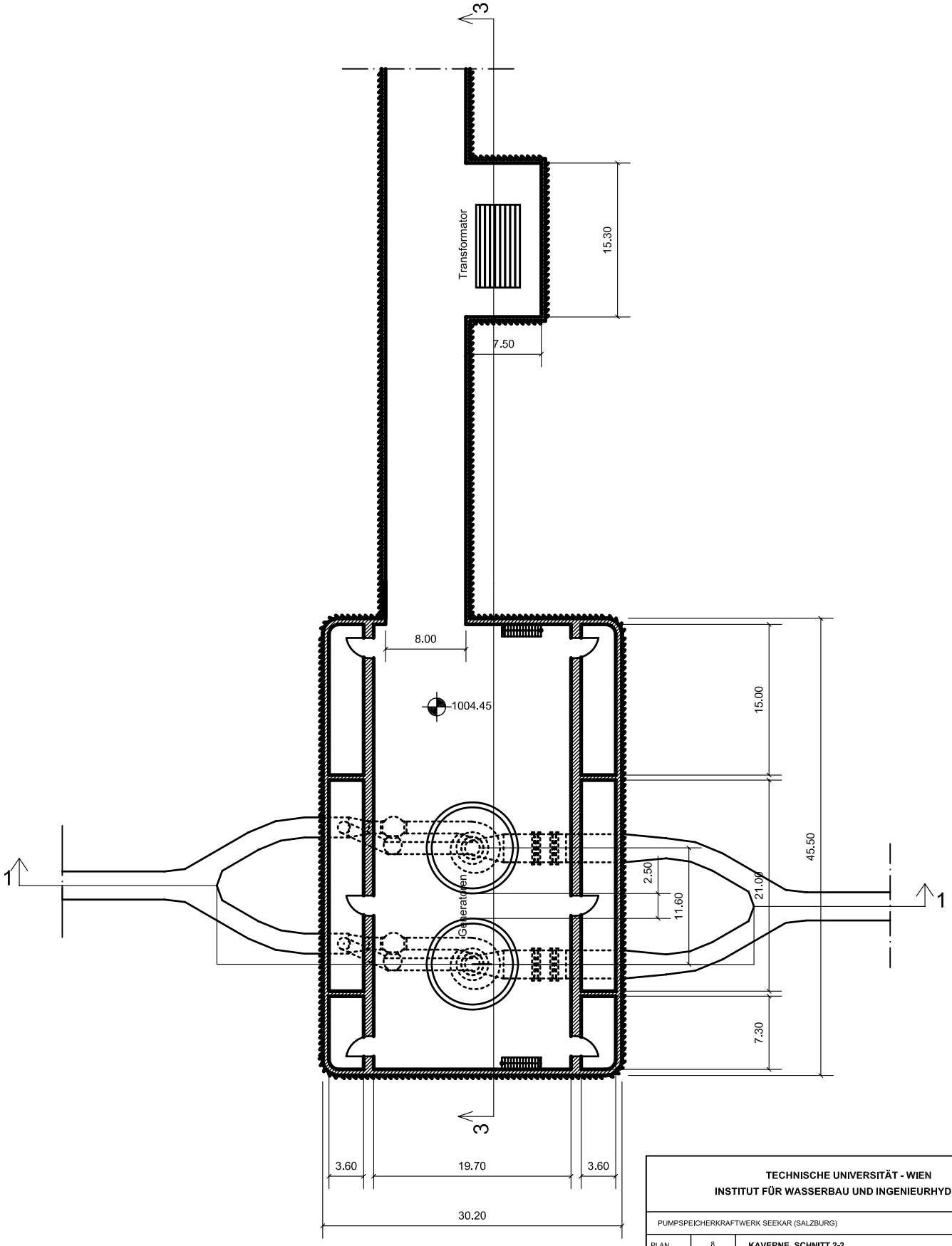


Bemerkung:

1.Spritzbeton $d_{spr.bet.}$=5cm
2. Hinterfüllbeton B30 $d_{Hinterfüllbet.}$=30cm
3. Stahlrohr 14X2GMRB $d_{panz.}$=30mm
4. Dränageschicht
5. Dränagerohr

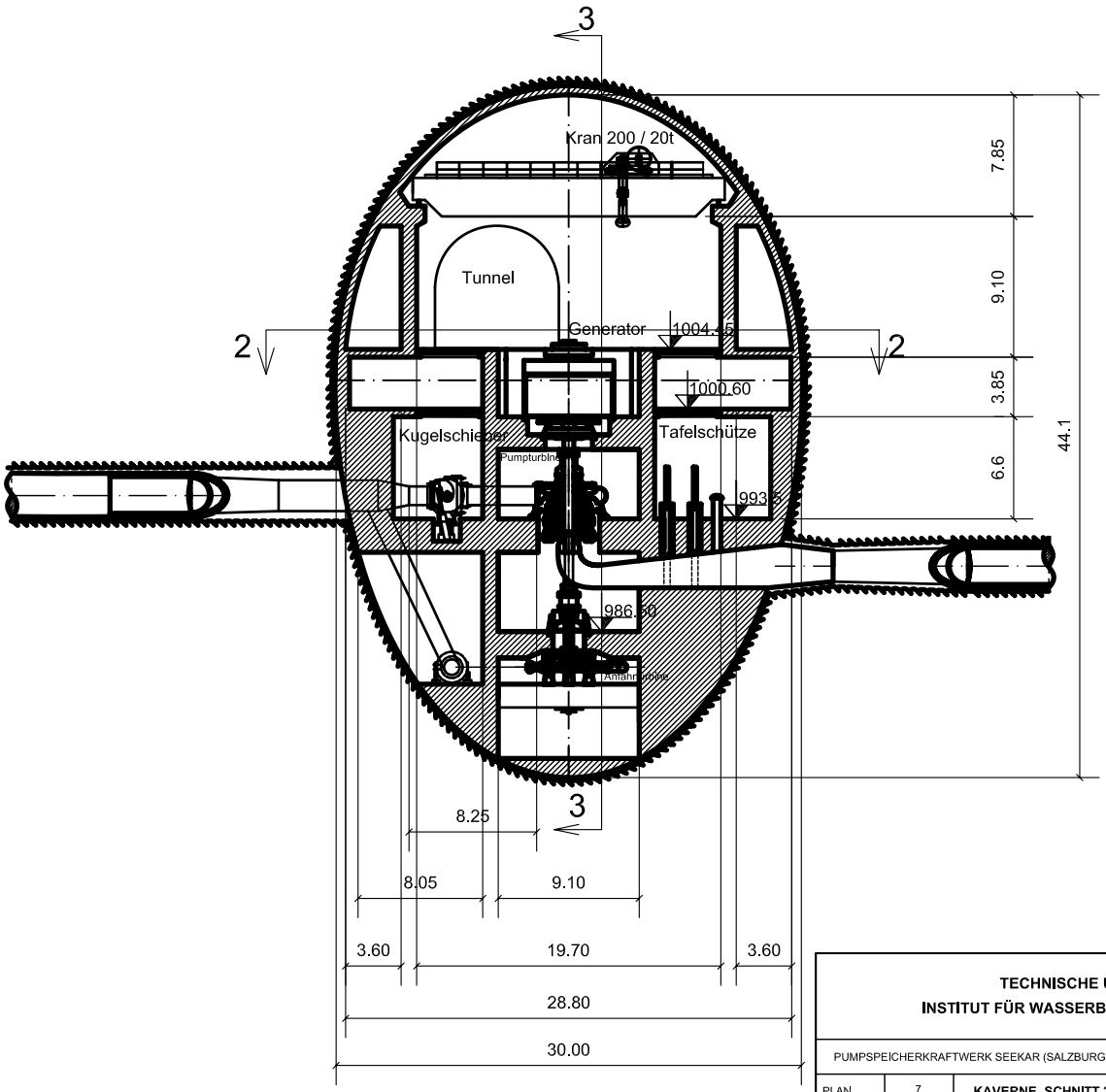
TECHNISCHE UNIWERSITÄT - WIEN **INSTITUT FÜR WASSERBAU UND INGENIEURHYDROLOGIE**			
PUMPSPEICHERKRAFTWERK SEEKAR (SALZBURG)			März 2008r.
PLAN	10	**AUSKLEIDUNG DER TRIEBWASSERLEITUNG**	M 1:50
DIPLOMAND		**IVELINA DENCHEVA IVANOVA**	Matr.Nr. 0227379
BETREUER		**Ao.Univ.Prof.DIpl.Ing R. Prenner**	

LAGEPLAN DER KAVERNE (SCHNITT 2 - 2)
M 1:200



TECHNISCHE UNIVERSITÄT - WIEN INSTITUT FÜR WASSERBAU UND INGENIEURHYDROLOGIE			
PUMPSPEICHERKRAFTWERK SEEKAR (SALZBURG)			März 2008r.
PLAN	8	KAVERNE, SCHNITT 2-2	1:200
DIPLOMAND		Ivelina Dencheva Ivanova	Matr. Nr. 0227379
BETREUER		Ao.Univ.Prof.Dipl.Ing R. Prenner	

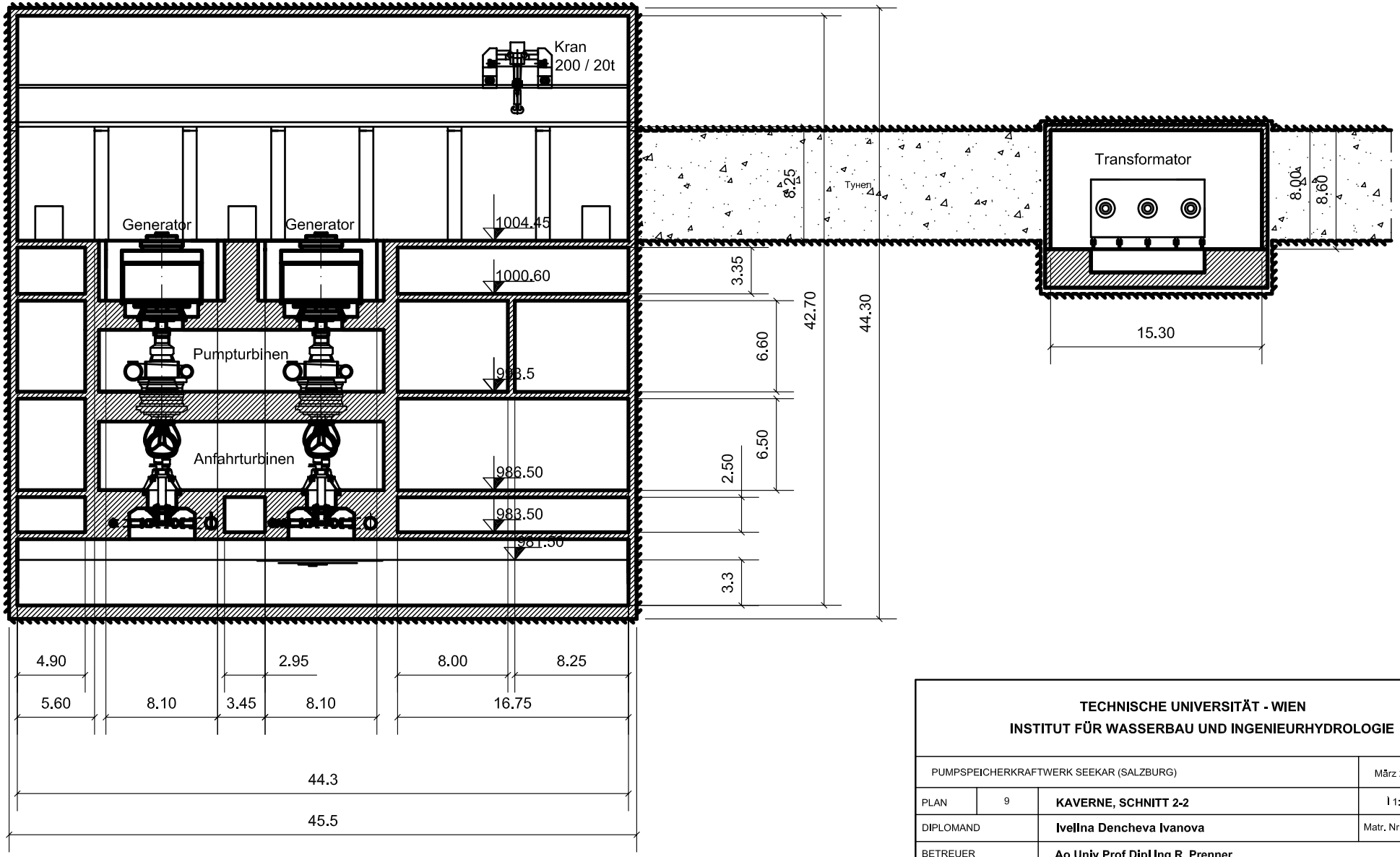
QUERSCHNITT DER KAVERNE (SCHNITT 1 - 1)
M 1:200



TECHNISCHE UNIVERSITÄT - WIEN
INSTITUT FÜR WASSERBAU UND INGENIEURHYDROLOGIE

PUMPSPEICHERKRAFTWERK SEEKAR (SALZBURG)			März 2008r.
PLAN	7	**KAVERNE, SCHNITT 2-2**	1:200
DIPLOMAND		**Ivelina Dencheva Ivanova**	Matr. Nr. 0227379
BETREUER		**Ao.Univ.Prof.Dipl.Ing R. Prenner**	

LÄNGSSCHNITT DER KAVERNE (SCHNITT 3 - 3)
M 1:200



TECHNISCHE UNIVERSITÄT - WIEN
INSTITUT FÜR WASSERBAU UND INGENIEURHYDROLOGIE

PUMPSPEICHERKRAFTWERK SEEKAR (SALZBURG)			März 2008r.
PLAN	9	**KAVERNE, SCHNITT 2-2**	1:200
DIPLOMAND		**Ivellna Dencheva Ivanova**	Matr. Nr. 0227379
BETREUER		**Ao.Univ.Prof.Dipl.Ing R. Prenner**	