

TU

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

Entwicklung eines technischen Projekts für den Druckstollen des WKWs „Sarnitsa“

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

Univ. Prof. Dipl.- Ing Viktor Tashev

Institut für konstruktiven Wasserbau,

Fakultät für Hydrotechnik,

Ivaylo Kukurin

Matr. Nr. 0728513

Sofia,

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
1 Allgemeine Daten für das Objekt	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Grunddaten für den Triebwasserweg	1
1.3 Speicher „Sarnitsa“	2
1.4 Triebwasserweg	2
1.5 WKW „Sarnitsa“	2
1.6 Geologische Bedingungen im Gebiet der Anlage.....	3
1.7 Beschreibung der Grundanlagen	4
1.7.1 Wasserentnahme	4
1.7.2 Druckstollen	5
1.7.3 Wasserschloss	5
2 Trassierung des Druckstollens im Grundriss	6
3 Hydraulische Bemessung bei stationären Prozessen	7
3.1 Hydraulische Parameter des Druckstollens.....	7
3.2 Hydraulische Verluste	8
3.2.1 Örtliche Verluste.....	8
3.2.2 Hydraulische Verluste im Druckstollen.....	10
3.3 Berechnung der Netto-und Bruttofallhöhe	11
4 Hydraulische Bemessung bei instationären Prozessen	13
4.1 Hydraulische Bemessung des zylindrischen Wasserschlosses	15
4.1.1 Ermittlung der horizontalen Fläche und des Durchmessers des Wasserschlosses (erstes Kriterium von Thoma).	16
4.1.2 Überprüfung der Schwankungsprozesse in Abhängigkeit von den hydraulischen Verlusten im Druckstollen und in der Druckrohrleitung (zweites Kriterium von Thoma).	16
4.1.3 Ermittlung des höchsten Spiegelanstiegs bei schneller Reduktion der Ausbauwassermenge von $Q = 72,00 \text{ m}^3 / \text{s}$ bis $Q = 0 \text{ m}^3 / \text{s}$ und minimaler Rauigkeit des Druckstollens.....	16



4.1.4	Ermittlung des tiefsten Spiegelsunks bei schneller Erhöhung der Wassermenge von $Q_1 = 0,5 \cdot Q = 36,00 \text{ m}^3 / \text{s}$ bis $Q_2 = 72,00 \text{ m}^3 / \text{s}$ und maximaler Rauigkeit.....	17
4.2	Berechnung der Schwankungen im System „Druckstollen-Wasserschloss“ mit Hilfe des Programms „VODKUL“	19
5	Optimierung der Abmessungen des Wasserschlosses im Bezug auf eine Verminderung der Baukosten und der dabei entstehenden Erhöhung der Druckverluste.....	24
5.1	Hydraulische Parameter des Druckstollens.....	24
5.2	Hydraulische Verluste	24
5.2.1	Örtliche Verluste.....	24
5.2.2	Hydraulische Verluste im Druckstollen.....	26
5.3	Berechnung der Netto-und Bruttofallhöhe	28
6	Hydraulische Bemessung bei instationären Prozessen.....	29
6.1	Hydraulische Bemessung des zylindrischen Wasserschlosses	29
6.1.1	Ermittlung der horizontalen Fläche und des Durchmessers des Wasserschlosses (erstes Kriterium von Thoma).	30
6.1.2	Überprüfung der Schwankungsprozesse in der Abhängigkeit von den hydraulischen Verlusten im Druckstollen und in der Druckrohrleitung (zweites Kriterium von Thoma).	30
6.1.3	Ermittlung des maximalen Spiegelanstiegs bei schneller Reduktion der Ausbauwassermenge von $Q = 72,00 \text{ m}^3 / \text{s}$ bis $Q = 0 \text{ m}^3 / \text{s}$ und minimaler Rauigkeit des Druckstollens.	31
6.1.4	Ermittlung des tiefsten Spiegelsunks bei schneller Erhöhung der Wassermenge von $Q_1 = 0,5 \cdot Q = 36,00 \text{ m}^3 / \text{s}$ bis $Q_2 = 72,00 \text{ m}^3 / \text{s}$ und maximaler Rauigkeit.....	31
6.2	Berechnung der Schwankungen im System „Druckstollen-Wasserschloss“ mit Hilfe des Programms „VODKUL“	33
7	Auswahl und Bemessung der Abstützung.....	39
7.1	Ermittlung des Gebirgsdrucks	39
7.1.1	Ermittlung des Gebirgsdrucks beim Festigkeitsbeiwert nach Protodiakonov $f < 4$	41



7.1.2	Ermittlung des Gebirgsdrucks beim Festigkeitsbeiwert nach Protodiakonov $f \geq 4$	41
7.2	Bemessung der Abstützung	42
7.2.1	Kombinierte Abstützung aus Spritzbeton und Anker (Gleitkeilanker und Kunstharzklebeanker)	42
7.2.2	Abstützung aus Spritzbeton (bewehrter und unbewehrter Spritzbeton).....	44
7.3	Auswahl der Abstützungskonstruktion und Bemessung in jedem Abschnitt.	46
7.3.1	Abschnitt 1	46
7.3.2	Abschnitt 2	50
7.3.3	Abschnitt 3	54
7.3.4	Abschnitt 4	57
7.3.5	Abschnitt 5	60
7.3.6	Abschnitt 6	61
7.3.7	Abschnitt 7	61
7.3.8	Abschnitt 8	61
7.4	Zusammenfassung der genutzten Ankerkonstruktionen	62
8	Auswahl und Bemessung der Auskleidung.....	63
8.1	Abschnitt 1	64
8.1.1	Minimale Dicke der ungerissenen Auskleidung.....	64
8.1.2	Bemessung der Bewehrung.....	79
8.1.3	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	82
8.2	Abschnitt 2	84
8.2.1	Minimale Dicke der ungerissenen Auskleidung.....	84
8.2.2	Bemessung der Bewehrung.....	94
8.2.3	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	96
8.3	Abschnitt 3	99
8.3.1	Minimale Dicke der ungerissenen Auskleidung.....	99
8.3.2	Bemessung der Bewehrung.....	110
8.3.3	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	112
8.4	Abschnitt 4	115
8.4.1	Minimale Dicke der ungerissenen Auskleidung.....	115



8.4.2	Bemessung der Bewehrung	126
8.4.3	Grunzzustand der Gebrauchstauglichkeit	129
8.5	Abschnitt 5	131
8.5.1	Minimale Dicke der ungerissenen Auskleidung	131
8.5.2	Bemessung der Bewehrung	143
8.5.3	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	145
8.6	Abschnitt 6	148
8.6.1	Minimale Dicke der ungerissenen Auskleidung	148
8.6.2	Bemessung der Bewehrung	159
8.6.3	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	161
8.7	Abschnitt 7	164
8.7.1	Minimale Dicke der ungerissenen Auskleidung	164
8.7.2	Bemessung der Bewehrung	173
8.7.3	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	175
8.8	Abschnitt 8	178
8.8.1	Minimale Dicke der ungerissenen Auskleidung	178
8.8.2	Bemessung der Bewehrung	187
8.8.3	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	189
8.9	Zusammenfassende Tabellen für die Auskleidungskonstruktionen	192
9	Bauverfahrenstechnik des Druckstollens	195
9.1	Ausbrucharbeiten	197
9.1.1	Bohr- und Sprengarbeiten	197
9.1.2	Maschinellem Vortrieb mit Teilschnittmaschine (TSM)	206
9.2	Schutterung	210
9.3	Abstützkonstruktionen	215
9.3.1	Wasserhaltung	215
9.3.2	Spritzbetonarbeiten	216
9.3.3	Gleitkeilanker	216
9.3.4	Kunstharzklebanker	217
9.4	Auskleidungsarbeiten	225
9.4.1	Schalungsarbeiten	225
9.4.2	Bewehrungsarbeiten	225
9.4.3	Betonierung	226



10	Umweltschutzmaßnahmen	228
10.1	Bauzeit	228
10.1.1	Auswirkung auf die Luft.....	228
10.1.2	Auswirkung auf das Wasser.....	229
10.1.3	Auswirkung auf die Flora und die Fauna	230
10.1.4	Abfall	230
10.2	Betriebszeit	231

1 Allgemeine Daten für das Objekt

1.1 Einleitung

Das folgende Projekt besteht aus einer technischen Lösung für den Aufbau von dem Druckstollen des WKWs „Sarnitsa“. Auf Grund der gegebenen geologischen Charakteristiken und der Ausbauwassermenge wird eine detaillierte Bemessung der Abstützung und der Auskleidung des Druckstollens durchgeführt. Das ganze Projekt für die Anlage besteht aus einer Druckrohrleitung und der Ausrüstung für das WKW „Sarnitsa“, das aber in einer anderen parallel ausgeführten Diplomarbeit untersucht wird.

1.2 Grunddaten für den Triebwasserweg

Der Triebwasserweg „Sarnitsa“ entsteht für eine bessere Anwendung des Energiepotentials des Arda-Flusses und ist eigentlich der dritte Teil des großen Hydroprojekts „Gorna Arda“, der sich in dem östlichen Gebiet von Rodopa Gebirge befindet. Die großen Wassermengen und die kleinen Hangneigungen sind die Hauptvoraussetzungen für die Art der geplanten Anlagen. Nach diesen Bedingungen werden alle Triebwasserwege entlang des Flusses mit kurzen Druckstollen und Druckrohrleitungen gebaut.

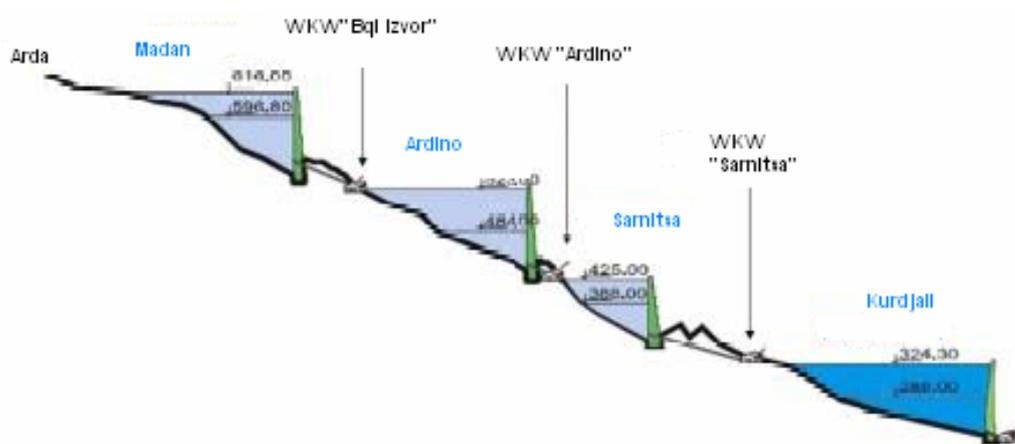


Abb. 1-1 Kaskade „Gorna Arda“

Die Hauptanlagen sind:

1.3 Speicher „Sarnitsa“

Der Speicher „Sarnitsa“ ist das dritte Teil der Kaskade „Gorna Arda“. Die Hauptfunktion des Speichers ist ein jährlicher Ausgleich des Gewässers zu gewährleisten. Das folgende Projekt wurde unter der Annahme einer Walzbetontalsperre entwickelt.

Technische Parameter des Speichers:

∇ Stauziel	= 425,00 m
∇ Überstau	= 427,00 m
∇ Absenkziel	= 388,00 m
Höhe der Talsperre	= 97 m
Länge der Talsperrenkrone	= 320 m
Volumen des Speichers	= 92 Mio. m ³

1.4 Triebwasserweg

Der Triebwasserweg soll den Speicher „Sarnitsa“ mit dem WKW „Sarnitsa“ verbinden. Der Abstand zwischen den beiden Anlagen ist ca. 1,5 km. Die Ausbauwassermenge beträgt $Q = 72,00 \text{ m}^3 / \text{s}$

Der Triebwasserweg besteht aus:

- Wasserentnahmebauwerk
- Druckstollen
- Wasserschloss
- Druckrohrleitung

1.5 WKW „Sarnitsa“

Die Ausrüstungsauswahl des WKWs „Sarnitsa“ wird ausführlich in einer parallel gemachten Diplomarbeit gemacht.

1.6 Geologische Bedingungen im Gebiet der Anlage

Entlang der Anlage sind die folgenden ingenieurgeologischen Bedingungen vorhanden.

Die Anlage befindet sich in einem Gebirge aus Andesitgestein- erste Effusion. Der Fels ist buntfarbig mit sich in Tiefe grau-grüne, grau-blaue, grüne und dunkel-graue wechselnde Farben. An der Oberfläche, bis zu einer Tiefe von ca. 4-8 m, ist der Fels durch Erosion beeinträchtigt. Die Hänge im Gebiet des Wasserschlosses bestehen hauptsächlich aus Kies und sandigem Lehm.

Im Fels kann man leicht spezifische Arten von Spalten erkennen. Sie sind vertikale und polyedrische Prismen. Die größte praktische Bedeutung haben die Kontaktspalten, die das unterirdische Gewässer voneinander trennen. Dadurch werden getrennte Felsmassen im Abstand von 3 bis 6 m formiert. Sie sind in Richtung Südost mit einer Neigung von $10^0 - 12^0$ geneigt. Als Ergebnis von diesen Prozessen und der Erosion kann eine Entstehung von verschiedenen Erweiterungen im Fels und Kavernen beobachtet werden. Dadurch können viele Filtrationsprozesse entstehen und es besteht große Gefahr, dass verschiedene Teile des Felsen unter Druck zu gelangen.

Im Gebiet sind keine großen tektonischen Störungen vorhanden.

Die hydrogeologischen Bedingungen sind relativ gut. Das Gebirge ist trocken wobei sich das Gewässer nur in den Spalten befindet, die eigentlich jahreszeitlich begründet sind. Der Einfluss des Druckstollens und der Druckrohrleitung ist in diesen Angaben nicht berücksichtigt.

Die physikalischen, mechanischen und geotechnischen Parameter des Felsens sind in der folgenden Tabelle dargestellt:

Abschnitt		γ g/cm ³	f	Ko N/cm ³	tg φ_n	Kohäsion MPa	Poissonzahl	Deforma- tiosmodulus. MPa
Andesit –Erste Effusion – erosiert. 4-8 m		2.14	1.5 – 2.0	800 - 1000	0.48	$c_n=0.15$	0.33	500
Andesit– Erste Effusion – nicht erodiert	Überdeckung < 25 m	2.19	3 - 4	1500-2000	0.60	0.35	0.28	2000
	Überdeckung > 25 m		4 - 5	2000-2500	0.66	0.40	0.28	2500

1.7 Beschreibung der Grundanlagen

1.7.1 Wasserentnahme

Die Hauptaufgabe der Wasserentnahme ist es einen gleichmäßigen Verlauf zwischen dem Wasser im Speicher und im Druckstollen zu gewährleisten. In Abhängigkeit von ihrer Lage im Grundriss und den ingenieurgeologischen Voraussetzungen ist die Wasserentnahme so positioniert, dass sie sehr nah der Talsperre ist. Dadurch wird eine Optimierung des Triebwasserwegs möglich. Der Zugang zu der Anlage wird durch eine Rampe gesichert, die von der rechten Seite der Talsperrenkrone beginnt.

Die Wasserentnahme ist von offenem Typ und besitzt zwei schnellfallende Gelitschützen –resp. Betriebsverschluss und Notverschluss. Die Position der Wasserentnahme ist so gewählt, dass genug Platz für die Bauarbeiten vorhanden ist. In diesem Bereich sollen die ganze erforderliche Mechanisierung, sowie eine Betonanlage positioniert werden.

Im Einlaufbereich der Wasserentnahme wird ein Rechen vorgesehen. Dieser Rechen soll den Druckstollen von den verschiedenen schwimmenden Abfällen und Triebgut, die die normale Arbeit des Druckstollens und dadurch des WKWs stören können, schützen.

Der Einlaufbereich hat ein rechteckiges Profil. Ihm folgend ist ein Überlaufsbereich vorgesehen, der diesen rechteckigen Querschnitt mit einem zylindrischen Querschnitt mit $D=6,10$ m verbinden soll.

1.7.2 Druckstollen

1.7.2.1 Einlaufbereich

Der Einlauf wird im Bereich der Baugrube für die Wasserentnahme konstruiert. Diese Baugrube soll groß genug für die beiden Anlagen sein, deshalb sollen die Böschungen mit einer besonderen Vorsicht geplant werden. Einige Bermen sind vorgesehen, die die Sicherheit gegen ungewünschte Rutschungen gewährleisten sollen.

Das Gebiet des Einlaufbereiches ist so zu bemessen, dass dort alle notwendige Mechanisierung für die Aushubarbeiten, Abstützung und Auskleidung positioniert werden können und alles problemlos funktionieren kann.

1.7.2.2 Druckstollen

Der Druckstollen hat eine Gesamtlänge $L=1019,81\text{m}$ und eine konstante Neigung von $i=0,0018$. Es wird ein kreisförmiger Querschnitt mit einem Durchmesser von $D=6,10\text{m}$ gewählt.

In Abhängigkeit von den gegebenen ingenieurgeologischen Bedingungen entlang des Druckstollens und nach den entsprechenden Berechnungen für die inneren und äußeren Wasserdrücke, wird eine ausführliche Bemessung der Abstützung und Auskleidung durchgeführt.

1.7.3 Wasserschloss

Es wird ein einfaches zylindrisches Einkammer-Wasserschloss gewählt. Diese einfache Konstruktion ist sehr leicht zu errichten und erlaubt eine sichere Arbeit bei instationären Prozessen.

Der Querschnitt des Wasserschlosses ist zylindrisch mit einem Durchmesser von $D=22,5\text{ m}$. Für die Bemessung dieses Querschnitts werden verschiedene hydraulische Berechnungen durchgeführt und mit der Hilfe der Kriterien von Thoma wird der entsprechende Durchmesser gewählt.

Es werden Berechnungen für maximale und minimale Wasserständen im Wasserschloss bei instationären Prozessen geführt.

Im Rahmen des Projekts wird noch eine zweite Variante des Wasserschlosses untersucht. Dadurch kann ein Vergleich zwischen den beiden gemacht werden wobei eine Optimierung für den Druckstollen möglich ist.

2 Trassierung des Druckstollens im Grundriss

Die folgende Diplomarbeit beginnt mit der Auswahl der Richtung des Druckstollens. Die Trassierung wird in Abhängigkeit von den gegebenen ingenieurgeologischen Voraussetzungen gemacht. Auf Grund dieser Bedingungen wird eine klassische Vorgehensweise für die Richtung des Druckstollens gewählt. Das Ziel ist eine minimale Länge der Anlage zu erreichen, weil dadurch die Investitionen für die Errichtung minimalisiert werden können. Der kurze Druckstollen hat eine wichtige Rolle bei den hydraulischen Verlusten, was in einer späteren Phase der Entwicklung eine größere Produktion von Energie gewährleisten wird. Die gewählte Form des Druckstollens erlaubt auch eine kurze, sehr geneigte Druckrohrleitung zu planen.

Die ingenieurgeologischen Voraussetzungen erlauben eine geradlinige Führung des Druckstollens vorzusehen. Wegen gefährlicher Zonen, mit einer nicht ausreichenden Tragfähigkeit, wurde aber eine Kurve im Grundriss vorgesehen, die auch die notwendige Überlagerungshöhe während der Betriebszeit gewährleistet.

Die kurze Länge des Druckstollens garantiert, dass auch eine kleine Abweichung von der geradlinigen Richtung keine größeren Investitionen bei der Errichtung und dem Betrieb verursachen wird.

3 Hydraulische Bemessung bei stationären Prozessen

- **Koten**

Stauziel	425,00 m
Überstau	427,00 m
Absenkziel	388,00 m
UWS	325,00 m

- **Ausbauwassermenge**

$$Q = 72,00 \text{ m}^3 / \text{s}$$

3.1 Hydraulische Parameter des Druckstollens

$$D_{\text{Druckstollen}} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{\text{Ausbau.}}}{v_{\text{Druckstollen}} \cdot \pi}}$$

$$Q_{\text{Ausbau}} = 72,00 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$v_{\text{Druckstollen}} = 2,50 \text{ m/s} - \text{Angenommene Geschwindigkeit [1]}$$

$$D_{\text{Druckstollen}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 72,00}{2,5 \cdot 3,14}} = 6,06 \text{ m}$$

Angenommen

$$D_{\text{Druckstollen}} = 6,10 \text{ m}$$

$$v'_{\text{Druckstollen}} = \frac{Q_{\text{Ausbau}}}{F_{\text{Druckstollen}}} = \frac{Q_{\text{Ausbau}}}{\frac{\pi \cdot D_{\text{Druckstollen}}^2}{4}} = \frac{72,00}{\frac{3,14 \cdot 6,10^2}{4}} = 2,46 \text{ m/s}$$

$$h_{\text{Druckstollen Saughöhe}} = \frac{D'_{\text{Druckstollen}}}{2} = \frac{6,10}{2} = 3,05 \text{ m}$$

angenommen

$$h_{\text{Druckstollen Saughöhe}} = 3,00 \text{ m}$$

3.2 Hydraulische Verluste

3.2.1 Örtliche Verluste

$$\Delta h_{\text{Örtliche}} = \Delta h_{\text{Rechen}} + \Delta h_{\text{Einlauf}} + \Delta h_{\text{Übergang}}$$

3.2.1.1 Hydraulische Verluste bei dem Grobrechen - Δh_{Rechen}

$$\Delta h_{\text{Rechen}} = \xi_{\text{Rechen}} \frac{V_{\text{Rechen}}^2}{2g} \quad \text{nach [1]}$$

$$\xi_{\text{Rechen}} = \beta \left(\frac{b}{a} \right)^{\frac{4}{3}} \cdot \sin \alpha$$

Die angenommenen Parameter sind:

$$V_{\text{re}} = 1,00 \text{ m/s} \quad \rightarrow \text{Eintrittsgeschwindigkeit nach [9]}$$

$$b = 0,02 \text{ m} = 2,0 \text{ cm} \quad \rightarrow \text{Stabdicke}$$

$$a = 0,2 \text{ m} = 20 \text{ cm} \quad \rightarrow \text{Abstand zwischen den Rechenstäben}$$

$$\beta = 2,42 \quad \rightarrow \text{Formbeiwert des Rechenstabes nach [9]}$$

$$\alpha = 60^\circ \quad \rightarrow \text{Neigungswinkel der Rechenstäbe}$$

$$F_{\text{Rechen}}^{\text{Netto}} = \frac{Q_{\text{Ausbau}}}{v_{\text{Rechen}}} = \frac{72,00}{1,00} = 72,00 \text{ m}^2$$

$$F_{\text{Rechen}}^{\text{Brutto}} = F_{\text{Rechen}}^{\text{Brutto}} \cdot \left(1 + \frac{b}{a} \right) = 72,00 \cdot \left(1 + \frac{0,2}{0,02} \right) = 79,20 \text{ m}^2$$

$$h_{\text{Rechen}} = 1,5 \cdot b_{\text{Rechen}}$$

$$F_{\text{Rechen}}^{\text{Brutto}} = h_{\text{Rechen}} \cdot b_{\text{Rechen}} = 1,5 b_{\text{Rechen}}^2 \Rightarrow b_{\text{Rechen}} = 7,266 \text{ m}$$

$$\Rightarrow h_{\text{Rechen}} = 1,5 \cdot 7,266 = 10,9 \text{ m}$$

Die Sohle der Baugrube für die Wasserentnahme befindet sich auf Kote 370,00m und das Absenkziel auf 388,00 m. Das bedeutet, dass der Wasserstand über den Rechen genug groß ist. Das garantiert, dass der Rechen immer unter dem Wasserspiegel sein wird und dadurch kann kein Vereisen entstehen. Wegen den konstruktiven Voraussetzungen bei der Errichtung des Rechens und nicht relevanter Veränderung der Fläche wird die folgende Form des Rechens gewählt:

$$h_{\text{Rechen}} = 11,00\text{m}$$

$$b_{\text{Rechen}} = 7,25\text{m}$$

$$F_{\text{Rechen}}^{\text{Brutto}} = h_{\text{Rechen}} \cdot b_{\text{Rechen}} = 11,00 \cdot 7,25 = 79,75 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{Rechen}}^{\text{real}} = \frac{Q_{\text{Ausbau}}}{F_{\text{Rechen}}} = \frac{72,00}{79,75} = 0,9 \text{ m/s}$$

$$\xi_{\text{Rechen}} = \beta \left(\frac{b}{a} \right)^{\frac{4}{3}} \cdot \sin \alpha = 2,42 \left(\frac{2}{20} \right)^{\frac{4}{3}} \sin 60^\circ = 0,097$$

$$\Delta h_{\text{Rechen}} = \xi_{\text{Rechen}} \frac{V_{\text{Rechen}}^2}{2g} = 0,097 \cdot \frac{0,9^2}{2 \cdot 9,81} = 0,004 \text{ m}$$

3.2.1.2 Einlaufverluste - $\Delta h_{\text{Einlauf}}$

$$\Delta h_{\text{Einlauf}} = \left(\xi_{\text{Einlauf}} + 1 \right) \frac{V_{\text{Einlauf}}^2}{2g}$$

$$\xi_{\text{Einlauf}} = 0,20 \div 0,25 \rightarrow \text{für ausgerundeten Einlauf}$$

$$V_{\text{Einlauf}} = \frac{Q_{\text{Ausbau}}}{b_{\text{Rechen}} \cdot (h_{\text{Rechen}} + \Delta h_{\text{Rechen}})} = \frac{72,00}{7,25 \cdot (11,00 + 0,004)} = 0,9 \text{ m/s}$$

$$\Delta h_{\text{Einlauf}} = \left(\xi_{\text{Einlauf}} + 1 \right) \frac{V_{\text{Einlauf}}^2}{2g} = (0,25 + 1) \frac{0,9^2}{2 \cdot 9,81} = 0,051 \text{ m}$$

3.2.1.3 Übergangverluste - $\Delta h_{\text{Übergang}}$

$$\Delta h_{\text{Übergang}} = \xi_{\text{Übergang}} \frac{V_{\text{Druckstollen}}^2}{2g}$$

$$\xi_{\text{Übergang}} = 0,15 \text{ bei } l/D = 4$$

$$\xi_{\text{Übergang}} = 0,20 \text{ bei } l/D = 3$$

$$\xi_{\text{Übergang}} = 0,25 \text{ bei } l/D = 2$$

Der Verlustbeiwert $\xi_{\text{Übergang}}$ ist auf Grund von Modeluntersuchungen im Labor von UABG angenommen.

$$\left. \begin{array}{l} L = 20,00 \text{ m} \\ D = 6,10 \text{ m} \end{array} \right\} \Rightarrow L/D = 20,00 / 6,10 = 3,279$$

interpoliert:

$$\xi_{\text{Übergang}} = 0,1861$$

$$\Delta h_{\text{Übergang}} = \xi_{\text{Übergang}} \frac{V_{\text{Tunnel}}^2}{2g} = 0,1861 \cdot \frac{2,46^2}{2 \cdot 9,81} = 0,057 \text{ m}$$

$$\Delta h_{\text{Örtliche}} = \Delta h_{\text{Rechen}} + \Delta h_{\text{Einlauf}} + \Delta h_{\text{Übergang}} = 0,004 + 0,051 + 0,057 = 0,112 \text{ m}$$

3.2.2 Hydraulische Verluste im Druckstollen

$$\Delta h_{\text{Druckstollen}} = \Delta h_{\text{Länge}} + \Delta h_{\text{Krümmung}} + \Delta h_{\text{Ausgang}}$$

3.2.2.1 Längsverluste - $\Delta h_{\text{Länge}}$

$$R_{\text{Druckstollen}} = \frac{D_{\text{Druckstollen}}}{4} = \frac{6,1}{4} = 1,525 \text{ m}$$

$$C_{\text{Druckstollen}}^{\text{min}} = \frac{1}{n_{\text{min}}} \cdot R_{\text{Druckstollen}}^{1/6} = \frac{1}{0,012} \cdot 1,525^{1/6} = 89,405 \text{ m}^{1/2} / \text{s}$$

$$C_{\text{Druckstollen}}^{\text{max}} = \frac{1}{n_{\text{max}}} \cdot R_{\text{Druckstollen}}^{1/6} = \frac{1}{0,016} \cdot 1,525^{1/6} = 67,05 \text{ m}^{1/2} / \text{s}$$

$$\Delta h_{\text{Druckstollen}}^{\text{min}} = \frac{L_{\text{Druckstollen}} \cdot v_{\text{Druckstollen}}^2}{C_{\text{Druckstollen}}^{\text{min}2} \cdot R_{\text{Druckstollen}}} = \frac{1019,81 \cdot 2,46^2}{89,405^2 \cdot 1,525} = 0,506 \text{ m}$$

$$\Delta h_{\text{Druckstollen}}^{\text{max}} = \frac{L_{\text{Druckstollen}} \cdot v_{\text{Druckstollen}}^2}{C_{\text{Druckstollen}}^{\text{max}2} \cdot R_{\text{Druckstollen}}} = \frac{1019,81 \cdot 2,46^2}{67,05^2 \cdot 1,525} = 0,90 \text{ m}$$

3.2.2.2 Krümmungsverluste - $\Delta h_{\text{Krümmung}}$

$$R_{\text{Kurve}} = 300 \text{ m}$$

$$\alpha = 31^\circ, \beta = 149^\circ$$

$$L_{\text{Kurve}} = 161,64 \text{ m}$$

$$\xi_{\text{Krümmung}} = \left[0,131 + 1,847 \cdot \left(\frac{r}{\rho} \right)^{3,5} \right] \cdot \frac{\alpha}{90^\circ}$$

$$\text{Wobei } \begin{cases} r = R_{\text{Druckstollen}} = 3,05 \text{ m} \\ \rho = R_{\text{Kurve}} = 300 \text{ m} \end{cases}$$

$$\xi_{\text{Krümmung}} = \left[0,131 + 1,847 \cdot \left(\frac{r}{\rho} \right)^{3,5} \right] \cdot \frac{\alpha}{90^\circ} = \left[0,131 + 1,847 \cdot \left(\frac{3,05}{300} \right)^{3,5} \right] \frac{30^\circ}{90^\circ} = 0,045$$

$$\Delta h_{\text{Krümmung}} = \xi_{\text{Krümmung}} \frac{V_{\text{Druckstollen}}^2}{2g} = 0,045 \cdot \frac{2,46^2}{2 \cdot 9,81} = 0,014 \text{ m}$$

3.2.2.3 Ausgangsverluste - $\Delta h_{\text{Ausgang}}$

$$\Delta h_{\text{Ausgang}} = \xi_{\text{Ausgang}} \frac{V_{\text{Druckstollen}}^2}{2g}, \quad \xi_{\text{Ausgang}} = 1,00 \text{ nach [1]}$$

$$\Delta h_{\text{Ausgang}} = \xi_{\text{Ausgang}} \frac{V_{\text{Druckstollen}}^2}{2g} = 1,00 \cdot \frac{2,46^2}{2 \cdot 9,81} = 0,31 \text{ m}$$

$$\Delta h_{\text{Druckstollen}} = \Delta h_{\text{Rechen}} + \Delta h_{\text{Einlauf}} + \Delta h_{\text{Übergang}} + \Delta h_{\text{Länge}} + \Delta h_{\text{Krümmung}} + \Delta h_{\text{Ausgang}}$$

$$\Delta h_{\text{Druckstollen}} = 0,004 + 0,051 + 0,057 + 0,90 + 0,014 + 0,31 = 1,336 \text{ m}$$

- Charakteristische Knoten

$$\nabla \text{ max Absenkziel} = \nabla \text{ Absenkziel} - h_{\text{Druckstollen Saughöhe}} = 388,00 - 3,00 = 385,00 \text{ m}$$

$$\nabla \text{ Druckstollen}_{\text{Sohle}}^{\text{Anfang}} = \nabla \text{ max Absenkziel} - h_{\text{Rechen}} = 385,00 - 11,00 = 374,00 \text{ m}$$

$$\nabla \text{ Druckstollen}_{\text{Firste}}^{\text{Anfang}} = \nabla \text{ Druckstollen}_{\text{Sohle}}^{\text{Anfang}} + D_{\text{Druckstollen}} = 374,00 + 6,10 = 380,1 \text{ m}$$

$$\nabla \text{ Druckstollen}_{\text{Richtungslinie}} = \nabla \text{ Druckstollen}_{\text{Sohle}}^{\text{Anfang}} + R_{\text{Druckstollen}} = 374,00 + 3,05 = 377,05$$

$$\nabla \text{ Druckstollen}_{\text{Sohle}}^{\text{End}} = \nabla \text{ Absenkziel} - \Delta h_{\text{Druckstollen}}^{\text{max}} - \Delta h_{\text{Sicher}}^{\text{Druckstollen}} - \Delta h_{\text{Saughöhe}}^{\text{Druckrohrleitung}} - D_{\text{Druckstollen}}$$

$$\nabla \text{ Druckstollen}_{\text{Sohle}}^{\text{End}} = \nabla 388,00 - 1,336 - 6,00 - 2,4 - 6,1$$

$$\nabla \text{ Druckstollen}_{\text{Sohle}}^{\text{End}} = 372,164 \text{ m}$$

$$\nabla \text{ Druckstollen}_{\text{RL}}^{\text{End}} = \nabla \text{ Druckstollen}_{\text{Sohle}}^{\text{End}} + R_{\text{Druckstollen}} = 372,164 + 3,05 = 375,214 \text{ m}$$

3.3 Berechnung der Netto-und Bruttofallhöhe

$$H_{\text{BRUTTO}}^{\text{max}} = \text{Überstau} - \text{UWS} = 100 \text{ m}$$

$$H_{\text{BRUTTO}}^{\text{min}} = \text{Absenkziel} - \text{UWS} = 63 \text{ m}$$

$$H_{\text{Netto}}^{\text{max}} = H_{\text{Netto}}^{\text{max}} - \Delta h_{\text{max}} = 100 - 3,378 = 96,622 \text{ m}$$

$$H_{\text{Brutto}}^{\text{min}} = H_{\text{Brutto}}^{\text{min}} - \Delta h_{\text{max}} = 63 - 3,378 = 59,622 \text{ m}$$

Wobei Δh_{\max} die Gesamtverluste für den ganzen Triebwasserweg sind. Hier sind nicht nur die Verluste im Druckstollen, sondern auch die Verluste in der Druckrohrleitung, die in einer anderen Diplomarbeit berechnet werden, berücksichtigt:

$$\Delta h_{\max} = \Delta h_{\text{Örtliche}} + \Delta h_{\text{Druckstollen}} + \Delta h_{\text{Druckrohrleitung}}$$

$$\Delta h_{\text{Örtliche}} = \Delta h_{\text{Rechen}} + \Delta h_{\text{Einlauf}} + \Delta h_{\text{Übergang}} = 0,004 + 0,051 + 0,057 = 0,112 \text{ m}$$

$$\Delta h_{\text{Druckstollen}} = \Delta h_{\text{Länge}} + \Delta h_{\text{Krümmung}} + \Delta h_{\text{Ausgang}}$$

$$\Delta h_{\text{Druckstollen}} = 0,506 + 0,014 + 0,31 = 0,83 \text{ m}$$

$$\Delta h_{\max} = \Delta h_{\text{Länge}} + \Delta h_{\text{Einlauf}} + \Delta h_{\text{Rechen}} + \Delta h_{\text{Knick}} + \Delta h_{\text{Einlauf}}^{\text{Verzweigung}} + \Delta h_{\text{Länge}}^{\text{Verzweigung}} + \Delta h_{\text{Kr}} + \Delta h_{\text{wkw}}$$

$$\Delta h_{\max} = 0,32 + 0,40 + 0,042 + 0,02 + 0,31 + 0,085 + 0,037 + 0,033 = 1,247 \text{ m}$$

$$\Delta h_{\max} = 0,112 + 0,83 + 1,247 = 2,189 \text{ m}$$

4 Hydraulische Bemessung bei instationären Prozessen

Die hydraulischen Bemessungen werden durchgeführt, um die größten Schwankungen des Wasserspiegels zu berechnen. Die Erhöhung ergibt den größten hydrostatischen Druck, der eigentlich der Bemessungsfall für die Auskleidung ist. Die Berechnungssituation für den Druckstollen ist bei einer ungünstigen Arbeit des WKWs und zwar bei einem notwendigen Ausschalten der Turbinen infolge eines Ausfalls des Generators. In diesem Fall entsteht ein Druckstoß und dadurch eine Erhöhung des hydrostatischen Drucks.

Damit diese Untersuchung realistisch ist, sollen die instationären Prozesse des Druckstoßes und der Druckschwankungen im Wasserschloss gleichzeitig untersucht werden. Physikalisch erscheinen sie zur gleichen Zeit. Solche Untersuchungen brauchen aber eine komplizierte Software, damit diese Prozesse gleichzeitig simuliert werden können. Aus diesem Grund werden Annahmen gemacht, die eine getrennte Untersuchung der beiden Prozesse erlauben. Dabei sollen die Ergebnisse X möglichst nahe der Realität sein. Außerdem sollen die Berechnungen so geführt werden, dass am Ende die maximalen Berechnungswerte eine groß genug Sicherheit für nachfolgende Untersuchungen besitzen.

Der Druckstoß ist bei einer maximalen Erhöhung des hydrostatischen Drucks im Druckstollen von 30% berechnet. Unter dieser Annahme wird die Schließzeit des Leitapparats bei einem Notfall, d.h. beim Ausfall des Lasts, berechnet.

Diese Untersuchung wird in einer anderen Diplomarbeit durchgeführt und hier sind nur die Endergebnisse für die Schließzeit angenommen.

Die Berechnung der Schwingungsprozesse im Wasserschloss stellt die Veränderung des Wasserspiegels im System Druckstollen-Wasserschloss als Funktion der Zeit dar.

Es werden zwei verschiedene Fälle im System Druckstollen-Wasserschloss untersucht, wobei die wichtigsten Parameter, die zu bestimmen sind, sind:

- Maximaler Spiegelanstieg des Wasserspiegels im Wasserschloss (Ausgangsdate ist der Stauziel = $\nabla 425$ m)



- Minimale Absenkung des Wasserspiegels im Wasserschloss, wobei dadurch die notwendige Saughöhe für die Druckrohrleitung überprüft wird. (Ausgangsdate ist das Absenkziel = $\nabla 388$ m)

Abfolge der Berechnungen:

- Ermittlung der Parameter des Druckstoßes in der Druckrohrleitung . Schließzeit des Leitapparats. Art des Druckstoßes. Die beiden werden in einer anderen Diplomarbeit berechnet und hier sind sie nur angenommen.
- Ermittlung des maximalen Spiegelanstiegs im Wasserschloss bei einer Laständerung von 100% bis 0% in Rahmen der Schließzeit des Leitapparats. Ausgang ist das Stauziel = $\nabla 425$ m.
- Ermittlung des tiefsten Spiegelsunk im Wasserschloss bei einer Laständerung von 50% bis 100% in Rahmen der Schließzeit des Leitapparats. Ausgang ist das Absenkziel = $\nabla 388$ m.
- Modellierung des Druckstoßes, die in anderer Diplomarbeit gemacht wird.

4.1 Hydraulische Bemessung des zylindrischen Wasserschlosses

- Speicher

$$\nabla \text{Überstau} = 427,00 \text{ m}$$

$$\nabla \text{Absenkziel} = 388,00 \text{ m}$$

- Druckstollen

$$\text{Länge} \quad L_{\text{Druckstollen}} = 1019,81 \text{ m}$$

$$\text{Durchmesser} \quad D_{\text{Druckstollen}} = 6,10 \text{ m}$$

$$\text{Rauheit} \quad n_{\text{Druckstollen}}^{\text{min}} = 0,12$$

$$n_{\text{Druckstollen}}^{\text{max}} = 0,16$$

- Druckrohrleitung

$$\text{Länge} \quad L_{\text{Druckrohrleitung}} = 203,58 \text{ m}$$

$$\text{Durchmesser} \quad D_{\text{Druckrohrleitung}} = 4,80 \text{ m}$$

$$\text{Rauheit} \quad n_{\text{Druckrohrleitung}}^{\text{min}} = 0,10$$

$$n_{\text{Druckrohrleitung}}^{\text{max}} = 0,14$$

- WKW

$$\text{Überstau} \quad \nabla 427,00 \text{ m}$$

$$\text{Ausbauwassermenge} \quad Q = 72,00 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$\text{Anzahl der Turbinen} \quad 2$$

$$\text{Schließzeit des Leitapparats} \quad T_{\text{Schließzeit}} = 8,52 \text{ s}$$

Mit diesen Daten werden die Grundparameter des Druckstollens, der Druckrohrleitung und des WKWs berechnet. [4]

- Hydraulische Verluste im Druckstollen

$$\Delta h_{\text{Druckstollen}}^{\text{min}} = \Delta h_{\text{Rechen}} + \Delta h_{\text{Einlauf}} + \Delta h_{\text{Übergang}} + \Delta h_{\text{Länge}} + \Delta h_{\text{Kurve}} + \Delta h_{\text{Ausgang}}$$

$$\Delta h_{\text{Druckstollen}}^{\text{min}} = 0,004 + 0,051 + 0,057 + 0,506 + 0,014 + 0,31 = 0,942 \text{ m}$$

- Hydraulische Verluste in der Druckrohrleitung

Diese Verluste werden in anderer Diplomarbeit berechnet und hier sind sie nur übernommen. :

$$\Delta h_{\text{Druckrohrleitung}}^{\text{max}} = \Delta h_{\text{Länge}} + \Delta h_{\text{Einlauf}} + \Delta h_{\text{Rechen}} + \Delta h_{\text{Knick}} + \Delta h_{\text{Einlauf}}^{\text{Verzweigung}} + \Delta h_{\text{Länge}}^{\text{Verzweigung}} + \Delta h_{\text{Kr}} + \Delta h_{\text{WKW}}$$

$$\Delta h_{\text{Druckrohrleitung}}^{\text{max}} = 0,32 + 0,40 + 0,042 + 0,02 + 0,31 + 0,085 + 0,037 + 0,033 = 1,247 \text{ m}$$

4.1.1 Ermittlung der horizontalen Fläche und des Durchmessers des Wasserschlosses (erstes Kriterium von Thoma).

$$A_{\text{Wasserschloss}}^{\text{kritisch}} = \frac{C_{\text{Druckstollen}}^{\text{min}2} \cdot R_{\text{Druckstollen}} \cdot A_{\text{Druckstollen}}}{2 \cdot g \cdot (H_{\text{brut}}^{\text{min}} - \Delta h_{\text{Druckstollen}}^{\text{min}} - 3 \cdot \Delta h_{\text{Druckrohrleitung}}^{\text{max}})}$$

$$A_{\text{Wasserschloss}}^{\text{kritisch}} = \frac{C_{\text{Druckstollen}}^{\text{min}2} \cdot R_{\text{Druckstollen}} \cdot A_{\text{Druckstollen}}}{2 \cdot g \cdot (H_{\text{brut}}^{\text{min}} - \Delta h_{\text{Druckstollen}}^{\text{min}} - 3 \cdot \Delta h_{\text{Druckrohrleitung}}^{\text{max}})} = \frac{89,405^2 \cdot 1,525 \cdot ((3,14 \cdot 6,1^2) / 4)}{2 \cdot 9,81 \cdot (63 - 0,942 - 3 \cdot 1,247)} = 311,2 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{Wasserschloss}} = 1,25 \cdot A_{\text{Wasserschloss}}^{\text{kritisch}} = 388,99 \text{ m}^2$$

$$D_{\text{Wasserschloss}} = 22,26 \text{ m}$$

$$\text{angenommen } D_{\text{Wasserschloss}} = 22,5 \text{ m} \Rightarrow A_{\text{Wasserschloss}} = (3,14 \cdot 22,5^2) / 4 = 397,41 \text{ m}^2$$

4.1.2 Überprüfung der Schwankungsprozesse in Abhängigkeit von den hydraulischen Verlusten im Druckstollen und in der Druckrohrleitung (zweites Kriterium von Thoma).

$$\frac{H_{\text{bruto}}^{\text{min}}}{3} \geq \Delta h_{\text{Druckstollen}}^{\text{max}} + \Delta h_{\text{Druckrohrleitung}}^{\text{max}}$$

$$\frac{63}{3} \geq 1,336 + 1,247$$

4.1.3 Ermittlung des höchsten Spiegelanstiegs bei schneller Reduktion der Ausbauwassermenge von $Q = 72,00 \text{ m}^3 / \text{s}$ bis $Q = 0 \text{ m}^3 / \text{s}$ und minimaler Rauigkeit des Druckstollens.

- Ermittlung der maximalen Schwankungsamplitude Z_0

$$Z_0 = Q \sqrt{\frac{L_{\text{Druckstollen}}}{g \cdot A_{\text{Druckstollen}} \cdot A_{\text{Wasserschloss}}}} = 72,00 \sqrt{\frac{1019,81}{9,81 \cdot 29,21 \cdot 397,41}} = 6,81 \text{ m}$$

- Ermittlung des Werts ε von den relativen Verlusten im Druckstollen.

$$\varepsilon = \frac{\Delta h_{\text{Druckstollen}}^{\text{min}}}{Z_0} = \frac{0,942}{6,81} = 0,138$$

- Ermittlung des maximalen relativen Spiegelanstiegs X_m

$$X_m = 1 - 0,681\varepsilon + 0,154\varepsilon^2 = 1 - 0,094 + 0,0029 = 0,909$$

- Ermittlung des tatsächlichen Werts des maximalen Spiegelanstiegs Z_m

$$Z_m = Z_0 \cdot X_m = 6,81 \cdot 0,904 = 6,19 \text{ m}$$

- Ermittlung des tiefsten Spiegelsunks Z_n ,

$$X_n = \frac{1 - 0,19\varepsilon}{1 + 1,81\varepsilon} = \frac{1 - 0,026}{1 + 0,249} = 0,78 \text{ m}$$

$$Z_n = X_n \cdot Z_0 = 0,78 \cdot 6,81 = 5,31 \text{ m}$$

- Ermittlung des maximalen Spiegelanstiegs- max. Schwall

$$\nabla Z_m = \nabla \text{Überstau} + Z_m = 427 + 6,19 = 433,19 \text{ m}$$

4.1.4 Ermittlung des tiefsten Spiegelsunks bei schneller Erhöhung der Wassermenge von $Q_1 = 0,5 \cdot Q = 36,00 \text{ m}^3/\text{s}$ bis $Q_2 = 72,00 \text{ m}^3/\text{s}$ und maximaler Rauigkeit.

- Ermittlung des Werts ε von den relativen Verlusten im Druckstollen.

$$\varepsilon = \frac{\Delta h_{\text{Druckstollen}}^{\min}}{Z_0} = \frac{1,336}{6,81} = 0,196$$

- Ermittlung des tiefsten relativen Spiegelsunks X_n

$$n = \frac{Q_1}{Q_2} = 0,5 \quad \nu = \frac{1 + 2n}{2 + n} = \frac{1 + 1}{2 + 0,5} = 0,8$$

$$\begin{aligned} X_n &= (1 - n) \{ 1 + 0,156 \nu (1 + n) \varepsilon [1 + (1 + n) \varepsilon] \} + n^2 \varepsilon = \\ &= (1 - 0,5) \{ 1 + 0,156 \cdot 0,8 (1 + 0,5) \cdot 0,196 \cdot [1 + (1 + 0,5) \cdot 0,196] \} + 0,5^2 \cdot 0,196 = \\ &= 0,524 + 0,049 = 0,573 \end{aligned}$$

- Ermittlung des tatsächlichen Werts des tiefsten Spiegelsunks Z_n

$$Z_n = Z_0 \cdot X_n = 6,81 \cdot 0,573 = 3,90 \text{ m}$$

- Ermittlung des maximalen Spiegelanstiegs nach dem tiefsten Spiegelsunk Z_m .

$$X_m = 1 - 4\varepsilon + 2,3\varepsilon^2 = 1 - 0,784 + 0,088 = 0,304$$

$$Z_m = Z_0 \cdot X_m = 6,81 \cdot 0,28 = 2,07 \text{ m}$$

- Ermittlung des tiefsten Spiegelsunks - max Sunk

$$\Delta h_{Q_{50\%}}^{\text{Druckstollen}} = \Delta h_{\text{Rechen}} + \Delta h_{\text{Einlauf}} + \Delta h_{\text{Übergang}} + \Delta h_{\text{Länge}} + \Delta h_{\text{Kurve}} + \Delta h_{\text{Ausgang}}$$

$$\Delta h_{Q_{50\%}}^{\text{Druckstollen}} = 0,004 + 0,051 + 0,057 + 0,90 + 0,014 + 0,31 = 1,336 \text{ m}$$

$$\nabla Z_n = \nabla \text{Absenkziel} - Z_n - \Delta h_{Q_{50\%}}^{\text{Druckstollen}} = 388 - 3,90 - 0,326 = 383,774 \text{ m}$$

- Ermittlung der Sohle des Wasserschlosses

$$\nabla \text{Sohle}_{\text{Wasserschloss}} = \nabla \text{Sohle}_{\text{Druckstollen}} - h_{\text{Sicherheit}} = 372,164 - 1,00 = 371,164 \text{ m}$$

- Ermittlung der Höhe und des Volumens des Wasserschlosses

$$H_{\text{Wasserschloss}} = \nabla Z_m - \nabla \text{Sohle}_{\text{Wasserschloss}} = 433,19 - 371,164 = 62,026 \text{ m}$$

$$\text{angenommen } H_{\text{Wasserschloss}} = 435,00 - 371,16 = 63,84 \text{ m}$$

$$V_{\text{Wasserschloss}} = A_{\text{Wasserschloss}} \cdot H_{\text{Wasserschloss}} = 397,41 \cdot 63,84 = 25370,65 \text{ m}^3$$



4.2 Berechnung der Schwankungen im System „Druckstollen-Wasserschloss“ mit Hilfe des Programms „VODKUL“

Bemessung der Schwankungen im System beim Ausfall des WKWs.

Ausgangsdaten :

IZ= 2 IT= 3 IP= 1 ISH= 1

TKR= 200. AKVN= 427. Q0=72.00 D= 6.10 AL= 1020. AKSI=2.50 AKSID=0.00

AN=0 .014 ZPR= 500. FGK=397. FD= **** DT= 0 .50 B= 1.00 AM= 0 .42

ZVK: 372.16 600.00

FVK: 397.41 397.41

TC: 0 .00 8.52 200.00

QCC: 72.00 0 .00 0.00

IZ -Anzahl der Elemente in ZVK und FVK

IT -Anzahl der Elemente in QCC und TC

IP -Zeitschritt

ISH - Berechnungsmethode

TKR - Berechnungslänge

AKVN – Überstau

Q0 - Ausbauwassermenge

D - Durchmesser des Druckstollens

AL - Länge des Druckstollens

AKSI – Widerstandsbeiwert des Druckstollens

AKSID- Widerstandsbeiwert des Drossels

AN - Rauigkeitsbeiwert

ZPR - Kote der Überlaufrinne

FGK - Durchmesser des Wasserschlosses

FD - Durchmesser des Drossels

DT - Zeit

B - Länge der Überlaufrinne

AM -Beiwert für das Wassermenge

Ergebnisse:

ZABS – Höhe des Wasserspiegels im Wasserschloss

Q - Wassermenge

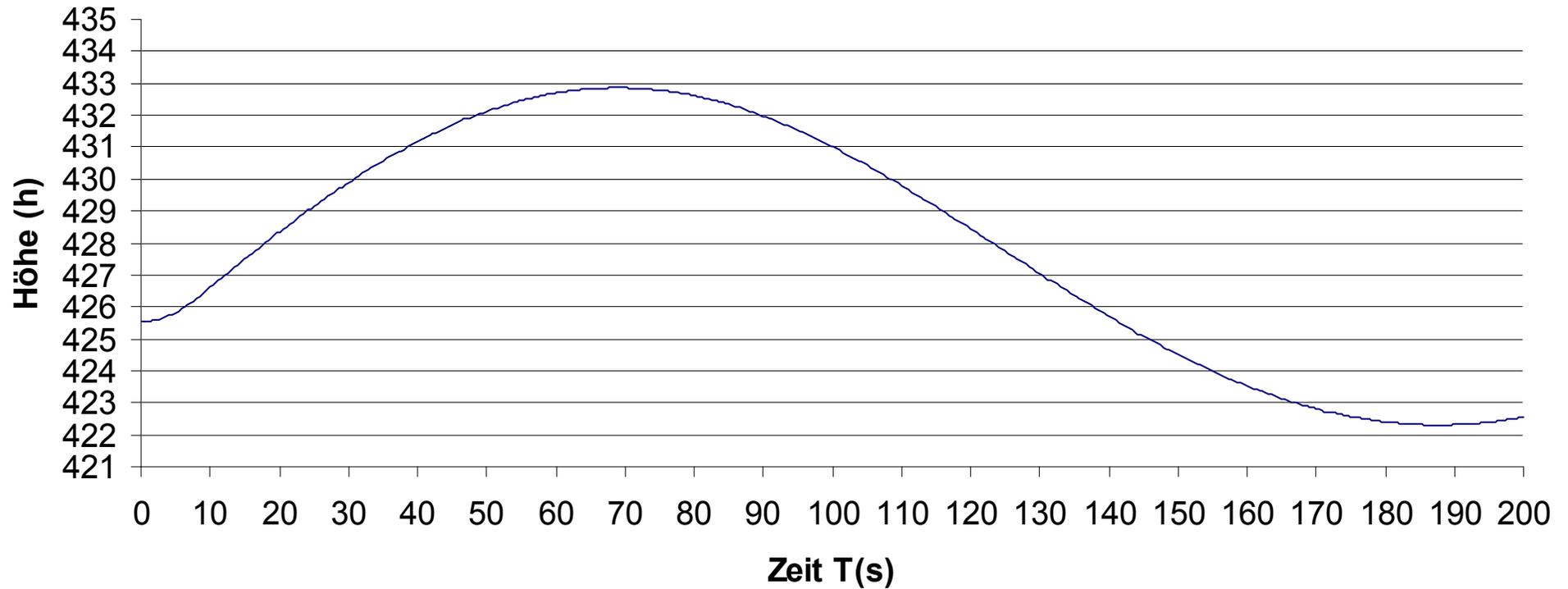
Anmerkung: Wegen der grossen Zahl der Ergebnissen ist nur ein Teil davon dargestellt, und zwar, wo ein maximaler Spiegelanstieg beobachtet wird:

Tab. 4-1

T	ZABS	Q	V	QC
64	432.81	7.74	0.26	0
64.5	432.82	6.92	0.24	0
65	432.82	6.1	0.21	0
65.5	432.83	5.28	0.18	0
66	432.84	4.46	0.15	0
66.5	432.84	3.64	0.12	0
67	432.85	2.81	0.1	0
67.5	432.85	1.99	0.07	0
68	432.86	1.17	0.04	0
68.5	432.86	0.35	0.01	0
69	432.86	-0.48	-0.02	0
69.5	432.86	-1.3	-0.04	0
70	432.86	-2.12	-0.07	0
70.5	432.85	-2.94	-0.1	0
71	432.85	-3.77	-0.13	0
71.5	432.84	-4.59	-0.16	0
72	432.84	-5.4	-0.19	0
72.5	432.83	-6.22	-0.21	0
73	432.82	-7.04	-0.24	0
73.5	432.81	-7.85	-0.27	0



Höchster Spiegelanstieg im Wasserschloss





**Ermittlung der Schwankungen im System „ Druckstollen- Wasserschloss“
beim Einschalten des WKWs**

Ausgangsdaten :

IZ= 2 IT= 3 IP= 1 ISH= 1
 TKR= 200. AKVN= 388. Q0=36.00 D= 6.10 AL= 1020. AKSI=2.50 AKSID= 0.00
 AN=0 .016 ZPR= 600. FGK=397. FD= **** DT= 0.50 B= 1.00 AM= 0.42
 ZVK: 371.51 600.00
 FVK: 397.41 397.41
 TC: 0.00 8.52 200.00
 QCC: 36.00 72.00 72.00

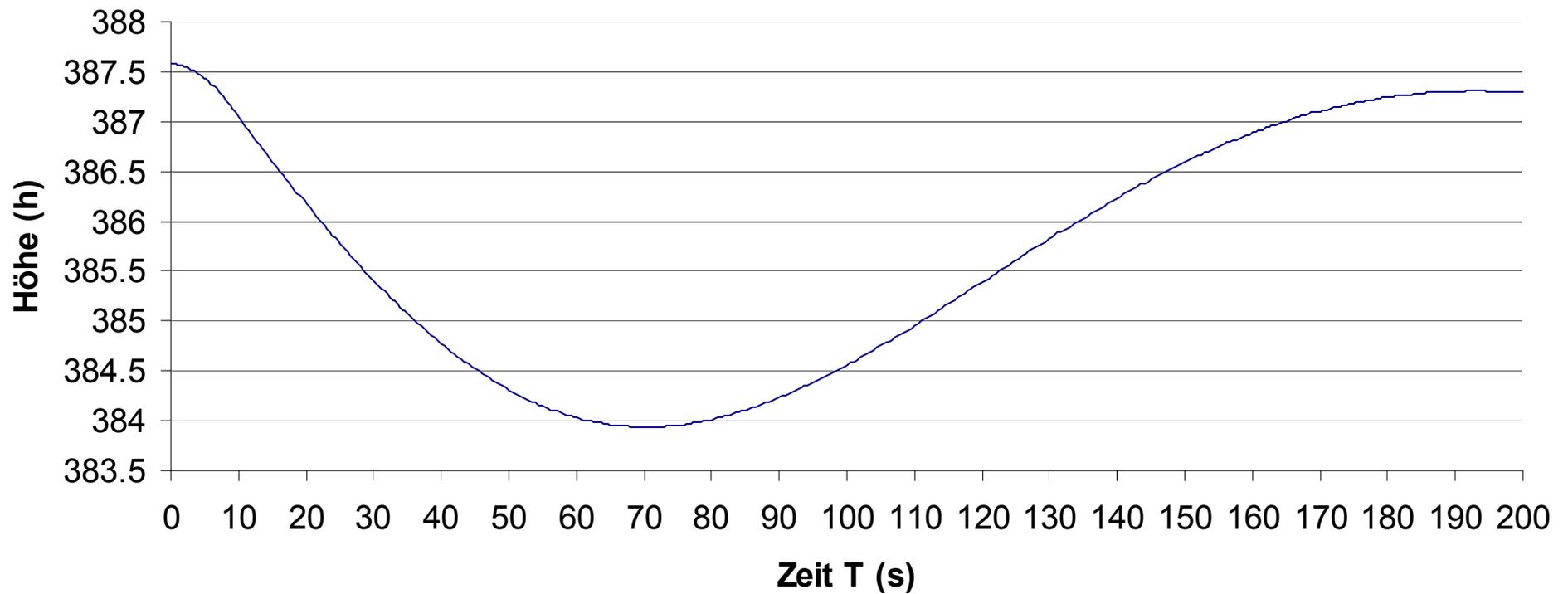
Anmerkung: Wegen der grossen Zahl der Ergebnissen ist nur ein Teil davon dargestellt, und zwar, wo eine maximale Absenkung beobachtet wird:

Tab. 4-2

T	ZABS	Q	V	QC
66.5	383.95	69.53	2.38	72
67	383.95	69.88	2.39	72
67.5	383.95	70.23	2.4	72
68	383.94	70.58	2.42	72
68.5	383.94	70.92	2.43	72
69	383.94	71.26	2.44	72
69.5	383.94	71.6	2.45	72
70	383.94	71.94	2.46	72
70.5	383.94	72.27	2.47	72
71	383.94	72.61	2.49	72
71.5	383.94	72.94	2.5	72
72	383.94	73.27	2.51	72
72.5	383.94	73.59	2.52	72
73	383.94	73.92	2.53	72
73.5	383.95	74.24	2.54	72
74	383.95	74.56	2.55	72
74.5	383.95	74.87	2.56	72



Tiefster Spiegelsunk im Wasserschloss



5 Optimierung der Abmessungen des Wasserschlosses im Bezug auf eine Verminderung der Baukosten und der dabei entstehenden Erhöhung der Druckverluste

5.1 Hydraulische Parameter des Druckstollens

$$D_{\text{Druckstollen}} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{\text{Ausbau}}}{v_{\text{Druckstollen}} \cdot \pi}}$$

$$Q_{\text{Ausbau}} = 72,00 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$v_{\text{Druckstollen}} = 3,50 \text{ m/s} - \text{Angenommene Geschwindigkeit}$$

$$D_{\text{Druckstollen}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 72,00}{3,5 \cdot 3,14}} = 5,12 \text{ m}$$

angenommen:

$$D_{\text{Opt}} = 5,10 \text{ m}$$

$$v'_{\text{Druckstollen}} = \frac{Q_{\text{Ausbau}}}{F_{\text{Druckstollen}}} = \frac{Q_{\text{Ausbau}}}{\frac{\pi \cdot D_{\text{Druckstollen}}^2}{4}} = \frac{72,00}{\frac{3,14 \cdot 5,10^2}{4}} = 3,53 \text{ m/s}$$

$$h_{\text{Druckstollen Saughöhe}} = \frac{D'_{\text{Druckstollen}}}{2} = \frac{5,10}{2} = 2,55 \text{ m}$$

angenommen

$$h_{\text{Druckstollen Saughöhe}} = 2,5 \text{ m}$$

5.2 Hydraulische Verluste

5.2.1 Örtliche Verluste

$$\Delta h_{\text{Wasseraufnahme}} = \Delta h_{\text{Rechen}} + \Delta h_{\text{Einlauf}} + \Delta h_{\text{Übergang}}$$

5.2.1.1 Hydraulische Verluste bei dem Rechen - Δh_{Rechen}

$$\Delta h_{\text{Rechen}} = \xi_{\text{Rechen}} \frac{v_{\text{Rechen}}^2}{2g}$$

$$\xi_{\text{Rechen}} = \beta \left(\frac{b}{a} \right)^{\frac{4}{3}} \cdot \sin \alpha$$

Die angenommenen Parameter sind:

$$V_{\text{re}} = 1,00 \text{ m/s} \quad \rightarrow \text{Eintrittsgeschwindigkeit}$$

$$b = 0,02 \text{ m} = 2,0 \text{ cm} \quad \rightarrow \text{Stabdicke}$$

$$a = 0,2 \text{ m} = 20 \text{ cm} \quad \rightarrow \text{lichter Abstand zwischen den Rechenstäben}$$

$$\beta = 2,42 \quad \rightarrow \text{Formbeiwert des Rechenstabes}$$

$$\alpha = 60^{\circ} \quad \rightarrow \text{Neigungswinkel der Rechenstäbe}$$

$$F_{\text{Rechen}}^{\text{Netto}} = \frac{Q_{\text{Ausbau}}}{V_{\text{Rechen}}} = \frac{72,00}{1,00} = 72,00 \text{ m}^2$$

$$F_{\text{Rechen}}^{\text{Brutto}} = F_{\text{Rechen}}^{\text{Brutto}} \cdot \left(1 + \frac{b}{a} \right) = 72,00 \cdot \left(1 + \frac{0,2}{0,02} \right) = 79,20 \text{ m}^2$$

$$h_{\text{Rechen}} = 1,5 \cdot b_{\text{Rechen}}$$

$$F_{\text{Rechen}}^{\text{Brutto}} = h_{\text{Rechen}} \cdot b_{\text{Rechen}} = 1,5 b_{\text{Rechen}}^2 \Rightarrow b_{\text{Rechen}} = 7,266 \text{ m}$$

$$\Rightarrow h_{\text{Rechen}} = 1,5 \cdot 7,266 = 10,9 \text{ m}$$

Die Sohle der Baugrube für die Wasserentnahme befindet sich auf Kote 370,00m und das Absenkziel auf 388,00 m. Das bedeutet, dass der Wasserstand über den Rechen genug groß ist. Das garantiert, dass der Rechen immer unter dem Wasserspiegel sein wird und dadurch kann kein Vereisen entstehen. Wegen den konstruktiven Voraussetzungen bei der Errichtung des Rechens und nicht relevanter Veränderung der Fläche wird die folgende Form des Rechens gewählt:

$$h_{\text{Rechen}} = 11,00 \text{ m}$$

$$b_{\text{Rechen}} = 7,25 \text{ m}$$

$$F_{\text{Rechen}}^{\text{Brutto}} = h_{\text{Rechen}} \cdot b_{\text{Rechen}} = 11,00 \cdot 7,25 = 79,75 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{Rechen}}^{\text{real}} = \frac{Q_{\text{Ausbau}}}{F_{\text{Rechen}}} = \frac{72,00}{79,75} = 0,9 \text{ m/s}$$

$$\xi_{\text{Rechen}} = \beta \left(\frac{b}{a} \right)^{\frac{4}{3}} \cdot \sin \alpha = 2,42 \left(\frac{2}{20} \right)^{\frac{4}{3}} \sin 60^{\circ} = 0,097$$

$$\Delta h_{\text{Rechen}} = \xi_{\text{Rechen}} \frac{V_{\text{Rechen}}^2}{2g} = 0,097 \cdot \frac{0,9^2}{2 \cdot 9,81} = 0,004 \text{ m}$$

5.2.1.2 Einlaufverluste - $\Delta h_{\text{Einlauf}}$

$$\Delta h_{\text{Einlauf}} = (\xi_{\text{Einlauf}} + 1) \frac{V_{\text{Einlauf}}^2}{2g}$$

$$\xi_{\text{Einlauf}} = 0,20 \div 0,25 \rightarrow \text{für gerundeten Einlauf}$$

$$V_{\text{Einlauf}} = \frac{Q_{\text{Ausbau}}}{b_{\text{Rechen}} \cdot (h_{\text{Rechen}} + \Delta h_{\text{Rechen}})} = \frac{72,00}{7,25 \cdot (11,00 + 0,004)} = 0,9 \text{ m/s}$$

$$\Delta h_{\text{Einlauf}} = (\xi_{\text{Einlauf}} + 1) \frac{V_{\text{Einlauf}}^2}{2g} = (0,25 + 1) \frac{0,9^2}{2 \cdot 9,81} = 0,051 \text{ m}$$

5.2.1.3 Überlaufverluste - $\Delta h_{\text{Überlauf}}$

$$\Delta h_{\text{Überlauf}} = \xi_{\text{Überlauf}} \frac{V_{\text{Druckstollen}}^2}{2g}$$

$$\xi_{\text{Überlauf}} = 0,15 \text{ bei } l/D = 4$$

$$\xi_{\text{Überlauf}} = 0,20 \text{ bei } l/D = 3$$

$$\xi_{\text{Überlauf}} = 0,25 \text{ bei } l/D = 2$$

Der Verlustbeiwert $\xi_{\text{Übergang}}$ ist auf Grund von Modeluntersuchungen im Labor von UABG angenommen.

$$\left. \begin{array}{l} L = 20,00 \text{ m} \\ D = 5,10 \text{ m} \end{array} \right\} \Rightarrow L/D = 20,00 / 5,10 = 3,921$$

interpoliert

$$\xi_{\text{Übergang}} = 0,154$$

$$\Delta h_{\text{Übergang}} = \xi_{\text{Übergang}} \frac{V_{\text{Druckstollen}}^2}{2g} = 0,154 \cdot \frac{3,53^2}{2 \cdot 9,81} = 0,098 \text{ m}$$

$$\Delta h_{\text{Ortlche}} = \Delta h_{\text{Übergang}} + \Delta h_{\text{Einlauf}} + \Delta h_{\text{Überlauf}} = 0,004 + 0,051 + 0,098 = 0,153 \text{ m}$$

5.2.2 Hydraulische Verluste im Druckstollen

$$\Delta h_{\text{Druckstollen}} = \Delta h_{\text{Länge}} + \Delta h_{\text{Krümmung}} + \Delta h_{\text{Ausgang}}$$

5.2.2.1 Längsverluste - $\Delta h_{\text{Länge}}$

$$R_{\text{Druckstollen}} = \frac{D_{\text{Druckstollen}}}{4} = \frac{5,1}{4} = 1,275 \text{ m}$$

$$C_{\text{Druckstollen}}^{\text{min}} = \frac{1}{n_{\text{min}}} \cdot R_{\text{Druckstollen}}^{1/6} = \frac{1}{0,012} \cdot 1,275^{1/6} = 86,777 \text{ m}^{1/2} / \text{s}$$

$$C_{\text{Druckstollen}}^{\text{max}} = \frac{1}{n_{\text{max}}} \cdot R_{\text{Druckstollen}}^{1/6} = \frac{1}{0,016} \cdot 1,275^{1/6} = 65,08 \text{ m}^{1/2} / \text{s}$$

$$\Delta h_{\text{Druckstollen}}^{\text{min}} = \frac{L_{\text{Druckstollen}} \cdot v_{\text{Druckstollen}}^2}{C_{\text{Druckstollen}}^{\text{min}2} \cdot R_{\text{Druckstollen}}} = \frac{1019,81 \cdot 3,53^2}{86,777^2 \cdot 1,275} = 1,324 \text{ m}$$

$$\Delta h_{\text{Druckstollen}}^{\text{max}} = \frac{L_{\text{Druckstollen}} \cdot v_{\text{Druckstollen}}^2}{C_{\text{Druckstollen}}^{\text{max}2} \cdot R_{\text{Druckstollen}}} = \frac{1019,81 \cdot 3,53^2}{65,08^2 \cdot 1,275} = 2,353 \text{ m}$$

5.2.2.2 Krümmungsverluste - $\Delta h_{\text{Krümmung}}$

$$R_{\text{Kurve}} = 300 \text{ m}$$

$$\alpha = 31^\circ, \beta = 149^\circ$$

$$L_{\text{Kurve}} = 161,64 \text{ m}$$

$$\xi_{\text{Krümmung}} = \left[0,131 + 1,847 \cdot \left(\frac{r}{\rho} \right)^{3,5} \right] \cdot \frac{\alpha}{90^\circ}$$

$$\text{Wobei } \begin{cases} r = R_{\text{Druckstollen}} = 2,55 \text{ m} \\ \rho = R_{\text{Kurve}} = 300 \text{ m} \end{cases}$$

$$\xi_{\text{Krümmung}} = \left[0,131 + 1,847 \cdot \left(\frac{r}{\rho} \right)^{3,5} \right] \cdot \frac{\alpha}{90^\circ} = \left[0,131 + 1,847 \cdot \left(\frac{2,55}{300} \right)^{3,5} \right] \frac{30^\circ}{90^\circ} = 0,044$$

$$\Delta h_{\text{Krümmung}} = \xi_{\text{Krümmung}} \frac{V_{\text{Druckstollen}}^2}{2g} = 0,044 \cdot \frac{3,53^2}{2 \cdot 9,81} = 0,028 \text{ m}$$

5.2.2.3 Ausgangsverluste - $\Delta h_{\text{Ausgang}}$

$$\Delta h_{\text{Ausgang}} = \xi_{\text{Ausgang}} \frac{V_{\text{Druckstollen}}^2}{2g}, \quad \xi_{\text{Ausgang}} = 1,00$$

$$\Delta h_{\text{Ausgang}} = \xi_{\text{Ausgang}} \frac{V_{\text{Druckstollen}}^2}{2g} = 1,00 \cdot \frac{3,53^2}{2 \cdot 9,81} = 0,635 \text{ m}$$



$$\Delta h_{\text{Druckstollen}} = \Delta h_{\text{Rechen}} + \Delta h_{\text{Einlauf}} + \Delta h_{\text{Übergang}} + \Delta h_{\text{Länge}} + \Delta h_{\text{Krümmung}} + \Delta h_{\text{Ausgang}}$$

$$\Delta h_{\text{Druckstollen}} = 0,004 + 0,051 + 0,098 + 2,353 + 0,028 + 0,635 = 3,169 \text{ m}$$

- Charakteristischen Koten

$$\nabla \text{ max Absenkziel} = \nabla \text{ Absenkziel} - h_{\text{Druckstollen Saughöhe}} = 388,00 - 3,00 = 385,00 \text{ m}$$

$$\nabla \text{ Druckstollen}^{\text{Anfang Sohle}} = \nabla \text{ max Absenkziel} - h_{\text{Rechen}} = 385,00 - 11,00 = 374,00 \text{ m}$$

$$\nabla \text{ Druckstollen}^{\text{Anfang Firste}} = \nabla \text{ Druckstollen}^{\text{Anfang Sohle}} + D_{\text{Druckstollen}} = 374,00 + 5,10 = 379,1 \text{ m}$$

$$\nabla \text{ Druckstollen}^{\text{Richtungslinie}} = \nabla \text{ Druckstollen}^{\text{Anfang Sohle}} + R_{\text{Druckstollen}} = 376,55$$

$$\nabla \text{ Druckstollen}^{\text{End Sohle}} = \nabla \text{ Absenkziel} - \Delta h_{\text{Druckstollen}}^{\text{max}} - \Delta h_{\text{Druckstollen}}^{\text{Sicher}} - \Delta h_{\text{Druckrohrleitung Saughöhe}} - D_{\text{Druckstollen}}$$

$$\nabla \text{ Druckstollen}^{\text{End Sohle}} = \nabla 388,00 - 3,169 - 5,167 - 2,4 - 5,1$$

$$\nabla \text{ Druckstollen}^{\text{End Sohle}} = 372,164 \text{ m}$$

$$\nabla \text{ Druckstollen}^{\text{End RL}} = \nabla \text{ Druckstollen}^{\text{End Sohle}} + R_{\text{Druckstollen}} = 372,164 + 2,55 = 374,714 \text{ m}$$

5.3 Berechnung der Netto-und Bruttofallhöhe

$$H_{\text{BRUTTO}}^{\text{max}} = \text{Überstau} - \text{UWS} = 425 - 325 = 100 \text{ m}$$

$$H_{\text{BRUTTO}}^{\text{min}} = \text{Absenkziel} - \text{UWS} = 388 - 325 = 63 \text{ m}$$

$$H_{\text{Netto}}^{\text{max}} = H_{\text{Netto}}^{\text{max}} - \Delta h_{\text{max}} = 100 - 3,378 = 96,622 \text{ m}$$

$$H_{\text{Brutto}}^{\text{min}} = H_{\text{Brutto}}^{\text{min}} - \Delta h_{\text{max}} = 63 - 3,378 = 59,622 \text{ m}$$

Wobei Δh_{max} die Gesamtverluste für den ganzen Triebwasserweg sind. Hier sind nicht nur die Verluste im Druckstollen, sondern auch die Verluste in der Druckrohrleitung, die in einer anderen Diplomarbeit berechnet werden, beachtet:

$$\Delta h_{\text{max}} = \Delta h_{\text{Örtliche}} + \Delta h_{\text{Druckstollen}} + \Delta h_{\text{Druckrohrleitung}}$$

$$\Delta h_{\text{Örtliche}} = \Delta h_{\text{Rechen}} + \Delta h_{\text{Einlauf}} + \Delta h_{\text{Überlauf}} = 0,004 + 0,051 + 0,098 = 0,153 \text{ m}$$

$$\Delta h_{\text{Druckrohrleitung}} = \Delta h_{\text{Länge}} + \Delta h_{\text{Krümmung}} + \Delta h_{\text{Ausgang}}$$

$$\Delta h_{\text{Druckrohrleitung}} = 1,324 + 0,028 + 0,635 = 1,987 \text{ m}$$

$$\Delta h_{\text{max}} = \Delta h_{\text{Länge}} + \Delta h_{\text{Einlauf}} + \Delta h_{\text{Rechen}} + \Delta h_{\text{Knick}} + \Delta h_{\text{Einlauf}}^{\text{Verzweigung}} + \Delta h_{\text{Länge}}^{\text{Verzweigung}} + \Delta h_{\text{Kr}} + \Delta h_{\text{wkw}}$$

$$\Delta h_{\text{max}} = 0,31 + 0,40 + 0,042 + 0,005 + 0,31 + 0,085 + 0,037 + 0,033 = 1,247 \text{ m}$$

$$\Delta h_{\text{max}} = 0,153 + 1,987 + 1,247 = 3,378 \text{ m}$$



6 Hydraulische Bemessung bei instationären Prozessen.

6.1 Hydraulische Bemessung des zylindrischen Wasserschlosses

- Speicher

$$\nabla \text{Überstau} = 427,00 \text{ m}$$

$$\nabla \text{Absenkziel} = 388,00 \text{ m}$$

- Druckstollen

$$\text{Länge} \quad L_{\text{Druckstollen}} = 1019,81 \text{ m}$$

$$\text{Durchmesser} \quad D_{\text{Druckstollen}} = 6,10 \text{ m}$$

$$\text{Rauheit} \quad n_{\text{Druckstollen}}^{\text{min}} = 0,12$$

$$n_{\text{Druckstollen}}^{\text{max}} = 0,16$$

- Druckrohrleitung

$$\text{Länge} \quad L_{\text{Druckrohrleitung}} = 203,58 \text{ m}$$

$$\text{Durchmesser} \quad D_{\text{Druckrohrleitung}} = 4,80 \text{ m}$$

$$\text{Rauheit} \quad n_{\text{Druckrohrleitung}}^{\text{min}} = 0,10$$

$$n_{\text{Druckrohrleitung}}^{\text{max}} = 0,14$$

- WKW

$$\text{Überstau} \quad \nabla 427,00 \text{ m}$$

$$\text{Ausbauwassermenge} \quad Q = 72,00 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$\text{Anzahl der Turbinen} \quad 2$$

$$\text{Schließzeit des Leitapparats} \quad T_{\text{Schließzeit}} = 8,52 \text{ s}$$

Mit diesen Daten werden die Grundparameter des Druckstollens, der Druckrohrleitung und des WKWs berechnet [4]

- Hydraulische Verluste für den Druckstollen

$$\Delta h_{\text{Druckstollen}} = \Delta h_{\text{Rechen}} + \Delta h_{\text{Einlauf}} + \Delta h_{\text{Überlauf}} + \Delta h_{\text{Länge}} + \Delta h_{\text{Krümmung}} + \Delta h_{\text{Ausgang}}$$

$$\Delta h_{\text{Druckstollen}} = 0,004 + 0,051 + 0,098 + 1,324 + 0,028 + 0,635 = 2,14 \text{ m}$$

- Hydraulische Verluste für die Druckrohrleitung

Diese Verluste werden in einer anderen Diplomarbeit berechnet und hier sind sie nur übernommen. :

$$\Delta h_{\text{Druckrohrleitung}}^{\text{max}} = \Delta h_{\text{Länge}} + \Delta h_{\text{Einlauf}} + \Delta h_{\text{Rechen}} + \Delta h_{\text{Knick}} + \Delta h_{\text{Einlauf}}^{\text{Verzweigung}} + \Delta h_{\text{Länge}}^{\text{Verzweigung}} + \Delta h_{\text{Kr}} + \Delta h_{\text{WKW}}$$
$$\Delta h_{\text{Druckrohrleitung}}^{\text{max}} = 0,32 + 0,40 + 0,042 + 0,02 + 0,31 + 0,085 + 0,037 + 0,033 = 1,247 \text{ m}$$

6.1.1 Ermittlung der horizontalen Fläche und des Durchmessers des Wasserschlosses (erstes Kriterium von Thoma).

$$A_{\text{Wasserschloss}}^{\text{kritisch}} = \frac{C_{\text{Druckstollen}}^{\text{MINH}^2} \cdot R_{\text{Druckstollen}} \cdot A_{\text{Druckstollen}}}{2 \cdot g \cdot (H_{\text{Bruto}}^{\text{min}} - \Delta h_{\text{Druckstollen}}^{\text{min}} - 3 \cdot \Delta h_{\text{Druckrohrleitung}}^{\text{max}})}$$

$$A_{\text{Wasserschloss}}^{\text{kritisch}} = \frac{C_{\text{Druckstollen}}^{\text{MINH}^2} \cdot R_{\text{Druckstollen}} \cdot A_{\text{Druckstollen}}}{2 \cdot g \cdot (H_{\text{Bruto}}^{\text{min}} - \Delta h_{\text{Druckstollen}}^{\text{min}} - 3 \cdot \Delta h_{\text{Druckrohrleitung}}^{\text{max}})} = \frac{86,777^2 \cdot 1,275 \cdot ((3,14 \cdot 5,1^2) / 4)}{2 \cdot 9,81 \cdot (63 - 2,14 - 3 \cdot 1,247)} = 174,7 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{Wasserschloss}} = 1,25 \cdot A_{\text{Wasserschloss}}^{\text{kritisch}} = 218,37 \text{ m}^2$$

$$D_{\text{Wasserschloss}} = 16,67 \text{ m}$$

$$\text{Angenommen } D_{\text{Wasserschloss}} = 17 \text{ m} \Rightarrow A_{\text{Wasserschloss}} = (3,14 \cdot 17^2) / 4 = 226,865 \text{ m}^2$$

6.1.2 Überprüfung der Schwankungsprozesse in der Abhängigkeit von den hydraulischen Verlusten im Druckstollen und in der Druckrohrleitung (zweites Kriterium von Thoma).

$$\frac{H_{\text{Bruto}}^{\text{min}}}{3} \geq \Delta h_{\text{Druckstollen}}^{\text{max}} + \Delta h_{\text{Druckrohrleitung}}^{\text{max}}$$

$$\frac{63}{3} \geq 3,169 + 1,247$$



6.1.3 Ermittlung des maximalen Spiegelanstiegs bei schneller Reduktion der Ausbauwassermenge von $Q = 72,00 \text{ m}^3/\text{s}$ bis $Q = 0 \text{ m}^3/\text{s}$ und minimaler Rauigkeit des Druckstollens.

- Ermittlung der maximalen Schwankungsamplitude Z_0

$$Z_0 = Q \sqrt{\frac{L_{\text{Druckstollen}}}{g \cdot A_{\text{Druckstollen}} \cdot A_{\text{Wasserschloss}}}} = 72,00 \sqrt{\frac{1019,81}{9,81 \cdot 20,42 \cdot 226,865}} = 10,79 \text{ m}$$

- Ermittlung des Werts ε von den relativen Verlusten im Druckstollen.

$$\varepsilon = \frac{\Delta h_{\text{TUNNEL}}^{\text{MIN}}}{Z_0} = \frac{2,14}{10,79} = 0,198$$

- Ermittlung des maximalen relativen Spiegelanstiegs X_m

$$X_m = 1 - 0,681\varepsilon + 0,154\varepsilon^2 = 1 - 0,135 + 0,006 = 0,871$$

- Ermittlung des tatsächlichen Werts des maximalen Spiegelanstiegs Z_m

$$Z_m = Z_0 \cdot X_m = 10,79 \cdot 0,871 = 9,40 \text{ m}$$

- Ermittlung des tiefsten Spiegelsunks Z_n ,

$$X_n = \frac{1 - 0,19\varepsilon}{1 + 1,81\varepsilon} = \frac{1 - 0,038}{1 + 0,358} = 0,708 \text{ m}$$

$$Z_n = X_n \cdot Z_0 = 0,708 \cdot 10,79 = 7,64 \text{ m}$$

- Ermittlung des maximalen Spiegelanstiegs- max Schwall

$$\nabla Z_m = \nabla \text{Überstau} + Z_m = 427 + 9,40 = 436,40 \text{ m}$$

6.1.4 Ermittlung des tiefsten Spiegelsunks bei schneller Erhöhung der Wassermenge von $Q_1 = 0,5 \cdot Q = 36,00 \text{ m}^3/\text{s}$ bis $Q_2 = 72,00 \text{ m}^3/\text{s}$ und maximaler Rauigkeit.

- Ermittlung des Werts ε von den relativen Verlusten im Druckstollen.

$$\varepsilon = \frac{\Delta h_{\text{Druckstollen}}^{\text{min}}}{Z_0} = \frac{2,14}{10,79} = 0,198$$

- Ermittlung des tiefsten Spiegelsunks X_n

$$n = \frac{Q_1}{Q_2} = 0,5 \quad \nu = \frac{1 + 2n}{2 + n} = \frac{1 + 1}{2 + 0,5} = 0,8$$



$$\begin{aligned} X_n &= (1-n)\{1+0,156\nu(1+n)\varepsilon[1+(1+n)\varepsilon]\} + n^2\varepsilon = \\ &= (1-0,5)\{1+0,156\cdot 0,8(1+0,5)\cdot 0,198\cdot [1+(1+0,5)\cdot 0,198]\} + 0,5^2\cdot 0,198 = \\ &= 0,524 + 0,050 = 0,573 \end{aligned}$$

- Ermittlung des tatsächlichen Werts des tiefsten Spiegelsunks Z_n

$$Z_n = Z_0 \cdot X_n = 10,79 \cdot 0,573 = 6,18 \text{ m}$$

- Ermittlung des maximalen Spiegelanstiegs nach dem tiefsten Spiegelsunk Z_m .

$$X_m = 1 - 4\varepsilon + 2,3\varepsilon^2 = 1 - 0,792 + 0,09 = 0,298$$

$$Z_m = Z_0 \cdot X_m = 10,79 \cdot 0,298 = 3,22 \text{ m}$$

- Ermittlung des tiefsten Spiegelsunks– max Sunk

$$\Delta h_{Q_{50\%}}^{\text{Druckstollen}} = \Delta h_{\text{Rechen}} + \Delta h_{\text{Einlauf}} + \Delta h_{\text{Übergang}} + \Delta h_{\text{Länge}} + \Delta h_{\text{Krümmung}} + \Delta h_{\text{Ausgang}}$$

$$\Delta h_{Q_{50\%}}^{\text{Druckstollen}} = 0,001 + 0,013 + 0,029 + 0,585 + 0,007 + 0,158 = 0,793 \text{ m}$$

$$\nabla Z_n = \nabla \text{Absenkziel} - Z_n - \Delta h_{Q_{50\%}}^{\text{Druckstollen}} = 388 - 6,18 - 0,793 = 381,027 \text{ m}$$

- Ermittlung der Sohle des Wasserschlosses

$$\nabla \text{Sohle}_{\text{Wasserschloss}} = \nabla \text{Sohle}_{\text{Druckstollen}} - h_{\text{Sicherheit}} = 372,164 - 1,00 = 371,164 \text{ m}$$

- Ermittlung der Höhe und des Volumens des Wasserschlosses

$$H_{\text{Wasserschloss}} = \nabla Z_m - \nabla \text{Sohle}_{\text{Wasserschloss}} = 436,40 - 371,164 = 65,24 \text{ m}$$

$$\text{angenommen } H_{\text{Wasserschloss}} = 440,00 - 371,16 = 68,84 \text{ m}$$

$$V_{\text{Wasserschloss}} = A_{\text{Wasserschloss}} \cdot H_{\text{Wasserschloss}} = 226,865 \cdot 68,84 = 15617,4 \text{ m}^3$$



6.2 Berechnung der Schwankungen im System „Druckstollen-Wasserschloss“ mit Hilfe des Programms „VODKUL“

Bemessung der Schwankungen im System beim Ausfall des WKWs.

Ausgangsdaten:

IZ= 2 IT= 3 IP= 1 ISH= 1

TKR= 200. AKVN= 427. Q0=72.00 D= 5.10 AL= 1020. AKSI=2.50 AKSID= 0.00

AN= 0.014 ZPR= 500. FGK=227. FD= **** DT= 0.50 B= 1.00 AM= 0.42

ZVK: 372.16 600.00

FVK: 226.87 226.87

TC: .00 8.52 200.00

QCC: 72.00 .00 .00

Anmerkung: Wegen der großen Zahl der Ergebnissen ist nur ein Teil davon dargestellt, und zwar, wo einen maximalen Spiegelanstieg beobachtet wird:

Tab. 6-1

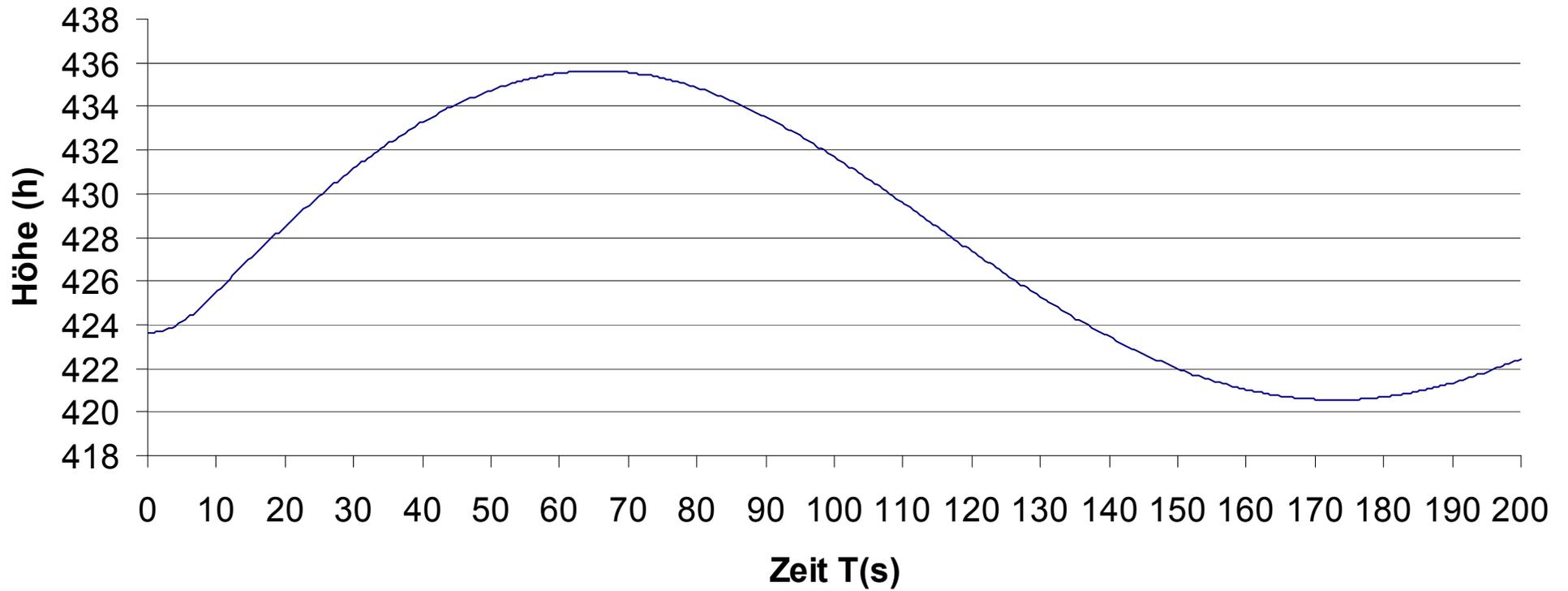
T	ZABS	Q	V	QC
55	435.22	17.17	0.84	0
55.5	435.26	16.34	0.8	0
56	435.29	15.51	0.76	0
56.5	435.33	14.68	0.72	0
57	435.36	13.84	0.68	0
57.5	435.39	13.01	0.64	0
58	435.42	12.17	0.6	0
58.5	435.45	11.33	0.55	0
59	435.47	10.49	0.51	0
59.5	435.5	9.65	0.47	0
60	435.52	8.81	0.43	0
60.5	435.54	7.96	0.39	0
61	435.55	7.12	0.35	0
61.5	435.57	6.27	0.31	0
62	435.58	5.43	0.27	0



62.5	435.59	4.58	0.22	0
63	435.6	3.74	0.18	0
63.5	435.61	2.89	0.14	0
64	435.62	2.04	0.1	0
64.5	435.62	1.2	0.06	0
65	435.63	0.35	0.02	0
65.5	435.63	-0.5	-0.02	0
66	435.63	-1.34	-0.07	0
66.5	435.62	-2.19	-0.11	0
67	435.62	-3.04	-0.15	0
67.5	435.61	-3.88	-0.19	0
68	435.6	-4.73	-0.23	0
68.5	435.59	-5.57	-0.27	0
69	435.58	-6.41	-0.31	0
69.5	435.57	-7.25	-0.35	0
70	435.55	-8.08	-0.4	0
70.5	435.53	-8.92	-0.44	0
71	435.51	-9.75	-0.48	0
71.5	435.49	-10.57	-0.52	0
72	435.47	-11.4	-0.56	0
72.5	435.44	-12.22	-0.6	0
73	435.42	-13.04	-0.64	0
73.5	435.39	-13.85	-0.68	0
74	435.36	-14.66	-0.72	0



Höchster Spiegelanstieg im Wasserschloss





**Ermittlung der Schwankungen im System „ Druckstollen- Wasserschlöss“
beim Einschalten des WKWs**

Ausgangsdaten:

IZ= 2 IT= 3 IP= 1 ISH= 1
 TKR= 200. AKVN= 388. Q0=36.00 D= 5.10 AL= 1020. AKSI=2.50 AKSID= 0.00
 AN= 0.016 ZPR= 500. FGK=227. FD= 1.00 DT= 0.50 B= 1.00 AM= 0.42
 ZVK: 372.16 600.00
 FVK: 226.87 226.87
 TC: 0.00 8.52 200.00
 QCC: 36.00 72.00 72.00

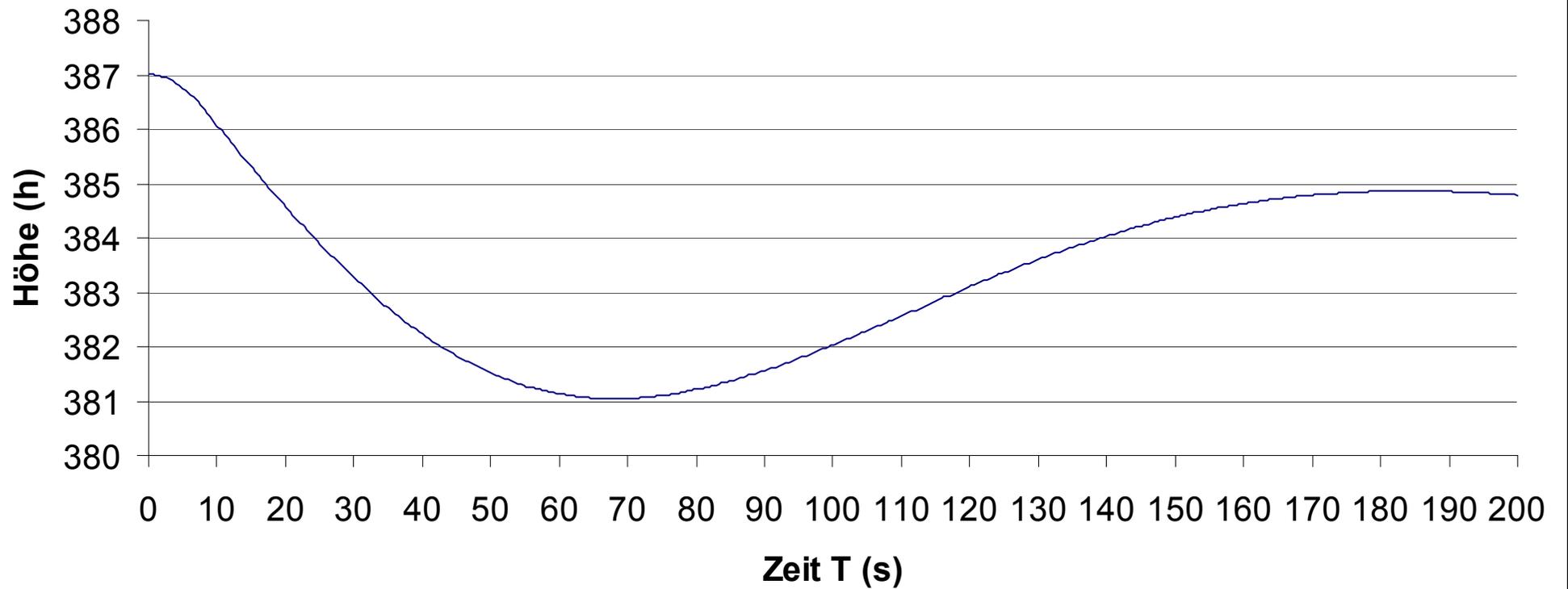
Anmerkung: Wegen den umfangreichen Ergebnissen ist es nur das Teil der Ergebnisse dargestellt, wo ein tiefster Spiegelsunk beobachtet wird:

Tab. 6-2

T	ZABS	Q	V	QC
64	381.06	69.61	3.41	72
64.5	381.05	69.93	3.42	72
65	381.05	70.24	3.44	72
65.5	381.04	70.56	3.46	72
66	381.04	70.87	3.47	72
66.5	381.04	71.18	3.49	72
67	381.04	71.49	3.5	72
67.5	381.04	71.79	3.52	72
68	381.04	72.09	3.53	72
68.5	381.04	72.39	3.55	72
69	381.04	72.68	3.56	72
69.5	381.04	72.97	3.57	72
70	381.04	73.26	3.59	72
70.5	381.04	73.54	3.6	72
71	381.05	73.82	3.62	72
71.5	381.05	74.1	3.63	72
72	381.06	74.37	3.64	72



Tiefster Spiegelsunk im Wasserschloss





Schlussfolgerung:

Die beiden Lösungen für Druckstollen und Wasserschloss sind für die Errichtung möglich, wobei jede von den beiden einen Schwerpunkt auf verschiedene Aspekte darstellt.

Möglichkeit 1 ist ein Druckstollen mit optimaler Geschwindigkeit von $V_{\text{TyHen}} = 2,50 \text{ m/s}$ und dadurch wird ein Durchmesser von $D_{\text{Druckstollen}} = 6,10 \text{ m}$ gewählt. Mit diesen Parametern werden die Verluste für den Druckstollen $\Delta h_{\text{Druckstollen}} = 1,336 \text{ m}$ berechnet und danach eine Bemessung des Wasserschlosses geführt. Die Abmessungen sind folgende: $D_{\text{Wasserschloss}} = 22,5 \text{ m}$ und $H_{\text{Wasserschloss}} = 63,84 \text{ m}$. Diese großen Abmessungen des Wasserschlosses sind eine Voraussetzung für die zweite Bemessung und daher sollen sie reduziert werden.

Möglichkeit 2 ist ein Druckstollen bei dem die Geschwindigkeit höher ist. $v_{\text{Druckstollen}} = 3,53 \text{ m/s}$. Mit der größeren Geschwindigkeit wird einen neuen kleineren Durchmesser gewählt $D_{\text{Druckstollen}} = 5,10 \text{ m}$. Die Verminderung des Durchmessers und die größere Geschwindigkeit sind aber eine Voraussetzung für größere Verluste. $\Delta h_{\text{Druckstollen}} = 3,378 \text{ m}$. Die Abmessungen des Wasserschlosses sind folgenden: $D_{\text{Wasserschloss}} = 17 \text{ m}$ und $H_{\text{Wasserschloss}} = 68,84 \text{ m}$. Dadurch wird die Baugrube vermindert.

Die Verminderung der Baugrube auf Kosten der Zunahme der Verluste soll vollkommen untersucht sein. Nur nach einer solchen Untersuchung kann eine Entscheidung gemacht werden, welche von den beiden Möglichkeiten wirtschaftlicher sein wird. Auf Grund der langzeitigen Betriebsdauer von den Wasserkraftwerken und die großen Verluste, die zur jährlichen Reduktion der Energieleistung führen können, wird die erste Möglichkeit gewählt. Die nachfolgenden Berechnungen werden für diese Abmessungen gemacht.



7 Auswahl und Bemessung der Abstützung

Nach dem Ausbruch des Druckstollens entsteht eine große Gefahr zur Zerstörung des Querschnitts. Die Einheit dieses Querschnittes soll gesichert werden wobei keine ungewünschten Schäden vorkommen dürfen. Dafür wird eine entsprechende Abstützung gebaut, die den Gebirgsdruck bis zu der Errichtung der permanenten unterirdischen Konstruktion tragen muss.

Die schalförmige Konstruktion der Abstützung ist eine Voraussetzung für die Entstehung einer entlasteten Zone über der Firste, die aufgrund der Zusammenarbeit und der Verzahnung des Felses passiert, wodurch die Belastung reduziert und eine Reihe von sekundären Gebirgsauflockerungen verhindert werden.

Die Abstützung ist in der Form einer deformierbaren Konstruktion vorgesehen, die einerseits temporär, andererseits als Teil von der Auskleidung arbeiten kann. Laut der Bemessungsnormen soll die Abstützung für den ganzen Gebirgsdruck bemessen werden.

7.1 Ermittlung des Gebirgsdrucks

Der Gebirgsdruck ist eine Kraft mit Zufallscharakter, deshalb ist es sehr schwer festzustellen, wo sie vorkommen wird. Es sollen alle Sicherheitsmaßnahmen für die Erhaltung der Baugrube unternommen werden. Wegen den Sprengarbeiten wird der Fels um den vorgesehenen Querschnitt aufgelockert. Die Störung wird von den sekundären Gebirgsauflockerungen noch mehr vergrößert und es entstehen Zugspannungen in der Zone der Firste, die wegen der kleinen Zugfestigkeit des Felses zur Entstehung von Rissen führen können. Das enorme Eigengewicht des gestörten Felses, der sich aus den Felsen trennt, kann eine Voraussetzung für den Kollaps der Gesamtheit des Querschnitts sein. Der Gebirgsdruck ist genau dieses Eigengewicht des gestörten Felses, das von der temporären oder permanenten Konstruktion der Abstützung übernommen werden soll.

Für die Ermittlung des Gebirgsdrucks spielen die Eigenschaften des Felses und die Bauverfahrenstechnik eine sehr wichtige Rolle. Je nachdem kann auch der Gebirgsdruck überhaupt nicht auftreten.



7.1.1 Ermittlung des Gebirgsdrucks beim Festigkeitsbeiwert nach Protodiakonov $f < 4$

Bei einem so kleinen Festigkeitsbeiwert nach Protodiakonov wird angenommen, dass der Fels nicht Tragfähig ist und die Auflockerungszone in dem Bereich der Firste eine Voraussetzung für die Entstehung von seitlichen Lasten ist. Dadurch entsteht einen horizontalen Gebirgsdruck.

Für $h_{\text{Ü}} > 2 \cdot h_{\text{Zerstört}}$

- Vertikaler Gebirgsdruck - $q = \beta \cdot \gamma_{\text{Fels}} \cdot h_{\text{Zerstört}} \text{ [kN/m}^2\text{]}$
- Horizontaler Gebirgsdruck $e = \gamma_{\text{Fels}} \cdot (h_{\text{Zerstört}} + 0,5 D_3) \text{tg}^2 \left(45 - \frac{\bar{\varphi}}{2} \right)$

wobei:

$h_{\text{Ü}}$ – Überlagerungshöhe

$h_{\text{zerstört}}$ – Höhe der zerstörten Zone

$\bar{\varphi}$ – Reibungswinkel: $\bar{\varphi} = \text{arctg}(f)$

q – Vertikaler Gebirgsdruck

e – Horizontaler Gebirgsdruck

γ_{Fels} – Wichte des Felses

β – Querschnittsbeiwert

$\beta = 0,7$ für $b \leq 5,5 \text{ m}$
$\beta = 1,0$ für $b \leq 7,5 \text{ m}$
$\beta = 0,8$ für $D_3 = b = 6,8 \text{ m}$

7.1.2 Ermittlung des Gebirgsdrucks beim Festigkeitsbeiwert nach Protodiakonov $f \geq 4$

Es entsteht nur vertikaler Gebirgsdruck

Für $h_{\text{Ü}} > 2 \cdot h_{\text{zerstört}}$

- Vertikaler Gebirgsdruck - $q = \beta \cdot \gamma_{\text{Fels}} \cdot h_{\text{zerstört}} \text{ [kN/m}^2\text{]}$

7.2 Bemessung der Abstützung

7.2.1 Kombinierte Abstützung aus Spritzbeton und Anker (Gleitkeilanker und Kunstharzklebeanker)

Die kombinierte Abstützung aus Spritzbeton und Ankern kann ein Teil der Auskleidung sein. Das Ziel ist den Querschnitt von der Zerstörungswirkung des Gebirgsdrucks zu schützen. Die Bemessung der Ankern umfasst das folgende: Der Ankerdurchmesser, der Bohrlochdurchmesser, die Ankerlänge und der Abstand zwischen den Ankern. Bei der Ermittlung des Gebirgsdrucks für die Bemessung der Anker ist der Festigkeitsbeiwert, der unmittelbar nach dem Abbruch vorkommt- f benutzt. Für die Bemessung des Spritzbetons soll die vorgespannte Funktion der Anker berücksichtigt werden und wird der verbesserte Festigkeitsbeiwert f_v verwendet.

7.2.1.1 Ermittlung der Ankerlänge

$$l_a = h_{\text{zerstört}} + l_{\text{Haft}}$$

- Haftstrecke für Gleitkeilanker

$$l_{\text{Haft}} = \max \left\{ \begin{array}{l} l_{\text{Haft}} \geq (0,5 \div 0,7) \text{ m} \\ l_{\text{Haft}} \geq 0,25 \cdot h_{\text{zerstört}} \text{ m} \end{array} \right\}$$

- Haftstrecke für Kunstharzklebeanker

$$l_{\text{Haft}} = \max \left\{ \begin{array}{l} l_{\text{Haft}} = \frac{R_{\text{St}} \cdot d_a}{4 \cdot \tau_M} \quad [\text{m}] \\ l_{\text{Haft}} = \frac{R_{\text{St}} \cdot d_L}{4 \cdot \tau_F} \quad [\text{m}] \end{array} \right\}$$

$\tau_M = (2,5 \div 3,5) \text{ MPa}$ – Reibung zwischen Anker stahl und Mörtel

$\tau_F = (1,8 \div 2,3) \text{ MPa}$ – Reibung zwischen Mörtel und Fels

$R_c = 355 \text{ MPa}$ – Zugfestigkeit des Stahls A – III



7.2.1.2 Ermittlung des Abstands zwischen den Ankern

$$a = \min \left\{ \begin{array}{l} a = l_a - \frac{k_B \cdot q}{c} \cdot (l_a + D_3) \\ a = \frac{l_a}{3} \cdot \sqrt{\frac{c}{q}} \quad \text{при } q > \frac{4}{9} \cdot \gamma_{ck} \cdot l_a \\ a = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{c \cdot l_a}{\gamma_{Fels}}} \quad \text{при } q \leq \frac{4}{9} \cdot \gamma_{Fels} \cdot l_a \\ a = \sqrt{\frac{N_a}{\gamma_{Fels} \cdot h_{zerstört}}} \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} \Rightarrow \text{Aufgrund der Form der} \\ \text{Auflockerungszone} \\ \\ \Rightarrow \text{Aufgrund der Erhaltung der} \\ \text{Beständigkeit des Felses} \\ \text{zwischen den Anker n} \\ \\ \Rightarrow \text{Aufgrund der Befestigungsfestigkeit} \end{array} \right.$$

$k_a = 0,3$ für kreisförmigen Querschnitt

c – Reibungsbeiwert des Felses

N_a – Tragfähigkeit des Anker s

$N_a = (60 \div 80)$ kN für Schlitzkeilanker

$N_a = (80 \div 100)$ kN für Kunstharzklebeanker

7.2.1.3 Ermittlung der Anzahl der Anker in einem Querschnitt

$$n_{\text{Anker}} = \frac{L}{a} = \frac{\pi \cdot D_3}{2 \cdot a}$$

a – Abstand zwischen den Anker n

7.2.1.4 Ermittlung des Ankerdurchmessers

$$d_a \geq 2 \cdot \sqrt{\frac{N_a}{\pi \cdot R_c}} \quad \text{für Schlitzkeilanker}$$

$$d_a = N16 \div N25 \quad \text{für Kustharzklebeanker}$$

$$d_{\text{Loch}} = d_a + (15 \div 20) \text{mm}$$



7.2.1.5 Bemessung des Spritzbetons

- Unbewehrter Spritzbeton

$$d_{SB} = 0,80 \sqrt{\frac{\gamma_{Fels} \cdot a^3}{f_v \cdot R_{sb}}} \quad [\text{cm}]$$

- Bewehrter Spritzbeton

$$d_{SB} = \frac{-F_s \cdot R_s + \sqrt{(F_s \cdot R_s)^2 + (0,0464 \cdot \gamma_{Fels} \cdot a^3 \cdot l^2 \cdot R_{sb}) / f_v}}{0,333 \cdot R_{sb} \cdot l} \quad [\text{cm}]$$

f_v – Verbesserter Festigkeitsbeiwert.

l – Vortriebslänge

R_{sb} – Druckfestigkeit des Spritzbetons [10^5 N/m^2].

γ_{Fels} – Wichte des Felses [10 N/cm^3]

a – Abstand zwischen den Anker n [cm]

R_s – Zugfestigkeit des Stahls [10^5 N/m^2]

F_s – Querschnittsfläche des Stahls

7.2.2 Abstützung aus Spritzbeton (bewehrter und unbewehrter Spritzbeton)

Die Abstützung aus Spritzbeton wird unmittelbar nach dem Abbruch des Querschnitts gemacht, wobei unter Druck Beton gespritzt wird. In Abhängigkeit von der Tragfähigkeit des Felses kann der Spritzbeton bewehrt oder unbewehrt sein, entsprechend für tragende Felsen und Felsen mit kleiner Tragfähigkeit. Die Abstützung von bewehrtem Spritzbeton wird gemacht nachdem der Beton auf vorfixiertes Stahlnetz gespritzt wird. Die Abstützung gewährleistet durch die schalenförmige Konstruktion eine große Tragfähigkeit. Der Fels arbeitet zusammen mit der Konstruktion und dadurch kann der große Gebirgsdruck des gestörten Felsen und von den sekundären Gebirgsauflockerungen übernommen werden. Der Spritzbeton hat auch eine zweite Funktion, die die Tragfähigkeit verbessert. Er füllt die großen Rissen aus und dadurch verfestigt er der Fels.



7.2.2.1 Unbewehrter Spritzbeton

$$d_{sb} = 0,473 \cdot \sqrt{\frac{\gamma_{Fels} \cdot a^3}{f \cdot R_{sb}}} \quad [\text{cm}]$$

7.2.2.2 Bewehrter Spritzbeton

$$d_{SB} = \frac{-F_s \cdot R_s + \sqrt{(F_s \cdot R_s)^2 + (160 \cdot \gamma_{Fels} \cdot a^3 \cdot R_{sb}) / f}}{33,3 \cdot R_{sb}} \quad [\text{cm}]$$

f_v – Verbessertes Festigkeitsbeiwert.

l – Vortriebslänge

R_{sb} – Druckfestigkeit des Spritzbetons [10^5 N/m^2].

γ_{Fels} – Wichte des Felses [10 N/cm^3]

a – Durchmesser des Druckstollens [cm]

R_s – Zugfestigkeit des Stahls [10^5 N/m^2]

F_s – Querschnittsfläche des Stahls



7.3 Auswahl der Abstützungskonstruktion und Bemessung in jedem Abschnitt.

Tab. 7-1 Abschnitte

% der Länge Vom Anfang	5	10	15	15	10	20	15	10
RMR	25	35	50	65	75	50	40	35

7.3.1 Abschnitt 1

- Abstützungskonstruktion – Kunstharzklebeanker und bewehrter Spritzbeton
- $L_{\text{Abschnitt}} = 0,05 \cdot L_{\text{Druckstollen}} = 0,05 \cdot 1019,81 = 51 \text{ m}$
- $f = 2 \Rightarrow K_0 = 800 \text{ N/cm}^2$
- $\varphi = \arctg(f) = 63,435^\circ$
- $\gamma_{\text{Fels}} = 24 \text{ kN/m}^3$
- $h_{\text{zerstört}} = b_1 / 2 \cdot f = 10,30 / 2 \cdot 2 = 2,58 \text{ m}$,

$$b_1 = b + 2 \cdot h \cdot \text{tg} \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) = 7,0 + 2 \cdot 7,0 \cdot \text{tg} \left(45^\circ - \frac{63,435^\circ}{2} \right) = 10,30$$

wobei $b = h = D_3$ – Durchmesser des Druckstollens mit angenommener Auskleidungsdicke und Spritzbetonsdicke

- $q = \beta \cdot \gamma_{\text{Fels}} \cdot h_{\text{zerstört}} = 0,8 \cdot 24 \cdot 2,58 = 49,54 \text{ [kN/m}^2\text{]}$
- $e = \gamma_{\text{Fels}} \cdot (h_{\text{zerst.}} + 0,5 D_3) \text{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) = 24 \cdot (2,50 + 0,5 \cdot 7,0) \text{tg}^2 \left(45 - \frac{63,435}{2} \right) = 8,024 \text{ kN/m}^2$

7.3.1.1 Ermittlung der Ankerlänge

$$l_a = h_{\text{zerstört}} + l_{\text{Haft}}$$

- Haftstrecke für Kunstharzklebeanker

$$l_{\text{Haft}} = \max \left\{ \begin{array}{l} l_{\text{Haft}} = \frac{R_{\text{st}} \cdot d_a}{4 \cdot \tau_M} = \frac{355,0 \cdot 0,025}{4 \cdot 3} = 0,74 \text{ [m]} \\ l_{\text{Haft}} = \frac{R_{\text{st}} \cdot d_L}{4 \cdot \tau_F} = \frac{355,0 \cdot 0,045}{4 \cdot 2} = 1,997 \text{ [m]} \end{array} \right\}$$

$\tau_M = (2,5 \div 3,5)$ MPa – Reibung zwischen Anker stahl und Mörtel

$\tau_F = (1,8 \div 2,3)$ MPa – Reibung zwischen Mörtel und Fels

$R_c = 355$ MPa – Zugfestigkeit des Stahls A – III

$$l_{\text{Haft}} = 2,00 \text{ m}$$

$$\text{Angenommen: } h_{\text{zerstört}} = 2,58 \text{ m}$$

$$l_a = h_{\text{zerstört}} + l_{\text{Haft}} = 2,00 + 2,58 = 4,58 \Rightarrow 4,60 \text{ m}$$

7.3.1.2 Ermittlung des Abstands zwischen den Ankern

$$a = \min \left\{ \begin{array}{l} a = l_a - \frac{k_a \cdot q}{c} \cdot (l_a + D_3) = 4,60 - \frac{0,3 \cdot 49,54}{60} \cdot (4,50 + 7,0) = 1,727 \text{ m} \\ a = \frac{l_a}{3} \cdot \sqrt{\frac{c}{q}} \quad \text{für } q > \frac{4}{9} \cdot \gamma_{\text{Fels}} \cdot l_a \\ a = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{c \cdot l_a}{\gamma_{\text{Fels}}}} \quad \text{für } q \leq \frac{4}{9} \cdot \gamma_{\text{Fels}} \cdot l_a \\ a = \sqrt{\frac{N_a}{\gamma_{\text{Fels}} \cdot h_{\text{zerstört}}}} = \sqrt{\frac{80}{24 \cdot 2,60}} = 1,15 \text{ m} \end{array} \right\} \frac{4}{9} \cdot 24 \cdot 4,60 = 49,07 = q \Rightarrow a = \frac{4,6}{3} \cdot \sqrt{\frac{60}{49,54}} = 1,68 \text{ m}$$

$k_a = 0,3$ für kreisförmigen Querschnitt

$c = 0,03 \cdot f = 0,03 \cdot 2 = 0,06$ MPa = 60,0 kN/m² – Reibungsbeiwert des Felses

N_a – Tragfähigkeit des Anker s

$N_a = (60 \div 80)$ kN für Schlitzkeilanker

$N_a = (80 \div 100)$ kN für Kunstharzklebeanker

$$\text{Angenommen: } a = 1,15 \text{ m}$$



7.3.1.3 Ermittlung der Anzahl der Anker

$$n_{\text{Anker}} = \frac{L}{a} = \frac{\pi \cdot D_3}{2 \cdot a} = \frac{3,14 \cdot 7,0}{2 \cdot 1,15} = 9,56$$

a – Abstand zwischen den Anker n

Angenommen: n=10

Es werden noch 2 Anker in den Wänden für Abstützung gegen horizontalen Druck angenommen.

7.3.1.4 Ermittlung des Ankerdurchmessers

$d_a = N16 \div N25$ für Kunsharzklebeanker

Angenommen $d_a = 25 \text{ mm}$

$$d_{\text{Loch}} = d_a + (15 \div 20) = 25 + 20 = 45 \text{ mm} = 0,045 \text{ m}$$

7.3.1.5 Ermittlung der Dicke des bewehrten Spritzbetons

$$d_{\text{sb}} = \frac{-F_s \cdot R_s + \sqrt{(F_s \cdot R_s)^2 + (0,0464 \cdot \gamma_{\text{Fels}} \cdot a^3 \cdot l^2 \cdot R_{\text{sb}}) / f_v}}{0,333 \cdot R_{\text{sb}} \cdot l} \quad [\text{cm}]$$

$f_v = 2,2$ – Verbesserter Festigkeitsbeiwert.
abgelesen von [3] "Unterirdische Wassekraftanlagen"
Univ.Prof.Dipl. – Ing Ljubomir Georgiev Tabelle 319.

$l = 2,0 \text{ m}$ – Vortriebslänge

$R_{\text{sb}} = 20,0 \cdot [10^5 \text{ N/m}^2]$ – Druckfestigkeit des Spritzbetons $[10^5 \text{ N/m}^2]$
abgelesen von [3] "Unterirdische Wassekraftanlagen"
Univ.Prof.Dipl. – Ing Ljubomir Georgiev Tabelle 320.

$\gamma_{\text{Fels}} = 0,024 \text{ N/cm}^3$ – Wichte des Felses $[\text{N/cm}^3]$

$a = 115 \text{ cm}$ – Abstand zwischen den Anker n $[\text{cm}]$

$R_s = 5500 \cdot [10^5 \text{ N/m}^2]$ – Zugfestigkeit des Stahls BSt500 S – DIN 488 $[10^5 \text{ N/m}^2]$

$F_s = 2,83 \text{ cm}^2$ – Querschnittsfläche des Stahls BSt500 S – DIN 488 – $\phi 6 - 10/10$

$$d_{\text{sb}} = \frac{-2,83 \cdot 5500 + \sqrt{(2,83 \cdot 5500)^2 + (0,0464 \cdot 0,024 \cdot 115^3 \cdot 200^2 \cdot 20) / 2,2}}{0,333 \cdot 20 \cdot 2} = 10,31 \text{ cm}$$

Angenommen: $d_{\text{sb}} = 15 \text{ cm}$

Die Bemessung der Abstützungsstruktur wird mit Hilfe der Neuen Österreichische Tunnelbaumethode (NÖT) überprüft, wobei die Tragfähigkeit der Elementen mit den entstandenen äußeren Lasten verglichen werden.

- Tragfähigkeit des Spritzbetons

$$P_{Sb} = \frac{d_{Sb} \cdot \tau_{Sb}}{r \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha)} = \frac{0,15 \cdot 2500}{3,5 \cdot \sin(30^\circ) \cdot \cos(30^\circ)} = 247,43 \text{ kN/m}^2$$

$\tau_{Sb} = 2,5 \text{ MPa} = 2500 \text{ kN/m}^2$ – Scherfestigkeit des Spritzbetons

$d_{Sb} = 0,15$ – Angenommene Dicke des Spritzbetons

$r = r_{\text{Druckstollen}} + d_{\text{Auskleidung}} + d_{\text{Spritzbeton}} = 3,05 + 0,30 + 0,15 = 3,5 \text{ m}$

$$\alpha = 45 - \frac{\varphi}{2} = 45 - \frac{63,435}{2} = 13,28 < \alpha_{\min} = 30^\circ$$

- Tragfähigkeit der Anker

$$P_{\text{Anker}} = 0,7 \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{Anker}}^2}{4} \cdot R_{\text{Stahl}} = 0,7 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,025^2}{4} \cdot 355 = 121,9 \text{ kN}$$

- Die Tragfähigkeit der Bewehrung ist zu klein und wird nicht berücksichtigt.

$$P_{\text{gesamt}} = P_{Sb} + P_{\text{Anker}} + P_{\text{Bewehrung}} = 247,43 + 121,9 + 0 = 393,33 \text{ kN/m}^2$$

- Last :

$$P_{\text{Last}} = \frac{2 \cdot \sigma_y}{\zeta + 1} = \frac{2 \cdot 1354,84}{17,18 + 1} = 149,05$$

$$\zeta = \frac{1 + \sin(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)} = \frac{1 + 0,89}{1 - 0,89} = 17,18$$

$$\sigma_y = \gamma \cdot H_{\text{Überlagerung}} = 24 \cdot 56,41 = 1353,84 \text{ kN/m}^2$$

$P_{Sb} > P_{\text{Last}} \Rightarrow$ Die Konstruktion ist Tragfähig

7.3.2 Abschnitt 2

- Abstützungskonstruktion – Kunstharzklebeanker und bewehrter Spritzbeton
- $L_{\text{Abschnitt}} = 0,10 \cdot L_{\text{Druckstollen}} = 0,10 \cdot 1019,81 = 102 \text{ m}$
- $f = 3 \Rightarrow K_0 = 1000 \text{ N/cm}^2$
- $\varphi = \arctg(f) = 71,565^\circ$
- $\gamma_{\text{Fels}} = 25 \text{ kN/m}^3$
- $h_{\text{zerstört}} = b_1 / 2 \cdot f = 9,27 / 2 \cdot 3 = 1,545 \text{ m}$,

$$b_1 = b + 2 \cdot h \cdot \text{tg}\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) = 7,0 + 2 \cdot 7,0 \cdot \text{tg}\left(45^\circ - \frac{71,565^\circ}{2}\right) = 9,27$$

wobei $b = h = D_3$ – Durchmesser des Druckstollens mit angenommener Auskleidungsdicke und Spritzbetonsdicke

- $q = \beta \cdot \gamma_{\text{Fels}} \cdot h_{\text{zerstört}} = 0,8 \cdot 25 \cdot 1,55 = 31 \text{ [kN/m}^2\text{]}$
- $e = \gamma_{\text{Fels}} \cdot (h_{\text{zerstört}} + 0,5 D_3) \text{tg}^2\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) = 25 \cdot (1,55 + 0,5 \cdot 7,0) \text{tg}^2\left(45 - \frac{71,565}{2}\right) = 3,325 \text{ kN/m}^2$

7.3.2.1 Ermittlung der Ankerlänge

$$l_a = h_{\text{zerstört}} + l_{\text{Haft}}$$

- Haftstrecke für Kunstharzklebeanker

$$l_{\text{Haft}} = \max \left\{ \begin{array}{l} l_{\text{Haft}} = \frac{R_c \cdot d_a}{4 \cdot \tau_M} = \frac{355,0 \cdot 0,025}{4 \cdot 4,3} = 0,74 \text{ [m]} \\ l_{\text{Haft}} = \frac{R_c \cdot d_d}{4 \cdot \tau_F} = \frac{355,0 \cdot 0,045}{4 \cdot 4,2} = 1,997 \text{ [m]} \end{array} \right\}$$

$\tau_M = (2,5 \div 3,5) \text{ MPa}$ – Reibung zwischen Anker stahl und Mörtel

$\tau_F = (1,8 \div 2,3) \text{ MPa}$ – Reibung zwischen Mörtel und Fels

$R_c = 355 \text{ MPa}$ – Zugfestigkeit des Stahls A – III

$$l_{\text{Haft}} = 2,00 \text{ m}$$

Angenommen: $h_{\text{zerstört}} = 1,55 \text{ m}$

$$l_a = h_{\text{zerstört}} + l_{\text{Haft}} = 2,00 + 1,55 = 3,55 \Rightarrow 3,60 \text{ m}$$

7.3.2.2 Ermittlung des Abstands zwischen den Ankern

$$a = \min \left\{ \begin{array}{l} a = l_a - \frac{k_a \cdot q}{c} \cdot (l_a + D_3) = 3,60 - \frac{0,3 \cdot 31}{90} \cdot (3,60 + 7,0) = 2,54 \text{ m} \\ a = \frac{l_a}{3} \cdot \sqrt{\frac{c}{q}} \quad \text{für } q > \frac{4}{9} \cdot \gamma_{\text{Fels}} \cdot l_a \\ a = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{c \cdot l_a}{\gamma_{\text{ck}}}} \quad \text{für } q \leq \frac{4}{9} \cdot \gamma_{\text{Fels}} \cdot l_a \\ a = \sqrt{\frac{N_a}{\gamma_{\text{Fels}} \cdot h_{\text{zerstört}}}} = \sqrt{\frac{80}{25 \cdot 1,55}} = 1,44 \text{ m} \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} \\ \\ \frac{4}{9} \cdot 25 \cdot 3,60 = 40 > q \Rightarrow a = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{90 \cdot 3,60}{25}} = 1,8 \text{ m} \end{array} \right\}$$

$k_a = 0,3$ für kreisförmigen Querschnitt

$c = 0,03 \cdot f = 0,03 \cdot 3 = 0,09 \text{ MPa} = 90,0 \text{ kN/m}^2$ – Reibungsbeiwert des Felses

N_a – Tragfähigkeit des Anker s

$N_a = (60 \div 80) \text{ kN}$ für Schlitzkeilanker

$N_a = (80 \div 100) \text{ kN}$ für Kunstharzklebeanker

Angenommen: $a = 1,40 \text{ m}$

7.3.2.3 Ermittlung der Anzahl der Anker

$$n_{\text{Anker}} = \frac{L}{a} = \frac{\pi \cdot D_3}{2 \cdot a} = \frac{3,14 \cdot 7,0}{2 \cdot 1,40} = 7,85$$

a – Abstand zwischen den Anker n

Angenommen: $n = 8$

Es werden noch 2 Anker in den Wänden für Abstützung gegen horizontalen Druck angenommen.

7.3.2.4 Ermittlung des Ankerdurchmessers

$d_a = N16 \div N25$ für Kunstharzklebeanker

Angenommen $d_a = 25 \text{ mm}$

$$d_{\text{Loch}} = d_a + (15 \div 20) = 25 + 20 = 45 \text{ mm} = 0,045 \text{ m}$$

**7.3.2.5 Ermittlung der Dicke des bewehrten Spritzbetons**

$$d_{sb} = \frac{-F_s \cdot R_s + \sqrt{(F_s \cdot R_s)^2 + (0,0464 \cdot \gamma_{Fels} \cdot a^3 \cdot l^2 \cdot R_{sb}) / f_v}}{0,333 \cdot R_{sb} \cdot l} \quad [\text{cm}]$$

$f_v = 3,3$ – Verbesserter Festigkeitsbeiwert
abgelesen von [3] "Unterirdische Wasserkraftanlagen"
Univ.Pr of.Dipl. – Ing Ljubomir Georgiev – Tabelle 319.

$l = 2,0\text{m}$ – Vortriebslänge

$R_{sb} = 310 \cdot [10^5 \text{N/m}^2]$ – Druckfestigkeit des Spritzbetons $[10^5 \text{N/m}^2]$.
abgelesen von [3] "Unterirdische Wasserkraftanlagen"
Univ.Pr of.Dipl. – Ing Ljubomir Georgiev – Tabelle 320

$\gamma_{Fels} = 0,025 \cdot [\text{N/cm}^3]$ – Wichte des Felses $[\text{N/cm}^3]$

$a = 140 \text{ cm}$ – Abstand zwischen den Anker n $[\text{cm}]$

$R_s = 5500 \cdot [10^5 \text{N/m}^2]$ – Zugfestigkeit des Stahls BSt 500S – DIN 488 $[10^5 \text{N/m}^2]$

$F_s = 2,83 \text{ cm}^2$ – Querschnittsfläche des Stahls BSt 500S – DIN 488 $\phi 6 \text{ 10/10}$

$$d_{sb} = \frac{-2,83 \cdot 5500 + \sqrt{(2,83 \cdot 5500)^2 + (0,0464 \cdot 0,025 \cdot 140^3 \cdot 2^2 \cdot 310) / 3,3}}{0,333 \cdot 310 \cdot 2} = 10,83 \text{ cm}$$

Angenommen: $d_{sb} = 15 \text{ cm}$

Die Bemessung der Abstützungsstruktur wird mit Hilfe der Neuen Österreichische Tunnelbaumethode (NÖT) überprüft, wobei die Tragfähigkeit der Elementen mit den entstandenen äußeren Lasten verglichen werden.

- Tragfähigkeit des Spritzbetons

$$P_{Sb} = \frac{d_{Sb} \cdot \tau_{Sb}}{r \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha)} = \frac{0,15 \cdot 3500}{3,5 \cdot \sin(30^\circ) \cdot \cos(30^\circ)} = 346,41 \text{ kN/m}^2$$

$$\tau_{Sb} = 3,5 \text{ MPa} = 2500 \text{ kN/m}^2 \text{ – Scherfestigkeit des Spritzbetons}$$

$$d_{Sb} = 0,15 \text{ – Angenommene Dicke des Spritzbetons}$$

$$r = r_{\text{Druckstollen}} + d_{\text{Auskleidung}} + d_{\text{Spritzbeton}} = 3,05 + 0,30 + 0,15 = 3,5 \text{ m}$$

$$\alpha = 45 - \frac{\varphi}{2} = 45 - \frac{71,565}{2} = 9,22 < \alpha_{\min} = 30^\circ$$

- Tragfähigkeit der Anker

$$P_{\text{Anker}} = 0,7 \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{Anker}}^2}{4} \cdot R_{\text{Stahl}} = 0,7 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,025^2}{4} \cdot 355 = 121,9 \text{ kN}$$

- Die Tragfähigkeit der Bewehrung ist zu klein und wird nicht berücksichtigt.

$$P_{\text{gesamt}} = P_{Sb} + P_{\text{Anker}} + P_{\text{Bewehrung}} = 346,41 + 121,9 + 0 = 468,31 \text{ kN/m}^2$$

- Last :

$$P_{\text{Last}} = \frac{2 \cdot \sigma_y}{\zeta + 1} = \frac{2 \cdot 3170}{32,33 + 1} = 190,2$$

$$\zeta = \frac{1 + \sin(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)} = \frac{1 + 0,94}{1 - 0,94} = 32,33$$

$$\sigma_y = \gamma \cdot H_{\text{Überlagerung}} = 25 \cdot 126,8 = 3170 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{Sb} > P_{\text{Last}} \Rightarrow \text{Die Konstruktion ist Tragfähig}$$

7.3.3 Abschnitt 3

- Abstützungsstruktur – Kunstharzklebeanker und bewehrter Spritzbeton
- $L_{\text{Abschnitt}} = 0,15 \cdot L_{\text{Druckstollen}} = 0,15 \cdot 1019,81 = 153\text{m}$
- $f = 4 \Rightarrow K_0 = 1600 \text{ N/cm}^2$
- $\varphi = \arctg(f) = 75,964^\circ$
- $\gamma_{\text{Fels}} = 26 \text{ kN/m}^3$
- $h_{\text{zerstört}} = k_a \cdot D_3 = 0,2 \cdot 6,8 = 1,36 \text{ m}$,

wobei $b = h = D_3$ – Durchmesser des Druckstollens mit angenommener Auskleidungsdicke und Spritzbetonsdicke

- $q = \beta \cdot \gamma_{\text{Fels}} \cdot h_{\text{zerstört}} = 0,8 \cdot 26 \cdot 1,36 = 28,288 \text{ [kN/m}^2\text{]}$

7.3.3.1 Ermittlung der Ankerlänge

$$l_a = h_{\text{zerstört}} + l_{\text{Haft}}$$

- Haftstrecke für Kunstharzklebeanker

$$l_{\text{Haft}} = \max \left\{ \begin{array}{l} l_{\text{Haft}} = \frac{R_c \cdot d_a}{4 \cdot \tau_M} = \frac{355,0 \cdot 0,025}{4 \cdot 3} = 0,74 \text{ [m]} \\ l_{\text{Haft}} = \frac{R_c \cdot d_D}{4 \cdot \tau_F} = \frac{355,0 \cdot 0,045}{4 \cdot 2} = 1,997 \text{ [m]} \end{array} \right\}$$

$\tau_M = (2,5 \div 3,5) \text{ MPa}$ – Reibung zwischen Anker stahl und Mörtel

$\tau_F = (1,8 \div 2,3) \text{ MPa}$ – Reibung zwischen Mörtel und Fels

$R_c = 355 \text{ MPa}$ – Zugfestigkeit des Stahls A – III

$$l_{\text{Haft}} = 2,00 \text{ m}$$

$$\text{Angenommen: } h_{\text{zerstört}} = 1,36 \text{ m}$$

$$l_a = h_{\text{zerstört}} + l_{\text{Haft}} = 2,00 + 1,36 = 3,36 \Rightarrow 3,40 \text{ m}$$

7.3.3.2 Ermittlung des Abstands zwischen den Ankern

$$a = \min \left\{ \begin{array}{l} a = l_a - \frac{k_B \cdot q}{c} \cdot (l_a + D_3) = 3,40 - \frac{0,3 \cdot 28,288}{120} \cdot (3,40 + 6,8) = 2,68 \text{ m} \\ a = \frac{l_a}{3} \cdot \sqrt{\frac{c}{q}} \quad \text{für } q > \frac{4}{9} \cdot \gamma_{\text{Fels}} \cdot l_a \\ a = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{c \cdot l_a}{\gamma_{\text{Fels}}}} \quad \text{für } q \leq \frac{4}{9} \cdot \gamma_{\text{Fels}} \cdot l_a \\ a = \sqrt{\frac{N_a}{\gamma_{\text{Fels}} \cdot h_{\text{zerstört}}}} = \sqrt{\frac{80}{26 \cdot 1,36}} = 1,50 \text{ m} \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} \\ \\ \frac{4}{9} \cdot 26 \cdot 3,40 = 38,83 > q \Rightarrow a = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{120 \cdot 3,40}{26}} = 1,98 \text{ m} \end{array} \right\}$$

$k_a = 0,3$ für kreisförmigen Querschnitt

$c = 0,03 \cdot f = 0,03 \cdot 4 = 0,12 \text{ MPa} = 120,0 \text{ kN/m}^2$ – Reibungsbeiwert des Felses

N_a – Tragfähigkeit des Ankers

$N_a = (60 \div 80) \text{ kN}$ für Schlitzkeilanker

$N_a = (80 \div 100) \text{ kN}$ für Kunstharzklebeanker

Angenommen: $a=1,50 \text{ m}$

7.3.3.3 Ermittlung der Anzahl der Anker

$$n_{\text{Anker}} = \frac{L}{a} = \frac{\pi \cdot D_3}{2 \cdot a} = \frac{3,14 \cdot 6,8}{2 \cdot 1,50} = 7,12$$

a – Abstand zwischen den Ankern

Angenommen: $n=8$

7.3.3.4 Ermittlung des Ankerdurchmessers

$d_a = N16 \div N25$ für Kunstharzklebeanker

Angenommen $d_a = 25 \text{ mm}$

$d_{\text{Loch}} = d_a + (15 \div 20) = 25 + 20 = 45 \text{ mm} = 0,045 \text{ m}$

**7.3.3.5 Ermittlung der Dicke des bewehrten Spritzbetons**

$$d_{sb} = \frac{-F_s \cdot R_s + \sqrt{(F_s \cdot R_s)^2 + (0,0464 \cdot \gamma_{Fels} \cdot a^3 \cdot l^2 \cdot R_{sb}) / f_v}}{0,333 \cdot R_{sb} \cdot l} \quad [\text{cm}]$$

$f_v = 4,4$ – Verbesserter Festigkeitsbeiwert.
abgelesen von [3] "Unterirdische Wassekraftanlagen"
Univ.Pr of.Dipl. – Ing. Ljubomir Georgiev – Tabelle 319.

$l = 2,0\text{m}$ – Vortriebslänge

$R_{sb} = 370,0 \cdot [10^5 \text{N/m}^2]$ – Druckfestigkeit des Spritzbetons $[10^5 \text{N/m}^2]$
abgelesen von [3] "Unterirdische Wassekraftanlagen"
Univ.Pr of.Dipl. – Ing. Ljubomir Georgiev – Tabelle 320.

$\gamma_{Fels} = 0,026 \cdot [\text{N/cm}^3]$ – Wichte des Felses $[\text{N/cm}^3]$

$a = 150 \text{ cm}$ – Abstand zwischen den Ankern $[\text{cm}]$

$R_s = 5500 \cdot [10^5 \text{N/m}^2]$ – Zugfestigkeit des Stahls BSt500S – DIN 488 $[10^5 \text{N/m}^2]$

$F_s = 2,83 \text{ cm}^2$ – Querschnittsfläche des Stahls BSt500S – DIN 488 $\phi 6 \quad 10/10$

$$d_{sb} = \frac{-2,83 \cdot 5500 + \sqrt{(2,83 \cdot 5500)^2 + (0,0464 \cdot 0,026 \cdot 150^3 \cdot 2^2 \cdot 370) / 4,4}}{0,333 \cdot 370 \cdot 2} = 4,16 \text{ cm}$$

Angenommen: $d_{sb} = 5 \text{ cm}$



7.3.4 Abschnitt 4

- Abstützungs konstruktion – Gleitkeilanker und unbewehrter Spritzbeton
- $L_{\text{Abschnitt}} = 0,15 \cdot L_{\text{Druckstollen}} = 0,15 \cdot 1019,81 = 153\text{m}$
- $f = 5 \Rightarrow K_0 = 2000 \text{ N/cm}^2$
- $\varphi = \arctg(f) = 78,690^\circ$
- $\gamma_{\text{Fels}} = 24 \text{ kN/m}^3$
- $h_{\text{zerstört}} = k_a \cdot D_3 = 0,1 \cdot 6,8 = 0,68 \text{ m}$,

wobei $b = h = D_3$ – Durchmesser des Druckstollens mit angenommener Auskleidungsdicke und Spritzbetonsdicke

- $q = \beta \cdot \gamma_{\text{Fels}} \cdot h_{\text{zerstört}} = 0,8 \cdot 24 \cdot 0,68 = 13,056 \text{ [kN/m}^2\text{]}$

7.3.4.1 Ermittlung der Ankerlänge

$$l_a = h_{\text{zerstört}} + l_{\text{Haft}}$$

- Haftstrecke für Gleitkeilanker

$$l_{\text{Haft}} = \max \left\{ \begin{array}{l} l_{\text{Haft}} \geq (0,5 \div 0,7) \text{ m} \\ l_{\text{Haft}} \geq 0,25 \cdot h_{\text{zerstört}} \text{ m} = 0,25 \cdot 0,68 = 0,17 \text{ m} \end{array} \right\}$$

Angenommen $l_{\text{Haft}} = 0,7 \text{ m}$

$$l_{\text{Haft}} = 0,7 \text{ m}$$

$$\text{Angenommen: } h_{\text{zerstört}} = 0,68 \text{ m}$$

$$l_a = h_{\text{zerstört}} + l_{\text{Haft}} = 0,7 + 0,68 = 1,38 \Rightarrow 1,50\text{m}$$

7.3.4.2 Ermittlung des Abstands zwischen den Ankern

$$a = \min \left\{ \begin{array}{l} a = l_a - \frac{k_B \cdot q}{c} \cdot (l_a + D_3) = 1,50 - \frac{0,3 \cdot 13,056}{150} \cdot (1,50 + 6,8) = 1,28 \text{ m} \\ a = \frac{l_a}{3} \cdot \sqrt{\frac{c}{q}} \quad \text{für } q > \frac{4}{9} \cdot \gamma_{\text{Fels}} \cdot l_a \\ a = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{c \cdot l_a}{\gamma_{\text{ck}}}} \quad \text{für } q \leq \frac{4}{9} \cdot \gamma_{\text{Fels}} \cdot l_a \\ a = \sqrt{\frac{N_a}{\gamma_{\text{Fels}} \cdot h_{\text{zerstört}}}} = \sqrt{\frac{150}{24 \cdot 0,68}} = 2,07 \text{ m} \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} \\ \\ \frac{4}{9} \cdot 24 \cdot 1,50 = 16 > q \Rightarrow a = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{150 \cdot 1,50}{24}} = 1,53 \text{ m} \end{array} \right\}$$

$k_a = 0,3$ für kreisförmigen Querschnitt

$c = 0,03 \cdot f = 0,03 \cdot 5 = 0,15 \text{ MPa} = 150,0 \text{ kN/m}^2$ – Reibungsbeiwert des Felses

N_a – Tragfähigkeit des Ankers

$N_a = (60 \div 80) \text{ kN}$ für Schlitzkeilanker

$N_a = (80 \div 100) \text{ kN}$ für Kunstharzklebeanker

Angenommen: $a=1,30 \text{ m}$

7.3.4.3 Ermittlung der Anzahl der Anker

$$n_{\text{Anker}} = \frac{L}{a} = \frac{\pi \cdot D_3}{2 \cdot a} = \frac{3,14 \cdot 6,8}{2 \cdot 1,3} = 8,21$$

a – Abstand zwischen den Ankern

Angenommen: $n=9$

7.3.4.4 Ermittlung des Ankerdurchmessers

$$d_a = d_a \geq 2 \cdot \sqrt{\frac{N_a}{\pi \cdot R_c}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{70}{3,14 \cdot 355000}} = 0,016 \text{ für Schlitzkeilanker}$$

$N_a = (60 \div 80) \text{ kN}$ für Schlitzkeilanker

Angenommen $N_a = 70 \text{ kN}$

$R_c = 355 \text{ MPA}$ – Zugfestigkeit des Stahls A – III

Angenommen $d_a=20 \text{ mm}$

$$d_{\text{Loch}} = d_a + (15 \div 20) = 20 + 20 = 40 \text{ mm} = 0,040 \text{ m}$$



7.3.4.5 Ermittlung der Dicke des unbewehrten Spitzbetons

$$d_{sb} = 0,80 \sqrt{\frac{\gamma_{Fels} \cdot a^3}{f_v \cdot R_{sb}}} \quad [\text{cm}]$$

$f_v = 5,2$ – Verbesserter Festigkeitsbeiwert
abgelesen von [3] "Unterirdische Wasserkraftanlagen"
Univ.Pr of.Dipl. – Ing. Ljubomir Georgiev – Tabelle 319.

$l = 2,0\text{m}$ – Vortriebslänge

$R_{sb} = 360,0 \cdot 10^5 \text{N/m}^2$ – Druckfestigkeit des Spritzbetons [10^5N/m^2]
abgelesen von [3] "Unterirdische Wasserkraftanlagen"
Univ.Pr of.Dipl. – Ing. Ljubomir Georgiev – Tabelle 320.

$a = 130 \text{cm}$ – Abstand zwischen den Ankern [cm]

$$d_{sb} = 0,80 \sqrt{\frac{240 \cdot 130^3}{5,2 \cdot 360 \cdot 10^5}} = 4,25\text{cm}$$

Angenommen: $d_{sb} = 5 \text{cm}$



7.3.5 Abschnitt 5

- Abstützungskonstruktion – bewehrten Spritzbeton
- $L_{\text{Abschnitt}} = 0,10 \cdot L_{\text{Druckstollen}} = 0,10 \cdot 1019,81 = 102\text{m}$
- $f = 8 \Rightarrow K_0 = 4000 \text{ N/cm}^2$
- $\varphi = \arctg(f) = 82,875^\circ$
- $\gamma_{\text{Fels}} = 25 \text{ kN/m}^3$
- $h_{\text{zerstört}} = k_a \cdot D_3 = 0,1 \cdot 6,8 = 0,68 \text{ m}$,

wobei $b = h = D_3$ – Durchmesser des Druckstollens mit angenommener Auskleidungsdicke und Spritzbetonsdicke

- $q = \beta \cdot \gamma_{\text{Fels}} \cdot h_{\text{zerstört}} = 0,8 \cdot 25 \cdot 0,68 = 13,6 \text{ [kN/m}^2\text{]}$

7.3.5.1 Ermittlung der Dicke des bewehrten Spritzbetons

$$d_{\text{sb}} = \frac{-F_s \cdot R_s + \sqrt{(F_s \cdot R_s)^2 + (160 \cdot \gamma_{\text{Fels}} \cdot a^3 \cdot R_{\text{sb}}) / f}}{33,3 \cdot R_{\text{sb}}} \text{ [cm]}$$

$f = 8$

– Festigkeitsbeiwert.

$R_{\text{sb}} = 400 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$

– Druckfestigkeit des Spritzbetons [10^5 N/m^2]

abgelesen von [3] "Unterirdische Wassekraftanlagen"
 Univ.Prof.Dipl. – Ing. Ljubomir Georgiev – Tabelle 319.

$\gamma_{\text{Fels}} = 25 \text{ kN/m}^3$

– Wichte des Felses [kN/m^3]

$a = D_3 = 680 \text{ cm}$

– Durchmesser des Druckstollens

$R_s = 5500 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$

– Zugfestigkeit des Stahls [10^5 N/m^2]

abgelesen von [3] "Unterirdische Wassekraftanlagen"
 Univ.Prof.Dipl. – Ing. Ljubomir Georgiev – Tabelle 320.

$F_s = 2,83 \text{ cm}$

– Querschnittsfläche des Stahls BSt500S – DIN 488 $\phi 6$ 10/10

$$d_{\text{sb}} = \frac{-2,83 \cdot 5500 \cdot 10^5 + \sqrt{(2,83 \cdot 5500 \cdot 10^5)^2 + (160 \cdot 25 \cdot 10 \cdot 680^3 \cdot 400 \cdot 10^6) / 8}}{33,3 \cdot 400 \cdot 10^5} = 1,05 \text{ cm}$$

Angenommen: $d_{\text{sb}} = 5 \text{ cm}$



7.3.6 Abschnitt 6

Der Abschnitt ist ähnlich den Abschnitt 3 und deshalb ist die Bemessung des Schnittes wie im Punkt 7.3.3.

7.3.7 Abschnitt 7

Der Abschnitt ist ähnlich den Abschnitt 2 und deshalb ist die Bemessung des Schnittes wie im Punkt 7.3.2.

7.3.8 Abschnitt 8

Der Abschnitt ist ähnlich den Abschnitt 2 und deshalb ist die Bemessung des Schnittes wie im Punkt 7.3.2.



7.4 Zusammenfassung der genutzten Ankerkonstruktionen

Tab. 7-2 Zusammenfassung der genutzten Ankerkonstruktionen

Abschnitt		1	2	3	4	5	6	7	8
L	m	51	102	153	153	102	204	153	102
RMR	-	25	35	50	65	75	50	40	35
f	-	2	3	4	5	8	4	3	3
Ko	N/cm ³	800	1000	1600	2000	4000	1600	1000	1000
φ	°	63,435	71,565	75,964	78,690	82,875	75,964	71,565	71,565
γ _{fels}	kN/cm ³	24,0	25,0	26,0	24,0	25,0	26,0	25,0	25,0
h _{zerstört}	m	2,58	1,58	1,36	0,68	0,68	1,36	1,58	1,58
q	kN/m ²	49,54	31	28,288	13,056	13,6	28,288	31	31
e	kN/m ²	8,024	3,325	0	0	0	0	3,325	3,325
l _a	m	4,60	3,60	3,40	1,50		3,40	3,60	3,60
a	m	1,15	1,40	1,50	1,30		1,50	1,40	1,40
n _{Anker}	-	10+2	8+2	8	9		8	8+2	8+2
d _a	m	0,025	0,025	0,025	0,020		0,025	0,025	0,025
d _{Loch}	m	0,045	0,045	0,045	0,040		0,045	0,045	0,045
dsb	cm	15	15	5	5		5	5	15



8 Auswahl und Bemessung der Auskleidung

Die Hauptlast für die Auskleidung des Druckstollens ist die Innendruckbelastung, die von der unterirdischen Konstruktion zusammen mit dem Fels übernommen sein soll. Je größer der Anteil des Felses ist desto kleiner sind die Abmessungen der Auskleidung. Die Verteilung der Innendruckbelastung zwischen den beiden Elementen hängt vorwiegend von der Tragfähigkeit des Felses und der unterirdischen Konstruktion.

Die Innendruckbelastung verursacht tangentielle Zugspannungen in der Auskleidung, deren Größe von der Tragfähigkeit des Felses abhängig ist. Je tragfähiger der Fels ist, desto kleiner sind die Zugspannungen. Die Werkstoffe für die Auskleidung sind meistens Stahlbeton und Beton, der sich mit einer kleinen Zugfestigkeit charakterisiert, deswegen kann in der Praxis sehr selten ein ungerissener Druckstollen beobachtet werden. Für diesen Druckstollen wird eine Auskleidungskonstruktion von Stahlbeton gewählt, die unbedingt in Schalung ausgeführt sein soll. Mit der Schalungsnutzung werden die Rauheit des Druckstollens, resp. die Verluste vermindert. Damit die notwendige Dichtigkeit des Druckstollens gewährleistet wird, sollen möglichst wenige Arbeitsfugen, besonders Längsfugen, ausgeführt werden. Wenn sie nicht gut verdichtet werden, entsteht Gefahr von Filtration aufgrund des Innenwasserdrucks. Für eine gute Verdichtung soll zuerst die Sohle und danach die Firste betoniert werden.

Die Stahlbetonauskleidung wird mit Zug- und Druckbewehrung ausgeführt. Der große Durchmesser des Druckstollens verursacht manchmal Probleme für die Bauverfahrenstechnik, weil die Bewehrungsstäbe miteinander verschweißt werden sollen. Ein anderer Nachteil besteht darin, dass wegen der kleineren Tragfähigkeit des Betons die große Zugfähigkeit des Stahls nicht vollständig genutzt wird. Sie vergrößert aber den Rissbildungswiderstand der Auskleidung, wobei gleichmäßigere Rissverteilung und Verminderung der Rissbreite gewährleistet werden.

Die Stahlbetonauskleidung wird als dickwandiges Rohr bemessen.

8.1 Abschnitt 1

- $L_{\text{Abschnitt}} = 0,05 \cdot L_{\text{Druckstollen}} = 0,05 \cdot 1019,81 = 51 \text{ m}$
- $f = 2 \Rightarrow K_0 = 800 \text{ N/cm}^2$
- $\varphi = \arctg(f) = 63,435^\circ$
- $\gamma_{\text{Fels}} = 24 \text{ kN/m}^3$

8.1.1 Minimale Dicke der ungerissenen Auskleidung

- $r_1 = \frac{D_{\text{Druckstollen}}}{2} = \frac{6,10}{2} = 3,05 \text{ [m]}$ – Innendurchmesser des Druckstollens
- $p = \gamma_{\text{Wasser}} \cdot H_{\text{WS}} = \frac{10 \cdot 50,38}{1000} = 0,5038 \text{ [MPa]}$ – Außenwasserdruck

wobei:

$\gamma_{\text{Wasser}} = 10 \text{ [kN/m}^3\text{]}$ – Wichte des Wassers

$H_{\text{WS}} = 50,38 \text{ m}$ – Wasserspiegel beim höchsten Schwallspiegel der Wasserschlossschwungung

8.1.1.1 Notwendige Dicke der Auskleidung :

$$d_{\text{Auskleidung}} = r_1 \cdot \left(\frac{p}{\gamma_c \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}}} - \frac{K_0}{0,70 \cdot E_{\text{Beton}}} \right) = 3,05 \cdot \left(\frac{0,5038}{1,1 \cdot 2} - \frac{800}{0,70 \cdot 32500} \right) = 1,17 \text{ [m]},$$

wobei

$\gamma_c = 1$ – Arbeitsbedingunsbeiwert abgelesen von folgender Tabelle :

γ_c	Grenzzustand		
	Erster	Zweiter	
Beton	1	Ko > 2000, [N/cm ³]	0,9
		Ko < 2000, [N/cm ³]	0,75
Stahlbeton	1,1	Ko > 2000, [N/cm ³]	1,3
		Ko < 2000, [N/cm ³]	1,15

$$R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = 1,2 \text{ [MPa]} \quad \text{– Zugfestigkeit des Betons B30}$$

$$E_{\text{Beton}} = 32500 \text{ [MPa]} \quad \text{– Elastizitätsmodul des Betons B 30}$$

$$d_{\text{Auskl.}}^{\text{max}} = 0,15 \cdot r_1 = 0,15 \cdot 3,05 = 0,4575 \text{ cm}$$

$$d_{\text{Auskleidung}} > d_{\text{Auskleidung}}^{\text{max}} \Rightarrow \text{andere Auskleidungskonstruktion ist notwendig}$$

8.1.1.2 Minimale Dicke der ungerissenen Stahlbetonauskleidung

- Äquivalenter Elastizitätsmodul des Stahlbetons :

$$E_{\text{Äquiv}} = E_{\text{Beton}} \cdot \left(1 + \mu_{\text{max}} \cdot \left(\frac{E_{\text{Stahl}}}{E_{\text{Beton}}} - 1 \right) \right) = 32500 \cdot \left(1 + 0,02 \cdot \left(\frac{2,1 \cdot 10^5}{32500} - 1 \right) \right) = \\ = 36050 \text{ [MPa]}, \text{ wobei :}$$

$$\mu_{\text{max}} = 0,02 \quad \text{– Maximaler Bewehrungsanteil für} \\ \text{ungerissene Auskleidung}$$

$$E_{\text{Stahl}} = 210000 \text{ [MPa]} \quad \text{– Elastizitätsmodul des Stahls}$$

$$\gamma_c = 1,1 \quad \text{– Abgelesen von Tabelle}$$

$$d_{\text{Auskleidung}} = \frac{r_1}{1 + 30 \cdot \frac{\mu_{\text{max}}}{R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}}}} \cdot \left(\frac{p}{\gamma_c \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}}} - \frac{K_0}{E_{\text{Äquiv}}} \right) = \frac{3,05}{1 + 30 \cdot \frac{0,02}{1,2}} \cdot \left(\frac{0,5038}{1,1 \cdot 1,2} - \frac{800}{36050} \right) = 0,73 \text{ [m]}$$

$$d_{\text{Auskleidung}} > d_{\text{Auskleidung}}^{\text{max}} \Rightarrow \text{angenommen : } d_{\text{Auskleidung}} = 30 \text{ cm - gerissene Auskleidung}$$

$$h_{\text{notwendig}} = \frac{K_0 \cdot r_1 \cdot \gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}}}{r_2 \cdot \rho \cdot g \cdot \gamma_n \cdot E_{\text{Stahl}}} = \frac{800 \cdot 305 \cdot 1,1 \cdot 390}{335 \cdot 0,0024 \cdot 9,81 \cdot 1,25 \cdot 210000} = 50,56 \text{ [m]}, \quad \text{wobei -}$$

$$r_1 = 3,05 \text{ [m]} = 305 \text{ [cm]} \quad \text{– Innendurchmesser}$$

$$r_2 = r_1 + d_{\text{Auskleidung}} = 3,05 + 0,30 = 3,35 \text{ [m]} = 335 \text{ [cm]}$$

$$\gamma_c = 1,1 \quad \text{– Abgelesen von Tabelle}$$

$$R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}} = 390 \text{ [MPa]} \quad \text{– Zugfestigkeit des Stahls AIII}$$

$$\rho = 0,0024 \text{ [kg/cm}^3\text{]} \quad \text{– Dichte des Felses}$$

$$\gamma_n = 1,25 \quad \text{– Abgelesen von folgender Tabelle :}$$

Klasse der Anlage	γ_n
I	1,25
II	1,2
III	1,15
IV	1,1

$$H_{\text{Überlagerungshöhe}} = 56,41 \text{ m} > h_{\text{notwendig}}$$

$$F_a = \frac{\gamma_n \cdot p \cdot r_1}{\gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}}} - \frac{K_0 \cdot r_1}{E_{\text{Stahl}}} = \frac{1,25 \cdot 0,5038 \cdot 3,05}{1,1 \cdot 390} - \frac{800 \cdot 3,05}{210000} = -0,00714 \text{ [cm}^2 \text{ / cm]}$$

- $\mu_{\text{MH}} = 0,5\% = 0,005$

8.1.1.3 Wirkende Lasten

- Die folgenden Sicherheitsbeiwerte werden benutzt: γ_f :

γ_f		Periode	
		Bauzeit	Betriebszeit
Vertikaler Gebirgsdruck		1,5	1,5
Horizontaler Gebirgsdruck		1,2	0,8
Eigengewicht		1,2	0,9
Innenwasserdruck		1	1
Außenwasserdruck		1,1	0,9
Seismisch	Vertikaler	1	1
	Horizontaler	1	1
	Eigengewicht	1	1
	Außenwasserdruck	1	1

8.1.1.3.1 Bauzeit

- Vertikaler Gebirgsdruck

$$q = \gamma \cdot h_{\text{zerstört}} \cdot \beta = 24 \cdot 2,58 \cdot 0,8 = 49,54 \text{ [kN/m]}$$

$$\gamma_f = 1,5$$

$$q_{\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot q = 1,5 \cdot 49,54 = 74,31 \text{ [kN/m]}$$

- Horizontaler Gebirgsdruck

$$e = \gamma \cdot (h_{\text{zerstört}} + 0,5 \cdot D_3) \cdot \text{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) = 24 \cdot (2,58 + 0,5 \cdot 7,0) \cdot \text{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{63,435^\circ}{2} \right) = 8,024 \text{ [kN/m]}$$

$$\gamma_f = 1,2$$

$$e_{\text{Berechnung}} = e \cdot \gamma_f = 8,024 \cdot 1,2 = 9,63 \text{ [kN/m]}$$

- Eigengewicht

$$\gamma_{\text{Beton}} = 24 \text{ [kN/m}^3\text{]} - \text{Wichte des Betons}$$

$$g = d_{\text{Auskleidung}} \cdot \gamma_{\text{stahlbeton}} = 0,3 \cdot 24 = 7,2 \text{ [kN/m]}$$

$$\gamma_f = 1,2$$

$$g_{\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot g = 1,2 \cdot 7,2 = 8,64 \text{ [kN/m]}$$

- Außenwasserdruck

$$H_{\text{WS}} = H_{\text{Überstau}} = 48 \text{ [m]} - \text{Wassergesättigtes Gebirge unter dem Speicher}$$

$$p_e = \gamma_{\text{wasser}} \cdot H_{\text{WS}} = \frac{10 \cdot 48}{1000} = 0,48 \text{ [MPa]}$$

$$\gamma_f = 1,1$$

$$p_{e,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot p_e = 1,1 \cdot 0,48 = 0,528 \text{ [MPa]}$$



- **Seismische Lasten**
- **Vertikaler Gebirgsdruck - seismisch**

$C = 1,5$ – Beiwert für die Klasse der Anlage
für I^{-ste} Klasse = 1,5

$K_s = 0,1$ – Seismischer Beiwert – abgelesen von [2]
Tabelle.22 – "Wasserbautunnel" – Univ.Prof.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989.

$K_h = 0,7$ – Überlagerungshöhebeiwert – abgelesen von [2]
Tabelle.23 – "Wasserbautunnel" – Univ.Prof.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989

$H_{\text{Überlagerung}} = 56,41 \text{ m}$

$R = 0,60$ – Verhaltensbeiwert

$K'_s = R \cdot C \cdot K_s \cdot K_h = 0,6 \cdot 1,5 \cdot 0,1 \cdot 0,7 = 0,063$

$q_s = q \cdot K'_s = 49,54 \cdot 0,063 = 3,12 \text{ [kN/m]}$

$\gamma_f = 1$

$q_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot q_s = 1 \cdot 3,12 = 3,12 \text{ [kN/m]}$

- **Horizontaler Gebirgsdruck - seismisch**

$\varphi = 63,435^\circ$ – Reibungswinkel

$e_s = 2 \cdot K'_s \cdot e \cdot \text{tg}(\varphi) = 2 \cdot 0,063 \cdot 8,024 \cdot \text{tg}(63,435^\circ) = 2,022 \text{ [kN/m]}$

$\gamma_f = 1$

$e_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot e_s = 1 \cdot 2,022 = 2,022 \text{ [kN/m]}$

- **Eigengewicht- seismisch**

$g_s = g \cdot K'_s = 7,2 \cdot 0,063 = 0,454 \text{ [kN/m]}$

$\gamma_f = 1$

$g_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot g_s = 1 \cdot 0,454 = 0,454 \text{ [kN/m]}$



8.1.1.3.2 Betriebszeit

- Vertikaler Gebirgsdruck

$$q = \gamma \cdot h_{\text{zerstört}} \cdot \beta = 24 \cdot 2,58 \cdot 0,8 = 49,54 \text{ [kN/m]}$$

$$\gamma_f = 1,5$$

$$q_{\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot q = 1,5 \cdot 49,54 = 74,31 \text{ [kN/m]}$$

- Horizontaler Gebirgsdruck

$$e = \gamma \cdot (h_{\text{zerstört}} + 0,5 \cdot D_3) \cdot \text{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) = 24 \cdot (2,58 + 0,5 \cdot 7,0) \cdot \text{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{63,435^\circ}{2} \right) = 8,024 \text{ [kN/m]}$$

$$\gamma_f = 0,8$$

$$e_{\text{Berechnung}} = e \cdot \gamma_f = 8,024 \cdot 0,8 = 6,42 \text{ [kN/m]}$$

- Eigengewicht

$$\gamma_{\text{Beton}} = 24 \text{ [kN/m}^3\text{]} \text{ – Wichte des Betons}$$

$$g = d_{\text{Auskleidung}} \cdot \gamma_{\text{Stahlbeton}} = 0,3 \cdot 24 = 7,2 \text{ [kN/m]}$$

$$\gamma_f = 0,9$$

$$g_{\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot g = 0,9 \cdot 7,2 = 6,48 \text{ [kN/m]}$$

- Außenwasserdruck

$$H_{\text{WS}} = H_{\text{Überlagerung}}^{\text{Druckstollen}} = 48 \text{ [m]}$$

$$p_e = \gamma_{\text{Wasser}} \cdot H_{\text{WS}} = \frac{10 \cdot 48}{1000} = 0,48 \text{ [MPa]}$$

$$\gamma_f = 0,9$$

$$p_{e,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot p_e = 0,9 \cdot 0,48 = 0,432 \text{ [MPa]}$$

- Innenwasserdruck

$$p_i \equiv p = 0,5038 \text{ [MPa]}$$

$$\gamma_f = 1$$

$$p_{i,\text{Berechnung}} \equiv \gamma_f \cdot p_i = 1 \cdot 0,5038 = 0,5038 \text{ [MPa]}$$



- **Seismische Lasten**
- **Vertikaler Gebirgsdruck - seismisch**

$C = 1,5$ – Beiwert für die Klasse der Anlage
für I^{ste} Klasse = 1,5

$K_s = 0,1$ – Seismischer Beiwert – abgelesen von [2]
Tabelle.22 – "Wasserbautunnel" – Univ.Pr of.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989.

$K_h = 0,7$ – Überlagerungshöhebeiwert – abgelesen von [2]
Tabelle.23 – "Wasserbautunnel" – Univ.Pr of.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989

$$H_{\text{Überlagerung}} = 56,41 \text{ m}$$

$R = 0,60$ – Verhaltensbeiwert

$$K'_s = R \cdot c \cdot K_s \cdot K_h = 0,6 \cdot 1,5 \cdot 0,1 \cdot 0,7 = 0,063$$

$$q_s = q \cdot K'_s = 49,54 \cdot 0,063 = 3,12 \text{ [kN/m]}$$

$$\gamma_f = 1$$

$$q_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot q_s = 1 \cdot 3,12 = 3,12 \text{ [kN/m]}$$

- **Horizontaler Gebirgsdruck - seismisch**

$\varphi = 63,435^\circ$ – Reibungswinkel

$$e_s = 2 \cdot K'_s \cdot e \cdot \text{tg}(\varphi) = 2 \cdot 0,063 \cdot 8,024 \cdot \text{tg}(63,435^\circ) = 2,022 \text{ [kN/m]}$$

$$\gamma_f = 1$$

$$e_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot e_c = 1 \cdot 2,022 = 2,022 \text{ [kN/m]}$$

- **Eigengewicht- seismisch**

$$g_s = g \cdot K'_s = 7,2 \cdot 0,063 = 0,454 \text{ [kN/m]}$$

$$\gamma_f = 1$$

$$g_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot g_s = 1 \cdot 0,454 = 0,454 \text{ [kN/m]}$$

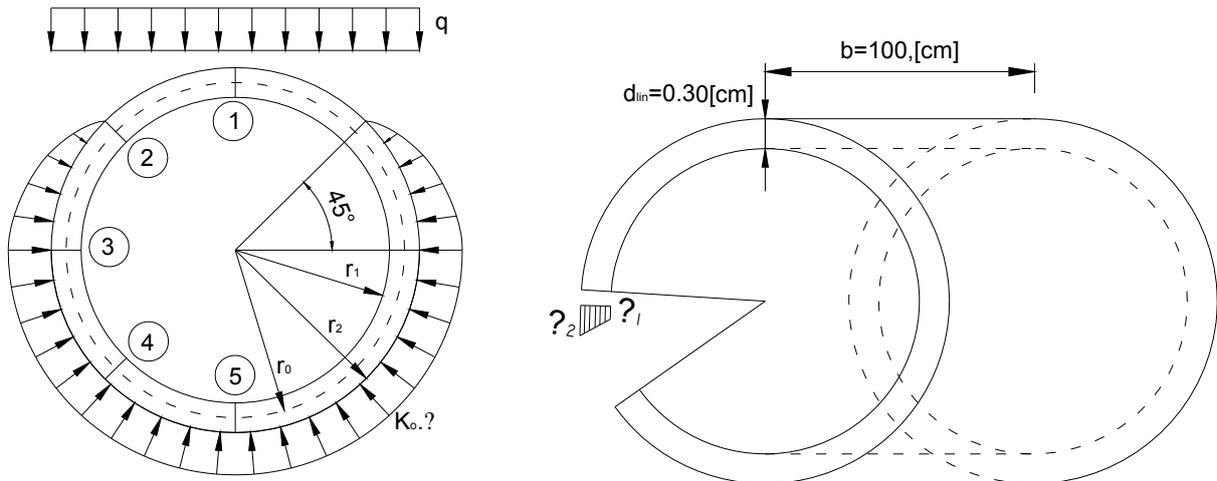
- **Innenwasserdruck- seismisch**

$$p_{i,c} = 100 \cdot K'_s = 100 \cdot 0,063 = 6,3 \text{ [kN/m]}$$

$$p_{i,s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot p_{i,s} = 1 \cdot 4,5 = 4,5 \text{ [kN/m]}$$

8.1.1.4 Berechnung der Biegemomente und der Normalkräfte

Der Querschnitt ist als kreisförmig vorgesehen. Die Biegemomente und Zugkräfte sind in 5 Punkten berechnet. Der vertikale Gebirgsdruck und das Eigengewicht sind als gleichmäßig über den Querschnittsdurchmesser verteilt. Die elastische Reaktion des Felses ist gleichmäßig über den Perimeter verteilt, wie es unten gezeigt ist.



Für die Berechnung sind die folgenden Formeln benutzt:

- Vertikale Last - q

$$M = q_{\text{Berechnung}} \cdot r_0 \cdot r_2 \cdot (A \cdot m + B + C \cdot n \cdot (1 + m)) \quad [\text{kNm}]$$

$$N = q_{\text{Berechnung}} \cdot r_2 \cdot (D \cdot m + F + G \cdot n \cdot (1 + m)) \quad [\text{kN}]$$

- Horizontale Last - e

$$M = A_4 \cdot e_{\text{Berechnung}} \cdot m \cdot r_0 \cdot r_2 \quad [\text{kNm}]$$

$$N = C_4 \cdot e_{\text{Berechnung}} \cdot r_2 \quad [\text{kN}]$$

- Eigengewicht - g

$$M = g_{\text{Berechnung}} \cdot r_0^2 \cdot (A_1 + B_1 \cdot n) \quad [\text{kNm}]$$

$$N = g_{\text{Berechnung}} \cdot r_0 \cdot (C_1 + D_1 \cdot n) \quad [\text{kN}]$$

- Außenwasserdruck - p_e



$$M = -\gamma_{\text{Wasser}} \cdot r_o \cdot r_1^2 \cdot (A_2 + B_2 \cdot n) \quad [\text{kNm}]$$

$$N = -\gamma_{\text{Wasser}} \cdot \left(r_2^2 \cdot (C_2 + D_2 \cdot n) - r_2 \cdot p_{e, \text{Berechnung}} \right) \quad [\text{kN}]$$

- Innenwasserdruck- p_i

$$M = \gamma_{\text{Wasser}} \cdot r_o \cdot r_1^2 \cdot (A_2 + B_2 \cdot n) \quad [\text{kNm}]$$

$$N = \gamma_{\text{Wasser}} \cdot r_1^2 \cdot (C_2 + D_2 \cdot n) \quad [\text{kN}]$$

Die Beiwerte m und n sind:

$$m = 2 - \frac{r_2}{r_o} = 2 - \frac{3,35}{3,20} = 0,953$$

$$n = \frac{1}{0,06416 + \frac{E_{\text{Beton}} \cdot I}{r_o^3 \cdot r_2 \cdot K \cdot b}} = \frac{1}{0,06416 + \frac{3250000 \cdot 225000}{3,2^3 \cdot 3,35 \cdot 238,8 \cdot 100}} = 14,94 \quad , \text{ wobei:}$$

$$E_{\text{Beton}} = 3250000 \quad [\text{N/cm}^2]$$

$$I = \frac{b \cdot d_{\text{lin}}^3}{12} = \frac{100 \cdot (0,30 \cdot 100)^3}{12} = 225000 \quad [\text{cm}^4]$$

$$b = 100 \quad [\text{cm}]$$

$$K = \frac{K_0}{r_2} = \frac{800}{3,35} = 238,8 \quad [\text{N/cm}^3]$$

$$r_o = r_1 + \frac{d_{\text{Auskleidung}}}{2} = 3,05 + \frac{0,30}{2} = 3,20 \quad [\text{m}]$$

$$r_2 = 3,35 \quad [\text{m}] \quad - \text{Außendurchmesser der Auskleidung}$$

$$r_1 = 3,05 \quad [\text{m}] \quad - \text{Innendurchmesser der Auskleidung}$$



Die Berechnung ist aufgrund der Theorie von Olga Bulgaeva durchgeführt, wobei die folgenden Beiwerte benutzt werden: A, B, C, D, F, G, A₁, B₁, C₁, D₁, A₂, B₂, C₂, D₂, A₄, и C₄:

Last	Beiwert	Schnitt				
		1	2	3	4	5
q	A	0,1628	-0,025	-0,125	0,025	0,0872
	B	0,0872	0,025	-0,125	-0,025	0,1628
	C	-0,007	-0,00084	0,00825	0,00022	-0,00837
	D	0,2122	0,15	0	-0,15	-0,2122
	F	-0,2122	0,35	1	0,9	0,7122
	G	0,021	0,01485	0,00575	0,0138	0,0224
g	A ₁	0,3447	0,0334	-0,3928	-0,0335	0,4405
	B ₁	-0,02198	-0,00267	0,02589	0,00067	-0,0262
	C ₁	-0,1667	0,3375	1,5708	1,9186	1,7375
	D ₁	0,06592	0,04661	0,01804	0,0422	0,0701
p _i и p _e	A ₂	0,1724	0,01673	-0,19638	-0,01679	0,22027
	B ₂	-0,01097	-0,00132	0,01294	0,00036	-0,01312
	C ₂	-0,58385	-0,42771	-0,2146	-0,39413	-0,63125
	D ₂	0,03294	0,02329	0,00903	0,02161	0,03509
e	A ₄	-0,25	0	0,25	0	-0,25
	C ₄	1	0,5	0	0,5	1

Für die Bemessung der seismischen Lasten werden dieselben Formeln und Beiwerte benutzt.

8.1.1.5 Berechnung der Spannungen

$$\sigma_{1,2} = \frac{N}{F} \mp \frac{M}{W} \text{ [kPa] , wobei}$$

$$F = b \cdot d_{\text{Auskleidung}} = 1,0 \cdot 30 = 0,30 \text{ [m}^2\text{]} - \text{Fläche der Auskleidung für 1 m des Druckstollens}$$

$$W = \frac{b \cdot d_{\text{Auskleidung}}^2}{6} = \frac{1,0 \cdot 30^2}{6} = 0,0150 \text{ [m}^3\text{]}$$

Während der Betriebszeit (maximaler Innenwasserdruck) sind die Spannungen für alle Punkten des Querschnitts gleich:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (2 \cdot \varepsilon \cdot r_2^2 - (r_1^2 + r_2^2))}{r_2^2 - r_1^2} = \frac{0,5038 \cdot 10^3 \cdot (2 \cdot 0,1 \cdot 3,35^2 - (3,05^2 + 3,35^2))}{3,35^2 - 3,05^2} = -4797 \text{ [kPa]}$$

$$\sigma_2 = \frac{p \cdot (\varepsilon \cdot (r_1^2 + r_2^2) - 2 \cdot r_1^2)}{r_2^2 - r_1^2} = \frac{0,5038 \cdot 10^3 \cdot (0,1 \cdot (3,05^2 + 3,35^2) - 2 \cdot 3,05^2)}{3,35^2 - 3,05^2} = -4343 \text{ kPa}$$

$\varepsilon = 0,1$ – abgelesen von [2] Tabelle.99 –

"Wasserbautunnel" – Univ. Prof. Dipl. Ing – Ljubomir Georgiev 1989

$$a = \frac{r_2}{r_1} = \frac{3,35}{3,05} = 1,10$$

$$c = \frac{E_{\text{Äquiv}} \cdot (1 + \nu_{\text{Fels}})}{E_{\text{Fels}} \cdot (1 + \nu_{\text{Äquiv}})} = \frac{32509 \cdot (1 + 0,28)}{1024 \cdot (1 + 0,20)} = 33,9$$

$$E_{\text{Äquiv}} = E_{\text{Beton}} \cdot \left(1 + \mu_{\text{min}} \cdot \left(\frac{E_{\text{Stahl}}}{E_{\text{Beton}}} - 1 \right) \right) = 32500 \cdot \left(1 + 0,005 \cdot \left(\frac{21 \cdot 10^4}{32500} - 1 \right) \right) = 32509 \text{ MPa}$$

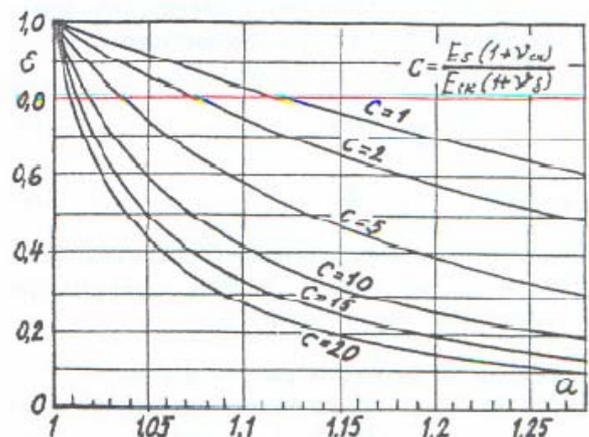
$$\nu_{\text{Äquiv}} = \nu_{\text{Beton}} \cdot \left(1 + \mu_{\text{min}} \cdot \left(\frac{\nu_{\text{Stahl}}}{\nu_{\text{Beton}}} - 1 \right) \right) = 0,2 \cdot \left(1 + 0,005 \cdot \left(\frac{0,3}{0,2} - 1 \right) \right) = 0,20$$

$$E_{\text{Fels}} = K_0 \cdot (1 + \nu_{\text{Fels}}) = 800 \cdot (1 + 0,28) = 1024 \text{ [MPa]}$$

$\nu_{\text{Fels}} = 0,28$ – Poissonzahl für Fels

$\nu_{\text{Beton}} = 0,2$ – Poissonzahl für Beton

$\nu_{\text{Stahl}} = 0,3$ – Poissonzahl für Stahl



8.1.1.6 Zulässige Spannungen

8.1.1.6.1 Bauzeit

$$\sigma_{1,2} \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug(Druck)}}, \text{ wobei } \gamma_c \text{ und } \gamma_n \text{ von oben abgelesen werden}$$

γ_m – Belastungsbeiwert :

γ_m	Periode	
	Bauzeit	Betriebszeit
übliche	0,95	1
besondere	0,95	0,9

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = \frac{1}{1,25 \cdot 0,95} \cdot 1,2 = 1,01 \text{ [MPa]}$$

$$R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = 1,2 \text{ [MPa]} - \text{Zugfestigkeit des Betons B30}$$

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Druck}} = \frac{1}{1,25 \cdot 0,95} \cdot 17 = 14,32 \text{ [MPa]}$$

$$R_{\text{Beton}}^{\text{Druck}} = 17 \text{ [MPa]} - \text{Druckfestigkeit des Betons B30}$$

8.1.1.6.2 Betriebszeit

- Übliche Lasten

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = \frac{1}{1,25 \cdot 1} \cdot 1,2 = 0,96 \text{ [MPa]}$$

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Druck}} = \frac{1}{1,25 \cdot 1} \cdot 17 = 13,60 \text{ [MPa]}$$

- Besondere Lasten

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = \frac{1,2}{1,25 \cdot 0,9} \cdot 1,2 = 1,28 \text{ [MPa]}$$

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Druck}} = \frac{1,2}{1,25 \cdot 0,9} \cdot 17 = 18,13 \text{ [MPa]}$$



Die maximalen Druckspannungen in der Auskleidung sind kleiner als die zulässigen Spannungen. Wenn aber das Gebirge trocken ist und es keinen Außenwasserdruck $p_e = 0$ gibt, dann werden die Zugspannungen größer und es ist eine zusätzliche Bewehrung des Querschnitts erforderlich.

Für diesen Abschnitt ist eine Verminderung des Außenwasserdrucks bei 50% angenommen, weil der Abschnitt unmittelbar unter dem Speicher positioniert ist und ein trockenes Gebirge kaum möglich ist. Damit die Situation der Realität entspricht, sind die Berechnungen mit einem Außenwasserdruck von 50% durchgeführt.



Tab. 8-1 Biegemomente und Normalkräfte während der Bauzeit

Tabelle	Q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		g _{Berechnung}		p _{e, Berechnung}		q _{s, Berechnung}		e _{s, Berechnung}		g _{s, Berechnung}		
	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	
	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	
Schnitt	1	29.45	145.37	-24.19	31.72	1.45	22.61	-2.54	1779.11	1.24	6.11	-5.08	6.66	0.08	1.19
	2	-18.01	223.40	0.00	15.86	-0.57	28.58	0.89	1777.76	-0.76	9.38	0.00	3.33	-0.03	1.50
	3	-2.67	281.66	24.19	0.00	-0.54	50.88	0.92	1777.75	-0.11	11.83	5.08	0.00	-0.03	2.67
	4	4.05	279.70	0.00	15.86	-2.08	70.47	3.40	1776.81	0.17	11.75	0.00	3.33	-0.11	3.70
	5	1.34	280.62	-24.19	31.72	4.35	76.99	-7.23	1780.82	0.06	11.79	-5.08	6.66	0.23	4.04

Tab. 8-2 Spannungen während der Bauzeit

Tabelle	q _{Ber}		e _{Ber}		g _{Ber}		p _{eBer}		q _{s, Bere}		E _{s, Ber}		g _{s, Bere}		q _{ber} +e _{ber} +g _{ber} +p _{eber}		Σ(X _{i, ber})+Σ(X _{i, ber})		
	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	
	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
Schnitt	1	-1479	2448	1718	-1507	-21	172	6100	5761	-62	103	361	-316	-1	9	6318	6874	6616	6669
	2	1945	-456	53	53	133	57	5867	5985	82	-19	11	11	7	3	7998	5639	8098	5634
	3	1117	761	-1613	1613	206	134	5864	5987	47	32	-339	339	11	7	5574	8494	5293	8872
	4	662	1202	53	53	373	96	5696	6149	28	50	11	11	20	5	6785	7501	6843	7567
	5	846	1025	1718	-1507	-33	547	6418	5454	36	43	361	-316	-2	29	8949	5518	9344	5274



Tab. 8-3 Biegemomente und Normalkräfte während der Betriebszeit

Tabelle	Q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		g _{Berechnung}		p _{e, Berechnung}		Q _{s, Berechnung}		e _{s, Berechnung}		g _{s, Berechnung}		Q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		
	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	
	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	
Schnitt	1	29.45	145.37	-16.13	21.15	1.09	16.96	-2.54	733.91	2.54	-8.54	1.24	6.11	-5.08	6.66	0.08	1.19	2.54	-8.54
	2	-18.01	223.40	0.00	10.57	-0.43	21.43	0.89	732.56	-0.89	-7.43	-0.76	9.38	0.00	3.33	-0.03	1.50	-0.89	-7.43
	3	-2.67	281.66	16.13	0.00	-0.40	38.16	0.92	732.55	-0.92	-7.42	-0.11	11.83	5.08	0.00	-0.03	2.67	-0.92	-7.42
	4	4.05	279.70	0.00	10.57	-1.56	52.85	3.40	731.61	-3.40	-6.64	0.17	11.75	0.00	3.33	-0.11	3.70	-3.40	-6.64
	5	1.34	280.62	-16.13	21.15	3.26	57.74	-7.23	735.62	7.23	-9.97	0.06	11.79	-5.08	6.66	0.23	4.04	7.23	-9.97

Tab. 8-4 Spannungen während der Betriebszeit

Таблица	Q _{Ber}		e _{Ber}		g _{Ber}		p _{e, Ber}		p _{i, Ber}		Q _{s, Ber}		e _{s, изчисл}		g _{s, Ber}		p _{i, Ber}		Q _{Ber} +e _{Ber} +g _{Ber} +p _{e, Ber}		Σ(X _{i, Ber})+Σ(X _{i,c, Ber})		p _i		Total.		
	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	
	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
Schnitt	1	-1479	2448	1146	-1005	-16	129	2616	2277	-198	141	-62	103	361	-316	-1	9	-198	141	2069	3990	2168	3927	-4797	-4343	-2728	-353
	2	1945	-456	35	35	100	43	2383	2501	35	-84	82	-19	11	11	7	3	35	-84	4498	2039	4632	1950	-4797	-4343	-299	-2304
	3	1117	761	-1075	1075	154	100	2380	2503	37	-86	47	32	-339	339	11	7	37	-86	2613	4353	2369	4644	-4797	-4343	-2183	10
	4	662	1202	35	35	280	72	2212	2665	204	-249	28	50	11	11	20	5	204	-249	3394	3726	3657	3544	-4797	-4343	-1402	-617
	5	846	1025	1146	-1005	-25	410	2934	1970	-515	449	36	43	361	-316	-2	29	-515	449	4386	2849	4265	3053	-4797	-4343	-411	-1494

8.1.2 Bemessung der Bewehrung

Die Bewehrung ist mit einem Außenwasserdruck von $p_e = 0.5p_e$ bemessen. In diesem Fall entstehen maximale Zugspannungen.

:

		übliche		besondere	
		σ_1	σ_2	σ_1	σ_2
		kPa	kPa	kPa	kPa
Schnitt	1	-2728	-353	-2629	-416
	2	-299	-2304	-165	-2393
	3	-2183	10	-2428	301
	4	-1402	-617	-1140	-799
	5	-411	-1494	-532	-1290

- Maximale Spannungen:

$$\sigma_1 = -2728 \text{ [kPa]} \quad \sigma_2 = -353 \text{ [kPa]}$$

Es gibt drei Möglichkeiten für die Position der Normalkraft:

8.1.2.1 Zentrischer Zug

Für die maximale Spannung $\sigma_1 = -2728 \text{ [kPa]}$ wird die Resultierende berechnet:

$$F_{\text{Auskleidung}} = d_{\text{Auskleidung}} \cdot b = 0,3 \cdot 100 \cdot 1.300 = 3000 \text{ [cm}^2\text{]} - \text{Fläche der Auskleidung}$$

für Länge des Druckstollens $b = 100 \text{ cm}$

- Resultierende:

$$N_{\text{Zug}} = \sigma_1 \cdot F_{\text{Auskleidung}} = 2728 \cdot 10^{-4} \cdot 3000 = 818,45 \text{ [kN]}$$

$$R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}} = 390 \text{ [MPa]} - \text{Zugfestigkeit des Stahls}$$

- Fläche der Bewehrung:

$$F_a = \frac{\gamma_m \cdot \gamma_n \cdot N_{\text{Zug}}}{\gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}}} = \frac{1,1 \cdot 1,25 \cdot 818,45}{1,1 \cdot 390 \cdot 10^3} \cdot 10^4 = 23,8 \text{ [cm}^2\text{/m]}$$

$$\gamma_c = 1,1 \quad \gamma_n = 1,25 \quad \gamma_m = 1$$



8.1.2.2 Zug mit kleiner Exzentrizität

Die Normalkraft wird zwischen der Fläche der Zug- und Druckbewehrung verteilt.

F_a und F'_a .

$a = a' = 0,05$ [m] – Betonüberdeckung

$h_o = d_{\text{Auskleidung}} - a = 0,3 - 0,05 = 0,25$ [m]

$e_o = \frac{M}{N} = \frac{17,8125}{462,15} = 0,039$ [m] – Exzentrizität der Normalkraft

Der Biegemoment M und die Normalkraft N sind durch folgende Formel berechnet:

$$\left| \begin{array}{l} \sigma_1 = \frac{N}{F} - \frac{M}{W} \\ \sigma_2 = \frac{N}{F} + \frac{M}{W} \end{array} \right. \quad \left| \begin{array}{l} -2728 = \frac{N}{0,3} - \frac{M}{0,0150} \\ -353 = \frac{N}{0,30} + \frac{M}{0,0150} \end{array} \right.$$

$M = 17,8125$ kNm $N = -426,15$ kN

- Abstand der Normalkraft N von der Druckbewehrung

$e' = 0,5 \cdot (h_o - a') - e_o = 0,5 \cdot (0,25 - 0,05) - 0,039 = 0,061$ [m]

- Abstand der Normalkraft N von der Zugbewehrung

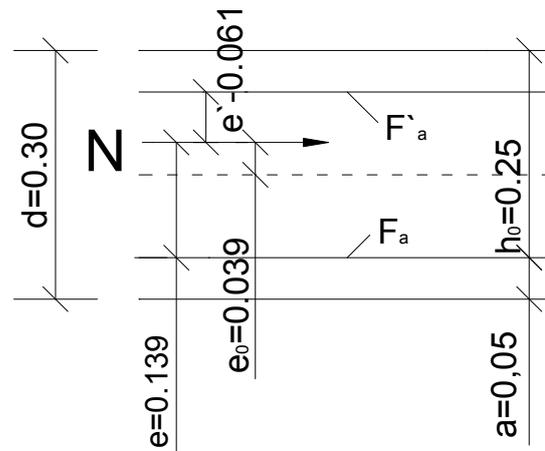
$e = 0,5 \cdot (h_o - a) + e_o = 0,5 \cdot (0,25 - 0,05) + 0,039 = 0,139$ [m]

- Fläche der Zugbewehrung .

$F_a = \frac{\gamma_m \cdot \gamma_n \cdot N \cdot e}{\gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}} \cdot (h_o - a)} = \frac{1,1 \cdot 1,25 \cdot 462,15 \cdot 0,139}{1,1 \cdot 390 \cdot 10^3 \cdot (0,25 - 0,05)} \cdot 10^{-4} = 9,33$ [cm² / m']

- Fläche der Druckbewehrung

$F'_a = \frac{\gamma_m \cdot \gamma_n \cdot N \cdot e'}{\gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Druck}} \cdot (h_o - a)} = \frac{1,1 \cdot 1,25 \cdot 462,15 \cdot 0,061}{1,1 \cdot 390 \cdot 10^3 \cdot (0,25 - 0,05)} \cdot 10^{-4} = 4,14$ [cm² / m']



8.1.2.3 Zug mit großer Exzentrizität– Das ist ein Fall, der hier nicht auftreten kann, deshalb ist er nicht berechnet.

Der massgebende Bemessungsfall trifft bei Zug mit keiner Exzentrizität auf, mit einer entsprechenden Bewehrung gleich:

$$F_a = 9,44 \text{ [cm}^2 \text{ / m]} \quad F'_a = 4,14 \text{ [cm}^2 \text{ / m]}$$

Angenommen:

- Zugbewehrung: 10 x N 12/10 cm $F=11,304 \text{ cm}^2$
- Druckbewehrung 10 x N 8 /10 cm $F=5,042 \text{ cm}^2$

$$\mu = \frac{F_a + F'_a}{F_{\text{stahl}}} = \frac{11,304 + 5,042}{3000} = \frac{16,346}{3000} = 0,0055 = 0,55\%$$

- Konstruktive Bewehrung: 2x5 N10/20 cm
- Bügel : $\Phi 8/25 \text{ cm}$

8.1.3 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

8.1.3.1 Mittlere Rissbreite

$$a = 7,7 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \eta \cdot \frac{\sigma_{\text{Stahl}} - \sigma_0}{E_{\text{Stahl}}} \cdot (4 - 100 \cdot \mu) \cdot \sqrt{d} =$$
$$= 7,7 \cdot 1,1 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot \frac{115,94 - 20}{210000} \cdot (4 - 100 \cdot 0,0055) \cdot \sqrt{12} = 0,064 \text{ [mm]}$$

$$\alpha = 1,1 \quad \beta = 1,2 \quad \eta = 1,0$$

$\sigma_0 = 20 \text{ [MPa]}$ – Angenommene Anfangsspannung in der Bewehrung

$d = 12 \text{ [mm]}$ – Durchmesser des Bewehrungsstahls

$\mu = 0,0055$ – Bewehrungsanteil

$$E_{\text{Stahl}} = 210000 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{\text{Stahl}} = \frac{p_i \cdot r_1}{F_a + \frac{K_0 \cdot r_1}{E_{\text{Stahl}}}} = \frac{0,5038 \cdot 305}{0,16364 + \frac{800 \cdot 305}{2100000}} = 115,94 \text{ [MPa]}$$

$$p_i = 0,5038 \text{ [MPa]}$$

$$K_0 = 800 \text{ [N/m}^3 \cdot 10^5\text{]}$$

$$F_a = 0,16364 \text{ [cm}^2 \text{ / cm}^3\text{]}$$

$$r_1 = 305 \text{ [cm]}$$

$$E_{\text{Stahl}} = 2100000 \text{ [N/m}^2 \cdot 10^5\text{]}$$

Die maximale Rissbreite hängt von: Hydraulischem Gradient, Wasserhärte, maximalem W/Z-Wert, Anzahl der Cl^- und SO_4^{2-} -Ionen, Durchlässigkeitsbeiwert des Felses, Klasse der Anlage ab.

- Hydraulischer Gradient

$$J = \frac{H_i - H_e}{d_{\text{Auskleidung}}} = \frac{50,38 - 48}{0,3} = 7,9$$

- Hydraulischer Gradient ohne Außenwasserdruck:

$$J = \frac{H_i}{d_{\text{Auskleidung}}} = \frac{50,38}{0,30} = 167,9$$



Es werden folgende Annahmen gemacht:

- Wasserhärte : $0,25 \text{ [g/dm}^3 \cdot 10^{-3}], \text{ [mg/l]}$
- Hydraulischer Gradient : $50 < J = 167,93 < 300$
- Durchlässigkeitsbeiwert des Felses $k_{\text{Fels}} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ [cm/s]}$
- Maximaler W/Z- Wert -0,5
- Anlage- Klasse - I
- Anzahl der Cl^- und SO_4^- Ionen - 400 – 1000 [mg/l]

Maximale zulässige Rissbreite : $0,1 \text{ [mm]}$.

8.1.3.2 Anzahl der Risse

$$n = \frac{16 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot \mu}{d} = \frac{16 \cdot \pi \cdot 335 \cdot 0,0055}{1,2} = 80$$

8.1.3.3 Sickerung durch die Auskleidung

$$Q = \frac{1}{\frac{d_{\text{Auskleidung}}}{k \cdot n} + \frac{1}{k_{\text{Fels}} \cdot M_F}} = \frac{1}{\frac{0,30}{26,5 \cdot 10^{-5} \cdot 150} + \frac{1}{4 \cdot 10^{-5} \cdot 2,84}} = 9,75 \cdot 10^{-5} \text{ [l/s]}, \text{ wobei}$$

- $k = a^3 = 0,064^3 = 0,000265 = 26,5 \cdot 10^{-5}$ – Durchlässigkeitsbeiwert
- $n = 80$ – Anzahl der Risse
- $d_{\text{Auskleidung}} = 0,30 \text{ [m]}$ – Dicke der Auskleidung
- $k_{\text{Fels}} \geq 4 \cdot 10^{-5} \text{ [cm/s]}$ – Durchlässigkeitsbeiwert des Felses
- $M_F = \frac{2 \cdot \pi}{\ln\left(\frac{R}{r_2}\right)} = \frac{2 \cdot \pi}{\ln\left(\frac{30,5}{3,35}\right)} = 2,84$ – Filtrationsmodul

$R = 10 \cdot r_1 = 10 \cdot 3,05 = 30,5 \text{ [m]}$ – Radius der wassergesättigten Zone

Die Formel ist bei mehr als 35 Rissen gültig.

$Q_{\text{zulässig}} = 1 \text{ [l/s]}$ – für 1000 m^2 von der Druckstollenfläche, wenn
 der Innenwasserdruck $H_i < 100 \text{ m}$ ist

Die Sickerung soll kleiner sein als:

$$Q' = 2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot Q_{\text{zulässig}} \cdot 10^{-7} = 2,10 \cdot 10^{-4} \text{ [l/s]} > 9,75 \cdot 10^{-5}$$

$$\Rightarrow Q < Q'$$



8.2 Abschnitt 2

- $L_{\text{Abschnitt}} = 0,10 \cdot L_{\text{Druckstollen}} = 0,10 \cdot 1019,81 = 102 \text{ m}$
- $f = 3 \Rightarrow K_0 = 1000 \text{ N/cm}^2$
- $\varphi = \arctg(f) = 71,565^\circ$
- $\gamma_{\text{Fels}} = 25 \text{ kN/m}^3$

8.2.1 Minimale Dicke der ungerissenen Auskleidung

- $r_1 = \frac{D_{\text{Druckstollen}}}{2} = \frac{6,10}{2} = 3,05 \text{ [m]}$ – Innendurchmesser des Druckstollens
- $p = \gamma_{\text{Wasser}} \cdot H_{\text{WS}} = \frac{10 \cdot 51,2}{1000} = 0,512 \text{ [MPa]}$ – Innenwasserdruck

wobei:

$\gamma_{\text{Wasser}} = 10 \text{ [kN/m}^3\text{]}$ – Wichte des Wassers

$H_{\text{WS}} = 51,2 \text{ m}$ – Wasserspiegel beim höchsten Schwallspiegel der Wasserschlossschwingung

8.2.1.1 Notwendige Dicke der Auskleidung:

$$d_{\text{Auskleidung}} = r_1 \cdot \left(\frac{p}{\gamma_c \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}}} - \frac{K_0}{0,70 \cdot E_{\text{Beton}}} \right) = 3,05 \cdot \left(\frac{0,512}{1,1 \cdot 1,2} - \frac{1000}{0,70 \cdot 32500} \right) = 1,12 \text{ [m]},$$

wobei

$\gamma_c = 1$ – Arbeitsbedingunsbeiwert

$R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = 1,2 \text{ [MPa]}$ – Zugfestigkeit des Betons B30

$E_{\text{Beton}} = 32500 \text{ [MPa]}$ – Elastizitätsmodul des Betons B30

$$d_{\text{Auskleidung}}^{\text{max}} = 0,15 \cdot r_1 = 0,15 \cdot 3,05 = 0,4575 \text{ cm}$$

$d_{\text{Auskleidung}} > d_{\text{Auskleidung}}^{\text{max}} \Rightarrow$ andere Auskleidungskonstruktion ist notwendig

8.2.1.2 Minimale Dicke der ungerissenen Stahlbetonaukleidung

- Äquivalenter Elastizitätsmodul des Stahlbetons:

$$E_{\text{Äquiv}} = E_{\text{Beton}} \cdot \left(1 + \mu_{\text{max}} \cdot \left(\frac{E_{\text{Stahl}}}{E_{\text{Beton}}} - 1 \right) \right) = 32500 \cdot \left(1 + 0,02 \cdot \left(\frac{2,1 \cdot 10^5}{32500} - 1 \right) \right) = 36050 \text{ [MPa]}, \text{ wobei:}$$

$\mu_{\text{max}} = 0,02$ – Maximaler Bewehrungsanteil für ungerissene Auskleidung

$E_{\text{Stahl}} = 210000 \text{ [MPa]}$ – Elastizitätsmodul des Stahls

$\gamma_c = 1,1$ – Abgelesen von Tabelle

$$d_{\text{Auskleidung}} = \frac{r_1}{1 + 30 \cdot \frac{\mu_{\text{max}}}{R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}}}} \cdot \left(\frac{p}{\gamma_c \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}}} - \frac{K_0}{E_{\text{Äquiv}}} \right) = \frac{3,05}{1 + 30 \cdot \frac{0,02}{1,2}} \cdot \left(\frac{0,512}{1,1 \cdot 1,2} - \frac{1000}{36050} \right) = 0,73 \text{ [m]}$$

$d_{\text{Auskleidung}} > d_{\text{Auskleidung}}^{\text{max}} \Rightarrow$ angenommen: $d_{\text{Auskleidung}} = 30 \text{ cm}$ - gerissene Auskleidung

$$h_{\text{notwendig}} = \frac{K_0 \cdot r_1 \cdot \gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}}}{r_2 \cdot \rho \cdot g \cdot \gamma_n \cdot E_{\text{Stahl}}} = \frac{1000 \cdot 305 \cdot 1,1 \cdot 390}{335 \cdot 0,0025 \cdot 9,81 \cdot 1,25 \cdot 210000} = 60,67 \text{ [m]}, \quad \text{wobei}$$

$r_1 = 3,05 \text{ [m]} = 305 \text{ [cm]}$ – Innendurchmesser

$r_2 = r_1 + d_{\text{Auskleidung}} = 3,05 + 0,30 = 3,35 \text{ [m]} = 335 \text{ [cm]}$

$\gamma_c = 1,1$ – Abgelesen von Tabelle

$R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}} = 390 \text{ [MPa]}$ – Zugfestigkeit des Stahls AIII

$\rho = 0,0025 \text{ [kg/cm}^3\text{]}$ – Dichte des Felses

$\gamma_n = 1,25$ – Abgelesen von Tabelle

$H_{\text{Überlagerungshöhe}} = 56,41 \text{ m} < h_{\text{notwendig}}$

$$F_a = \frac{\gamma_n \cdot p \cdot r_1}{\gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}}} - \frac{\rho \cdot g \cdot H_{\text{Überlagerungshöhe}} \cdot r_2}{100 \cdot \gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}}} = \frac{1,25 \cdot 0,512 \cdot 3,05}{1,1 \cdot 390} - \frac{0,0025 \cdot 9,81 \cdot 56,41 \cdot 3,35}{100 \cdot 1,1 \cdot 390} = 0,00444 \text{ [cm}^2 / \text{cm]}$$

- $\mu_{\text{min}} = 0,5\% = 0,005$

8.2.1.3 Wirkende Lasten

8.2.1.3.1 Bauzeit

- Vertikaler Gebirgsdruck

$$q = \gamma \cdot h_{\text{zerstört}} \cdot \beta = 25 \cdot 1,55 \cdot 0,8 = 31 \text{ [kN/m]}$$

$$q_{\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot q = 1,5 \cdot 31 = 46,5 \text{ [kN/m]}$$

- Horizontaler Gebirgsdruck

$$e = \gamma \cdot (h_{\text{zerstört}} + 0,5 \cdot D_3) \cdot \text{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) = 25 \cdot (1,55 + 0,5 \cdot 7,0) \cdot \text{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{71,565^\circ}{2} \right) = 3,325 \text{ [kN/m]}$$

$$e_{\text{Berechnung}} = e \cdot \gamma_f = 3,325 \cdot 1,2 = 3,99 \text{ [kN/m]}$$

- Eigengewicht

$$\gamma_{\text{Beton}} = 24 \text{ [kN/m}^3\text{]} - \text{Wichte des Betons}$$

$$g = d_{\text{Auskleidung}} \cdot \gamma_{\text{Stahlbeton}} = 0,3 \cdot 24 = 7,2 \text{ [kN/m]}$$

$$g_{\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot g = 1,2 \cdot 7,2 = 8,64 \text{ [kN/m]}$$

- Außenwasserdruck

$$H_{\text{Wasser}} = 0,5 \cdot H_{\text{Überlagerung}} = 0,5 \cdot 126,8 = 63,4 \text{ [m]} - \text{Wassergesättigtes Gebirge}$$

$$p_e = \gamma_{\text{Wasser}} \cdot H_{\text{Wasser}} = \frac{10 \cdot 63,4}{1000} = 0,634 \text{ [MPa]}$$

$$p_{e,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot p_e = 1,1 \cdot 0,634 = 0,70 \text{ [MPa]}$$

- Seismische Lasten
- Vertikaler Gebirgsdruck - seismisch

$C = 1,5$ – Beiwert für die Klasse der Anlage
für I^{-ste} Klasse = 1,5

$K_s = 0,1$ – Seismischer Beiwert – abgelesen von [2]

Tabelle.22 – "Wasserbautunnel" – Univ.Pr of.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989.

$K_h = 0,5$ – Überlagerungshöhebeiwert – abgelesen von [2]

Tabelle.23 – "Wasserbautunnel" – Univ.Pr of.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989

$R = 0,60$ – Verhaltensbeiwert

$H_{\text{Überlagerung}} = 126,8 \text{ m}$

$$K'_s = R \cdot c \cdot K_s \cdot K_h = 0,6 \cdot 1,5 \cdot 0,1 \cdot 0,5 = 0,045$$

$$q_s = q \cdot K'_s = 31 \cdot 0,045 = 1,395 \text{ [kN/m]}$$

$$q_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot q_s = 1,1 \cdot 1,395 = 1,395 \text{ [kN/m]}$$



- Horizontaler Gebirgsdruck - seismisch

$$\varphi = 71,565^\circ - \text{Reibungswinkel}$$

$$e_s = 2 \cdot K'_s \cdot e \cdot \text{tg}(\varphi) = 2 \cdot 0,045 \cdot 3,325 \cdot \text{tg}(71,565^\circ) = 0,898 \text{ [kN/m]}$$

$$e_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot e_s = 1 \cdot 0,898 = 0,898 \text{ [kN/m]}$$

- Eigengewicht- seismisch

$$g_s = g \cdot K'_s = 7,2 \cdot 0,045 = 0,324 \text{ [kN/m]}$$

$$g_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot g_s = 1 \cdot 0,324 = 0,324 \text{ [kN/m]}$$

8.2.1.3.2 Betriebszeit

- Vertikaler Gebirgsdruck

$$q = \gamma \cdot h_{\text{zerstört}} \cdot \beta = 25 \cdot 1,55 \cdot 0,8 = 31 \text{ [kN/m]}$$

$$q_{\text{Bemessung}} = \gamma_f \cdot q = 1,5 \cdot 31 = 46,5 \text{ [kN/m]}$$

- Horizontaler Gebirgsdruck

$$e = \gamma \cdot (h_{\text{zerstört}} + 0,5 \cdot D_3) \cdot \text{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) = 25 \cdot (1,55 + 0,5 \cdot 7,0) \cdot \text{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{71,565^\circ}{2} \right) = 3,325 \text{ [kN/m]}$$

$$e_{\text{Bemessung}} = e \cdot \gamma_f = 3,325 \cdot 0,8 = 2,66 \text{ [kN/m]}$$

- Eigengewicht

$$\gamma_{\text{Beton}} = 24 \text{ [kN/m}^3\text{]} - \text{Wichte des Betons}$$

$$g = d_{\text{Auskleidung}} \cdot \gamma_{\text{Beton}} = 0,3 \cdot 24 = 7,2 \text{ [kN/m]}$$

$$g_{\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot g = 0,9 \cdot 7,2 = 6,48 \text{ [kN/m]}$$

- Außenwasserdruck

$$H_{\text{Wasser}} = 0,5 \cdot H_{\text{Überlagerung}}^{\text{Druckstollen}} = 0,5 \cdot 126,8 = 63,4 \text{ [m]}$$

$$p_e = \gamma_{\text{Wasser}} \cdot H_{\text{Wasser}} = \frac{10 \cdot 63,4}{1000} = 0,634 \text{ [MPa]}$$

$$p_{e,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot p_e = 0,9 \cdot 0,634 = 0,571 \text{ [MPa]}$$

- Innenwasserdruck

$$p_i \equiv p = 0,512 \text{ [MPa]}$$

$$p_{i,\text{Berechnung}} \equiv \gamma_f p_i = 1 \cdot 0,512 = 0,512 \text{ [MPa]}$$



- **Seismische Lasten**
- **Vertikaler Gebirgsdruck - seismisch**

$C = 1,5$ – Beiwert für die Klasse der Anlage
für I^{ste} Klasse = 1,5

$K_s = 0,1$ – Seismischer Beiwert – abgelesen von [2]
Tabelle.22 – "Wasserbautunnel" – Univ.Pr of.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989.

$K_h = 0,5$ – Überlagerungshöhebeiwert – abgelesen von [2]
Tabelle.23 – "Wasserbautunnel" – Univ.Pr of.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989

$H_{\text{Überlagerung}} = 126,8 \text{ m}$

$R = 0,60$ – Verhaltensbeiwert

$K'_s = R \cdot c \cdot K_s \cdot K_h = 0,6 \cdot 1,5 \cdot 0,1 \cdot 0,5 = 0,045$

$q_s = q \cdot K'_s = 31 \cdot 0,045 = 1,395 \text{ [kN/m]}$

$q_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot q_s = 1 \cdot 1,395 = 1,395 \text{ [kN/m]}$

- **Horizontaler Gebirgsdruck - seismisch**

$\varphi = 71,565^\circ$ – Reibungswinkel

$e_s = 2 \cdot K'_s \cdot e \cdot \text{tg}(\varphi) = 2 \cdot 0,045 \cdot 3,325 \cdot \text{tg}(71,565^\circ) = 0,898 \text{ [kN/m]}$

$e_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot e_s = 1 \cdot 0,898 = 0,898 \text{ [kN/m]}$

- **Eigengewicht- seismisch**

$g_s = g \cdot K'_s = 7,2 \cdot 0,045 = 0,324 \text{ [kN/m]}$

$g_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot g_s = 1 \cdot 0,324 = 0,324 \text{ [kN/m]}$

- **Innenwasserdruck- seismisch**

$p_{i,c} = 100 \cdot K'_s = 100 \cdot 0,045 = 4,5 \text{ [kN/m]}$

$p_{i,s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot p_{i,s} = 1 \cdot 4,5 = 4,5 \text{ [kN/m]}$

8.2.1.4 Berechnung der Biegemomente und der Normalkräfte

Der Querschnitt ist als kreisförmig vorgesehen. Die Biegemomente und Zugkräfte sind in 5 Punkten berechnet. Der vertikale Gebirgsdruck und das Eigengewicht sind als gleichmäßig über den Querschnittsdurchmesser verteilt. Die elastische Reaktion des Felses ist gleichmäßig über den Perimeter verteilt, wie es unten gezeigt ist.

Die Formeln für die Berechnung sind im 8.1.1.4 gezeigt:

8.2.1.5 Berechnung der Spannungen

$$\sigma_{1,2} = \frac{N}{F} \mp \frac{M}{W} \text{ [kPa] , wobei}$$

$$F = b \cdot d_{\text{Auskleidung}} = 1,0 \cdot 0,30 = 0,30 \text{ [m}^2\text{]} - \text{Fläche der Auskleidung für 1 m des Druckstollens}$$

$$W = \frac{b \cdot d_{\text{Auskleidung}}^2}{6} = \frac{1,0 \cdot 0,30^2}{6} = 0,0150 \text{ [m}^3\text{]}$$

Während der Betriebszeit (maximaler Innenwasserdruck) sind die Spannungen für alle Punkten des Querschnitts gleich:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (2 \cdot \varepsilon \cdot r_2^2 - (r_1^2 + r_2^2))}{r_2^2 - r_1^2} = \frac{0,5038 \cdot 10^3 \cdot (2 \cdot 0,1 \cdot 3,35^2 - (3,05^2 + 3,35^2))}{3,35^2 - 3,05^2} = -4797 \text{ [kPa]}$$

$$\sigma_2 = \frac{p \cdot (\varepsilon \cdot (r_1^2 + r_2^2) - 2 \cdot r_1^2)}{r_2^2 - r_1^2} = \frac{0,5038 \cdot 10^3 \cdot (0,1 \cdot (3,05^2 + 3,35^2) - 2 \cdot 3,05^2)}{3,35^2 - 3,05^2} = -4343 \text{ kPa}$$

$$\varepsilon = 0,1 - \text{abgelesen von [2] Tabelle.99 -}$$

"Wasserbautunnel" – Univ.Pr of.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989

$$a = \frac{r_2}{r_1} = \frac{3,35}{3,05} = 1,10$$

$$c = \frac{E_{\text{Äquiv}} \cdot (1 + \nu_{\text{Fels}})}{E_{\text{Fels}} \cdot (1 + \nu_{\text{Äquiv}})} = \frac{32509 \cdot (1 + 0,28)}{1280 \cdot (1 + 0,20001)} = 27,1$$

$$E_{\text{Äquiv}} = E_{\text{Beton}} \cdot \left(1 + \mu_{\text{min}} \cdot \left(\frac{E_{\text{Stahl}}}{E_{\text{Beton}}} - 1 \right) \right) = 32500 \cdot \left(1 + 0,005 \cdot \left(\frac{21 \cdot 10^4}{32500} - 1 \right) \right) = 32509 \text{ MPa}$$



$$\nu_{\text{Äquiv}} = \nu_{\text{Beton}} \cdot \left(1 + \mu_{\text{min}} \cdot \left(\frac{\nu_{\text{Stahl}}}{\nu_{\text{Beton}}} - 1 \right) \right) = 0,2 \cdot \left(1 + 0,005 \cdot \left(\frac{0,3}{0,2} - 1 \right) \right) = 0,20$$

$$E_{\text{Fels}} = K_0 \cdot (1 + \nu_{\text{Fels}}) = 1000 \cdot (1 + 0,28) = 1280 \text{ [MPa]}$$

$\nu_{\text{Fels}} = 0,28$ – Poissonzahl für Fels

$\nu_{\text{Beton}} = 0,2$ – Poissonzahl für Beton

$\nu_{\text{Stahl}} = 0,3$ – Poissonzahl für Stahl

8.2.1.6 Zulässige Spannungen

8.2.1.6.1 Bauzeit

$\sigma_{1,2} \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug(Druck)}}$, wobei γ_c und γ_n von oben abgelesen werden

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = \frac{1}{1,25 \cdot 0,95} \cdot 1,2 = 1,01 \text{ [MPa]}$$

$R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = 1,2 \text{ [MPa]}$ – Zugfestigkeit des Betons B30

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Druck}} = \frac{1}{1,25 \cdot 0,95} \cdot 17 = 14,32 \text{ [MPa]}$$

$R_{\text{Beton}}^{\text{Druck}} = 17 \text{ [MPa]}$ – Druckfestigkeit des Betons B30

8.2.1.6.2 Betriebszeit

- Übliche Lasten

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = \frac{1}{1,25 \cdot 1} \cdot 1,2 = 0,96 \text{ [MPa]}$$

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Druck}} = \frac{1}{1,25 \cdot 1} \cdot 17 = 13,60 \text{ [MPa]}$$

- Besondere Lasten

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = \frac{1,2}{1,25 \cdot 0,9} \cdot 1,2 = 1,28 \text{ [MPa]}$$

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Druck}} = \frac{1,2}{1,25 \cdot 0,9} \cdot 17 = 18,13 \text{ [MPa]}$$



Die maximalen Druckspannungen in der Auskleidung sind kleiner als die zulässigen Spannungen. Bei einem trockenen Gebirge ist der Außenwasserdruck $p_e = 0$, wobei größere Zugspannungen eintreten. Das erfordert eine zusätzliche Bewehrung des Querschnitts.



Tab. 8-5 Biegemomente und Normalkräfte während der Bauzeit

Tabelle		Q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		g _{Berechnung}		p _{e, Berechnung}		q _{s, Berechnung}		e _{s, Berechnung}		g _{s, Berechnung}	
		M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N
		kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN
Schnitt	1	17.58	91.63	-9.89	12.97	1.21	22.84	-2.13	2346.13	0.53	2.75	-2.22	2.92	0.05	0.86
	2	-11.36	140.17	0.00	6.48	-0.60	28.74	0.94	2344.92	-0.34	4.21	0.00	1.46	-0.02	1.08
	3	-0.69	176.25	9.89	0.00	-0.25	50.94	0.44	2345.11	-0.02	5.29	2.22	0.00	-0.01	1.91
	4	2.56	175.32	0.00	6.48	-2.07	70.62	3.38	2343.99	0.08	5.26	0.00	1.46	-0.08	2.65
	5	-0.15	176.21	-9.89	12.97	4.06	77.23	-6.74	2347.82	0.00	5.29	-2.22	2.92	0.15	2.90

Tab. 8-6 Spannungen während der Bauzeit

Tabelle		q _{Ber}		e _{Ber}		g _{Ber}		p _{eBer}		q _{s, Bere}		E _{s, Ber}		g _{s, Bere}		q _{ber} +e _{ber} +g _{ber} +p _{eber}		Σ(X _{i, ber})+Σ(X _{i, ber})	
		σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2
		kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
Schnitt	1	-866.5	1477.4	702.5	-616.0	-4.3	156.6	7962.7	7678.2	-26.0	44.3	158.1	-138.6	-0.2	5.9	7794.4	8696.1	7926.3	8607.7
	2	1224.3	-289.8	21.6	21.6	136.0	55.6	7753.9	7879.0	36.7	-8.7	4.9	4.9	5.1	2.1	9135.7	7666.4	9182.4	7664.6
	3	633.8	541.2	-659.2	659.2	186.6	153.0	7787.7	7846.3	19.0	16.2	-148.3	148.3	7.0	5.7	7948.9	9199.8	7826.6	9370.1
	4	414.0	754.9	21.6	21.6	373.5	97.3	7587.7	8038.9	12.4	22.6	4.9	4.9	14.0	3.6	8396.8	8912.7	8428.0	8943.9
	5	597.6	577.1	702.5	-616.0	-13.1	528.0	8275.6	7376.5	17.9	17.3	158.1	-138.6	-0.5	19.8	9562.6	7865.6	9738.1	7764.1



Tab. 8-7 Biegemomente und Normalkräfte während der Betriebszeit

Tabelle	Q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		g _{Berechnung}		p _{e, Berechnung}		Q _{s, Berechnung}		e _{s, Berechnung}		g _{s, Berechnung}		Q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		
	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	
	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	
Schnitt	1	17.58	91.63	-6.59	8.65	0.90	17.13	-2.13	1921.35	2.13	-8.16	0.53	2.75	-2.22	2.92	0.05	0.86	2.13	-8.16
	2	-11.36	140.17	0.00	4.32	-0.45	21.56	0.94	1920.14	-0.94	-7.15	-0.34	4.21	0.00	1.46	-0.02	1.08	-0.94	-7.15
	3	-0.69	176.25	6.59	0.00	-0.19	38.21	0.44	1920.33	-0.44	-7.31	-0.02	5.29	2.22	0.00	-0.01	1.91	-0.44	-7.31
	4	2.56	175.32	0.00	4.32	-1.55	52.96	3.38	1919.21	-3.38	-6.38	0.08	5.26	0.00	1.46	-0.08	2.65	-3.38	-6.38
	5	-0.15	176.21	-6.59	8.65	3.04	57.92	-6.74	1923.04	6.74	-9.56	0.00	5.29	-2.22	2.92	0.15	2.90	6.74	-9.56

Tab. 8-8 Spannungen während der Betriebszeit

Tabelle	q _{Ber}		e _{Ber}		g _{Ber}		p _{e, Ber}		p _{i, Ber}		Q _{s, Ber}		e _{s, изчисл}		g _{s, Ber}		p _{i, Ber}		q _{Ber} +e _{Ber} +g _{Ber} +p _{e, Ber}		Σ(x _{i, Ber})+Σ(x _{i,c, Ber})		p _i		Total.		
	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	
	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
Schnitt	1	-867	1477	468	-411	-3	117	6547	6262	-169	115	-26	44	158	-139	0	6	-169	115	5976	7561	5938	7588	-4276	-3867	1700	3695
	2	1224	-290	14	14	102	42	6338	6463	39	-86	37	-9	5	5	5	2	39	-86	7717	6143	7803	6055	-4276	-3867	3441	2276
	3	634	541	-439	439	140	115	6372	6430	5	-54	19	16	-148	148	7	6	5	-54	6711	7472	6594	7589	-4276	-3867	2435	3606
	4	414	755	14	14	280	73	6172	6623	204	-247	12	23	5	5	14	4	204	-247	7085	7218	7320	7003	-4276	-3867	2808	3352
	5	598	577	468	-411	-10	396	6860	5961	-481	418	18	17	158	-139	0	20	-481	418	7434	6941	7128	7257	-4276	-3867	3158	3074

8.2.2 Bemessung der Bewehrung

Die Bewehrung ist mit Außenwasserdruck von $p_e = 0$ bemisst. In diesem Fall entstehen maximale Zugspannungen:

		übliche		besondere	
		σ_1	σ_2	σ_1	σ_2
		kPa	kPa	kPa	kPa
Schnitt	1	-4847	-2567	-4885	-2541
	2	-2897	-4187	-2811	-4275
	3	-3937	-2825	-4054	-2708
	4	-3363	-3271	-3128	-3487
	5	-3702	-2886	-4008	-2570

- Maximale Spannungen:

$$\sigma_1 = -4885 \text{ [kPa]} \quad \sigma_2 = -2541 \text{ [kPa]}$$

Es gibt drei Möglichkeiten für die Position der Normalkraft.

8.2.2.1 Zentrischer Zug

Für die maximale Spannung $\sigma_1 = -4885 \text{ [kPa]}$ wird die Resultierende berechnet:

$$F_{\text{Auskleidung}} = d_{\text{Auskleidung}} \cdot b = 0,3 \cdot 100 \cdot 1.300 = 3000 \text{ [cm}^2\text{]} \text{ – Fläche der Auskleidung}$$

für Länge des Druckstollens $b = 100 \text{ cm}$

- Resultierende:

$$N_{\text{Zug}} = \sigma_1 \cdot F_{\text{Auskleidung}} = 4885 \cdot 10^{-4} \cdot 3000 = 1465,4 \text{ [kN]}$$

$$R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}} = 390 \text{ [MPa]} \text{ – Zugfestigkeit des Stahls}$$

- Fläche der Bewehrung:

$$F_a = \frac{\gamma_m \cdot \gamma_n \cdot N_{\text{Zug}}}{\gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}}} = \frac{1,1 \cdot 1,25 \cdot 1465,4}{1,1 \cdot 390 \cdot 10^3} \cdot 10^4 = 42,7 \text{ [cm}^2\text{/m]}$$

$$\gamma_c = 1,1 \quad \gamma_n = 1,25 \quad \gamma_m = 1$$



8.2.2.2 Zug mit kleiner Exzentrizität

Die Normalkraft wird zwischen der Flächen der Zug- und Druckbewehrung verteilt.

F_a und F'_a .

$a = a' = 0,05$ [m] – Betonüberdeckung

$h_o = d_{\text{Auskleidung}} - a = 0,3 - 0,05 = 0,25$ [m]

$e_o = \frac{M}{N} = \frac{17,58}{1113,9} = 0,016$ [m] – Exzentrizität der Normalkraft

Der Biegemoment M und die Normalkraft N sind durch folgende Formel berechnet:

$$\left| \begin{array}{l} \sigma_1 = \frac{N}{F} - \frac{M}{W} \\ \sigma_2 = \frac{N}{F} + \frac{M}{W} \end{array} \right. \quad \left| \begin{array}{l} -4885 = \frac{N}{0,3} - \frac{M}{0,0150} \\ -2541 = \frac{N}{0,30} + \frac{M}{0,0150} \end{array} \right.$$

$M = 18,55$ kNm

$N = -1117,65$ kN

- Abstand der Normalkraft N von der Druckbewehrung

$e' = 0,5 \cdot (h_o - a') - e_o = 0,5 \cdot (0,25 - 0,05) - 0,016 = 0,084$ [m]

- Abstand der Normalkraft N von der Zugbewehrung

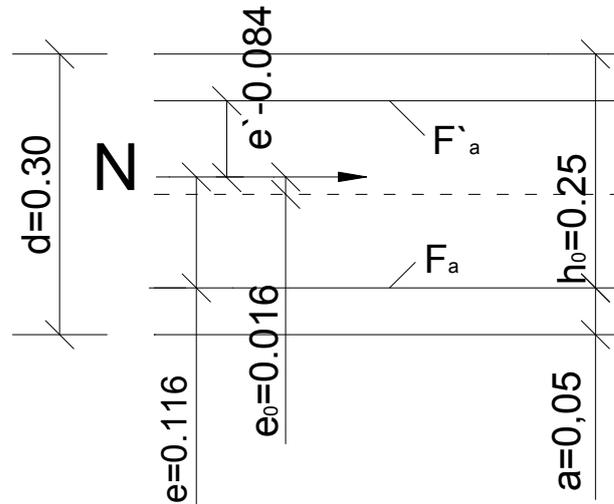
$e = 0,5 \cdot (h_o - a) + e_o = 0,5 \cdot (0,25 - 0,05) + 0,016 = 0,116$ [m]

- Fläche der Zugbewehrung.

$F_a = \frac{\gamma_m \cdot \gamma_n \cdot N \cdot e}{\gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}} \cdot (h_o - a)} = \frac{1,1,25 \cdot 1113,9 \cdot 0,116}{1,1 \cdot 390 \cdot 10^3 \cdot (0,25 - 0,05)} \cdot 10^{-4} = 18,79$ [cm² / m]

- Fläche der Druckbewehrung

$F'_a = \frac{\gamma_m \cdot \gamma_n \cdot N \cdot e'}{\gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Druck}} \cdot (h_o - a)} = \frac{1,1,25 \cdot 1113,9 \cdot 0,084}{1,1 \cdot 390 \cdot 10^3 \cdot (0,25 - 0,05)} \cdot 10^{-4} = 13,67$ [cm² / m]



8.2.2.3 Zug mit großer Exzentrizität– Das ist ein Fall, der hier nicht auftreten kann, deshalb ist er nicht berechnet.

Der massgebende Bemessungsfall trifft bei Zug mit keiner Exzentrizität auf, mit einer entsprechenden Bewehrung gleich:

$$F_a = 18,99 \text{ [cm}^2 \text{ / m]} \quad F'_a = 13,58 \text{ [cm}^2 \text{ / m]}$$

Angenommen:

- Zugbewehrung: 10 x N 16/10 cm $F=20,096 \text{ cm}^2$
- Druckbewehrung 10 x N 14 /10 cm $F=15,386 \text{ cm}^2$

$$\mu = \frac{F_a + F'_a}{F_{\text{Stahl}}} = \frac{20,096 + 15,386}{3000} = \frac{35,482}{3000} = 0,0118\%$$

- Konstruktive Bewehrung : 2x5 N 10/20 cm
- Bügel : $\Phi 8/25 \text{ cm}$

8.2.3 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

8.2.3.1 Mittlere Rissbreite

$$a = 7,7 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \eta \cdot \frac{\sigma_{\text{Stahl}} - \sigma_o}{E_{\text{Stahl}}} \cdot (4 - 100 \cdot \mu) \cdot \sqrt{d} =$$

$$= 7,7 \cdot 1,1 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot \frac{86,41 - 20}{210000} \cdot (4 - 100 \cdot 0,0118) \cdot \sqrt{16} = 0,051 \text{ [mm]}$$



$$\alpha = 1,1 \quad \beta = 1,2 \quad \eta = 1,0$$

$\sigma_0 = 20$ [MPa] – Angenommene Anfangsspannung in der Bewehrung

$d = 16$ [mm] – Durchmesser des Bewehrungsstahls

$\mu = 0,0118$ – Bewehrungsanteil

$E_{\text{Stahl}} = 210000$ [MPa]

$$\sigma_{\text{Stahl}} = \frac{p_i \cdot r_1}{F_a + \frac{K_0 \cdot r_1}{E_{\text{Stahl}}}} = \frac{0,512 \cdot 305}{0,3548 + \frac{1000 \cdot 305}{2100000}} = 86,41 \text{ [MPa]}$$

$$p_i = 0,512 \text{ [MPa]}$$

$$K_0 = 1000 \text{ [N/m}^3 \cdot 10^5\text{]}$$

$$F_a = 0,3548 \text{ [cm}^2 \text{ / cm}^2\text{]}$$

$$r_1 = 305 \text{ [cm]}$$

$$E_{\text{Stahl}} = 2100000 \text{ [N/m}^2 \cdot 10^5\text{]}$$

Die maximale Rissbreite hängt von: Hydraulischem Gradient, Wasserhärte, maximalem W/Z-Wert, Anzahl der Cl^- und SO_4^{2-} -Ionen, Durchlässigkeitsbeiwert des Felses, Klasse der Anlage ab.

- Hydraulischer Gradient

$$J = \frac{H_i - H_e}{d_{\text{Auskleidung}}} = \frac{51,2 - 63,4}{0,3} = -40,7$$

- Hydraulischer Gradient ohne Außenwasserdruck:

$$J = \frac{H_i}{d_{\text{Auskleidung}}} = \frac{51,2}{0,30} = 170,67$$

Es werden folgende Annahmen gemacht:

- Wasserhärte : $0,25 \text{ [g/dm}^3 \cdot 10^{-3}\text{]}, \text{ [mg/l]}$
- Hydraulischer Gradient : $50 < J = 170,67 < 300$
- Durchlässigkeitsbeiwert des Felses $k_{\text{Fels}} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ [cm/s]}$
- Maximaler W/Z- Wert -0,5
- Anlage- Klasse - I
- Anzahl der Cl^- und SO_4^{2-} Ionen - 400 – 1000 [mg/l]

Maximale zulässige Rissbreite: 0,06 [mm].



8.2.3.2 Anzahl der Risse

$$n = \frac{16 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot \mu}{d} = \frac{16 \cdot \pi \cdot 335 \cdot 0,0118}{1,6} = 120$$

8.2.3.3 Sickerung durch die Auskleidung

$$Q = \frac{1}{\frac{d_{\text{Auskleidung}}}{k \cdot n} + \frac{1}{k_{\text{Fels}} \cdot M_{\text{F}}}} = \frac{1}{\frac{0,30}{13,4 \cdot 10^{-5} \cdot 120} + \frac{1}{4 \cdot 10^{-5} \cdot 2,84}} = 1,04 \cdot 10^{-4} \text{ [l/s] , wobei}$$

- $k = a^3 = 0,051^3 = 0,000134 = 13,4 \cdot 10^{-5}$ – Durchlässigkeitsbeiwert
- $n = 120$ – Anzahl der Risse
- $d_{\text{Auskleidung}} = 0,30 \text{ [m]}$ – Dicke der Auskleidung
- $k_{\text{Fels}} \geq 4 \cdot 10^{-5} \text{ [cm/s]}$ – Durchlässigkeitsbeiwert des Felses
- $M_{\text{F}} = \frac{2 \cdot \pi}{\ln\left(\frac{R}{r_2}\right)} = \frac{2 \cdot \pi}{\ln\left(\frac{30,5}{3,35}\right)} = 2,84$ – Filtrationsmodul
- $R = 10 \cdot r_1 = 10 \cdot 3,05 = 30,5 \text{ [m]}$ – Radius der wassergesättigten Zone

Die Formel ist bei mehr als 35 Rissen gültig.

$Q_{\text{zulässig}} = 1 \text{ [l/s]}$ – für 1000 m^2 von der Druckstollenfläche, wenn
 der Innenwasserdruck $H_i < 100 \text{ m}$ ist

Die Sickerung soll kleiner sein als:

$$Q' = 2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot Q_{\text{zulässig}} \cdot 10^{-7} = 2,10 \cdot 10^{-4} \text{ [l/s]} > 1,04 \cdot 10^{-4}$$

$$\Rightarrow Q < Q'$$



8.3 Abschnitt 3

- $L_{\text{Abschnitt}} = 0,15 \cdot L_{\text{Druckstollen}} = 0,15 \cdot 1019,81 = 153 \text{ m}$
- $f = 4 \Rightarrow K_0 = 1600 \text{ N/cm}^2$
- $\varphi = \arctg(f) = 75,964^\circ$
- $\gamma_{\text{Fels}} = 26 \text{ kN/m}^3$

8.3.1 Minimale Dicke der ungerissenen Auskleidung

- $r_1 = \frac{D_{\text{Druckstollen}}}{2} = \frac{6,10}{2} = 3,05 \text{ [m]}$ – Innendurchmesser des Druckstollens
- $p = \gamma_{\text{Wasser}} \cdot H_{\text{WS}} = \frac{10 \cdot 52,4}{1000} = 0,524 \text{ [MPa]}$ – Innenwasserdruck

wobei:

$\gamma_{\text{Wasser}} = 10 \text{ [kN/m}^3\text{]}$ – Wichte des Wassers

$H_{\text{WS}} = 52,4 \text{ m}$ – Wasserspiegel beim höchsten Schwallspiegel der Wasserschlossschwungung

8.3.1.1 Notwendige Dicke der Auskleidung:

$$d_{\text{Auskleidung}} = r_1 \cdot \left(\frac{p}{\gamma_c \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}}} - \frac{K_0}{0,70 \cdot E_{\text{Beton}}} \right) = 3,05 \cdot \left(\frac{0,524}{1,1,2} - \frac{1600}{0,70 \cdot 32500} \right) = 0,90 \text{ [m]},$$

wobei

$\gamma_c = 1$ – Arbeitsbedingunsbeiwert

$R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = 1,2 \text{ [MPa]}$ – Zugfestigkeit des Betons B30

$E_{\text{Beton}} = 32500 \text{ [MPa]}$ – Elastizitätsmodul des Betons B30

$$d_{\text{Auskleidung}}^{\text{max}} = 0,15 \cdot r_1 = 0,15 \cdot 3,05 = 0,4575 \text{ cm}$$

$d_{\text{Auskleidung}} > d_{\text{Auskleidung}}^{\text{max}} \Rightarrow$ andere Auskleidungskonstruktion ist notwendig

8.3.1.2 Minimale Dicke der ungerissenen Stahlbetonaukleidung

- Äquivalenter Elastizitätsmodul des Stahlbetons:

$$E_{\text{Äquiv}} = E_{\text{Beton}} \cdot \left(1 + \mu_{\text{max}} \cdot \left(\frac{E_{\text{Stahl}}}{E_{\text{Beton}}} - 1 \right) \right) = 32500 \cdot \left(1 + 0,02 \cdot \left(\frac{2,1 \cdot 10^5}{32500} - 1 \right) \right) = 36050 \text{ [MPa]}, \text{ wobei:}$$

$\mu_{\text{max}} = 0,02$ – Maximaler Bewehrungsanteil für ungerissene Auskleidung

$E_{\text{Stahl}} = 210000$ [MPa] – Elastizitätsmodul des Stahls

$\gamma_c = 1,1$ – Abgelesen von Tabelle

$$d_{\text{Auskleidung}} = \frac{r_1}{1 + 30 \cdot \frac{\mu_{\text{max}}}{R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}}}} \cdot \left(\frac{p}{\gamma_c \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}}} - \frac{K_0}{E_{\text{Äquiv}}} \right) = \frac{3,05}{1 + 30 \cdot \frac{0,02}{1,2}} \cdot \left(\frac{0,524}{1,1 \cdot 1,2} - \frac{1600}{36050} \right) = 0,72 \text{ [m]}$$

$d_{\text{Auskleidung}} > d_{\text{Auskleidung}}^{\text{max}} \Rightarrow$ angenommen: $d_{\text{Auskleidung}} = 30 \text{ cm}$ - gerissene Auskleidung

$$h_{\text{notwendig}} = \frac{K_0 \cdot r_1 \cdot \gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}}}{r_2 \cdot \rho \cdot g \cdot \gamma_n \cdot E_{\text{Stahl}}} = \frac{1600 \cdot 305 \cdot 1,1 \cdot 390}{335 \cdot 0,0026 \cdot 9,81 \cdot 1,25 \cdot 210000} = 93,34 \text{ [m]}, \quad \text{wobei}$$

$r_1 = 3,05$ [m] = 305 [cm] – Innendurchmesser

$r_2 = r_1 + d_{\text{Auskleidung}} = 3,05 + 0,30 = 3,35$ [m] = 335 [cm]

$\gamma_c = 1,1$ – Abgelesen von Tabelle

$R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}} = 390$ [MPa] – Zugfestigkeit des Stahls AIII

$\rho = 0,0026$ [kg/cm³] – Dichte des Felses

$\gamma_n = 1,25$ – Abgelesen von Tabelle

$H_{\text{Überdeckungshöhe}} = 126,8 \text{ m} > h_{\text{notwendig}}$

$$F_a = \frac{\gamma_n \cdot p \cdot r_1}{\gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}}} - \frac{K_0 \cdot r_1}{E_{\text{Stahl}}} = \frac{1,25 \cdot 0,524 \cdot 3,05}{1,1 \cdot 390} - \frac{1600 \cdot 3,05}{210000} = -0,01858 \text{ [cm}^2 \text{ / cm]}$$

- $\mu_{\text{min}} = 0,5\% = 0,005$



8.3.1.3 Wirkende Lasten

8.3.1.3.1 Bauzeit

- Vertikaler Gebirgsdruck

$$q = \gamma \cdot h_{\text{zerstört}} \cdot \beta = 26 \cdot 1,36 \cdot 0,8 = 28,288 \text{ [kN/m]}$$

$$q_{\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot q = 1,5 \cdot 28,288 = 42,432 \text{ [kN/m]}$$

- Eigengewicht

$$\gamma_{\text{Beton}} = 24 \text{ [kN/m}^3\text{]} - \text{Wichte des Betons}$$

$$g = d_{\text{Auskleidung}} \cdot \gamma_{\text{Beton}} = 0,3 \cdot 24 = 7,2 \text{ [kN/m]}$$

$$g_{\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot g = 1,2 \cdot 7,2 = 8,64 \text{ [kN/m]}$$

- Außenwasserdruck- für maximale Überlagerungshöhe

$$H_{\text{Wasser}} = 0,5 \cdot H_{\text{Überlagerung}} = 0,5 \cdot 223,45 = 111,7 \text{ [m]} - \text{Wassergesättigtes Gebirge}$$

$$p_e = \gamma_B \cdot H_{\text{Wasser}} = \frac{10 \cdot 111,7}{1000} = 1,117 \text{ [MPa]}$$

$$p_{e,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot p_e = 1,1 \cdot 1,117 = 1,23 \text{ [MPa]}$$

- Außenwasserdruck- am Ende des Abschnitts

$$H_{\text{Wasser}} = 0,5 \cdot H_{\text{Überlagerung}} = 0,5 \cdot 214,29 = 107,15 \text{ [m]} - \text{Wassergesättigtes Gebirge}$$

$$p_e = \gamma_{\text{Wasser}} \cdot H_{\text{Wasser}} = \frac{10 \cdot 107,15}{1000} = 1,07 \text{ [MPa]}$$

$$p_{e,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot p_e = 1,1 \cdot 1,07 = 1,18 \text{ [MPa]}$$

- Seismische Lasten

- Vertikaler Gebirgsdruck - seismisch

$C = 1,5$ – Beiwert für die Klasse der Anlage
für I^{ste} Klasse = 1,5

$K_s = 0,1$ – Seismischer Beiwert – abgelesen von [2]

Tabelle.22 – "Wasserbautunnel" – Univ.Pr of.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989.

$K_h = 0,5$ – Überlagerungshöhebeiwert – abgelesen von [2]

Tabelle.23 – "Wasserbautunnel" – Univ.Pr of.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989

$$H_{\text{Überlagerung}}^{\text{max}} = 223,45 \text{ m}$$

$$H_{\text{Überlagerung}}^{\text{Ende}} = 214,29 \text{ m}$$

$R = 0,60$ – Verhaltensbeiwert



$$K'_s = R \cdot c \cdot K_s \cdot K_h = 0,6 \cdot 1,5 \cdot 0,1 \cdot 0,5 = 0,045$$

$$q_s = q \cdot K'_s = 28,288 \cdot 0,045 = 1,273 \text{ [kN/m]}$$

$$q_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot q_s = 1,1 \cdot 1,273 = 1,237 \text{ [kN/m]}$$

- Eigengewicht- seismisch

$$g_s = g \cdot K'_s = 7,2 \cdot 0,045 = 0,324 \text{ [kN/m]}$$

$$g_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot g_s = 1,0 \cdot 0,324 = 0,324 \text{ [kN/m]}$$

8.3.1.3.2 Betriebszeit

- Vertikaler Gebirgsdruck

$$q = \gamma \cdot h_{\text{zersört}} \cdot \beta = 26 \cdot 1,36 \cdot 0,8 = 28,288 \text{ [kN/m]}$$

$$q_{\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot q = 1,5 \cdot 28,288 = 42,432 \text{ [kN/m]}$$

- Eigengewicht

$$\gamma_{\text{Beton}} = 24 \text{ [kN/m}^3\text{]} \text{ – Wichte des Betons}$$

$$g = d_{\text{Auskleidung}} \cdot \gamma_{\text{Beton}} = 0,3 \cdot 24 = 7,2 \text{ [kN/m]}$$

$$g_{\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot g = 0,9 \cdot 7,2 = 6,48 \text{ [kN/m]}$$

- Außenwasserdruck- für maximale Überlagerungshöhe

$$H_{\text{Wasser}} = 0,5 \cdot H_{\text{Überlagerung}}^{\text{Druckstollen}} = 0,5 \cdot 223,45 = 111,7 \text{ [m]}$$

$$p_e = \gamma_{\text{Wasser}} \cdot H_{\text{Wasser}} = \frac{10 \cdot 111,7}{1000} = 1,117 \text{ [MPa]}$$

$$p_{e,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot p_e = 0,9 \cdot 1,117 = 1,01 \text{ [MPa]}$$

- Außenwasserdruck- am Ende des Abschnitts

$$H_{\text{Wasser}} = 0,5 \cdot H_{\text{Überlagerung}}^{\text{Druckstollen}} = 0,5 \cdot 214,29 = 107,15 \text{ [m]}$$

$$p_e = \gamma_{\text{Wasser}} \cdot H_{\text{Wasser}} = \frac{10 \cdot 107,15}{1000} = 1,07 \text{ [MPa]}$$

$$p_{e,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot p_e = 0,9 \cdot 1,07 = 0,96 \text{ [MPa]}$$

- Innenwasserdruck- am Ende des Abschnitts

$$p_i \equiv p = 0,524 \text{ [MPa]}$$

$$p_{i,\text{Berechnung}} \equiv \gamma_f p_i = 1,0 \cdot 0,524 = 0,524 \text{ [MPa]}$$



- Innenwasserdruck- für maximale Überlagerungshöhe

$$p_i \equiv p = 0,523 \text{ [MPa]}$$

$$p_{i,\text{Berechnung}} \equiv \gamma_f p_i = 1,0 \cdot 0,523 = 0,523 \text{ [MPa]}$$

- **Seismische Lasten**
- **Vertikaler Gebirgsdruck - seismisch**

$C = 1,5$ – Beiwert für die Klasse der Anlage
für I^{-ste} Klasse = 1,5

$K_s = 0,1$ – Seismischer Beiwert – abgelesen von [2]

Tabelle.22 – "Wasserbautunnel" – Univ.Pr of.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989.

$K_h = 0,5$ – Überlagerungshöhebeiwert – abgelesen von [2]

Tabelle.23 – "Wasserbautunnel" – Univ.Pr of.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989

$$H_{\text{Überlagerung}}^{\text{max}} = 223,45 \text{ m}$$

$$H_{\text{Überlagerung}}^{\text{Ende}} = 214,29 \text{ m}$$

$R = 0,60$ – Verhaltensbeiwert

$$K'_s = R \cdot c \cdot K_s \cdot K_h = 0,6 \cdot 1,5 \cdot 0,1 \cdot 0,5 = 0,045$$

$$q_s = q \cdot K'_s = 28,288 \cdot 0,045 = 1,273 \text{ [kN/m]}$$

$$q_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot q_s = 1,1 \cdot 1,273 = 0,536 \text{ [kN/m]}$$

- Eigengewicht- seismisch

$$g_s = g \cdot K'_s = 7,2 \cdot 0,045 = 0,324 \text{ [kN/m]}$$

$$g_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot g_s = 1,0 \cdot 0,324 = 0,324 \text{ [kN/m]}$$

- Innenwasserdruck- seismisch

$$p_{i,c} = 100 \cdot K'_s = 100 \cdot 0,045 = 4,5 \text{ [kN/m]}$$

$$p_{i,s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot p_{i,s} = 1,4 \cdot 4,5 = 4,5 \text{ [kN/m]}$$

8.3.1.4 Bemessung der Biegemomente und der Normalkräfte

Der Querschnitt ist als kreisförmig vorgesehen. Die Biegemomente und Zugkräfte sind in 5 Punkten berechnet. Der vertikale Gebirgsdruck und das Eigengewicht sind als gleichmäßig über den Querschnittsdurchmesser verteilt. Die elastische Reaktion des Felses ist gleichmäßig über den Perimeter verteilt, wie es unten gezeigt ist.

Die Formeln für die Berechnung sind im 8.1.1.4 gezeigt:

8.3.1.5 Bemessung der Spannungen

$$\sigma_{1,2} = \frac{N}{F} \mp \frac{M}{W} \text{ [kPa] , wobei}$$

$$F = b \cdot d_{\text{Auskleidung}} = 1,0 \cdot 30 = 30 \text{ [m}^2\text{]} - \text{Fläche der Auskleidung für 1 m des Druckstollens}$$

$$W = \frac{b \cdot d_{\text{Auskleidung}}^2}{6} = \frac{1,0 \cdot 30^2}{6} = 150 \text{ [m}^3\text{]}$$

Während der Betriebszeit (maximaler Innenwasserdruck) sind die Spannungen für alle Punkten des Querschnitts gleich:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (2 \cdot \varepsilon \cdot r_2^2 - (r_1^2 + r_2^2))}{r_2^2 - r_1^2} = \frac{0,524 \cdot 10^3 \cdot (2 \cdot 0,3 \cdot 3,35^2 - (3,05^2 + 3,35^2))}{3,35^2 - 3,05^2} = -3764 \text{ [kPa]}$$

$$\sigma_2 = \frac{p \cdot (\varepsilon \cdot (r_1^2 + r_2^2) - 2 \cdot r_1^2)}{r_2^2 - r_1^2} = \frac{0,524 \cdot 10^3 \cdot (0,3 \cdot (3,05^2 + 3,35^2) - 2 \cdot 3,05^2)}{3,35^2 - 3,05^2} = -3397 \text{ kPa}$$

$$\varepsilon = 0,3 - \text{ abgelesen von [2] Tabelle.99 -}$$

"Wasserbautunnel" – Univ. Prof. Dipl. Ing – Ljubomir Georgiev 1989

$$a = \frac{r_2}{r_1} = \frac{3,35}{3,05} = 1,10$$

$$c = \frac{E_{\text{Äquiv}} \cdot (1 + \nu_{\text{Fels}})}{E_{\text{Fels}} \cdot (1 + \nu_{\text{Äquiv}})} = \frac{32509 \cdot (1 + 0,28)}{2048 \cdot (1 + 0,20)} = 16,9$$

$$E_{\text{Äquiv}} = E_{\text{Beton}} \cdot \left(1 + \mu_{\text{min}} \cdot \left(\frac{E_{\text{Stahl}}}{E_{\text{Beton}}} - 1 \right) \right) = 32500 \cdot \left(1 + 0,005 \cdot \left(\frac{21 \cdot 10^4}{32500} - 1 \right) \right) = 32509 \text{ MPa}$$

$$\nu_{\text{Äquiv}} = \nu_{\text{Beton}} \cdot \left(1 + \mu_{\text{min}} \cdot \left(\frac{\nu_{\text{Stahl}}}{\nu_{\text{Beton}}} - 1 \right) \right) = 0,2 \cdot \left(1 + 0,005 \cdot \left(\frac{0,3}{0,2} - 1 \right) \right) = 0,20$$

$$E_{\text{Fels}} = K_0 \cdot (1 + \nu_{\text{Fels}}) = 1600 \cdot (1 + 0,28) = 2048 \text{ [MPa]}$$

$$\nu_{\text{Fels}} = 0,28 - \text{Poissonzahl für Fels}$$

$$\nu_{\text{Beton}} = 0,2 - \text{Poissonzahl für Beton}$$

$$\nu_{\text{Stahl}} = 0,3 - \text{Poissonzahl für Stahl}$$

8.3.1.6 Zulässige Spannungen

8.3.1.6.1 Bauzeit

$\sigma_{1,2} \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug(Druck)}}$, wobei γ_c und γ_n von oben abgelesen werden

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = \frac{1}{1,25 \cdot 0,95} \cdot 1,2 = 1,01 \text{ [MPa]}$$

$R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = 1,2 \text{ [MPa]}$ – Zugfestigkeit des Betons B30

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Druck}} = \frac{1}{1,25 \cdot 0,95} \cdot 17 = 14,32 \text{ [MPa]}$$

$R_{\text{Beton}}^{\text{Druck}} = 17 \text{ [MPa]}$ – Druckfestigkeit des Betons B30

8.3.1.6.2 Betriebszeit

- Übliche Lasten

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = \frac{1}{1,25 \cdot 1} \cdot 1,2 = 0,96 \text{ [MPa]}$$

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Druck}} = \frac{1}{1,25 \cdot 1} \cdot 17 = 13,60 \text{ [MPa]}$$

- Besondere Lasten

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = \frac{1,2}{1,25 \cdot 0,9} \cdot 1,2 = 1,28 \text{ [MPa]}$$

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Druck}} = \frac{1,2}{1,25 \cdot 0,9} \cdot 17 = 18,13 \text{ [MPa]}$$

Die maximalen Druckspannungen in der Auskleidung sind größer als die zulässigen Spannungen aber ist angenommen, dass während der Bauzeit ein Teil von den Lasten von der Abstützung übernommen sein können und deshalb ist keine zusätzliche Bemessung der Auskleidung. Wenn aber das Gebirge trocken ist und es keinen Außenwasserdruck $p_e = 0$ gibt, dann werden die Zugspannungen größer und ist eine zusätzliche Bewehrung des Querschnitts erforderlich.

Maßgebend ist die Bemessung am Ende des Abschnitts für maximalen Innwasserdruck.



Tab. 8-9 Biegemomente und Normalkräfte während der Bauzeit- für maximale Überlagerungshöhe

Tabelle	q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		g _{Berechnung}		p _{e, Berechnung}		q _{s, Berechnung}		e _{s, Berechnung}		g _{s, Berechnung}		
	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	
	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	
Schnitt	1	15.38	87.52	0.00	0.00	0.83	23.19	-1.51	4126.20	0.46	2.63	0.00	0.00	0.03	0.87
	2	-10.85	132.97	0.00	0.00	-0.65	28.99	1.01	4125.20	-0.33	3.99	0.00	0.00	-0.02	1.09
	3	0.75	166.50	0.00	0.00	0.19	51.04	-0.30	4125.69	0.02	4.99	0.00	0.00	0.01	1.91
	4	2.45	166.05	0.00	0.00	-2.06	70.84	3.36	4124.30	0.07	4.98	0.00	0.00	-0.08	2.66
	5	-1.57	167.35	0.00	0.00	3.61	77.60	-5.99	4127.84	-0.05	5.02	0.00	0.00	0.14	2.91

Табл. 8-10 Spannungen während der Bauzeit - für maximale Überlagerungshöhe

Tabelle	q _{Ber}		e _{Ber}		g _{Ber}		p _{eBer}		q _{s, Bere}		E _{s, Ber}		g _{s, Bere}		q _{ber} +e _{ber} +g _{ber} +p _{eber}		Σ(x _{i, ber})+Σ(x _{i, ber})		
	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	
	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
Schnitt	1	-733.6	1317.1	0.0	0.0	21.8	132.8	13854.4	13653.6	-22.0	39.5	0.0	0.0	0.8	5.0	13142.6	15103.5	13121.4	15148.0
	2	1166.6	-280.2	0.0	0.0	139.9	53.4	13683.1	13818.2	35.0	-8.4	0.0	0.0	5.2	2.0	14989.5	13591.5	15029.8	13585.1
	3	504.7	605.3	0.0	0.0	157.5	182.7	13772.4	13732.2	15.1	18.2	0.0	0.0	5.9	6.9	14434.6	14520.2	14455.7	14545.2
	4	390.3	716.7	0.0	0.0	373.5	98.8	13523.5	13971.9	11.7	21.5	0.0	0.0	14.0	3.7	14287.2	14787.5	14312.9	14812.7
	5	662.8	452.9	0.0	0.0	17.8	499.5	14159.0	13359.9	19.9	13.6	0.0	0.0	0.7	18.7	14839.6	14312.3	14860.2	14344.7



Tab. 8-11 Biegemomente und Normalkräfte während der Betriebszeit - für maximale Überlagerungshöhe

Tabelle	q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		g _{Berechnung}		p _{e, Berechnung}		q _{s, Berechnung}		e _{s, Berechnung}		g _{s, Berechnung}		q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		
	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	
	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	
Schnitt	1	15.38	87.52	0.00	0.00	0.62	17.39	-1.51	3376.89	1.51	-7.57	0.51	2.89	0.00	0.00	0.03	0.87	1.51	-7.57
	2	-10.85	132.97	0.00	0.00	-0.49	21.74	1.01	3375.88	-1.01	-6.74	-0.36	4.39	0.00	0.00	-0.02	1.09	-1.01	-6.74
	3	0.75	166.50	0.00	0.00	0.14	38.28	-0.30	3376.38	0.30	-7.15	0.02	5.49	0.00	0.00	0.01	1.91	0.30	-7.15
	4	2.45	166.05	0.00	0.00	-1.54	53.13	3.36	3374.99	-3.36	-6.00	0.08	5.48	0.00	0.00	-0.08	2.66	-3.36	-6.00
	5	-1.57	167.35	0.00	0.00	2.71	58.20	-5.99	3378.53	5.99	-8.93	-0.05	5.52	0.00	0.00	0.14	2.91	5.99	-8.93

Tab. 8-12 Spannungen während der Betriebszeit - für maximale Überlagerungshöhe

Tabelle	q _{Ber}		e _{Ber}		g _{Ber}		p _{e, Ber}		p _{i, Ber}		q _{s, Ber}		e _{s, изчисл}		g _{s, Ber}		p _{i, Ber}		q _{Ber} +e _{Ber} +g _{Ber} +p _{e, Ber}		Σ(x _{i, Ber})+Σ(x _{i,c, Ber})		p _i		Total.		
	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	
	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
Schnitt	1	-734	1317	0	0	16	100	11357	11156	-126	75	-24	43	0	0	1	5	-126	75	10514	12648	10365	12771	-3757	-3391	6757	9257
	2	1167	-280	0	0	105	40	11185	11321	45	-90	38	-9	0	0	5	2	45	-90	12502	10990	12591	10893	-3757	-3391	8745	7600
	3	505	605	0	0	118	137	11275	11235	-44	-4	17	20	0	0	6	7	-44	-4	11854	11973	11832	11996	-3757	-3391	8097	8582
	4	390	717	0	0	280	74	11026	11474	204	-244	13	24	0	0	14	4	204	-244	11900	12021	12131	11804	-3757	-3391	8144	8630
	5	663	453	0	0	13	375	11661	10862	-429	370	22	15	0	0	1	19	-429	370	11908	12060	11501	12463	-3757	-3391	8151	8669



Tab. 8-12 Biegemomente und Normalkräfte während der Bauzeit am Ende des Abschnitts

Tabelle	Q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		g _{Berechnung}		p _{e, Berechnung}		q _{s, Berechnung}		e _{s, Berechnung}		g _{s, Berechnung}		
	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	
	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	
Schnitt	1	15.38	87.52	0.00	0.00	0.83	23.19	-1.51	3957.42	0.46	2.63	0.00	0.00	0.03	0.87
	2	-10.85	132.97	0.00	0.00	-0.65	28.99	1.01	3956.42	-0.33	3.99	0.00	0.00	-0.02	1.09
	3	0.75	166.50	0.00	0.00	0.19	51.04	-0.30	3956.92	0.02	4.99	0.00	0.00	0.01	1.91
	4	2.45	166.05	0.00	0.00	-2.06	70.84	3.36	3955.53	0.07	4.98	0.00	0.00	-0.08	2.66
	5	-1.57	167.35	0.00	0.00	3.61	77.60	-5.99	3959.06	-0.05	5.02	0.00	0.00	0.14	2.91

Tab. 8-13 Spannungen während der Bauzeit - am Ende des Abschnitts

Tabelle	q _{Ber}		e _{Ber}		g _{Ber}		p _{eBer}		q _{s, Bere}		E _{s, Ber}		g _{s, Bere}		q _{ber} +e _{ber} +g _{ber} +p _{eber}		Σ(x _{i, ber})+Σ(x _{i, ber})		
	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	
	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
Schnitt	1	-733.6	1317.1	0.0	0.0	21.8	132.8	13291.8	13091.0	-22.0	39.5	0.0	0.0	0.8	5.0	12580.0	14540.9	12558.8	14585.4
	2	1166.6	-280.2	0.0	0.0	139.9	53.4	13120.5	13255.7	35.0	-8.4	0.0	0.0	5.2	2.0	14427.0	13028.9	14467.2	13022.5
	3	504.7	605.3	0.0	0.0	157.5	182.7	13209.8	13169.6	15.1	18.2	0.0	0.0	5.9	6.9	13872.0	13957.7	13893.1	13982.7
	4	390.3	716.7	0.0	0.0	373.5	98.8	12960.9	13409.3	11.7	21.5	0.0	0.0	14.0	3.7	13724.6	14224.9	13750.3	14250.1
	5	662.8	452.9	0.0	0.0	17.8	499.5	13596.4	12797.4	19.9	13.6	0.0	0.0	0.7	18.7	14277.1	13749.8	14297.6	13782.1



Tab. 8-14 Biegemomente und Normalkräfte während der Betriebszeit- am Ende des Abschnitts

Tabelle	Q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		g _{Berechnung}		p _{e, Berechnung}		Q _{s, Berechnung}		e _{s, Berechnung}		g _{s, Berechnung}		Q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		
	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	
	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	
Schnitt	1	15.38	87.52	0.00	0.00	0.62	17.39	-1.51	3239.70	1.51	-7.57	0.51	2.89	0.00	0.00	0.03	0.87	1.51	-7.57
	2	-10.85	132.97	0.00	0.00	-0.49	21.74	1.01	3238.70	-1.01	-6.74	-0.36	4.39	0.00	0.00	-0.02	1.09	-1.01	-6.74
	3	0.75	166.50	0.00	0.00	0.14	38.28	-0.30	3239.20	0.30	-7.15	0.02	5.49	0.00	0.00	0.01	1.91	0.30	-7.15
	4	2.45	166.05	0.00	0.00	-1.54	53.13	3.36	3237.81	-3.36	-6.00	0.08	5.48	0.00	0.00	-0.08	2.66	-3.36	-6.00
	5	-1.57	167.35	0.00	0.00	2.71	58.20	-5.99	3241.34	5.99	-8.93	-0.05	5.52	0.00	0.00	0.14	2.91	5.99	-8.93

Tab. 8-15 Spannungen während der Betriebszeit- am Ende des Abschnitts

Tabelle	q _{Ber}		e _{Ber}		g _{Ber}		p _{e, Ber}		p _{i, Ber}		q _{s, Ber}		e _{s, изчисл}		g _{s, Ber}		p _{i, Ber}		q _{Ber} +e _{Ber} +g _{Ber} +p _{e, Ber}		Σ(x _{i, Ber})+Σ(x _{i,c, Ber})		p _i		Total.		
	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	
	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
Schnitt	1	-734	1317	0	0	16	100	10899	10699	-126	75	-24	43	0	0	1	5	-126	75	10057	12190	9908	12314	-3764	-3397	6293	8793
	2	1167	-280	0	0	105	40	10728	10863	45	-90	38	-9	0	0	5	2	45	-90	12045	10533	12134	10436	-3764	-3397	8281	7136
	3	505	605	0	0	118	137	10817	10777	-44	-4	17	20	0	0	6	7	-44	-4	11396	11516	11375	11539	-3764	-3397	7632	8119
	4	390	717	0	0	280	74	10568	11017	204	-244	13	24	0	0	14	4	204	-244	11443	11564	11674	11347	-3764	-3397	7679	8166
	5	663	453	0	0	13	375	11204	10405	-429	370	22	15	0	0	1	19	-429	370	11451	11602	11044	12006	-3764	-3397	7687	8205

8.3.2 Bemessung der Bewehrung

Die Bewehrung ist mit Außenwasserdruck von $p_e = 0$ bemessen. In diesem Fall entstehen maximale Zugspannungen:

		übliche		Besondere	
		σ_1	σ_2	σ_1	σ_2
		kPa	kPa	kPa	kPa
Schnitt	1	-4607	-1905	-4756	-1782
	2	-2447	-3727	-2358	-3825
	3	-3185	-2659	-3206	-2635
	4	-2889	-2850	-2658	-3067
	5	-3517	-2200	-3924	-1796

- Maximale Spannungen:

$$\sigma_1 = -4756 \text{ [kPa]} \quad \sigma_2 = -1782 \text{ [kPa]}$$

Es gibt drei Möglichkeiten für die Position der Normalkraft.

8.3.2.1 Zentrischer Zug

Für die maximale Spannung $\sigma_1 = -4756 \text{ [kPa]}$ wird die Resultierende berechnet:

$$F_{\text{Auskleidung}} = d_{\text{Auskleidung}} \cdot b = 0,3 \cdot 100 \cdot 1.300 = 3000 \text{ [cm}^2\text{]} - \text{Fläche der Auskleidung}$$

für Länge des Druckstollens $b = 100 \text{ cm}$

- Resultierende:

$$N_{\text{Zug}} = \sigma_1 \cdot F_{\text{Auskleidung}} = 4756 \cdot 10^{-4} \cdot 3000 = 1426,74 \text{ [kN]}$$

$$R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}} = 390 \text{ [MPa]} - \text{Zugfestigkeit des Stahls}$$

- Fläche der Bewehrung:

$$F_a = \frac{\gamma_m \cdot \gamma_n \cdot N_{\text{Zug}}}{\gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}}} = \frac{1,1 \cdot 1,25 \cdot 1426,74}{1,1 \cdot 390 \cdot 10^3} \cdot 10^4 = 41,6 \text{ [cm}^2\text{/m]}$$

$$\gamma_c = 1,1 \quad \gamma_n = 1,25 \quad \gamma_m = 1$$



8.3.2.2 Zug mit kleiner Exzentrizität

Die Normalkraft wird zwischen der Flächen der Zug- und Druckbewehrung verteilt.

F_a und F'_a .

$a = a' = 0,05$ [m] – Betonüberdeckung

$h_o = d_{\text{Auskleidung}} - a = 0,3 - 0,05 = 0,25$ [m]

$e_o = \frac{M}{N} = \frac{22,305}{980,7} = 0,022$ [m] – Exzentrizität der Normalkraft

Der Biegemoment M und die Normalkraft N sind durch folgende Formel berechnet:

$$\left| \begin{array}{l} \sigma_1 = \frac{N}{F} - \frac{M}{W} \\ \sigma_2 = \frac{N}{F} + \frac{M}{W} \end{array} \right. \quad \left| \begin{array}{l} -4756 = \frac{N}{0,3} - \frac{M}{0,0150} \\ -1782 = \frac{N}{0,30} + \frac{M}{0,0150} \end{array} \right.$$

$M = 22,305$ kNm

$N = -980,7$ kN

- Abstand der Normalkraft N von der Druckbewehrung

$e' = 0,5 \cdot (h_o - a') - e_o = 0,5 \cdot (0,25 - 0,05) - 0,022 = 0,078$ [m]

- Abstand der Normalkraft N von der Zugbewehrung

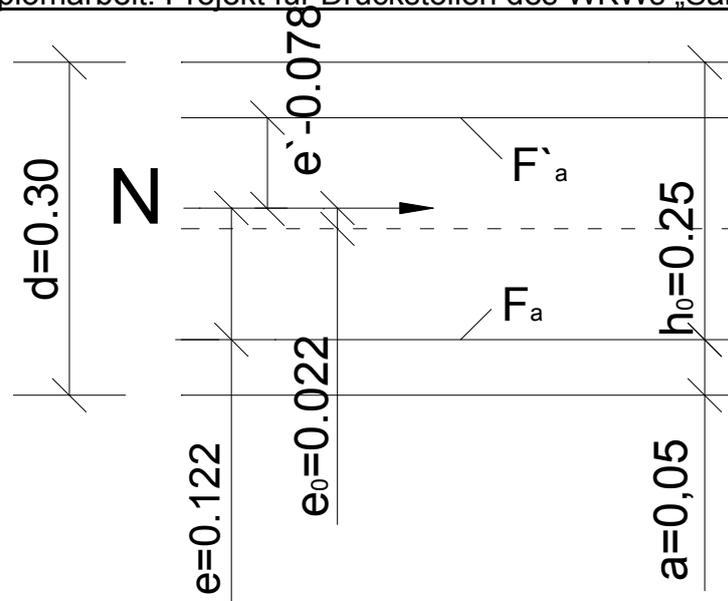
$e = 0,5 \cdot (h_o - a) + e_o = 0,5 \cdot (0,25 - 0,05) + 0,022 = 0,122$ [m]

- Fläche der Zugbewehrung.

$F_a = \frac{\gamma_m \cdot \gamma_n \cdot N \cdot e}{\gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}} \cdot (h_o - a)} = \frac{1,1,25 \cdot 982,8 \cdot 0,122}{1,1 \cdot 390 \cdot 10^3 \cdot (0,25 - 0,05)} \cdot 10^{-4} = 17,52$ [cm² / m¹]

- Fläche der Druckbewehrung

$F'_a = \frac{\gamma_m \cdot \gamma_n \cdot N \cdot e'}{\gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Druck}} \cdot (h_o - a)} = \frac{1,1,25 \cdot 982,8 \cdot 0,078}{1,1 \cdot 390 \cdot 10^3 \cdot (0,25 - 0,05)} \cdot 10^{-4} = 11,11$ [cm² / m¹]



8.3.2.3 Zug mit großer Exzentrizität– Das ist ein Fall, der hier nicht auftreten kann, deshalb ist er nicht berechnet.

Der massgebende Bemessungsfall trifft bei Zug mit keiner Exzentrizität auf, mit einer entsprechenden Bewehrung gleich:

$$F_a = 17,52 [\text{cm}^2 / \text{m}] \quad F'_a = 11,11 [\text{cm}^2 / \text{m}]$$

Angenommen:

- Zugbewehrung: 9 x N 16/11,11 cm $F=18,086 \text{ cm}^2$
- Druckbewehrung 9 x N 14 /11,11 cm $F=13,847 \text{ cm}^2$

$$\mu = \frac{F_a + F'_a}{F_{\text{Beton}}} = \frac{18,436 + 13,565}{3000} = \frac{31,933}{3000} = 0,0107 = 1,06\%$$

- Konstruktive Bewehrung : 2x5 N10/20 cm
- Bügel : $\Phi 8/25$ cm

8.3.3 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

8.3.3.1 Mittlere Rissbreite

$$\begin{aligned} a &= 7,7 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \eta \cdot \frac{\sigma_{\text{Stahl}} - \sigma_o}{E_{\text{Stahl}}} \cdot (4 - 100 \cdot \mu) \cdot \sqrt{d} = \\ &= 7,7 \cdot 1,1 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot \frac{60,47 - 20}{210000} \cdot (4 - 100 \cdot 0,0107) \cdot \sqrt{16} = 0,031 [\text{mm}] \end{aligned}$$



$$\alpha = 1,1 \quad \beta = 1,2 \quad \eta = 1,0$$

$\sigma_0 = 20$ [MPa] – Angenommene Anfangsspannung in der Bewehrung

$d = 16$ [mm] – Durchmesser des Bewehrungsstahls

$\mu = 0,0106$ – Bewehrungsanteil

$E_{\text{Stahl}} = 210000$ [MPa]

$$\sigma_{\text{Stahl}} = \frac{p_i \cdot r_1}{F_a + \frac{K_0 \cdot r_1}{E_{\text{Stahl}}}} = \frac{0,524 \cdot 305}{0,31933 + \frac{1000 \cdot 305}{2100000}} = 60,47 \text{ [MPa]}$$

$$p_i = 0,524 \text{ [MPa]}$$

$$K_0 = 1600 \text{ [N/m}^3 \cdot 10^5\text{]}$$

$$F_a = 0,31933 \text{ [cm}^2 / \text{cm}^3\text{]} \quad r_1 = 305 \text{ [cm]}$$

$$E_{\text{Stahl}} = 2100000 \text{ [N/m}^2 \cdot 10^5\text{]}$$

Die maximale Rissbreite hängt von: Hydraulischem Gradient, Wasserhärte, maximalem W/Z-Wert, Anzahl der Cl^- und SO_4^{2-} -Ionen, Durchlässigkeitsbeiwert des Felses, Klasse der Anlage ab.

- Hydraulischer Gradient

$$J = \frac{H_i - H_e}{d_{\text{Auskleidung}}} = \frac{52,4 - 107,145}{0,3} = -182,5$$

- Hydraulischer Gradient ohne Außenwasserdruck:

$$J = \frac{H_i}{d_{\text{Auskleidung}}} = \frac{52,4}{0,30} = 174,7$$

Es werden folgende Annahmen gemacht:

- Wasserhärte : $0,25 \text{ [g/dm}^3 \cdot 10^{-3}\text{]}, \text{ [mg/l]}$
- Hydraulischer Gradient : $50 < J = 174,7 < 300$
- Durchlässigkeitsbeiwert des Felses $k_{\text{Fels}} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ [cm/s]}$
- Maximaler W/Z- Wert -0,5
- Anlage- Klasse - I
- Anzahl der Cl^- und SO_4^{2-} Ionen - $400 - 1000 \text{ [mg/l]}$

Maximale zulässige Rissbreite: $0,06 \text{ [mm]}$:



8.3.3.2 Anzahl der Risse

$$n = \frac{16 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot \mu}{d} = \frac{16 \cdot \pi \cdot 335 \cdot 0,0107}{1,6} = 110$$

8.3.3.3 Sickerung durch die Auskleidung

$$Q = \frac{1}{\frac{d_{\text{Auskleidung}}}{k \cdot n} + \frac{1}{k_{\text{Fels}} \cdot M_{\text{F}}}} = \frac{1}{\frac{0,30}{3,053 \cdot 10^{-5} \cdot 110} + \frac{1}{4 \cdot 10^{-5} \cdot 2,84}} = 6,31 \cdot 10^{-5} \text{ [l/s] , wobei}$$

- $k = a^3 = 0,031^3 = 0,00003053 = 3,053 \cdot 10^{-5}$ – Durchlässigkeitsbeiwert
- $n = 110$ – Anzahl der Risse
- $d_{\text{Auskleidung}} = 0,30 \text{ [m]}$ – Dicke der Auskleidung
- $k_{\text{Fels}} \geq 4 \cdot 10^{-5} \text{ [cm/s]}$ – Durchlässigkeitsbeiwert des Felses
- $M_{\text{F}} = \frac{2 \cdot \pi}{\ln\left(\frac{R}{r_2}\right)} = \frac{2 \cdot \pi}{\ln\left(\frac{30,5}{3,35}\right)} = 2,84$ – Filtrationsmodul
- $R = 10 \cdot r_1 = 10 \cdot 3,05 = 30,5 \text{ [m]}$ – Radius der wassergesättigten Zone

Die Formel ist bei mehr als 35 Rissen gültig.

$Q_{\text{zulässig}} = 1 \text{ [l/s]}$ – für 1000 m^2 von der Druckstollenfläche, wenn
 der Innenwasserdruck $H_i < 100 \text{ m}$ ist

Die Sickerung soll kleiner sein als:

$$Q' = 2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot Q_{\text{zulässig}} \cdot 10^{-7} = 2,10 \cdot 10^{-4} \text{ [l/s]} > 6,31 \cdot 10^{-5}$$

$$\Rightarrow Q < Q'$$



8.4 Abschnitt 4

- $L_{\text{Abschnitt}} = 0,15 \cdot L_{\text{Druckstollen}} = 0,15 \cdot 1019,81 = 153 \text{ m}$
- $f = 5 \Rightarrow K_0 = 2000 \text{ N/cm}^2$
- $\varphi = \arctg(f) = 78,690^\circ$
- $\gamma_{\text{Fels}} = 24 \text{ kN/m}^3$

8.4.1 Minimale Dicke der ungerissenen Auskleidung

- $r_1 = \frac{D_{\text{Druckstollen}}}{2} = \frac{6,10}{2} = 3,05 \text{ [m]}$ – Innendurchmesser des Druckstollens
- $p = \gamma_{\text{Wasser}} \cdot H_{\text{WS}} = \frac{10 \cdot 53,61}{1000} = 0,5361 \text{ [MPa]}$ – Innenwasserdruck

Wobei:

$\gamma_{\text{Wasser}} = 10 \text{ [kN/m}^3\text{]}$ – Wichte des Wassers

$H_{\text{WS}} = 53,61 \text{ m}$ – Wasserspiegel beim höchsten Schwallspiegel der Wasserschlossschwungung

8.4.1.1 Notwendige Dicke der Auskleidung:

$$d_{\text{Auskleidung}} = r_1 \cdot \left(\frac{p}{\gamma_c \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}}} - \frac{K_0}{0,70 \cdot E_{\text{Beton}}} \right) = 3,05 \cdot \left(\frac{0,5361}{1,1,2} - \frac{2000}{0,70 \cdot 32500} \right) = 0,95 \text{ [m]},$$

wobei

$\gamma_c = 1$ – Arbeitsbedingungsbeiwert

$R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = 1,2 \text{ [MPa]}$ – Zugfestigkeit des Betons B30

$E_{\text{Beton}} = 32500 \text{ [MPa]}$ – Elastizitätsmodul des Betons B30

$$d_{\text{Auskleidung}}^{\text{max}} = 0,15 \cdot r_1 = 0,15 \cdot 3,05 = 0,4575 \text{ cm}$$

$d_{\text{Auskleidung}} > d_{\text{Auskleidung}}^{\text{max}} \Rightarrow$ andere Auskleidungskonstruktion ist notwendig



8.4.1.2 Minimale Dicke der ungerissenen Stahlbetonauskleidung

- Äquivalenter Elastizitätsmodul des Stahlbetons:

$$E_{\text{Äquiv}} = E_{\text{Beton}} \cdot \left(1 + \mu_{\text{max}} \cdot \left(\frac{E_{\text{Stahl}}}{E_{\text{Beton}}} - 1 \right) \right) = 32500 \cdot \left(1 + 0,02 \cdot \left(\frac{2,1 \cdot 10^5}{32500} - 1 \right) \right) = 36050 \text{ [MPa]}, \text{ wobei:}$$

$\mu_{\text{max}} = 0,02$ – Maximaler Bewehrungsanteil für ungerissene Auskleidung

$E_{\text{Stahl}} = 210000 \text{ [MPa]}$ – Elastizitätsmodul des Stahls

$\gamma_c = 1,1$ – Abgelesen von Tabelle

$$d_{\text{Auskleidung}} = \frac{r_1}{1 + 30 \cdot \frac{\mu_{\text{max}}}{R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}}}} \cdot \left(\frac{\rho}{\gamma_c \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}}} - \frac{K_0}{E_{\text{Äquiv}}} \right) = \frac{3,05}{1 + 30 \cdot \frac{0,02}{1,2}} \cdot \left(\frac{0,5361}{1,1 \cdot 1,2} - \frac{2000}{36050} \right) = 0,71 \text{ [m]}$$

$d_{\text{Auskleidung}} > d_{\text{Auskleidung}}^{\text{max}} \Rightarrow$ angenommen : $d_{\text{Auskleidung}} = 30 \text{ cm}$ - gerissene Auskleidung

$$h_{\text{notwendig}} = \frac{K_0 \cdot r_1 \cdot \gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}}}{r_2 \cdot \rho \cdot g \cdot \gamma_n \cdot E_{\text{Stahl}}} = \frac{2000 \cdot 3,05 \cdot 1,1 \cdot 390}{335 \cdot 0,0024 \cdot 9,81 \cdot 1,25 \cdot 210000} = 126,40 \text{ [m]}, \quad \text{wobei}$$

$r_1 = 3,05 \text{ [m]} = 305 \text{ [cm]}$ – Innendurchmesser

$r_2 = r_1 + d_{\text{Auskleidung}} = 3,05 + 0,30 = 3,35 \text{ [m]} = 335 \text{ [cm]}$

$\gamma_c = 1,1$ – Abgelesen von Tabelle

$R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}} = 390 \text{ [MPa]}$ – Zugfestigkeit des Stahls AIII

$\rho = 0,0024 \text{ [kg/cm}^3\text{]}$ – Dichte des Felses

$\gamma_n = 1,25$ – Abgelesen von Tabelle

$H_{\text{Überlagerung}} = 130,87 \text{ m} > h_{\text{notwendig}}$

$$F_a = \frac{\gamma_n \cdot \rho \cdot r_1}{\gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}}} - \frac{K_0 \cdot r_1}{E_{\text{Stahl}}} = \frac{1,25 \cdot 0,5361 \cdot 3,05}{1,1 \cdot 390} - \frac{2000 \cdot 3,05}{210000} = -0,0248 \text{ [cm}^2\text{/cm]}$$

- $\mu_{\text{min}} = 0,5\% = 0,005$



8.4.1.3 Wirkende Lasten

8.4.1.3.1 Bauzeit

- Vertikaler Gebirgsdruck

$$q = \gamma \cdot h_{\text{zerstört}} \cdot \beta = 24 \cdot 0,68 \cdot 0,8 = 13,056 \text{ [kN/m]}$$

$$q_{\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot q = 1,5 \cdot 13,056 = 19,584 \text{ [kN/m]}$$

- Eigengewicht

$$\gamma_{\text{Beton}} = 24 \text{ [kN/m}^3\text{]} - \text{Wichte des Betons}$$

$$g = d_{\text{Auskleidung}} \cdot \gamma_{\text{Beton}} = 0,3 \cdot 24 = 7,2 \text{ [kN/m]}$$

$$g_{\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot g = 1,2 \cdot 7,2 = 8,64 \text{ [kN/m]}$$

- Außenwasserdruck- für maximale Überlagerungshöhe

$$H_{\text{Wasser}} = 0,5 \cdot H_{\text{Überlagerung}} = 0,5 \cdot 214,29 = 107,145 \text{ [m]} - \text{Wassergesättigtes Gebirge}$$

$$p_e = \gamma_{\text{Wasser}} \cdot H_{\text{Wasser}} = \frac{10 \cdot 107,145}{1000} = 1,07 \text{ [MPa]}$$

$$p_{e,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot p_e = 1,1 \cdot 1,07 = 1,18 \text{ [MPa]}$$

- Außenwasserdruck- am Ende des Abschnitts

$$H_{\text{Wasser}} = 0,5 \cdot H_{\text{Überlagerung}} = 0,5 \cdot 130,87 = 65,435 \text{ [m]} - \text{Wassergesättigtes Gebirge}$$

$$p_e = \gamma_{\text{Wasser}} \cdot H_{\text{Wasser}} = \frac{10 \cdot 65,435}{1000} = 0,654 \text{ [MPa]}$$

$$p_{e,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot p_e = 1,1 \cdot 0,654 = 0,72 \text{ [MPa]}$$

- Seismische Lasten

- Vertikaler Gebirgsdruck - seismisch

$C = 1,5$ – Beiwert für die Klasse der Anlage

für I^{ste} Klasse = 1,5

$K_s = 0,1$ – Seismischer Beiwert – abgelesen von [2]

Tabelle.22 – "Wasserbautunnel" – Univ.Pr of.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989.

$K_h = 0,5$ – Überlagerungshöhebeiwert – abgelesen von [2]

Tabelle.23 – "Wasserbautunnel" – Univ.Pr of.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989

$$H_{\text{Überlagerung}}^{\text{Max}} = 214,29 \text{ m}$$

$$H_{\text{Überlagerung}}^{\text{Ende}} = 130,87 \text{ m}$$

$R = 0,60$ – Verhaltensbeiwert



$$K'_s = R \cdot c \cdot K_s \cdot K_h = 0,6 \cdot 1,5 \cdot 0,1 \cdot 0,5 = 0,045$$

$$q_s = q \cdot K'_s = 13,056 \cdot 0,045 = 0,588 \text{ [kN/m]}$$

$$q_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot q_s = 1,0 \cdot 0,588 = 0,588 \text{ [kN/m]}$$

- Eigengewicht- seismisch

$$g_s = g \cdot K'_s = 7,2 \cdot 0,045 = 0,324 \text{ [kN/m]}$$

$$g_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot g_s = 1,0 \cdot 0,324 = 0,324 \text{ [kN/m]}$$

8.4.1.3.2 Betriebszeit

- Vertikaler Gebirgsdruck

$$q = \gamma \cdot h_{\text{zerstört}} \cdot \beta = 24 \cdot 0,68 \cdot 0,8 = 13,056 \text{ [kN/m]}$$

$$q_{\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot q = 1,5 \cdot 13,056 = 19,584 \text{ [kN/m]}$$

- Eigengewicht

$$\gamma_{\text{Beton}} = 24 \text{ [kN/m}^3\text{]} \text{ – Wichte des Betons}$$

$$g = d_{\text{Auskleidung}} \cdot \gamma_{\text{Beton}} = 0,3 \cdot 24 = 7,2 \text{ [kN/m]}$$

$$g_{\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot g = 0,9 \cdot 7,2 = 6,48 \text{ [kN/m]}$$

- Außenwasserdruck- für maximale Überlagerungshöhe

$$H_{\text{Wasser}} = 0,5 \cdot H_{\text{Überlagerung}}^{\text{Druckstollen}} = 0,5 \cdot 214,29 = 107,145 \text{ [m]}$$

$$p_e = \gamma_{\text{Wasser}} \cdot H_{\text{Wasser}} = \frac{10 \cdot 107,145}{1000} = 1,07 \text{ [MPa]}$$

$$p_{e,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot p_e = 0,9 \cdot 1,07 = 0,964 \text{ [MPa]}$$

- Außenwasserdruck- am Ende des Abschnitts

$$H_{\text{Wasser}} = 0,5 \cdot H_{\text{Überlagerung}}^{\text{Druckstollen}} = 0,5 \cdot 130,87 = 65,435 \text{ [m]}$$

$$p_e = \gamma_B \cdot H_{\text{Wasser}} = \frac{10 \cdot 65,435}{1000} = 0,654 \text{ [MPa]}$$

$$p_{e,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot p_e = 0,9 \cdot 0,654 = 0,59 \text{ [MPa]}$$

- Innenwasserdruck – am Ende des Abschnitts

$$p_i \equiv p = 0,5361 \text{ [MPa]}$$

$$p_{i,\text{Berechnung}} \equiv \gamma_f p_i = 1,0 \cdot 0,5361 = 0,5361 \text{ [MPa]}$$



- Innenwasserdruck- für maximale Überlagerungshöhe

$$p_i \equiv p = 0,524 \text{ [MPa]}$$

$$p_{i,\text{Berechnung}} \equiv \gamma_f p_i = 1,0 \cdot 0,524 = 0,524 \text{ [MPa]}$$

- **Seismische Lasten**
- **Vertikaler Gebirgsdruck - seismisch**

$C = 1,5$ – Beiwert für die Klasse der Anlage
für I^{ste} Klasse = 1,5

$K_s = 0,1$ – Seismischer Beiwert – abgelesen von [2]

Tabelle.22 – "Wasserbautunnel" – Univ.Pr of.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989.

$K_h = 0,5$ – Überlagerungshöhebeiwert – abgelesen von [2]

Tabelle.23 – "Wasserbautunnel" – Univ.Pr of.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989

$$H_{\text{Überlagerung}}^{\text{Max}} = 214,29 \text{ m}$$

$$H_{\text{Überlagerung}}^{\text{Ende}} = 130,87 \text{ m}$$

$R = 0,60$ – Verhaltensbeiwert

$$K'_s = R \cdot c \cdot K_s \cdot K_h = 0,6 \cdot 1,5 \cdot 0,1 \cdot 0,5 = 0,045$$

$$q_s = q \cdot K'_s = 13,056 \cdot 0,045 = 0,588 \text{ [kN/m]}$$

$$q_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot q_s = 1,0 \cdot 0,588 = 0,588 \text{ [kN/m]}$$

- Eigengewicht- seismisch

$$g_s = g \cdot K'_s = 7,2 \cdot 0,045 = 0,324 \text{ [kN/m]}$$

$$g_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot g_s = 1,0 \cdot 0,324 = 0,324 \text{ [kN/m]}$$

- Innenwasserdruck- seismisch

$$p_{i,c} = 100 \cdot K'_s = 100 \cdot 0,045 = 4,5 \text{ [kN/m]}$$

$$p_{i,s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot p_{i,c} = 1,0 \cdot 4,5 = 4,5 \text{ [kN/m]}$$

8.4.1.4 Bemessung der Biegemomente und der Normalkräfte

Der Querschnitt ist als kreisförmig vorgesehen. Die Biegemomente und Zugkräfte sind in 5 Punkten berechnet. Der vertikale Gebirgsdruck und das Eigengewicht sind als gleichmäßig über den Querschnittsdurchmesser verteilt. Die



elastische Reaktion des Felses ist gleichmäßig über den Perimeter verteilt, wie es unten gezeigt ist.

Die Formeln für die Berechnung sind im 8.1.1.4 gezeigt:

8.4.1.5 Bemessung der Spannungen

$$\sigma_{1,2} = \frac{N}{F} \mp \frac{M}{W} \text{ [kPa] , wobei}$$

$F = b \cdot d_{\text{Auskleidung}} = 1,0,30 = 0,30 \text{ [m}^2\text{]} - \text{Fläche der Auskleidung für 1 m des Druckstollens}$

$$W = \frac{b \cdot d_{\text{Auskleidung}}^2}{6} = \frac{1,0,30^2}{6} = 0,0150 \text{ [m}^3\text{]}$$

Während der Betriebszeit (maximaler Innenwasserdruck) sind die Spannungen für alle Punkten des Querschnitts gleich:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (2 \cdot \varepsilon \cdot r_2^2 - (r_1^2 + r_2^2))}{r_2^2 - r_1^2} = \frac{0,5361 \cdot 10^3 \cdot (2 \cdot 0,38 \cdot 3,35^2 - (3,05^2 + 3,35^2))}{3,35^2 - 3,05^2} = -3349 \text{ [kPa]}$$

$$\sigma_2 = \frac{p \cdot (\varepsilon \cdot (r_1^2 + r_2^2) - 2 \cdot r_1^2)}{r_2^2 - r_1^2} = \frac{0,5361 \cdot 10^3 \cdot (0,38 \cdot (3,05^2 + 3,35^2) - 2 \cdot 3,05^2)}{3,35^2 - 3,05^2} = -3017 \text{ kPa}$$

$\varepsilon = 0,38 - \text{abgelesen von [2] Tabelle.99 -}$

"Wasserbautunnel"- Univ.Pr of.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989

$$a = \frac{r_2}{r_1} = \frac{3,35}{3,05} = 1,10$$

$$c = \frac{E_{\text{Äquiv}} \cdot (1 + \nu_{\text{Fels}})}{E_{\text{Fels}} \cdot (1 + \nu_{\text{Äquiv}})} = \frac{32509 \cdot (1 + 0,28)}{2560 \cdot (1 + 0,20)} = 13,5$$

$$E_{\text{Äquiv}} = E_{\text{Beton}} \cdot \left(1 + \mu_{\text{min}} \cdot \left(\frac{E_{\text{Stahl}}}{E_{\text{Beton}}} - 1 \right) \right) = 32500 \cdot \left(1 + 0,005 \cdot \left(\frac{21 \cdot 10^4}{32500} - 1 \right) \right) = 32509 \text{ MPa}$$

$$\nu_{\text{Äquiv}} = \nu_{\text{Beton}} \cdot \left(1 + \mu_{\text{min}} \cdot \left(\frac{\nu_{\text{Stahl}}}{\nu_{\text{Beton}}} - 1 \right) \right) = 0,2 \cdot \left(1 + 0,005 \cdot \left(\frac{0,3}{0,2} - 1 \right) \right) = 0,20$$

$$E_{\text{Fels}} = K_0 \cdot (1 + \nu_{\text{Fels}}) = 2000 \cdot (1 + 0,28) = 2560 \text{ [MPa]}$$

$\nu_{\text{Fels}} = 0,28 - \text{Poissonzahl für Fels}$

$\nu_{\text{Beton}} = 0,2 - \text{Poissonzahl für Beton}$

$\nu_{\text{Stahl}} = 0,3 - \text{Poissonzahl für Stahl}$

8.4.1.6 Zulässige Spannungen

8.4.1.6.1 Bauzeit

$\sigma_{1,2} \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug(Druck)}}$, wobei γ_c und γ_n von oben abgelesen werden

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = \frac{1}{1,25 \cdot 0,95} \cdot 1,2 = 1,01 \text{ [MPa]}$$

$R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = 1,2 \text{ [MPa]}$ – Zugfestigkeit des Betons B30

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Druck}} = \frac{1}{1,25 \cdot 0,95} \cdot 17 = 14,32 \text{ [MPa]}$$

$R_{\text{Beton}}^{\text{Druck}} = 17 \text{ [MPa]}$ – Druckfestigkeit des Betons B30

8.4.1.6.2 Betriebszeit

- Übliche Lasten

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = \frac{1}{1,25 \cdot 1} \cdot 1,2 = 0,96 \text{ [MPa]}$$

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Druck}} = \frac{1}{1,25 \cdot 1} \cdot 17 = 13,60 \text{ [MPa]}$$

- Besondere Lasten

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = \frac{1,2}{1,25 \cdot 0,9} \cdot 1,2 = 1,28 \text{ [MPa]}$$

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Druck}} = \frac{1,2}{1,25 \cdot 0,9} \cdot 17 = 18,13 \text{ [MPa]}.$$

Die maximalen Druckspannungen in der Auskleidung sind kleiner als die zulässigen Spannungen. Wenn aber das Gebirge trocken ist und es keinen Außenwasserdruck $p_e = 0$ gibt, dann werden die Zugspannungen größer und ist eine zusätzliche Bewehrung des Querschnitts erforderlich.

Maßgebend ist die Bemessung am Ende des Abschnitts – max. Innwasserdruck.



Tab. 8-16 Biegemomente und Normalkräfte während der Bauzeit- für maximale Überlagerungshöhe

Tabelle		Q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		g _{Berechnung}		p _{e, Berechnung}		q _{s, Berechnung}		e _{s, Berechnung}		g _{s, Berechnung}	
		M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N
		kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN
Schnitt	1	6.91	40.57	0.00	0.00	0.71	23.31	-1.29	3957.18	0.21	1.22	0.00	0.00	0.03	0.87
	2	-5.03	61.49	0.00	0.00	-0.66	29.07	1.04	3956.25	-0.15	1.84	0.00	0.00	-0.02	1.09
	3	0.57	76.89	0.00	0.00	0.34	51.07	-0.55	3956.85	0.02	2.31	0.00	0.00	0.01	1.92
	4	1.14	76.76	0.00	0.00	-2.06	70.92	3.36	3955.37	0.03	2.30	0.00	0.00	-0.08	2.66
	5	-0.95	77.43	0.00	0.00	3.46	77.73	-5.74	3958.81	-0.03	2.32	0.00	0.00	0.13	2.91

Tab. 8-17 Spannungen während der Bauzeit - für maximale Überlagerungshöhe

Tabelle		q _{Ber}		e _{Ber}		g _{Ber}		p _{eBer}		q _{s, Bere}		E _{s, Ber}		g _{s, Bere}		q _{ber} +e _{ber} +g _{ber} +p _{eber}		Σ(x _{i, ber})+Σ(x _{i, ber})	
		σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2
		kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
Schnitt	1	-325.5	596.0	0.0	0.0	30.7	124.7	13276.8	13104.4	-9.8	17.9	0.0	0.0	1.2	4.7	12982.0	13825.2	12973.3	13847.7
	2	540.3	-130.4	0.0	0.0	141.2	52.7	13118.2	13256.8	16.2	-3.9	0.0	0.0	5.3	2.0	13799.7	13179.1	13821.2	13177.1
	3	218.4	294.2	0.0	0.0	147.7	192.8	13226.3	13152.7	6.6	8.8	0.0	0.0	5.5	7.2	13592.4	13639.7	13604.5	13655.8
	4	180.1	331.6	0.0	0.0	373.4	99.3	12960.8	13408.3	5.4	9.9	0.0	0.0	14.0	3.7	13514.4	13839.3	13533.8	13852.9
	5	321.5	194.7	0.0	0.0	28.3	489.9	13578.6	12813.5	9.6	5.8	0.0	0.0	1.1	18.4	13928.4	13498.1	13939.1	13522.3



Tab. 8-18 Biegemomente und Normalkräfte während der Betriebszeit - für maximale Überlagerungshöhe

Tabelle	Q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		g _{Berechnung}		p _{e, Berechnung}		Q _{s, Berechnung}		e _{s, Berechnung}		g _{s, Berechnung}		Q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		
	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	
	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	
Schnitt	1	6.91	40.57	0.00	0.00	0.53	17.48	-1.29	3239.31	1.29	-7.37	0.21	1.22	0.00	0.00	0.03	0.87	1.29	-7.37
	2	-5.03	61.49	0.00	0.00	-0.50	21.80	1.04	3238.38	-1.04	-6.60	-0.15	1.84	0.00	0.00	-0.02	1.09	-1.04	-6.60
	3	0.57	76.89	0.00	0.00	0.25	38.30	-0.55	3238.98	0.55	-7.09	0.02	2.31	0.00	0.00	0.01	1.92	0.55	-7.09
	4	1.14	76.76	0.00	0.00	-1.54	53.19	3.36	3237.50	-3.36	-5.87	0.03	2.30	0.00	0.00	-0.08	2.66	-3.36	-5.87
	5	-0.95	77.43	0.00	0.00	2.60	58.30	-5.74	3240.94	5.74	-8.72	-0.03	2.32	0.00	0.00	0.13	2.91	5.74	-8.72

Tab. 8-19 Spannungen während der Betriebszeit - für maximale Überlagerungshöhe

Tabelle	q _{Ber}		e _{Ber}		g _{Ber}		p _{e, Ber}		p _{i, Ber}		q _{s, Ber}		e _{s, изчисл}		g _{s, Ber}		p _{i, Ber}		q _{Ber} +e _{Ber} +g _{Ber} +p _{e, Ber}		Σ(x _{i, Ber})+Σ(x _{i,c, Ber})		p _i		Total.		
	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	
	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
Schnitt	1	-326	596	0	0	23	94	10884	10712	-111	62	-10	18	0	0	1	5	-111	62	10471	11463	10351	11547	-3274	-2949	7197	8514
	2	540	-130	0	0	106	39	10725	10864	47	-91	16	-4	0	0	5	2	47	-91	11419	10682	11488	10588	-3274	-2949	8145	7733
	3	218	294	0	0	111	145	10833	10760	-60	13	7	9	0	0	6	7	-60	13	11102	11212	11054	11241	-3274	-2949	7828	8263
	4	180	332	0	0	280	75	10568	11015	204	-243	5	10	0	0	14	4	204	-243	11232	11178	11456	10949	-3274	-2949	7958	8229
	5	321	195	0	0	21	367	11186	10421	-412	354	10	6	0	0	1	18	-412	354	11117	11336	10716	11714	-3274	-2949	7843	8387



Tab. 8-20 Biegemomente und Normalkräfte während der Bauzeit am Ende des Abschnitts

Tabelle		Q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		g _{Berechnung}		p _{e, Berechnung}		q _{s, Berechnung}		e _{s, Berechnung}		g _{s, Berechnung}	
		M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N
		kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN
Schnitt	1	6.91	40.57	0.00	0.00	0.71	23.31	-1.29	2420.17	0.21	1.22	0.00	0.00	0.03	0.87
	2	-5.03	61.49	0.00	0.00	-0.66	29.07	1.04	2419.24	-0.15	1.84	0.00	0.00	-0.02	1.09
	3	0.57	76.89	0.00	0.00	0.34	51.07	-0.55	2419.84	0.02	2.31	0.00	0.00	0.01	1.92
	4	1.14	76.76	0.00	0.00	-2.06	70.92	3.36	2418.36	0.03	2.30	0.00	0.00	-0.08	2.66
	5	-0.95	77.43	0.00	0.00	3.46	77.73	-5.74	2421.79	-0.03	2.32	0.00	0.00	0.13	2.91

Tab. 8-21 Spannungen während der Bauzeit - am Ende des Abschnitts

Tabelle		q _{Ber}		e _{Ber}		g _{Ber}		p _{eBer}		q _{s, Bere}		E _{s, Ber}		g _{s, Bere}		q _{ber} +e _{ber} +g _{ber} +p _{eber}		Σ(x _{i, ber})+Σ(x _{i, ber})	
		σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2
		kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
Schnitt	1	-326	596	0	0	31	125	8153	7981	-10	18	0	0	1	5	7859	8702	7850	8724
	2	540	-130	0	0	141	53	7995	8133	16	-4	0	0	5	2	8676	8056	8698	8054
	3	218	294	0	0	148	193	8103	8029	7	9	0	0	6	7	8469	8516	8481	8532
	4	180	332	0	0	373	99	7837	8285	5	10	0	0	14	4	8391	8716	8410	8730
	5	321	195	0	0	28	490	8455	7690	10	6	0	0	1	18	8805	8375	8816	8399



Tab. 8-22 Biegemomente und Normalkräfte während der Betriebszeit- am Ende des Abschnitts

Tabelle	Q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		g _{Berechnung}		p _{e, Berechnung}		q _{s, Berechnung}		e _{s, Berechnung}		g _{s, Berechnung}		Q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		
	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	
	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	
Schnitt	1	6.91	40.57	0.00	0.00	0.53	17.48	-1.29	1981.76	1.29	-7.37	0.21	1.22	0.00	0.00	0.03	0.87	1.29	-7.37
	2	-5.03	61.49	0.00	0.00	-0.50	21.80	1.04	1980.82	-1.04	-6.60	-0.15	1.84	0.00	0.00	-0.02	1.09	-1.04	-6.60
	3	0.57	76.89	0.00	0.00	0.25	38.30	-0.55	1981.42	0.55	-7.09	0.02	2.31	0.00	0.00	0.01	1.92	0.55	-7.09
	4	1.14	76.76	0.00	0.00	-1.54	53.19	3.36	1979.94	-3.36	-5.87	0.03	2.30	0.00	0.00	-0.08	2.66	-3.36	-5.87
	5	-0.95	77.43	0.00	0.00	2.60	58.30	-5.74	1983.38	5.74	-8.72	-0.03	2.32	0.00	0.00	0.13	2.91	5.74	-8.72

Tab. 8-23 Spannungen während der Betriebszeit- am Ende des Abschnitts

Tabelle	q _{Ber}		e _{Ber}		g _{Ber}		p _{e, Ber}		p _{i, Ber}		q _{s, Ber}		e _{s, изчисл}		g _{s, Ber}		p _{i, Ber}		q _{Ber} +e _{Ber} +g _{Ber} +p _{e, Ber}		Σ(x _{i, Ber})+Σ(x _{i,c, Ber})		p _i		Total.		
	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	
	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
Schnitt	1	-326	596	0	0	23	94	6692	6520	-111	62	-10	18	0	0	1	5	-111	62	6279	7271	6159	7355	-3349	-3017	2929	4254
	2	540	-130	0	0	106	39	6533	6672	47	-91	16	-4	0	0	5	2	47	-91	7227	6490	7296	6397	-3349	-3017	3877	3473
	3	218	294	0	0	111	145	6642	6568	-60	13	7	9	0	0	6	7	-60	13	6910	7020	6862	7049	-3349	-3017	3561	4003
	4	180	332	0	0	280	75	6376	6824	204	-243	5	10	0	0	14	4	204	-243	7040	6986	7264	6757	-3349	-3017	3691	3969
	5	321	195	0	0	21	367	6994	6229	-412	354	10	6	0	0	1	18	-412	354	6925	7144	6524	7522	-3349	-3017	3575	4127

8.4.2 Bemessung der Bewehrung

Die Bewehrung ist mit Außenwasserdruck von $p_e = 0$ bemessen. In diesem Fall entstehen maximale Zugspannungen:

		übliche		besondere	
		σ_1	σ_2	σ_1	σ_2
		kPa	kPa	kPa	kPa
Schnitt	1	-3763	-2266	-3882	-2182
	2	-2656	-3199	-2587	-3293
	3	-3081	-2565	-3129	-2536
	4	-2685	-2854	-2461	-3084
	5	-3418	-2101	-3819	-1724

- Maximale Spannungen:

$$\sigma_1 = -3882 \text{ [kPa]} \quad \sigma_2 = -2182 \text{ [kPa]}$$

Es gibt drei Möglichkeiten für die Position der Normalkraft.

8.4.2.1 Zentrischer Zug

Für die maximale Spannung $\sigma_1 = -3882 \text{ [kPa]}$ wird die Resultierende berechnet:

$$F_{\text{Auskleidung}} = d_{\text{Auskleidung}} \cdot b = 0,3 \cdot 100 \cdot 1.300 = 3000 \text{ [cm}^2\text{]} \text{ – Fläche der Auskleidung}$$

für Länge des Druckstollens $b = 100 \text{ cm}$

- Resultierende:

$$N_{\text{Zug}} = \sigma_1 \cdot F_{\text{Auskleidung}} = 3882 \cdot 10^{-4} \cdot 3000 = 1164,65 \text{ [kN]}$$

$$R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}} = 390 \text{ [MPa]} \text{ – Zugfestigkeit des Stahls}$$

- Fläche der Bewehrung:

$$F_a = \frac{\gamma_m \cdot \gamma_n \cdot N_{\text{Zug}}}{\gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}}} = \frac{1,1 \cdot 1,25 \cdot 1164,65}{1,1 \cdot 390 \cdot 10^3} \cdot 10^4 = 33,9 \text{ [cm}^2\text{ / m]}$$

$$\gamma_c = 1,1 \quad \gamma_n = 1,25 \quad \gamma_m = 1$$



8.4.2.2 Zug mit kleiner Exzentrizität

Die Normalkraft wird zwischen der Flächen der Zug- und Druckbewehrung verteilt.

F_a und F'_a .

$a = a' = 0,05$ [m] – Betonüberdeckung

$h_o = d_{\text{Auskleidung}} - a = 0,3 - 0,05 = 0,25$ [m]

$e_o = \frac{M}{N} = \frac{12,75}{909,6} = 0,014$ [m] – Exzentrizität der Normalkraft

Der Biegemoment M und die Normalkraft N sind durch folgende Formel berechnet:

$$\left| \begin{array}{l} \sigma_1 = \frac{N}{F} - \frac{M}{W} \\ \sigma_2 = \frac{N}{F} + \frac{M}{W} \end{array} \right. \quad \left| \begin{array}{l} -3882 = \frac{N}{0,3} - \frac{M}{0,0150} \\ -2182 = \frac{N}{0,30} + \frac{M}{0,0150} \end{array} \right.$$

$M = 12,75$ kNm

$N = -909,6$ kN

- Abstand der Normalkraft N von der Druckbewehrung

$e' = 0,5 \cdot (h_o - a') - e_o = 0,5 \cdot (0,25 - 0,05) - 0,014 = 0,086$ [m]

- Abstand der Normalkraft N von der Zugbewehrung

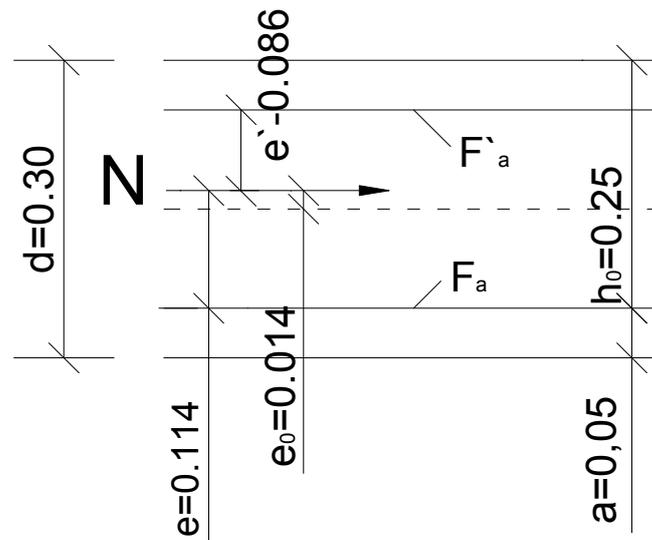
$e = 0,5 \cdot (h_o - a) + e_o = 0,5 \cdot (0,25 - 0,05) + 0,014 = 0,114$ [m]

- Fläche der Zugbewehrung.

$F_a = \frac{\gamma_m \cdot \gamma_n \cdot N \cdot e}{\gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}} \cdot (h_o - a)} = \frac{1,1 \cdot 1,25 \cdot 909,6 \cdot 0,114}{1,1 \cdot 390 \cdot 10^3 \cdot (0,25 - 0,05)} \cdot 10^{-4} = 15,11$ [cm² / m]

- Fläche der Druckbewehrung

$F'_a = \frac{\gamma_m \cdot \gamma_n \cdot N \cdot e'}{\gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Druck}} \cdot (h_o - a)} = \frac{1,1 \cdot 1,25 \cdot 909,6 \cdot 0,086}{1,1 \cdot 390 \cdot 10^3 \cdot (0,25 - 0,05)} \cdot 10^{-4} = 11,39$ [cm² / m]



8.4.2.3 Zug mit großer Exzentrizität– Das ist ein Fall, der hier nicht auftreten kann, deshalb ist er nicht berechnet.

Der massgebende Bemessungsfall trifft bei Zug mit keiner Exzentrizität auf, mit einer entsprechenden Bewehrung gleich:

$$F_a = 15,11 [\text{cm}^2 / \text{m}] \quad F'_a = 11,43 [\text{cm}^2 / \text{m}]$$

Angenommen:

- Zugbewehrung: 10 x N 14/10 cm $F=15,386 \text{ cm}^2$
- Druckbewehrung 10 x N 14 /10 cm $F=15,386 \text{ cm}^2$

$$\mu = \frac{F_a + F'_a}{F_{\text{Fels}}} = \frac{15,386 + 15,386}{3000} = \frac{30,772}{3000} = 0,0102 = 1,02\%$$

- Konstruktive Bewehrung : 2x5N10/20 cm
- Bügel : $\Phi 8/25 \text{ cm}$



8.4.3 Grunzzustand der Gebrauchstauglichkeit

8.4.3.1 Mittlere Rissbreite

$$a = 7,7 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \eta \cdot \frac{\sigma_{\text{Stahl}} - \sigma_0}{E_{\text{Stahl}}} \cdot (4 - 100 \cdot \mu) \cdot \sqrt{d} =$$

$$= 7,7 \cdot 1,1 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot \frac{50,91 - 20}{210000} \cdot (4 - 100 \cdot 0,0102) \cdot \sqrt{14} = 0,022 \text{ [mm]}$$

$$\alpha = 1,1 \quad \beta = 1,2 \quad \eta = 1,0$$

$\sigma_0 = 20 \text{ [MPa]}$ – Angenommene Anfangsspannung in der Bewehrung

$d = 14 \text{ [mm]}$ – Durchmesser des Bewehrungsstahls

$\mu = 0,0102$ – Bewehrungsanteil

$$E_{\text{Stahl}} = 210000 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{\text{Stahl}} = \frac{p_i \cdot r_1}{F_a + \frac{K_0 \cdot r_1}{E_{\text{Stahl}}}} = \frac{0,5361 \cdot 305}{0,30722 + \frac{2000 \cdot 305}{2100000}} = 50,91 \text{ [MPa]}$$

$$p_i = 0,5361 \text{ [MPa]}$$

$$K_0 = 2000 \text{ [N/m}^3 \cdot 10^5\text{]}$$

$$F_a = 0,30722 \text{ [cm}^2 \text{ / cm}^3\text{]}$$

$$r_1 = 305 \text{ [cm]}$$

$$E_{\text{Stahl}} = 2100000 \text{ [N/m}^2 \cdot 10^5\text{]}$$

Die maximale Rissbreite hängt von: Hydraulischem Gradient, Wasserhärte, maximalem W/Z-Wert, Anzahl der Cl^- und SO_4^- -Ionen, Durchlässigkeitsbeiwert des Felses, Klasse der Anlage ab.

- Hydraulischer Gradient

$$J = \frac{H_i - H_e}{d_{\text{Auskleidung}}} = \frac{53,61 - 65,435}{0,3} = -39,4$$

- Hydraulischer Gradient ohne Außwasserdruck :

$$J = \frac{H_i}{d_{\text{Auskleidung}}} = \frac{53,61}{0,30} = 178,7$$



Es werden folgende Annahmen gemacht:

- Wasserhärte : $0,25 \text{ [g/dm}^3 \cdot 10^{-3}\text{]}, \text{[mg/l]}$
- Hydraulischer Gradient : $50 < J = 178,7 < 300$
- Durchlässigkeitsbeiwert des Felses $k_{\text{Fels}} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ [cm/s]}$
- Maximaler W/Z- Wert - 0,5
- Anlage- Klasse - I
- Anzahl der Cl^- und SO_4 Ionen - 400 – 1000 [mg/l]

Maximale zulässige Rissbreite: 0,06 [mm]:

8.4.3.2 Anzahl der Risse

$$n = \frac{16 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot \mu}{d} = \frac{16 \cdot \pi \cdot 335 \cdot 0,0102}{1,4} = 120$$

8.4.3.3 Sickerung durch die Auskleidung

$$Q = \frac{1}{\frac{d_{\text{Auskleidung}}}{k \cdot n} + \frac{1}{k_{\text{Fels}} \cdot M_F}} = \frac{1}{\frac{0,30}{1,0 \cdot 10^{-5} \cdot 120} + \frac{1}{4 \cdot 10^{-5} \cdot 2,84}} = 3,25 \cdot 10^{-5} \text{ [l/s]} , \text{ wobei}$$

- $k = a^3 = 0,022^3 = 0,000010 = 1,0 \cdot 10^{-5}$ – Durchlässigkeitsbeiwert
- $n = 120$ – Anzahl der Risse
- $d_{\text{Auskleidung}} = 0,30 \text{ [m]}$ – Dicke der Auskleidung
- $k_{\text{Fels}} \geq 4 \cdot 10^{-5} \text{ [cm/s]}$ – Durchlässigkeitsbeiwert des Felses
- $M_F = \frac{2 \cdot \pi}{\ln\left(\frac{R}{r_2}\right)} = \frac{2 \cdot \pi}{\ln\left(\frac{30,5}{3,35}\right)} = 2,84$ – Filtrationsmodul
- $R = 10 \cdot r_1 = 10 \cdot 3,05 = 30,5 \text{ [m]}$ – Radius der wassergesättigten Zone

Die Formel ist bei mehr als 35 Rissen gültig.



$Q_{\text{zulässig}} = 1 \text{ [l/s]}$ – für 1000 m^2 von der Druckstollenfläche, wenn
der Innenwasserdruck $H_i < 100 \text{ m}$ ist

Die Sickerung soll kleiner sein als:

$$Q' = 2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot Q_{\text{zulässig}} \cdot 10^{-7} = 2,10 \cdot 10^{-4} \text{ [l/s]} > 3,25 \cdot 10^{-5}$$
$$\Rightarrow Q < Q'$$

8.5 Abschnitt 5

- $L_{\text{Abschnitt}} = 0,10 \cdot L_{\text{Druckstollen}} = 0,10 \cdot 1019,81 = 102 \text{ m}$
- $f = 8 \Rightarrow K_0 = 4000 \text{ N/cm}^2$
- $\varphi = \arctg(f) = 82,875^\circ$
- $\gamma_{\text{Fels}} = 25 \text{ kN/m}^3$

8.5.1 Minimale Dicke der ungerissenen Auskleidung

- $r_1 = \frac{D'_{\text{Druckstollen}}}{2} = \frac{6,10}{2} = 3,05 \text{ [m]}$ – Innendurchmesser des Druckstollens
- $p = \gamma_{\text{Wasser}} \cdot H_{\text{WS}} = \frac{10 \cdot 54,41}{1000} = 0,5441 \text{ [MPa]}$ – Innewasserdruck

wobei:

$\gamma_{\text{Wasser}} = 10 \text{ [kN/m}^3\text{]}$ – Wichte des Wassers

$H_{\text{WS}} = 54,41 \text{ m}$ – Wasserspiegel beim höchsten Schwallspiegel
der Wasserschlossschwingung

8.5.1.1 Notwendige Dicke der Auskleidung:

$$d_{\text{Auskleidung}} = r_1 \cdot \left(\frac{p}{\gamma_c \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}}} - \frac{K_0}{0,70 \cdot E_{\text{Beton}}} \right) = 3,05 \cdot \left(\frac{0,5441}{1,12} - \frac{4000}{0,70 \cdot 32500} \right) = 0,45 \text{ [m]},$$



wobei

$\gamma_c = 1$ – Arbeitsbedingunsbeiwert

$R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = 1,2$ [MPa] – Zugfestigkeit des Betons B30

$E_{\text{Beton}} = 32500$ [MPa] – Elastizitätsmodul des Betons B30

$d_{\text{Auskleidung}}^{\text{max}} = 0,15 \cdot r_1 = 0,15 \cdot 3,05 = 0,4575$ cm

Wegen der großen Dicken der Betonauskleidung wird eine Stahlbetonauskleidung mit kleiner Dicke gewählt.

8.5.1.2 Minimale Dicke der ungerissenen Stahlbetonauskleidung

- Äquivalenter Elastizitätsmodul des Stahlbetons:

$$E_{\text{Äquiv}} = E_{\text{Beton}} \cdot \left(1 + \mu_{\text{max}} \cdot \left(\frac{E_{\text{Stahl}}}{E_{\text{Beton}}} - 1 \right) \right) = 32500 \cdot \left(1 + 0,02 \cdot \left(\frac{2,1 \cdot 10^5}{32500} - 1 \right) \right) = 36050 \text{ [MPa]}, \text{ wobei:}$$

$\mu_{\text{max}} = 0,02$ – Maximaler Bewehrungsanteil für ungerissene Auskleidung

$E_{\text{Stahl}} = 210000$ [MPa] – Elastizitätsmodul des Stahls

$\gamma_c = 1,1$ – Abgelesen von Tabelle

$$d_{\text{Auskleidung}} = \frac{r_1 \cdot (\rho - K_0 \cdot e)}{\gamma_c \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} \left(1 + \frac{30 \mu}{R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}}} \right) + K_0 \cdot e} = \frac{3,05 \cdot (0,5441 - 4000 \cdot 7,66 \cdot 10^{-5})}{1,1 \cdot 1,2 \cdot \left(1 + 30 \cdot \frac{0,02}{1,2} \right) + 4000 \cdot 7,66 \cdot 10^{-5}} = 0,32 \text{ [m]}$$

angenommen: $d_{\text{Auskleidung}} = 30$ cm - gerissene Auskleidung

$$h_{\text{notwendig}} = \frac{K_0 \cdot r_1 \cdot \gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}}}{r_2 \cdot \rho \cdot g \cdot \gamma_n \cdot E_{\text{Stahl}}} = \frac{4000 \cdot 305 \cdot 1,1 \cdot 390}{335 \cdot 0,0025 \cdot 9,81 \cdot 1,25 \cdot 210000} = 242,68 \text{ [m]}, \quad \text{wobei}$$

$r_1 = 3,05$ [m] = 305 [cm] – Innendurchmesser

$r_2 = r_1 + d_{\text{Auskleidung}} = 3,05 + 0,30 = 3,35$ [m] = 335 [cm]

$\gamma_c = 1,1$ – Abgelesen von Tabelle

$R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}} = 390$ [MPa] – Zugfestigkeit des Stahls AIII

$\rho = 0,0025$ [kg/cm³] – Dichte des Felses

$\gamma_n = 1,25$ – Abgelesen von Tabelle

$$H_{\text{Überlagerung}} = 82,51 \text{ m} < h_{\text{notwendig}}$$

$$F_a = \frac{\gamma_n \cdot p \cdot r_1}{\gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}}} - \frac{\rho \cdot g \cdot H_{\text{Überlagerung}} \cdot r_2}{E_{\text{Stahl}}} = \frac{1,25 \cdot 0,5441 \cdot 3,05}{1,1 \cdot 390} - \frac{0,0026 \cdot 9,81 \cdot 82,51 \cdot 3,35}{210000} = 0,00468 \text{ [cm}^2 \text{ / cm]}$$

- $\mu_{\text{min}} = 0,5\% = 0,005$

8.5.1.3 Wirkende Lasten

8.5.1.3.1 Bauzeit

- Vertikaler Gebirgsdruck

$$q = \gamma \cdot h_{\text{zerstört}} \cdot \beta = 25 \cdot 0,68 \cdot 0,8 = 13,6 \text{ [kN/m]}$$

$$q_{\text{Bemessung}} = \gamma_f \cdot q = 1,5 \cdot 13,6 = 20,4 \text{ [kN/m]}$$

- Eigengewicht

$$\gamma_{\text{Beton}} = 24 \text{ [kN/m}^3\text{]} - \text{Wichte des Wassers}$$

$$g = d_{\text{Auskleidung}} \cdot \gamma_{\text{Beton}} = 0,3 \cdot 24 = 7,2 \text{ [kN/m]}$$

$$g_{\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot g = 1,2 \cdot 7,2 = 8,64 \text{ [kN/m]}$$

- Außenwasserdruck- für maximale Überlagerungshöhe

$$H_{\text{Wasser}} = 0,5 \cdot H_{\text{Überlagerung}} = 0,5 \cdot 130,87 = 65,4 \text{ [m]} - \text{Wassergesättigtes Gebirge}$$

$$p_e = \gamma_{\text{Wasser}} \cdot H_{\text{Wasser}} = \frac{10 \cdot 65,4}{1000} = 0,654 \text{ [MPa]}$$

$$p_{e,\text{Bemessung}} = \gamma_f \cdot p_e = 1,1 \cdot 0,654 = 0,72 \text{ [MPa]}$$

- Außenwasserdruck- am Ende des Abschnitts

$$H_{\text{Wasser}} = 0,5 \cdot H_{\text{Überlagerung}} = 0,5 \cdot 82,51 = 41,26 \text{ [m]} - \text{Wassergesättigtes Gebirge}$$

$$p_e = \gamma_{\text{Wasser}} \cdot H_{\text{Wasser}} = \frac{10 \cdot 41,26}{1000} = 0,4126 \text{ [MPa]}$$

$$p_{e,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot p_e = 1,1 \cdot 0,4126 = 0,45 \text{ [MPa]}$$



- **Vertikaler Gebirgsdruck - seismisch**

$C = 1,5$ – Beiwert für die Klasse der Anlage
für I^{-ste} Klasse = 1,5

$K_s = 0,1$ – Seismischer Beiwert – abgelesen von [2]
Tabelle.22 – "Wasserbautunnel" – Univ.Pr of.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989.

$K_h = 0,6$ – Überlagerungshöhebeiwert – abgelesen von [2]
Tabelle.23 – "Wasserbautunnel" – Univ.Pr of.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989

$$H_{\text{Überlagerung}}^{\text{Max}} = 130,87 \text{ m}$$

$$H_{\text{Überlagerung}}^{\text{Ende}} = 82,51 \text{ m}$$

$R = 0,6$ – Verhaltensbeiwert

$$K'_s = R \cdot C \cdot K_s \cdot K_h = 0,6 \cdot 1,5 \cdot 0,1 \cdot 0,6 = 0,054$$

$$q_s = q \cdot K'_s = 13,6 \cdot 0,054 = 0,734 \text{ [kN/m]}$$

$$q_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot q_s = 1,0 \cdot 0,734 = 0,734 \text{ [kN/m]}$$

- **Eigengewicht- seismisch**

$$g_s = g \cdot K'_s = 7,2 \cdot 0,054 = 0,389 \text{ [kN/m]}$$

$$g_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot g_s = 1,0 \cdot 0,389 = 0,389 \text{ [kN/m]}$$

8.5.1.3.2 Betriebszeit

- **Vertikaler Gebirgsdruck**

$$q = \gamma \cdot h_{\text{zerstört}} \cdot \beta = 25 \cdot 0,68 \cdot 0,8 = 13,6 \text{ [kN/m]}$$

$$q_{\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot q = 1,5 \cdot 13,6 = 20,04 \text{ [kN/m]}$$

- **Eigengewicht**

$$\gamma_{\text{Beton}} = 24 \text{ [kN/m}^3\text{]} \text{ – Wichte des Betons}$$

$$g = d_{\text{Auskleidung}} \cdot \gamma_{\text{Beton}} = 0,3 \cdot 24 = 7,2 \text{ [kN/m]}$$

$$g_{\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot g = 0,9 \cdot 7,2 = 6,48 \text{ [kN/m]}$$



- Außenwasserdruck- für maximale Überlagerungshöhe

$$H_{\text{Wasser}} = 0,5 \cdot H_{\text{Überlagerung}}^{\text{Druckstollen}} = 0,5 \cdot 130,87 = 65,435 \text{ [m]}$$

$$p_e = \gamma_{\text{Wasser}} \cdot H_{\text{Wasser}} = \frac{10 \cdot 65,435}{1000} = 0,654 \text{ [MPa]}$$

$$p_{e,\text{изчисл}} = \gamma_f \cdot p_e = 0,9 \cdot 0,654 = 0,59 \text{ [MPa]}$$

- Außenwasserdruck- am Ende des Querschnitts

$$H_{\text{Wasser}} = 0,5 \cdot H_{\text{Überlagerung}}^{\text{Druckstollen}} = 0,5 \cdot 82,51 = 41,26 \text{ [m]}$$

$$p_e = \gamma_{\text{Wasser}} \cdot H_{\text{Wasser}} = \frac{10 \cdot 41,26}{1000} = 0,4126 \text{ [MPa]}$$

$$p_{e,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot p_e = 0,9 \cdot 0,4126 = 0,37 \text{ [MPa]}$$

- Innenwasserdruck- am Ende des Querschnitts

$$p_i \equiv p = 0,5441 \text{ [MPa]}$$

$$p_{i,\text{Berechnung}} \equiv \gamma_f p_i = 1,0 \cdot 0,5441 = 0,5441 \text{ [MPa]}$$

- Innenwasserdruck – für maximale Überlagerungshöhe

$$p_i \equiv p = 0,5361 \text{ [MPa]}$$

$$p_{i,\text{Berechnung}} \equiv \gamma_f p_i = 1,0 \cdot 0,5361 = 0,5361 \text{ [MPa]}$$

- **Vertikaler Gebirgsdruck - seismisch**

$C = 1,5$ – Beiwert für die Klasse der Anlage
für I^{ste} Klasse = 1,5

$K_s = 0,1$ – Seismischer Beiwert – abgelesen von [2]

Tabelle.22 – "Wasserbautunnel" – Univ.Pr of.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989.

$K_h = 0,6$ – Überlagerungshöhebeiwert – abgelesen von [2]

Tabelle.23 – "Wasserbautunnel" – Univ.Pr of.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989

$$H_{\text{Überlagerung}}^{\text{Max}} = 130,87 \text{ m}$$

$$H_{\text{Überlagerung}}^{\text{Ende}} = 82,51 \text{ m}$$

$R = 0,6$ – Verhaltensbeiwert

$$K'_s = R \cdot c \cdot K_s \cdot K_h = 0,6 \cdot 1,5 \cdot 0,1 \cdot 0,6 = 0,054$$

$$q_s = q \cdot K'_s = 13,6 \cdot 0,054 = 0,734 \text{ [kN/m]}$$

$$q_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot q_s = 1,0 \cdot 0,734 = 0,734 \text{ [kN/m]}$$



- Eigengewicht- seismisch

$$g_s = g \cdot K'_s = 7,2 \cdot 0,054 = 0,389 \text{ [kN/m]}$$

$$g_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot g_s = 1,0 \cdot 0,389 = 0,389 \text{ [kN/m]}$$

$$g_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot g_s = 1,0 \cdot 0,389 = 0,389 \text{ [kN/m]}$$

- Innenwasserdruck - seismisch

$$p_{i,s} = 100 \cdot K'_s = 100 \cdot 0,054 = 5,4 \text{ [kN/m]}$$

$$p_{i,s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot p_{i,s} = 1,0 \cdot 5,4 = 5,4 \text{ [kN/m]}$$

8.5.1.4 Bemessung der Biegemomente und der Normalkräfte

Der Querschnitt ist als kreisförmig vorgesehen. Die Biegemomente und Zugkräfte sind in 5 Punkten berechnet. Der vertikale Gebirgsdruck und das Eigengewicht sind als gleichmäßig über den Querschnittsdurchmesser verteilt. Die elastische Reaktion des Felses ist gleichmäßig über den Perimeter verteilt, wie es unten gezeigt ist.

Die Formeln für die Berechnung sind im 8.1.1.4 gezeigt:

8.5.1.5 Bemessung der Spannungen

$$\sigma_{1,2} = \frac{N}{F} \mp \frac{M}{W} \text{ [kPa] , wobei}$$

$$F = b \cdot d_{\text{Auskleidung}} = 1,0 \cdot 0,30 = 0,30 \text{ [m}^2\text{]} - \text{Fläche der Auskleidung für 1 m des Druckstollens}$$

$$W = \frac{b \cdot d_{\text{Auskleidung}}^2}{6} = \frac{1,0 \cdot 0,30^2}{6} = 0,0150 \text{ [m}^3\text{]}$$

Während der Betriebszeit (maximaler Innenwasserdruck) sind die Spannungen für alle Punkten des Querschnitts gleich:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (2 \cdot \varepsilon \cdot r_2^2 - (r_1^2 + r_2^2))}{r_2^2 - r_1^2} = \frac{0,5441 \cdot 10^3 \cdot (2 \cdot 0,5 \cdot 3,35^2 - (3,05^2 + 3,35^2))}{3,35^2 - 3,05^2} = -2636 \text{ [kPa]}$$

$$\sigma_2 = \frac{p \cdot (\varepsilon \cdot (r_1^2 + r_2^2) - 2 \cdot r_1^2)}{r_2^2 - r_1^2} = \frac{0,5441 \cdot 10^3 \cdot (0,5 \cdot (3,05^2 + 3,35^2) - 2 \cdot 3,05^2)}{3,35^2 - 3,05^2} = -2364 \text{ kPa}$$



$\varepsilon = 0,5$ – abgelesen von [2] Tabelle.99 –

"Wasserbautunnel" – Univ.Prof.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989

$$a = \frac{r_2}{r_1} = \frac{3,35}{3,05} = 1,10$$

$$c = \frac{E_{\text{Äquiv}} \cdot (1 + \nu_{\text{Fels}})}{E_{\text{Fels}} \cdot (1 + \nu_{\text{Äquiv}})} = \frac{32509 \cdot (1 + 0,28)}{5120 \cdot (1 + 0,20)} = 6,8$$

$$E_{\text{Äquiv}} = E_{\text{Beton}} \cdot \left(1 + \mu_{\text{min}} \cdot \left(\frac{E_{\text{Stahl}}}{E_{\text{Beton}}} - 1 \right) \right) = 32500 \cdot \left(1 + 0,005 \cdot \left(\frac{21 \cdot 10^4}{32500} - 1 \right) \right) = 32509 \text{ MPa}$$

$$\nu_{\text{Äquiv}} = \nu_{\text{Beton}} \cdot \left(1 + \mu_{\text{min}} \cdot \left(\frac{\nu_{\text{Stahl}}}{\nu_{\text{Beton}}} - 1 \right) \right) = 0,2 \cdot \left(1 + 0,005 \cdot \left(\frac{0,3}{0,2} - 1 \right) \right) = 0,20$$

$$E_{\text{Fels}} = K_0 \cdot (1 + \nu_{\text{Fels}}) = 4000 \cdot (1 + 0,28) = 5120 \text{ [MPa]}$$

$\nu_{\text{Fels}} = 0,28$ – Poissonzahl für Fels

$\nu_{\text{Beton}} = 0,2$ – Poissonzahl für Beton

$\nu_{\text{Stahl}} = 0,3$ – Poissonzahl für Stahl

8.5.1.6 Zulässige Spannungen

8.5.1.6.1 Bauzeit

$\sigma_{1,2} \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug(Druck)}}$, wobei γ_c und γ_n von oben abgelesen werden

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = \frac{1}{1,25 \cdot 0,95} \cdot 1,2 = 1,01 \text{ [MPa]}$$

$R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = 1,2 \text{ [MPa]}$ – Zugfestigkeit des Betons B30

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Druck}} = \frac{1}{1,25 \cdot 0,95} \cdot 17 = 14,32 \text{ [MPa]}$$

$R_{\text{Beton}}^{\text{Druck}} = 17 \text{ [MPa]}$ – Druckfestigkeit des Betons B30



8.5.1.6.2 Betriebszeit

- Übliche Lasten

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = \frac{1}{1,25 \cdot 1} \cdot 1,2 = 0,96 \text{ [MPa]}$$

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Druck}} = \frac{1}{1,25 \cdot 1} \cdot 17 = 13,60 \text{ [MPa]}$$

- Besondere Lasten

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = \frac{1,2}{1,25 \cdot 0,9} \cdot 1,2 = 1,28 \text{ [MPa]}$$

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Druck}} = \frac{1,2}{1,25 \cdot 0,9} \cdot 17 = 18,13 \text{ [MPa]}$$

Die maximalen Druckspannungen in der Auskleidung sind kleiner als die zulässigen Spannungen. Wenn aber das Gebirge trocken ist und es keinen Außenwasserdruck $p_e = 0$ gibt, dann werden die Zugspannungen größer und ist eine zusätzliche Bewehrung des Querschnitts erforderlich.

Maßgebend ist die Bemessung am Ende des Abschnitts – maximaler Innenwasserdruck.



Tab. 8-24 Biegemomente und Normalkräfte während der Bauzeit- für maximale Überlagerungshöhe

Tabelle		Q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		g _{Berechnung}		p _{e, Berechnung}		q _{s, Berechnung}		e _{s, Berechnung}		g _{s, Berechnung}	
		M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N
		kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN
Schnitt	1	6.80	42.63	0.00	0.00	0.45	23.55	-0.86	2419.68	0.20	1.28	0.00	0.00	0.02	0.88
	2	-5.29	64.32	0.00	0.00	-0.70	29.24	1.09	2418.89	-0.16	1.93	0.00	0.00	-0.03	1.10
	3	1.06	80.20	0.00	0.00	0.64	51.14	-1.06	2419.70	0.03	2.41	0.00	0.00	0.02	1.92
	4	1.20	80.20	0.00	0.00	-2.05	71.07	3.34	2418.04	0.04	2.41	0.00	0.00	-0.08	2.67
	5	-1.46	81.05	0.00	0.00	3.16	77.99	-5.22	2421.27	-0.04	2.43	0.00	0.00	0.12	2.92

Tab. 8-25 Spannungen während der Bauzeit - für maximale Überlagerungshöhe

Tabelle		q _{Ber}		e _{Ber}		g _{Ber}		p _{eBer}		q _{s, Bere}		E _{s, Ber}		g _{s, Bere}		q _{ber} +e _{ber} +g _{ber} +p _{eber}		Σ(x _{i, ber})+Σ(x _{i, ber})	
		σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2
		kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
Schnitt	1	-311.5	595.7	0.0	0.0	48.6	108.4	8123.1	8008.2	-9.3	17.9	0.0	0.0	1.8	4.1	7860.1	8712.3	7852.6	8734.3
	2	566.9	-138.1	0.0	0.0	143.8	51.1	7990.2	8135.7	17.0	-4.1	0.0	0.0	5.4	1.9	8700.9	8048.8	8723.3	8046.5
	3	196.8	337.8	0.0	0.0	127.7	213.2	8136.4	7994.9	5.9	10.1	0.0	0.0	4.8	8.0	8461.0	8546.0	8471.7	8564.1
	4	187.6	347.0	0.0	0.0	373.4	100.4	7837.3	8282.9	5.6	10.4	0.0	0.0	14.0	3.8	8398.4	8730.4	8418.0	8744.5
	5	367.6	172.7	0.0	0.0	49.6	470.3	8419.1	7722.7	11.0	5.2	0.0	0.0	1.9	17.6	8836.3	8365.7	8849.2	8388.6



Tab. 8-26 Biegemomente und Normalkräfte während der Betriebszeit - für maximale Überlagerungshöhe

Tabelle	Q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		g _{Berechnung}		p _{e, Berechnung}		Q _{s, Berechnung}		e _{s, Berechnung}		g _{s, Berechnung}		Q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		
	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	
	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	
Schnitt	1	6.80	42.63	0.00	0.00	0.34	17.66	-0.86	1981.27	0.86	-6.96	0.22	1.41	0.00	0.00	0.02	0.88	0.86	-6.96
	2	-5.29	64.32	0.00	0.00	-0.52	21.93	1.09	1980.48	-1.09	-6.31	-0.17	2.12	0.00	0.00	-0.03	1.10	-1.09	-6.31
	3	1.06	80.20	0.00	0.00	0.48	38.35	-1.06	1981.29	1.06	-6.98	0.03	2.65	0.00	0.00	0.02	1.92	1.06	-6.98
	4	1.20	80.20	0.00	0.00	-1.54	53.31	3.34	1979.62	-3.34	-5.60	0.04	2.65	0.00	0.00	-0.08	2.67	-3.34	-5.60
	5	-1.46	81.05	0.00	0.00	2.37	58.49	-5.22	1982.86	5.22	-8.28	-0.05	2.67	0.00	0.00	0.12	2.92	5.22	-8.28

Tab. 8-27 Spannungen während der Betriebszeit - für maximale Überlagerungshöhe

Tabelle	q _{Ber}		e _{Ber}		g _{Ber}		p _{e, Ber}		p _{i, Ber}		q _{s, Ber}		e _{s, изчисл}		g _{s, Ber}		p _{i, Ber}		q _{Ber} +e _{Ber} +g _{Ber} +p _{e, Ber}		Σ(x _{i, Ber})+Σ(x _{i,c, Ber})		p _i		Total.		
	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	
	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
Schnitt	1	-312	596	0	0	36	81	6662	6547	-81	34	-10	20	0	0	2	4	-81	34	6306	7258	6217	7316	-2597	-2329	3708	4929
	2	567	-138	0	0	108	38	6529	6674	52	-94	19	-5	0	0	5	2	52	-94	7255	6481	7331	6384	-2597	-2329	4658	4151
	3	197	338	0	0	96	160	6675	6534	-94	47	6	11	0	0	5	8	-94	47	6874	7079	6791	7145	-2597	-2329	4276	4749
	4	188	347	0	0	280	75	6376	6822	204	-241	6	11	0	0	14	4	204	-241	7048	7002	7272	6776	-2597	-2329	4450	4673
	5	368	173	0	0	37	353	6958	6261	-376	321	12	6	0	0	2	18	-376	321	6987	7107	6625	7451	-2597	-2329	4389	4778



Tab. 8-28 Biegemomente und Normalkräfte während der Bauzeit am Ende des Abschnitts

Tabelle	Q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		g _{Berechnung}		p _{e, Berechnung}		q _{s, Berechnung}		e _{s, Berechnung}		g _{s, Berechnung}		
	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	
	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	
Schnitt	1	6.80	42.63	0.00	0.00	0.45	23.55	-0.86	1528.65	0.24	1.53	0.00	0.00	0.02	1.06
	2	-5.29	64.32	0.00	0.00	-0.70	29.24	1.09	1527.86	-0.19	2.32	0.00	0.00	-0.03	1.32
	3	1.06	80.20	0.00	0.00	0.64	51.14	-1.06	1528.67	0.04	2.89	0.00	0.00	0.03	2.30
	4	1.20	80.20	0.00	0.00	-2.05	71.07	3.34	1527.00	0.04	2.89	0.00	0.00	-0.09	3.20
	5	-1.46	81.05	0.00	0.00	3.16	77.99	-5.22	1530.24	-0.05	2.92	0.00	0.00	0.14	3.51

Tab. 8-29 Spannungen während der Bauzeit - am Ende des Abschnitts

Tabelle	q _{Ber}		e _{Ber}		g _{Ber}		p _{eBer}		q _{s, Bere}		E _{s, Ber}		g _{s, Bere}		q _{ber} +e _{ber} +g _{ber} +p _{eber}		Σ(x _{i, ber})+Σ(x _{i, ber})		
	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	
	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
Schnitt	1	-311.5	595.7	0.0	0.0	48.6	108.4	5153.0	5038.0	-11.2	21.4	0.0	0.0	2.2	4.9	4890.0	5742.2	4881.0	5768.5
	2	566.9	-138.1	0.0	0.0	143.8	51.1	5020.1	5165.6	20.4	-5.0	0.0	0.0	6.5	2.3	5730.8	5078.7	5757.7	5076.0
	3	196.8	337.8	0.0	0.0	127.7	213.2	5166.3	5024.8	7.1	12.2	0.0	0.0	5.7	9.6	5490.9	5575.9	5503.7	5597.6
	4	187.6	347.0	0.0	0.0	373.4	100.4	4867.2	5312.8	6.8	12.5	0.0	0.0	16.8	4.5	5428.3	5760.2	5451.8	5777.3
	5	367.6	172.7	0.0	0.0	49.6	470.3	5449.0	4752.6	13.2	6.2	0.0	0.0	2.2	21.2	5866.2	5395.6	5881.7	5423.0



Tab. 8-30 Biegemomente und Normalkräfte während der Betriebszeit- am Ende des Abschnitts

Tabelle	Q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		g _{Berechnung}		p _{e, Berechnung}		Q _{s, Berechnung}		e _{s, Berechnung}		g _{s, Berechnung}		Q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		
	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	
	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	
Schnitt	1	6.80	42.63	0.00	0.00	0.34	17.66	-0.86	1252.24	0.86	-6.96	0.24	1.53	0.00	0.00	0.02	1.06	0.86	-6.96
	2	-5.29	64.32	0.00	0.00	-0.52	21.93	1.09	1251.45	-1.09	-6.31	-0.19	2.32	0.00	0.00	-0.03	1.32	-1.09	-6.31
	3	1.06	80.20	0.00	0.00	0.48	38.35	-1.06	1252.26	1.06	-6.98	0.04	2.89	0.00	0.00	0.03	2.30	1.06	-6.98
	4	1.20	80.20	0.00	0.00	-1.54	53.31	3.34	1250.60	-3.34	-5.60	0.04	2.89	0.00	0.00	-0.09	3.20	-3.34	-5.60
	5	-1.46	81.05	0.00	0.00	2.37	58.49	-5.22	1253.83	5.22	-8.28	-0.05	2.92	0.00	0.00	0.14	3.51	5.22	-8.28

Tab. 8-31 Spannungen während der Betriebszeit- am Ende des Abschnitts

Tabelle	q _{Ber}		e _{Ber}		g _{Ber}		p _{e, Ber}		p _{i, Ber}		q _{s, Ber}		e _{s, изчисл}		g _{s, Ber}		p _{i, Ber}		q _{Ber} +e _{Ber} +g _{Ber} +p _{e, Ber}		Σ(x _{i, Ber})+Σ(x _{i,c, Ber})		p _i		Total.		
	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	
	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
Schnitt	1	-312	596	0	0	36	81	4232	4117	-81	34	-11	21	0	0	2	5	-81	34	3876	4828	3786	4889	-2636	-2364	1240	2464
	2	567	-138	0	0	108	38	4099	4244	52	-94	20	-5	0	0	6	2	52	-94	4825	4051	4904	3954	-2636	-2364	2189	1687
	3	197	338	0	0	96	160	4245	4103	-94	47	7	12	0	0	6	10	-94	47	4444	4649	4362	4718	-2636	-2364	1807	2285
	4	188	347	0	0	280	75	3946	4391	204	-241	7	12	0	0	17	5	204	-241	4618	4572	4845	4348	-2636	-2364	1981	2208
	5	368	173	0	0	37	353	4528	3831	-376	321	13	6	0	0	2	21	-376	321	4557	4677	4196	5025	-2636	-2364	1920	2313

8.5.2 Bemessung der Bewehrung

Die Bewehrung ist mit Außenwasserdruck von $p_e = 0$ bemessen. In diesem Fall entstehen maximale Zugspannungen:

		übliche		besondere	
		σ_1	σ_2	σ_1	σ_2
		kPa	kPa	kPa	kPa
Schnitt	1	-2992	-1653	-3082	-1592
	2	-1910	-2558	-1831	-2654
	3	-2438	-1819	-2519	-1750
	4	-1964	-2183	-1737	-2408
	5	-2607	-1518	-2967	-1170

- Maximale Spannungen:

$$\sigma_1 = -3082 \text{ [kPa]} \quad \sigma_2 = -1592 \text{ [kPa]}$$

Es gibt drei Möglichkeiten für die Position der Normalkraft.

8.5.2.1 Zentrischer Zug

Für die maximale Spannung $\sigma_1 = -3082 \text{ [kPa]}$ wird die Resultierende berechnet:

$$F_{\text{Auskleidung}} = d_{\text{Auskleidung}} \cdot b = 0,3 \cdot 100 \cdot 1.300 = 3000 \text{ [cm}^2\text{]} \text{ – Fläche der Auskleidung}$$

für Länge des Druckstollens $b = 100 \text{ cm}$

- Resultierende:

$$N_{\text{опьн}} = \sigma_1 \cdot F_0 = 3082 \cdot 10^{-4} \cdot 3000 = 924,496 \text{ [kN]}$$

$$R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}} = 390 \text{ [MPa]} \text{ – Zugfestigkeit des Stahls}$$

- Fläche der Bewehrung:

$$F_a = \frac{\gamma_m \cdot \gamma_n \cdot N_{\text{Zug}}}{\gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}}} = \frac{1,1 \cdot 1,25 \cdot 924,496}{1,1 \cdot 390 \cdot 10^3} \cdot 10^4 = 26,9 \text{ [cm}^2 \text{ / m]}$$

$$\gamma_c = 1,1 \quad \gamma_n = 1,25 \quad \gamma_m = 1$$



8.5.2.2 Zug mit kleiner Exzentrizität

Die Normalkraft wird zwischen der Flächen der Zug- und Druckbewehrung verteilt.

F_a und F'_a .

$a = a' = 0,05$ [m] – Betonüberdeckung

$h_o = d_{\text{Auskleidung}} - a = 0,3 - 0,05 = 0,25$ [m]

$e_o = \frac{M}{N} = \frac{11,175}{669,9} = 0,016$ [m] – Exzentrizität der Normalkraft

Der Biegemoment M und die Normalkraft N sind durch folgende Formel berechnet:

$$\left| \begin{array}{l} \sigma_1 = \frac{N}{F} - \frac{M}{W} \\ \sigma_2 = \frac{N}{F} + \frac{M}{W} \end{array} \right. \quad \left| \begin{array}{l} -3082 = \frac{N}{0,3} - \frac{M}{0,0150} \\ -1592 = \frac{N}{0,30} + \frac{M}{0,0150} \end{array} \right.$$

$M = 11,175$ kNm

$N = -699,9$ kN

- Abstand der Normalkraft N von der Druckbewehrung

$e' = 0,5 \cdot (h_o - a') - e_o = 0,5 \cdot (0,25 - 0,05) - 0,016 = 0,084$ [m]

- Abstand der Normalkraft N von der Zugbewehrung

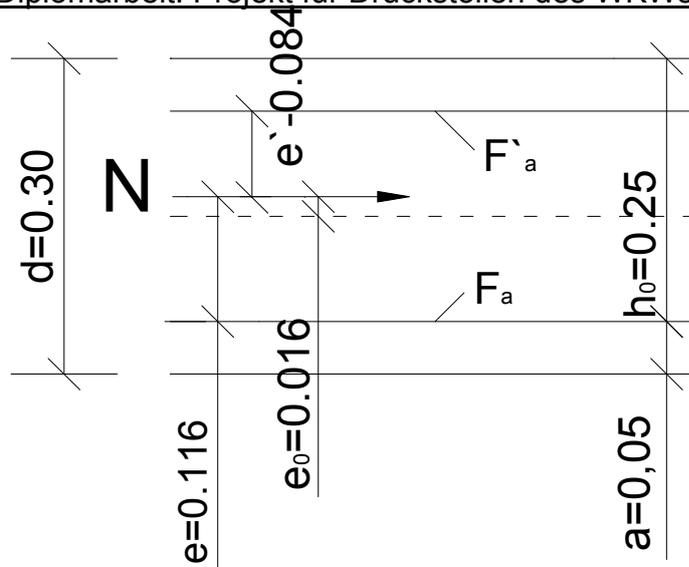
$e = 0,5 \cdot (h_o - a) + e_o = 0,5 \cdot (0,25 - 0,05) + 0,016 = 0,116$ [m]

- Fläche der Zugbewehrung.

$F_a = \frac{\gamma_m \cdot \gamma_n \cdot N \cdot e}{\gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}} \cdot (h_o - a)} = \frac{1,1 \cdot 1,25 \cdot 699,9 \cdot 0,116}{1,1 \cdot 390 \cdot 10^3 \cdot (0,25 - 0,05)} \cdot 10^{-4} = 11,82$ [cm² / m]

- Fläche der Druckbewehrung

$F'_a = \frac{\gamma_m \cdot \gamma_n \cdot N \cdot e'}{\gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Druck}} \cdot (h_o - a)} = \frac{1,1 \cdot 1,25 \cdot 699,9 \cdot 0,084}{1,1 \cdot 390 \cdot 10^3 \cdot (0,25 - 0,05)} \cdot 10^{-4} = 8,57$ [cm² / m]



8.5.2.3 Zug mit großer Exzentrizität– Das ist ein Fall, der hier nicht auftreten kann, deshalb ist er nicht berechnet.

Der massgebende Bemessungsfall trifft bei Zug mit keiner Exzentrizität auf, mit einer entsprechenden Bewehrung gleich:

$$F_a = 11,82 \text{ [cm}^2 \text{ / m]} \quad F'_a = 8,57 \text{ [cm}^2 \text{ / m]}$$

Angenommen:

- Zugbewehrung: 8 x N 14/12.5 cm $F=12,309 \text{ cm}^2$
- Druckbewehrung 8 x N 12 /12.5 cm $F=9,043 \text{ cm}^2$

$$\mu = \frac{F_a + F'_a}{F_{\text{Beton}}} = \frac{12,309 + 9,043}{3000} = \frac{21,352}{3000} = 0,0071 = 0,71\%$$

- Konstruktive Bewehrung : 2x5 N10/25 cm
- Bügel : $\Phi 8/25 \text{ cm}$

8.5.3 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

8.5.3.1 Mittlere Rissbreite

$$\begin{aligned} a &= 7,7 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \eta \cdot \frac{\sigma_{\text{Stahl}} - \sigma_o}{E_{\text{Stahl}}} \cdot (4 - 100 \cdot \mu_{\text{min}}) \cdot \sqrt{d} = \\ &= 7,7 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 10 \cdot \frac{27,55 - 20}{210000} \cdot (4 - 100 \cdot 0,0071) \cdot \sqrt{14} = 0,005 \text{ [mm]} \end{aligned}$$



$$\alpha = 1,1 \quad \beta = 1,2 \quad \eta = 1,0$$

$\sigma_0 = 20$ [MPa] – Angenommene Anfangsspannung in der Bewehrung

$d = 14$ [mm] – Durchmesser des Bewehrungsstahls

$\mu = 0,0071$ – Bewehrungsanteil

$E_{\text{Stahl}} = 210000$ [MPa]

$$\sigma_{\text{Stahl}} = \frac{p_i \cdot r_1}{F_a + \frac{K_0 \cdot r_1}{E_{\text{Stahl}}}} = \frac{0,5441 \cdot 305}{0,21352 + \frac{4000 \cdot 305}{2100000}} = 27,55 \text{ [MPa]}$$

$$p_i = 0,5441 \text{ [MPa]}$$

$$K_0 = 4000 \text{ [N/m}^3 \cdot 10^5\text{]}$$

$$F_a = 0,21352 \text{ [cm}^2 \text{ / cm}^3\text{]}$$

$$r_1 = 305 \text{ [cm]}$$

$$E_{\text{Stahl}} = 2100000 \text{ [N/m}^2 \cdot 10^5\text{]}$$

Die maximale Rissbreite hängt von: Hydraulischem Gradient, Wasserhärte, maximalem W/Z-Wert, Anzahl der Cl^- und SO_4^{2-} -Ionen, Durchlässigkeitsbeiwert des Felses, Klasse der Anlage ab.

- Hydraulischer Gradient

$$J = \frac{H_i - H_e}{d_{\text{Auskleidung}}} = \frac{54,41 - 41,23}{0,3} = 43,9$$

- Hydraulischer Gradient ohne Außenwasserdruck:

$$J = \frac{H_i}{d_{\text{Auskleidung}}} = \frac{54,41}{0,30} = 181,4$$

Es werden folgende Annahmen gemacht:

- Wasserhärte : $0,25 \text{ [g/dm}^3 \cdot 10^{-3}\text{]}, \text{ [mg/l]}$
- Hydraulischer Gradient : $50 < J = 181,4 < 300$
- Durchlässigkeitsbeiwert des Felses $k_{\text{Fels}} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ [cm/s]}$
- Maximaler W/Z- Wert -0,5
- Anlage- Klasse - I
- Anzahl der Cl^- und SO_4^{2-} Ionen - 400 – 1000 [mg/l]

Maximale zulässige Rissbreite: 0,06 [mm]



8.5.3.2 Anzahl der Risse

$$n = \frac{16 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot \mu}{d} = \frac{16 \cdot \pi \cdot 335,0,0071}{1,4} = 90$$

8.5.3.3 Sickerung durch die Auskleidung

$$Q = \frac{1}{\frac{d_{\text{Auskleidung}}}{k \cdot n} + \frac{1}{k_{\text{Fels}} \cdot M_F}} = \frac{1}{\frac{0,30}{0,016 \cdot 10^{-5} \cdot 90} + \frac{1}{4 \cdot 10^{-5} \cdot 2,84}} = 4,26 \cdot 10^{-7} \text{ [l/s] , wobei}$$

- $k = a^3 = 0,005^3 = 0,00000016 = 0,016 \cdot 10^{-5}$ – Durchlässigkeitsbeiwert
- $n = 90$ – Anzahl der Risse
- $d_{\text{Auskleidung}} = 0,30$ [m] – Dicke der Auskleidung
- $k_{\text{Fels}} \geq 4 \cdot 10^{-5}$ [cm/s] – Durchlässigkeitsbeiwert des Felses
- $M_F = \frac{2 \cdot \pi}{\ln\left(\frac{R}{r_2}\right)} = \frac{2 \cdot \pi}{\ln\left(\frac{30,5}{3,35}\right)} = 2,84$ – Filtrationsmodul
- $R = 10 \cdot r_1 = 10 \cdot 3,05 = 30,5$ [m] – Radius der wassergesättigten Zone

Die Formel ist bei mehr als 35 Rissen gültig.

$Q_{\text{zulässig}} = 1$ [l/s] – für 1000m² von der Druckstollenfläche, wenn
 der Innenwasserdruck $H_i < 100$ m ist

Die Sickerung soll kleiner sein als:

$$Q' = 2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot Q_{\text{zulässig}} \cdot 10^{-7} = 2,10 \cdot 10^{-4} \text{ [l/s]} > 4,26 \cdot 10^{-7}$$

$$\Rightarrow Q < Q'$$

8.6 Abschnitt 6

- $L_{\text{Abschnitt}} = 0,20 \cdot L_{\text{Druckstollen}} = 0,20 \cdot 1019,81 = 204 \text{ m}$
- $f = 4 \Rightarrow K_0 = 1600 \text{ N/cm}^2$
- $\varphi = \arctg(f) = 75,964^\circ$
- $\gamma_{\text{Fels}} = 26 \text{ kN/m}^3$

8.6.1 Minimale Dicke der ungerissenen Auskleidung

- $r_1 = \frac{D_{\text{Druckstollen}}}{2} = \frac{6,10}{2} = 3,05 \text{ [m]}$ – Innendurchmesser des Druckstollens
- $p = \gamma_{\text{Wasser}} \cdot H_{\text{WS}} = \frac{10 \cdot 56,01}{1000} = 0,5601 \text{ [MPa]}$ – Innenwasserdruck

wobei:

$\gamma_{\text{Wasser}} = 10 \text{ [kN/m}^3\text{]}$ – Wichte des Wassers

$H_{\text{WS}} = 56,01 \text{ m}$ – Wasserspiegel beim höchsten Schwallspiegel
der Wasserschlossschwungung

8.6.1.1 Notwendige Dicke der Auskleidung:

$$d_{\text{Auskleidung}} = r_1 \cdot \left(\frac{p}{\gamma_c \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}}} - \frac{K_0}{0,70 \cdot E_{\text{Beton}}} \right) = 3,05 \cdot \left(\frac{0,5601}{1,12} - \frac{1600}{0,70 \cdot 32500} \right) = 1,21 \text{ [m]},$$

wobei

$\gamma_c = 1$ – Arbeitsbedingungsbeiwert

$R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = 1,2 \text{ [MPa]}$ – Zugfestigkeit des Betons B30

$E_{\text{Beton}} = 32500 \text{ [MPa]}$ – Elastizitätsmodul des Betons B30

$$d_{\text{Auskleidung}}^{\text{max}} = 0,15 \cdot r_1 = 0,15 \cdot 3,05 = 0,4575 \text{ cm}$$

$d_{\text{Auskleidung}} > d_{\text{Auskleidung}}^{\text{max}} \Rightarrow$ andere Auskleidungskonstruktion ist notwendig

8.6.1.2 Minimale Dicke der ungerissenen Stahlbetonauskleidung

- Äquivalenter Elastizitätsmodul des Stahlbetons:

$$E_{\text{Äquiv}} = E_{\text{Beton}} \cdot \left(1 + \mu_{\text{max}} \cdot \left(\frac{E_{\text{Stahl}}}{E_{\text{Beton}}} - 1 \right) \right) = 32500 \cdot \left(1 + 0,02 \cdot \left(\frac{2,1 \cdot 10^5}{32500} - 1 \right) \right) = 36050 \text{ [MPa]}, \text{ wobei:}$$

$\mu_{\text{max}} = 0,02$ – Maximaler Bewehrungsanteil für ungerissene Auskleidung

$E_{\text{Stahl}} = 210000 \text{ [MPa]}$ – Elastizitätsmodul des Stahls

$\gamma_c = 1,1$ – Abgelesen von Tabelle

$$d_{\text{Auskleidung}} = \frac{r_1}{1 + 30 \cdot \frac{\mu_{\text{max}}}{R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}}}} \cdot \left(\frac{p}{\gamma_c \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}}} - \frac{K_0}{E_{\text{Äquiv}}} \right) = \frac{3,05}{1 + 30 \cdot \frac{0,02}{1,2}} \cdot \left(\frac{0,5601}{1,1 \cdot 1,2} - \frac{1600}{36050} \right) = 0,77 \text{ [m]}$$

$d_{\text{Auskleidung}} > d_{\text{Auskleidung}}^{\text{max}} \Rightarrow$ angenommen: $d_{\text{Auskleidung}} = 30 \text{ cm}$ - gerissene Auskleidung

$$h_{\text{notwendig}} = \frac{K_0 \cdot r_1 \cdot \gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}}}{r_2 \cdot \rho \cdot g \cdot \gamma_n \cdot E_{\text{Stahl}}} = \frac{1600 \cdot 305 \cdot 1,1 \cdot 390}{335 \cdot 0,0026 \cdot 9,81 \cdot 1,25 \cdot 210000} = 93,34 \text{ [m]}, \quad \text{wobei}$$

$r_1 = 3,05 \text{ [m]} = 305 \text{ [cm]}$ – Innendurchmesser

$r_2 = r_1 + d_{\text{Auskleidung}} = 3,05 + 0,30 = 3,35 \text{ [m]} = 335 \text{ [cm]}$

$\gamma_c = 1,1$ – Abgelesen von Tabelle

$R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}} = 390 \text{ [MPa]}$ – Zugfestigkeit des Stahls AIII

$\rho = 0,0026 \text{ [kg/cm}^3\text{]}$ – Dichte des Felses

$\gamma_n = 1,25$ – Abgelesen von Tabelle

$H_{\text{Überlagerung}} = 56,18 \text{ m} < h_{\text{notwendige}}$

$$F_a = \frac{\gamma_n \cdot p \cdot r_1}{\gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}}} - \frac{\rho \cdot g \cdot H_{\text{Überlagerung}} \cdot r_2}{E_{\text{Stahl}}} = \frac{1,25 \cdot 0,5601 \cdot 305}{1,1 \cdot 390} - \frac{0,0026 \cdot 9,81 \cdot 56,18 \cdot 3,35}{210000} = 0,00487 \text{ [cm}^2\text{/cm]}$$

- $\mu_{\text{min}} = 0,5\% = 0,005$

8.6.1.3 Wirkende Lasten

8.6.1.3.1 Bauzeit

- Vertikaler Gebirgsdruck

$$q = \gamma \cdot h_{\text{zerstört}} \cdot \beta = 26,1 \cdot 36,0 \cdot 0,8 = 28,288 \text{ [kN/m]}$$

$$q_{\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot q = 1,5 \cdot 28,288 = 42,432 \text{ [kN/m]}$$

- Eigengewicht

$$\gamma_{\text{Beton}} = 24 \text{ [kN/m}^3\text{]} - \text{Wichte des Betons}$$

$$g = d_{\text{Auskleidung}} \cdot \gamma_{\text{Beton}} = 0,3 \cdot 24 = 7,2 \text{ [kN/m]}$$

$$g_{\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot g = 1,2 \cdot 7,2 = 8,64 \text{ [kN/m]}$$

- Außenwasserdruck- für maximale Überlagerungshöhe

$$H_{\text{Wasser}} = 0,5 \cdot H_{\text{Überlagerung}} = 0,5 \cdot 82,51 = 41,26 \text{ [m]} - \text{Wassergesättigtes Gebirge}$$

$$p_e = \gamma_{\text{Wasser}} \cdot H_{\text{Wasser}} = \frac{10 \cdot 41,26}{1000} = 0,4126 \text{ [MPa]}$$

$$p_{e,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot p_e = 1,1 \cdot 0,4126 = 0,45 \text{ [MPa]}$$

- Außenwasserdruck- am Ende des Abschnitts

$$H_{\text{Wasser}} = 0,5 \cdot H_{\text{Überlagerung}} = 0,5 \cdot 56,18 = 28,09 \text{ [m]} - \text{Wassergesättigtes Gebirge}$$

$$p_e = \gamma_{\text{Wasser}} \cdot H_{\text{Wasser}} = \frac{10 \cdot 28,09}{1000} = 0,281 \text{ [MPa]}$$

$$p_{e,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot p_e = 1,1 \cdot 0,281 = 0,309 \text{ [MPa]}$$

- **Seismische Lasten**
- **Vertikaler Gebirgsdruck - seismisch**

$C = 1,5$ – Beiwert für die Klasse der Anlage
für I^{ste} Klasse = 1,5

$K_s = 0,1$ – Seismischer Beiwert – abgelesen von [2]
Tabelle.22 – "Wasserbautunnel" – Univ.Pr of.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989.

$K_h = 0,7$ – Überlagerungshöhebeiwert – abgelesen von [2]
Tabelle.23 – "Wasserbautunnel" – Univ.Pr of.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989

$$H_{\text{Überlagerung}}^{\text{Max}} = 82,51 \text{ m}$$

$$H_{\text{Überlagerung}}^{\text{Ende}} = 56,18 \text{ m}$$



$R = 0,6$ – Verhaltensbeiwert

$$K'_s = R \cdot c \cdot K_s \cdot K_h = 0,6 \cdot 1,5 \cdot 0,1 \cdot 0,7 = 0,063$$

$$q_s = q \cdot K'_s = 28,288 \cdot 0,063 = 1,782 \text{ [kN/m]}$$

$$q_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot q_s = 1 \cdot 1,782 = 1,782 \text{ [kN/m]}$$

- Eigengewicht- Seismisch

$$g_s = g \cdot K'_s = 7,2 \cdot 0,063 = 0,454 \text{ [kN/m]}$$

$$g_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot g_s = 1 \cdot 0,454 = 0,454 \text{ [kN/m]}$$

8.6.1.3.2 Betriebszeit

- Vertikaler Gebirgsdruck

$$q = \gamma \cdot h_{\text{zerstört}} \cdot \beta = 26 \cdot 1,36 \cdot 0,8 = 28,288 \text{ [kN/m]}$$

$$q_{\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot q = 1,5 \cdot 28,288 = 42,432 \text{ [kN/m]}$$

- Eigengewicht

$$\gamma_{\text{Beton}} = 24 \text{ [kN/m}^3\text{]} \text{ – Wichte des Betons}$$

$$g = d_{\text{Auskleidung}} \cdot \gamma_{\text{Beton}} = 0,3 \cdot 24 = 7,2 \text{ [kN/m]}$$

$$g_{\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot g = 0,9 \cdot 7,2 = 6,48 \text{ [kN/m]}$$

- Außenwasserdruck- für maximale Überlagerungshöhe

$$H_{\text{Wasser}} = 0,5 \cdot H_{\text{Überlagerung}}^{\text{Druckstollen}} = 0,5 \cdot 82,51 = 41,26 \text{ [m]}$$

$$p_e = \gamma_{\text{Wasser}} \cdot H_{\text{Wasser}} = \frac{10 \cdot 41,26}{1000} = 0,4126 \text{ [MPa]}$$

$$p_{e,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot p_e = 0,9 \cdot 0,4126 = 0,37 \text{ [MPa]}$$

- Außenwasserdruck – am Ende der Abschnitts

$$H_{\text{Wasser}} = 0,5 \cdot H_{\text{Überlagerung}}^{\text{Druckstollen}} = 0,5 \cdot 56,18 = 28,09 \text{ [m]}$$

$$p_e = \gamma_{\text{Wasser}} \cdot H_{\text{Wasser}} = \frac{10 \cdot 28,09}{1000} = 0,2809 \text{ [MPa]}$$

$$p_{e,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot p_e = 0,9 \cdot 0,2809 = 0,253 \text{ [MPa]}$$

- Innenwasserdruck – am Ende des Abschnitts

$$p_i \equiv p = 0,5601 \text{ [MPa]}$$

$$p_{i,\text{Bemessung}} \equiv \gamma_f p_i = 1 \cdot 0,5601 = 0,5601 \text{ [MPa]}$$



- Innenwasserdruck – für maximale Überlagerungshöhe

$$p_i \equiv p = 0,5441 \text{ [MPa]}$$

$$p_{i,\text{Berechnung}} \equiv \gamma_f p_i = 1,0 \cdot 0,5441 = 0,524 \text{ [MPa]}$$

- **Seismische Lasten**
- **Vertikaler Gebirgsdruck - seismisch**

$C = 1,5$ – Beiwert für die Klasse der Anlage
für I^{-ste} Klasse = 1,5

$K_s = 0,1$ – Seismischer Beiwert – abgelesen von [2]

Tabelle.22 – "Wasserbautunnel" – Univ.Pr of.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989.

$K_h = 0,7$ – Überlagerungshöhebeiwert – abgelesen von [2]

Tabelle.23 – "Wasserbautunnel" – Univ.Pr of.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989

$$H_{\text{Überlagerung}}^{\text{Max}} = 82,51 \text{ m}$$

$$H_{\text{Überlagerung}}^{\text{Ende}} = 56,18 \text{ m}$$

$R = 0,6$ – Verhaltensbeiwert

$$K'_s = R \cdot c \cdot K_s \cdot K_h = 0,6 \cdot 1,5 \cdot 0,1 \cdot 0,7 = 0,063$$

$$q_s = q \cdot K'_s = 28,288 \cdot 0,063 = 1,782 \text{ [kN/m]}$$

$$q_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot q_s = 1,1 \cdot 1,782 = 1,782 \text{ [kN/m]}$$

- Eigengewicht- Seismisch

$$g_s = g \cdot K'_s = 7,2 \cdot 0,063 = 0,454 \text{ [kN/m]}$$

$$g_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot g_s = 1,0 \cdot 0,454 = 0,454 \text{ [kN/m]}$$

- Innenwasserdruck – seismisch

$$p_{i,s} = 100 \cdot K'_s = 100 \cdot 0,063 = 6,3 \text{ [kN/m]}$$

$$p_{i,s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot p_{i,s} = 1,1 \cdot 6,3 = 6,93 \text{ [kN/m]}$$

8.6.1.4 Bemessung der Biegemomente und der Normalkräfte

Der Querschnitt ist als kreisförmig vorgesehen. Die Biegemomente und Zugkräfte sind in 5 Punkten berechnet. Der vertikale Gebirgsdruck und das Eigengewicht sind als gleichmäßig über den Querschnittsdurchmesser verteilt. Die elastische Reaktion des Felses ist gleichmäßig über den Perimeter verteilt, wie es unten gezeigt ist.



Die Formeln für die Berechnung sind im 8.1.1.4 gezeigt

8.6.1.5 Bemessung der Spannungen

$$\sigma_{1,2} = \frac{N}{F} \mp \frac{M}{W} \text{ [kPa] , wobei}$$

$F = b \cdot d_{\text{Auskleidung}} = 1,0 \cdot 30 = 0,30 \text{ [m}^2\text{]}$ – Fläche der Auskleidung für 1 m des Druckstollens

$$W = \frac{b \cdot d_{\text{Auskleidung}}^2}{6} = \frac{1,0 \cdot 30^2}{6} = 0,0150 \text{ [m}^3\text{]}$$

Während der Betriebszeit (maximaler Innenwasserdruck) sind die Spannungen für alle Punkten des Querschnitts gleich:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (2 \cdot \varepsilon \cdot r_2^2 - (r_1^2 + r_2^2))}{r_2^2 - r_1^2} = \frac{0,5601 \cdot 10^3 \cdot (2 \cdot 0,3 \cdot 3,35^2 - (3,05^2 + 3,35^2))}{3,35^2 - 3,05^2} = -4023 \text{ [kPa]}$$

$$\sigma_2 = \frac{p \cdot (\varepsilon \cdot (r_1^2 + r_2^2) - 2 \cdot r_1^2)}{r_2^2 - r_1^2} = \frac{0,5601 \cdot 10^3 \cdot (0,3 \cdot (3,05^2 + 3,35^2) - 2 \cdot 3,05^2)}{3,35^2 - 3,05^2} = -3631 \text{ kPa}$$

$\varepsilon = 0,3$ – abgelesen von [2] Tabelle.99 –

"Wasserbautunnel" – Univ. Prof. Dipl. Ing – Ljubomir Georgiev 1989

$$a = \frac{r_2}{r_1} = \frac{3,35}{3,05} = 1,10$$

$$c = \frac{E_{\text{Äquiv}} \cdot (1 + \nu_{\text{Fels}})}{E_{\text{Fels}} \cdot (1 + \nu_{\text{Äquiv}})} = \frac{32509 \cdot (1 + 0,28)}{2048 \cdot (1 + 0,20)} = 16,9$$

$$E_{\text{Äquiv}} = E_{\text{Beton}} \cdot \left(1 + \mu_{\text{min}} \cdot \left(\frac{E_{\text{Stahl}}}{E_{\text{Beton}}} - 1 \right) \right) = 32500 \cdot \left(1 + 0,005 \cdot \left(\frac{21 \cdot 10^4}{32500} - 1 \right) \right) = 32509 \text{ MPa}$$

$$\nu_{\text{Äquiv}} = \nu_{\text{Beton}} \cdot \left(1 + \mu_{\text{min}} \cdot \left(\frac{\nu_{\text{Stahl}}}{\nu_{\text{Beton}}} - 1 \right) \right) = 0,2 \cdot \left(1 + 0,005 \cdot \left(\frac{0,3}{0,2} - 1 \right) \right) = 0,20$$

$$E_{\text{Fels}} = K_0 \cdot (1 + \nu_{\text{Fels}}) = 1600 \cdot (1 + 0,2) = 1920 \text{ [MPa]}$$

$\nu_{\text{Fels}} = 0,28$ – Poissonzahl für Fels

$\nu_{\text{Beton}} = 0,2$ – Poissonzahl für Beton

$\nu_{\text{Stahl}} = 0,3$ – Poissonzahl für Stahl

8.6.1.6 Zulässige Spannungen

8.6.1.6.1 Bauzeit

$\sigma_{1,2} \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug(Druck)}}$, wobei γ_c und γ_n von oben abgelesen werden

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = \frac{1}{1,25 \cdot 0,95} \cdot 1,2 = 1,01 \text{ [MPa]}$$

$R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = 1,2 \text{ [MPa]}$ – Zugfestigkeit des Betons B30

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Druck}} = \frac{1}{1,25 \cdot 0,95} \cdot 17 = 14,32 \text{ [MPa]}$$

$R_{\text{Beton}}^{\text{Druck}} = 17 \text{ [MPa]}$ – Druckfestigkeit des Betons B30

8.6.1.6.2 Betriebszeit

- Übliche Lasten

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = \frac{1}{1,25 \cdot 1} \cdot 1,2 = 0,96 \text{ [MPa]}$$

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Druck}} = \frac{1}{1,25 \cdot 1} \cdot 17 = 13,60 \text{ [MPa]}$$

- Besondere Lasten

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = \frac{1,2}{1,25 \cdot 0,9} \cdot 1,2 = 1,28 \text{ [MPa]}$$

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Druck}} = \frac{1,2}{1,25 \cdot 0,9} \cdot 17 = 18,13 \text{ [MPa]}.$$

Die maximalen Druckspannungen in der Auskleidung sind kleiner als die zulässigen Spannungen. Wenn aber das Gebirge trocken ist und es keinen Außenwasserdruck $p_e = 0$ gibt, dann werden die Zugspannungen größer und ist eine zusätzliche Bewehrung des Querschnitts erforderlich.

Maßgebend ist die Bemessung am Ende des Abschnitts – maximaler Innenwasserdruck.



Tab. 8-32 Biegemomente und Normalkräfte während der Bauzeit- für maximale Überlagerungshöhe

Tabelle		Q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		g _{Berechnung}		p _{e, Berechnung}		q _{s, Berechnung}		e _{s, Berechnung}		g _{s, Berechnung}	
		M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N
		kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN
Schnitt	1	15.38	87.52	0.00	0.00	0.83	23.19	-1.51	1529.38	0.55	3.15	0.00	0.00	0.04	1.04
	2	-10.85	132.97	0.00	0.00	-0.65	28.99	1.01	1528.38	-0.39	4.79	0.00	0.00	-0.03	1.30
	3	0.75	166.50	0.00	0.00	0.19	51.04	-0.30	1528.87	0.03	5.99	0.00	0.00	0.01	2.30
	4	2.45	166.05	0.00	0.00	-2.06	70.84	3.36	1527.48	0.09	5.98	0.00	0.00	-0.09	3.19
	5	-1.57	167.35	0.00	0.00	3.61	77.60	-5.99	1531.02	-0.06	6.02	0.00	0.00	0.16	3.49

Tab. 8-33 Spannungen während der Bauzeit - für maximale Überlagerungshöhe

Tabelle		q _{Ber}		e _{Ber}		g _{Ber}		p _{eBer}		q _{s, Bere}		E _{s, Ber}		g _{s, Bere}		q _{ber} +e _{ber} +g _{ber} +p _{eber}		Σ(x _{i, ber})+Σ(x _{i, ber})	
		σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2
		kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
Schnitt	1	-733.6	1317.1	0.0	0.0	21.8	132.8	5198.3	4997.5	-26.4	47.4	0.0	0.0	1.0	6.0	4486.5	6447.4	4461.1	6500.8
	2	1166.6	-280.2	0.0	0.0	139.9	53.4	5027.0	5162.2	42.0	-10.1	0.0	0.0	6.3	2.4	6333.5	4935.4	6381.8	4927.7
	3	504.7	605.3	0.0	0.0	157.5	182.7	5116.3	5076.1	18.2	21.8	0.0	0.0	7.1	8.2	5778.6	5864.2	5803.8	5894.2
	4	390.3	716.7	0.0	0.0	373.5	98.8	4867.4	5315.8	14.1	25.8	0.0	0.0	16.8	4.4	5631.1	6131.4	5662.0	6161.7
	5	662.8	452.9	0.0	0.0	17.8	499.5	5502.9	4703.9	23.9	16.3	0.0	0.0	0.8	22.5	6183.6	5656.3	6208.2	5695.0



Tab. 8-34 Biegemomente und Normalkräfte während der Betriebszeit - für maximale Überlagerungshöhe

Tabelle	Q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		g _{Berechnung}		p _{e, Berechnung}		Q _{s, Berechnung}		e _{s, Berechnung}		g _{s, Berechnung}		Q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		
	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	
	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	
Schnitt	1	15.38	87.52	0.00	0.00	0.62	17.39	-1.51	1252.97	1.51	-7.57	0.55	3.15	0.00	0.00	0.04	1.04	1.51	-7.57
	2	-10.85	132.97	0.00	0.00	-0.49	21.74	1.01	1251.97	-1.01	-6.74	-0.39	4.79	0.00	0.00	-0.03	1.30	-1.01	-6.74
	3	0.75	166.50	0.00	0.00	0.14	38.28	-0.30	1252.46	0.30	-7.15	0.03	5.99	0.00	0.00	0.01	2.30	0.30	-7.15
	4	2.45	166.05	0.00	0.00	-1.54	53.13	3.36	1251.07	-3.36	-6.00	0.09	5.98	0.00	0.00	-0.09	3.19	-3.36	-6.00
	5	-1.57	167.35	0.00	0.00	2.71	58.20	-5.99	1254.61	5.99	-8.93	-0.06	6.02	0.00	0.00	0.16	3.49	5.99	-8.93

Tab. 8-35 Spannungen während der Betriebszeit - für maximale Überlagerungshöhe

Tabelle	q _{Ber}		e _{Ber}		g _{Ber}		p _{e, Ber}		p _{i, Ber}		Q _{s, Ber}		e _{s, изчисл}		g _{s, Ber}		p _{i, Ber}		q _{Ber} +e _{Ber} +g _{Ber} +p _{e, Ber}		Σ(x _{i, Ber})+Σ(x _{i,c, Ber})		p _i		Total.		
	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	
	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
Schnitt	1	-734	1317	0	0	16	100	4277	4076	-126	75	-26	47	0	0	1	6	-126	75	3434	5568	3283	5697	-3908	-3527	-474	2041
	2	1167	-280	0	0	105	40	4106	4241	45	-90	42	-10	0	0	6	2	45	-90	5422	3911	5516	3813	-3908	-3527	1514	383
	3	505	605	0	0	118	137	4195	4155	-44	-4	18	22	0	0	7	8	-44	-4	4774	4893	4755	4920	-3908	-3527	866	1366
	4	390	717	0	0	280	74	3946	4394	204	-244	14	26	0	0	17	4	204	-244	4821	4941	5056	4727	-3908	-3527	912	1414
	5	663	453	0	0	13	375	4582	3783	-429	370	24	16	0	0	1	22	-429	370	4828	4980	4424	5388	-3908	-3527	920	1452



Tab. 8-36 Biegemomente und Normalkräfte während der Bauzeit am Ende des Abschnitts

Tabelle		Q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		g _{Berechnung}		p _{e, Berechnung}		q _{s, Berechnung}		e _{s, Berechnung}		g _{s, Berechnung}	
		M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N
		kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN
Schnitt	1	15.38	87.52	0.00	0.00	0.83	23.19	-1.51	1044.25	0.65	3.68	0.00	0.00	0.04	1.22
	2	-10.85	132.97	0.00	0.00	-0.65	28.99	1.01	1043.25	-0.46	5.58	0.00	0.00	-0.03	1.52
	3	0.75	166.50	0.00	0.00	0.19	51.04	-0.30	1043.74	0.03	6.99	0.00	0.00	0.01	2.68
	4	2.45	166.05	0.00	0.00	-2.06	70.84	3.36	1042.35	0.10	6.97	0.00	0.00	-0.11	3.72
	5	-1.57	167.35	0.00	0.00	3.61	77.60	-5.99	1045.89	-0.07	7.03	0.00	0.00	0.19	4.07

Tab. 8-37 Spannungen während der Bauzeit - am Ende des Abschnitts

Tabelle		q _{Ber}		e _{Ber}		g _{Ber}		p _{eBer}		q _{s, Bere}		E _{s, Ber}		g _{s, Bere}		q _{ber} +e _{ber} +g _{ber} +p _{eber}		Σ(x _{i, ber})+Σ(x _{i, ber})	
		σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2
		kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
Schnitt	1	-734	1317	0	0	22	133	3581	3380	-31	55	0	0	1	7	2869	4830	2840	4893
	2	1167	-280	0	0	140	53	3410	3545	49	-12	0	0	7	3	4716	3318	4773	3309
	3	505	605	0	0	158	183	3499	3459	21	25	0	0	8	10	4161	4247	4191	4282
	4	390	717	0	0	373	99	3250	3699	16	30	0	0	20	5	4014	4514	4050	4550
	5	663	453	0	0	18	500	3886	3087	28	19	0	0	1	26	4566	4039	4595	4084



Tab. 8-38 Biegemomente und Normalkräfte während der Betriebszeit- am Ende des Abschnitts

Tabelle	Q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		g _{Berechnung}		p _{e, Berechnung}		Q _{s, Berechnung}		e _{s, Berechnung}		g _{s, Berechnung}		Q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		
	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	
	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	
Schnitt	1	15.38	87.52	0.00	0.00	0.62	17.39	-1.51	856.05	1.51	-7.57	0.65	3.68	0.00	0.00	0.04	1.22	1.51	-7.57
	2	-10.85	132.97	0.00	0.00	-0.49	21.74	1.01	855.04	-1.01	-6.74	-0.46	5.58	0.00	0.00	-0.03	1.52	-1.01	-6.74
	3	0.75	166.50	0.00	0.00	0.14	38.28	-0.30	855.54	0.30	-7.15	0.03	6.99	0.00	0.00	0.01	2.68	0.30	-7.15
	4	2.45	166.05	0.00	0.00	-1.54	53.13	3.36	854.15	-3.36	-6.00	0.10	6.97	0.00	0.00	-0.11	3.72	-3.36	-6.00
	5	-1.57	167.35	0.00	0.00	2.71	58.20	-5.99	857.68	5.99	-8.93	-0.07	7.03	0.00	0.00	0.19	4.07	5.99	-8.93

Tab. 8-39 Spannungen während der Betriebszeit- am Ende des Abschnitts

Tabelle	q _{Ber}		e _{Ber}		g _{Ber}		p _{e, Ber}		p _{i, Ber}		q _{s, Ber}		e _{s, изчисл}		g _{s, Ber}		p _{i, Ber}		q _{Ber} +e _{Ber} +g _{Ber} +p _{e, Ber}		Σ(x _{i, Ber})+Σ(x _{i,c, Ber})		p _i		Total.		
	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	
	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
Schnitt	1	-734	1317	0	0	16	100	2954	2753	-126	75	-31	55	0	0	1	7	-126	75	2111	4245	1956	4382	-4023	-3631	-1912	614
	2	1167	-280	0	0	105	40	2783	2918	45	-90	49	-12	0	0	7	3	45	-90	4099	2588	4201	2489	-4023	-3631	76	-1044
	3	505	605	0	0	118	137	2872	2832	-44	-4	21	25	0	0	8	10	-44	-4	3451	3570	3436	3602	-4023	-3631	-572	-61
	4	390	717	0	0	280	74	2623	3071	204	-244	16	30	0	0	20	5	204	-244	3498	3618	3738	3409	-4023	-3631	-526	-13
	5	663	453	0	0	13	375	3258	2459	-429	370	28	19	0	0	1	26	-429	370	3505	3657	3105	4072	-4023	-3631	-518	26

8.6.2 Bemessung der Bewehrung

Die Bewehrung ist mit Außenwasserdruck von $p_e = 0$ bemessen. In diesem Fall entstehen maximale Zugspannungen:

		übliche		besondere	
		σ_1	σ_2	σ_1	σ_2
		kPa	kPa	kPa	kPa
Schnitt	1	-4866	-2139	-5021	-2002
	2	-2707	-3961	-2605	-4060
	3	-3444	-2893	-3459	-2861
	4	-3149	-3085	-2908	-3293
	5	-3776	-2434	-4177	-2019

- Maximale Spannungen:

$$\sigma_1 = -5021 \text{ [kPa]} \quad \sigma_2 = -2002 \text{ [kPa]}$$

Es gibt drei Möglichkeiten für die Position der Normalkraft.

8.6.2.1 Zentrischer Zug

Für die maximale Spannung $\sigma_1 = -5021 \text{ [kPa]}$ wird die Resultierende berechnet:

$$F_{\text{Auskleidung}} = d_{\text{Auskleidung}} \cdot b = 0,3 \cdot 100 \cdot 1.300 = 3000 \text{ [cm}^2\text{]} - \text{Fläche der Auskleidung}$$

für Länge des Druckstollens $b = 100 \text{ cm}$

- Resultierende:

$$N_{\text{Zug}} = \sigma_1 \cdot F_{\text{Fläche}} = 5021 \cdot 10^{-4} \cdot 3000 = 1506,42 \text{ [kN]}$$

$$R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}} = 390 \text{ [MPa]} - \text{Zugfestigkeit des Stahls}$$

- Fläche der Bewehrung:

$$F_a = \frac{\gamma_m \cdot \gamma_n \cdot N_{\text{Zug}}}{\gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}}} = \frac{1,1 \cdot 1,25 \cdot 1506,42}{1,1 \cdot 390 \cdot 10^3} \cdot 10^4 = 43,9 \text{ [cm}^2\text{ / m]}$$

$$\gamma_c = 1,1 \quad \gamma_n = 1,25 \quad \gamma_m = 1$$



8.6.2.2 Zug mit kleiner Exzentrizität

Die Normalkraft wird zwischen der Flächen der Zug- und Druckbewehrung verteilt.

F_a und F'_a .

$a = a' = 0,05$ [m] – Betonüberdeckung

$h_o = d_{\text{Auskleidung}} - a = 0,3 - 0,05 = 0,25$ [m]

$e_o = \frac{M}{N} = \frac{22,6425}{1053,45} = 0,021$ [m] – Exzentrizität der Normalkraft

Der Biegemoment M und die Normalkraft N sind durch folgende Formel berechnet:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{N}{F} - \frac{M}{W} \\ \sigma_2 = \frac{N}{F} + \frac{M}{W} \end{cases} \quad \begin{cases} -5021 = \frac{N}{0,3} - \frac{M}{0,0150} \\ -2002 = \frac{N}{0,30} + \frac{M}{0,0150} \end{cases}$$

$M = 22,6425$ kNm $N = -1053,45$ kN

- Abstand der Normalkraft N von der Druckbewehrung

$e' = 0,5 \cdot (h_o - a') - e_o = 0,5 \cdot (0,25 - 0,05) - 0,021 = 0,079$ [m]

- Abstand der Normalkraft N von der Zugbewehrung

$e = 0,5 \cdot (h_o - a) + e_o = 0,5 \cdot (0,25 - 0,05) + 0,021 = 0,121$ [m]

- Fläche der Zugbewehrung.

$$F_a = \frac{\gamma_m \cdot \gamma_n \cdot N \cdot e}{\gamma_c \cdot R_{\text{СТОМАНА}}^{\text{ОПЪН}} \cdot (h_o - a)} = \frac{1,1 \cdot 1,25 \cdot 1053,45 \cdot 0,121}{1,1 \cdot 390 \cdot 10^3 \cdot (0,25 - 0,05)} \cdot 10^{-4} = 18,65 \text{ [cm}^2 \text{ / m}^2\text{]}$$

- Flächen der Druckbewehrung

$$F'_a = \frac{\gamma_m \cdot \gamma_n \cdot N \cdot e'}{\gamma_c \cdot R_{\text{СТОМАНА}}^{\text{НАТИСК}} \cdot (h_o - a)} = \frac{1,1 \cdot 1,25 \cdot 1053,45 \cdot 0,079}{1,1 \cdot 390 \cdot 10^3 \cdot (0,25 - 0,05)} \cdot 10^{-4} = 12,05 \text{ [cm}^2 \text{ / m}^2\text{]}$$



$$\alpha = 1,1 \quad \beta = 1,2 \quad \eta = 1,0$$

$\sigma_0 = 20$ [MPa] – Angenommene Anfangsspannung in der Bewehrung

$d = 16$ [mm] – Durchmesser des Bewehrungsstahls

$\mu = 0,0118$ – Bewehrungsanteil

$E_{\text{Stahl}} = 210000$ [MPa]

$$\sigma_{\text{Stahl}} = \frac{p_i \cdot r_1}{F_a + \frac{K_0 \cdot r_1}{E_{\text{Stahl}}}} = \frac{0,5601 \cdot 305}{0,35482 + \frac{1600 \cdot 305}{2100000}} = 63,78 \text{ [MPa]}$$

$$p_i = 0,5441 \text{ [MPa]}$$

$$K_0 = 4000 \text{ [N/m}^3 \cdot 10^5\text{]}$$

$$F_a = 0,21352 \text{ [cm}^2 \text{ / cm}^3\text{]}$$

$$r_1 = 305 \text{ [cm]}$$

$$E_{\text{Stahl}} = 2100000 \text{ [N/m}^2 \cdot 10^5\text{]}$$

Die maximale Rissbreite hängt von: Hydraulischem Gradient, Wasserhärte, maximalem W/Z-Wert, Anzahl der Cl^- und SO_4^{2-} -Ionen, Durchlässigkeitsbeiwert des Felses, Klasse der Anlage ab.

- Hydraulischer Gradient

$$J = \frac{H_i - H_e}{d_{\text{Auskleidung}}} = \frac{56,01 - 28,09}{0,3} = 93,1$$

- Hydraulischer Gradient ohne Außenwasserdruck :

$$J = \frac{H_i}{d_{\text{Auskleidung}}} = \frac{56,01}{0,30} = 186,7$$

Es werden folgende Annahmen gemacht:

- Wasserhärte : $0,25 \text{ [g/dm}^3 \cdot 10^{-3}\text{]}, \text{ [mg/l]}$
- Hydraulischer Gradient : $50 < J = 186,7 < 300$
- Durchlässigkeitsbeiwert des Felses $k_{\text{Fels}} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ [cm/s]}$
- Maximaler W/Z- Wert -0,5
- Anlage- Klasse - I
- Anzahl der Cl^- und SO_4^{2-} Ionen - 400 – 1000 [mg/l]

Maximale zulässige Rissbreite: 0,06 [mm].



8.6.3.2 Anzahl der Risse

$$n = \frac{16 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot \mu}{d} = \frac{16 \cdot \pi \cdot 335,0 \cdot 0,0118}{1,6} = 120$$

8.6.3.3 Sickerung durch die Auskleidung

$$Q = \frac{1}{\frac{d_{\text{Auskleidung}}}{k \cdot n} + \frac{1}{k_{\text{Fels}} \cdot M_{\text{F}}}} = \frac{1}{\frac{0,30}{3,9 \cdot 10^{-5} \cdot 120} + \frac{1}{4 \cdot 10^{-5} \cdot 2,84}} = 6,65 \cdot 10^{-5} \text{ [l/s] , wobei}$$

- $k = a^3 = 0,034^3 = 0,000039 = 3,9 \cdot 10^{-5}$ – Durchlässigkeitsbeiwert
- $n = 120$ – Anzahl der Risse
- $d_{\text{Auskleidung}} = 0,30 \text{ [m]}$ – Dicke der Auskleidung
- $k_{\text{Fels}} \geq 4 \cdot 10^{-5} \text{ [cm/s]}$ – Durchlässigkeitsbeiwert des Felses
- $M_{\text{F}} = \frac{2 \cdot \pi}{\ln\left(\frac{R}{r_2}\right)} = \frac{2 \cdot \pi}{\ln\left(\frac{30,5}{3,35}\right)} = 2,84$ – Filtrationsmodul
- $R = 10 \cdot r_1 = 10 \cdot 3,05 = 30,5 \text{ [m]}$ – Radius der wassergesättigten Zone

Die Formel ist bei mehr als 35 Rissen gültig.

$Q_{\text{zulässig}} = 1 \text{ [l/s]}$ – für 1000 m^2 von der Druckstollenfläche, wenn
 der Innenwasserdruck $H_i < 100 \text{ m}$ ist

Die Sickerung soll kleiner sein als:

$$Q' = 2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot Q_{\text{zulässig}} \cdot 10^{-7} = 2,10 \cdot 10^{-4} \text{ [l/s]} > 6,65 \cdot 10^{-5}$$

$$\Rightarrow Q < Q'$$



8.7 Abschnitt 7

- $L_{\text{Abschnitt}} = 0,15 \cdot L_{\text{Druckstollen}} = 0,15 \cdot 1019,81 = 153 \text{ m}$
- $f = 3 \Rightarrow K_0 = 1000 \text{ N/cm}^2$
- $\varphi = \arctg(f) = 71,565^\circ$
- $\gamma_{\text{Fels}} = 25 \text{ kN/m}^3$

8.7.1 Minimale Dicke der ungerissenen Auskleidung

- $r_1 = \frac{D'_{\text{Тунел}}}{2} = \frac{6,10}{2} = 3,05 \text{ [m]}$ – втрешен радиус на тунела
- $p = \gamma_{\text{Wasser}} \cdot H_{\text{WS}} = \frac{10 \cdot 57,22}{1000} = 0,5722 \text{ [MPa]}$ – Innenwasserdruck

wobei:

$\gamma_{\text{Wasser}} = 10 \text{ [kN/m}^3\text{]}$ – Wichte des Wassers

$H_{\text{WS}} = 57,22 \text{ m}$ – Wasserspiegel beim höchsten Schwallspiegel der Wasserschlossschwungung

8.7.1.1 Notwendige Dicke der Auskleidung:

$$d_{\text{Auskleidung}} = r_1 \cdot \left(\frac{p}{\gamma_c \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}}} - \frac{K_0}{0,70 \cdot E_{\text{Beton}}} \right) = 3,05 \cdot \left(\frac{0,5722}{1,1,2} - \frac{1000}{0,70 \cdot 32500} \right) = 1,14 \text{ [m]},$$

wobei

$\gamma_c = 1$ – Arbeitsbedingunsbeiwert

$R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = 1,2 \text{ [MPa]}$ – Zugfestigkeit des Betons B30

$E_{\text{бетон}} = 32500 \text{ [MPa]}$ – Elastizitätsmodul des Betons B30

$$d_{\text{Auskleidung}}^{\text{max}} = 0,15 \cdot r_1 = 0,15 \cdot 3,05 = 0,4575 \text{ cm}$$

$d_{\text{Auskleidung}} > d_{\text{Auskleidung}}^{\text{max}} \Rightarrow$ andere Auskleidungskonstruktion ist notwendig

8.7.1.2 Minimale Dicke der ungerissenen Stahlbetonauskleidung

- Äquivalenter Elastizitätsmodul des Stahlbetons:

$$E_{\text{Äquiv}} = E_{\text{Beton}} \cdot \left(1 + \mu_{\text{max}} \cdot \left(\frac{E_{\text{Stahl}}}{E_{\text{Beton}}} - 1 \right) \right) = 32500 \cdot \left(1 + 0,02 \cdot \left(\frac{2,1 \cdot 10^5}{32500} - 1 \right) \right) = 36050 \text{ [MPa]}, \text{ wobei:}$$

$\mu_{\text{max}} = 0,02$ – Maximaler Bewehrungsanteil für ungerissene Auskleidung

$E_{\text{Stahl}} = 210000 \text{ [MPa]}$ – Elastizitätsmodul des Stahls

$\gamma_c = 1,1$ – Abgelesen von Tabelle

$$d_{\text{Auskleidung}} = \frac{r_1}{1 + 30 \cdot \frac{\mu_{\text{max}}}{R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}}}} \cdot \left(\frac{p}{\gamma_c \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}}} - \frac{K_0}{E_{\text{Äquiv}}} \right) = \frac{3,05}{1 + 30 \cdot \frac{0,02}{1,2}} \cdot \left(\frac{0,5722}{1,1 \cdot 1,2} - \frac{1000}{36050} \right) = 0,83 \text{ [m]}$$

$d_{\text{Auskleidung}} > d_{\text{Auskleidung}}^{\text{max}} \Rightarrow$ angenommen: $d_{\text{Auskleidung}} = 30 \text{ cm}$ - gerissene Auskleidung

$$h_{\text{notwendig}} = \frac{K_0 \cdot r_1 \cdot \gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}}}{r_2 \cdot \rho \cdot g \cdot \gamma_n \cdot E_{\text{Stahl}}} = \frac{1000 \cdot 305 \cdot 1,1 \cdot 390}{335 \cdot 0,0025 \cdot 9,81 \cdot 1,25 \cdot 210000} = 60,67 \text{ [m]}, \quad \text{wobei}$$

$r_1 = 3,05 \text{ [m]} = 305 \text{ [cm]}$ – Innendurchmesser

$r_2 = r_1 + d_{\text{Auskleidung}} = 3,05 + 0,30 = 3,35 \text{ [m]} = 335 \text{ [cm]}$

$\gamma_c = 1,1$ – Abgelesen von Tabelle

$R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}} = 390 \text{ [MPa]}$ – Zugfestigkeit des Stahls AIII

$\rho = 0,0025 \text{ [kg/cm}^3\text{]}$ – Dichte des Felses

$\gamma_n = 1,25$ – Abgelesen von Tabelle

$H_{\text{Überlagerung}} = 56,18 \text{ m} < h_{\text{notwendige}}$

$$F_a = \frac{\gamma_n \cdot p \cdot r_1}{\gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}}} - \frac{\rho \cdot g \cdot H_{\text{Überlagerung}} \cdot r_2}{100 \cdot \gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}}} = \frac{1,25 \cdot 0,512 \cdot 3,05}{1,1 \cdot 390} - \frac{0,0025 \cdot 9,81 \cdot 56,18 \cdot 3,35}{100 \cdot 1,1 \cdot 390} = 0,00498 \text{ [cm}^2/\text{cm]}$$

- $\mu_{\text{min}} = 0,5\% = 0,005$

8.7.1.3 Wirkende Lasten

8.7.1.3.1 Bauzeit

- Vertikaler Gebirgsdruck

$$q = \gamma \cdot h_{\text{zerstört}} \cdot \beta = 25 \cdot 1,5 \cdot 0,8 = 31 \text{ [kN/m]}$$

$$q_{\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot q = 1,5 \cdot 31 = 46,5 \text{ [kN/m]}$$

- Horizontaler Gebirgsdruck

$$e = \gamma \cdot (h_{\text{zerstört}} + 0,5 \cdot D_3) \cdot \text{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) = 25 \cdot (1,55 + 0,5 \cdot 6,8) \cdot \text{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{71,565^\circ}{2} \right) = 3,325 \text{ [kN/m]}$$

$$e_{\text{Berechnung}} = e \cdot \gamma_f = 3,325 \cdot 1,2 = 3,99 \text{ [kN/m]}$$

- Eigengewicht

$$\gamma_{\text{Beton}} = 24 \text{ [kN/m}^3\text{]} - \text{Wichte des Betons}$$

$$g = d_{\text{Auskleidung}} \cdot \gamma_{\text{Beton}} = 0,3 \cdot 24 = 7,2 \text{ [kN/m]}$$

$$g_{\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot g = 1,2 \cdot 7,2 = 8,64 \text{ [kN/m]}$$

- Außenwasserdruck

$$H_{\text{Wasser}} = 0,5 \cdot H_{\text{Überlagerung}} = 0,5 \cdot 68,91 = 34,46 \text{ [m]} - \text{Wassergesättigtes Gebirge}$$

$$p_e = \gamma_{\text{Wasser}} \cdot H_{\text{Wasser}} = \frac{10 \cdot 34,46}{1000} = 0,3446 \text{ [MPa]}$$

$$p_{e,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot p_e = 1,1 \cdot 0,3446 = 0,38 \text{ [MPa]}$$

- Seismische Lasten
- Vertikaler Gebirgsdruck - seismisch

$$C = 1,5 - \text{Beiwert für die Klasse der Anlage} \\ \text{für I}^{-\text{ste}} \text{ Klasse} = 1,5$$

$$K_s = 0,1 - \text{Seismischer Beiwert} - \text{abgelesen von [2]}$$

Tabelle.22 – "Wasserbautunnel" – Univ.Pr of.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989.

$$K_h = 0,65 - \text{Überlagerungshöhebeiwert} - \text{abgelesen von [2]}$$

Tabelle.23 – "Wasserbautunnel" – Univ.Pr of.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989

$$H_{\text{Überlagerung}} = 68,91 \text{ m}$$

$$R = 0,6 - \text{Verhaltensbeiwert}$$

$$K'_s = R \cdot c \cdot K_s \cdot K_h = 0,6 \cdot 1,5 \cdot 0,1 \cdot 0,65 = 0,0585$$

$$q_s = q \cdot K'_s = 31 \cdot 0,0585 = 1,814 \text{ [kN/m]}$$



$$q_{s,Berechnung} = \gamma_f \cdot q_s = 1,1,814 = 1,814 \text{ [kN/m]}$$

- Horizontaler Gebirgsdruck - seismisch

$$\varphi = 71,565^\circ - \text{Reibungswinkel}$$

$$e_s = 2 \cdot K'_s \cdot e \cdot \text{tg}(\varphi) = 2,0,0585 \cdot 3,325 \cdot \text{tg}(71,565^\circ) = 1,167 \text{ [kN/m]}$$

$$e_{s,Berechnung} = \gamma_f \cdot e_s = 1,1,167 = 1,167 \text{ [kN/m]}$$

- Eigengewicht - seismisch

$$g_s = g \cdot K'_s = 7,2,0,0585 = 0,421 \text{ [kN/m]}$$

$$g_{s,Berechnung} = \gamma_f \cdot g_s = 1,0,421 = 0,421 \text{ [kN/m]}$$

8.7.1.3.2 Betriebszeit

- Vertikaler Gebirgsdruck

$$q = \gamma \cdot h_{\text{zerstört}} \cdot \beta = 25,1,5,0,8 = 31 \text{ [kN/m]}$$

$$q_{Berechnung} = \gamma_f \cdot q = 1,5,31 = 46,5 \text{ [kN/m]}$$

- Horizontaler Gebirgsdruck

$$e = \gamma \cdot (h_{\text{zerstört}} + 0,5 \cdot D_3) \cdot \text{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) = 25 \cdot (1,55 + 0,5 \cdot 7,0) \cdot \text{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{71,565^\circ}{2} \right) = 3,325 \text{ [kN/m]}$$

$$e_{Berechnung} = e \cdot \gamma_f = 3,325 \cdot 0,8 = 2,66 \text{ [kN/m]}$$

- Eigengewicht

$$\gamma_{\text{Beton}} = 24 \text{ [kN/m}^3] - \text{Wichte des Betons}$$

$$g = d_{\text{Auskleidung}} \cdot \gamma_{\text{Beton}} = 0,3,24 = 7,2 \text{ [kN/m]}$$

$$g_{Berechnung} = \gamma_f \cdot g = 0,9,7,2 = 6,48 \text{ [kN/m]}$$

- Außenwasserdruck

$$H_{\text{Wasser}} = 0,5 \cdot H_{\text{Druckstollen Überlagerung}} = 0,5,68,91 = 34,46 \text{ [m]}$$

$$p_e = \gamma_B \cdot H_{\text{Wasser}} = \frac{10 \cdot 34,44}{1000} = 0,3446 \text{ [MPa]}$$

$$p_{e,Berechnung} = \gamma_f \cdot p_e = 0,9,0,3446 = 0,31 \text{ [MPa]}$$

- Innenwasserdruck

$$p_i \equiv p = 0,5722 \text{ [MPa]}$$

$$p_{i,Berechnung} \equiv \gamma_f p_i = 1,0,5722 = 0,5722 \text{ [MPa]}$$



- **Seismische Lasten**
- **Vertikaler Gebirgsdruck - seismisch**

$C = 1,5$ – Beiwert für die Klasse der Anlage
für I^{-ste} Klasse = 1,5

$K_s = 0,1$ – Seismischer Beiwert – abgelesen von [2]
Tabelle.22 – "Wasserbautunnel" – Univ.Pr of.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989.

$K_h = 0,65$ – Überlagerungshöhebeiwert – abgelesen von [2]
Tabelle.23 – "Wasserbautunnel" – Univ.Pr of.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989

$H_{\text{Überlagerung}} = 68,91 \text{ m}$

$R = 0,6$ – Verhaltungsbeiwert

$K'_s = R \cdot C \cdot K_s \cdot K_h = 0,6 \cdot 1,5 \cdot 0,1 \cdot 0,65 = 0,0585$

$q_s = q \cdot K'_s = 31 \cdot 0,0585 = 1,814 \text{ [kN/m]}$

$q_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot q_s = 1 \cdot 1,814 = 1,814 \text{ [kN/m]}$

- **Horizontaler Gebirgsdruck - seismisch**

$\varphi = 71,565^\circ$ – Reibungswinkel

$e_s = 2 \cdot K'_s \cdot e \cdot \text{tg}(\varphi) = 2 \cdot 0,0585 \cdot 3,325 \cdot \text{tg}(71,565^\circ) = 1,167 \text{ [kN/m]}$

$e_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot e_s = 1 \cdot 1,167 = 1,167 \text{ [kN/m]}$

- **Eigengewicht - seismisch**

$g_s = g \cdot K'_s = 7,2 \cdot 0,0585 = 0,421 \text{ [kN/m]}$

$g_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot g_s = 1 \cdot 0,421 = 0,421 \text{ [kN/m]}$

- **Innenwasserdruck - seismisch**

$p_{i,s} = 100 \cdot K'_s = 100 \cdot 0,0585 = 5,85 \text{ [kN/m]}$

$p_{i,s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot p_{i,s} = 1 \cdot 5,85 = 5,85 \text{ [kN/m]}$

8.7.1.4 Bemessung der Biegemomente und der Normalkräfte

Der Querschnitt ist als kreisförmig vorgesehen. Die Biegemomente und Zugkräfte sind in 5 Punkten berechnet. Der vertikale Gebirgsdruck und das Eigengewicht sind als gleichmäßig über den Querschnittsdurchmesser verteilt. Die elastische Reaktion des Felses ist gleichmäßig über den Perimeter verteilt, wie es unten gezeigt ist.

Die Formeln für die Berechnung sind im 8.1.1.4 gezeigt:

8.7.1.5 Bemessung der Spannungen

$$\sigma_{1,2} = \frac{N}{F} \mp \frac{M}{W} \text{ [kPa] , wobei}$$

$$F = b \cdot d_{\text{Auskleidung}} = 1,0 \cdot 30 = 30 \text{ [m}^2\text{]} - \text{Fläche der Auskleidung für 1 m des Druckstollens}$$

$$W = \frac{b \cdot d_{\text{Auskleidung}}^2}{6} = \frac{1,0 \cdot 30^2}{6} = 150 \text{ [m}^3\text{]}$$

Während der Betriebszeit (maximaler Innenwasserdruck) sind die Spannungen für alle Punkten des Querschnitts gleich:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (2 \cdot \varepsilon \cdot r_2^2 - (r_1^2 + r_2^2))}{r_2^2 - r_1^2} = \frac{0,5722 \cdot 10^3 \cdot (2 \cdot 0,2 \cdot 3,35^2 - (3,05^2 + 3,35^2))}{3,35^2 - 3,05^2} = -4779 \text{ [kPa]}$$

$$\sigma_2 = \frac{p \cdot (\varepsilon \cdot (r_1^2 + r_2^2) - 2 \cdot r_1^2)}{r_2^2 - r_1^2} = \frac{0,5722 \cdot 10^3 \cdot (0,2 \cdot (3,05^2 + 3,35^2) - 2 \cdot 3,05^2)}{3,35^2 - 3,05^2} = -4321 \text{ kPa}$$

$$\varepsilon = 0,2 - \text{abgelesen von [2] Tabelle.99 -}$$

"Wasserbautunnel" – Univ. Prof. Dipl. Ing – Ljubomir Georgiev 1989

$$a = \frac{r_2}{r_1} = \frac{3,35}{3,05} = 1,10$$

$$c = \frac{E_{\text{Äquiv}} \cdot (1 + \nu_{\text{Fels}})}{E_{\text{Fels}} \cdot (1 + \nu_{\text{Äquiv}})} = \frac{32509 \cdot (1 + 0,28)}{1280 \cdot (1 + 0,20001)} = 27,1$$

$$E_{\text{екви}} = E_{\text{Beton}} \cdot \left(1 + \mu_{\text{min}} \cdot \left(\frac{E_{\text{Stahl}}}{E_{\text{Beton}}} - 1 \right) \right) = 32500 \cdot \left(1 + 0,005 \cdot \left(\frac{21 \cdot 10^4}{32500} - 1 \right) \right) = 32509 \text{ MPa}$$

$$\nu_{\text{Äquiv}} = \nu_{\text{Beton}} \cdot \left(1 + \mu_{\text{min}} \cdot \left(\frac{\nu_{\text{Stahl}}}{\nu_{\text{Beton}}} - 1 \right) \right) = 0,2 \cdot \left(1 + 0,005 \cdot \left(\frac{0,3}{0,2} - 1 \right) \right) = 0,20$$

$$E_{\text{Stahl}} = K_0 \cdot (1 + \nu_{\text{Stahl}}) = 1000 \cdot (1 + 0,28) = 1280 \text{ [MPa]}$$

$$\nu_{\text{Fels}} = 0,28 - \text{Poissonzahl für Fels}$$

$$\nu_{\text{Beton}} = 0,2 - \text{Poissonzahl für Beton}$$

$$\nu_{\text{Stahl}} = 0,3 - \text{Poissonzahl für Stahl}$$

8.7.1.6 Zulässige Spannungen

8.7.1.6.1 Bauzeit

$\sigma_{1,2} \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug(Druck)}}$, wobei γ_c und γ_n von oben abgelesen werden

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = \frac{1}{1,25 \cdot 0,95} \cdot 1,2 = 1,01 \text{ [MPa]}$$

$R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = 1,2 \text{ [MPa]}$ – Zugfestigkeit des Betons B30

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Druck}} = \frac{1}{1,25 \cdot 0,95} \cdot 17 = 14,32 \text{ [MPa]}$$

$R_{\text{Beton}}^{\text{Druck}} = 17 \text{ [MPa]}$ – Druckfestigkeit des Betons B30

8.7.1.6.2 Betriebszeit

- Übliche Lasten

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = \frac{1}{1,25 \cdot 1} \cdot 1,2 = 0,96 \text{ [MPa]}$$

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Druck}} = \frac{1}{1,25 \cdot 1} \cdot 17 = 13,60 \text{ [MPa]}$$

- Besondere Lasten

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = \frac{1,2}{1,25 \cdot 0,9} \cdot 1,2 = 1,28 \text{ [MPa]}$$

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Druck}} = \frac{1,2}{1,25 \cdot 0,9} \cdot 17 = 18,13 \text{ [MPa]}.$$

Die maximalen Druckspannungen in der Auskleidung sind kleiner als die zulässigen Spannungen. Wenn aber das Gebirge trocken ist und es keinen Außenwasserdruck $p_e = 0$ gibt, dann werden die Zugspannungen größer und ist eine zusätzliche Bewehrung des Querschnitts erforderlich.

Maßgebend ist die Bemessung am Ende des Abschnitts – maximaler Innenwasserdruck.



Tab. 8-40 Biegemomente und Normalkräfte während der Bauzeit

Tabelle	Q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		g _{Berechnung}		p _{e, Berechnung}		q _{s, Berechnung}		e _{s, Berechnung}		g _{s, Berechnung}		
	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	
	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	
Schnitt	1	17.58	91.63	-9.89	12.97	1.21	22.84	-2.13	1279.51	0.69	3.57	-2.89	3.79	0.06	1.11
	2	-11.36	140.17	0.00	6.48	-0.60	28.74	0.94	1278.30	-0.44	5.47	0.00	1.90	-0.03	1.40
	3	-0.69	176.25	9.89	0.00	-0.25	50.94	0.44	1278.49	-0.03	6.87	2.89	0.00	-0.01	2.48
	4	2.56	175.32	0.00	6.48	-2.07	70.62	3.38	1277.37	0.10	6.84	0.00	1.90	-0.10	3.44
	5	-0.15	176.21	-9.89	12.97	4.06	77.23	-6.74	1281.19	-0.01	6.87	-2.89	3.79	0.20	3.76

Tab. 8-41 Spannungen während der Bauzeit

Tabelle	q _{Ber}		e _{Ber}		g _{Ber}		p _{eBer}		q _{s, Bere}		E _{s, Ber}		g _{s, Bere}		q _{ber} +e _{ber} +g _{ber} +p _{eber}		Σ(x _{i, ber})+Σ(x _{i, ber})		
	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	
	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
Schnitt	1	-866.5	1477.4	702.5	-616.0	-4.3	156.6	4407.3	4122.8	-33.8	57.6	205.5	-180.2	-0.2	7.6	4239.0	5140.7	4410.4	5025.8
	2	1224.3	-289.8	21.6	21.6	136.0	55.6	4198.4	4323.5	47.7	-11.3	6.3	6.3	6.6	2.7	5580.3	4111.0	5641.0	4108.7
	3	633.8	541.2	-659.2	659.2	186.6	153.0	4232.3	4290.9	24.7	21.1	-192.8	192.8	9.1	7.5	4393.5	5644.4	4234.5	5865.8
	4	414.0	754.9	21.6	21.6	373.5	97.3	4032.3	4483.5	16.1	29.4	6.3	6.3	18.2	4.7	4841.3	5357.3	4882.0	5397.8
	5	597.6	577.1	702.5	-616.0	-13.1	528.0	4720.2	3821.1	23.3	22.5	205.5	-180.2	-0.6	25.7	6007.2	4310.2	6235.3	4178.3



Tab. 8-42 Biegemomente und Normalkräfte während der Betriebszeit

Tabelle	Q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		g _{Berechnung}		p _{e, Berechnung}		Q _{s, Berechnung}		e _{s, Berechnung}		g _{s, Berechnung}		Q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		
	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	
	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	
Schnitt	1	17.58	91.63	-6.59	8.65	0.90	17.13	-2.13	1048.66	2.13	-8.16	0.69	3.57	-2.89	3.79	0.06	1.11	2.13	-8.16
	2	-11.36	140.17	0.00	4.32	-0.45	21.56	0.94	1047.45	-0.94	-7.15	-0.44	5.47	0.00	1.90	-0.03	1.40	-0.94	-7.15
	3	-0.69	176.25	6.59	0.00	-0.19	38.21	0.44	1047.64	-0.44	-7.31	-0.03	6.87	2.89	0.00	-0.01	2.48	-0.44	-7.31
	4	2.56	175.32	0.00	4.32	-1.55	52.96	3.38	1046.52	-3.38	-6.38	0.10	6.84	0.00	1.90	-0.10	3.44	-3.38	-6.38
	5	-0.15	176.21	-6.59	8.65	3.04	57.92	-6.74	1050.35	6.74	-9.56	-0.01	6.87	-2.89	3.79	0.20	3.76	6.74	-9.56

Tab. 8-43 Spannungen während der Betriebszeit

Tabelle	q _{Ber}		e _{Ber}		g _{Ber}		p _{e, Ber}		p _{i, Ber}		q _{s, Ber}		e _{s, изчисл}		g _{s, Ber}		p _{i, Ber}		q _{Ber} +e _{Ber} +g _{Ber} +p _{e, Ber}		Σ(x _{i, Ber})+Σ(x _{i,c, Ber})		p _i		Total.		
	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	
	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
Schnitt	1	-867	1477	468	-411	-3	117	3638	3353	-169	115	-34	58	205	-180	0	8	-169	115	3067	4652	3069	4653	-4779	-4321	-1712	331
	2	1224	-290	14	14	102	42	3429	3554	39	-86	48	-11	6	6	7	3	39	-86	4808	3234	4908	3145	-4779	-4321	29	-1087
	3	634	541	-439	439	140	115	3463	3521	5	-54	25	21	-193	193	9	7	5	-54	3802	4563	3648	4731	-4779	-4321	-977	242
	4	414	755	14	14	280	73	3263	3714	204	-247	16	29	6	6	18	5	204	-247	4176	4309	4421	4103	-4779	-4321	-603	-12
	5	598	577	468	-411	-10	396	3951	3052	-481	418	23	23	205	-180	-1	26	-481	418	4525	4032	4272	4318	-4779	-4321	-254	-290

8.7.2 Bemessung der Bewehrung

Die Bewehrung ist mit Außenwasserdruck von $p_e = 0$ bemessen. In diesem Fall entstehen maximale Zugspannungen:

		übliche		besondere	
		σ_1	σ_2	σ_1	σ_2
		kPa	kPa	kPa	kPa
Schnitt	1	-5350	-3022	-5348	-3022
	2	-3400	-4641	-3300	-4730
	3	-4440	-3279	-4594	-3112
	4	-3866	-3726	-3621	-3932
	5	-4204	-3341	-4458	-3055

- Maximale Spannungen:

$$\sigma_1 = -5350 \text{ [kPa]} \quad \sigma_2 = -3022 \text{ [kPa]}$$

Es gibt drei Möglichkeiten für die Position der Normalkraft.

8.7.2.1 Zentrischer Zug

Für die maximale Spannung $\sigma_1 = -5350 \text{ [kPa]}$ wird die Resultierende berechnet:

$$F_{\text{Auskleidung}} = d_{\text{Auskleidung}} \cdot b = 0,3 \cdot 100 \cdot 1.300 = 3000 \text{ [cm}^2\text{]} \text{ – Fläche der Auskleidung}$$

für Länge des Druckstollens $b = 100 \text{ cm}$

- Resultierende:

$$N_{\text{Zug}} = \sigma_1 \cdot F_{\text{Auskleidung}} = 5350 \cdot 10^{-4} \cdot 3000 = 1604,97 \text{ [kN]}$$

$$R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}} = 390 \text{ [MPa]} \text{ – Zugfestigkeit des Stahls}$$

- Fläche der Bewehrung:

$$F_a = \frac{\gamma_m \cdot \gamma_n \cdot N_{\text{Zug}}}{\gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}}} = \frac{1,1 \cdot 1,25 \cdot 1604,97}{1,1 \cdot 390 \cdot 10^3} \cdot 10^4 = 46,8 \text{ [cm}^2\text{ / m]}$$

$$\gamma_c = 1,1 \quad \gamma_n = 1,25 \quad \gamma_m = 1$$



8.7.2.2 Zug mit kleiner Exzentrizität

Die Normalkraft wird zwischen der Flächen der Zug- und Druckbewehrung verteilt.

F_a und F'_a .

$a = a' = 0,05$ [m] – Betonüberdeckung

$h_o = d_{\text{Auskleidung}} - a = 0,3 - 0,05 = 0,25$ [m]

$e_o = \frac{M}{N} = \frac{17,46}{1255,8} = 0,014$ [m] – Exzentrizität der Normalkraft

Der Biegemoment M und die Normalkraft N sind durch folgende Formel berechnet:

$$\left| \begin{array}{l} \sigma_1 = \frac{N}{F} - \frac{M}{W} \\ \sigma_2 = \frac{N}{F} + \frac{M}{W} \end{array} \right. \quad \left| \begin{array}{l} -5350 = \frac{N}{0,3} - \frac{M}{0,0150} \\ -3022 = \frac{N}{0,30} + \frac{M}{0,0150} \end{array} \right.$$

$M = 17,46$ kNm

$N = -1255,8$ kN

- Abstand der Normalkraft N von der Druckbewehrung

$e' = 0,5 \cdot (h_o - a') - e_o = 0,5 \cdot (0,25 - 0,05) - 0,014 = 0,086$ [m]

- Abstand der Normalkraft N von der Zugbewehrung

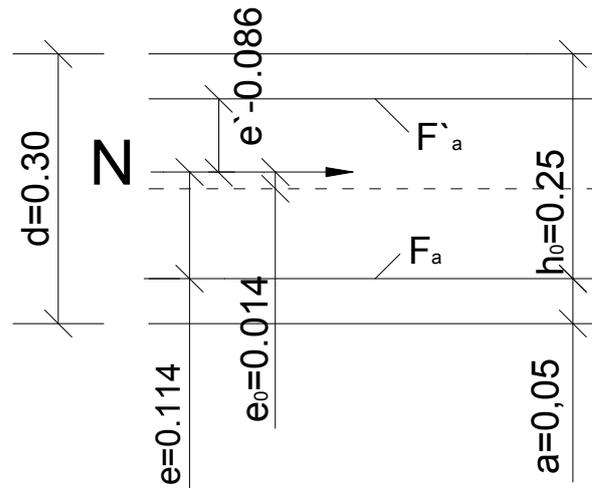
$e = 0,5 \cdot (h_o - a) + e_o = 0,5 \cdot (0,25 - 0,05) + 0,014 = 0,114$ [m]

- Fläche der Zugbewehrung.

$F_a = \frac{\gamma_m \cdot \gamma_n \cdot N \cdot e}{\gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}} \cdot (h_o - a)} = \frac{1,125 \cdot 1255,8 \cdot 0,114}{1,1 \cdot 390 \cdot 10^3 \cdot (0,25 - 0,05)} \cdot 10^{-4} = 20,84$ [cm² / m]

- Fläche der Druckbewehrung

$F'_a = \frac{\gamma_m \cdot \gamma_n \cdot N \cdot e'}{\gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Druck}} \cdot (h_o - a)} = \frac{1,125 \cdot 1255,8 \cdot 0,086}{1,1 \cdot 390 \cdot 10^3 \cdot (0,25 - 0,05)} \cdot 10^{-4} = 15,75$ [cm² / m]



8.7.2.3 Zug mit großer Exzentrizität– Das ist ein Fall, der hier nicht auftreten kann, deshalb ist er nicht berechnet.

Der massgebende Bemessungsfall trifft bei Zug mit keiner Exzentrizität auf, mit einer entsprechenden Bewehrung gleich:

$$F_a = 20,84 \text{ [cm}^2 \text{ / m]} \quad F'_a = 15,75 \text{ [cm}^2 \text{ / m]}$$

Angenommen:

- Zugbewehrung: 9 x N 18/11.11 cm $F=22,891 \text{ cm}^2$
- Druckbewehrung 9 x N 16 /11.11 cm $F=18,086 \text{ cm}^2$

$$\mu = \frac{F_a + F'_a}{F_{\text{Beton}}} = \frac{22,891 + 18,086}{3000} = \frac{40,997}{3000} = 0,0137\%$$

- Konstruktive Bewehrung : 2x5N10/20 cm
- Bügel : $\Phi 8/25 \text{ cm}$

8.7.3 Grenzzustand der Gebrauchtauglichkeit

8.7.3.1 Mittlere Rissbreite

$$\begin{aligned} a &= 7,7 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \eta \cdot \frac{\sigma_{\text{Stahl}} - \sigma_o}{E_{\text{Stahl}}} \cdot (4 - 100 \cdot \mu) \cdot \sqrt{d} = \\ &= 7,7 \cdot 1,1 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot \frac{93,71 - 20}{210000} \cdot (4 - 100 \cdot 0,0137) \cdot \sqrt{18} = 0,06 \text{ [mm]} \end{aligned}$$



$$\alpha = 1,1 \quad \beta = 1,2 \quad \eta = 1,0$$

$\sigma_0 = 20$ [MPa] – Angenommene Anfangsspannung in der Bewehrung

$d = 18$ [mm] – Durchmesser des Bewehrungsstahls

$\mu = 0,0137$ – Bewehrungsanteil

$E_{\text{Stahl}} = 210000$ [MPa]

$$\sigma_{\text{Stahl}} = \frac{p_i \cdot r_1}{F_a + \frac{K_0 \cdot r_1}{E_{\text{Stahl}}}} = \frac{0,5722 \cdot 305}{0,40997 + \frac{1000 \cdot 305}{2100000}} = 93,71 \text{ [MPa]}$$

$$p_i = 0,5722 \text{ [MPa]}$$

$$K_0 = 1000 \text{ [N/m}^3 \cdot 10^5\text{]}$$

$$F_a = 0,40997 \text{ [cm}^2 \text{ / cm}^3\text{]}$$

$$r_1 = 305 \text{ [cm]}$$

$$E_{\text{Stahl}} = 2100000 \text{ [N/m}^2 \cdot 10^5\text{]}$$

Die maximale Rissbreite hängt von: Hydraulischem Gradient, Wasserhärte, maximalem W/Z-Wert, Anzahl der Cl^- und SO_4^{2-} -Ionen, Durchlässigkeitsbeiwert des Felses, Klasse der Anlage ab.

- Hydraulischer Gradient

$$J = \frac{H_i - H_e}{d_{\text{Auskleidung}}} = \frac{57,22 - 34,45}{0,3} = 75,9$$

- Hydraulischer Gradient ohne Außenwasserdruck:

$$J = \frac{H_i}{d_{\text{Auskleidung}}} = \frac{57,22}{0,30} = 190,7$$

Es werden folgende Annahmen gemacht:

- Wasserhärte : $0,25 \text{ [g/dm}^3 \cdot 10^{-3}\text{]}, \text{ [mg/l]}$
- Hydraulischer Gradient : $50 < J = 190,7 < 300$
- Durchlässigkeitsbeiwert des Felses $k_{\text{Fels}} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ [cm/s]}$
- Maximaler W/Z- Wert -0,5
- Anlage- Klasse - I
- Anzahl der Cl^- und SO_4^{2-} Ionen - 400 – 1000 [mg/l]

Maximale zulässige Rissbreite: 0,06 [mm]:



8.7.3.2 Anzahl der Risse

$$n = \frac{16 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot \mu}{d} = \frac{16 \cdot \pi \cdot 335,0137}{1,8} = 130$$

8.7.3.3 Sickerung durch die Auskleidung

$$Q = \frac{1}{\frac{d_{\text{Auskleidung}}}{k \cdot n} + \frac{1}{k_{\text{Fels}} \cdot M_F}} = \frac{1}{\frac{0,30}{21,965 \cdot 10^{-5} \cdot 130} + \frac{1}{4 \cdot 10^{-5} \cdot 2,84}} = 1,24 \cdot 10^{-4} \text{ [l/s] , wobei}$$

- $k = a^3 = 0,06^3 = 0,00021965 = 21,965 \cdot 10^{-5}$ – Durchlässigkeitsbeiwert
- $n = 130$ – Anzahl der Risse
- $d_{\text{Auskleidung}} = 0,30 \text{ [m]}$ – Dicke der Auskleidung
- $k_{\text{Fels}} \geq 4 \cdot 10^{-5} \text{ [cm/s]}$ – Durchlässigkeitsbeiwert des Felses
- $M_F = \frac{2 \cdot \pi}{\ln\left(\frac{R}{r_2}\right)} = \frac{2 \cdot \pi}{\ln\left(\frac{30,5}{3,35}\right)} = 2,84$ – Filtrationsmodul
- $R = 10 \cdot r_1 = 10 \cdot 3,05 = 30,5 \text{ [m]}$ – Radius der wassergesättigten Zone

Die Formel ist bei mehr als 35 Rissen gültig.

$Q_{\text{zulässig}} = 1 \text{ [l/s]}$ – für 1000 m^2 von der Druckstollenfläche, wenn
 der Innenwasserdruck $H_i < 100 \text{ m}$ ist

Die Sickerung soll kleiner sein als:

$$Q' = 2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot Q_{\text{zulässig}} \cdot 10^{-7} = 2,10 \cdot 10^{-4} \text{ [l/s]} > 1,21 \cdot 10^{-4}$$

$$\Rightarrow Q < Q'$$



8.8 Abschnitt 8

- $L_{\text{Abschnitt}} = 0,10 \cdot L_{\text{Druckstollen}} = 0,10 \cdot 1019,81 = 102 \text{ m}$
- $f = 3 \Rightarrow K_0 = 1000 \text{ N/cm}^2$
- $\varphi = \arctg(f) = 71,565^\circ$
- $\gamma_{\text{Fels}} = 25 \text{ kN/m}^3$

8.8.1 Minimale Dicke der ungerissenen Auskleidung

- $r_1 = \frac{D_{\text{Druckstollen}}}{2} = \frac{6,10}{2} = 3,05 \text{ [m]}$ – Innendurchmesser des Druckstollens
- $p = \gamma_{\text{Wasser}} \cdot H_{\text{WS}} = \frac{10 \cdot 58,02}{1000} = 0,5802 \text{ [MPa]}$ – Innenwasserdruck

wobei:

$\gamma_{\text{Wasser}} = 10 \text{ [kN/m}^3\text{]}$ – Wichte des Wassers

$H_{\text{WS}} = 58,02 \text{ m}$ – Wasserspiegel beim höchsten Schwallspiegel der Wasserschlossschwungung

8.8.1.1 Notwendige Dicker der Auskleidung:

$$d_{\text{Auskleidung}} = r_1 \cdot \left(\frac{p}{\gamma_c \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}}} - \frac{K_0}{0,70 \cdot E_{\text{Beton}}} \right) = 3,05 \cdot \left(\frac{0,5802}{1,1,2} - \frac{1000}{0,70 \cdot 32500} \right) = 1,15 \text{ [m]} ,$$

wobei

$\gamma_c = 1$ – Arbeitsbedingunsbeiwert

$R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = 1,2 \text{ [MPa]}$ – Zugfestigkeit des Betons B30

$E_{\text{Beton}} = 32500 \text{ [MPa]}$ – Elastizitätsmodul des Betons B30

$$d_{\text{Auskleidung}}^{\text{max}} = 0,15 \cdot r_1 = 0,15 \cdot 3,05 = 0,4575 \text{ cm}$$

$d_{\text{Auskleidung}} > d_{\text{Auskleidung}}^{\text{max}} \Rightarrow$ andere Auskleidungskonstruktion ist notwendig



8.8.1.2 Minimale Dicke der ungerissenen Stahlbetonaukleidung

- Äquivalenter Elastizitätsmodul des Stahlbetons:

$$E_{\text{Äquiv}} = E_{\text{Beton}} \cdot \left(1 + \mu_{\text{max}} \cdot \left(\frac{E_{\text{Stahl}}}{E_{\text{Beton}}} - 1 \right) \right) = 32500 \cdot \left(1 + 0,02 \cdot \left(\frac{2,1 \cdot 10^5}{32500} - 1 \right) \right) = 36050 \text{ [MPa]}, \text{ wobei:}$$

$\mu_{\text{max}} = 0,02$ – Maximaler Bewehrungsanteil für ungerissene Auskleidung

$E_{\text{Stahl}} = 210000 \text{ [MPa]}$ – Elastizitätsmodul des Stahls

$\gamma_c = 1,1$ – Abgelesen von Tabelle

$$d_{\text{Auskleidung}} = \frac{r_1}{1 + 30 \cdot \frac{\mu_{\text{max}}}{R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}}}} \cdot \left(\frac{p}{\gamma_c \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}}} - \frac{K_0}{E_{\text{Äquiv}}} \right) = \frac{3,05}{1 + 30 \cdot \frac{0,02}{1,2}} \cdot \left(\frac{0,5802}{1,1 \cdot 1,2} - \frac{1000}{36050} \right) = 0,84 \text{ [m]}$$

$d_{\text{Auskleidung}} > d_{\text{Auskleidung}}^{\text{max}} \Rightarrow$ angenommen: $d_{\text{Auskleidung}} = 30 \text{ cm}$ - gerissene Auskleidung

$$h_{\text{notwendig}} = \frac{K_0 \cdot r_1 \cdot \gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}}}{r_2 \cdot \rho \cdot g \cdot \gamma_n \cdot E_{\text{Stahl}}} = \frac{1000 \cdot 305 \cdot 1,1 \cdot 390}{335 \cdot 0,0025 \cdot 9,81 \cdot 1,25 \cdot 210000} = 60,67 \text{ [m]}, \quad \text{wobei}$$

$r_1 = 3,05 \text{ [m]} = 305 \text{ [cm]}$ – Innendurchmesser

$r_2 = r_1 + d_{\text{Auskleidung}} = 3,05 + 0,30 = 3,35 \text{ [m]} = 335 \text{ [cm]}$

$\gamma_c = 1,1$ – Abgelesen von Tabelle

$R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}} = 390 \text{ [MPa]}$ – Zugfestigkeit des Stahls AIII

$\rho = 0,0025 \text{ [kg/cm}^3\text{]}$ – Dichte des Felses

$\gamma_n = 1,25$ – Abgelesen von Tabelle

$H_{\text{Überlagerung}} = 56,18 \text{ m} < h_{\text{notwendig}}$

$$F_a = \frac{\gamma_n \cdot p \cdot r_1}{\gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}}} - \frac{\rho \cdot g \cdot H_{\text{Überlagerung}} \cdot r_2}{100 \cdot \gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}}} = \frac{1,25 \cdot 0,512 \cdot 3,05}{1,1 \cdot 390} - \frac{0,0025 \cdot 9,81 \cdot 59,83 \cdot 3,35}{100 \cdot 1,1 \cdot 390} = 0,00504 \text{ [cm}^2 \text{ / cm]}$$

- $\mu_{\text{min}} = 0,5\% = 0,005$



8.8.1.3 Wirkende Lasten

8.8.1.3.1 Bauzeit

- Vertikaler Gebirgsdruck

$$q = \gamma \cdot h_{\text{zerstört}} \cdot \beta = 25 \cdot 1,5 \cdot 0,8 = 31 \text{ [kN/m]}$$

$$q_{\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot q = 1,5 \cdot 31 = 46,5 \text{ [kN/m]}$$

- Horizontaler Gebirgsdruck

$$e = \gamma \cdot (h_{\text{zerstört}} + 0,5 \cdot D_3) \cdot \text{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) = 25 \cdot (1,55 + 0,5 \cdot 6,8) \cdot \text{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{71,565^\circ}{2} \right) = 3,325 \text{ [kN/m]}$$

$$e_{\text{Berechnung}} = e \cdot \gamma_f = 3,325 \cdot 1,2 = 3,99 \text{ [kN/m]}$$

- Eigengewicht

$$\gamma_{\text{Beton}} = 24 \text{ [kN/m}^3\text{]} - \text{Wichte des Betons}$$

$$g = d_{\text{Auskleidung}} \cdot \gamma_{\text{Beton}} = 0,3 \cdot 24 = 7,2 \text{ [kN/m]}$$

$$g_{\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot g = 1,2 \cdot 7,2 = 8,64 \text{ [kN/m]}$$

- Außenwasserdruck

$$H_{\text{Wasser}} = 0,5 \cdot H_{\text{Überlagerung}} = 0,5 \cdot 89,73 = 44,87 \text{ [m]} - \text{Wassergesättigtes Gebirge}$$

$$p_e = \gamma_{\text{Wasser}} \cdot H_{\text{Wasser}} = \frac{10 \cdot 44,87}{1000} = 0,4487 \text{ [MPa]}$$

$$p_{e, \text{изчисл}} = \gamma_f \cdot p_e = 1,1 \cdot 0,4487 = 0,49 \text{ [MPa]}$$

- Seismische Lasten
- Vertikaler Gebirgsdruck - seismisch

$C = 1,5$ – Beiwert für die Klasse der Anlage
für I^{ste} Klasse = 1,5

$K_s = 0,1$ – Seismischer Beiwert – abgelesen von [2]
Tabelle.22 – "Wasserbautunnel" – Univ.Pr of.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989.

$K_h = 0,7$ – Überlagerungshöhebeiwert – abgelesen von [2]
Tabelle.23 – "Wasserbautunnel" – Univ.Pr of.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989

$R = 0,6$ – Verhaltensbeiwert $H_{\text{Überlagerung}} = 59,83 \text{ m}$

$$K'_s = R \cdot c \cdot K_s \cdot K_h = 0,6 \cdot 1,5 \cdot 0,1 \cdot 0,7 = 0,063$$

$$q_s = q \cdot K'_s = 31 \cdot 0,063 = 1,953 \text{ [kN/m]}$$

$$q_{s, \text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot q_s = 1,1 \cdot 1,890 = 1,953 \text{ [kN/m]}$$



- Horizontaler Gebirgsdruck - seismisch

$$\varphi = 71,565^\circ - \text{Reibungswinkel}$$

$$e_s = 2 \cdot K'_s \cdot e \cdot \text{tg}(\varphi) = 2 \cdot 0,063 \cdot 3,325 \cdot \text{tg}(71,565^\circ) = 1,257 \text{ [kN/m]}$$

$$e_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot e_s = 1 \cdot 1,257 = 1,257 \text{ [kN/m]}$$

- Eigengewicht - seismisch

$$g_s = g \cdot K'_s = 7,2 \cdot 0,063 = 0,454 \text{ [kN/m]}$$

$$g_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot g_s = 1 \cdot 0,454 = 0,454 \text{ [kN/m]}$$

8.8.1.3.2 Betriebszeit

- Vertikaler Gebirgsdruck

$$q = \gamma \cdot h_{\text{zerstört}} \cdot \beta = 25 \cdot 1,5 \cdot 0,8 = 31 \text{ [kN/m]}$$

$$q_{\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot q = 1,5 \cdot 31 = 46,5 \text{ [kN/m]}$$

- Horizontaler Gebirgsdruck

$$e = \gamma \cdot (h_{\text{zerstört}} + 0,5 \cdot D_3) \cdot \text{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) = 25 \cdot (1,55 + 0,5 \cdot 6,8) \cdot \text{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{71,565^\circ}{2} \right) = 3,325 \text{ [kN/m]}$$

$$e_{\text{Berechnung}} = e \cdot \gamma_f = 3,325 \cdot 0,8 = 2,66 \text{ [kN/m]}$$

- Eigengewicht

$$\gamma_{\text{Beton}} = 24 \text{ [kN/m}^3\text{]} - \text{Wichte des Betons}$$

$$g = d_{\text{Auskleidung}} \cdot \gamma_{\text{Beton}} = 0,3 \cdot 24 = 7,2 \text{ [kN/m]}$$

$$g_{\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot g = 0,9 \cdot 7,2 = 6,48 \text{ [kN/m]}$$

- Außenwasserdruck

$$H_{\text{Wasser}} = 0,5 \cdot H_{\text{Überlagerung}}^{\text{Druckstollen}} = 0,5 \cdot 89,73 = 44,87 \text{ [m]}$$

$$p_e = \gamma_{\text{Wasser}} \cdot H_{\text{Wasser}} = \frac{10 \cdot 44,87}{1000} = 0,4487 \text{ [MPa]}$$

$$p_{e,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot p_e = 0,9 \cdot 0,4487 = 0,40 \text{ [MPa]}$$

- Innenwasserdruck

$$p_i \equiv p = 0,5802 \text{ [MPa]}$$

$$p_{i,\text{Berechnung}} \equiv \gamma_f p_i = 1 \cdot 0,5802 = 0,5802 \text{ [MPa]}$$



- **Seismische Lasten**
- **Vertikaler Gebirgsdruck - seismisch**

$C = 1,5$ – Beiwert für die Klasse der Anlage
für I^{-ste} Klasse = 1,5

$K_s = 0,1$ – Seismischer Beiwert – abgelesen von [2]
Tabelle.22 – "Wasserbautunnel" – Univ.Pr of.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989.

$K_h = 0,7$ – Überlagerungshöhebeiwert – abgelesen von [2]
Tabelle.23 – "Wasserbautunnel" – Univ.Pr of.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989

$$H_{\text{Überlagerung}} = 68,91 \text{ m}$$

$R = 0,6$ – Verhaltensbeiwert

$$K'_s = R \cdot C \cdot K_s \cdot K_h = 0,6 \cdot 1,5 \cdot 0,1 \cdot 0,7 = 0,063$$

$$q_s = q \cdot K'_s = 31 \cdot 0,063 = 1,953 \text{ [kN/m]}$$

$$q_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot q_s = 1 \cdot 1,953 = 1,953 \text{ [kN/m]}$$

- **Horizontaler Gebirgsdruck - seismisch**

$\varphi = 71,565^\circ$ – Reibungswinkel

$$e_s = 2 \cdot K'_s \cdot e \cdot \text{tg}(\varphi) = 2 \cdot 0,063 \cdot 3,325 \cdot \text{tg}(71,565^\circ) = 1,257 \text{ [kN/m]}$$

$$e_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot e_s = 1 \cdot 1,257 = 1,257 \text{ [kN/m]}$$

- **Eigengewicht - seismisch**

$$g_s = g \cdot K'_s = 7 \cdot 0,063 = 0,454 \text{ [kN/m]}$$

$$g_{s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot g_s = 1 \cdot 0,454 = 0,454 \text{ [kN/m]}$$

- **Innenwasserdruck**

$$p_{i,s} = 100 \cdot K'_s = 100 \cdot 0,063 = 6,3 \text{ [kN/m]}$$

$$p_{i,s,\text{Berechnung}} = \gamma_f \cdot p_{i,s} = 1 \cdot 6,3 = 6,3 \text{ [kN/m]}$$

8.8.1.4 Bemessung der Biegemomente und der Normalkräfte

Der Querschnitt ist als kreisförmig vorgesehen. Die Biegemomente und Zugkräfte sind in 5 Punkten berechnet. Der vertikale Gebirgsdruck und das Eigengewicht sind als gleichmäßig über den Querschnittsdurchmesser verteilt. Die elastische Reaktion des Felses ist gleichmäßig über den Perimeter verteilt, wie es unten gezeigt ist.

Die Formeln für die Berechnung sind im 8.1.1.4 gezeigt:



8.8.1.5 Bemessung der Spannungen

$$\sigma_{1,2} = \frac{N}{F} \mp \frac{M}{W} \text{ [kPa] , wobei}$$

$F = b \cdot d_{\text{Auskleidung}} = 1,0,30 = 0,30 \text{ [m}^2\text{]} - \text{Fläche der Auskleidung für 1 m des Druckstollens}$

$$W = \frac{b \cdot d_{\text{Auskleidung}}^2}{6} = \frac{1,0,30^2}{6} = 0,0150 \text{ [m}^3\text{]}$$

Während der Betriebszeit (maximaler Innenwasserdruck) sind die Spannungen für alle Punkten des Querschnitts gleich:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (2 \cdot \varepsilon \cdot r_2^2 - (r_1^2 + r_2^2))}{r_2^2 - r_1^2} = \frac{0,5803 \cdot 10^3 \cdot (2 \cdot 0,2 \cdot 3,35^2 - (3,05^2 + 3,35^2))}{3,35^2 - 3,05^2} = -4846 \text{ [kPa]}$$

$$\sigma_2 = \frac{p \cdot (\varepsilon \cdot (r_1^2 + r_2^2) - 2 \cdot r_1^2)}{r_2^2 - r_1^2} = \frac{0,5803 \cdot 10^3 \cdot (0,2 \cdot (3,05^2 + 3,35^2) - 2 \cdot 3,05^2)}{3,35^2 - 3,05^2} = -4382 \text{ kPa}$$

$\varepsilon = 0,2 - \text{abgelesen von [2] Tabelle.99 -}$

"Wasserbautunnel" – Univ.Pr of.Dipl.Ing – Ljubomir Georgiev 1989

$$a = \frac{r_2}{r_1} = \frac{3,35}{3,05} = 1,10$$

$$c = \frac{E_{\text{Äquiv}} \cdot (1 + \nu_{\text{Fels}})}{E_{\text{Fels}} \cdot (1 + \nu_{\text{Äquiv}})} = \frac{32509 \cdot (1 + 0,28)}{1280 \cdot (1 + 0,20001)} = 27,1$$

$$E_{\text{екви}} = E_{\text{Beton}} \cdot \left(1 + \mu_{\text{min}} \cdot \left(\frac{E_{\text{Stahl}}}{E_{\text{Beton}}} - 1 \right) \right) = 32500 \cdot \left(1 + 0,005 \cdot \left(\frac{21 \cdot 10^4}{32500} - 1 \right) \right) = 32509 \text{ MPa}$$

$$\nu_{\text{Äquiv}} = \nu_{\text{Beton}} \cdot \left(1 + \mu_{\text{min}} \cdot \left(\frac{\nu_{\text{Stahl}}}{\nu_{\text{Beton}}} - 1 \right) \right) = 0,2 \cdot \left(1 + 0,005 \cdot \left(\frac{0,3}{0,2} - 1 \right) \right) = 0,20$$

$$E_{\text{Stahl}} = K_0 \cdot (1 + \nu_{\text{Stahl}}) = 1000 \cdot (1 + 0,28) = 1280 \text{ [MPa]}$$

$\nu_{\text{Fels}} = 0,28 - \text{Poissonzahl für Fels}$

$\nu_{\text{Beton}} = 0,2 - \text{Poissonzahl für Beton}$

$\nu_{\text{Stahl}} = 0,3 - \text{Poissonzahl für Stahl}$

8.8.1.6 Zulässige Spannungen

8.8.1.6.1 Bauzeit

$\sigma_{1,2} \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug(Druck)}}$, wobei γ_c und γ_n von oben abgelesen werden

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = \frac{1}{1,25 \cdot 0,95} \cdot 1,2 = 1,01 \text{ [MPa]}$$

$R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = 1,2 \text{ [MPa]}$ – Zugfestigkeit des Betons B30

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Druck}} = \frac{1}{1,25 \cdot 0,95} \cdot 17 = 14,32 \text{ [MPa]}$$

$R_{\text{Beton}}^{\text{Druck}} = 17 \text{ [MPa]}$ – Druckfestigkeit des Betons B30

8.8.1.6.2 Betriebszeit

- Übliche Lasten

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = \frac{1}{1,25 \cdot 1} \cdot 1,2 = 0,96 \text{ [MPa]}$$

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Druck}} = \frac{1}{1,25 \cdot 1} \cdot 17 = 13,60 \text{ [MPa]}$$

- Besondere Lasten

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Zug}} = \frac{1,2}{1,25 \cdot 0,9} \cdot 1,2 = 1,28 \text{ [MPa]}$$

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{Beton}}^{\text{Druck}} = \frac{1,2}{1,25 \cdot 0,9} \cdot 17 = 18,13 \text{ [MPa]}$$

Die maximalen Druckspannungen in der Auskleidung sind kleiner als die zulässigen Spannungen. Wenn aber das Gebirge trocken ist und es keinen Außenwasserdruck $p_e = 0$ gibt, dann werden die Zugspannungen größer und ist eine zusätzliche Bewehrung des Querschnitts erforderlich.

Maßgebend ist die Bemessung am Ende des Abschnitts – maximaler Innenwasserdruck.



Tab. 8-44 Biegemomente und Normalkräfte während der Bauzeit

Tabelle	Q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		g _{Berechnung}		p _{e, Berechnung}		Q _{s, Berechnung}		e _{s, Berechnung}		g _{s, Berechnung}		
	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	
	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	
Schnitt	1	17.58	91.63	-9.89	12.97	1.21	22.84	-2.13	1663.12	0.74	3.85	-3.11	4.09	0.06	1.20
	2	-11.36	140.17	0.00	6.48	-0.60	28.74	0.94	1661.91	-0.48	5.89	0.00	2.04	-0.03	1.51
	3	-0.69	176.25	9.89	0.00	-0.25	50.94	0.44	1662.09	-0.03	7.40	3.11	0.00	-0.01	2.67
	4	2.56	175.32	0.00	6.48	-2.07	70.62	3.38	1660.98	0.11	7.36	0.00	2.04	-0.11	3.71
	5	-0.15	176.21	-9.89	12.97	4.06	77.23	-6.74	1664.80	-0.01	7.40	-3.11	4.09	0.21	4.05

Tab. 8-45 Spannungen während der Bauzeit

Tabelle	Q _{Ber}		e _{Ber}		g _{Ber}		p _{eBer}		Q _{s, Bere}		E _{s, Ber}		g _{s, Bere}		Q _{ber} +e _{ber} +g _{ber} +p _{eber}		Σ(X _{i, ber})+Σ(X _{i, ber})		
	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	σ1	σ2	
	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
Schnitt	1	-866.5	1477.4	702.5	-616.0	-4.3	156.6	5686.0	5401.5	-36.4	62.0	221.3	-194.0	-0.2	8.2	5517.7	6419.4	5702.3	6295.6
	2	1224.3	-289.8	21.6	21.6	136.0	55.6	5477.1	5602.2	51.4	-12.2	6.8	6.8	7.1	2.9	6859.0	5389.7	6924.4	5387.2
	3	633.8	541.2	-659.2	659.2	186.6	153.0	5511.0	5569.6	26.6	22.7	-207.7	207.7	9.8	8.0	5672.2	6923.1	5500.9	7161.5
	4	414.0	754.9	21.6	21.6	373.5	97.3	5311.0	5762.2	17.4	31.7	6.8	6.8	19.6	5.1	6120.0	6636.0	6163.8	6679.6
	5	597.6	577.1	702.5	-616.0	-13.1	528.0	5998.9	5099.8	25.1	24.2	221.3	-194.0	-0.7	27.7	7285.9	5588.9	7531.6	5446.8



Tab. 8-46 Biegemomente und Normalkräfte während der Betriebszeit

Tabelle	Q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		g _{Berechnung}		p _{e, Berechnung}		Q _{s, Berechnung}		e _{s, Berechnung}		g _{s, Berechnung}		Q _{Berechnung}		e _{Berechnung}		
	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	
	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kN	
Schnitt	1	17.58	91.63	-6.59	8.65	0.90	17.13	-2.13	1362.52	2.13	-8.16	0.74	3.85	-3.11	4.09	0.06	1.20	2.13	-8.16
	2	-11.36	140.17	0.00	4.32	-0.45	21.56	0.94	1361.31	-0.94	-7.15	-0.48	5.89	0.00	2.04	-0.03	1.51	-0.94	-7.15
	3	-0.69	176.25	6.59	0.00	-0.19	38.21	0.44	1361.50	-0.44	-7.31	-0.03	7.40	3.11	0.00	-0.01	2.67	-0.44	-7.31
	4	2.56	175.32	0.00	4.32	-1.55	52.96	3.38	1360.38	-3.38	-6.38	0.11	7.36	0.00	2.04	-0.11	3.71	-3.38	-6.38
	5	-0.15	176.21	-6.59	8.65	3.04	57.92	-6.74	1364.21	6.74	-9.56	-0.01	7.40	-3.11	4.09	0.21	4.05	6.74	-9.56

Tab. 8-47 Spannungen während der Betriebszeit

Tabelle	Q _{Ber}		e _{Ber}		g _{Ber}		p _{e, Ber}		p _{i, Ber}		Q _{s, Ber}		e _{s, изчисл}		g _{s, Ber}		p _{i, Ber}		Q _{Ber} +e _{Ber} +g _{Ber} +p _{e, Ber}		Σ(x _{i, Ber})+Σ(x _{i,c, Ber})		p _i		Total.		
	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	σ 1	σ 2	
	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
Schnitt	1	-867	1477	468	-411	-3	117	4684	4399	-169	115	-36	62	221	-194	0	8	-169	115	4113	5699	4128	5690	-4846	-4382	-733	1317
	2	1224	-290	14	14	102	42	4475	4600	39	-86	51	-12	7	7	7	3	39	-86	5855	4280	5959	4191	-4846	-4382	1009	-102
	3	634	541	-439	439	140	115	4509	4568	5	-54	27	23	-208	208	10	8	5	-54	4848	5609	4682	5794	-4846	-4382	2	1228
	4	414	755	14	14	280	73	4309	4760	204	-247	17	32	7	7	20	5	204	-247	5222	5356	5470	5152	-4846	-4382	376	974
	5	598	577	468	-411	-10	396	4997	4098	-481	418	25	24	221	-194	-1	28	-481	418	5572	5078	5336	5354	-4846	-4382	726	696

8.8.2 Bemessung der Bewehrung

Die Bewehrung ist mit Außenwasserdruck von $p_e = 0$ bemisst. In diesem Fall entstehen maximale Zugspannungen:

		übliche		besondere	
		σ_1	σ_2	σ_1	σ_2
		kPa	kPa	kPa	kPa
Schnitt	1	-5417	-3083	-5402	-3091
	2	-3466	-4702	-3362	-4791
	3	-4507	-3340	-4673	-3155
	4	-3933	-3786	-3685	-3990
	5	-4271	-3402	-4507	-3126

- Maximale Spannungen:

$$\sigma_1 = -5417 \text{ [kPa]} \quad \sigma_2 = -3083 \text{ [kPa]}$$

Es gibt drei Möglichkeiten für die Position der Normalkraft.

8.8.2.1 Zentrischer Zug

Für die maximale Spannung $\sigma_1 = -5350 \text{ [kPa]}$ wird die Resultierende berechnet:

$$F_{\text{Auskleidung}} = d_{\text{Auskleidung}} \cdot b = 0,3 \cdot 100 \cdot 1.300 = 3000 \text{ [cm}^2\text{]} \text{ – Fläche der Auskleidung}$$

für Länge des Druckstollens $b = 100 \text{ cm}$

- Resultierende:

$$N_{\text{Zug}} = \sigma_1 \cdot F_{\text{Auskleidung}} = 5417 \cdot 10^{-4} \cdot 3000 = 1625,02 \text{ [kN]}$$

$$R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}} = 390 \text{ [MPa]} \text{ – Zugfestigkeit des Stahls}$$

- Fläche der Bewehrung:

$$F_a = \frac{\gamma_m \cdot \gamma_n \cdot N_{\text{Zug}}}{\gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}}} = \frac{1,1 \cdot 1,25 \cdot 1625,02}{1,1 \cdot 390 \cdot 10^3} \cdot 10^4 = 47,3 \text{ [cm}^2\text{ / m]}$$

$$\gamma_c = 1,1 \quad \gamma_n = 1,25 \quad \gamma_m = 1$$

8.8.2.2 Zug mit kleiner Exzentrizität

Die Normalkraft wird zwischen der Flächen der Zug- und Druckbewehrung verteilt.

F_a und F'_a .

$a = a' = 0,05$ [m] – Betonüberdeckung

$h_o = d_{\text{Auskleidung}} - a = 0,3 - 0,05 = 0,25$ [m]

$e_o = \frac{M}{N} = \frac{17,505}{1275} = 0,014$ [m] – Exzentrizität der Normalkraft

Der Biegemoment M und die Normalkraft N sind durch folgende Formel berechnet:

$$\left| \begin{array}{l} \sigma_1 = \frac{N}{F} - \frac{M}{W} \\ \sigma_2 = \frac{N}{F} + \frac{M}{W} \end{array} \right. \quad \left| \begin{array}{l} -5417 = \frac{N}{0,3} - \frac{M}{0,0150} \\ -3083 = \frac{N}{0,30} + \frac{M}{0,0150} \end{array} \right.$$

$M = 17,505$ kNm

$N = -1275$ kN

- Abstand der Normalkraft N von der Druckbewehrung

$e' = 0,5 \cdot (h_o - a') - e_o = 0,5 \cdot (0,25 - 0,05) - 0,014 = 0,086$ [m]

- Abstand der Normalkraft N von der Zugbewehrung

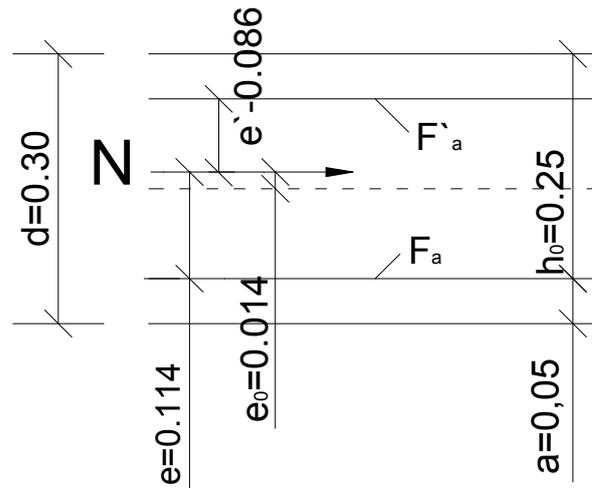
$e = 0,5 \cdot (h_o - a) + e_o = 0,5 \cdot (0,25 - 0,05) + 0,014 = 0,114$ [m]

- Fläche der Zugbewehrung.

$$F_a = \frac{\gamma_m \cdot \gamma_n \cdot N \cdot e}{\gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Zug}} \cdot (h_o - a)} = \frac{1,1,25 \cdot 1275 \cdot 0,114}{1,1 \cdot 390 \cdot 10^3 \cdot (0,25 - 0,05)} \cdot 10^{-4} = 21,13 \text{ [cm}^2 \text{ / m]}$$

- Fläche der Druckbewehrung

$$F'_a = \frac{\gamma_m \cdot \gamma_n \cdot N \cdot e'}{\gamma_c \cdot R_{\text{Stahl}}^{\text{Druck}} \cdot (h_o - a)} = \frac{1,1,25 \cdot 1275 \cdot 0,086}{1,1 \cdot 390 \cdot 10^3 \cdot (0,25 - 0,05)} \cdot 10^{-4} = 16,02 \text{ [cm}^2 \text{ / m]}$$



8.8.2.3 Zug mit großer Exzentrizität– Das ist ein Fall, der hier nicht auftreten kann, deshalb ist er nicht berechnet.

Der massgebende Bemessungsfall trifft bei Zug mit keiner Exzentrizität auf, mit einer entsprechenden Bewehrung gleich:

$$F_a = 21,13 \text{ [cm}^2 \text{ / m]} \quad F'_a = 16,02 \text{ [cm}^2 \text{ / m]}$$

Angenommen:

- Zugbewehrung: 9 x N 18/11.11 cm F=22,891 cm²
- Druckbewehrung 9 x N 16 /9.1 cm F=18.086 cm²

$$\mu = \frac{F_a + F'_a}{F_{\text{Beton}}} = \frac{22,891 + 18,086}{3000} = \frac{40,997}{3000} = 0,0137\%$$

- Konstruktive Bewehrung : 2x5N10/20 cm
- Bügle : $\Phi 8/25$ cm

8.8.3 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

8.8.3.1 Mittlere Rissbreite

$$\begin{aligned} a &= 7,7 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \eta \cdot \frac{\sigma_{\text{Stahl}} - \sigma_o}{E_{\text{Stahl}}} \cdot (4 - 100 \cdot \mu) \cdot \sqrt{d} = \\ &= 7,7 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 2,1 \cdot 1,0 \cdot \frac{95,02 - 20}{210000} \cdot (4 - 100 \cdot 0,0137) \cdot \sqrt{18} = 0,061 \text{ [mm]} \end{aligned}$$



$$\alpha = 1,1 \quad \beta = 1,2 \quad \eta = 1,0$$

$\sigma_0 = 20$ [MPa] – Angenommene Anfangsspannung in der Bewehrung

$d = 18$ [mm] – Durchmesser des Bewehrungsstahls

$\mu = 0,0136$ – Bewehrungsanteil

$E_{\text{Stahl}} = 210000$ [MPa]

$$\sigma_{\text{Stahl}} = \frac{p_i \cdot r_1}{F_a + \frac{K_0 \cdot r_1}{E_{\text{Stahl}}}} = \frac{0,5802 \cdot 305}{0,40997 + \frac{1000 \cdot 305}{2100000}} = 95,02 \text{ [MPa]}$$

$$p_i = 0,5802 \text{ [MPa]}$$

$$K_0 = 1000 \text{ [N/m}^3 \cdot 10^5\text{]}$$

$$F_a = 0,40997 \text{ [cm}^2 \text{ / cm}^3\text{]}$$

$$r_1 = 305 \text{ [cm]}$$

$$E_{\text{Stahl}} = 2100000 \text{ [N/m}^2 \cdot 10^5\text{]}$$

$$E_{\text{Stahl}} = 2100000 \text{ [N/m}^2 \cdot 10^5\text{]}$$

Die maximale Rissbreite hängt von: Hydraulischem Gradient, Wasserhärte, maximalem W/Z-Wert, Anzahl der Cl^- und SO_4^{2-} -Ionen, Durchlässigkeitsbeiwert des Felses, Klasse der Anlage ab.

- Hydraulischer Gradient

$$J = \frac{H_i - H_e}{d_{\text{Auskleidung}}} = \frac{58,03 - 44,865}{0,3} = 43,9$$

- Hydraulischer Gradient ohne Außenwasserdruck:

$$J = \frac{H_i}{d_{\text{Auskleidung}}} = \frac{58,03}{0,30} = 193,4$$

Es werden folgende Annahmen gemacht:

- Wasserhärte : $0,25 \text{ [g/dm}^3 \cdot 10^{-3}\text{]}, \text{ [mg/l]}$
- Hydraulischer Gradient : $50 < J = 193,4 < 300$
- Durchlässigkeitsbeiwert des Felses $k_{\text{Fels}} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ [cm/s]}$
- Maximaler W/Z- Wert -0,5
- Anlage- Klasse - I
- Anzahl der Cl^- und SO_4^{2-} Ionen - $400 - 1000 \text{ [mg/l]}$



Maximale zulässige Rissbreite: 0,1 [mm].

8.8.3.2 Anzahl der Risse

$$n = \frac{16 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot \mu}{d} = \frac{16 \cdot \pi \cdot 335 \cdot 0,0130}{1,8} = 130$$

8.8.3.3 Sickerung durch die Auskleidung

$$Q = \frac{1}{\frac{d_{\text{Auskleidung}}}{k \cdot n} + \frac{1}{k_{\text{Fels}} \cdot M_{\text{F}}}} = \frac{1}{\frac{0,30}{23,157 \cdot 10^{-5} \cdot 130} + \frac{1}{4 \cdot 10^{-5} \cdot 2,84}} = 1,24 \cdot 10^{-4} \text{ [l/s] , wobei}$$

- $k = a^3 = 0,061^3 = 0,00023157 = 23,157 \cdot 10^{-5}$ – Durchlässigkeitsbeiwert
- $n = 130$ – Anzahl der Risse
- $d_{\text{Auskleidung}} = 0,30$ [m] – Dicke der Auskleidung
- $k_{\text{Fels}} \geq 4 \cdot 10^{-5}$ [cm/s] – Durchlässigkeit des Felses
- $M_{\text{F}} = \frac{2 \cdot \pi}{\ln\left(\frac{R}{r_2}\right)} = \frac{2 \cdot \pi}{\ln\left(\frac{30,5}{3,35}\right)} = 2,84$ – Filtrationsmodul
- $R = 10 \cdot r_1 = 10 \cdot 3,05 = 30,5$ [m] – Radius der wassergesättigten Zone

Die Formel ist bei mehr als 35 Rissen gültig.

$Q_{\text{zulässig}} = 1$ [l/s] – für 1000m² von der Druckstollenfläche, wenn
der Innenwasserdruck $H_i < 100$ m ist

Die Sickerung soll kleiner sein als:

$$Q' = 2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot Q_{\text{zulässig}} \cdot 10^{-7} = 2,10 \cdot 10^{-4} \text{ [l/s]} > 1,24 \cdot 10^{-4}$$

$$\Rightarrow Q < Q'$$



8.9 Zusammenfassende Tabellen für die Auskleidungskonstruktionen

Tab. 8-48 Lasten während der Bauzeit für den verschiedenen Abschnitten

Abschnitt		1	2	3	4	5	6	7	8
f	-	2	3	4	5	8	4	3	3
Ko	N/cm ²	800	1000	1600	2000	4000	1600	1000	1000
Y _{Fels}	kN/m ³	24	25	26	24	25	26	25	25
p	MPa	0.5038	0.512	0.524	0.5361	0.5441	0.5601	0.5722	0.5802
dauskl	cm	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
μ _{min}	%	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Bauzeit									
q	kN/m`	49,54	31	28.288	13.056	13.6	28.288	31	31
q _{berechnung}	kN/m`	74,31	46,5	42.432	19.584	20.04	42.432	46,5	36,5
e	kN/m`	8.024	3.325	0	0	0	0	3.325	3.325
e _{berechnung}	kN/m`	9.63	3.99	0	0	0	0	3.99	3.99
g _s	kN/m`	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2
g _{s,berechnung}	kN/m`	8.64	8.64	8.64	8.64	8.64	8.64	8.64	8.64
p _e	MPa	0.48	0.634	1.07	0.654	0.4126	0.281	0.634	0.4487
p _{e, berechnung}	MPa	0.528	0.7	1.18	0.72	0.45	0.309	0.7	0.49
q _{s, berechnung}	kN/m`	3.12	1.395	1.273	0.588	0.734	1.782	1.814	1.953
e _{s, berechnung}	kN/m`	2.022	0.898	0	0	0	0	1.167	1.257
g _{s, berechnung}	kN/m`	0.454	0.324	0.324	0.324	0.389	0.454	0.324	0.454



Tab. 8-49 Lasten während der Betriebszeit für den verschiedenen Abschnitten

Abschnitt		1	2	3	4	5	6	7	8
f	-	2	3	4	5	8	4	3	3
Ko	N/cm ²	800	1000	1600	2000	4000	1600	1000	1000
Y _{Fels}	kN/m ³	24	25	26	24	25	26	25	25
p	MPa	0.5038	0.512	0.524	0.5361	0.5441	0.5601	0.5722	0.5802
dau skl.	cm	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
μ _{min}	%	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Betriebszeit									
q	kN/m`	48	31	28.288	13.056	13.6	28.288	31	31
q _{berechnung}	kN/m`	72	46,5	42.432	19.584	20.04	41.432	46,5	46,5
e	kN/m`	7.891	3.325	0	0	0	0	3.325	3.325
e _{berechnung}	kN/m`	6.31	2.66	0	0	0	0	2.66	2.66
g _s	kN/m`	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2
g _{s, berechnung}	kN/m`	6.48	6.48	6.48	6.48	6.48	6.48	6.48	6.48
p _e	MPa	0.48	0.634	1.07	0.654	0.4126	0.281	0.3446	0.4487
p _{e, berechnung}	MPa	0.432	0.571	0.96	0.59	0.37	0.253	0.31	0.4
p _{i, berechnung}	MPa	0.5038	0.512	0.524	0.5361	0.5441	0.5601	0.5722	0.5802
q _{s, berechnung}	kN/m`	3.024	1.395	1.273	0.588	0.734	1.782	1.814	1.953
e _{s, berechnung}	kN/m`	1.989	0.898	0	0	0	0	1.167	1.257
g _{s, berechnung}	kN/m`	0.454	0.324	0.324	0.324	0.389	0.454	0.421	0.454
p _{i,s, berechnung}	MPa	6.3	4.5	4.5	4.5	5.4	6.3	5.85	6.3



Tab. 8-50 Spannungen, Bewehrung, Rissbreite, Anzahl der Risse, Sickerung durch die Auskleidung für den verschiedenen Abschnitten

Abschnitt		1	2	3	4	5	6	7	8
Innenwasserdruck									
σ_1	kPa	-4797	-4276	-3764	-3349	-2636	-4023	-4779	-4846
σ_2	kPa	-4343	-3867	-3397	-3017	-2363	-3631	-4321	-4382
Maximale Spannungen									
σ_1	kPa	-2728	-4885	-4756	-3882	-3082	-5021	-5350	-5417
σ_2	kPa	-353	-2541	-1782	-2182	-1592	-2002	-3022	-3083
M	kNm	17.8125	17.58	22.305	12.75	11.175	22.6425	18.72	18.675
N	kN	-462.15	-1113.9	-980.7	-909.6	-699.9	-1053.45	-1260.3	-1279.2
e_0	m	0.039	0.016	0.022	0.014	0.016	0.021	0.015	0.014
e	m	0.139	0.116	0.122	0.114	0.116	0.121	0.115	0.114
e'	m	0.069	0.084	0.078	0.086	0.084	0.079	0.085	0.086
Fa	cm ² /m	11.304	20.096	18.086	15.386	12.309	20.096	22,891	22.891
F`a	cm ² /m	5.042	15.386	13.847	15.386	9.043	15.386	18.086	18.086
Zugbewehrung		10xN10/10	10xN16/10	9xN16/11.11	10xN14/10	8xN14/12.5	10xN16/10	9xN18/11.11	9xN18/11.11
Druckbewehrung		10xN8/10	10xN14/10	9xN14/11.11	10xN14/10	8xN14/12,5	10xN14/10	9xN16/11.11	9xN16/11.11
μ	%	0.55	1.18	1.06	1.02	0.71	1.18	1.37	1.37
Risse									
a	mm	0.064	0.051	0.031	0.022	0.005	0.034	0.06	0.061
n	-	80	120	110	120	90	120	130	130
Q	l/s	9.75x10 ⁻⁵	1.04x10 ⁻⁴	6.31x10 ⁻⁵	3.25x10 ⁻⁵	4.26x10 ⁻⁷	6.65x10 ⁻⁵	1.24x10 ⁻⁴	1.24x10 ⁻⁴



9 Bauverfahrenstechnik des Druckstollens

Es werden Beispiele einer technischen Lösung für mögliche Bauverfahrenstechniken des Druckstollens und der entsprechenden Hilfsmaßnahmen dargestellt.

Die dargestellte Bauverfahrenstechnik untersucht zwei verschiedene Aufbauansätze. Jede der beiden Möglichkeiten hat ihre Vor- und Nachteile, die zusätzlich untersucht werden sollen, um eine bessere wirtschaftliche Lösung zu wählen. Deshalb sollen die untersuchten Bauverfahrenstechniken nur als Basis für eine nachfolgende Entwicklung des Projekts angenommen werden.

Die erste Möglichkeit für Abbau des Druckstollens verlangt eine Baugrube auf der Seite des Speichers und noch eine in dem Bereich des Wasserschlosses, das durch einen Fensterstollen erreichbar ist. Sie sind so positioniert, dass sie die abschließenden Arbeiten für den Abbau der Talsperre und der Druckrohrleitung nicht verhindern. Es wird angenommen, dass alle Entwässerungsmaßnahmen, sowie die Empfehlungen für Sicherheit- und Gesundheitsmaßnahmen gewährleistet sind.

Die zweite Möglichkeit für den Abbau des Druckstollens verlangt eine Baugrube auf der Seite des WKWs „Sarnitsa“, die im Bereich des Wasserschlosses endet und durch einen Fensterstollen erreichbar ist. Dadurch kann die Fläche des Wasserschlosses als Baugrube benutzt werden und dort, wenn es notwendig ist, kann der Fels auch zwischendeponiert werden.

Der Druckstollen hat eine Länge von $L=1019,81\text{m}$ und einen Durchmesser von $D=6,10\text{m}$. Entlang des Druckstollens sind die folgenden Abschnitte vorausgesehen:

- Baugrube auf der Seite des Speichers
- Geneigter Abschnitt- eigentlicher Druckstollen
- Baugrube auf der Seite des WKWs



Die Baugruben sind so positioniert, dass sie die Bewegung der Mechanisierung während der Aushubarbeiten, Abstützung und Auskleidung nicht stören. Die Abmessungen sind groß genug, damit sie die Bedürfnisse der entsprechenden Bauverfahrenstechnik gewährleisten.

Wegen der grossen Länge von $L=1019,81\text{m}$ soll der Ausbruch im ersten Fall von beiden Seiten anfangen, weil dadurch die Transportlänge bzw. die Zeit für den Aufbau des Druckstollens reduziert wird. Die zweite Variante bietet auch eine relativ kurze Bauzeit.

Es wird angenommen, dass in der ersten Variante ein konventioneller Vortrieb durchgeführt wird. Es handelt sich um jene Vortriebsart, bei der die einzelnen Arbeitsvorgänge des Lösens, Schütterns und des Stützmitteleinbaues nacheinander und mit Hilfe von Einzelgeräten ausgeführt werden [8].

Die Bauverfahrenstechnik für die zweite Variante zeigt einen maschinellen Vortrieb. Es handelt sich um jene Vortriebsart, bei der der Vortrieb mit Hilfe einer Teilschnittmaschine bewältigt wird. Die einzelnen Arbeitsvorgänge des Lösens, Ladens und des Stützmitteleinbaues werden im Wesentlichen gleichzeitig ausgeführt [8].



9.1 Ausbrucharbeiten

9.1.1 Bohr- und Sprengarbeiten

Die Bohr- und Sprengarbeiten werden im Felsgestein ausgeführt, wobei Bohrlöcher gemacht werden, die später mit Sprengstoffen geladen werden, die das Lösen des Felses gewährleisten [6].

Die Bohr- und Sprengarbeiten werden für die erste Variante vorausgesehen. Die kleine Neigung des Druckstollens erlaubt eine leichte Bewegung der Mechanisierung für die Ausbrucharbeiten und das Transportieren.

Die Art der Ausbrucharbeiten ist eine Voraussetzung für strengen Kontrollen über die Sicherheits- und Gesundheitsmaßnahmen. Es ist notwendig auch die entsprechende Elektrizitätsausrüstung und Bewetterung zu gewährleisten.

Der größte Nachteil der Bohr- und Sprengarbeiten besteht darin, dass dadurch der Fels gestört wird und das führt zum Entstehen von großen Auflockerungszonen. Diese Zone spielt eine wichtige Rolle für die Bemessung der Abstützung. Damit sie reduziert wird, ist eine besondere Beachtung der äußeren Kranzlöchern notwendig. Dadurch wird die Auflockerungszone begrenzt, was auch in kleineren Bemessungswerten reflektiert.

Andererseits ist dieses Verfahren sehr konkurrenzfähig, weil die Kosten pro Laufmeter sehr klein sind und mit einer guten Planung kann die Arbeit sehr schell laufen.

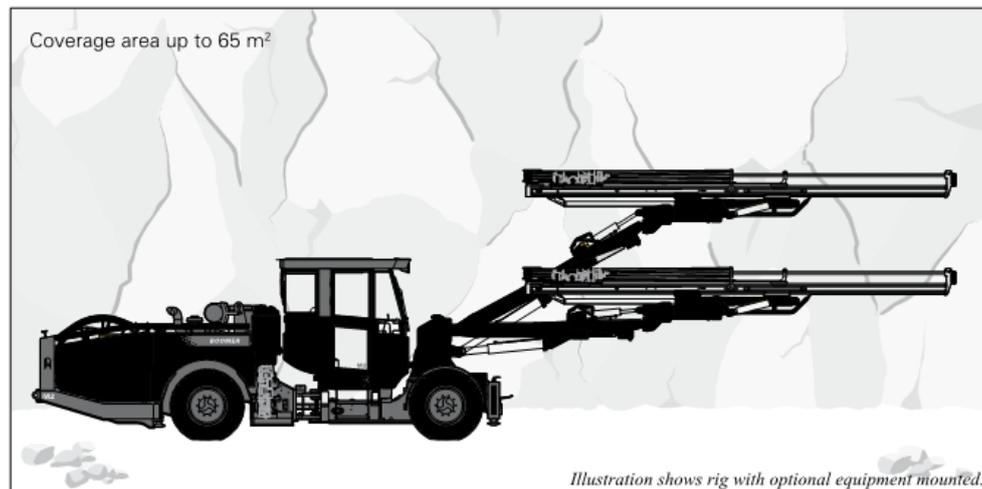
Die Bohr- und Sprengarbeiten werden im Vollprofil durchgeführt. Dafür ist eine entsprechende Mechanisierung - Boomer M2 C von Atlas Copco mit zwei Bohrhammer COP 3038 für das Bohren gewählt werden. Die Firma hat eine breite Palette von Automatisierungen, die für verschiedenen Durchmesser geeignet sind. Boomer M2 C hat einen Arbeitsbereich von 65m^2 , der den entsprechenden Durchmesser des Druckstollens abdecken kann.

Atlas Copco Face drilling rigs

Technical specification

Boomer M2 C

Equipped with COP 3038



Two boom hydraulic tunnelling and mining rig with an advanced Rig Control System for high accuracy and productivity. COP 3038 rock drills for superior productivity.

Standard features

» Rock drill

- High-frequency COP 3038 rock drills with dual-damping system for optimal consumable life
- Pressurized housing and mating surfaces to reduce internal contamination of the rock drill

» Hydraulic boom

- BUT 35 SL heavy-duty boom with double tripod suspension for accurate hydraulic parallel holding in all directions

» Hydraulic feed

- BMH 6000-series heavy-duty aluminium feed with high bending and torsional resistance for maximum durability
- Snap-on stainless steel sleeves and polymer contacts

» Control system

- Advanced Rig Control System (RCS) allowing several levels of automation to suit customer requirements
- Standard functions include soft collaring and the anti-jamming function Rotation Pressure Controlled Feed (RPCF)
- Integrated diagnostic and event logging system to assist in equipment maintenance
- Interactive operator panel with full-colour display

» Carrier

- Sturdy, articulated carrier with four-wheel drive
- Powered by a 4-cylinder, EPA III/COM III (Tier 3/Stage IIIA) approved diesel engine
- Four jacks for stable set up

» General

- FOPS-approved telescopic protective roof
- Cable reel
- Hydraulically driven compressor
- Hydraulically driven water booster pump
- Working lights

Atlas Copco

Abb. 9-1 Technische Charakteristiken der Bohrmaschine [10]

Specifications

ROCK DRILL

	COP 3038
Shank adapter	TC45
Height over drill centre	84 mm
Length without shank	970 mm
Impact power	30 kW
Impact rate	102 Hz
Hydraulic pressure	200 bar
Rotation system	Separate rotation
Rotation speed	0–380 rpm
Rotation torque, max	190 Nm
Lub. air consump. at 4 bar	5 l/s
Flushing water	20–30 bar
Water consumption, max	130–190 l/min*
Weight	165 kg
Sound level	<106 dB(A)

*Depending on drill steel

FEED

	BMH 6900	BMH 6914	BMH 6916	BMH 6918
Total length	5 988 mm	6 598 mm	7 208 mm	7 208 mm
Drill steel length	4 310 mm	4 920 mm	5 530 mm	5 530 mm
Hole depth	4 043 mm	4 668 mm	5 268 mm	5 268 mm
Weight, incl. drill	666 kg	700 kg	731 kg	731 kg
Feed force	22.0 kN	22.0 kN	22.0 kN	22.0 kN

» Boom

- BUT 35 SL
- Feed extension 1 800 mm
- Boom extension 1 600 mm
- Parallel holding complete
- Feed roll-over 360°
- Max. lifting angle +65°/–30°
- Max. swinging angle ±45°
- Weight, boom only 2 900 kg

» Air system

- Hydraulically driven screw compressor ... Atlas Copco GAR 5
- Capacity, max at 9 bar 26 l/s
- Adjustable speed
- Air pressure gauge
- Hole blowing kit with 80 l air receiver

» Water system

- Hydraulically driven water booster pump Johnson MCVS16-7
- Water booster pump max capacity at 30 bar 400 l/min
- Min water inlet pressure at 200 l/min, 2 bar
- Water pressure gauge
- Water flow guard

» Control system

- Rig Control System (RCS) – versatile and upgradeable to a higher degree of automation
- One adjustable, electronic control panel with colour display
- USB-port for transfer of data and backup settings
- Integrated diagnostic system

» Electrical system

- Total installed power 198 kW
- Main motors 2 x 95 kW
- Voltage 380–1 000 V
- Frequency 50–60 Hz
- Starting method star/delta (1 000 V direct start)
- Electronic overload protection for electric motors
- Percussion hour meter on operator display
- Digital voltmeter/ampere meter in electric cabinet
- Phase sequence indicator
- Earth fault indicator
- Battery charger
- Transformer 8 kVA
- Cable reel, diameter 1 600 mm
- Dual controls for cable reel

» Hydraulic system

- Hydraulic pumps 2 separate units, one for each boom
- Pumps unloaded at start
- System pressure, max 250 bar
- Hydraulic oil tank, volume max/min 390/290 l
- Low oil level indicator
- Oil temperature gauge on oil tank
- Electrical oil filling pump
- Oil filter indicator
- Water cooled oil
- Filtration 16 µm
- Mineral hydraulic oil
- Big hole drilling system

» Carrier

- Deutz 4-cylinder, TCD 2013 L04, EPA III/COM III (Tier 3/ Stage IIIA) approved 4-stroke prechamber diesel engine
- Power rating at 2 300 rpm 120 kW (160 hp)
- Torque at 1 600 rpm 618 Nm
- Articulated steering ±41° steering angle
- Fixed seat for tramping
- Four-wheel drive
- Hydrostatic power steering system
- Hydrodynamic transmission Clark 24000
- Front axle Dana 123/90
- Rear axle Dana 123/90, ±8° oscillation
- Automatic differential lock on front axle, limited slip
- Tyres 12.00 x R24
- Clearance outside axles 22° front, 13° rear
- Hydraulic jacks, front 2 extendable
- Hydraulic jacks, rear 2
- Service brakes 2 separate circuits
- Emergency and parking brakes SAHR
- Fuel tank, volume 110 l
- Exhaust catalyser
- Silencer
- Electric system 24 V
- Batteries 2 x 12 V, 125 Ah
- Tramping lights 6 x 40 W LED + 2 x 70 W halogen, 24 V
- Working lights 4 x 35 W HID, 24 V DC
- Brake lights
- Illuminated stairs for platform 2 x 70 W
- Fire extinguisher
- Central lubrication system
- Spirit level one for longitudinal, one for sideways
- Gradeability at max. load on drive wheels 1:4
- Horn, beacon and reverse alarm
- Shelf for drill bits and tools

Abb. 9-2 Technische Charakteristiken der Bohrmaschine [10]

Boomer M2 C equipped with COP 3038

Specifications

DRIFTER RODS

Dimension	Min. hole diameter
mm SR35-H35-T38	45
SR35-R39-T38	45

SHANK ADAPTERS

Thread	Diameter	Length
mm TC45*	45	525
TC45	45	435

* Intended for RAS and extension drilling with BSH 110

COUPLINGS

Thread	Diameter	Length
mm T38/TC45	57	175

EXTENSION RODS FOR INJECTION DRILLING/RAS

Dimension	Min. hole diameter
mm R39 Speedrod	64

GUIDE TUBE FOR INJECTION DRILLING

Dimension	Min. hole diameter
mm R46	64

Optional equipment

» Feed

- Telescopic feed BMHT 6000-series (max 18 ft)
- Extension drilling set BSH 110 (BMH feeds only)
- Feed prepared for RAS
- Rod Adding System, RAS
- Water spraying kit on cradle

» Boom

- Automatic boom lubrication kit, rear part of boom

» Automation

- ABC Basic
- ABC Regular
- ABC Total
- Rig prepared for ABC Total
- Electronic parallel holding (ABC Regular)
- Rig prepared for Measure While Drilling (MWD) logging and analyzing drill data
- Measure While Drilling (MWD)
- Bolt view (ABC Regular and Total)
- Rig Remote Access (RRA) – LAN or WLAN connection
- RRA server

» Protective roof

- Mounting height -80 mm/+30 mm/+310 mm
- Manual spotlight, left and/or right
- Swingable seat for drilling and tramping (one operator panel only)
- Two operator panels for standing operation only

» Cabin

- FOPS-approved cabin, noise level <80 dB(A), height 3 044 mm including:
 - Air conditioning unit
 - Fixed seat
 - CD-changer
 - Boot washing kit
- Cabin body made of stainless steel
- Front window, 24 mm
- Heating function for air conditioning (water transferred)
- Electrical heater, 1.2 kW, 230 V (CE)

- Joystick-controlled spotlights left and/or right
- Swingable seat for drilling and tramping (one operator panel only)
- Two operator panels (for standing operation only)

» Air system

- Compressor, GAR 30

» Water system

- Water hose reel

» Hydraulic system

- Biodegradable hydraulic oil
- Heater kit for hydraulic oil tank, diesel engine and electric motors

» Carrier

- Deutz engine, TCD 2015 L06 2V
- Exhaust system: particle filter
- Fire suppression system ANSUL (manual or Checkfire)
- Fire suppression system FORREX (manual or automatic)
- Large plates for boom frame hydraulic jacks

» Electrical system

- Stainless steel electrical enclosure
- Electric cable type Buflex, 690/1 000 V
- Plug for cable
- Switch gear
- Electrical outlet voltage 16 A 3-phase (CE and not for 1 000 V)
- Extra transformer, 3-phase, 15 kVA (230/400 V)

» Miscellaneous

- Hose/cable guiding at water/cable reel
- Hydraulic Swellex pump type H1 for manual installation
- Manual lubrication kit
- Rig washing kit
- Boot washing kit
- Ni-Cr plated piston rods (limitations exist)
- Hydraulic outlet for charging with Mini SSE

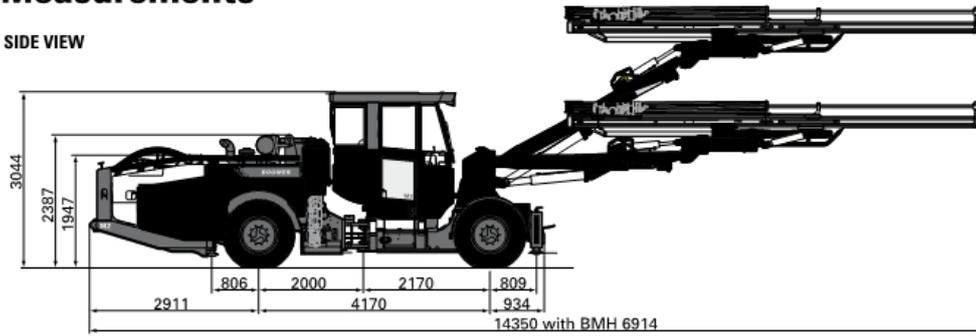
Abb. 9-3 Technische Charakteristiken der Bohrmaschine [10]



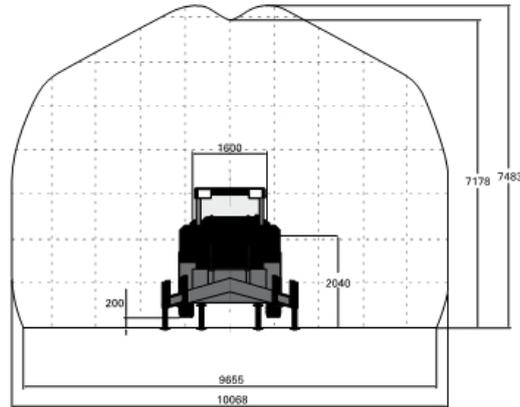
Boomer M2 C equipped with COP 3038

Measurements

SIDE VIEW



COVERAGE AREA



DIMENSIONS

mm	Width	2 245
	Height with cabin	3 044
	Height roof up/down	3 019/2 387
	Length with BMH 6914 feeds	14 350
	Ground clearance	262
	Turning radius outer/inner	7 200/4 400

TRAMMING SPEED

km/h	On flat ground (rolling resistance 0.05)	>14
	On incline 1:8	>6

WEIGHT

gross weight, depending on configuration		
kg	Total	23 500–27 000
	Boom side	17 500–19 000
	Engine side	6 000–8 000

NOISE AND VIBRATION

Operator sound pressure level in canopy, drilling, free field (ISO 11201)	104±6 dB(A) re 20µPa
Operator sound pressure level in cabin, drilling, free field (ISO 11201)	75±3 dB(A) re 20µPa
Operator sound pressure level working close to machine, drilling, free field	104±6 dB(A) re 20µPa
Sound power level (ISO 3744), drilling, free field	131 dB(A) re 1pW
Vibration levels standing, canopy (ISO 2631-1)	0.1±0.15 m/s ^{4/2}
Vibration levels standing, cabin (ISO 2631-1)	0.07±0.15 m/s ^{4/2}
Vibration levels seated, cabin (ISO 2631-1)	0.07±0.07 m/s ^{4/2}

RECOMMENDED CABLE SIZE AND LENGTH

Voltage	Type	Dimension, mm ²	Diameter, mm	Length, m
660–690V	H07RN-F	4X120	60	75
	Buflex	3x150+3G25	52	100
1 000 V	Buflex	3x95+3G16	45	155

Recommendations are given for surrounding temperature of 40 °C and up to a height of 2 000 m.

© Copyright 2010, Atlas Copco Rock Drills AB, Sweden. All product names in this publication are trademarks of Atlas Copco. Any unauthorized use or copying of the contents or any part thereof is prohibited. Illustrations and photos may show equipment with optional extras. No warranty is made regarding specifications or otherwise. Specifications and equipment are subject to change without notice. Consult your Atlas Copco Customer Center for specific information.

10/2010

9851 2774 01

Atlas Copco

Abb. 9-4 Technische Charakteristiken der Bohrmaschine [10]



Die Steuerung der Bohrmaschine Boomer M2 C wird mittels zwei Schalteebenen gewährleistet, die gleichzeitig und unabhängig arbeiten können. Dadurch werden auch die Mitarbeiter bzw. die Kosten reduziert.

Für die problemlose Funktionsweise der Bohrmaschine soll ein ununterbrochener Zulauf von Druckluft vorhanden sein. Die Druckluft wird durch einen Kompressor produziert, der sich zusammen der Bohrmaschine bewegt.

Nach dem Bohren kommt das Sprengen des Felses. Es wird mit speziellen Sprengstoffen realisiert. Es sind eigentlich verschiedene chemische Verbindungen, die unter bestimmten Bedingungen sehr schnell reagieren und dabei eine relativ große Energiemenge in Form von einer Druckwelle freisetzen, die den Fels zerreisst. Der Effekt der Explosion ist vom Volumen der Gase und der Geschwindigkeit ihrer Entstehung abhängig. Im Tunnelbau werden hauptsächlich zwei Arten von Sprengstoffen benutzt – Amonite und Dynamite [5]. Jede von den beiden Stoffen hat Vor- und Nachteile und die Auswahl eines Produkts ist von den Arbeitsbedingungen abhängig. Die Vorteile von Amonite sind:

- Unempfindlich bei einem Stoß
- Unempfindlich bei Erschütterungen
- Brandbeständig
- Unempfindlich auf hohe Temperatur

Der große Nachteil ist, dass sie hygroskopisch sind und in wassergesättigten Gebirgen kaum verwendbar sind. Für diese Fälle gibt es natürlich spezielle Arten von Amoniten.

Vorteile von Dynamite sind:

- Wasserbeständig
- Hohe Geschwindigkeit der Druckwelle

Die Dynamite sind sehr empfindlich beim Stoß und sind leicht entzündbar. Das ist eine Voraussetzung derentwegen entsprechende Maßnahmen während der Arbeit und bei der Lagerung unternommen werden.



Die Dynamite werden in der Form von Patronen mit entsprechendem Durchmesser und Länge, im geölten Papier verpackt, angeboten.

Wegen der gegebenen Arbeitsbedingungen und der Voraussetzung, dass das Gebirge wassergesättigt ist, werden Dynamite als Sprengstoff gewählt. Die bevorzugte Herstellerfirma hat eine breite Palette von Produkten und mit ihrer langjährigen Erfahrung garantiert Sie die Qualität des Produkts.

Es wird DYNOSPLIT von Dyno Nobel gewählt. Dieses Produkt ist auf Basis des Nitroglyzerins hergestellt und ist in einer geölten Papierverpackung geliefert. Seine Eigenschaften erlauben die Entstehung von relativ glatten Wänden nach dem Sprengen, was eigentlich der größte Vorteil dieses Sprengstoffs ist.

Spezielle Maßnahmen für die Lagerung der Sprengstoffe sollen getroffen werden. Dazu wird ein gesicherter Platz in der Nähe von der Baugrube vorgesehen.

Die Dynamite können nicht direkt gezündet werden, deshalb soll ein Sprengzünder benutzt werden [6]. Das Zünden erfolgt elektronisch und dadurch ist eine präzise Regelung der Sprengzeit gewährleistet, was zu einer Erhöhung der Leistungsfähigkeit des Sprengens führt.

Das Laden der Bohrlöcher mit den Sprengstoffen wird unbedingt von einem Spezialisten gemacht. Er soll auch den Sprengzünder in der Sprengstoff stecken [5].



DYNOSPLIT®

Technical Information



Nitroglycerin Dynamite



Product Description

DYNOSPLIT is a specially formulated nitroglycerin dynamite packaged in rigid 600 mm (24 in) long paper cartridges available in either 19, 22 or 25 mm (¾, ⅞ or 1 in) diameters. A plastic or paper coupler, attached to one end, allows easy assembly into a continuous length. DYNOSPLIT is designed for pre-splitting or cushion blasting in surface operations and for smooth wall, contour or trim blasting underground.

Application Recommendations

- Minimum detonating cord is 5.3 g/m (25 gr/ft).
- Minimum detonator is No. 8 strength.
- Minimum temperature is -40°C (-40°F).
- Linear charge weight:
 - D = 19 mm (¾ in) diameter = 0.42 kg/m (0.28 lbs/ft)
 - D = 22 mm (⅞ in) diameter = 0.57 kg/m (0.38 lbs/ft)
 - D = 25 mm (1 in) diameter = 0.64 kg/m (0.42 lbs/ft)
 - D1 = 22 mm (⅞ in) diameter = 0.42 kg/m (0.28 lbs/ft)
- **ALWAYS** trace columns over 2 m (6 ft) long with detonating cord securely attached to each cartridge.
- **ALWAYS** decouple the explosive charge when presplitting; that is, select larger borehole diameters to reduce borehole pressure. In surface applications, always stem to minimize air blast and plug the borehole above the explosive column to prevent stemming from filling the air/water space. In underground drifting applications, plug the borehole after the explosive column to prevent the explosive column from being ejected out of the borehole during detonation of the drift round.

Properties

MSDS #1019

	D	D	D	D1
Diameter (in)	¾	⅞	1	¾
Density (g/cc) Avg	1.40	1.40	0.95	0.82
Energy ^a (cal/g)	995	995	990	930
(cal/cc)	1,440	1,440	1,230	940
Relative Weight Strength ^a	1.13	1.13	1.12	1.05
Relative Bulk Strength ^{a,b}	2.00	2.00	1.70	1.30
Velocity ^c (m/s)	2,600 ^c	2,700 ^d	3,000	1,875
(ft/s)	8,500 ^c	8,900 ^d	9,800	6,150
Detonation Pressure ^c (Kbars)	24 ^c	26 ^d	28 ^d	7 ^d
Gas Volume ^a (moles/kg)	32	32	37	38
Water Resistance (@ 12 ft)	24 hrs	24 hrs	24 hrs	8 hrs

Fume Class IME1 & NRCan1^e Not for use underground

Maximum Water Depth 8 m (25 ft)

^a All Dyno Nobel Inc. energy and gas volume values are calculated using PRODET™ the computer code developed by Dyno Nobel Inc. for its exclusive use. Other computer codes may give different values.

^b ANFO = 1.00 @ 0.82 g/cc

^c Unconfined @ 19 mm (¾ in) diameter

^d Unconfined @ 22 mm (⅞ in) diameter

^e Approved by Natural Resources Canada as Fume Class 1.

Hazardous Shipping Description
Explosive, Blasting, Type A, 1.1D, UN 0081 II



D-08-12-15-08

See Product Disclaimer on page 2

DYNO
Dyno Nobel

Groundbreaking Performance™

Abb. 9-5 Eigenschaften des Sprengstoffs



DYNOSPLIT®

Technical Information



Transportation, Storage and Handling

- DYNOSPLIT must be transported, stored, handled and used in conformity with all applicable federal, state, provincial and local laws and regulations.
- For maximum shelf-life, dynamite must be stored in cool, dry and well-ventilated magazines. Dynamite inventory should always be rotated by using the oldest materials first. For recommended good practices in transporting, storing, handling and using this product, see the booklet "Prevention of Accidents in the Use of Explosive Materials" packed inside each case and the Safety Library Publications of the Institute of Makers of Explosives.

Decoupled Borehole Pressure (psi)

Product Diameter (in)	Borehole Diameter (in)				
	1 3/4	2 1/2	2 3/4	3	3 1/2
3/4 ^a	16,766	7,941	6,198	4,943	3,311
7/8 ^a	27,600	13,064	10,196	8,132	5,447
1 ^a	32,381	15,327	11,963	9,541	6,390
3/4 ^b	--	48,468	37,830	30,171	20,208
7/8 ^b	--	72,732	56,768	45,275	30,325
1 ^b	--	85,330	66,601	53,117	35,577
7/8 ^a	9,576	4,533	2,821	2,821	1,890
7/8 ^b	--	52,849	32,897	32,897	22,034

Diameter x Length		Linear Charge Weight		Qty / Case	Nominal Case Weight	
mm	in	kg/m	lbs/ft		kg	lbs
19 x 600	3/4 x 24	0.42	0.28	80	20	44
22 x 600	7/8 x 24	0.57	0.38	60	19.5	43.2
25 x 600	1 x 24	0.66	0.42	50	20	44
22 x 600	7/8 x 24	0.42	0.28	60	19.5	34.8

- ^a DYNOSPLIT alone.
- ^b DYNOSPLIT with detonating cord trace along its length.
- Diameter as labeled is nominal inside diameter. Actual outside diameter is 20mm (0.79 in) for 19 mm (3/4 in) and 23 mm (0.90) for 22 mm (7/8 in).
- Note: All weights are approximate.

D
D1

Case Dimensions

67 x 35 x 12 cm

26 1/2 x 13 3/4 x 4 3/4 in

Product Disclaimer Dyno Nobel Inc. and its subsidiaries disclaim any warranties with respect to this product, the safety or suitability thereof, or the results to be obtained, whether express or implied, INCLUDING WITHOUT LIMITATION, ANY IMPLIED WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE AND/OR OTHER WARRANTY. Buyers and users assume all risk, responsibility and liability whatsoever from any and all injuries (including death), losses, or damages to persons or property arising from the use of this product. Under no circumstances shall Dyno Nobel Inc. or any of its subsidiaries be liable for special, consequential or incidental damages or for anticipated loss of profits.

Dyno Nobel Inc.
2650 Decker Lake Boulevard, Suite 300, Salt Lake City, Utah 84119 USA
Phone 800-732-7534 Fax 801-328-6452 Web www.dynonobel.com

DYNO
Dyno Nobel
Groundbreaking Performance

Abb. 9-6 Eigenschaften des Sprengstoffs



9.1.2 Maschinelles Vortrieb mit Teilschnittmaschine (TSM)

Der maschinelle Vortrieb mit Teilschnittmaschinen ist für den Abbau von weichem bis mittelhartem standfestem Gestein geeignet [8].

Für den gegebenen Durchmesser des Druckstollens wird die Roadheader MR520 -Teilschnittmaschine von Sandvik gewählt. Der große Vorteil von solchen Teilschnittmaschinen ist der schnelle Vortrieb, den sie ermöglichen. Der Grund dafür ist die Konstruktion der Maschine. Das Gestein wird mit einer Ladeschaufel aufgenommen und von mehreren rotierenden Ladescheiben zu einem mittig durch die Teilschnittmaschine laufenden Förderband geschoben und transportiert. Dadurch kann der Abbau ununterbrochen laufen, was die Bauzeit deutlich reduzieren kann.

Bei solchen Maschinen gibt es die Möglichkeit eine Ausrüstung für Verankerung anzubauen, wodurch die Ankerlöcher schneller gemacht werden können. Die Arbeiten für die Verankerung und der Abbau des Felses können gleichzeitig passieren was eine Voraussetzung für schnelle Ausrüstung eines fertigen Querschnitts ist.

Die Teilschnittmaschine kann den Querschnitt horizontal und vertikal in Abhängigkeit von den Felseigenschaften fräsen. Die Herstellerfirma hat große Erfahrung im Tunnelbau bei schweren Arbeitsbedingungen und kann schnell in einem Notfall reagieren. Sie haben eine Methode für die Auswahl von geeigneten Fräsköpfen für die entsprechenden Arbeitsbedingungen entwickelt. Diese Auswahl ist sehr wichtig, weil ein Verschleiß des Fräskopfes bedeutet, dass der Vortrieb langfristig unterbrochen sein kann.

Die Größe der ausgebrochenen Felsteile, die für eine spätere Schütterung geeignet sind, soll im Voraus berechnet sein.

Die Herstellerfirma garantiert eine optimale Leistungsfähigkeit bei horizontaler Bewegung des Fräskopfes. Wenn das Abbauwerkzeug das Ende des Querschnitts erreicht, wird sie vertikal zu einer neuen Position umgesetzt, wo sie ihre horizontale Bewegung neu beginnt.



Roadheader MR520 in Action

Highly productive and reliable production machine



BU-SYSTEMS (MR520) / Copyright © Sandvik Mining and Construction S.A., Dec. 2009



SANDVIK MINING AND CONSTRUCTION • www.miningandconstruction.sandvik.com



Abb. 9-7 Roadheader MR520



Unique features of the MR520

- Rugged design.
- Easy and rapid assembly and disassembly through modular design.
- High specific cutting performance with corresponding loading and conveying capacity.
- Proportional-Load sensing Hydraulic system for optimal energy utilisation.



Roadheader MR520

Sandvik Roadheader MR520

The Sandvik Roadheader MR520 is a boom type production machine in the 100 t range and represents another addition to the successful Roadheader series. The new developed cutter head is designed as a spiral head which ensures a high specific cutting rate and the capability to cut rock inclusions. The high performance loading device is equipped with loading spinners instead of loading arms thus gathering the material over the entire width of the loading table.

Technical data MR520*

General:		Negotiable gradients:			
Total weight approx.	(t)	102	Navigable cone radius (m)	25	
Machine ground pressure	(MPa)	0.2	Navigable basin radius min. (m)	12.5	
Length approx.	(m)	14.25	Navigable slope side gradient max. (° / gon)	±8 / ±9	
Height over turret approx.	(mm)	3.440	Slope upgrade / incline** (° / gon)	±18 / ±20	
Height over conveyor approx.	(mm)	2.820	Tramming speed, forward and reverse (m/min)	0 - 6 - 13	
Loading table width variable	(m)	5.51	Electrical system:		
Ground clearance	(mm)	280	Electric supply voltage	(V/Hz) 1.000 / 50	
Cutting Profile:		Cutter motor	(kW)	300	
Cutting height above track level max.	(m)	5.20	Total installed power	(kW)	547
Cutting width max.	(m)	8.35	<small>All dimensions and weights are approximate Please see technical specifications for details * All rights for technical modification are reserved ** without stabilizing</small>		
Undercut below floor level	(mm)	285			
Cutter head sprays		dry			
Cutting speed at 50 Hz	(m/sec)	3.4 / 4.2			



Abb. 9-8 Roadheader MR520



Ein großer Nachteil der Teilschnittmaschinen ist die starke Staubbildung. Eine speziell entwickelte Ausrüstung soll den Staub stark reduzieren, ist trotzdem aber das nicht immer erfolgreich.

Ein Vorteil ist, dass durch maschinellen Vortrieb die Auflockerungszone wesentlich reduziert wird. Dadurch wird die Standfestigkeit des Gebirges erhalten, was auch den Gebirgsdruck vermindert. Der kleine Gebirgsdruck ist eine Voraussetzung für kleinere Abstützkonstruktionen.

Roadheader MR 520 erlaubt einen glatten Abbau des Felses. Das ist eine Voraussetzung für Verminderung des Ausbrucharbeiten und der Notwendigkeit von großen Mengen von Füllbeton.

Der größte Vorteil dieser Verfahrenstechnik im Vergleich zu den Bohr- und Sprengarbeiten ist die große Vortriebsgeschwindigkeit und die wesentliche Reduktion der Mitarbeiter. Dieser Vorteil kann zu Verminderung der Aufbaukosten führen. Sehr wichtig ist auch, dass durch die kürzere Bauzeit der Triebwasserweg schneller im Betrieb eingesetzt werden kann.

Das Förderband soll hoch genug sein, damit sich das Transportgerät problemlos unter der Teilschnittmaschine positionieren kann.



9.2 Schutterung

Im Falle einer Technologie mit Bohren und Sprengen, soll auch Schütterungsmechanisierung vorgesehen werden. Ein Radlader von Atlas Copco – Scooptram ST710 wird gewählt, der mit einem Transportgerät zusammenarbeiten soll, was einen ununterbrochenen Vortrieb der Aushubarbeiten sichert.

Die Transportgeräte für die Bohr- und Sprengarbeiten und für den maschinellen Vortrieb sind ähnlich. Die kleine Neigung des Druckstollens erlaubt eine Verwendung von Muldenhinterkipper. Sie zeichnen sich durch kompakte Konstruktion und eine große Beweglichkeit aus [8]. Sie sollen unmittelbar hinter der Abbaumaschine positioniert werden.

Bei den Bohr- und Sprengarbeiten soll der Radlader nach dem Sprengen kommen und den gelösten Fels auf dem Muldenhinterkipper beladen. Die Baugrube soll für die Verankerung vorbereitet sein, deshalb soll der ganze Aushub raustransportiert werden.

Bei dem maschinellen Vortrieb soll unbedingt das Transportgerät hinter der Teilschnittmaschine sein, wobei der gefräste Fels unmittelbar aufgeladen werden kann. Wenn der Muldenkipper voll ist, soll das Fräsen des Felses unterbrochen werden. Die Abladezeit des Transportgeräts kann zum Kühlen des Abbauwerkzeuges benutzt werden.

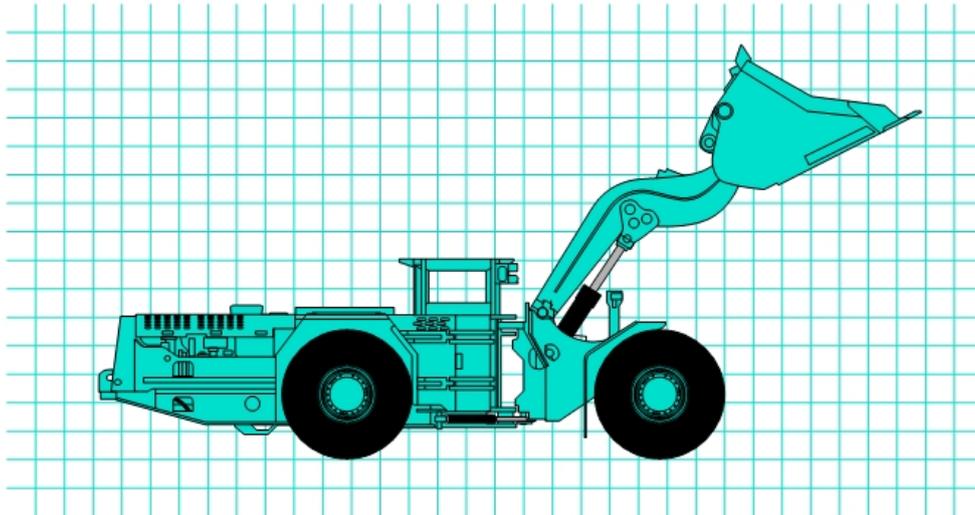
In den beiden Bauverfahrenstechniken ist nur ein Transportgerät für die Schutterung gewählt. Die kurze Länge des Druckstollens ist eine Voraussetzung für die kleine Transportdauer. Bei der Anwendung von einem Muldenkipper sind keine Verbreitungen des Querschnitts für die Transportgerätbewegung notwendig. Für eine Optimierung der Aushubarbeiten ist es möglich eine Auswahl von mehreren Transportgeräten, wobei der erste Muldenhinterkipper auf einem näher liegenden Zwischendeponie abladet, wovon andere Maschinen die Transportarbeiten weiter durchführen können, was einen ununterbrochenen Verlauf der Arbeit erlaubt [5].



Atlas Copco Underground Loaders

Scooptram® ST710

Technical specification



The ST710 is a compact 6.5 metric ton Scooptram with an ergonomically designed operator's compartment especially for narrow-vein mining.

Features

Load frame

- A Z-bar front-end for efficient loading and mucking
- An aggressively designed "high shape" factor bucket, reducing the need for multiple passes to fill the bucket
- Easy to change bucket and cylinders with split-cap pin retention system
- Boom support and lock for safe work under boom

Operator's compartment

Ergonomically and spacious designed compartment for maximum safety and minimal operator fatigue with:

- maximized legroom because of the Atlas Copco's "footbox"
- comfortable operator's seat offering improved ergonomic positioning, body orientation and generous shoulder and hip room
- compliant with sound and vibration regulations to minimize operator's fatigue; reduced noise level to 82 dB(A) inside the cab

Power frame

- Atlas Copco unique powertrain including an upbox, and a transverter (a combined transmission and converter) - allowing space for the "footbox" plus a low and short rear end
- Electronic transverter and engine control systems for smooth and precise shifting
- A high power-to-weight ratio complemented by a fully integrated powertrain, automatically matching the gear selection to the load - producing a high tractive effort without wheel spin
- Stacked V-core radiator and charge air cooler: easy to replace damaged tubes and to clean

General

- Great serviceability with centralized service points
- Long-life roller bearing centre hinge
- Anti skid material at service access points



Abb. 9-9 Radlader Scooptram ST710 [10]

Specifications

Capacities		Motion times		Matching vehicles	
SAE regulations		Boom		Minetruck	
Tramming capacity	6 500 kg	Raising	6.1 seconds	Minetruck MT2010	
Breakout force, hydraulic	14 200 kg	Lowering	4.6 seconds		
Breakout force, mechanical	10 347 kg	Bucket			
		Dumping	1.3 seconds		
		Rolling back	1.7 seconds		

Engine

- Deutz Diesel BF6M1013FC-MVS
- Power Rating at 2300 rpm 149 kW/200 HP
- Maximum torque at 1400 rpm 805 Nm
- MSHA part 32 ventilation rate 481 m³/min
- Ventilation particulate index 113 m³/min
- Rock Tough purifier and silencer
- Dry type air cleaner
- Exhaust heat protection
- Remote engine oil drain
- Cooling package with v-core radiator

Upbox

Superior AC826V: Power transmitted through a 1:1 gear ratio box

Transverter

Funk DF150: Automatic power shift with integral converter, fully modulated 4 speed shifting, forward/reverse

Axles

Rock Tough 406: Spiral bevel differential, full floating, planetary wheel end drive

- No spin front differential
- Conventional rear differential
- Rear axle, trunnion mounted
- Degree of rear axle oscillation +/-7°

Brakes

Fully enclosed, force cooled, multiple wet discs at each wheel end

- Service, parking and emergency brakes SAHR system

Tires

Tubeless, smooth, extra deep tread design for underground mine service on demountable rims

- Tire size, front and rear 17.5x25, 20 ply STMS L-5S

** As applications and conditions vary, Atlas Copco recommends that the user consults with tire suppliers to obtain the optimum tire selection.*

Operator's compartment

- Canopy MSHA-ISO ROPS/FOPS approved
- Side seated operator for bi-directional operation
- Grammer seat with retractable seat belts
- Open door retainer
- Two pilot operated joysticks for steering, dump & hoist control
- Push button transmission control on dump and hoist lever
- Foot-box

Hydraulic system

- Bucket float
- Cylinders: Double acting, chrome plated stems
- Two steer cylinders diameter 80 mm
- Two hoist cylinders diameter 160 mm
- Stabilizer cylinder diameter 180 mm
- System pressure, dump and hoist 20.7 MPa
- System pressure, steering 22.4 MPa
- Hydraulic tank capacity 87 liters
- Filtration, return line 4.0 µm
- Heavy duty gear type pumps
- Door steering interlock

Electrical system

- Voltage, system start & accessories 24 V
- Alternator, high output
- Hydraulic warning system
- Rock Tough protection lights
- Isolation switch lockout

Fuel

- Fuel tank capacity 191 liters
- Fuel consumption, full load 41 litres/hour
- Fuel filtration 3.0 µm
- Anti-siphon fuel supply

Abb. 9-10 Radlader Scooptram ST710 [10]

Scooptram® ST710

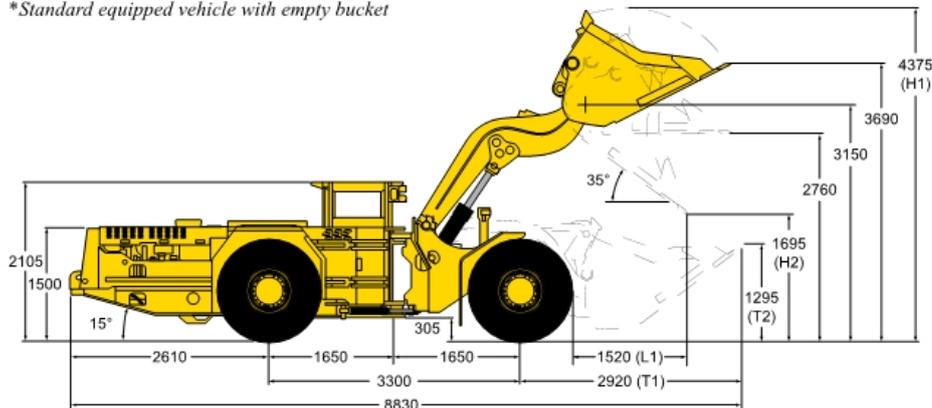
Buckets

Bucket data		STD				
Material density (t/m ³)		1.8	2.0	2.2	2.4	2.6
Volume, nominal heaped (m ³)		3.4	3.2	3.0	2.8	2.6
Width, bucket (mm)	W	2 040	2 040	2 040	2 040	2 040
Tramming position: Axle centerline to bucket lip (mm)	T1	3 000	2 920	2 895	2 830	2 750
Tramming position: Ground to bucket tip (mm)	T2	1 340	1 295	1 280	1 220	1 135
Truck loading: Reach (mm)	L1	1 590	1 520	1 500	1 440	1 360
Raised position: Back height, max. (mm)	H1	4 375	4 375	4 375	4 375	4 375
Raised position: Bucket tip, height (mm)	H2	1 635	1 695	1 705	1 750	1 825

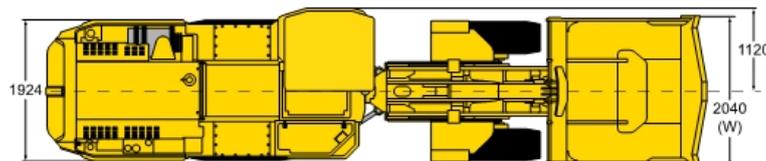
Dimensions and weights

- Approximate gross weight18 200 kg*
- Axle load, front end8 372 kg*
- Axle load, back end9 828 kg*

*Standard equipped vehicle with empty bucket



Side view



Top view

- Dimensions shown are based on standard vehicle configuration with 27 mm tire deflection.
- All dimensions are shown in millimeters.



© Copyright 2006, Atlas Copco Rock Drills AB, Umeå, Sweden. Any unauthorized use or copying of the contents or any part thereof is prohibited. This applies in particular to trademarks, trade designations, part numbers and drawings. Illustrations and photos in this brochure may show equipment with optional series. Specifications and equipment subjects to change without notice. Consult your Atlas Copco Customer Center for specific information.

9851 2256 01 c
 02/2007

Abb. 9-11 Radlader Scooptram ST710 [10]

Minetruck MT436B

A mine truck for large-scale operations



Technical data* MT436B	
Recommended drift width	5 m
Payload capacity	32,650 kg
Volume Semi-heaped	13.8 m ³
Operating weight of vehicle**	30,600 kg
Length	10,180 mm
Height, canopy/cabin	2,680 mm
Box height (raised)	5,385 mm
Width, vehicle	3,065 mm
Standard diesel engine	Detroit Diesel DDEC IV Series 60, Tier 2/Stage II
Power rating at 2,100 rpm	298 kW/400 hp
Tyre dimensions	26.5 R 25

Abb. 9-12 Transportgerät [10]



9.3 Abstützkonstruktionen

Für die Abstützkonstruktion werden zwei Arten von Ankern gewählt – Gleitkeilanker und Kunstharzklebeanker [7]. Die Bohrlöcher für die Verankerung werden durch spezielle Maschinen ausgeführt. Bei den Bohr- und Sprengarbeiten ist eine geeignete Bohrmaschine gewählt und bei dem maschinellen Vortrieb werden Bohrhammer auf der Teilschnittmaschine befestigt.

9.3.1 Wasserhaltung

Während der Bauarbeiten für den Druckstollen ist mit Wasserzutritten aus dem angeschnittenen Gebirge zu rechnen. Die Beseitigung des anfallenden Bergwassers durch eine Wasserhaltung spielt eine wichtige Rolle bei der Herstellung von Druckstollen, weil das Wasser sowohl die Bauausführung als auch den Betrieb der Anlage beeinflussen kann [6]. Manchmal hat es auch negative Auswirkung auf die Tragfähigkeit des Gebirges.

Es werden zwei Fälle untersucht:

- Die Neigung der Sohle des Druckstollens ist in die Vortriebsrichtung gerichtet.
- Die Neigung der Sohle des Druckstollens ist gegen die Vortriebsrichtung gerichtet.

Wenn die Neigung des Druckstollens gegen die Vortriebsrichtung gerichtet ist, kann das Wasser nur unter der Wirkung der Schwerkraft fließen. Es soll nur ein Entwässerungsgraben auf der Sohle mit Querschnitt von $0,2-0,25 \text{ m}^2$ und den entsprechenden Rohren vorgesehen werden. Die minimale Neigung soll mindestens 2 ‰ sein, deshalb soll im Abstand von 200m Sammlungsschächte gemacht werden von denen das Wasser gepumpt werden kann.

Wenn die Neigung des Druckstollens in die Vortriebsrichtung gerichtet ist, sollen unbedingt Sammlungsschächte vorgesehen werden und von dort wird das Wasser gepumpt.



9.3.2 Spritzbetonarbeiten

Die Abstützung aus Spritzbeton soll unmittelbar nach dem Ende des Vortriebs ausgeführt werden. Die Betonmischung wird unter Druck auf dem Fels gespritzt. Für die Spritzbetonarbeiten wird eine Maschine MEYCO– Oruga von Meyco gewählt.

Die Bemessung der Spritzbetondicke wird im Punkt 7 ausgeführt. Die angenommene Spritzbetondicke ist 5 und 6 cm.

Die vorgefertigte trockene Betonmischung von Zement und Zusatzmitteln kommt zu der Maschine mit der Hilfe von Förderband und wird direkt nach den Aushubarbeiten gespritzt. Der Fels soll im Voraus von aufgelockerten Felsteilen gereinigt werden, wodurch die entsprechende Festigkeit des Spritzbetons gewährleistet wird.

9.3.3 Gleitkeilanker

9.3.3.1 Vorbereitung für die Verankerungsarbeiten

- Die Ankerstäbe sind aus Stahl A III mit Durchmesser von $D=20\text{mm}$ gefertigt. Beim Schneiden der Anker soll das Ende glatt und senkrecht der Längsrichtung sein.
- Am Ende wird ein Gewinde gemacht, wobei durch das Drehen der Mutter der Anker gespannt wird.
- Die Ankerplatte hat Abmessungen von $200/200\text{mm}$ und ist aus Stahlblech mit einer Dicke von 6mm gemacht.

9.3.3.2 Bohren von Ankerlöcher

- Die Ankerlöcher werden mit einer entsprechenden Maschine gebohrt. Bei den Bohr- und Sprengarbeiten, nachdem die Aushubarbeiten und die Schutterung beendet sind, beginnt die Bohrmaschine die Löcher zu bohren. Bei dem maschinellen Vortrieb werden die Löcher von einem Bohrhammer, der an der Teilschnittmaschine installiert wird, gebohrt.
- Die Lage der Ankerlöcher hängt hauptsächlich von der Tragfähigkeit des Felses und den entsprechenden Arbeitsbedingungen ab. Der Abstand zwischen den Anker ist im Punkt 7 bestimmt worden.



- Die Ankerlöcher werden mit dem gleichen Durchmesser der Bohrkronen gemacht.
- Der Verschleiß der Bohrkronen soll kontrolliert werden.
- Die Bohrlöcher sollen senkrecht zu der Ankerplatte sein, weil dadurch eine maximale Tragfähigkeit des Ankers erreicht wird.
- Die bestimmte Bohrlöchlänge soll unbedingt eingehalten sein.

9.3.3.3 Verankerung

- Das Personal soll vorbereitet für die schweren Arbeitsbedingungen sein. Alle Sicherheits- und Gesundheitserfordernisse müssen eingehalten werden.
- Das Ende des Bohrlochs wird überprüft, ob es die notwendige Tragfähigkeit besitzt.
- Alle Partikel wie Staub und kleine Felsteilchen sollen entfernt werden.
- Bei der Verankerung soll die Bohrlöchlänge nochmals überprüft werden.
- Der Keil des Ankers wird ausgedehnt durch das Drehen und die Kraft wird in den Untergrund geleitet. [7]
- Die Unebenheiten unter der Ankerplatte sollen entfernt werden, um einen guten Kontakt zwischen Fels und Ankerplatte zu gewährleisten.
- Nach der Verankerung wird die Tragfähigkeit des Ankers mit Hilfe von Tensometern überprüft.
- Die fertigen Anker sollen nach 3-4 Tagen überwacht werden und wenn irgendwelche Probleme aufgetreten sind, sollen die entsprechenden Maßnahmen unternommen werden.
- Bei Rissbildung zwischen den Ankern, können zusätzliche Anker ausgeführt werden.

9.3.4 Kunstharzklebeanker

Das Bohren der Ankerlöcher ist ähnlich wie bei den Gleitkeilankern. Es gibt aber einen wesentlichen Unterschied bei der Verankerung und bei der Wirkungsweise der beiden Ankertypen.

Es wird ein Kunstharz von Lokset gewählt. Die Kunstharze von Lokset haben viele Vorteile und sind sehr geeignet zur Anwendung im Tunnelbau.



- Alle Arten von Kunstharzklebeanker können durch die Kunstharze Lokset ausgeführt werden.
- Die Kunstharze Lokset haben eine große Verbindungsgeschwindigkeit und erreichen schnell eine hohe Tragfähigkeit.
- Durch die hohe Verbindungsgeschwindigkeit des Produkts kann der Gebirgsdruck in wenigen Minuten übernommen werden.
- Die Kunstharze schützen den Stahl vor Korrosion und vor aggressiven unterirdischen Wässern.
- Sie werden nicht zusätzlich gespannt.
- Durch die Kunstharze Lokset entstehen keine Innenspannungen im Fels [11].

9.3.4.1 Ausführung der Kunstharzklebeanker mit Kunstharze Lokset

- Die gegebene Instruktion soll vor der Anwendung unbedingt ausführlich gelesen werden.
- Die Lagerung der Kunstharzpatronen soll zusammen mit dem Stahl innerhalb des Druckstollens sein, damit sie die gleiche Temperatur haben und dadurch schnell die vorgeschriebene Verbindungsgeschwindigkeit erreichen.
- Der Durchmesser der Kunstharzpatrone wird in Abhängigkeit von dem Bohrlochdurchmesser gewählt. Die angenommenen Bohrlochdurchmesser sind $D=40\text{mm}$ und $D=45\text{mm}$
- Die Länge des Bohrlochs soll ca. 2,5 cm tiefer sein.
- Die notwendige Anzahl der Kunstharzpatronen wird eingesteckt und mit rotierender Bewegung läuft der Anker durch alle Kunstharzpatronen.
- Einige Zentimeter vor dem Bohrlochende wird der Anker schell für 3-8 Sekunden gedreht, damit das Kunstharz in den Patronen gemischt wird.
- Das Drehen wird eingestellt und es wird auf das Erhärten des Kunstharzes gewartet.
- Nachdem das Kunstharz schon hart ist, soll der Anker nicht mehr gedreht werden, weil dadurch der Kunstharzklebeanker zerstört werden kann [11].

MEYCO Oruga | Overview

The MEYCO® Oruga is a mobile spraying unit for mechanising and automating the application of shotcrete. It is equipped with a MEYCO Rama 4 spraying manipulator, electro-hydraulic power source and mounted on a very robust tracked carrier vehicle. It is suitable for both wet and dry methods. The MEYCO Oruga can increase output to an extent impossible with manual spraying and safety standards for the nozzle-man are vastly improved.



1 The MEYCO Rama 4 spraying manipulator is compact yet has two extensions to allow great reach, powered by a 7.5 kW electro-hydraulic drive unit.

2 Lance extensions fitted with tough rebound protection to reduce damage and maintenance.

3 Mounted on a very agile carrier vehicle, so that it can operate in the tightest tunnels and pits.

4 Each track has its own independent hydrostatic drive enabling the vehicle to «spin around» on its axis for the greatest possible mobility!



5+6 Powerful, air-cooled, 14 kW diesel engine is used for transport.

6 The operator can sit whilst driving or operating.

7 Outriggers are fitted for the necessary stability during spraying.



8+9 Electric remote control with 15 m cable (or radio as option) controls all manipulator functions.

9 Remote control can also be integrated with MEYCO Suprema sprayed concrete machine.



10 Standard full size MEYCO spraying head for ideal spraying position and strength to enable use of dia. 65 mm or even 80 mm wet-spraying nozzle.

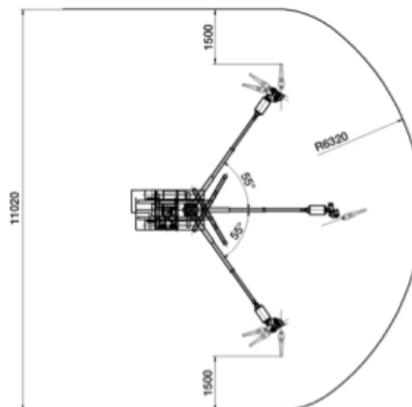
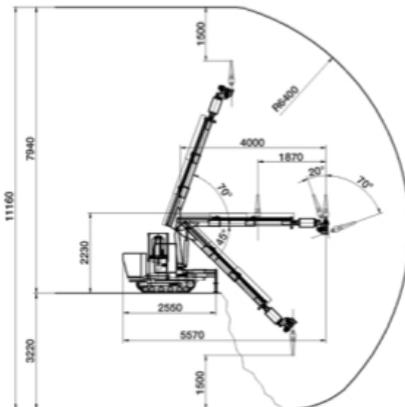
11 Nozzle mounting and anti-kink spring for spraying hose is fitted as standard.



Abb. 9-13 Spritzbetonmaschine [12]

Applications

The MEYCO Oruga can be used in virtually all types of wet or dry sprayed concrete application. Either out in the open for slope protection or in tunnelling where the profile dictates that a smaller manipulator is necessary. Wherever the tunnel advance is dangerous then a manipulator should also be used. Although compact, its strength and reach gives it a real advantage over spraying manually, both in performance and safety.



Weight	Dry		= 1670 kg
Dimensions	Length		2650 mm
	Width		1200 mm
	Outriggers, extended		2000 mm
Power/Drive	Input supply voltage		3 x 400/50 V/Hz
			7.5 kW
	Protection class		55 IP
Hydraulic	Main pump	P max.	180 bar
		Q max.	22 l/min
	Oil tank		100 l
Spraying range	Max. height (incl. 1500 mm nozzle distance)		8 m
	Max. width (incl. 1500 mm nozzle distance)		11 m
Delivery system	Pipe and hoses sizes, dependent on application		80, 65 or 50 mm
Carrier vehicle	2 caterpillar tracks, with individual hydrostatic drives and outriggers		
	Diesel engine, air-cooled		14 kW

Abb. 9-14 Spritzbetonmaschine [12]

Atlas Copco Bolting rigs

Boltec LC

Technical specification



A fully mechanized rock bolting rig with RCS based control system for high productivity and precision. For bolt lengths 1.5–6 m and effective in roof heights up to 12 m.

Standard features

» Control system

- Rig Control System (RCS)
- Interactive operator control panel with full-colour display
- Auto-collaring and anti-jamming protection
- Improved regulation of the rock drill
- Integrated diagnostic and fault location system
- Proportionell movements of the hydraulic components
- USB for transfer of data and for service engineers to store optimal drill settings

» Bolting unit

- MBU bolting unit
- Unique design based on a single feed system which utilizes a cradle indexer at the rear end and a centralizer at the top with 3 positions – drilling, injecting and bolting
- The magazine for 10 bolts is low mounted and designed for maximum flexibility during drilling and bolting operations

» Rock drill

- COP 1132 with hydraulic dual-damping system
- 11 kW impact power

» Hydraulic boom

- BUT 35HBE heavy-duty booms for direct, fast and accurate positioning between holes.
- Improved linkage bearings in main boom joints and new axial bearings in all boom joints reducing maintenance requirements.

» Carrier

- Sturdy, articulated carrier with turbocharged water-cooled, low emission diesel engine.
- High ground clearance, four wheel traction and articulated steering for easy manoeuvring in narrow drifts and fast tramming in steep ramps.

» General

- Basic rig includes telescopic FOPS-approved protective roof, fixed seat, hydraulic driven compressor and water booster pump, cable reel, bolt rack, air receiver and working lights.



Abb. 9-15 Bohrlochmaschine [10]

Specifications

» Rock drill/drill system

- COP 1132
- Shank adapterR25, R28, R32
- Height over drill centre 77 mm
- Length without shank adapter 735 mm
- Impact power, max 11 kW
- Impact rate 100 Hz
- Hydraulic pressure, max 210 bar
- Rotation system separate rotation
- Rotation speed 0–300 rpm
- Rotation torque, max 225 Nm
- Lub. air consump. (at 3 bar) 6 l/s
- Water consumption 1.25 l/s
- Weight 75 kg
- Sound level <106dB(A)
- Rock drill lubrication warning kit
- Rock drill lubrication surveillance system
- Hole blowing kit

» Bolting unit

- Mechanical Bolt Unit, MBU
- Magazine capacity 10 bolts
- Max. size of face plates, rectangular 150x150 mm
- Max. size of face plates, round Ø 200 mm
- Bolt length 1.5–6.0 m
- Adapted for all commonly used bolt types on the market, see options
- Drill steel and coupling according to MBU, delivered with rig
- Chain feed adapted according to bolt length

» Boom

- BUT 35HBE
- Feed extension 0–1 000 mm
- Boom extension 1 600 mm
- Feed roll-over 360°
- Max. lifting angle +65°/-30°
- Max. swinging angle ±45°
- Weight, boom only 2 870 kg

» Electrical system

- Total installed power 63 kW (auto cement, 83 kW)
- Main electrical motor 1x55 kW (auto cement, 1x75 kW)
- Voltage (as per customer specification) 400–1 000 V
- Frequency (as per customer specification) 50–60 Hz
- Starting method - star/delta (400–700 V), direct start 1 000 V
- Electronic overload protection for electric motors
- Digital voltage and current meter in electrical cabinet
- Phase sequence indicator
- Earth fault indicator
- Battery charger
- Transformer 8 kVA
- Working lights, halogen 2x1 000 W, 230 V
- Working lights for CSA 4x500 W, 110 V
- Cable reel, diameter 1 600 mm
- Rain cap(s) for main electrical motor(s)
- Limit switch for cable reel with signal lamp and brake connection
- Earth connectors (EMC grounding straps)

» Carrier

- Deutz TCD 2013 L04 2V, Tier 3/Stage III A (EPA III/COM III) approved, water-cooled, turbo-charged diesel engine
- Power rating at 2 300 rpm 120 kW (173 hp)
- Torque at 1 600 rpm 618 Nm
- Exhaust catalyser
- Exhaust silencer
- FOPS approved protective roof
- Fixed seat for tramping, incl. safety belt
- Articulated steering with ±38 degree steering angle
- Four wheel drive
- Hydrostatic power steering system
- Hydrodynamic Dana/Clark 24000 transmission
- Dana/Hurth 114 front axle
- Dana/Hurth 114 rear axle with ± 8 degree oscillation
- Automatic differential lock on front axle, limited slip
- Tyres front and rear, 14.00 R24
- Hydraulic jacks (2 extendable at front and 2 at rear)
- Large plates for boom frame hydraulic jacks
- Service brakes: two separate circuits, hydraulically applied, fully enclosed wet disc brakes
- Emergency and parking brakes: SAHR (Spring Applied Hydraulic Released)
- Control panel for roof, jacks and cable reel
- Fuel tank, volume 112 l
- Electric system 24 V
- Batteries 2x125 Ah
- Tramping lights 8x70 W, 24 V DC
- Spotlight 1x70 W, 24 V
- Diod illumination, stairs for platform
- Spirit levels, one for longitudinal and one for sideways
- Central lubrication system
- Fire extinguisher
- Gradeability at max load on drive wheels 1:4
- Beacon warning lamp and reverse alarm
- Break light
- Warning horn
- Boltrack
- Shelf for drill bits and tools
- Manual lubrication kit
- Dual controls for cable/water hose reel (if included)
- Bolt/rod holder

» Air system

- Atlas Copco GAR 5 screw compressor
- Capacity, max 20 l/s at 7 bar and 5 400 rpm
- Air receiver 50 l
- Hydraulic drive, axial piston motor 10 cc
- Adjustable speed
- Air pressure gauge
- Hole blowing kit

» Water system

- Water booster pump, CR5-13
- Max capacity at 7 bar 80 l/min
- Min water inlet pressure 2 bar
- Hydraulic drive, axial piston motor 5 cc
- Water pressure gauge
- Water flow guard, flushing water
- Water pressure switch
- Rig washing kit

Abb. 9-16 Bohrlochmaschine - Charakteristiken [10]

Specifications

» Control system

- Rig Control System (RCS), versatile and upgradeable to a higher degree of automation
- Ergonomic operator panel with colour display
- All needed information and settings can be viewed on display i.e. pressure gauges, logging hole depth etc.
- PC-card for transfer of data and for storage of optimal drill settings
- Integrated diagnostic system
- Exposed components are designed and tested acc. to IP 65 standard

» Hydraulic system

- Hydraulic pump unit consisting of two variable pumps for percussion and positioning, and two constant flow pumps for rotation and compressor
- Pumps unloaded at start
- System pressure 150–240 bar
- Hydraulic oil tank, volume max 250 l, min 200 l
- Low oil level indicator and shut down
- Oil temperature gauge on oil tank, electronically supervised
- Filtration, 16 µm absolute
- Oil filter indicator
- Water cooled, stainless steel oil cooler
- Mineral hydraulic oil
- Electrical oil filling pump
- Hydraulic oil thermostat

Optional Equipment

» Rock drill/drill system

- Water mist flushing, external air
- Water mist flushing with internal water and air supply (incl. extra hydraulic driven fan for oil cooling or water-oil cooling)

» Boom

- Automatic boom lubrication system, rear part
- Manual boom lubrication kit

» Bolting unit

- Swellex, Mn 12, Mn 16, Mn 24
- Split-Set, SS33, SS39, SS46
- Mechanical anchor bolts, CT, Kiruna, including boltrotator
- Split Wedge
- Rebar - manual resin / cement cartridge, including boltrotator
- Rebar - resin cartridge injection system, automatic, including boltrotator
- Rebar - cement injection system, automatic
- Hose injection system for resin cartridges
- Dual bolt lengths
- Dual bolt types
- Extension drilling kit

» Air/water system

- Water hose reel
- Water hose
- Dual controls for hose reel
- Booster pump CR16-80 at cement use

» Hydraulic system

- Heater kit
- Smart oil leakage shut down system
- Biogradable oil

» Automation

- Rig remote access
- Bolt quality log (BQL)
- Bolt angle indication
- Bolt plan navigation

» Protective roof

- Rig height roof up 3 070 mm, roof down 2 570 mm

» Cabin

- Cabin, FOPS approved with sound level <80 dB(A) including
 - Fixed seat
 - CD player
 - Air condition
 - Front window 16 mm
 - Rear windshield wiper
 - Joystick controlled spot light, 70 W (left side)
 - 12 V outlet for communication radio
 - Boot washing kit
- Heating function for air conditioning (water transferred, 2 kW)
- Swingable operator seat
- Additional operator's control panel
- Alternative mounting height: 140 mm (rig height 2 900 mm) or increased 250 mm (rig height 3 410 mm)
- FOPS approved grizzly bar for front window
- Cabin body made of stainless steel
- Electrical joystick steered spotlights, 1x75 W
- Cabin lift/tilt, 375 mm/15 degrees
- Reversing camera with monitor

» Carrier

- Fire suppression system
 - Manual release
 - Automatic (Checkfire)
 - Full Automatic
- Particle filter UNIKAT
- Brake lights
- Deutz TCD 2013 L6 2V, 173 kW (238 hp)

» Electrical system

- Soft start for electrical motors, for 400–700 V (not for CSA approved rigs)
- 1 000 V electric system, direct start only

- Electric cable, see recommendations
- Dual controls for cable reel
- Electric plugs 400–660 V, max 250 or 420 A
- Electric plugs and socket
- Plug and switch gear
- Connector
- Electric outlet for accessories, 16 Amp (Voltage = main supply voltage if no extra transformer is chosen. Not for 1 000 V)
- Extra transformer 15 kVA
- CSA approved electrics (Canadian regulations)
- UL approved electrics (US standard)
- Australian electrics according to AUS 3 000
- Metal halogen working lights 2x400 W

» Miscellaneous

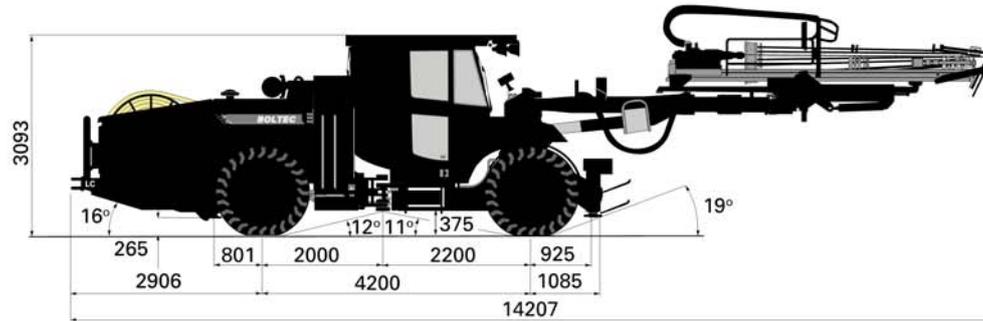
- Service platform HL 256
- FOPS approved protective roof for HL 256
- Water and air outlet in service platform basket
- Screen handling arm
- Hose and/or cable guide at water/cable reel
- Remote operating kit
- Ni-Cr plated piston rods
- Service tool box for electronic system

Abb. 9-17 Bohrlochmaschine - Charakteristiken [10]

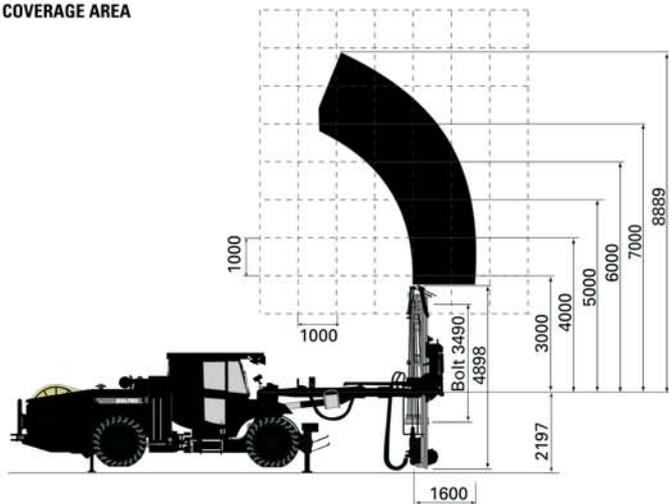
Boltec LC

Measurements

LENGTH / HEIGHT



COVERAGE AREA



RECOMMENDED CABLE SIZE AND LENGTH

Voltage	Type	Dimension	Diameter	Length
400 V	H07RN-F	4G50 mm ²	49 mm	150 m
400 V	Buflex	3x70+3G16 mm ²	42 mm	200 m
440 V	H07RN-F	4G50 mm ²	44 mm	150 m
440 V	Buflex	3x70+3G16 mm ²	37 mm	200 m
460-500 V	H07RN-F	4G35 mm ²	44 mm	200 m
460-500 V	Buflex	3x50+3G16 mm ²	37 mm	200 m
500-550 V	H07RN-F	4G35 mm ²	44 mm	200 m
500-550 V	Buflex	3x50+3G16 mm ²	37 mm	200 m
660-700 V	H07RN-F	4G35 mm ²	38 mm	200 m
660-700 V	Buflex	3x35+3G10 mm ²	32 mm	200 m
1 000 V	Buflex	3x35+3G10 mm ²	28 mm	200 m

G = Protection yellow/green
Valid for ambient temperature below 30°C

DIMENSIONS

mm	Width, without bolt rack	2 501
Height, standard	3 093	
Length tramping MBU34.3	14 207	
Ground clearance	375	
Turning radius, outer	7 500	
Turning radius, inner	4 750	

WEIGHT

gross weight		
kg	Total	26 000
	Boom side	19 500
	Engine side	6 500

TRAMMING SPEED

km/h	On flat ground (rolling resistance 0.05)	> 15
	On incline 1:8	> 5

© Copyright 2009, Atlas Copco Rock Drills AB, Umeå, Sweden. All product names in this publication are trademarks of Atlas Copco. Any unauthorised use or copying of the contents or any part thereof is prohibited. This applies in particular to trademarks, model designations, part numbers and drawings. Illustrations and photos in this brochure may show equipment with optional extras. Specifications and equipment subjects to change without notice. Consult your Atlas Copco Customer Center for specific information.

9851 2201 01f 01/2010



Abb. 9-18 Bohrlochmaschine - Abmessungen [10]

9.4 Auskleidungsarbeiten

Die Auskleidungsarbeiten des Druckstollens bestehen von drei verschiedenen Elementen:

- Schalungsarbeiten
- Bewehrungsarbeiten
- Betonierung

9.4.1 Schalungsarbeiten

Die Schalung dient grundsätzlich für die Formgebung des Betons. Im Tunnelbau werden meistens komplizierte Konstruktionen von gewölbten Elementen benutzt. Für den entsprechenden Druckstollen wird eine Schalhaut aus Stahl gewählt. Die Stahlschalung erlaubt eine glatte Ausführung der Auskleidung, wodurch die Rauheit des Druckstollens bzw. die hydraulischen Verluste vermindert werden. Der gleiche Durchmesser des Querschnitts ist eine Voraussetzung für die mehrmalige Verwendung von einer Schalkonstruktion, die schell ab- und eingebaut werden kann. Eine wichtige Rolle für den schnellen Vortrieb spielt die gute Koordination der Schalung – und Betonierungsprozessen.

Schalungen für Druckstollen werden von vielen Firmen hergestellt. Heutzutage wird die Schalhaut oft aus Aluminium gemacht, wodurch das Gewicht vermindert wird und das Transportieren der Konstruktion erleichtert wird.

Für eine maximale Leistungsfähigkeit der Schalungsarbeiten soll die Herstellerfirma das Fachpersonal für die Installation der Konstruktion gewährleisten.

9.4.2 Bewehrungsarbeiten

Die Bewehrung der Auskleidung ist notwendig, weil Aufgrund des Innendrucks große Zugspannungen entstehen. Die Bemessung zeigt, dass die notwendige Dicke für eine Betonauskleidung zu groß ist und deshalb wird eine gerissene Stahlbetonkonstruktion gewählt.

Für die Bewehrung wird Stahl AIII mit Durchmesser von 8 bis 25 mm benutzt, wobei für jeden Abschnitt die entsprechende Zug- und Druckbewehrung berechnet werden und sie wird im Punkt 8.9. dargestellt.



Die Stahlstäbe für die Zug- und Druckbewehrung sollen für den kreisförmigen Querschnitt entsprechend geschnitten und gebogen werden. Das Einhalten des erforderlichen Abstands zur Schalung bzw. die Betonüberdeckungshöhe von 5 cm wird durch Abstandhalter aus Beton oder Kunststoff gewährleistet [8]. Wegen der kleinen Länge der Stahlstäbe bei der Herstellung sollen sie miteinander geschweißt werden.

Die konstruktive Bewehrung 2x 5 N 10/20 ist ca. 15% der Zug- und Druckbewehrung und wird zwischen den beiden verteilt. Die Stahlstäbe sollen mit der tragenden Bewehrung geschweißt werden.

Für die Querkräfte sind Bügel $\Phi 8/25$ cm gewählt worden.

Die Bewehrungsarbeiten sind sehr aufwändig und dauerhaft. Sie sollen von spezialisiertem Fachpersonal verlegt werden, wobei eine Koordinierung von Schal- und Betonierpersonal einerseits und den Bewehrern andererseits wichtig ist, um einen reibungsfreien Bauablauf zu gewährleisten [8].

9.4.3 Betonierung

Die Mengen für die Betonierung sind relativ groß, deshalb wird eine kleine Betonanlage in der Baugrube des Einlaufbereichs vorausgesehen, die am Ende der Bauzeit abgebaut werden kann.

Die Betonierung wird durch eine Betonpumpe gemacht, wobei die Betonmischung durch verschiedene Zusatzmittel für Transportieren geeignet sein soll.

Die Rohrleitung für die Betonierung ist mit Durchmesser von $D=160$ mm vorgesehen und gewährleistet eine ungehinderte Bewegung der Betonmischung.

Das Verdichten des eingebrachten Betons erfolgt mit Tauch- und Schalungsrüttlern.

Für die Tauchrüttler ist das Einhalten eines regelmäßigen Abstands der Eintauchstellen wichtig, um eine lückenlose Verdichtung zu erreichen. Der Wirkungskreisdurchmesser ist etwa der 10- fache Durchmesser der Rüttelfläche. Beim langen Rütteln durch Tauchrüttler entsteht eine Entmischungsgefahr.

Die Schalungsrüttler werden außen an der Schalungskonstruktion befestigt, wobei sie die Schalung und somit den drin liegenden Beton in Schwingung versetzen und dadurch die Verdichtung gewährleisten.



Die Betonierung wird von unten nach oben geführt und die Arbeitsfugen sind zu vermeidene.

Die Betonierung der Firste ist immer problematisch deswegen sollen spezielle Maßnahmen für die Verdichtung dieses Bereiches getroffen werden.

Der Beton soll allen vorgeschriebenen Parametern entsprechen.

Während des Ausbruchs des Druckstollens sollen unbedingt die vorgeschriebenen Sicherheits- und Gesundheitsmaßnahmen eingehaltet werden.



10 Umweltschutzmaßnahmen

Das vorausgesehene Projekt enthält folgende Grundanlagen:

- Wasserentnahme
- Druckstollen
- Wasserschloss
- Druckrohrleitung
- WKW „Sarnitsa“

Als ein wichtiger Bestandteil der Kaskade „Gorna Arda“ soll der Triebwasserweg die Ausnützung des Flusses Arda für Energieversorgung erhöhen.

Aufgrund der Arbeitsbedingungen der Anlagen sollen zwei verschiedene Perioden der Auswirkungen auf die Umwelt untersucht werden:

- Bauzeit
- Betriebszeit

Umweltauswirkungen sind größer während der Bauzeit, deshalb soll viel mehr Aufmerksamkeit auf die Umweltschutzmassnahmen während dieser Periode gelegt werden.

10.1 Bauzeit

Einige mögliche Schutzpunkten, worauf die Auswirkung des Triebwasserwegs auf die Umwelt beobachtet werden kann sind:

- Luft
- Wasser
- Flora und Fauna
- Abfall

10.1.1 Auswirkung auf die Luft

Während der Bauzeit entsteht die größte Staubbildung, wodurch unregelmäßig Staub in die Atmosphäre emittiert wird. Gegen diese große Staubbildung sollen spezielle Maßnahmen wie Umluftsysteme, drückende oder saugende Bewetterung vorausgesehen werden.

Das Bestauben der zeitweiligen Wege kann erfolgreich in trockenen Tagen und bei intensiver Arbeit durch Gießen bekämpft werden.



Auf der Baustelle gibt es Bedingungen für Luftverschmutzung mit Abgasen auf Grund der Dieselaggregate und der Transportgeräte. Um die schädlichen Emissionen zu verringern, sollen nur neuwertige Transportgeräte benutzen werden, die den Normen für die erlaubten Emissionen entsprechen. Die Arbeit im Leerlauf soll möglichst vermieden und reduziert werden.

Die Sprengstoffe können auch schädliche Gase freisetzen. Um die negative Wirkung dieser Gase zu vermeiden, soll das Umluftsystem die Abgasen ableiten. Die abgeleiteten an der Oberfläche Gase sollen wegen ihrer niedrigen Konzentration im Freien keine wesentliche Auswirkung haben.

10.1.2 Auswirkung auf das Wasser

Die Hauptwasserverschmutzung während der Bauzeit entsteht infolge des erhöhten Gehalts von unaufgelösten Felsteilchen. Sie sind Resultat von:

- Bohr- und Sprengarbeiten
- Gießen der zeitweiligen Wegen
- Waschen der Felsoberfläche bei der Verankerungsarbeiten
- Waschen der Transportgeräte

Eine sehr große Verschmutzungsquelle können auch die Brenn- und Schmierstoffe der Transportgeräte sein, deshalb muss täglich technische Kontrolle über ihre Funktionsfähigkeit ausgeübt werden. Demgemäß sollen Gruben für Schmierstoffauffang eingerichtet werden und Reparaturstellen vorgesehen werden.

Während der Bauzeit sollen unbedingt Qualitätsuntersuchungen der unter- und oberirdischen Gewässer ausgeführt werden.

Der Abbau des Druckstollens schafft eine Öffnung, die eine Voraussetzung für Drainage des Grundwassers ist. Das kann dazu führen, dass der Grundwasserspiegel drastisch sinkt, was eine sehr starke Auswirkung auf die Umwelt haben kann.

Beim Sprengen treten Gase aus, die ins Grundgewässer einringen können. Notwendig sind Proben zur Ermittlung der Giftgasmengen im Wasser.

Ein Notfallplan bei einer Wasserverschmutzung oder bei einer Betriebsstörung des WKWs soll vorhanden sein.



10.1.3 **Auswirkung auf die Flora und die Fauna**

Bei der Errichtung der Baustelle und des Entnahmebauwerks wird eine Beseitigung der Vegetation erfolgt. Die Hauptbaustelle befindet sich im Stausee, deshalb wird keine zusätzliche negative Auswirkung erwartet, weil sie später eingestaut werden wird.

Die große Auswirkung des Triebwasserwegs auf die Flora wird von den zusätzlichen Flächen für das Deponieren des Aushubs geübt. Der Aushub soll im Stausee deponiert werden oder auf Flächen, die nicht bepflanzt sind.

Eine negative Auswirkung kann auch das Absinken des Grundwasserspiegels ausüben, was zur Reduktion der Vegetation führen kann.

Die Auswirkung auf die Tierwelt ist eng mit der Auswirkung auf die Fauna verbunden. Eine relativ lange Bauzeit erlaubt den Tieren umzusiedeln und sich den neuen Lebensbedingungen anzupassen, ohne dass das sich auf ihre Lebensqualität und Nahrungsgewohnlichkeiten auswirkt.

10.1.4 **Abfall**

Auf der Baustelle entsteht, außer den Bauabfällen von Bohrarbeiten, Sprengarbeiten, Schalungsarbeiten, Bewehrungsarbeiten und Betonieren, auch viel Restmüll.

Der Restmüll muss sowohl während der Bauzeit, als auch während der Betriebszeit in Abfallbehältern mit vorausbestimmten Stellen gesammelt und danach zu den entsprechenden Deponien entsorgt werden.

Überflüssige und unbrauchbare Bauabfälle sowie die Felsmasse sollen auch zu entsprechenden Deponien für Bauabfälle entsorgt werden.

Die Brenn- und Schmierstoffe sollen in speziellen Behälter gesammelt und gelagert werden, damit keine Gefahr von Boden- oder Wasserverschmutzungen entsteht.

Die gefährlichen Sprengstoffe sollen nach spezifischer technischer Vorschrift auf speziellen und abgesicherten Stellen gelagert werden.



10.2 Betriebszeit

Während der Betriebszeit ist die Auswirkung auf die Umwelt auf das Minimum reduziert, deshalb werden keine zusätzlichen Schutzmassnahmen vorausgesehen.

Während der Betriebsperiode muss ein Plan für den Falle einer Wasserkraftwerkstörung und ein Reaktionsplan ausgearbeitet werden.

Schlussfolgerung:

Die Entwicklung des technischen Projekts für Druckstollen des WKWs „Sarnitsa“ übt während der Bau- und Betriebszeit keinen wesentlichen Einfluss auf die Umwelt aus. Nach der Errichtung des Triebwasserwegs ist eine vollständige Wiederherstellung der von dem Abbau betroffenen Regionen und keine negativen Folgen auf die Umwelt zu erwarten.



Literatur

1. **„Hydraulik“-2003 UABG** – unter der Redaktion von Univ.Prof. Dipl.-Ing. Emil marinov
2. **„Tunnel im Wasserbau“** – 1989 UABG - Univ.Prof. Dipl.-Ing. Ljubomir Georgiev
3. **„Unterirdische Wasserkraftanlagen“** – 1990 UABG - Univ.Prof. Dipl.-Ing. Ljubomir Georgiev
4. **„Handbuch für Kursprojektierung von Wasserkraftanlagen“**- 1991 UABG – Univ.Prof. Dipl.-Ing. Tsano Tsolovski, Univ.Prof. Dipl.-Ing. Rossitsa Nikolaeva
5. **„Organisation und Verwaltung im Bewässerungs- und Wasserbau – Teil 1 “** – UABG-1999 – Univ.Prof. Dipl.-Ing. Alexander Jantschulev
6. **„Bauverfahren im Tunnel- und Hohlraumbau“** –TU-Wien 2005/06
O.Univ. Prof. Dipl. – Ing. Dr.techn. Hans Georg JODL
7. **„Bauverfahren im Tiefbau“** – TU- Wien 2008
O.Univ. Prof. Dipl. – Ing. Dr.techn. Hans Georg JODL
8. **„Bauverfahrenstechnik“- Teil 5- Tunnelbau-** TU- Wien 2007
O.Univ. Prof. Dipl. – Ing. Dr.techn. Hans Georg JODL
9. **„Wasserkraftanlagen- Planung, Bau und Betrieb“** – J. Giesecke , E. Mosonyi
1997
10. www.atlascopco.com
11. www.minovaamericas.com
12. www.meyco.basf.com