

Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/
Masterarbeit ist in der Hauptbibliothek der Tech-
nischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.

<http://www.ub.tuwien.ac.at>



The approved original version of this diploma or
master thesis is available at the main library of the
Vienna University of Technology.

<http://www.ub.tuwien.ac.at/eng>

DIPLOMARBEIT Master Thesis

TECHNISCHE PLANUNG DER DRUCKROHRLEITUNG VOM WASSERKRAFTWERK „SARNITSA“

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs/ einer Diplom-Ingenieurin

unter der Leitung von

**Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.
Peter TSCHERNUTTER**

E222

Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Gergana KOSTADINOVA

0728512

Treti mart Str. 5, Smolyan 4700, Bulgarien

Wien, am 26.10.2011

eigenhändige Unterschrift:

INHALTSVERZEICHNIS

| | | |
|-----------|---|----|
| 1. | Allgemeiner Teil | |
| 1.1. | Einführung | 2 |
| 1.2. | Charakterisierung und Standort der Anlage | 2 |
| 1.2.1. | Beschreibung der Grundeinrichtungen des Wasserkraftsystems Sarnitsa | 2 |
| 1.3. | Ingenieur - geologische Gegebenheiten des Gegebietes | 5 |
| 1.4. | Trassierung der Druckrohrleitung | 6 |
| 2. | Vorläufige Berechnungen | |
| 2.1. | Bemessung des Rohrleitungsquerschnitts | 8 |
| 2.2. | Ermittlung der Druckhöhe | 9 |
| 2.2.1. | Ermittlung der maximalen und minimalen Werten der Brutto- und Nettofallhöhe | 9 |
| 2.2.2. | Ermittlung der Bemessungsfallhöhe | 9 |
| 2.3. | Bemessung des Turbinenkammereinlaufs | 9 |
| 3. | Hydraulische Berechnungen zum stationären Betriebszustand | |
| 3.1. | Ermittlung der Komponenten der Gesamtverluste im Triebwasserweg | 13 |
| 3.2. | Ermittlung der Gesamtverluste im Triebwasserweg | 18 |
| 3.3. | Ermittlung der tatsächlichen Werte der Nettofallhöhe und der Bemessungsfallhöhe | 19 |
| 4. | Auswahl von Ausrüstungen für WKW Sarnitsa | |
| 4.1. | Auswahl der Turbine | 21 |
| 4.2. | Auswahl des Generators | 26 |
| 5. | Untersuchung der instationären Betriebszustände von WKW Sarnitsa | |
| 5.1. | Allgemeine Erklärungen | 29 |
| 5.2. | Grundparameter des hydraulischen Druckstoßes in der DRL | 30 |
| 5.2.1. | Geometrie des Mediums | 30 |
| 5.2.2. | Ausbreitungsgeschwindigkeit der Druckwelle | 30 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| 5.2.3. | Massenträgheitskonstante des Generators | 32 |
| 5.2.4. | Schließzeit des Leitapparates | 32 |
| 5.2.5. | Phase des hydraulischen Druckstoßes | 32 |
| 5.2.6. | Turbinenbeiwert | 33 |
| 5.3. | Numerische Modellierung vom hydraulischen Druckstoß in der DRL | 33 |
| 5.3.1. | Ermittlung der maximalen Druckerhöhung bei Laständerung von 100% auf 0% | 34 |
| 5.3.2. | Ermittlung der maximalen Druckminderung bei Laständerung von 100% auf 0% | 36 |
| 6. | Auswahl und Bemessung der Unterstützungsstruktur | |
| 6.1. | Methodik für die Auswahl und Bemessung von Unterstützungsstruktur | 39 |
| 6.1.1. | Bestimmung des Bergdrucks | 39 |
| 6.1.2. | Auswahl von Konstruktionstypen | 40 |
| 6.1.3. | Bemessungsprinzipien | 41 |
| 6.2. | Bemessung der Konstruktionen in Streckenabschnitten | 41 |
| 6.2.1. | Bemessung von 1. und 5. Abschnitt | 43 |
| 6.2.2. | Bemessung von 2. Abschnitt | 49 |
| 6.2.3. | Bemessung von 3. Abschnitt | 51 |
| 6.2.4. | Bemessung von 4. Abschnitt | 55 |
| 6.2.5. | Bemessung von 6. Abschnitt | 57 |
| 7. | Auswahl und Bemessung von der Auskleidung der unterirdischen Druckrohrleitung | |
| 7.1. | Statische Bemessung der Panzerung | 60 |
| 7.2. | Basisdaten und Parameter von untersuchten Abschnitten | 60 |
| 7.3. | Statische Überprüfung von Füllbeton | 63 |
| 7.4. | Statische Überprüfung der Panzerung | 84 |
| 7.4.1. | Tragfähigkeitsüberprüfung auf Innenwasserdruck p_i | 84 |
| 7.4.2. | Tragfähigkeitsüberprüfung auf Grundwasserdruck p_g | 86 |
| 7.4.3. | Tragfähigkeitsüberprüfung auf axiale Kräfte | 87 |
| 7.4.4. | Überprüfung nach der ersten Gruppe von Grenzzuständen | 89 |
| 7.4.5. | Überprüfung gegen Einbeulen | 89 |
| 7.4.6. | Ermittlung der Panzerungsstärke bei der Verengung und bei der Verzweigung der DRL | 94 |
| 8. | Bauverfahrenstechnik für den Bau der unterirdischen Druckrohrleitung | |
| 8.1. | Abbauarbeiten | 97 |
| 8.1.1. | Abbautechnik | 97 |
| 8.1.2. | Abfuhrtechnik | 101 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 8.2. | Einbautechnologie von Ankern mit mechanischer Verankerung | 104 |
| 8.3. | Einbautechnologie vom Stahl-Rahmenwerk und Verstärkung vom Fels durch Grouting | 109 |
| 8.4. | Einbautechnologie von Spritzbeton | 111 |
| 8.5. | Auskleidungsarbeiten | 113 |
| 8.5.1. | Montage der Rohrleitungssektionen | 114 |
| 8.5.2. | Betonarbeiten | 116 |
| 8.6. | Abdichtungsarbeiten | 117 |
| 8.6.1. | Verdichtungsinjektion | 117 |
| 8.6.2. | Packer – Injektion | 118 |
| 8.6.3. | Korrosionsschutz | 120 |
| 9. | Umweltschutzmaßnahmen | |
| 9.1. | Bewertung der Umwelt vom Arda Tal | 122 |
| 9.2. | Umweltschutzmaßnahmen | 122 |
| 9.2.1. | Bauwege | 123 |
| 9.2.2. | Aushubarbeiten | 124 |
| 9.2.3. | Einsatz von Baumaschinen und Verkehr | 124 |
| 9.2.4. | Abfall | 124 |
| 9.2.5. | Deponie | 124 |
| 9.2.6. | Gewässerschutz | 126 |
| 9.2.7. | Gefährliche Stoffe | 126 |
| 9.2.8. | Lärmverschmutzung | 126 |
| 9.2.9. | Auswirkungen auf die Flora und die Fauna in der Anlagenumgebung | 126 |
| 10. | Anhang | |
| 10.1. | Ergebnisse von der Untersuchung der maximalen Erhöhung der Druckhöhe mit HIUD Programm | 128 |
| 10.2. | Ergebnisse von der Untersuchung der maximalen Minderung der Druckhöhe mit HIUD Programm | 131 |
| 10.3. | Betriebsmuschelkurve der PO115 Turbine | 134 |
| | Quellenangabe | 135 |

1. Allgemeiner Teil

1.1. Einführung

1.2. Charakterisierung und Standort der Anlage

1.2.1. Beschreibung der Grundeinrichtungen des Wasserkraftsystems Sarnitsa

1.3. Ingenieur - geologische Gegebenheiten des Gebietes

1.4. Trassierung der Druckrohrleitung

1.1. Einführung

[14] “Studien zur Nutzung von Wasserkraftpotenzial des Arda Flusses sind mehrfach entwickelt worden. Zum ersten Mal wurde eine allgemeine schematische Entscheidung im Jahr 1951 gemacht. Dementsprechend wird geschätzt, dass der Fluss Arda eines der besten energieökonomischen Potentiale des Landes besitzt. Eine Reihe von günstigen Faktoren sind evaluiert worden. Die wichtigsten davon sind wie folgt:

- Deutliche Abflüsse;
- Günstige geologische und topographische Bedingungen;
- Gelegenheit zum Ausbau von Retentionsvolumen, ohne potenzielle Überschwemmung von wertvollem Ackerland und großer Städte;
- Kein Vorhandensein anderer Wasserverbraucher, was die Verwendung von Wasser nur für den Energiebedarf ermöglicht;
- Die Hochwasserperiode vom Arda Fluss ist in den Wintermonaten, was zeitgleich mit dem steigenden Verbrauch von Strom übereinstimmt. Die daraus resultierende wirtschaftliche Auswirkung ist eine Verringerung des erforderlichen Ausgleichsvolumens.

Eine Zusammenfassung der Energieeffizienz zeigt, dass die zur Zeit installierte Gesamtleistung am Unterlauf des Arda Flusses 272,5 MW beträgt. Dabei beträgt die gesamte jährliche Stromproduktion 610 Mio.kWh. Um das ungenutzte Wasserkraftpotenzial am Oberlauf des Flusses zu verbrauchen, wurde der Aufbau der Gorna Arda Kaskade geplant.”

1.2. Charakterisierung und Standort der Anlagen

[14] “Die Gorna Arda Kaskade liegt innerhalb der westlichen Rhodopen und befindet sich in den administrativen Bereichen von Kardzhali und Smoljan. Die Kaskade ist für die Zwecke der Nutzung vom ungenutzten Wasserkraftpotenzial am Oberlauf des Flusses zwischen dem Srednogortsi Dorf und Kardzhali Speicher vorgesehen. Der Flussabschnitt von der Quelle des Arda bis zu dem bestehenden Kardjali Speicher hat eine Länge von 101 km, was 42% der Gesamtlänge des Flusses darstellt. Das Einzugsgebiet des Abschnittes beträgt 1438 km², was etwa 28% der Fläche des gesamten Einzugsgebietes des Flusses darstellt.

Auf Grund von technischen, energetischen und wirtschaftlichen Studien von möglichen Lösungen wurde angenommen, dass die Kaskade in drei Stufen ausgebaut sein könnte.

- Wasserkraftsystem Madan, welches aus einem Steinschüttdamm mit Betonoberflächendichtung (CFRD Typ) und Bjal Iyvor Wasserkraftwerk besteht;
- Wasserkraftsystem Ardino, welches aus einem Steinschüttdamm mit Betonoberflächendichtung (CFRD Typ) und Ardino Wasserkraftwerk besteht;
- Wasserkraftsystem Sarnitsa, welches aus einer Walzbetonmauer und dem Sarnitsa Wasserkraftwerk besteht.”



Abb. 1. Das Einzugsgebiet des Flusses Arda

1.2.1. Beschreibung der Grundeinrichtungen des Wasserkraftsystems Sarnitsa

- [14] “**Der Sarnitsa Speicher** ist das dritte Ausgleichsvolumen von Gorna Arda Kaskade. Das Einzugsgebiet des Speichers ist 1426km² groß, wodurch sich ein Jahresdurchschnittsabfluss von 818 Mio.m³ ergibt. Das Speichervolumen wird auf 92,30 Mio.m³ bei Wasserspiegelhöhe von 425m geschätzt. Eine Walzbetongewichtsmauer mit einer Höhe von 97,40m ist vorgesehen. Ihre Kronenlänge sollte ca.32m betragen.”

Die Wasserstandhöhen sind wie folgt:

| Charakteristische Wasserstandhöhen | |
|------------------------------------|------|
| Stauziel | 425m |
| Überstau | 427m |
| Absenkziel | 388m |
| UWS | 325m |

- **Das Entnahmebauwerk** soll einen widerstandsfreien Wassereinzug vom Speicher zum Triebwasserweg gewährleisten. Es ist ein freistehendes Einlaufbauwerk am rechten Ufer des Stausees vorgesehen, welches etwa 30m von der Mauer entfernt ist. Für Betriebs- und Überwachungszwecke sind zwei Fallschütze anzuordnen. Um die Turbine vor Treibgut zu schützen, ist der Einlauf mit einem Rechen zu versehen.
- **Der Triebwasserweg**, welcher auf die Ausbauwassermenge bemessen wird, bringt das Wasser vom Entnahmebauwerk bis zu der Turbinenausrüstung des WKWs.

Komponenten des Triebwasserwegs

- Druckstollen D = 6,10m L = 1019,81m
- Wasserschloss D = 22,5m
- Druckrohrleitung D = 4,80m L = 207,33m

Bemerkung: Die ersten zwei Komponenten sind Gegenstand der parallel erarbeiteten Diplomarbeit.

Die Ausbauwassermenge ist $Q_{\text{Ausbau}} = 72 \text{ m}^3 / \text{s}$. – (nach Aufgabestellung)

- **Die Druckrohrleitung** ist in drei typische Bereiche getrennt:

Portalabschnitt

Der Portalabschnitt ist unmittelbar vor dem Wasserkraftwerk gelegen. Die Form und die geometrischen Abmessungen des Portalquerschnitts sind von der geeigneten Bautechnologie für die Druckrohrleitung bestimmt. Die gewählte technische Lösung bietet die notwendige Querschnittsbreite, die die problemlose Bewegung von verschiedenen Baumaschinen ermöglicht.

Stark geneigter Abschnitt

Der mittlere Teil der Druckrohrleitung hat eine Länge von 161,33m und eine Neigung von 18°. Der Zugang für die Aushub- und Stützarbeiten ist auf der Seite des schon ausgebauten Portalabschnittes ermittelt worden. Die Rohre und der Füllbeton werden von der Wasserschlossseite eingebracht. Detaillierte statische und hydraulische Berechnungen und die Bauverfahrenstechnik sind weiter angegeben.

Horizontalabschnitt

Der horizontale Abschnitt verbindet das Wasserschloss und den stark geneigten Abschnitt. Er hat eine Länge von 7m und eine minimale Neigung von 1,0%. Der Ausbau eines solchen Abschnitts trägt zu der reibungsarme Verbindung zwischen dem Druckstollen, dem Wasserschloss und der gepanzerten Druckrohrleitung bei und erleichtert die Montagetechnologie für die Rohrabschnitte.

- Für **das oberirdische Wasserkraftwerk** sind zwei Turbinen "Francis" mit einer vertikalen Achse vorgesehen. Die wichtigsten technischen Parameter des Wasserkraftwerks sind wie folgt:

| | |
|-----------------------|-----------------------------|
| Gesamtleistung | 49,8MW |
| Maximale Netofallhöhe | 97,8m |
| Ausbauwassermenge | $72 \text{ m}^3 / \text{s}$ |

- Südöstlich von der Druckrohrleitung auf $\nabla 375$ m ist ein Zugangsstollen vorgesehen, der zu dem Ausbau vom Triebwasserweg beiträgt. Die Achsen des Zugangsstollens und der Druckrohrleitung kreuzen sich beim Wasserschloss. Die Geometrie des Bauplatzes vor dem Zugangsstollen ist entsprechend dem Bauverfahren für die Druckrohrleitung und den Zugangsstollen selbst bestimmt.

1.3. Ingenieur - geologische Gegebenheiten des Gebietes (*nach Aufgabestellung*)

Das Gebiet, wo alle Einrichtungen gebaut werden, ist von Andesiten in erster Effusion zusammengesetzt. Die Felsfarbe ist abwechselnd in der Tiefe – graugrün, graublau, olivengrün und dunkelgrau. Im Oberflächenbereich, 4-8m tief haben die Andesite eine Verwitterung in verschiedenem Maße erfahren. Im Wasserschlossbereich ist die Böschung mit Kies und sandigem Lehm bedeckt.

Im Andesitgestein ist ein typisches Rissnetz, das vertikale polyedrische Prismen bildet, vorhanden. Die größte praktische Bedeutung haben die Kontaktrisse, die die verhärteten Lavaströme der pulsierenden vulkanischen Aktivitäten aus dem Oligozän trennen. Sie bilden lange Trennebenen im Felsmassiv in einem Intervall von 3-5m und mit einer Neigung von $10^\circ - 12^\circ$ in Richtung Süden/Südosten. Es bildeten sich weitere Risse und kleine kavernenförmige Räume als Ergebnis der Entlastung und durch Verwitterungsprozesse. Dadurch ist unter bestimmten Bedingungen die Bildung von konzentrierten Wasserdurchtritten und großen Druckhöhen möglich.

In dem Bereich wurden keine tektonischen Störungen und Brüche konstatiert.

Die hydrogeologischen Verhältnisse sind relativ einfach, da das Felsmassiv trocken ist und es kann saisonal nur Kluftwasser zirkulieren. Diese Schätzungen beinhalten nicht die wahrscheinlich geringen Wasserdurchtritte von schon vorhandenen unterirdischen Anlagen.

Die wichtigsten physikalischen, mechanischen und geotechnischen Parameter des Felsmassives sind in Tabelle 1 angegeben. In den Tabellen 2 und 3 ist die prozentuelle Verteilung der Länge der Abschnitte mit unterschiedlichen Eigenschaften für den Druckstollen und die Druckrohrleitung angegeben. Die Festigkeitseigenschaften des Felsmassivs sind gemäß dem System von Bienjavski durch einen RMR-Faktor /Rock Mass Rating Index/ gegeben.

| Andesit in erster Effusion Verwitterungstiefe:4-8m | Wichte [g/cm ³] | f_{pr} | K_0 [N/cm ³] | $tg \varphi_n$ | Kohäsion [MPa] | Poisson Koeff. | Deformations- modul [MPa] |
|---|--------------------------------|----------|-------------------------------|----------------|-------------------|-------------------|---------------------------------|
| Oberflächengebiet | 2,14 | 1,5 – 2 | 800 - 1000 | 0,48 | 0,15 | 0,33 | 500 |
| Bei Abraummächtigkeit $H_{Abr} < 25$ m | 2,19 | 3 - 4 | 1500- 2000 | 0,60 | 0,35 | 0,28 | 2000 |
| Bei Abraummächtigkeit $H_{Abr} > 25$ m | | 4 - 5 | 2000- 2500 | 0,66 | 0,40 | 0,28 | 2500 |

Tabelle 1 – Mechanische und geotechnische Parameter des Felsmassives

| | | | | | | | | |
|----------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| % der Länge, abwärts | 5 | 10 | 15 | 15 | 10 | 20 | 15 | 10 |
| RMR | 25 | 35 | 50 | 65 | 75 | 50 | 40 | 35 |

Tabelle 2 – RMR - Faktor des Felsmassives entlang des Druckstollens

| | | | | | | |
|----------------------|----|----|----|----|----|----|
| % der Länge, abwärts | 15 | 10 | 20 | 30 | 15 | 10 |
| RMR | 35 | 25 | 50 | 65 | 40 | 25 |

Tabelle 3 – RMR - Faktor des Felsmassives entlang der Druckrohrleitung

1.4. Trassierung der Druckrohrleitung

Bei dem von Energoprojekt EAD ausgearbeiteten Projekt für den Triebwasserweg vom WKS Sarnitsa wurde ein Druckschacht angenommen. Der Hochdruckteil des Triebwasserwegs besteht aus einem vertikalen Schacht und einem leicht abfallenden Abschnitt. Der Nachteil dieser konstruktiven Lösung ist, dass die Bauverfahren in den beiden Abschnitten unterschiedliche Bautechniken verlangen. Die Arbeitsrichtung, horizontal oder vertikal, bestimmt das Bauverfahren, respektiv die Bautechnik.

In dem vorliegenden Projekt ist die Variante mit einem langen, stark geneigten Abschnitt, beiderseits mit zwei kurzen Abschnitten gewählt worden. So wird die Gesamtlänge der Druckrohrleitung reduziert, respektiv werden die hydraulischen Längsverluste verringert.

Der bedeutende Vorteil dieser konstruktiven Variante ist, dass eine gleichartige Bautechnologie für die ganze Druckrohrleitung angewandt werden kann. Weiterhin ist auch eine notwendige Überdeckung vorhanden. Damit kann die Druckrohrleitung tief genug gelegt werden.

2. Vorläufige Berechnungen

2.1. Bemessung des Rohrleitungsquerschnitts

2.2. Ermittlung der Druckhöhe

- 2.2.1. Ermittlung der maximalen und minimalen Werten der Brutto- und Nettofallhöhe
- 2.2.2. Ermittlung der Bemessungsfalhöhe

2.3. Bemessung des Turbinenkammereinlaufs

2.1. Bemessung des Rohrleitungsquerschnitts

Daten über den Monatsmittelzufluss sind nicht vorhanden. Der Rohrleitungsquerschnitt wird dann auf die in der Praxis akzeptierte optimale Geschwindigkeit bemessen. In der einschlägigen Literatur ist der Bereich $V_{opt} = 3,5 \div 4,5 \text{ m/s}$ angegeben.

$$D_{DRL} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{Ausbau}}{V_{DRL} \cdot \pi}}; \quad V_{opt} = 3,5 \div 4,5 \text{ m/s}; \quad \text{Angenommen: } V_{opt} = 4,0 \text{ m/s}$$

$$D_{DRL} = \sqrt{\frac{4 \times 72}{4 \times 3,14}} = 4,79 \text{ m};$$

Angenommen: $D_{DRL} = 4,80 \text{ m}$

$$V_{opt} = \frac{Q_{Ausbau}}{F_{DRL}} = \frac{Q_{Ausbau}}{\frac{\pi \cdot D_{DRL}^2}{4}} = \frac{72}{\frac{3,14 \times 4,80^2}{4}} = \frac{72}{18,09} = 3,98 \text{ m/s}$$

$$V_{opt} = V_{DRL} = 3,98 \text{ m/s}$$

$F_{DRL} = 18,09 \text{ m}^2$ – Querschnittsfläche der Druckrohrleitung

$$F_{DRL}^v = \frac{F_{tp}}{2} = \frac{18,09}{2} = 9,043 \text{ m}^2 \text{ - Querschnittsfläche der Druckrohrleitung nach der Verzweigung}$$

$$D_{DRL}^v = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{DRL}^v}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 9,043}{3,14}} = 3,39 \text{ m}$$

Angenommen: $D_{DRL}^v = 3,40 \text{ m}$

$$F_{DRL}^v = \frac{\pi \cdot (D_{DRL}^v)^2}{4} = \frac{3,14 \times 3,40^2}{4} = 9,075 \text{ m}^2$$

$$V_{DRL}^v = \frac{Q_{Ausbau} / 2}{F_{DRL}^v} = \frac{72 / 2}{9,075} = 3,97 \text{ m/s}$$

$V_{DRL}^v = 3,97 \text{ m/s} \Rightarrow$ liegt im Intervall $V_{opt} = 3,5 \div 4,5 \text{ m/s}$

2.2. Ermittlung der Druckhöhe

| Charakteristische Wasserstandhöhen | |
|------------------------------------|------|
| Stauziel | 425m |
| Überstau | 427m |
| Absenkziel | 388m |
| UWS | 325m |

2.2.1. Ermittlung der maximalen und minimalen Werten der Brutto- und Nettofallhöhe

$$H_{br}^{max} = \nabla \text{Stauziel} - \nabla \text{UWS} = 425 - 325 = 100 \text{ m}$$

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

Die Nettofallhöhe wird als Differenz der Bruttofallhöhe und der Höhe der Verluste in der Rohrleitung berechnet. Für die Gesamtverluste wurde zunächst angenommen, dass sie 5-10% der Bruttofallhöhe betragen. Weiter werden die tatsächlichen Werte der Verluste bzw. der Nettofallhöhe ermittelt.

$$\Delta h_{\Sigma} = (5-10)\% \cdot H_{br}$$

$$\text{Angenommen : } \Delta h_{\Sigma} = 7\% \cdot H_{br}$$

$$\Delta h_{\Sigma}^{max} = 0,07 \times 100 = 7 \text{ m}$$

$$\Delta h_{\Sigma}^{min} = 0,07 \times 63 = 4,41 \text{ m}$$

$$H_{nt} = H_{br} - \Delta h_{\Sigma}$$

$$H_{nt}^{max} = 100 - 7 = 93 \text{ m}$$

$$H_{nt}^{min} = 63 - 4,41 = 58,59 \text{ m}$$

2.2.2. Ermittlung der Bemessungsfallhöhe

$$H_{nt}^b = \frac{2 \cdot H_{nt}^{max} + H_{nt}^{min}}{3} = \frac{2 \cdot 93 + 58,59}{3} = 81,53 \text{ m}$$

2.3. Bemessung des Turbineneinlaufs

Die Wahl der Turbine wird nach der maximalen Nettofallhöhe gemacht. Vorläufig sind die Verluste als 7% der Bruttofallhöhe angenommen. Der Durchmesser des Turbineneinlaufs wird bei der Berechnung der hydraulischen Verluste beim Übergang Rohrleitung-Kammer benötigt. Im Teil "4. Auswahl von Ausrüstungen für WKW Sarnitsa" wird die Turbinenauswahl im Detail erklärt und die maximale Nettofallhöhe und die Bemessungsfallhöhe durch die tatsächlichen Verluste ermittelt.

Im Teil 3. sind die hydraulischen Berechnungen zu dem stationären Betriebszustand angegeben. Dabei werden die tatsächlichen Verluste ermittelt.

Bestimmung der installierten Leistung von WKW Sarnitsa

Angenommen ist:

Wirkungsgrad der Turbine $\eta_T = 0,85 \div 0,88, \eta_T = 0,85$;

Wirkungsgrad des Generators $\eta_G = 0,97$.

$$P_{\text{Ausbau}} = 9,81 \cdot \eta_T \cdot \eta_G \cdot Q_{\text{Ausbau}} \cdot H_{\text{nt}}^b \quad [\text{kW}]$$

$$P_{\text{Ausbau}} = 9,81 \times 0,85 \times 0,97 \times 72 \times 81,53$$

$$P_{\text{Ausbau}} = 47479,9 \text{ kW}$$

$$P_{\text{Ausbau}} = 47,48 \text{ MW}$$

Auswahl der Turbine

Zwei Francis Turbinen auf vertikaler Achse sind für das WKW vorgesehen. Durch Nutzung beider Turbinen wird der Betrieb auch beim Ausfall einer Turbine ermöglicht.

Das Modell der Turbine wird durch die im Handbuch [1] gegebene Nomenklatur bestimmt. Das gewählte Turbinenmodell soll auch bei größerer Druckhöhe funktionsfähig sein.

$$\left. \begin{array}{l} \frac{P_{\text{Ausbau}}}{2} = \frac{47,48}{2} = 23,74 \text{ MW} \\ H_{\text{nt}}^{\text{max}} = 93 \text{ m} \end{array} \right\} \text{PO115}$$

Grundparameter der Turbine

Q'_1 und n'_1 werden umgerechnete Parameter der Turbine für Laufraddurchmesser 1m und Druckhöhe 1m genannt. Nach dem Erfordernis den Wirkungsgrad zu maximieren, wird von der Betriebsmuschelkurve für Turbine PO115 (siehe Anhang) abgelesen:

$$n'_1 = 75 \text{ und } Q'_1 = 1,15 \text{ m}^3/\text{s}$$

Der Durchmesser des Laufrades wird nach dem Betriebsähnlichkeitsgesetz bestimmt.

$$Q_T = \frac{Q_{\text{Ausbau}}}{2} = \frac{72,0}{2} = 36 \text{ m}^3/\text{s} \text{ - Durchflussmenge jeder Turbine}$$

$$D_1 = \sqrt{\frac{Q_T}{Q'_1 \sqrt{H_{\text{nt}}^b}}} = \sqrt{\frac{36}{1,15 \times \sqrt{81,53}}} = 1,86 \text{ m}$$

Für die Ziele der bautechnischen Ausführung wird der Durchmesser auf $D_1 = 1900 \text{ mm}$ gerundet.

Bestimmung der Turbinenzulaufspirale

Der Zweck der Turbinenspirale ist die gleichmäßige Verteilung der Wassermenge in der Kontur des Turbinenleitapparats. Das erfordert die spezielle Spiralförmigkeit. Die Querschnittsform des Zulaufs und die Art des Materials hängen hauptsächlich von der Druckhöhe und der Turbinenleistung ab. Da die Druckhöhe hoch ist, ist eine Stahlschnecke mit einem kreisförmigen Querschnitt und Umfangswinkel von 345° vorgesehen worden. Zur Herstellung eines Vorentwurfs, sind die Hauptabmessungen der Spirale als eine Funktion des Laufraddurchmessers und des Koordinatenwinkels φ^0 bestimmt worden. Bei Stahlschnecken werden der Durchmesser der Spirale R in Draufsicht und die Durchmesser des kreisförmigen und des elliptischen Querschnitts bzw. ρ und ρ_1 durch folgende Beziehungen bestimmt:

$$R = C \cdot D_1 \quad \rho = E \cdot D_1 \quad \rho_1 = K \cdot \rho$$

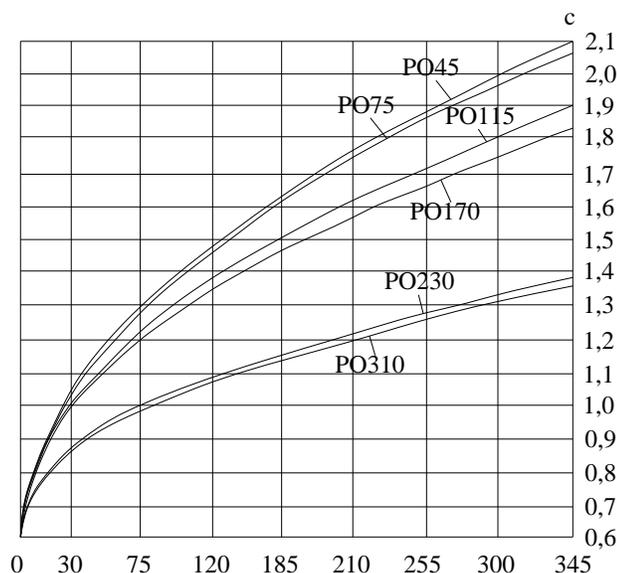


Abb. 2 Grafik für annähernde Ermittlung der Bemessungen von Stahlschnecken [1]

$$\left. \begin{array}{l} \varphi = 345^\circ \\ \text{PO115} \end{array} \right\} c = 1,9 \text{ wird von Abb. 2 abgelesen}$$

$$R = C \cdot D_1 = 1,9 \times 1,9 = 3,61 \text{ m}$$

$$D_{\text{TZS}} = R^{345} - \frac{D_0}{2};$$

$$D_0 = 1,3 \cdot D_1 = 1,3 \times 1,9 = 2,47 \text{ m}$$

$$D_{\text{TZS}} = 3,61 - \frac{2,47}{2} = 2,375 \text{ m} \Rightarrow \text{Angenommen: } D_{\text{TZS}} = 2,40 \text{ m}$$

Angenommen ist ein konischer Übergang zwischen dem Rohrleitungszweig mit $D_{\text{DRL}} = 3,40 \text{ m}$ und der Turbinenkammereinlauf mit $D_{\text{TZS}} = 2,40 \text{ m}$. Die Länge des konischen Überganges ist 7m.

3. Hydraulische Berechnungen zum stationären Betriebszustand

- 3.1. Ermittlung der Komponenten der Gesamtverluste im Triebwasserweg**
- 3.2. Ermittlung der Gesamtverluste im Triebwasserweg**
- 3.3. Ermittlung der tatsächlichen Werte der Nettofällhöhe und der Bemessungsfällhöhe**

3.1. Ermittlung der Komponenten der Gesamtverluste im Triebwasserweg [2]

Hydraulische Berechnung der stationären Prozesse in der Druckrohrleitung drückt sich in der Bestimmung der hydraulischen Verluste aus. Bedingt durch die Reibung zwischen dem Wasser und den Rohrwänden finden Verluste über die gesamte Länge der Rohrleitung Längsverluste statt. Auch lokale Widerstände kommen bei Unebenheiten vor. So finden Ortsverluste beim Entnahmebauwerk, bei Kurven, bei Querschnittänderung, bei Verschlussorganen und bei Verzweigungen statt.

$$\Sigma \Delta h_{\text{Triebwasserweg}} = \Delta h_{\text{Entnahme}} + \Delta h_{\text{DRL}} + \Delta h_{\text{DS}};$$

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

$$\Delta h_{\text{DS}} = \Delta h_{\text{Längs}} + \Delta h_{\text{Kurve}} + \Delta h_{\text{Auslauf}};$$

$$\Delta h_{\text{DRL}} = \Delta h_{\text{Längs}} + \Delta h_{\text{Einlauf}} + \Delta h_{\text{Rechen}} + \Delta h_{\text{Knick}} + \Delta h_{\text{Verschluss}} + \Delta h_{\text{Ort}}^{\text{v}} + \Delta h_{\text{Längs}}^{\text{v}} + \Delta h_{\text{Kurve}} + \Delta h_{\text{Verengung}}.$$

Bemerkung: Die Verluste in der Druckrohrleitung sind ein Teil der gesamten hydraulischen Verluste im Triebwasserweg. Die anderen Komponenten der Gesamtverluste sind Gegenstand der parallel erarbeiteten Diplomarbeit. In der vorliegenden Diplomarbeit wurden die Werte dieser Verluste direkt entnommen.

Bei den vorläufigen Berechnungen wurden folgende Resultate ermittelt:

- Durchmesser der DRL $D_{\text{DRL}} = 4,80 \text{ m}$
- Optimale Geschwindigkeit in der DRL $V_{\text{DRL}}^{\text{opt}} = 3,98 \text{ m/s}$
- Durchmesser der Verzweigungen $D_{\text{DRL}}^{\text{v}} = 3,40 \text{ m}$
- Optimale Geschwindigkeit in den Verzweigungen $V_{\text{DRL}}^{\text{v}} = 3,97 \text{ m/s}$

Länge der einzelnen Abschnitte:

- Horizontaler Abschnitt $L_{\text{h}} = 7,00 \text{ m}$
- Stark geneigter Abschnitt $L_{\text{g}} = 161,33 \text{ m}$
- Sammelabschnitt $L_{\text{s}} = 9,00 \text{ m}$

▪ $\Delta h_{\text{Längs}}$ Längsverluste

$$\Delta h_{\text{Längs}} = \frac{L_{\text{DRL}} \cdot V_{\text{DRL}}^2}{C_{\text{DRL}}^2 \cdot R_{\text{DRL}}} \quad [\text{m}]$$

$$L_{\text{DRL}} = L_{\text{h}} + L_{\text{g}} + L_{\text{s}}$$

$$L_{\text{DRL}} = 7,0 + 161,33 + 9,0 = 177,33 \text{ m}$$

$$V_{\text{DRL}} = 3,98 \text{ m/s}$$

$$R_{DRL} = \frac{D_{DRL}}{4} = \frac{4,80}{4} = 1,2 \text{ m}$$

$$C_{DRL} = \frac{1}{n} \cdot R_{DRL}^{1/6} = \frac{1}{0,012} \times 1,2^{1/6} = 85,90 \text{ m/s}^{1/2}$$

$n = 0,012$ – Rauigkeitsbeiwert der DRL

$$\Delta h_{L\ddot{a}ngs} = \frac{177,33 \times 3,98^2}{85,90^2 \times 1,2} = 0,32 \text{ m}$$

$$\Delta h_{L\ddot{a}ngs} = 0,32 \text{ m}$$

▪ $\Delta h_{\text{Einlauf}}$ Einlaufverluste

$$\Delta h_{\text{Einlauf}} = \xi_{\text{Einlauf}} \cdot \frac{V_{\text{Einlauf}}^2}{2g} \quad [\text{m}]$$

$$\xi_{\text{Einlauf}} = 0,5$$

$$V_{\text{Einlauf}} = V_{DRL} = 3,98 \text{ m/s}$$

$$\Delta h_{\text{Einlauf}} = 0,5 \times \frac{3,98^2}{2 \cdot 9,81} = 0,40 \text{ m}$$

$$\Delta h_{\text{Einlauf}} = 0,40 \text{ m}$$

▪ Δh_{Rechen} Rechenverluste

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

Angenommene Abmessungen für den Rechen:

$$h_{\text{Rechen}} = 5,50 \text{ m}; \quad b_{\text{Rechen}} = 5,1$$

$$\Rightarrow a = 10 \text{ cm}; \quad b = 1,0 \text{ cm}$$

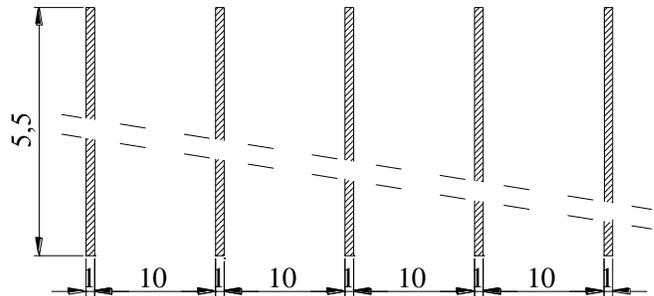
$$F_{\text{Rechen}}^{\text{brutto}} = b_{\text{Rechen}}^{\text{brutto}} \cdot h_{\text{Rechen}} = 5,50 \cdot 5,10 = 28,05 \text{ m}^2$$

$$k = \frac{a}{a+b} = \frac{10}{10+1} = 0,9090$$

$$F_{\text{Rechen}}^{\text{netto}} = F_{\text{Rechen}}^{\text{brutto}} \cdot k = 28,05 \times 0,9091 = 25,50 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{Rechen}} = \frac{Q_{\text{Ausbau}}}{F_{\text{Rechen}}^{\text{netto}}} = \frac{72,00}{25,50} = 2,83 \text{ m/s}$$

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



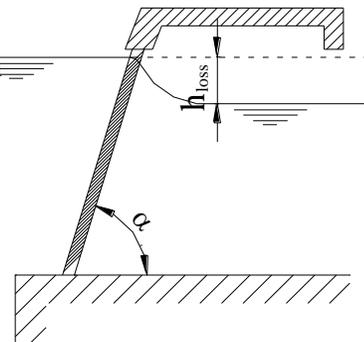
$\alpha = 70^\circ$ – Neigungswinkel des Rechen

$\beta = 2,34$ – Beiwert der Ortsverluste bei den Rechenstäben

für rechteckigen Querschnitt

$$\xi_{\text{Rechen}} = 2,34 \cdot \left(\frac{1}{10}\right)^{4/3} \times \sin 70^\circ = 0,102$$

$$\Delta h_{\text{Rechen}} = 0,102 \times \frac{2,83^2}{2 \cdot 9,81} = 0,042 \text{ m}$$



$$\Delta h_{\text{Rechen}} = 0,042 \text{ m}$$

Die Berechnungen wurden unter der Voraussetzung gemacht, dass die Wassermenge zwischen der Druckrohrleitung und dem Druckstollen gleichmäßig verteilt ist und deshalb keine Pulsationen vorhanden sind.

▪ Δh_{Knick} Knickverluste

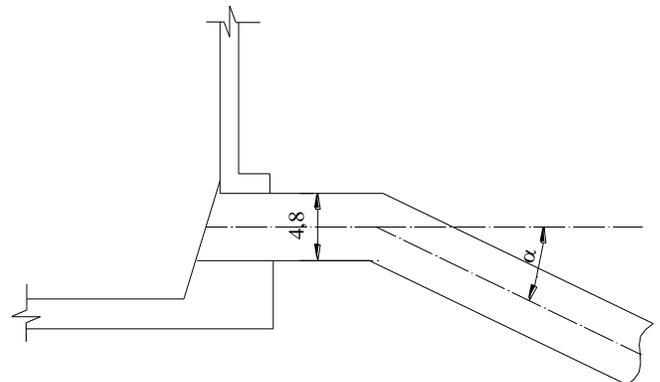
$$\Delta h_{\text{Knick}} = \xi_{\text{Knick}} \cdot \frac{V_{\text{Knick}}^2}{2g} \quad [\text{m}]$$

$$\xi_{\text{Knick}} = 0,946 \cdot \sin^2 \frac{\alpha}{2} + 2,047 \cdot \sin^4 \frac{\alpha}{2}$$

$\alpha = 18^\circ$ – Ergänzungswinkel

$$\xi_{\text{Knick}} = 0,946 \times \sin^2 \frac{18}{2} + 2,047 \times \sin^4 \frac{18}{2} = 0,024$$

$$\Delta h_{\text{Knick}} = 0,024 \times \frac{3,98^2}{2 \cdot 9,81} = 0,02 \text{ m}$$



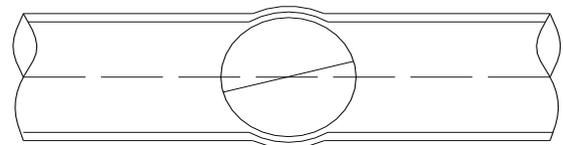
$$\Delta h_{\text{Knick}} = 0,02 \text{ m}$$

▪ $\Delta h_{\text{Verschluss}}$ Verluste beim Verschlussorgan

Ein Kugelschieber wurde als Verschlussorgan angenommen.

$$\xi_{\text{Verschluss}} = 0$$

$$\Delta h_{\text{Verschluss}} = \xi_{\text{Verschluss}} \cdot \frac{V_{\text{Verschluss}}^2}{2g} = 0 \quad [\text{m}]$$



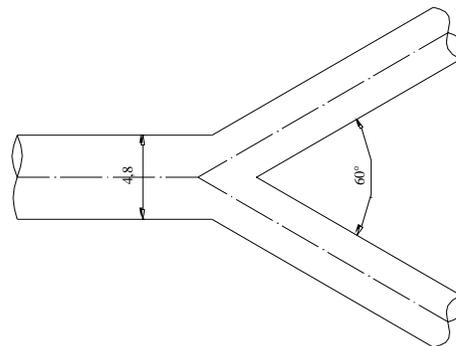
$$\Delta h_{\text{Verschluss}} = 0 \text{ m}$$

- Δh_{Ort}^v Ortsverluste bei der Verzweigung der DRL

$$\Delta h_{\text{Ort}}^v = \xi_{\text{Ort}}^v \cdot \frac{V_{\text{Ort}}^2}{2g} \quad [\text{m}]$$

$$\xi_{\text{Ort}} = 0,38;$$

$$\Delta h_{\text{Ort}}^v = 0,38 \times \frac{3,98^2}{2,9,81} = 0,31 \text{ m}$$



$$\Delta h_{\text{Ort}}^v = 0,31 \text{ m}$$

- $\Delta h_{\text{Längs}}^v$ Längsverluste bei der Verzweigung der DRL

$$\Delta h_{\text{Längs}}^v = \frac{L_{\text{DRL}}^v \cdot V_{\text{DRL}}^v{}^2}{C_{\text{DRL}}^v \cdot R_{\text{DRL}}^v} \quad [\text{m}]$$

$$R_{\text{DRL}}^v = \frac{D_{\text{DRL}}^v}{4} = \frac{3,40}{4} = 0,85 \text{ m}$$

$$C_{\text{DRL}}^v = \frac{1}{n} \cdot R_{\text{DRL}}^v{}^{1/6} = \frac{1}{0,012} \times 0,85^{1/6} = 81,11 \text{ m/s}^{1/2}$$

$$\Delta h_{\text{Längs}}^v = \frac{L_{\text{DRL}}^v \cdot V_{\text{DRL}}^v{}^2}{C_{\text{DRL}}^v{}^2 \cdot R_{\text{DRL}}^v} = \frac{30 \times 3,97^2}{81,11^2 \times 0,85} = 0,085 \text{ m}$$

$$\Delta h_{\text{Längs}}^v = 0,085 \text{ m}$$

- Δh_{Kurve} Kurvenverluste

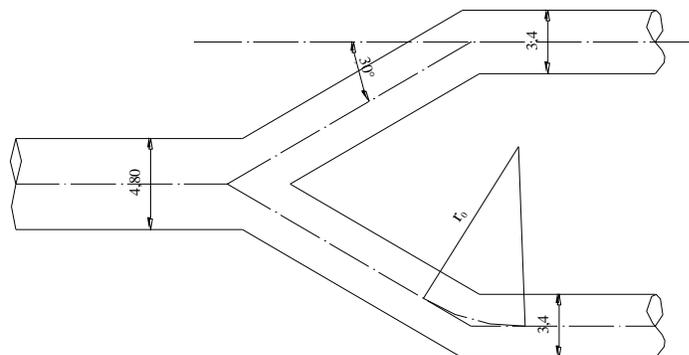
$$\Delta h_{\text{Kurve}} = \xi_{\text{Kurve}} \cdot \frac{V_{\text{Kurve}}^2}{2g} \quad [\text{m}]$$

$$\xi_{\text{Kurve}} = \xi_{90^\circ} \cdot \frac{\alpha^\circ}{90^\circ}$$

$$\text{Für } d / 2 \cdot r_0 = 3,40 / 2 \cdot 10 = 0,17$$

$$\Rightarrow \xi_{90^\circ} = 0,137 [2]$$

$$\xi_{\text{Kurve}} = 0,137 \times \frac{30^\circ}{90^\circ} = 0,046$$



$$\Delta h_{\text{Kurve}} = 0,046 \times \frac{3,97^2}{2,9,81} = 0,037 \text{ m}$$

$$\Delta h_{\text{Kurve}} = 0,037 \text{ m}$$

- **$\Delta h_{\text{Verengung}}$** Verluste bei der konischen Übergang

$$\Delta h_{\text{Verengung}} = \xi_{\text{Verengung}} \cdot \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g} \quad [\text{m}]$$

$\alpha = 8^\circ$ - Verengungswinkel

$$\xi_{\text{Verengung}} = 0,041$$

V_1 - Wassergeschwindigkeit bei Rohrleitungsdurchmesser $d = 2,40 \text{ m}$

V_2 - Wassergeschwindigkeit bei Rohrleitungsdurchmesser $d = 3,40 \text{ m}$

$$F_{\text{Spirale}} = \frac{\pi \cdot 2,40^2}{4} = 4,52 \text{ m}^2$$

$$V_1 = \frac{Q_{\text{Ausbau}} / 2}{F_{\text{Spirale}}} = \frac{72 / 2}{4,52} = 7,96 \text{ m/s}$$

$$F_{\text{DRL}}^v = \frac{\pi \cdot 3,40^2}{4} = 9,07 \text{ m}^2$$

$$V_2 = V_{\text{DRL}}^v = \frac{Q_{\text{Ausbau}} / 2}{F_{\text{DRL}}^v} = \frac{72 / 2}{9,07} = 3,97 \text{ m/s}$$

$$\Delta h_{\text{Verengung}} = 0,041 \times \frac{(7,96 - 3,97)^2}{2g} = 0,033 \text{ m}$$

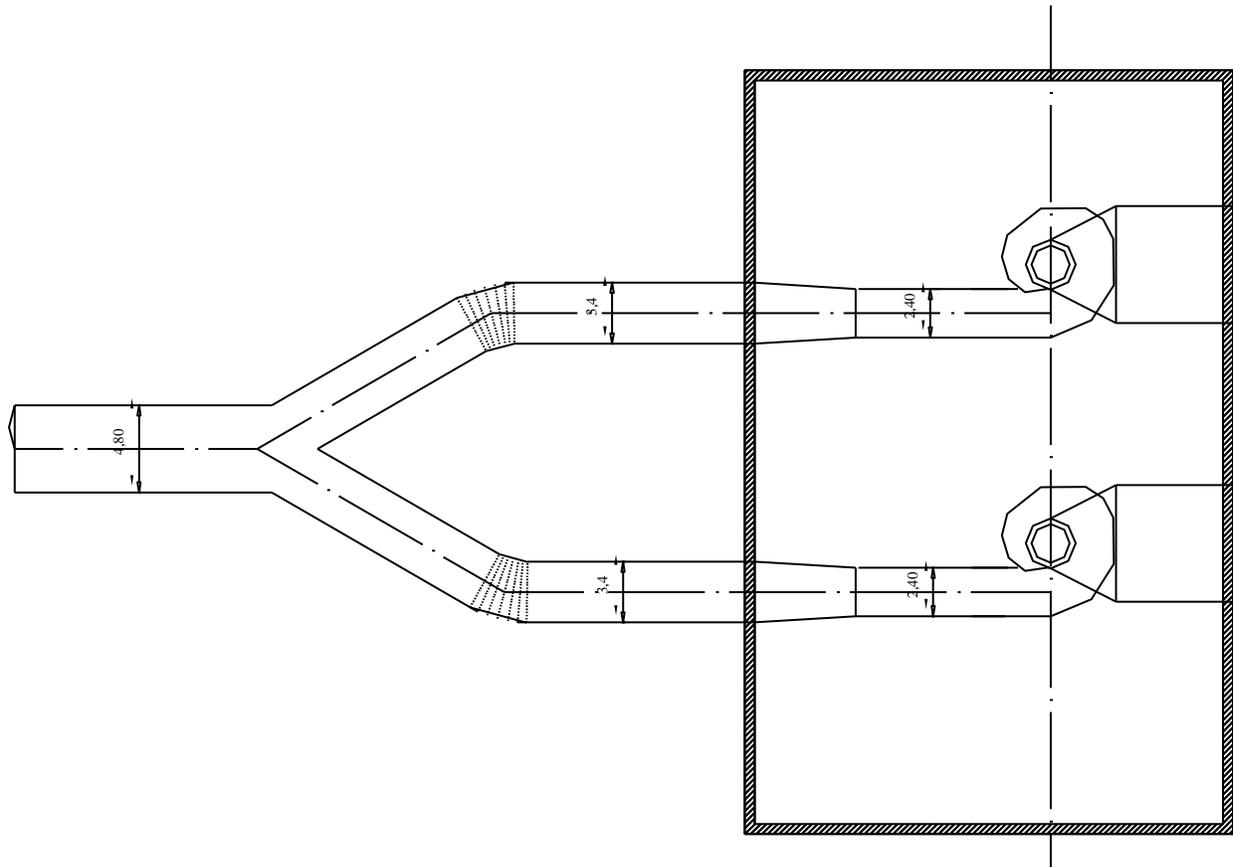


Abb.3 Verbindungsschema der DRL mit der Turbinenkammer

3.2. Ermittlung der Gesamtverluste im Triebwasserweg

| $\Delta h_{\text{Längs}}$ | Δh_{Einl} | Δh_{Rech} | Δh_{Knick} | $\Delta h_{\text{Verschl}}$ | Δh_{Ort}^v | $\Delta h_{\text{Längs}}^v$ | Δh_{Kurve} | Δh_{Vereng} | $\Sigma \Delta h_{\text{DRL}}$ |
|---------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0,32 | 0,40 | 0,042 | 0,02 | 0 | 0,31 | 0,085 | 0,037 | 0,033 | 1,247 |

| $\Delta h_{\text{Längs}/\text{max}}$ | $\Delta h_{\text{Längs}/\text{min}}$ | Δh_{Kurve} | $\Delta h_{\text{Auslauf}}$ | $\Sigma \Delta h_{\text{DS}/\text{max}}$ | $\Sigma \Delta h_{\text{DS}/\text{min}}$ |
|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|--|--|
| 0,90 | 0,504 | 0,014 | 0,31 | 1,224 | 0,828 |

| Δh_{Rechen} | $\Delta h_{\text{Einlauf}}$ | $\Delta h_{\text{Übergang}}$ | $\Sigma \Delta h_{\text{Entnahme}}$ |
|----------------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| 0,004 | 0,051 | 0,057 | 0,112 |

| $\Sigma \Delta h_{\text{Entnahme}}$ | $\Sigma \Delta h_{\text{DS}/\text{min}}$ | $\Sigma \Delta h_{\text{DRL}}$ | Δh_{Σ} |
|-------------------------------------|--|--------------------------------|---------------------|
| 0,112 | 0,828 | 1,247 | 2,187 |

Tabelle 4 – Gesamtverluste im Triebwasserweg

3.3. Ermittlung der tatsächlichen Werte der Nettofallhöhe und der Bemessungsfallhöhe

$$H_{br}^{max} = \nabla \text{Stauziel} - \nabla \text{UWS} = 425 - 325 = 100 \text{ m}$$

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

$$H_{nt}^{max} = H_{br}^{max} - \Delta h_{\Sigma} = 100 - 2,187 = 97,813 \text{ m}$$

$$H_{nt}^{min} = H_{br}^{min} - \Delta h_{\Sigma} = 63 - 2,187 = 60,813 \text{ m}$$

Δh_{Σ} – Gesamtverluste im Triebwasserweg

Ermittlung der Bemessungsfallhöhe

$$H_{nt}^b = \frac{2 \cdot H_{nt}^{max} + H_{nt}^{min}}{3} = \frac{2 \times 97,813 + 60,813}{3} = 85,48 \text{ m}$$

4. Auswahl von Ausrüstungen für WKW Sarnitsa

4.1. Auswahl der Turbine

4.2. Auswahl des Generators

4.1. Auswahl der Turbine [1]

Das Anwendungsgebiet der verschiedenen Turbinentypen richtet sich nach der Fallhöhe und dem Wasserdurchfluss oder der Leistung. Passend für den Fall sind die Francis Turbinen, die sogar bei Fallhöhe bis zu 700m einsetzbar sind.

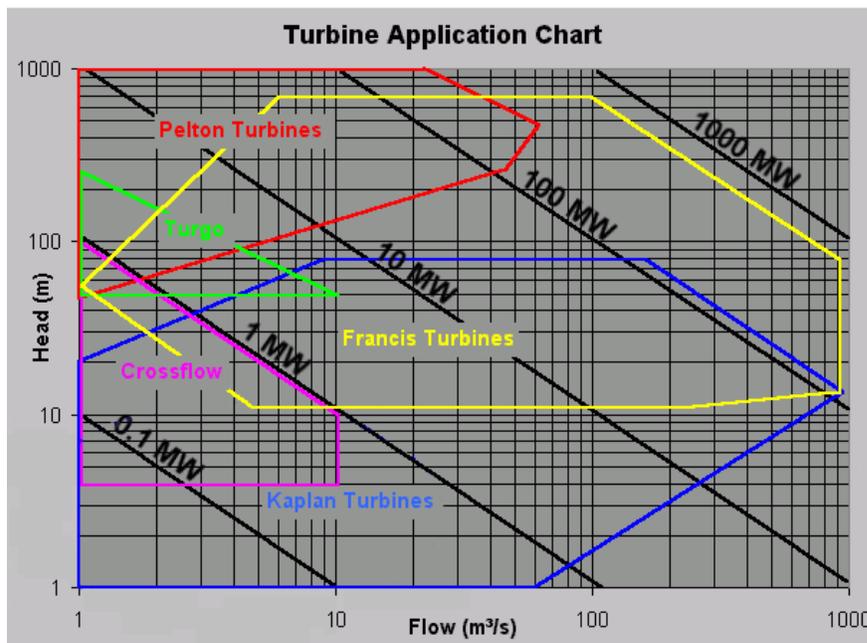


Abb. 4 Anwendungsgebiet der Turbinentype

Zwei Francis Turbinen mit vertikaler Achse sind für das WKW vorgesehen. Die Anwendung von zwei Turbinen ermöglicht den Betrieb des WKWs auch beim Ausfall einer Turbine. Ein Hosenrohr ist als Verbindung mit der Druckrohrleitung für die zwei Maschinen vorgesehen. Der Durchfluss jeder Turbine ist:

$$Q_T = Q_{\text{3acrp}} / 2 = 72 / 2 = 36 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Das Modell der Turbine wird durch die im Handbuch [1] gegebene Nomenklatur bestimmt. Das gewählte Turbinenmodell soll auch bei größerer Druckhöhe funktionsfähig sein.

$$\left. \begin{array}{l} \frac{P_{\text{Ausbau}}}{2} = \frac{49,78}{2} = 24,89 \text{ MW} \\ H_{\text{nt}}^{\text{max}} = 97,813 \text{ m} \end{array} \right\} \text{PO115}$$

Von der tatsächlichen Nettofallhöhe und der angegebenen Ausbauwassermenge $Q_{\text{Ausbau}} = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ wird die tatsächliche Leistung des Wasserkraftwerks ermittelt.

Angenommen wird: Wirkungsgrad der Turbine $\eta_T = 0,85 \div 0,88, \eta_T = 0,85$ und Wirkungsgrad des Generators $\eta_G = 0,97$.

$$P_{\text{Ausbau}} = 9,81 \cdot \eta_T \cdot \eta_G \cdot Q_{\text{Ausbau}} \cdot H_{\text{nt}}^b \quad [\text{kW}]$$

$$P_{\text{Ausbau}} = 9,81 \times 0,85 \times 0,97 \times 72 \times 85,48$$

$$P_{\text{Ausbau}} = 49780 \text{ kW}$$

$$P_{\text{Ausbau}} = 49,78 \text{ MW}$$

Grundparameter der Turbine

Der Durchmesser des Laufrades und die tatsächliche Drehzahl werden nach dem Betriebsähnlichkeitsgesetz bestimmt. Damit diese zwei Parameter in einem konkreten Fall ermittelt werden können, braucht man auch die umgerechneten Parameter der Turbine Q_1' und n_1' für Laufraddurchmesser 1m und Druckhöhe 1m. Von der Betriebsmuschelkurve der Turbinentyp PO115 (siehe Anhang) wird im Gebiet des maximalen Wirkungsgrads abgelesen: $n_1' = 75 \text{ min}^{-1}$
 $Q_1' = 1,15 \text{ m}^3 / \text{s}$

So wird berechnet:

$$D_1 = \sqrt{\frac{Q}{Q_1' \cdot \sqrt{H_{\text{nt}}^b}}} = \sqrt{\frac{36}{1,15 \times \sqrt{85,48}}} = 1,84 \text{ m}$$

Für die Ziele der technischen Ausführung wird der Durchmesser auf $D_1 = 1900 \text{ mm}$ gerundet.

Die tatsächliche Drehzahl der Turbine wird vom zweiten Ähnlichkeitsgesetz berechnet:

$$n = n_1' \cdot \frac{\sqrt{H_{\text{nt}}^b}}{D_1} = 75 \cdot \frac{\sqrt{85,48}}{1,9} = 365 \text{ min}^{-1}$$

Der Generator ist eine Synchronmaschine mit bestimmter Polenanzahl wobei diese Anzahl einer bestimmten Drehzahl entspricht. Eine Standarddrehzahl wird durch die folgende Formel bestimmt.

$$n_{\text{synchron}} = \frac{f \cdot 60}{p} = \frac{50 \times 60}{8} = 375 \text{ min}^{-1}$$

$f = 50 \text{ Hz}$ - die Netzfrequenz

$p = 8$ - Polpaare [1]

Für die drei charakteristischen Werte der Fallhöhe H_{nt}^{\max} , H_{nt}^{\min} и H_{nt}^b werden die entsprechenden umgerechneten Drehzahlen berechnet.

$$n'_{l,\min} = \frac{n \cdot D_1}{\sqrt{H_{nt}^{\max}}} = \frac{375 \times 1,90}{\sqrt{97,813}} = 72,04 \text{ min}^{-1}$$

$$n'_{l,ep} = \frac{n \cdot D_1}{\sqrt{H_{nt}^b}} = \frac{375 \times 1,90}{\sqrt{85,48}} = 77,06 \text{ min}^{-1}$$

$$n'_{l,\max} = \frac{n \cdot D_1}{\sqrt{H_{nt}^{\min}}} = \frac{375 \times 1,90}{\sqrt{60,813}} = 91,35 \text{ min}^{-1}$$

Bestimmung der zulässigen Saughöhe

Die zulässige Saughöhe ist einer der Grundparameter der reaktiven Turbinen. Diese Höhe ist zwischen dem Turbinenteil, wo Kavitationsprozesse möglich sind, und dem tiefsten Unterwasserstand.

Von der Betriebsmuschelkurve der Turbine PO115 wird der kritische Kavitationsbeiwert $\sigma = 0,1$ abgelesen. Unter Berücksichtigung des Sicherheitskoeffizients k_σ wird der tatsächliche Kavitationsbeiwert ermittelt:

$$k_\sigma = (1,1 \div 1,2), k_\sigma = 1,1$$

$$\sigma_T = k_\sigma \cdot \sigma = 1,1 \cdot 0,1 = 0,11$$

Die maximale Saughöhe wird nach der folgenden Formel berechnet:

$$H_s^{\max} \leq 10 - \frac{\nabla UWS}{900} - \sigma_T \cdot H_{nt}^{\max}$$

$$H_s = 10 - \frac{325}{900} - 0,11 \times 97,813 = -1,12 \text{ m}$$

$$\Rightarrow H_s^{\max} \leq -1,07 \text{ m}$$

Bedingungsüberprüfung:

$$\nabla \text{Turbinenachse} = 323,5 \text{ m}$$

$$\nabla UWS = 325 \text{ m}$$

$$H_s^{\max} = \nabla \text{Turbinenachse} - \nabla UWS = 323,5 - 325 = -1,5 \text{ m} < -1,12 \text{ m}$$

Konstruktive Gestaltung und Anordnung der Turbinenspirale und des Saugrohres

Bei Stahlspirale werden der Durchmesser der Spirale R in Draufsicht und die Durchmesser des kreisförmigen und des elliptischen Querschnitts bzw. ρ und ρ_1 durch folgende Beziehungen bestimmt:

$$R = c.D_1 ; \rho = E.D_1 ; \rho_1 = k.\rho$$

Die Bemessungen C, E und K werden von [1], Abb. 7.17 abgelesen.

$$C = f(\varphi) ; E = f(\varphi) ; K = f(\varphi)$$

| φ° | 30° | 75° | 120° | 165° | 210° | 255° | 300° | 345° |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| C [m] | 0,98 | 1,22 | 1,39 | 1,51 | 1,62 | 1,71 | 1,8 | 1,9 |
| R [m] | 1,862 | 2,38 | 2,641 | 2,869 | 3,249 | 3,249 | 3,42 | 3,61 |
| E [m] | 0,23 | 0,33 | 0,37 | 0,4 | 0,44 | 0,48 | 0,53 | 0,57 |
| ρ [m] | 0,437 | 0,627 | 0,703 | 0,76 | 0,836 | 0,912 | 1,007 | 1,083 |
| K [m] | 0,25 | 0,53 | 0,75 | 0,92 | 1 | - | - | - |
| ρ_1 [m] | 0,109 | 0,332 | 0,528 | 0,699 | 0,836 | - | - | - |

Tabelle 5 - Bemessungen der Turbinenkammer bei $D_1 = 1,90$ m

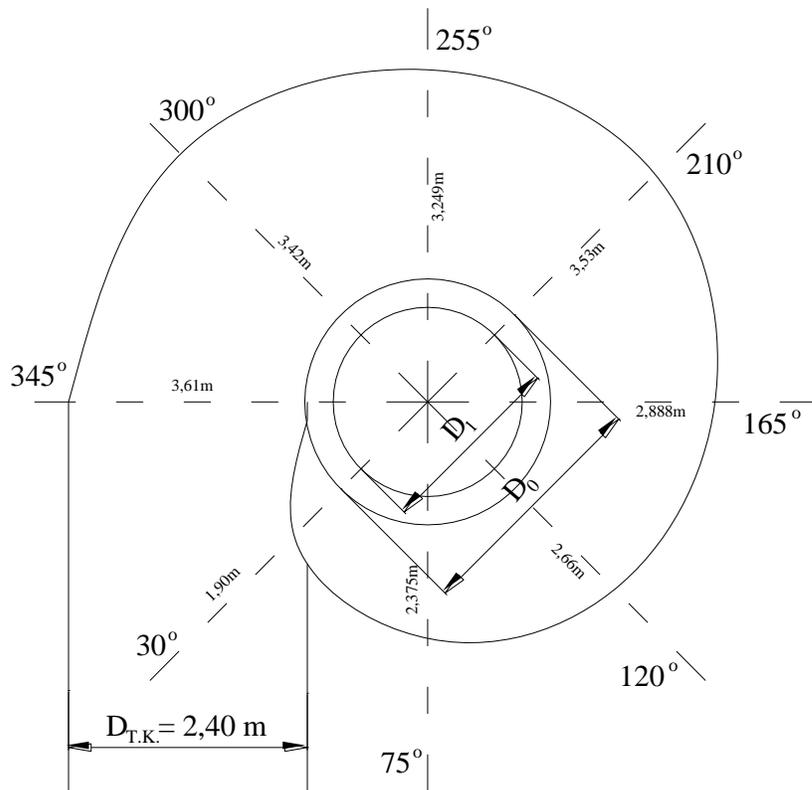


Abb.4 Schema der Stahlspirale

Vom [1] Tabelle. 7.8 ist der Saugrohrtyp 4H gewählt. Die relativen und die berechneten tatsächlichen Bemessungen sind in der Tabelle 6 erfasst.

| Saugrohr 4H | h [m] | h_1 [m] | h_2 [m] | h_3 [m] | h_4 [m] | L [m] | L_1 [m] | B [m] | h_5 [m] | h_6 [m] |
|-------------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|--------------|
| $D=1\text{m}$ | 2,5 | 0,245 | 0,015 | 0,888 | 1,352 | 4,5 | 1,75 | 2,74 | 1,31 | 0,67 |
| $D_1=1,9\text{m}$ | 4,75 | 0,466 | 0,029 | 1,687 | 2,569 | 8,55 | 3,325 | 5,206 | 2,489 | 1,273 |

Tabelle 6 – Bemessungen des Saugrohres

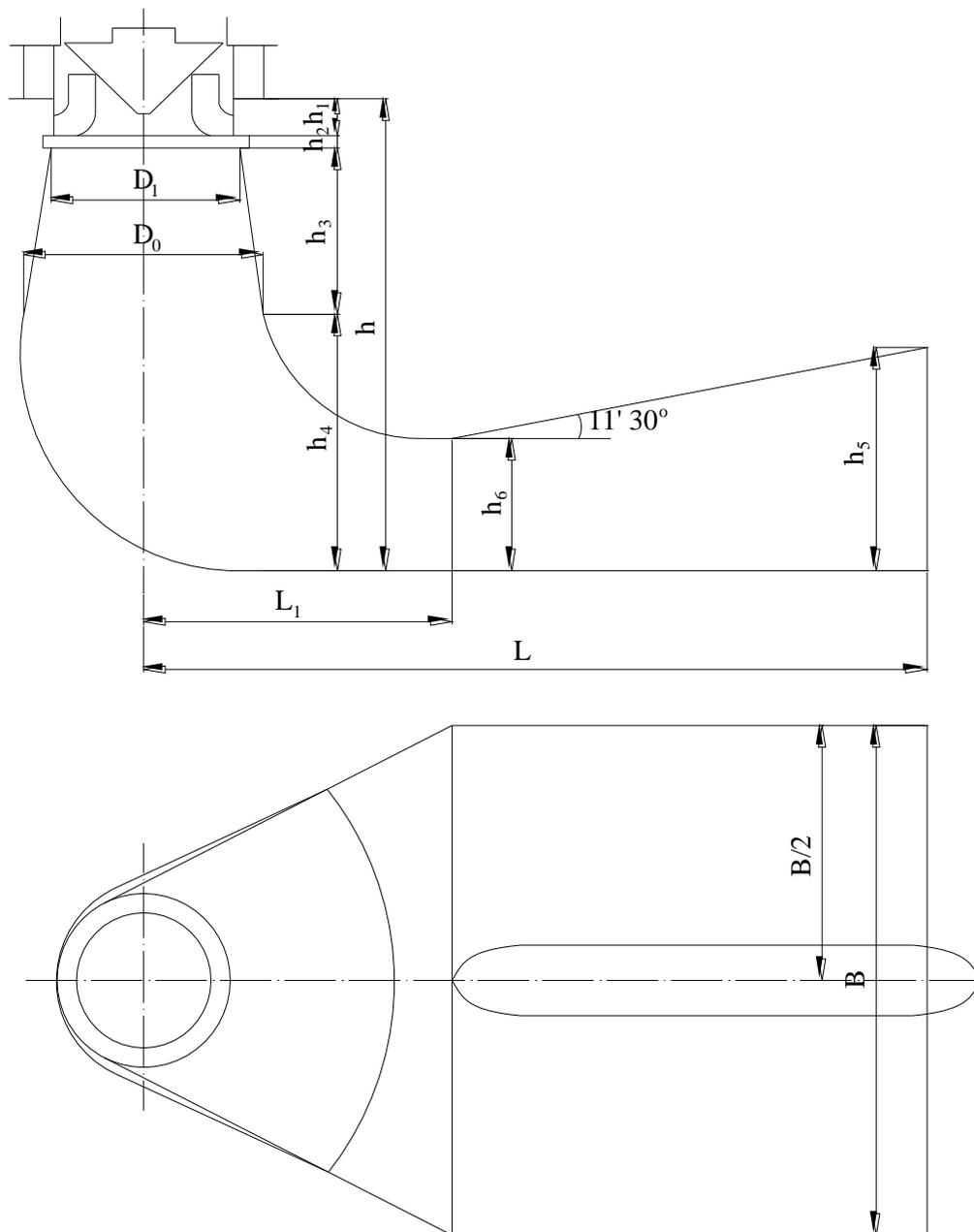


Abb.5 Schema des Saugrohres

Ermittlung der Turbinen- und der Laufradmasse

Die Massen der Turbine und des Laufrads hängen von der Leistung Wasserdurchflussmenge ab. Genauer gesagt hängt die Masse vom Laufraddurchmesser ab.

$$G_T = k_{SK} \cdot 3,6 \cdot D_1^{2,5} \cdot H_{nt}^{\max 0,2} = 1,0 \cdot 3,6 \cdot 1,9^{2,5} \cdot 97,813^{0,2} = 44,76 \text{ t}$$

k_{SK} – Beiwert, der die Spiralkammermasse berücksichtigt

$k_{SK} = 1,0$ – für Spiralkammer aus Stahl

$$G_{LR} = k_{LR} \cdot D_1^3 = 0,6 \cdot 1,9^3 = 4,12 \text{ t}$$

$k_{LR} = 0,55 \div 0,65$, Angenommen $k_{LR} = 0,6$

Ermittlung der korrigierten Werte

$$n'_{1,0} = n'_{1,b} = \frac{n \cdot D_1}{\sqrt{H_{nt}^b}} = \frac{375 \cdot 1,90}{\sqrt{85,48}} = 77,06 \text{ min}^{-1}$$

$$Q'_{1,0} = Q'_{1,b} = \frac{Q}{D^2 \cdot \sqrt{H_{nt}^b}} = \frac{36}{1,90^2 \cdot \sqrt{85,48}} = 1,079 \text{ m}^3 / \text{s}$$

4.2. Auswahl des Generators [1]

Die Auswahl des Generators basiert auf der Synchrondrehzahl und der nominalen Wirkleistung oder der vollen Scheinleistung bei angenommenem Leistungsbeiwert $\cos \varphi = 0,8$.

$$P_{\text{Ausbau}} = 9,81 \cdot \eta_T \cdot \eta_G \cdot Q_{\text{Ausbau}} \cdot H_{nt}^b \quad [\text{kW}]$$

$$P_{\text{Ausbau}} = 49780 \text{ kW}$$

$\Rightarrow P_{\text{Ausbau}} = 24890 \text{ kW}$ für eine Turbine

$$S = \frac{P_{\text{Ausbau}}}{\cos \varphi} = \frac{24890}{0,8} = 31112,5 \text{ kVA}$$

$$\left. \begin{array}{l} S = 31112,5 \text{ kVA} \\ n_{\text{synchron}} = 375 \text{ min}^{-1} \end{array} \right\} \text{CB425 / 122 - 16}$$

Von CB425/122 - 16 wird gelesen:

$D_a = 425 \text{ cm}$ – Außendurchmesser der aktiven Höhe des Stators

$L_a = 122 \text{ cm}$ – aktive Höhe des Stators und Rotors

16-polig (8 Polpaare)

| Rotor- durchmesser D_i [m] | Synchron- drehzahl n_c [min^{-1}] | Schein- leistung S [kVA] | Wirk- leistung P_a [kW] | Wirkungs- grad [%] | Schwung- moment GD^2 [tm^2] | Rotormasse G_R [t] | Generator- masse G_G [t] |
|------------------------------------|--|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------|--|-------------------------|----------------------------------|
| 3,6 | 375 | 31 250 | 25 000 | 97 | 570 | 90 | 210 |

Tabelle 7 - Parameter des ausgewählten Analoggenerators [1], Tabelle 7.10

Ermittlung der Grundparameter des erforderlichen Generators

- Durchmesser des Rotors

$$D_i = D_{i,\text{analog}} = 3,60 \text{ m}$$

Der erforderliche Generator hat denselben Durchmesser als der Analoggenerator. Bei den anderen Parametern wird mit einem Korrekturfaktor gerechnet.

$$k = \frac{S}{S_{\text{analog}}} = \frac{31112,5}{31250} = 0,9956$$

- Aktive Höhe des Rotors und des Stators

$$L_a = k \cdot L_{a,\text{analog}} = 0,9956 \times 122 = 121,46 \text{ cm}$$

- Schwungmoment des Rotors

$$GD^2 = k \cdot GD_{\text{analog}}^2 = 0,9956 \times 570 = 567,49 \text{ tm}^2$$

- Gewicht des Rotors

$$G_R = k \cdot G_{p,\text{analog}} = 0,9956 \times 90 = 89,60 \text{ t}$$

- Gesamtgewicht des Generators

$$G_G = k \cdot G_{G,\text{analog}} = 0,9956 \times 210 = 209,08 \text{ t}$$

Der erforderliche Generator CB425/122 – 16

5. Untersuchung der instationären Betriebszustände von WKW Sarnitsa

5.1. Allgemeine Erklärungen

5.2. Grundparameter des hydraulischen Druckstoßes in der DRL

- 5.2.1. Geometrie des Mediums
- 5.2.2. Ausbreitungsgeschwindigkeit der Druckwelle
- 5.2.3. Massenträgheitskonstante des Generators
- 5.2.4. Schließzeit des Leitapparates
- 5.2.5. Phase des hydraulischen Druckstoßes
- 5.2.6. Turbinenbeiwert

5.3. Numerische Modellierung vom hydraulischen Druckstoß in der DRL

- 5.3.1. Ermittlung der maximalen Druckerhöhung bei Laständerung von 100% auf 0%
- 5.3.2. Ermittlung der maximalen Druckminderung bei Laständerung von 100% auf 0%

5.1. Allgemeine Erklärungen

Das Ziel der hydraulischen Berechnungen ist die Bestimmung der maximalen Erhöhung der Druckhöhe in der Druckrohrleitung. Maßgebend für die statische Bemessung der Auskleidung ist genau dieser Wert der Druckhöhe. Weiter werden Berechnungen für die ungünstigen Betriebsfälle gemacht. Der riskanteste hydraulische Druckstoß ist dieser, bei dem der Generator vom Netz fällt bzw. die Druckerhöhung maximal ist.

Im physikalischen Sinne verlaufen der Druckstoß in der Druckrohrleitung und die Schwankungsprozesse im Tunnel-Wasserschloss System zusammen. Eine gemeinsame Untersuchung der instationären Prozesse hat den realistischsten Charakter. Aufgrund des Fehlens von Software, die eine Modellierung von instationären Prozessen im ganzen Triebwassersystem ermöglicht, werden in diesem Fall die allgemein anerkannten Verfahren der Annäherung verwendet. Dabei werden die zwei Prozesse unabhängig voneinander behandelt. Das erfordert einige Annahmen, die die Ergebnisse von numerischen Methoden den aktuellen Parametern des hydraulischen Druckstoßes nähern. Besonders wichtig ist, dass ein hoher Sicherheitsgrad der Ergebnisse gewährleistet wird.

Angenommen wird, dass die zulässige dynamische Belastung 30 % der maximalen Nettofallhöhe ist und dieser Maximalwert nicht überschritten werden darf. Als Ergebnis der Untersuchung wird die erforderliche Schließzeit des Verschlussorgans am Ende der Druckrohrleitung ermittelt.

Algorithmus der Berechnungen

Im Teil 5.2: Ermittlung der Parameter des Druckstoßes in der Druckrohrleitung. Schließzeit, Druckstoß – direkt oder indirekt.

Im Teil 5.3: Numerische Modellierung vom hydraulischen Druckstoß in der Druckrohrleitung bei vorausgesetzter Randbedingung am Anfang - ein Behälter mit konstantem Wasserstand.

Im Teil 5.3.1: Ermittlung der maximalen Druckerhöhung bei einer Laständerung von 100% auf 0% für die Schließzeit des Leitapparates und bei konstantem Wasserstand im Behälter gleich:

$$\nabla \text{Stauziel} - \Delta h_{\text{Entnahme}} - \Delta h_{\text{DS}}$$

Die Druckerhöhung darf nicht mehr als 30 % der maximalen Nettofallhöhe überschreiten.

Im Teil 5.3.2: Ermittlung der maximalen Druckminderung bei einer Laständerung von 50% auf 100% für die Schließzeit des Leitapparats und bei konstantem Wasserstand im Behälter gleich:

$$\nabla \text{Absenkziel} - \Delta h_{\text{Entnahme}} - \Delta h_{\text{DS}}$$

Überprüfung gegen Vakuum - die Grenzlinie der minimalen Druckhöhe darf nicht die Linie der Rohrleitung überschreiten.

5.2. Grundparameter des hydraulischen Druckstoßes in der DRL

5.2.1. Geometrie des Mediums

In vorläufigen Berechnungen wurde ermittelt:

$$L_{\text{DRL}} = 7 + 9 + 30 + 161,33 = 207,33 \text{ m}$$

$$V_{\text{DRL}} = 3,98 \text{ m/s}$$

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

$$D_{\text{DRL}} = 4,80 \text{ m}$$

Vorläufig angenommen für die Parameter der Auskleidungs- und Abstützungselemente werden:

$$\delta_{\text{panz}} = 2 \text{ cm} = 0,02 \text{ m}$$

$$d_b = 30 \text{ cm} = 0,3 \text{ m}$$

$$d_{\text{sb}} = 5 \text{ cm} = 0,05 \text{ m}$$

$$l_{\text{inj.zone}} = 0,6 \cdot D_{\text{DRL}} = 0,6 \cdot 4,80 = 2,88 \text{ m}$$

$$R = D / 2 = 480 / 2 = 240 \text{ cm}$$

$$R_1 = R + \delta_{\text{panz}} = 240 + 2 = 242 \text{ cm}$$

$$R_2 = R + \delta_{\text{panz}} + d_b$$

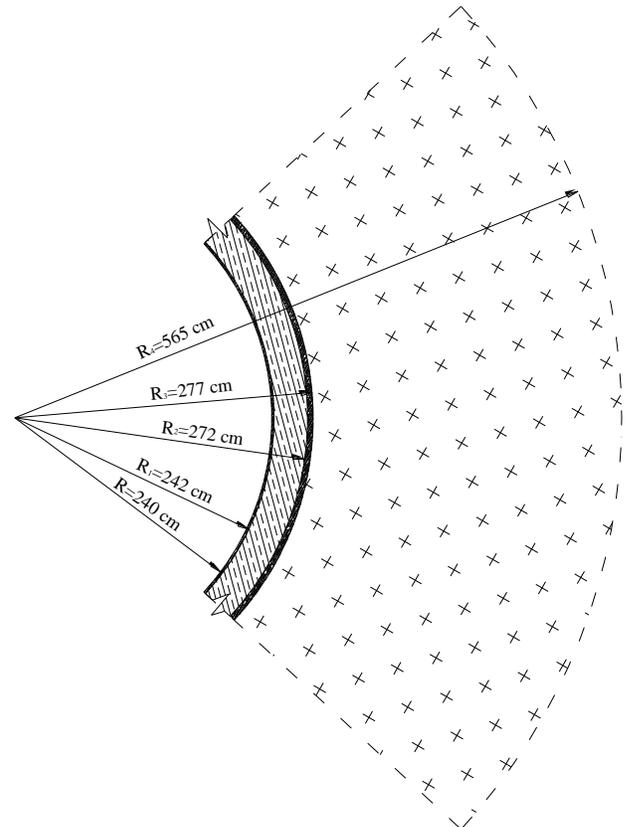
$$R_2 = 240 + 2 + 30 = 272 \text{ cm}$$

$$R_3 = R + \delta_{\text{panz}} + d_b + d_{\text{sb}}$$

$$R_3 = 240 + 2 + 30 + 5 = 277 \text{ cm}$$

$$R_4 = R + \delta_{\text{panz}} + d_b + d_{\text{sb}} + l_{\text{inj.zone}}$$

$$R_4 = 240 + 2 + 30 + 5 + 288 = 565 \text{ cm}$$



5.2.2. Ausbreitungsgeschwindigkeit der Druckwelle

$$a = \frac{c}{\sqrt{1 + \frac{k_v}{k_Q}}} \quad [\text{m/s}]$$

$c = 1425 \text{ m/s}$ – die Ausbreitungsgeschwindigkeit der akustischen Wellen im Wasser

$k_v = 2100 \text{ MPa}$ – Volumenelastizitätskoeffizient vom Wasser

k_Q – Koeffizient der relativen Querschnittsänderung der Rohrleitung wegen des Drucks

Bei angenommen Auskleidungselementen wird für k_Q nach der Formel von Prof. N. L. Kurek berechnet.

$$\kappa_Q = \frac{1}{2}(A_0 + B_1 + B_2 + C + N)$$

Wo:

$$A_0 = \frac{E_{St} \cdot \delta_{panz}}{R_1} \quad \rightarrow \text{für Panzerung}$$

$$B_1 = \frac{E_b \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}}{1 - \mu_b^2} \quad \rightarrow \text{für Füllbeton}$$

$$B_2 = \frac{E_{sb} \cdot \ln \frac{R_3}{R_2}}{1 - \mu_{sb}^2} \quad \rightarrow \text{für Spritzbeton}$$

$$C = \frac{E_{F,inj} \cdot \ln \frac{R_4}{R_3}}{1 - \mu_{F,inj}^2} \quad \rightarrow \text{für injizierte Felsschicht}$$

$$N = \frac{E_F}{1 + \mu_F} \quad \rightarrow \text{für natürlichen Fels}$$

$E_{St} = 200\,000$ MPa – Elastizitätsmodul der linearen Verformung vom Stahl

$E_b = 30\,000$ MPa – Elastizitätsmodul der linearen Verformung vom Beton B25, natürlich verhärtet

$E_F = 100 \cdot \kappa_0(1 + \mu_F)$ – mittleres Elastizitätsmodul der linearen Verformung vom Fels

$\kappa_0 = 500$ N/cm² – Elastizitätskoeffizient der relativen Rückwirkung

$E_F = 100 \cdot \kappa_0(1 + \mu_F) = 100 \cdot 500 \cdot (1 + 0,28) = 64\,000$ N/cm² = 640 MPa

$\mu_F = 0,28$ – Poissonzahl vom Fels

$\mu_b = 0,20$ – Poissonzahl vom Beton

$\mu_{F,inj} = 0,22$ – Poissonzahl vom injizierten Fels

Angenommen: $\frac{E_{F,inj}}{E_F} = 1,2 \Rightarrow E_{F,inj} = 1,2 \cdot E_F = 1,2 \cdot 640 = 768$ MPa

$$A_0 = \frac{E_{cr} \cdot \delta_{cr,6p}}{R_1} = \frac{2,0 \times 10^5 \times 2}{242} = 1652,89 \text{ MPa}$$

$$B_1 = \frac{E_b \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}}{1 - \mu_b^2} = \frac{3,0 \times 10^5 \times \ln \frac{272}{242}}{1 - 0,2^2} = 36520,11 \text{ MPa}$$

$$B_2 = \frac{E_{sb} \cdot \ln \frac{R_3}{R_2}}{1 - \mu_{sb}^2} = \frac{3,0 \times 10^5 \times \ln \frac{277}{272}}{1 - 0,2^2} = 5692,32 \text{ MPa}$$

$$C = \frac{E_{F,inj} \cdot \ln \frac{R_4}{R_3}}{1 - \mu_{F,inj}^2} = \frac{768 \times \ln \frac{565}{277}}{1 - 0,22^2} = 575,28 \text{ MPa}$$

$$N = \frac{E_F}{1 + \mu_F} = \frac{640}{1 + 0,28} = 500 \text{ MPa}$$

$$\kappa_Q = \frac{1}{2} (A_0 + B + C + N) = \frac{1}{2} \times (1652,89 + 36520,11 + 5692,32 + 575,28 + 500) = 22470,3 \text{ MPa}$$

$$a = \frac{c}{\sqrt{1 + \frac{k_v}{k_Q}}} = \frac{1425,0}{\sqrt{1 + \frac{2 \cdot 10^4}{22470,3}}} = 1036,5 \text{ m/s}$$

Für die Prozessuntersuchung werden einige vereinfachende Annahmen gemacht. In diesem Fall wird eine lineare Veränderung des Drehmoments der Turbine angenommen.

5.2.3. Massenträgheitskonstante des Generators [1]

$$T_a = \frac{GD^2 \cdot n_{\text{synchron}}^2 \cdot \eta_G}{365 \cdot P_a} = \frac{570 \times 0,97 \times 375^2}{365 \times 25000} = 8,52 \text{ s}$$

$$GD^2 = 570 \text{ tm}^2$$

$$N_{\text{synchron}} = 375 \text{ min}^{-1}$$

$$\eta_G = 0,97$$

$$P_a = 25 \text{ 000 kW}$$

5.2.4. Schließzeit des Leitapparats

$$T_s = 2 \cdot \Delta\beta \cdot T_a$$

Angenommen: $\Delta\beta = 0,5$ – zulässige Drehzahlerhöhung

$$T_s = 2 \cdot \Delta\beta \cdot T_a = 2 \times 0,5 \times 8,52 = 8,52 \text{ s}$$

5.2.5. Phase des hydraulischen Druckstoßes (Reflexionszeit der Druckwelle) [1]

$$T_{\text{ph}} = \frac{2 \cdot L_{\text{DRL}}}{a} = \frac{2 \times 207,33}{1036,5} = 0,4$$

$$T_{\text{ph}} = 0,4 \text{ s} < T_s = 8,52 \text{ s} \Rightarrow \text{indirekter Druckstoß}$$

5.2.6. Turbinenbeiwert [1]

Dieser Beiwert kennzeichnet die Auswirkung der Drehgeschwindigkeit der Turbine auf die Durchflussänderung. Der Turbinenbeiwert wird von der Muschelkurve der Turbine entnommen.

γ ist der Winkel zwischen der senkrechten Gerade zu $Q'_{1,0}$ und der Linie der maximalen Öffnung vom Leitapparat.

$$k = \frac{\Delta Q'_1 / Q'_{1,0}}{\Delta n'_1 / n'_1} = -\text{tg } \gamma; \quad \gamma = 9,87^\circ \Rightarrow -\text{tg } \gamma = k = -0,17$$

5.3. Numerische Modellierung vom hydraulischen Druckstoß in der DRL

Bei einem Lastausfall des Generators, wegen des verminderten Widerstandes, erhöht das Aggregat seine Drehgeschwindigkeit. Da sich die Drehzahl nicht zu viel erhöhen darf, beginnt der automatische Regler den Leitapparat zu schließen, um den Wasserzufluss zum Laufrad zu vermindern. Dies führt zu einem Druckstoß in der Druckrohrleitung, welcher in bestimmten Grenzen in Abhängigkeit von der Rohrfestigkeit gehalten werden muss.

Die angenommen Randbedingungen: Am Anfang der Druckrohrleitung ist ein Behälter mit konstantem Wasserstand gleich:

$$\nabla \text{Stauziel} / \nabla \text{Stauziel} - \Delta h_{\text{Entnahme}} - \Delta h_{\text{DS}}$$

Die Randbedingung am Ende der Druckrohrleitung berücksichtigt die Längs- und Ortverluste.

Die Untersuchung der Druckänderung in den einzelnen Punkten der Druckrohrleitung und der Wassermengen sind mit der Software HIUD durchgeführt. Die Eingabedaten sind in Textfiles.

Druckhöhe am Anfang der DRL

Last 100% – 0%

$$H_{\text{br}}^{\text{max}} = \nabla \text{Stauziel} - \Delta h_{\text{Entnahme}} - \Delta h_{\text{DS}}^{\text{min}} - \text{UWS} = 425 - 0,112 - 0,828 - 325 = 99,06 \text{ m}$$

Last 50% – 100%

$$H_{\text{br}}^{\text{min}} = \nabla \text{Absenkziel} - \Delta h_{\text{Entnahme}} - \Delta h_{\text{DS}}^{\text{max}} - \text{UWS} = 388 - 0,112 - 1,224 - 325 = 61,664 \text{ m}$$

Druckhöhe am Ende der DRL

$$H_{\text{nt}}^{\text{max}} = H_{\text{br}}^{\text{max}} - \Delta h_{\text{DRL}} = 99,06 - 1,247 = 97,813 \text{ m} \Rightarrow \text{Last } 100\% - 0\%$$

$$H_{\text{nt}}^{\text{min}} = H_{\text{br}}^{\text{min}} - \Delta h_{\text{DRL}} = 61,664 - 1,247 = 60,417 \text{ m} \Rightarrow \text{Last } 50\% - 100\%$$

$$T_{\text{Ende}} = T_s + 2 \cdot T_{\text{Ph}} = 8,52 + 2 \times 0,4 = 9,32 \text{ s}$$

Mittlerer Durchmesser

$$v_m = \frac{\sum v_i \cdot l_i}{\sum l_i} = \frac{3,98 \times (7 + 161,33 + 9) + 30,3,97}{207,33} = 3,98 \text{ m/s}$$

$$F_m = \frac{Q}{v_m} = \frac{72}{3,98} = 18,1 \text{ m}^2$$

$$D_m = \sqrt{\frac{4 \cdot F_m}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 18,1}{\pi}} = 4,80 \text{ m}$$

5.3.1. Ermittlung der maximalen Druckerhöhung bei Laständerung von 100% auf 0%

$$\Delta H_{\max} = 0,3 \cdot H_{\text{nt}}^{\max} = 0,3 \times 97,813 = 29,34 \text{ m}$$

$$\Rightarrow H_{\text{dyn}}^{\max} = H_{\text{nt}}^{\max} + \Delta H_{\max} = 97,813 + 29,34 = 127,16 \text{ m}$$

Der Leitapparat wird nach einem linearen Gesetz geschlossen.

Eingabedatei für HIUD:

```
21 5 5 3
207.33 4.80 1036.5 0.012 72 99.06 97.813 0 9.32 4
3
0 8.52 9.32
1. 0. 0.
-0.17
```

21 - Anzahl der Berechnungspunkte
 5 - Schritte zum Ausdrücken
 5 - Randbedingung am Anfang - Behälter mit konstantem Wasserstand
 3 - Randbedingung am Ende - Francis-Turbine
 207,33 - Länge der Druckrohrleitung
 4,80 - Mittlerer Durchmesser der Druckrohrleitung
 1036,5 - Ausbreitungsgeschwindigkeit der Stoßwelle
 0,012 – Rauigkeitsbeiwert der Druckrohrleitung
 72 - Ausbauwassermenge
 99,06 - Maximale Bruttofallhöhe
 97,813 - Maximale Nettofallhöhe
 0 - Höhe der Turbinenachse im Vergleich zu ∇ UWS
 4 - Dauer der Berechnungsperiode
 3 - Randbedingung Nr. 3 - Francis-Turbine am Ende der Druckrohrleitung
 -0,17 - Turbinenbeiwert
 Detaillierte Ergebnisse vom Programm HIUD sind im Anhang angegeben.

| S, m | H _{min} , m | H _{max} , m |
|---------|----------------------|----------------------|
| 0,000 | 99,06 | 99,06 |
| 10,366 | 98,54 | 99,58 |
| 20,733 | 98,02 | 100,10 |
| 31,100 | 97,49 | 100,63 |
| 41,466 | 96,97 | 101,15 |
| 51,833 | 96,45 | 101,67 |
| 62,199 | 95,93 | 102,19 |
| 72,565 | 95,40 | 102,72 |
| 82,932 | 94,88 | 103,24 |
| 93,299 | 94,36 | 103,76 |
| 103,665 | 93,84 | 104,28 |
| 114,032 | 93,32 | 104,80 |
| 124,398 | 92,79 | 105,33 |
| 134,764 | 92,27 | 105,85 |
| 145,131 | 91,75 | 106,37 |
| 155,497 | 91,23 | 106,89 |
| 165,864 | 90,71 | 107,41 |
| 176,230 | 90,18 | 107,94 |
| 186,597 | 89,66 | 108,46 |
| 196,964 | 89,14 | 108,98 |
| 207,330 | 88,68 | 109,50 |

S – die Streckenlänge vom Anfang bis zum jeweiligen Punkt
H_{min} – Die minimale Druckerhöhung im jeweiligen Punkt
H_{max} – Die maximale Druckerhöhung im jeweiligen Punkt

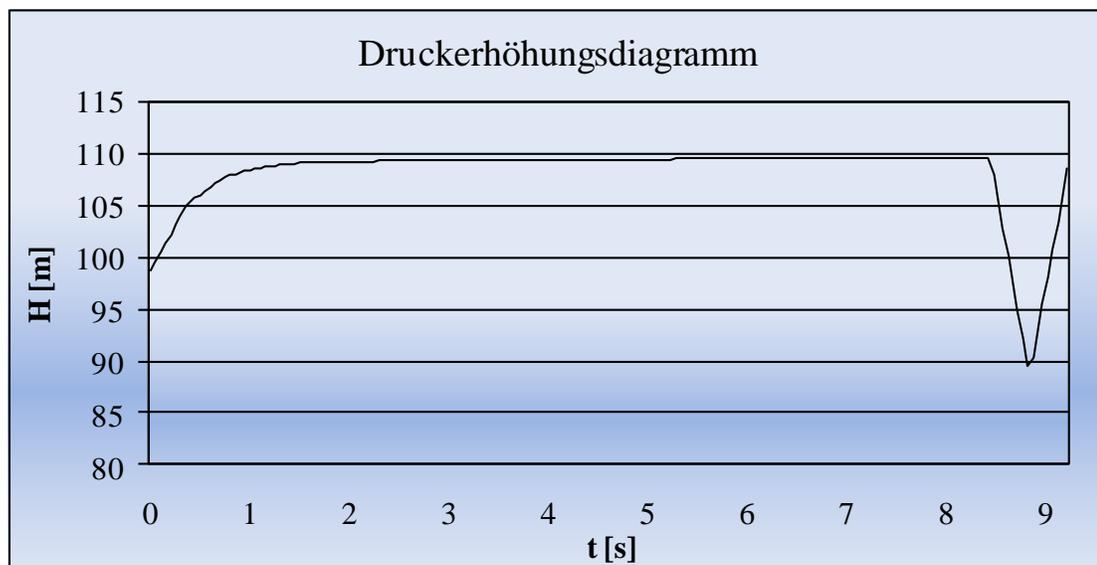


Abb.6 Die Druckerhöhung mit der Zeit

Schlussfolgerung aus der Untersuchung:

Bei der durchgeführten Untersuchung wurde bewiesen, dass die maximale Erhöhung des Drucks in den zulässigen Grenzen 30% der maximalen hydrostatischen Druckhöhe liegt.

Die Druckrohrleitung ist relativ kurz, deshalb ist sogar eine Schließung des Leitapparates in kürzerer Zeit möglich.

Zur Vermeidung einer gefährlichen Zunahme der Turbinendrehzahl, ist gegebenenfalls die Anordnung eines Synchronauslaufes erforderlich.

5.3.2. Ermittlung der maximalen Druckminderung bei Laständerung von 50% auf 100%

Die Rohre sind für den bestimmten optimalen Durchmesser und die Druckhöhe am Ende jeder Teilstrecke zu bemessen. Für die angenommene Rohrwandstärke soll auch eine Beulüberprüfung durchgeführt werden. Einbeulen der Rohrleitung ist dann möglich, wenn der Wasserstand im Wasserschloss so gering ist, dass Luft eingesaugt wird.

Eingabedatei HIUD:

21 5 5 3
207.33 4.80 1036.5 0.012 36 61.664 60.417 0 9.32 4
3
0 8.52 9.32
1. 2. 2.
-0.17

Detaillierte Ergebnisse vom Programm HIUD sind im Anhang angegeben.

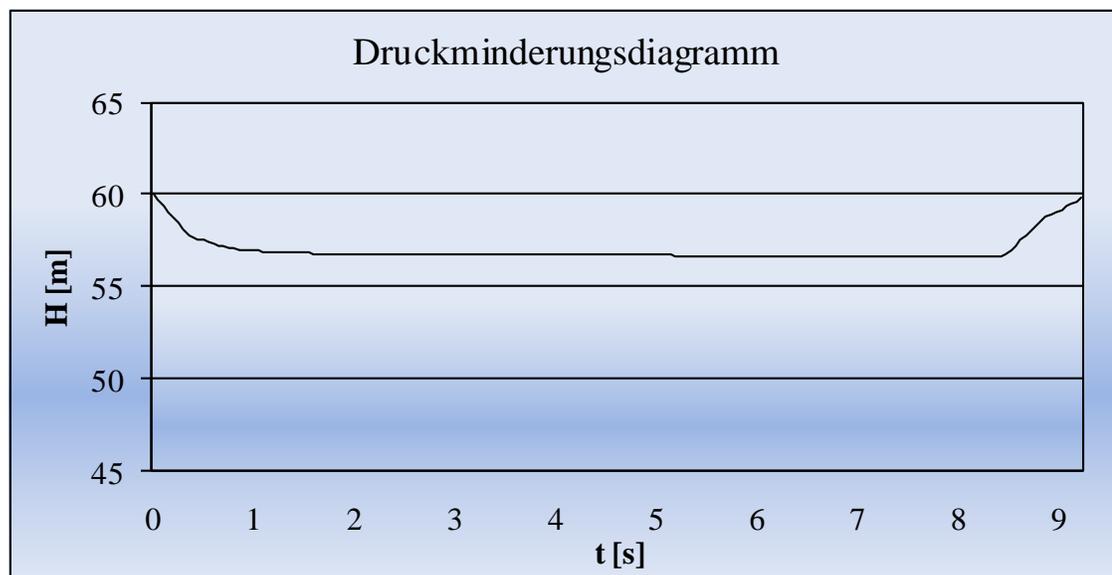


Abb.7 Die Druckminderung mit der Zeit

| S, m | H _{min} , m | H _{max} , m |
|---------|----------------------|----------------------|
| 0.000 | 61.66 | 61.66 |
| 10.366 | 61.41 | 61.60 |
| 20.733 | 61.15 | 61.54 |
| 31.100 | 60.90 | 61.48 |
| 41.466 | 60.64 | 61.41 |
| 51.833 | 60.39 | 61.35 |
| 62.199 | 60.13 | 61.29 |
| 72.565 | 59.88 | 61.23 |
| 82.932 | 59.62 | 61.17 |
| 93.299 | 59.37 | 61.10 |
| 103.665 | 59.11 | 61.04 |
| 114.032 | 58.86 | 60.98 |
| 124.398 | 58.60 | 60.92 |
| 134.764 | 58.35 | 60.85 |
| 145.131 | 58.10 | 60.79 |
| 155.497 | 57.84 | 60.73 |
| 165.864 | 57.59 | 60.67 |
| 176.230 | 57.33 | 60.60 |
| 186.597 | 57.08 | 60.54 |
| 196.964 | 56.82 | 60.48 |
| 207.330 | 56.57 | 60.42 |

S – die Streckenlänge vom Anfang bis zum jeweiligen Punkt

H_{min} – Die minimale Druckminderung im jeweiligen Punkt

H_{max} – Die maximale Druckminderung im jeweiligen Punkt

Schlussfolgerung aus der Untersuchung:

Die Überprüfung gegen Lufteinsaugen zeigt, dass die Grenzlinie der minimalen Druckhöhe die Linie der Rohrleitung nicht überschreitet.

6. Auswahl und Bemessung der Abstützungsstruktur

6.1. Methodik für die Auswahl und Bemessung von Abstützungsstruktur

- 6.1.1. Bestimmung des Bergdrucks
- 6.1.2. Auswahl von Konstruktionstypen
- 6.1.3. Bemessungsprinzipien

6.2. Bemessung der Konstruktionen in Streckenabschnitten

- 6.2.1. Bemessung von 1. und 5. Abschnitt
- 6.2.2. Bemessung von 2. Abschnitt
- 6.2.3. Bemessung von 3. Abschnitt
- 6.2.4. Bemessung von 4. Abschnitt
- 6.2.5. Bemessung von 6. Abschnitt

5.3. Methodik für die Auswahl und Bemessung der Abstützungskonstruktion [6]

Die Hauptaufgabe der Abstützungskonstruktion ist die Tunnelwände gegen Zerstörung unter dem Einfluss vom Bergdruck zu schützen und sie in einem sicheren Zustand bis zum Bauende der endgültigen Konstruktion zu halten. Die Abstützungskonstruktion kann entweder vorübergehend sein oder als Teil der Auskleidung bleiben. Die Konstruktion wird auf den vollen Bergdruck bemessen.

5.3.1. Bestimmung des Bergdrucks

Die Bergdruckauflast hat weitgehend einen zufälligen Charakter. Als Folge der Sprengarbeiten entsteht ein sekundärer Spannungszustand um das unterirdische Abbauprofil. Es bilden sich Risse in dieser Schwächungszone. Im oberen Teil des Abbauprofils entstehen Zugspannungen, die die Rissbildung in dem Firste verursachen. Die Eigengewichteinwirkung des Felsmassivs schafft die Voraussetzung für Störungen des Abbauprofils und genau diese Gewichtseinwirkung stellt den Bergdruck dar, der von der Abstützungskonstruktion aufgenommen werden soll. In Abhängigkeit von der Struktur des Felsmassivs und der Abbauverfahren äußert sich die Bergdruckeinwirkung vollständig oder nur teilweise.

Bei der Abbauweise ohne Sprengen ist die gestörte Zone wesentlich kleiner. Die Sprengarbeiten sind die Hauptvoraussetzung für die Stabilitätsabnahme des Felsmassivs um das Abbauprofil. Die Untersuchung der gestörten Zone ist durch Simulationsmethoden unmöglich, was eine Annahme über die Mächtigkeit des gestörten Bereichs voraussetzt. Es ist vorgesehen, dass die tatsächliche Mächtigkeit am Ort und im Laufe der Abbauarbeiten festgelegt wird. Bei wesentlichen Unterschieden werden die Bemessungsberechnungen unter Berücksichtigung der neu ermittelten Mächtigkeitswerte korrigiert.

Der Bergdruckuntersuchung zu Grunde liegt die Theorie von M. M. Protodjakonovs. Der Hauptindikator vom Felsmassiv ist der Festigkeitsfaktor f_{pr} . Der Bergdruck wird als Gewicht des Gesteins in der gestörten Zone definiert und nach Protodjakonov hat diese Zone eine parabolische Form. Es ist zulässig, dass der vertikale und horizontale Bergdruck als gleichmäßig verteilte Last mit einer Intensität gleich dem maximalen Wert in der parabolischen Verteilung berücksichtigt wird.

Bergdruckberücksichtigung nach dem Festigkeitsfaktor f_{pr}

[6] Wenn $f_{pr} < 4$,

In lockeren Gesteinkörpern verursacht die Gesteinauflast auch eine Störung in den Wänden des Abbauprofils. Dieser Prozess erfordert die Berücksichtigung einer Auflastkomponente in horizontaler Richtung.

[6] Wenn $f_{pr} \geq 4$,

Im Festgestein wirkt die Bergdruckauflast nur in vertikaler Richtung.

| Fall | | Vertikaler Bergdruck [kN/m ²] | Horizontaler Bergdruck [kN/m ²] |
|---------------------|-----------------|--|--|
| $h_a < 2 \cdot h_g$ | $f_{pr} \leq 4$ | $q = \gamma_F \cdot h_a$ | $e = \gamma_F \cdot (h_g + 0,5 \cdot D_2) \cdot \text{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right)$ |
| $h_a > 2 \cdot h_g$ | $f_{pr} \leq 4$ | $q = \beta \cdot \gamma_F \cdot h_g$ | |
| | $f_{pr} \geq 4$ | | |

Tabelle 8 – Berechnungsfälle [6]

Wo:

h_a – Abdeckung über das unterirdische Abbauprofil

h_g – Mächtigkeit des gestörten Bereichs

φ – innerer Reibungswinkel

γ_F – Wichte des Felsmassivs

$D \leq 5,5 \Rightarrow \beta = 0,7$ $\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \text{Nach Interpolation für } D \geq 5,54 \text{ m} \Rightarrow \beta = 0,706$

5.3.2. Auswahl von Konstruktionstypen

Die Stabilitätssicherheit des Abbauprofils kann in verschiedenen Weisen bereitgestellt werden. Der Abstützungstyp wird nach einigen Faktoren gewählt, die wichtigsten sind:

- Technische Möglichkeiten
- Baukosten
- Bauverfahren

In Abhängigkeit von der Festigkeit vom Felsmassiv, der Querschnittsfläche und der vorgesehenen Abbauausrüstung werden folgende Abstützungskonstruktionen ausgewählt:

| No | L [m] | RMR | f_{pr} | k_0 [N/cm ²] | Abstützungskonstruktion |
|----|----------|-----|----------|-------------------------------|--|
| 1 | 26,60 | 35 | 2-3 | 1000-1500 | Swellex Gebirgsanker und bewehrter Spritzbeton |
| 3 | 35,47 | 50 | 3-4 | 1500-2000 | |
| 5 | 26,60 | 40 | 2-3 | 1000-1500 | |
| 2 | 17,73 | 25 | 1,5-2 | 500-1000 | Stützbögen und bewehrter Spritzbeton |
| 6 | 17,73 | 25 | 1,5-2 | 500-1000 | |
| 4 | 53,20 | 65 | 5-6 | 2500-3000 | Konventionelle mechanische Anker und unbewehrter Spritzbeton |

Tabelle 9 – Abstützungskonstruktion in den einzelnen Streckenabschnitten

5.3.3. Bemessungsprinzipien [3]

Die kombinierte Abstützungsstruktur bleibt als Bestandteil der künftigen Auskleidung in allen Abschnitten. Die Anfangsauflast soll von den Ankern vollständig aufgenommen werden. Deswegen ist bei ihrer Bemessung der Festigkeitsfaktor f_{pr} maßgebend, welcher unmittelbar nach den Abbauarbeiten gilt. Bei der Bemessung des Spritzbetons aber gilt ein anderer Festigkeitsfaktor f_{pr} , der die verbesserten Felsmassiveigenschaften nach Verankerungsarbeiten darstellt.

In Lockergestein und bei unsicheren Felsbedingungen kommt sehr oft die Kombination aus Stützbögen und bewehrtem oder unbewehrtem Spritzbeton zum Einsatz. Die Spritzbetonschicht wird auf den Stützbögen eingebaut, so wird eine räumliche hochtragfähige Schalenstruktur erstellt.

Das Abstützungselement aus Spritzbeton wird auf den Wänden des Abbauprofils unmittelbar nach Abbauarbeiten eingebaut. In Lockergestein wird der Beton auf Stahlgitter gespritzt. Das Einbringen verläuft unter hohem Druck und nach dem Austrocknen ergibt sich eine Struktur, die hohe Zugfestigkeit und gute Bindeeigenschaft besitzt. Die Spritzbetonschicht hat auch einen zusätzlichen Verfestigungseffekt, der vom Rissausfüllen hervorgerufen ist und eine Minderung der Spitzenwerte beim sekundären Spannungszustand verursacht. Unter statischem Gesichtspunkt stellt die Spritzbetonschicht ein zylindrisches Gehäuse dar, das in den Verankerungspunkten am Felsmassiv befestigt ist. Die Spritzbetonabstützung ist mit dem Eigengewicht des Betons und mit dem Gewicht des Gesteines vom gestörten Bereich belastet.

6.2. Bemessung der Konstruktionen in Streckenabschnitten

| No | L | RMR | f_{pr} | k_0 | Wichte γ | φ | Kohäsion c | Poisson- Zahl | Elastizitätsmodul der linearen Verformung E_F |
|----|-------|-----|----------|-------------------|--------------------|-----------|-----------------|------------------|--|
| | m | - | - | N/cm ² | g/cm ³ | ° | MPa | - | MPa |
| 1 | 26,60 | 35 | 2 | 1000 | 2,14 | 25,6 | 0,15 | 0,33 | 500 |
| 2 | 17,73 | 25 | 1,5 | 500 | 2,14 | 25,6 | 0,15 | 0,33 | 500 |
| 3 | 35,47 | 50 | 3 | 1500 | 2,19 | 31 | 0,35 | 0,28 | 2000 |
| 4 | 53,20 | 65 | 5 | 2500 | 2,19 | 31 | 0,40 | 0,28 | 2500 |
| 5 | 26,60 | 40 | 2 | 1000 | 2,14 | 25,6 | 0,15 | 0,33 | 500 |
| 6 | 17,73 | 25 | 1,5 | 500 | 2,14 | 25,6 | 0,15 | 0,33 | 500 |

Tabelle 10 – Physikalische und mechanische Eigenschaften des Felsmassivs

Ermittlung der Mächtigkeit des gestörten Bereichs

Wenn $f_{pr} < 4$, dann wird die Stärke des gestörten Bereichs nach folgender Formel berechnet:

$$h_g = \frac{b_1}{2 \cdot f_{pr}} \quad \text{/für die Abschnitte 1, 2, 3,5 und 6/}$$

$$b_1 = b + 2 \cdot h \cdot \operatorname{tg}(45^\circ - \frac{\varphi}{2})$$

Wo:

b - Breite des Abbauquerschnitts

h - Höhe des Abbauquerschnitts

Wenn $f_{pr} > 4$, dann wird die Mächtigkeit des gestörten Bereich nach folgender Formel berechnet:

$$h_{eg} = k_{eg} \cdot b$$

Wo:

k_a – Störungskoeffizient des Felsmassivs [3] /Tabelle 7 /

| No | f_{pr} | b_1 | D | h_s | γ_F | φ | β | q | | e | |
|----|----------|-------|------|-------|-------------------|-----------|---------|-------|-------|------|-------|
| | | m | m | m | kN/m ³ | ° | m | kN/m | MPa | kN/m | MPa |
| 1 | 2 | 8,22 | 5,54 | 2,06 | 21,4 | 25,6 | 0,706 | 30,54 | 0,031 | 5,29 | 0,005 |
| 2 | 1,5 | 8,22 | 5,54 | 2,74 | 21,4 | 25,6 | 0,706 | 41,40 | 0,041 | 6,09 | 0,006 |
| 3 | 3 | 8,81 | 5,54 | 1,47 | 21,9 | 31 | 0,706 | 22,71 | 0,023 | 7,14 | 0,007 |
| 4 | 5 | 0,55 | 5,54 | 0,55 | 21,9 | 31 | 0,706 | 8,57 | 0,009 | 0 | 0 |
| 5 | 2 | 8,22 | 5,54 | 2,06 | 21,4 | 25,6 | 0,706 | 31,05 | 0,031 | 5,33 | 0,005 |
| 6 | 1,5 | 8,22 | 5,54 | 2,74 | 21,4 | 25,6 | 0,706 | 41,40 | 0,041 | 6,09 | 0,006 |

Tabelle 11 – Bergdruckkomponenten in den einzelnen Abschnitten

/ D ist der Durchmesser des Abbauprofils für die vorläufig angenommenen Abmessungen von den Strukturelementen, die für die Ziele der Untersuchung von instationären Prozessen dienen. /

6.2.1. Bemessung von 1. und 5. Abschnitte

| No | L [m] | RMR | f_{pr} | k_0 [N/cm ²] | Abstützungs konstruktion |
|----|-------|-----|----------|----------------------------|--|
| 1 | 26,60 | 35 | 2 | 1000 | Swellex Gebirgsanker und bewehrter Spritzbeton |
| 5 | 26,60 | 40 | 2 | 1000 | |

/ Die Werte von f_{pr} und k_0 sind für den ungünstigsten Fall berücksichtigt/

[4] Beim Swellex Gebirgsanker handelt es sich um eine Kombination von mechanischer Verankerung und Reibung in der Kontaktfläche zwischen dem Anker und dem Fels. Je nach Felsfestigkeit hat der Anker einen entsprechenden Verankerungsmechanismus. In diesem Fall kommen die Gebirgsanker Swellex für die schwachen Bereiche zum Einsatz. Das bedeutet, dass die Tragfähigkeit des Ankers von den Spannungen im Anker - Fels Kontakt bestimmt werden.

Technische Daten

| Description | Unit | Swellex Premium IIne | | | | | Swellex Manganese IIne | | |
|---|------|----------------------|---------|---------|---------|---------|------------------------|---------|---------|
| | | Pm12 | Pm16 | Pm24 | Pm24C | Pm24H | Mn12 | Mn16 | Mn24 |
| Stahl Qualität Steel quality | | S275JR / S 355MC | | | | | S275JR | | |
| Minimale Bruchlast Minimum breaking load | kN | 110 | 160 | 240 | 200 | 200 | 110 | 160 | 200 |
| Minimale Fließlast Minimum yield load | kN | 100 | 140 | 200 | 190 | 190 | 90 | 120 | 180 |
| Minimale Bruchdehnung** Minimum elongation ** | % | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 20 | 20 | 20 |
| Fülldruck Inflation pressure | bar | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| Profildurchmesser Profile diameter | mm | 28.0 | 36 | 36 | 36 | 36 | 27.5 | 36 | 36 |
| Original Rohrdurchmesser Original tube diameter | mm | 41 | 54 | 54 | 54 | 54 | 41 | 54 | 54 |
| Wandstärke Wall thickness | mm | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 |
| Durchmesser obere Muffe Upper bushing diameter | mm | 28 | 38 | 38 | 38 | 38 | 28 | 38 | 38 |
| Durchmesser Füllmuffe Inflation bushing diameter | mm | 30 / 36 | 41 / 48 | 41 / 48 | 41 / 48 | - | 30 / 36 | 41 / 48 | 41 / 48 |
| Optimaler Bohrl Lochdurchmesser* Optimal hole diameters* | mm | 35 - 38 | 45 - 51 | 45 - 51 | 48 - 51 | 45 - 51 | 35 - 38 | 45 - 51 | 45 - 51 |
| Mögliche Bohrl Lochdurchmesser Range hole diameters | mm | 32 - 39 | 43 - 52 | 43 - 52 | 48 - 52 | 43 - 52 | 32 - 39 | 43 - 52 | 43 - 52 |
| Anschlussdurchmesser inkl. Schweißnaht Connection diameter incl. welds | mm | - | - | - | 43 | - | - | - | - |
| Erforderlicher Muffendurchmesser Recommended collar diameter | mm | - | - | - | - | 53 - 55 | - | - | - |

Abb. 7. Technische Daten von Gebirgsanker Swellex [4]

Ausgewählt ist Swellex Premium-Linie PM 16. Für die Ankerdimensionierung wurde der Methodik in *Rock Support and Reinforcement Practice in Mining, Villaescusa, Windsor & Thompson (eds), 1999 Balkema, Rotterdam* [5] gefolgt.

Die folgenden Berechnungen sind nach den Formeln von Hakansson und Li, 1997 durchgeführt:

$$q_l = \frac{K_s}{K_r + K_s} \left[P_i - \frac{K_s}{K_f} (P_{pm} - P_i) \right] \quad [\text{MPa}] - \text{Verzahnungskraft im Kontakt Anker - Fels}$$

$$K_s - \text{Steifigkeit in radialer Richtung; } K_s = \frac{K_b \cdot K_f}{K_b + K_f} \quad [\text{MPa}]$$

$$K_f - \text{Steifigkeit des ringförmigen Rohrs in radialer Richtung; } K_f = \frac{E_{st} \cdot t}{(1 - \nu_s^2) \cdot r_i} \quad [\text{MPa}]$$

K_b – Steifigkeit der Zunge, die eine Funktion des Rohranschwellensgrads ist (Abb. 8)

$$K_r - \text{Steifigkeit des Ankers; } K_r = \frac{E_r}{1 + \nu_r} \quad [\text{MPa}]$$

P_{pm} – maximaler Druck, der von der Pumpe eingebracht werden kann; $P_{pm} = 30 \text{ MPa}$

P_i – der Druck, der zum Rohranschwellen eingebracht wird; $P_i = 24 \text{ MPa}$

t – Rohrwandstärke; $t = 2 \text{ mm}$

r_i – der Profilradius; $r_i = 36/2 = 18 \text{ mm}$

E_s – Elastizitätsmodul der linearen Verformung vom Stahl

E_r – Elastizitätsmodul der linearen Verformung vom Fels; $E_r = 500 \text{ MPa}$

ν_s – Poisson-Zahl vom Stahl

ν_r – Poisson-Zahl vom Fels

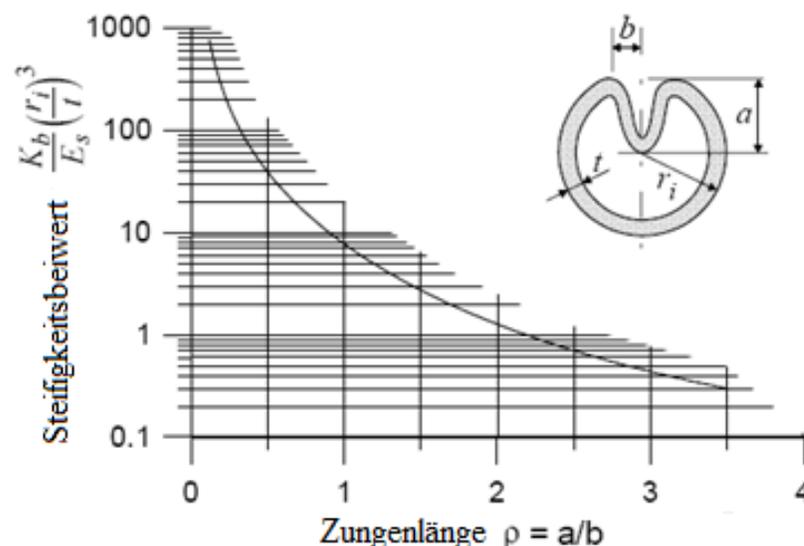


Abb.8. Diagramm für die Steifigkeitsbeiwert in Abhängigkeit vom Rohranschwellensgrads [5]

| $\rho=a/b$ | K_b | K_f | K_s | K_r | q_1 |
|------------|-----------|----------|----------|--------|-------|
| | MPa | MPa | MPa | MPa | MPa |
| 0,2 | 216049,38 | 25641,03 | 22920,76 | 416,67 | 18,30 |
| 0,5 | 11522,63 | 25641,03 | 7950,03 | 416,67 | 21,04 |
| 1 | 2304,53 | 25641,03 | 2114,48 | 416,67 | 19,64 |
| 1,5 | 777,78 | 25641,03 | 754,88 | 416,67 | 15,35 |
| 2 | 403,29 | 25641,03 | 397,05 | 416,67 | 11,67 |
| 2,5 | 201,65 | 25641,03 | 200,07 | 416,67 | 7,77 |
| 3 | 123,87 | 25641,03 | 123,27 | 416,67 | 5,47 |
| 3,5 | 86,42 | 25641,03 | 86,13 | 416,67 | 4,11 |

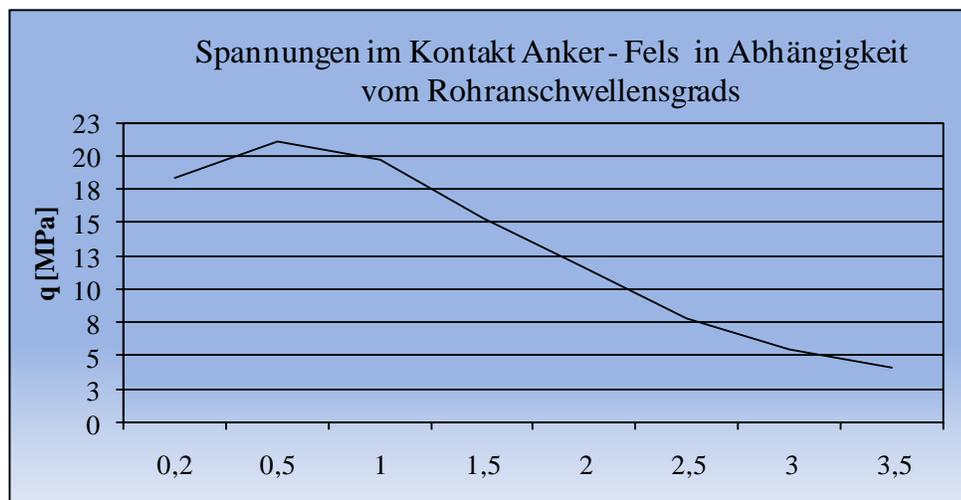


Abb.9. Spannungen im Kontakt Anker - Fels in Abhängigkeit vom Rohranswellensgrads

Tragfähigkeit des Ankers Swellex

Die Tragfähigkeit des Ankers wird durch die Kontaktspannungen und die Spannungen im Verankerungsmechanismus bestimmt. In Lockergestein sind nur die Kontaktspannungen zu berücksichtigen. Für q_2 wird in der nächsten Formel angenommen, dass es gleich Null ist, weil der Verankerungsmechanismus beim Lockergestein eine vernachlässbare Rolle spielt.

$$N_a = \pi \cdot d \cdot l_v \cdot (q_1 + q_2) \cdot \tan \varphi < T \text{ [kN]}$$

d – Bohrlochdurchmesser; angenommen: $d = 48 \text{ mm}$

φ – Reibungswinkel zwischen dem Anker und dem Fels; angenommen: $\varphi = 35^\circ$

T – Zugfestigkeit des Ankers, $T = 160 \text{ kN}$

$$l_v < \frac{T}{\pi \cdot d \cdot q_1 \cdot \tan \varphi} \text{ – Verankerungslänge}$$

| q_1 | l_v | N_a |
|-------------------|-------|--------|
| N/mm ² | m | kN |
| 18,30 | 0,083 | 160,00 |
| 21,04 | 0,072 | 160,00 |
| 19,64 | 0,077 | 160,00 |
| 15,35 | 0,099 | 160,00 |
| 11,67 | 0,130 | 160,00 |
| 7,77 | 0,195 | 160,00 |
| 5,47 | 0,277 | 160,00 |
| 4,11 | 0,369 | 160,00 |

Angenommen : $l_v = 0,35 \text{ m} \Rightarrow N_a = 151,73 \text{ kN}$

Ermittlung der Gesamtlänge des Ankers

$$l_a = h_g + l_v$$

$$l_a = h_g + l_v = 2,06 + 0,35 = 2,41 \text{ m}$$

Ermittlung des Abstands zwischen den Anker

$$a = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{4}{9} \cdot \gamma_F \cdot l_a = \frac{4}{9} \times 21,4 \times 2,41 = 22,92 < q = 30,54 \text{ kN/m}^2 \Rightarrow \\ a = \frac{l_a}{3} \cdot \sqrt{\frac{c}{q}} = \frac{2,41}{3} \times \sqrt{\frac{0,15 \times 1000}{30,54}} = 1,78 \text{ m} \\ a = \sqrt{\frac{N_a}{\gamma_F \cdot h_g}} = \sqrt{\frac{151,73}{21,4 \times 2,06}} = 1,86 \text{ m} \end{array} \right\} \text{ Angenommen : } a = 1,70 \text{ m}$$

c – Kohäsion des Felsmassivs , $c = 0,15 \text{ MPa}$

N_a – Tragfähigkeit des Ankers

$$N_a = 151,73 \text{ kN}$$

Ermittlung der Anzahl der Anker in einem Querprofil

$$n_{\text{Anker}} = \frac{L}{a} = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot a} = \frac{3,14 \times 5,54}{2 \times 1,70} = 5,12 \text{ \textcircled{p}}$$

Angenommen : $n = 5 - 6$ in Zickzackanordnung

Bemessung der Abstützungsschicht aus Spritzbeton

Bei kombinierten Abstützungselementen kommt die folgende Formel zum Einsatz:

$$d_{sb} = \frac{-F_a \cdot R_a + \sqrt{(F_a \cdot R_a)^2 + (0,0464 \cdot \gamma_F \cdot a^3 \cdot l^2 \cdot R_o)}}{0,333 \cdot R_o \cdot l} \quad [\text{cm}]$$

F_a – Querschnitt der Stahlbewehrung

R_a – Zugfestigkeit von Stahlbewehrung; $R_a = 5500 \text{ N/mm}^2$

a – Abstand zwischen Anker

l – Länge eines Fortschritts

f_k – Festigkeitsfaktor, der die verbesserten Felsmassiveigenschaften nach Verankerungsarbeiten darstellt; Abgelesen vom [6] /Abb. 319/

R_o – Zugfestigkeit von Spritzbeton; für $B_o 2,0$ ist $R_o = 2 \text{ MPa}$

Die Länge eines Abbaufortschritts bestimmt die Streckenlänge, nach der die Auskleidungsarbeiten für dieselbe Strecke beginnen. In Tabelle 12 sind die Ergebnisse für verschiedene Varianten gegeben. Die Länge des Fortschritts und die Bewehrungsnetzabmessungen variieren. Die Ergebnisse veranschaulichen, dass die Auswirkung dieser beiden Komponenten auf die Spritzbetonstärke vernachlässigbar ist.

Die Fortschrittswlänge soll auch in situ geprüft werden. Wenn ein wesentlicher Unterschied in den Ergebnissen festgestellt wird und die vorläufig bemessenen Abstützungsstrukturen nicht einsetzbar sind, dann werden neue Konstruktionen behandelt.

Für Bewehrung des Spritzbetons ist ein Netzwerk von Stomana Industry SA Q131 gewählt worden. Daten für das Bewehrungsnetz:

Quer- und Längsdraht aus BSt 500 M nach DIN 488, gemacht von kaltgewalztem Stab SAE1010.

Zugfestigkeit von BSt 500 M DIN 488 $R_a = 5500 \text{ N/mm}^2$

Blatt: 2,15 m Breite und 4,00 - 6,00 m Länge

Gewicht: 2,12 kg/m^2

| Abschnitt | 1 | 3 | 5 |
|------------------------|--------|--------|--------|
| f | 2 | 3 | 2 |
| f_k | 2,2 | 3,3 | 2,2 |
| $F_a (\phi 5) [cm^2]$ | 0,196 | 0,196 | 0,196 |
| $R_a [10^5 N/m^2]$ | 55000 | 55000 | 55000 |
| $R_H [10^5 N/m^2]$ | 200 | 200 | 200 |
| $\gamma_F [10 N/cm^3]$ | 0,0214 | 0,0219 | 0,0214 |
| a [cm] | 125 | 140 | 125 |
| $\phi 5 - 10/10$ | | | |
| l [cm] | 100 | 100 | 100 |
| d_{sp} | 10,31 | 7,52 | 10,31 |
| $\phi 5 - 15/15$ | | | |
| l [cm] | 150 | 150 | 150 |
| d_{sp} | 10,78 | 7,98 | 10,78 |
| $\phi 5 - 20/20$ | | | |
| l [cm] | 200 | 200 | 200 |
| d_{sp} | 11,03 | 8,23 | 11,03 |

Tabelle 12 - Bestimmung von der Mächtigkeit der Spritzbetonschicht

| Abschnitt | | 1 | 5 |
|-------------------------|----|-------|-------|
| d_{sp} | cm | 11 | 11 |
| Bewehrungsnetz $\phi 5$ | cm | 10/10 | 10/10 |

6.2.2. Bemessung von 2. Abschnitt

| No | L [m] | RM R | f_{pr} | k_0 [N/cm ²] | Abstützungskonstruktion |
|----|----------|---------|----------|-------------------------------|--------------------------------------|
| 2 | 17,73 | 25 | 1,5 | 500 | Stützbögen und bewehrter Spritzbeton |

Die Bemessung der Abstützungskonstruktion von den Abschnitten mit ungünstigen mechanischen Eigenschaften ist nach der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode (NÖT) durchgeführt worden. Zu diesem Zweck wird die Tragfähigkeit aller Abstützungselemente berechnet und anschließend mit den Kräften von äußeren Belastungen verglichen.

Tragfähigkeit des Spritzbetons

$$P_{sb} = \frac{d_{sb} \cdot \tau_{sb}}{r \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha)} = \frac{0,15 \times 4000}{2,97 \times \sin(32,2^\circ) \times \cos(32,2^\circ)} = 448 \text{ kN / m}^2$$

τ_{sb} – Scherfestigkeit von Spritzbeton; $\tau_{sb} = 4 \text{ MPa} = 4000 \text{ kN / m}^2$

$d_{sb} = 0,15 \text{ m}$ – zunächst angenommene Stärke von der Spritzbetonschicht

$$r = r_1 + d_{sb} + d_{panz} + d_{fb} = 2,40 + 0,15 + 0,02 + 0,40 = 2,97 \text{ m}$$

$$\alpha = 45^\circ - \frac{\varphi}{2} = 45^\circ - \frac{25,6^\circ}{2} = 32,2^\circ$$

Tragfähigkeit der Stützbögen

$$P_{srw} = \frac{d_{srw} \cdot \tau_{St}}{r \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha)} = \frac{0,00147 \times 368\,000}{2,97 \times \sin(32,2^\circ) \times \cos(32,2^\circ)} = 478 \text{ kN / m}^2$$

$$d_{srw} = \frac{F_{srw}}{l_{srw}} = 0,00174 \text{ m}$$

$F_{srw} = 0,00174 \text{ m}^2$ – Querschnittsfläche vom Profil I14

$l_{srw} = 1 \text{ m}$ – angenommen Abstand zwischen den Rippen

τ_{St} – Scherfestigkeit von Stahl St 52-3 N Din 17100

$$\tau_{St} \approx 0,75 \cdot R_u$$

$$\tau_{St} = 0,75 \times 490 \approx 368 \text{ MPa} = 368\,000 \text{ kN / m}^2$$

$R_u = 390 \text{ MPa}$ – Zugfestigkeit von Stahl St 52-3 N Din 17100

Tragfähigkeit vom Bewehrungsnetzwerk

Da die Tragfähigkeit vom Bewehrungsnetzwerk vernachlässigbar ist, wird sie nicht berücksichtigt. Sie kann als kleine Sicherheitsreserve bleiben.

Für Bewehrung des Spritzbetons ist ein Netzwerk von Stomana Industry SA Q131 gewählt.
Daten für das Bewehrungsnetz:

Quer- und Längsdraht aus BSt 500 M nach DIN 488, gemacht von kaltgewalztem Stab SAE1010.

Zugfestigkeit von BSt 500 M DIN 488 $R_a = 5500 \text{ N/mm}^2$

Blatt: 2,15 m Breite und 4,00 - 6,00 m Länge

Gewicht: $2,12 \text{ kg/m}^2$

$\varnothing 5 \text{ 10/10}$

Gesamttragfähigkeit der Abstützung

$$P_u = P_{sb} + P_{srw} + P_{nw} = 448 + 478 + 0 = 926 \text{ kN / m}^2$$

Kräfte von äußeren Belastungen

$$P_{\text{ä.b.}} = \frac{2 \cdot \sigma_y}{\xi + 1} = \frac{2 \times 1285,7}{2,52 + 1} = 750,51 \text{ kN / m}^2$$

$$\xi = \frac{1 + \sin(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)} = \frac{1 + \sin(25,6^\circ)}{1 - \sin(25,6^\circ)} = \frac{1,432}{0,568} = 2,52$$

ξ – Koeffizient der passiven Gegenwirkung

$$\sigma_{y,2} = \gamma \cdot h_a = 21,4 \times 60,08 = 1285,7 \text{ kN / m}^2$$

So dimensionierte Abstützungskombination von Spritzbeton und Stützbögen versichert ca. 24% Tragfähigkeitsreserve.

6.2.3. Bemessung von 3. Abschnitt

| No | L [m] | RM R | f _{pr} | k ₀ [N/cm ²] | Abstützungskonstruktion |
|----|----------|---------|-----------------|--|--|
| 3 | 35,47 | 50 | 3 | 1500 | Swellex Gebirgsanker und bewehrter Spritzbeton |

[4] Beim Swellex Gebirgsanker handelt es sich um eine Kombination aus mechanischer Verankerung und Reibung in der Kontaktfläche zwischen dem Anker und dem Fels. Je nach Felsfestigkeit hat der Anker einen entsprechenden Verankerungsmechanismus. Im Falle kommen die Gebirgsanker Swellex für die schwachen Bereiche zum Einsatz. Das bedeutet, dass die Tragfähigkeit des Ankers von den Spannungen im Anker - Fels Kontakt bestimmt werden.

Ausgewählt ist Swellex Premium-Linie PM 12 /Abb 7/. Die Ankerdimensionierung wurde der Methodik in *Rock Support and Reinforcement Practice in Mining, Villaescusa, Windsor & Thompson (eds), 1999 Balkema, Rotterdam* [5] nachempfunden.

Die folgenden Berechnungen sind nach den Formeln von Hakansson und Li, 1997 durchgeführt:

$$q_1 = \frac{K_s}{K_r + K_s} \left[P_i - \frac{K_s}{K_f} (P_{pm} - P_i) \right] \text{ [MPa]} - \text{Verzahnungskraft im Kontakt Anker - Fels}$$

$$K_s - \text{Steifigkeit in radialer Richtung; } K_s = \frac{K_b \cdot K_f}{K_b + K_f} \text{ [MPa]}$$

$$K_f - \text{Steifigkeit des ringförmigen Rohrs in radialer Richtung; } K_f = \frac{E_{st} \cdot t}{(1 - \nu_s^2) \cdot r_i} \text{ [MPa]}$$

K_b – Steifigkeit der Zunge, die eine Funktion des Rohranschwellensgrads der ist (Abb. 8)

$$K_r - \text{Steifigkeit des Ankers; } K_r = \frac{E_r}{1 + \nu_r} \text{ [MPa]}$$

P_{pm} – maximaler Druck, der von der Pumpe eingebracht werden kann; $P_{pm} = 30$ MPa

P_i – der Druck, der zum Rohranschwellen eingebracht wird; $P_i = 30$ MPa

t – Rohrwandstärke; $t = 2$ mm

r_i – der Profilradius; $r_i = 28/2 = 14$ mm

E_s – Elastizitätsmodul der linearen Verformung vom Stahl

E_r – Elastizitätsmodul der linearen Verformung vom Fels; $E_r = 2000$ MPa

ν_s – Poisson-Zahl vom Stahl

ν_r – Poisson-Zahl vom Fels

| $\rho=a/b$ | K_b | K_f | K_s | K_r | q_1 |
|------------|-----------|----------|----------|---------|-------|
| | MPa | MPa | MPa | MPa | MPa |
| 0,2 | 459183,67 | 32967,03 | 30758,71 | 1562,50 | 17,51 |
| 0,5 | 24489,80 | 32967,03 | 14051,52 | 1562,50 | 19,30 |
| 1 | 4897,96 | 32967,03 | 4264,39 | 1562,50 | 17,00 |
| 1,5 | 1653,06 | 32967,03 | 1574,13 | 1562,50 | 11,90 |
| 2 | 857,14 | 32967,03 | 835,42 | 1562,50 | 8,31 |
| 2,5 | 428,57 | 32967,03 | 423,07 | 1562,50 | 5,10 |
| 3 | 263,27 | 32967,03 | 261,18 | 1562,50 | 3,43 |
| 3,5 | 183,67 | 32967,03 | 182,66 | 1562,50 | 2,51 |

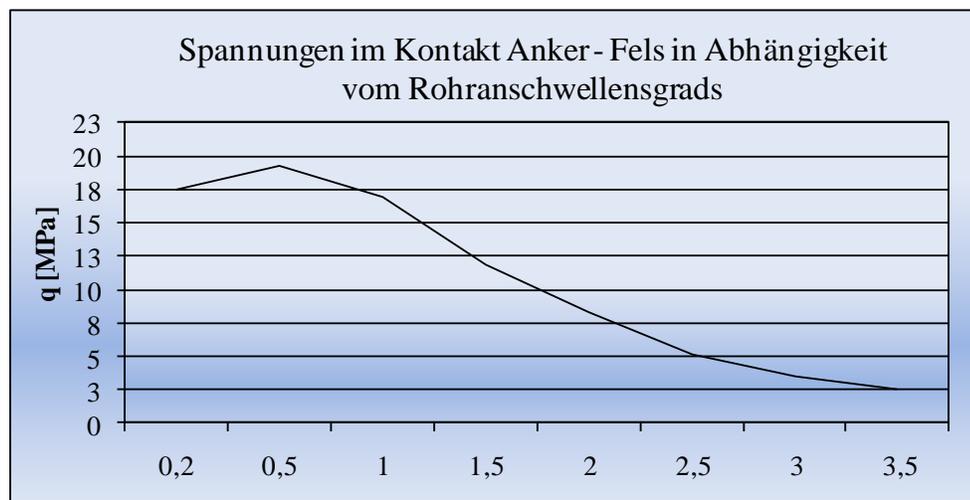


Abb.10. Spannungen im Kontakt Anker - Fels in Abhängigkeit vom Rohranschwellensgrads

Tragfähigkeit des Ankers Swellex

Die Tragfähigkeit des Ankers wird durch die Kontaktspannungen und die Spannungen im Verankerungsmechanismus bestimmt. In Lockergestein sind nur die Kontaktspannungen zu berücksichtigen. Für q_2 wird in der nächsten Formel angenommen, dass es gleich Null ist, weil der Verankerungsmechanismus beim Lockergestein eine vernachlässbare Rolle spielt.

$$N_a = \pi \cdot d \cdot l_a \cdot (q_1 + q_2) \cdot \tan \varphi < T \text{ [kN]}$$

d – Bohrlochdurchmesser; angenommen: $d = 36 \text{ mm}$

φ – Reibungswinkel zwischen dem Anker und dem Fels; angenommen: $\varphi = 35^\circ$

T – Zugfestigkeit des Ankers, $T = 110 \text{ kN}$

$$l_v < \frac{T}{\pi \cdot d \cdot q_1 \cdot \tan \varphi} \text{ – Verankerungslänge}$$

| q_1 | l_v | N_a |
|-----------------|-------|--------|
| N/mm^2 | m | kN |
| 17,51 | 0,079 | 110,00 |
| 19,30 | 0,072 | 110,00 |
| 17,00 | 0,082 | 110,00 |
| 11,90 | 0,117 | 110,00 |
| 8,31 | 0,167 | 110,00 |
| 5,10 | 0,273 | 110,00 |
| 3,43 | 0,405 | 110,00 |
| 2,51 | 0,554 | 110,00 |

Angenommen : $l_v = 0,50 \text{ m} \Rightarrow N_a = 99,27 \text{ kN}$

Ermittlung der Gesamtlänge des Ankers

$$l_a = h_g + l_v$$

$$l_a = h_g + l_v = 1,47 + 0,50 = 1,97 \text{ m}$$

Ermittlung des Abstands zwischen den Anker

$$a = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{4}{9} \cdot \gamma_F \cdot l_a = \frac{4}{9} \times 21,9 \times 1,97 = 19,17 < q = 22,71 \text{ kN/m}^2 \Rightarrow \\ a = \frac{l_a}{3} \cdot \sqrt{\frac{c}{q}} = \frac{1,97}{3} \times \sqrt{\frac{0,35 \times 1000}{22,71}} = 2,58 \text{ m} \\ a = \sqrt{\frac{N_a}{\gamma_F \cdot h_g}} = \sqrt{\frac{99,27}{21,9 \times 1,47}} = 1,76 \text{ m} \end{array} \right\} \text{ Angenommen : } a = 1,70 \text{ m}$$

c – Kohäsion des Felsmassivs, $c = 0,35 \text{ MPa}$

N_a – Tragfähigkeit des Ankers

$$N_a = 99,27 \text{ kN}$$

Ermittlung der Anzahl der Anker in einem Querprofil

$$n_{\text{Anker}} = \frac{L}{a} = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot a} = \frac{3,14 \times 5,54}{2 \times 1,70} = 5,12 \text{ \textcircled{p}}$$

Angenommen : $n = 5 - 6$ in Zickzackanordnung

Bemessung der Abstützungsschicht aus Spritzbeton

Bei kombinierten Abstützungselementen kommt die folgende Formel zum Einsatz:

$$d_{sb} = \frac{-F_a \cdot R_a + \sqrt{(F_a \cdot R_a)^2 + (0,0464 \cdot \gamma_F \cdot a^3 \cdot l^2 \cdot R_o)} / f_k}{0,333 \cdot R_o \cdot l} \quad [\text{cm}]$$

F_a – Querschnitt der Stahlbewehrung

R_a – Zugfestigkeit von Stahlbewehrung; $R_a = 5500 \text{ N/mm}^2$

a – Abstand zwischen Anker

l – Länge eines Fortschritts

f_k – Festigkeitsfaktor, der die verbesserten Felsmassiveigenschaften nach Verankerungsarbeiten darstellt; Abgelesen vom [6] /Abb. 319/

R_o – Zugfestigkeit von Spritzbeton; für $B_o 2,0$ ist $R_o = 2 \text{ MPa}$

Für Bewehrung des Spritzbetons ist ein Netzwerk von Stomana Industry SA Q131 gewählt worden. Daten für das Bewehrungsnetz:

Quer- und Längsdraht aus BSt 500 M nach DIN 488, gemacht von kaltgewalztem Stab SAE1010.

Zugfestigkeit von BSt 500 M DIN 488 $R_a = 5500 \text{ N/mm}^2$

Blatt: 2,15 m Breite und 4,00 - 6,00 m Länge

Gewicht: $2,12 \text{ kg/m}^2$

Von Tabelle 12:

| Abschnitt | | 1 | 5 |
|---------------------------|----|-------|-------|
| d_{sb} | cm | 8 | 8 |
| Bewehrungsgitter $\phi 5$ | cm | 10/10 | 10/10 |

6.2.4. Bemessung von 4. Abschnitt [6]

| No | L [m] | RM R | f _{pr} | k ₀ [N/cm ²] | Abstützungs konstruktion |
|----|----------|---------|-----------------|--|--|
| 4 | 53,20 | 65 | 5 | 2500 | Konventionelle mechanische Anker und unbewehrter Spritzbeton |

Ermittlung der Verankerungslänge des Ankers

$$l_v = \max \left\{ \begin{array}{l} l_v \geq (0,5 \div 0,7) \text{ m} \\ l_v \geq 0,25h_g; \\ l_v = 0,25 \times 0,55 = 0,14 \text{ m} \end{array} \right\} \text{ Angenommen : } l_v = 0,5 \text{ m}$$

$$h_g = 0,55 \text{ m}$$

Ermittlung der Gesamtlänge des Ankers

$$l_a = h_g + l_v$$

$$l_a = h_g + l_v = 0,55 + 0,5 = 1,05 \text{ m} \Rightarrow l_a = l_{\min} = 1,50 \text{ m}$$

Ermittlung des Abstands zwischen den Ankern

$$a = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{4}{9} \cdot \gamma_F \cdot l_a = \frac{4}{9} \cdot 21,9 \times 1,50 = 14,6 > q = 8,57 \text{ kN/m}^2 \Rightarrow \\ a = \frac{l_a}{3} \cdot \sqrt{\frac{c}{q}} = \frac{1,50}{3} \times \sqrt{\frac{0,40 \times 1000}{8,57}} = 3,41 \text{ m} \\ a = \sqrt{\frac{N_a}{\gamma_F \cdot h_g}} = \sqrt{\frac{60}{21,9 \times 0,55}} = 2,23 \text{ m} \end{array} \right\} \text{ Angenommen : } a = 2,20 \text{ m}$$

c – Kohäsion des Felsmassivs, c = 0,40

N_a – Tragfähigkeit des Ankers

N_a = (60 ÷ 80) kN für Anker mit mechanischer Verankerung;

Angenommen: N_a = 60 kN

Ermittlung der Anzahl der Anker in einem Querprofil

$$n_{\text{Anker}} = \frac{L}{a} = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot a} = \frac{3,14 \times 5,54}{2 \times 2,20} = 3,95 \text{ 6p}$$

Angenommen : n = 4 in Zickzackanordnung

Ermittlung des Durchmessers vom Ankerstab und Bohrloch

$$d_a \geq 2 \sqrt{\frac{N_a}{\pi \cdot R_c}} \quad [\text{m}]$$

$N_a = (60 \div 80) \text{ kN}$ für Anker mit mechanischer Verankerung; Angenommen: $N_a = 60 \text{ kN}$

R_c – Bemessungszugfestigkeit für Stahl StAIII für I^{ste} Gruppe von Grenzzuständen

$$R_c = 355 \text{ MPa}$$

$$d_a \geq 2 \sqrt{\frac{N_a}{\pi \cdot R_c}} = 2 \times \sqrt{\frac{60}{3,14 \times 355000}} = 0,016 \text{ m}$$

Angenommen: $d_a = \text{N20}$

$d_{\text{Bl}} = d_a + (15 \div 20) \text{ mm}$ – Durchmesser des Bohrlochs;

Angenommen: $d_{\text{Bl}} = 20 + 20 = 40 \text{ mm}$

Bemessung der Abstützungsschicht aus Spritzbeton

Bei kombinierten Abstützungselementen kommt die folgende Formel zum Einsatz:

$$d_{\text{sb}} = 0,80 \sqrt{\frac{\gamma_F \cdot a^3}{f_k \cdot R_z}} \quad [\text{cm}]$$

Wo:

f_k – Festigkeitsfaktor, der die verbesserten Felsmassiveigenschaften nach Verankerungsarbeiten darstellt; Abgelesen vom [6] /Abb. 319/

$$f_k = 5,2$$

R_z – Bemessungsdruckfestigkeit von Spritzbeton

$$R_z = 360 \text{ N/cm}^2, \text{ abgelesen von [6]}$$

$$\gamma_F = 0,0219 \text{ N/cm}^3$$

a – Abstand zwischen den Ankern

$$d_{\text{sb}} = 0,80 \sqrt{\frac{\gamma_F \cdot a^3}{f_k \cdot R_z}} = 0,80 \times \sqrt{\frac{0,0219 \times 240^3}{5,2 \times 360}} \approx 10 \text{ cm}$$

6.2.5. Bemessung von 6. Abschnitt

| No | L [m] | RMR | f_{pr} | k_0 [N/cm ²] | Abstützungskonstruktion |
|----|----------|-----|----------|-------------------------------|--------------------------------------|
| 6 | 17,73 | 25 | 1,5 | 500 | Stützbögen und bewehrter Spritzbeton |

Die Bemessung der Abstützungskonstruktion von den Abschnitten mit ungünstigen mechanischen Eigenschaften ist nach der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode (NÖT) durchgeführt worden. Zu diesem Zweck wird die Tragfähigkeit aller Abstützungselemente berechnet und anschließend mit den Kräften von äußeren Belastungen verglichen.

Tragfähigkeit des Spritzbetons

$$P_{sb} = \frac{d_{sb} \cdot \tau_{sb}}{r \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha)} = \frac{0,10 \cdot 4000}{2,92 \times \sin(32,2^\circ) \times \cos(32,2^\circ)} = 304 \text{ kN / m}^2$$

τ_{sb} – Scherfestigkeit von Spritzbeton; $\tau_{sb} = 4 \text{ MPa} = 4000 \text{ kN / m}^2$

$d_{sb} = 0,10 \text{ m}$ – zunächst angenommene Stärke von der Spritzbetonschicht

$$r = r_1 + d_{sb} + d_{panz} + d_{fb} = 2,40 + 0,10 + 0,02 + 0,40 = 2,92 \text{ m}$$

$$\alpha = 45^\circ - \frac{\varphi}{2} = 45^\circ - \frac{25,6^\circ}{2} = 32,2^\circ$$

Tragfähigkeit der Stützbögen

$$P_{srw} = \frac{d_{srw} \cdot \tau_{St}}{r \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha)} = \frac{0,0006 \cdot 368\,000}{2,92 \times \sin(32,2^\circ) \times \cos(32,2^\circ)} = 168,5 \text{ kN / m}^2$$

$$d_{srw} = \frac{F_{srw}}{l_{srw}} = 0,0006 \text{ m}$$

$F_{srw} = 0,0012 \text{ m}^2$ – Querschnittsfläche vom Profil I10

$l_{srw} = 2 \text{ m}$ – angenommen Abstand zwischen den Rippen

τ_{St} – Scherfestigkeit von Stahl St 52-3 N Din 17100

$$\tau_{St} \approx 0,75 \cdot R_u$$

$$\tau_{St} = 0,75 \times 490 \approx 368 \text{ MPa} = 368\,000 \text{ kN / m}^2$$

$R_u = 390 \text{ MPa}$ – Zugfestigkeit von Stahl St 52-3 N Din 17100

Tragfähigkeit vom Bewehrungsnetzwerk

Da die Tragfähigkeit vom Bewehrungsnetzwerk vernachlässigbar ist, wird sie nicht berücksichtigt. Sie kann als kleine Sicherheitsreserve bleiben.

Für Bewehrung des Spritzbetons ist ein Netzwerk von Stomana Industry SA Q131 gewählt.
Daten für das Bewehrungsnetz:

Quer- und Längsdraht aus BSt 500 M nach DIN 488, gemacht von kaltgewalztem Stab SAE1010.

Zugfestigkeit von BSt 500 M DIN 488 $R_a = 5500 \text{ N/mm}^2$

Blatt: 2,15 m Breite und 4,00 - 6,00 m Länge

Gewicht: $2,12 \text{ kg/m}^2$

$\varnothing 5 \text{ 10/10}$

Gesamttragfähigkeit der Abstützung

$$P_k = P_{sb} + P_{srw} + P_{nw} = 304 + 168,5 + 0 = 472,5 \text{ kN / m}^2$$

Kräfte von äußeren Belastungen

$$P_{\text{ä.b.}} = \frac{2 \cdot \sigma_y}{\xi + 1} = \frac{2 \times 351,8}{2,52 + 1} = \frac{7202,8}{6,82} = 300 \text{ kN / m}^2$$

$$\xi = \frac{1 + \sin(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)} = \frac{1 + \sin(25,6^\circ)}{1 - \sin(25,6^\circ)} = \frac{1,432}{0,568} = 2,52$$

ξ – Koeffizient der passiven Gegenwirkung

$$\sigma_{y,6} = \gamma \cdot h_a = 21,4 \times 16,44 = 351,8 \text{ kN / m}^2$$

So dimensionierte Abstützungskombination von Spritzbeton und Stützbögen ergibt eine sehr große Tragfähigkeitsreserve wegen der geringen Überdeckung. Da dieser Abschnitt den Portalabschnitt umfasst, wird die so dimensionierte Konstruktion zugunsten der Sicherheit ausgelegt.

7. Auswahl und Bemessung der Auskleidung des Druckstollens

7.1. Statische Bemessung der Panzerung

7.2. Basisdaten und Parameter von untersuchten Abschnitten

7.3. Statische Überprüfung des Füllbetons

7.4. Statische Überprüfung der Panzerung

- 7.4.1. Tragfähigkeitsüberprüfung auf Innenwasserdruck p_i
- 7.4.2. Tragfähigkeitsüberprüfung auf Grundwasserdruck p_g
- 7.4.3. Tragfähigkeitsüberprüfung auf axiale Kräfte
- 7.4.4. Überprüfung nach der ersten Gruppe von Grenzzuständen
- 7.4.5. Überprüfung gegen Einbeulen
- 7.4.6. Ermittlung der Panzerungsstärke bei der Verengung und bei der Verzweigung der DRL

7.1. Statische Bemessung der Panzerung

Die statische Bemessung der Druckstollenauskleidung umfasst die Auskleidungsstärke in Abhängigkeit von den wirkenden Belastungen und von den mechanischen Eigenschaften des Felsmassivs. Zu diesem Zweck wird der Druckstollen in Abschnitten nach der Bemessungsfalhöhe und nach den geologischen Parametern geteilt. Die Auskleidung wird auf die Endbedingungen bei den einzelnen Abschnitten bemessen.

Die Panzerung des Druckstollens wird mit der Annahme bemessen, dass der Füllbeton die Belastungen in der Bauphase aufnimmt. Die Füllbetonschicht ist auf folgende Auswirkungen überprüft:

- Eigengewicht
- Bergdruck
- Grundwasserdruck
- Einpressdruck bei Füllinjektion /in der Fuge zwischen Betonschicht und Felsmassiv/
- Seismischen Kräfte /nach der Theorie des dickwandigen Rohrs im isotropen elastischen Medium/

Bei einem idealisierten statistischen Schema der Panzerung ist für die Betriebsphase angenommen, dass der Grundwasserdruck von der Panzerung und vom Fels aufgenommen wird. Der Füllbeton besitzt die erforderlichen Festigkeitseigenschaften nicht und er erfüllt nur eine Übertragungsfunktion für die Belastungen zwischen der Panzerung und dem Fels. Wenn der Füllbeton eine tragende Funktion erfüllt, müsste er die erforderliche Zugfestigkeit aufweisen. Um dies zu gewährleisten, ohne dass ein zu großes Abbauprofil infolge dickerer Betonschicht zu erhalten, müssen konkrete Abschnitte bewehrt werden. Dies würde zu Schwierigkeiten bei der angenommenen Technologie für die Betonarbeiten führen.

Im [6] ist ein Algorithmus für die Bemessung von Panzerung gegeben, den keine klare Vorstellung über die Bemessung von unterirdischen Bauwerken unter seismischen Einwirkungen ermöglicht. Zu Gunsten der Sicherheit wurde in dieser Projektlösung angenommen, dass seismische Einwirkungen auch in der Bauphase als möglich betrachtet werden.

Zu diesem Zweck wurde Tabelle 36 in [3] verwendet. Dadurch wurden die Scherkräfte im dickwandigen Rohr in der Bauphase erhalten und damit auch die Normalspannung in Füllbeton /in Richtung der Tangente des Abbauprofils/. Verschiedene Kombinationen von vorhandenen Kräften sind untersucht worden.

7.2. Basisdaten und Parameter von untersuchten Abschnitten

Aufgrund fehlender Daten über den Grundwasserspiegel wurde die möglichst ungünstige Position angenommen. Auf 372,20 m, vor dem Druckstollen ist ein Fenster anzuordnen, durch das das Wasser auf ein höheres Niveau drainiert wird. Deswegen ist die höchstmögliche GWS-Lage auf 372,20 m.

| No | | 1 | 1.1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 6.1 |
|-----------------|-------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| f | - | 2 | 2 | 1,5 | 3 | 5 | 2 | 1,5 | 1,5 |
| k ₀ | N/cm ³ | 1000 | 1000 | 500 | 1500 | 2500 | 1000 | 500 | 500 |
| v _F | - | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,28 | 0,28 | 0,33 | 0,33 | 0,33 |
| ∇GWS | m | 372,2 | 372,2 | 372,2 | 372,2 | 372,2 | 372,2 | 372,2 | 372,2 |
| h _g | m | 0 | 5,05 | 10,66 | 21,89 | 35,38 | 25,78 | 24,24 | 0 |
| L _i | m | 7 | 19,6 | 17,73 | 35,47 | 53,2 | 26,6 | 8,73 | 9 |
| α | ° | 0 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 0 |
| L _h | m | 7,00 | 18,59 | 16,82 | 33,65 | 50,47 | 25,23 | 8,00 | 9,00 |
| D | m | 4,8 | 4,8 | 4,8 | 4,8 | 4,8 | 4,8 | 4,8 | 4,8 |
| d _{fb} | m | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,35 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| r ₁ | m | 2,408 | 2,408 | 2,408 | 2,408 | 2,408 | 2,408 | 2,408 | 2,408 |
| d _{sb} | m | 0,11 | 0,11 | 0,15 | 0,08 | 0,10 | 0,11 | 0,10 | 0,10 |
| r ₂ | m | 2,66 | 2,66 | 2,68 | 2,65 | 2,63 | 2,66 | 2,66 | 2,66 |
| r ₀ | m | 2,54 | 2,54 | 2,55 | 2,53 | 2,52 | 2,54 | 2,53 | 2,53 |
| m | m | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,96 | 0,95 | 0,95 | 0,95 |
| E _b | MPa | 32500 | 32500 | 32500 | 32500 | 32500 | 32500 | 32500 | 32500 |
| I | m ⁴ | 0,00533 | 0,00533 | 0,00533 | 0,00533 | 0,00357 | 0,00533 | 0,00533 | 0,00533 |
| k | MPa | 0,38 | 0,38 | 0,19 | 0,57 | 0,95 | 0,38 | 0,19 | 0,19 |
| b | m | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| n | - | 15,59 | 15,59 | 15,59 | 15,59 | 15,59 | 15,59 | 15,59 | 15,59 |

Tabelle 13 - Daten für die untersuchten Abschnitte

h_g – Grundwasserdruckhöhe

α o – Steigung der Handlung

$r_0 = \frac{r_1 + r_2}{2}$ - mittlerer Radius der Auskleidung

d_{fb} - Füllbetonstärke

$$m = 2 \cdot \frac{r_2}{r_0}$$

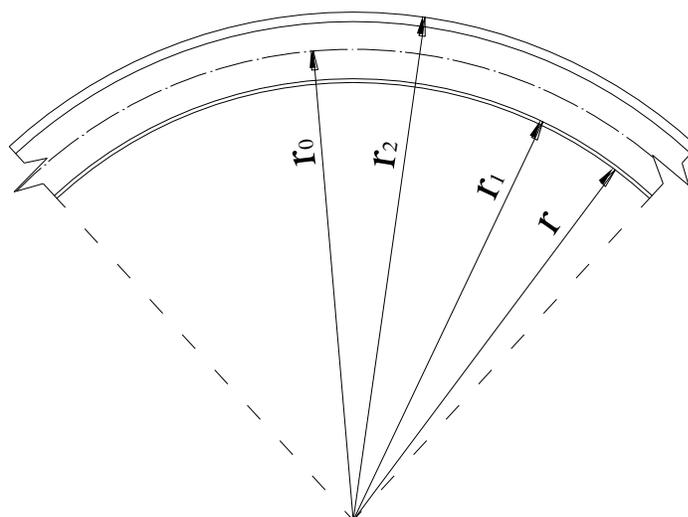
E = 32500 MPa (B30)

$$J = \frac{b \cdot d_{fb}^3}{12} \quad [m^4]$$

$$k = \frac{100 \cdot k_0}{r_2} \quad [N/cm^3] - \text{Koeffizient der}$$

elastischen Gegenwirkung

k₀ – Koeffizient der relativen elastischen
Gegenwirkung



Für die erste Phase der Bemessung kann k_0 von [3], Abb. 7 als eine Funktion von f abgelesen werden.

$$n = \frac{1}{0,06416 + \frac{EJ}{r_0^3 \cdot r_2 \cdot k_{y-k} \cdot b}}$$

Wo:

EJ – Steifigkeit der Auskleidung

r_0, r_2 – mittlerer und äußerer Radius der Auskleidung

k – Koeffizient der elastischen Gegenwirkung

$b = 1 \text{ m}$ – Breite der betrachteten Abschnitt vom Füllbeton

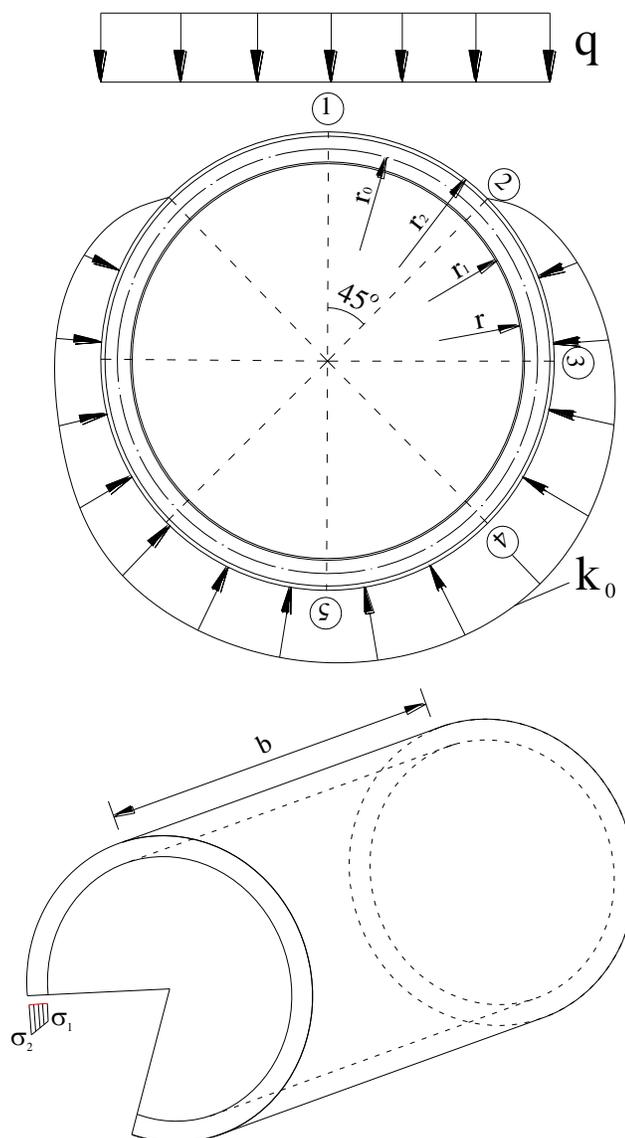


Abb. 11. Grundparameter bei der Bemessung von Auskleidung

7.3. Statische Überprüfung des Füllbetons

| γ_f | | Bauphase |
|------------------------|------------------------|----------|
| Vertikaler Bergdruck | | 1,5 |
| Horizontaler Bergdruck | | 1,2 |
| Eigengewicht | | 1,2 |
| Grundwasserdruck | | 1,1 |
| seismisch | Vertikaler Bergdruck | 1 |
| | Horizontaler Bergdruck | 1 |
| | Eigengewicht | 1 |
| Einpressdruck | | 1,2 |

Tabelle 13 – Zuverlässigkeitsbeiwert, [7], S. 6, Tabelle 3

Bei der Bemessung von der Auskleidung sind die Tragfähigkeit der Abstützungselemente und die Einwirkung folgender Kräfte berücksichtigt:

- Eigengewicht

Für die Abschnitte 1 und 6.1 gilt:

$$g_n = g_n^h = F \cdot \gamma_b = d_{fb} \cdot 1 \cdot \gamma_b \text{ [kN/m]}$$

$$g_h^b = g_n^h \cdot \gamma_f \text{ [kN/m]}$$

Für die Abschnitte 1.1, 2, 3, 4, 5 und 6 gilt:

$$g_n = g_n^h = F \cdot \gamma_b = d_{fb} \cdot 1 \cdot \gamma_b \text{ [kN/m]}$$

$$g_n^v = g_n^h \cdot \cos\alpha \text{ [kN/m]}$$

$$g_n^v = g_n^v \cdot \gamma_f \text{ [kN/m]}$$

γ_b – Wichte von Beton; $\gamma_b = 24 \text{ kN/m}^3$

| No | | 1 | 1.1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 6.1 |
|--------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| d_{fb} | m | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,35 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| α | $^\circ$ | 0 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 0 |
| $\cos\alpha$ | $^\circ$ | 1 | 0,988 | 0,988 | 0,988 | 0,988 | 0,988 | 0,988 | 1 |
| g_n^h | kN/m | 9,60 | 9,48 | 9,48 | 9,48 | 8,30 | 9,48 | 9,48 | 9,60 |
| g_h^b | kN/m | 11,52 | 11,38 | 11,38 | 11,38 | 9,96 | 11,38 | 11,38 | 11,52 |

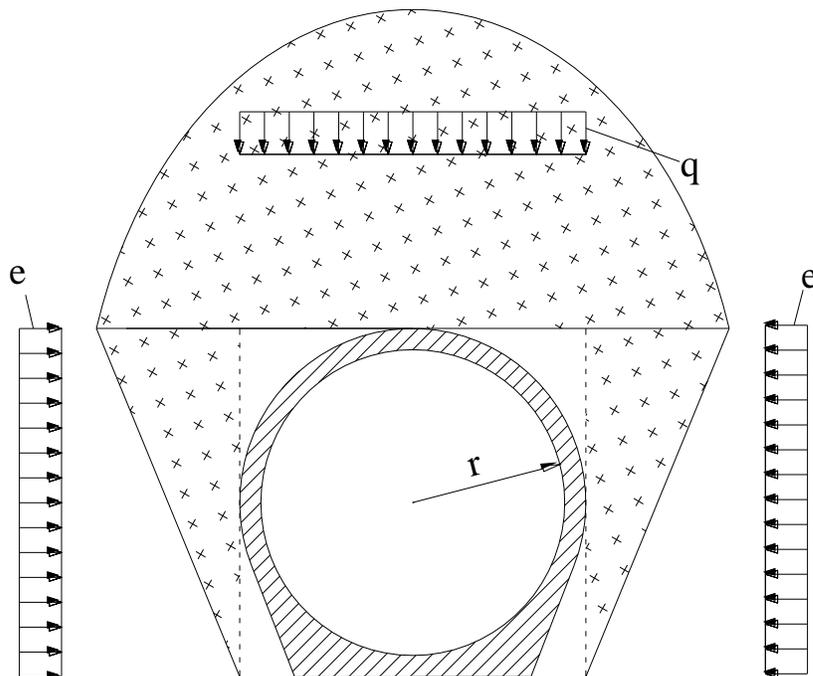
Bemerkung: Index „n“ bedeutet normativer Wert und Index „b“ kennzeichnet Bemessungswert.

▪ Vertikaler Bergdruck

$$q_b = q_n \cdot \gamma_f$$

/Die normativen Werte von vertikalem und horizontalem Bergdruck sind in Teil 6. berechnet/

| No | | 1 | 1.1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 6.1 |
|-------|------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|------|------|
| q_n | kN/m | 30,54 | 30,54 | 41,4 | 22,71 | 8,57 | 31,05 | 41,4 | 41,4 |
| q_b | kN/m | 45,81 | 62,1 | 34,065 | 34,065 | 12,855 | 46,575 | 62,1 | 62,1 |



▪ Horizontaler Bergdruck

$$e_b = e_n \cdot \gamma_f$$

| No | | 1 | 1.1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 6.1 |
|-------|------|-------|-------|-------|-------|---|-------|-------|-------|
| e_n | kN/m | 5,29 | 5,29 | 6,09 | 7,14 | 0 | 5,33 | 6,09 | 6,09 |
| e_b | kN/m | 6,348 | 6,348 | 7,308 | 8,568 | 0 | 6,396 | 7,308 | 7,308 |

Hinweis: Bei der Festigkeitsüberprüfung des Füllbetons ist angenommen, dass er mit der Hälfte der tatsächlichen Belastung vom vertikalen und horizontalen Bergdruck berechnet wird. Dies wird wegen der Tragfähigkeit der Abstützungskonstruktion gemacht. Die Abstützungen sind auf vollen Bergdruck bemessen und bleiben in der Auskleidung eingebettet.

- Spritzdruck:

Angenommen – $i_n = 166,67 \text{ kN/m}$

$i_b = 166,67 \times 1,2 = 200 \text{ kN/m}$ – für alle Abschnitte

- Ermittlung des Grundwasserdrucks

$$p_g = \gamma_w \cdot h_g \text{ [kN/m]}$$

γ_w – Wichte vom Wasser; $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$

h_g – Grundwasserdruckhöhe

| No | | 1 | 1.1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 6.1 |
|-------|-----|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| h_g | m | 0 | 5,05 | 10,66 | 21,89 | 35,38 | 25,78 | 24,24 | 0 |
| p_g | MPa | 0 | 0,051 | 0,107 | 0,219 | 0,354 | 0,258 | 0,242 | 0 |

Seismische Einwirkungen

Nach "Richtlinien für die Gestaltung von Gebäuden und Bauwerken in erdbebengefährdeten Gebieten" seit 1986, sollten die Druckrohrleitungen auf Erdbebeneinwirkungen geprüft werden. Gemäß dieser Verordnung müssen seismische Kräfte vom Fels, vom Eigengewicht der Auskleidung und vom Wasser in der Druckrohrleitung in Betracht genommen werden. Sie werden nach der statischen Theorie analysiert und werden als eine zusätzliche äußere Belastung berechnet.

Die seismischen Einwirkungen rufen Trägheitskräfte (vom Eigengewicht, Bergdruck) und Kräfte vom veränderten Spannungszustand im Felsmassiv nach seismischer Einwirkung hervor. Da sich die letzten in der Zeit nicht parallel mit den Trägheitskräften äußern, werden sie in den Lastkombinationen unabhängig voneinander betrachtet. Als maßgebend gilt der ungünstigste Fall.

In diesem Projekt wurden die seismischen Einwirkungen nur in der Bauphase betrachtet, die als maßgebend für die Tragfähigkeitsüberprüfung vom Füllbeton gelten. Mit den im Teil 6. angenommenen Abmessungen erfüllt die Füllbetonschicht die Festigkeitskriterien nicht. Deswegen wurden die Schichtstärke und die Betonklasse geändert. Die neu angenommenen Parameter begünstigen die Abbautechnologie und die Abstützungsarbeit, deshalb bleiben die dimensionierten Tragwerke gültig.

- Seismischer Wasserdruck

$$p_s = \frac{1}{2\pi} \cdot k_s^I \cdot \gamma_F \cdot c \cdot T_0 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

γ_F – Wichte vom Fels

c – Ausbreitungsgeschwindigkeit von seismischen Wellen im Fels, abgelesen in [3], Tabelle 5

T_0 – Eigenperiode

k_s^I – Seismischer Beiwert; $k_s^I = C \cdot R \cdot k_h \cdot k_s$

$k_s = 0,1$, abgelesen in [3], Tabelle 22

k_h – reduzierter Koeffizient des Abraums, abgelesen in [3], Tabelle 23

R – Verhaltensbeiwert

$R = 0,60$ – für unterirdische Anlagen

C Beiwert, der von der Werkklasse des Bauwerks abhängig ist; $C=1,5$ – für Wasserbauanlagen der I^{ste} Werkklasse

- Seismischer Bergdruck

$$q_s = k_s^I \cdot q_n \text{ [kN/m]}$$

$$e_s = 2k_s^I \cdot e_n \cdot \text{tg}\varphi \text{ [kN/m]}$$

φ – innerer Reibungswinkel

- Seismische Kräfte vom Eigengewicht

$$g_s = k_s^I \cdot g_n \text{ [kN/m]}$$

| No | 1 | 1.1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 6.1 | |
|--------------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| f | - | 2 | 2 | 1,5 | 3 | 5 | 2 | 1,5 | 1,5 |
| tg φ | - | 0,48 | 0,48 | 0,48 | 0,60 | 0,60 | 0,48 | 0,48 | 0,48 |
| γ_F | kN/m ³ | 21,40 | 21,40 | 21,40 | 21,90 | 21,90 | 21,40 | 21,40 | 21,40 |
| c_1 | m/s | 1200 | 1200 | 1100 | 1000 | 1300 | 1200 | 1100 | 1100 |
| T_0 | s | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
| C | - | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,50 |
| R | - | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 |
| k_h | - | 0,691 | 0,697 | 0,711 | 0,744 | 0,823 | 0,871 | 0,889 | 0,928 |
| k_s | - | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
| k_s^I | - | 0,0622 | 0,0627 | 0,0640 | 0,0670 | 0,0741 | 0,0784 | 0,0800 | 0,0835 |
| q | kN/m | 30,54 | 30,54 | 41,4 | 22,71 | 8,57 | 31,05 | 41,4 | 41,4 |
| e | kN/m | 5,29 | 5,29 | 6,09 | 7,14 | 0 | 5,33 | 6,09 | 6,09 |
| g | kN/m | 9,60 | 9,48 | 9,48 | 9,48 | 8,30 | 9,48 | 9,48 | 9,60 |
| p_s | kN/m | 0,00 | 25,65 | 23,99 | 23,35 | 33,58 | 32,06 | 29,99 | 0,00 |
| q_s | kN/m | 1,90 | 1,92 | 2,65 | 1,52 | 0,63 | 2,43 | 3,31 | 3,46 |
| e_s | kN/m | 0,32 | 0,32 | 0,37 | 0,57 | 0 | 0,40 | 0,47 | 0,49 |
| g_c | kN/m | 0,60 | 0,59 | 0,61 | 0,63 | 0,61 | 0,74 | 0,76 | 0,80 |

1. Abschnitt: f=2

| 1.Abschnitt | q | e | g | i | p _s | q _s | e _s | g _s | p _g |
|-------------|-------|------|------|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | MPa |
| | 30,54 | 5,29 | 9,60 | 200,00 | 0,00 | 1,90 | 0,32 | 0,60 | 0 |

| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------------------------|----|----------|----------|----------|----------|----------|
| Vertikaler Bergdruck | A3 | 0,16280 | -0,02500 | -0,12500 | 0,02500 | 0,08720 |
| | B3 | 0,06400 | 0,01780 | -0,09470 | -0,01090 | 0,10960 |
| | C3 | 0,21220 | 0,15 | 0 | -0,15 | -0,21220 |
| | D3 | -0,15910 | 0,38710 | 1 | 1,62320 | 0,79570 |
| Horizontaler Bergdruck | A4 | -0,25 | 0 | 0,25 | 0 | -0,25 |
| | C4 | 1 | 0,50 | 0 | 0,50 | 1 |
| Eigengewicht | A5 | 0,27320 | 0,01070 | -0,29760 | 0,01070 | 0,27320 |
| | C5 | 0 | 0,55540 | 1,57080 | 1,96960 | 2 |
| Grundwasserdruck | A6 | 0,13660 | 0,00540 | -0,14880 | 0,00540 | 0,13660 |
| | C6 | -0,50 | -0,36880 | -0,21460 | -0,36880 | -0,50 |
| | C7 | 1,50 | 1,63120 | 1,78540 | 1,63120 | 1,50 |
| Einpressdruck | A | 0,16280 | -0,02500 | -0,12500 | 0,02500 | 0,08720 |
| | B | 0,08720 | 0,02500 | -0,12500 | -0,02500 | 0,16280 |
| | C | -0,00700 | -0,00084 | 0 | 0,00022 | -0,00837 |
| | D | 0,21220 | 0,15 | 0 | -0,15 | -0,21220 |
| | F | -0,21220 | 0,35000 | 1 | 0,90 | 0,71220 |
| | G | 0,02100 | 0,01485 | 0,00575 | 0,01380 | 0,02240 |

Tabelle 14 - Beiwerte für die Bemessung von runden Auskleidungen [3]

Zulässige Spannungen

$$\sigma_{1,2} \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_{\text{бет.}}^{\text{натиск/опыт}}$$

$\gamma_c = 1$ und $\gamma_n = 1,25$ – für I^{ste} Werkklasse

$\gamma_m = 0,95$ – Koeffizient der Arbeitsbedingungen für die entsprechende Bauphase

$R_b^z = 1,2 \text{ MPa}$ – Druckfestigkeit von Beton B40

$R_b^d = 17 \text{ MPa}$ – Zugfestigkeit von Beton B40

$$\sigma_{1, \text{zul}} = \frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_b^z = \frac{1}{1,25 \times 0,95} \times 1,2 = 1,01 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{2, \text{zul}} = \frac{\gamma_c}{\gamma_n \cdot \gamma_m} \cdot R_b^d = \frac{1}{1,25 \times 0,95} \times 17 = 14,32 \text{ MPa}$$

| 1.Abschnitt | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| q | $M=q \cdot r_0 \cdot r_2(A3.m+B3)$ [kNm] | 45,41 | -1,28 | -44,26 | 2,70 | 39,85 |
| | $N=q \cdot r_2(C3.m+D3)$ [kN] | 3,63 | 43,19 | 81,31 | 120,28 | 48,14 |
| e | $M=e \cdot r_0 \cdot r_2 A4.m$ [kNm] | -8,57 | 0,00 | 8,57 | 0,00 | -8,57 |
| | $N=C4.e.r^2$ [kN] | 14,08 | 7,04 | 0,00 | 7,04 | 14,08 |
| g | $M=g \cdot r_0^2.A5$ [kNm] | 16,85 | 0,66 | -18,36 | 0,66 | 16,85 |
| | $N=g \cdot r_0.C5$ [kN] | 0,00 | 13,52 | 38,23 | 47,93 | 48,67 |
| p _g | $M=-\gamma_w \cdot r_0 \cdot r_2^2.A6$ [kNm] | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | $N=-\gamma_w(r_2^2.C6-r_2.h_g)$ [kN] | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| p _{s-z} | $M=p_s \cdot r_0 \cdot r_2(A3.m+B3)$ [kNm] | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | $N=p_s \cdot r^2(C3.m+D3)$ [kN] | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| p _{s-x} | $M=p_s \cdot r_0 \cdot r_2 A4.m$ [kNm] | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | $N=C4.p_s \cdot r_2$ [kN] | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| q _s | $M=q_s \cdot r_0 \cdot r_2(A3.m+B3)$ [kNm] | 2,82 | -0,08 | -2,75 | 0,17 | 2,48 |
| | $N=q_s \cdot r_2(C3.m+D3)$ [kN] | 0,23 | 2,69 | 5,06 | 7,48 | 2,99 |
| e _s | $M=e_s \cdot r_0 \cdot r_2 A4.m$ [kNm] | -0,51 | 0,00 | 0,51 | 0,00 | -0,51 |
| | $N=C4.e_s \cdot r_2$ [kN] | 0,84 | 0,42 | 0,00 | 0,42 | 0,84 |
| g _s | $M=g_s \cdot r_0^2.A5$ [kNm] | 1,05 | 0,04 | -1,14 | 0,04 | 1,05 |
| | $N=g_s \cdot r_0.C5$ [kN] | 0,00 | 0,84 | 2,38 | 2,98 | 3,03 |
| i | $M=i \cdot r_0 \cdot r_2[A.m+B.C.n.(1+m)]$ [kNm] | 40,02 | -33,29 | 9,48 | 7,72 | -12,39 |
| | $N=i \cdot r_2.[D.m+F+G.n.(1+m)]$ [kN] | 337,09 | 504,62 | 626,04 | 627,06 | 635,15 |

| 1.Abschnitt | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------|------------------------------|----------|--------|----------|--------|----------|
| q | σ_1 kN/m ² | -1693,71 | 155,89 | 1862,87 | 199,43 | -1373,92 |
| | σ_2 kN/m ² | 1711,85 | 60,04 | -1456,30 | 401,95 | 1614,60 |
| e | σ_1 kN/m ² | 356,55 | 17,61 | -321,34 | 17,61 | 356,55 |
| | σ_2 kN/m ² | -286,13 | 17,61 | 321,34 | 17,61 | -286,13 |
| g | σ_1 kN/m ² | -632,03 | 9,04 | 784,05 | 95,08 | -510,35 |
| | σ_2 kN/m ² | 632,03 | 58,54 | -592,91 | 144,58 | 753,71 |
| p _g | σ_1 kN/m ² | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | σ_2 kN/m ² | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| p _{s-z} | σ_1 kN/m ² | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | σ_2 kN/m ² | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| p _{s-x} | σ_1 kN/m ² | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | σ_2 kN/m ² | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| q _s | σ_1 kN/m ² | -105,33 | 9,69 | 115,85 | 12,40 | -85,44 |
| | σ_2 kN/m ² | 106,46 | 3,73 | -90,57 | 25,00 | 100,41 |

| | | | | | | | |
|-------|------------|-------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| e_s | σ_1 | kN/m ² | 21,25 | 1,05 | -19,15 | 1,05 | 21,25 |
| | σ_2 | kN/m ² | -17,05 | 1,05 | 19,15 | 1,05 | -17,05 |
| g_s | σ_1 | kN/m ² | -39,31 | 0,56 | 48,76 | 5,91 | -31,74 |
| | σ_2 | kN/m ² | 39,31 | 3,64 | -36,87 | 8,99 | 46,87 |
| i | σ_1 | kN/m ² | -658,07 | 2509,91 | 1209,43 | 1278,06 | 2052,58 |
| | σ_2 | kN/m ² | 2343,52 | 13,20 | 1920,75 | 1857,23 | 1123,19 |

| Grundkombination (trockener Fels) - q+e+g | | | | | | |
|--|-------------------|----------------|-----------------|--|--------|----------|
| σ_1 | kN/m ² | -1969,19 | 182,53 | 2325,58 | 312,12 | -1527,72 |
| σ_2 | kN/m ² | 2057,75 | 136,19 | -1727,88 | 564,14 | 2082,19 |
| Grundkombination (feuchter Fels) - q+e+g+p _g | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | -1969,19 | 182,53 | 2325,58 | 312,12 | -1527,72 |
| σ_2 | kN/m ² | 2057,75 | 136,19 | -1727,88 | 564,14 | 2082,19 |
| Sonderkombination (trockener Fels) - q+e+g+(q _s +e _s)+g _s | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | -2053,28 | 193,27 | 2422,28 | 325,57 | -1591,92 |
| σ_2 | kN/m ² | 2147,16 | 140,97 | -1799,29 | 590,19 | 2165,55 |
| Sonderkombination (trockener Fels) - q+e+g+(p _s ^z +p _s ^x)+g _s | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | -1969,19 | 182,53 | 2325,58 | 312,12 | -1527,72 |
| σ_2 | kN/m ² | 2057,75 | 136,19 | -1727,88 | 564,14 | 2082,19 |
| Sonderkombination (feuchter Fels) - q+e+g+p _g +(q _s +e _s)+g _s | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | -2053,28 | 193,27 | 2422,28 | 325,57 | -1591,92 |
| σ_2 | kN/m ² | 2147,16 | 140,97 | -1799,29 | 590,19 | 2165,55 |
| Sonderkombination (feuchter Fels) - q+e+g+p _g +(p _s ^z +p _s ^x)+g _s | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | -2008,50 | 183,09 | 2374,34 | 318,03 | -1559,46 |
| σ_2 | kN/m ² | 2097,06 | 139,83 | -1764,75 | 573,14 | 2129,06 |
| $\sigma_{1(max)}$ | kN/m ² | 2422,28 | -2053,28 | $\sigma_{1, zul} = 1010 \text{ kN/m}^2$ (Zug) | | |
| $\sigma_{2(max)}$ | kN/m ² | 2165,55 | -1799,29 | $\sigma_{2, zul} = 14320 \text{ kN/m}^2$ (Druck) | | |

1.1. Abschnitt: f=2

| 1.1.Abschnitt | q | e | g | i | p _s | q _s | e _s | g _s | p _g |
|---------------|-------|------|------|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | MPa |
| | 30,54 | 5,29 | 9,48 | 200,00 | 25,65 | 1,92 | 0,32 | 0,59 | 0,05 |

| 1.1.Abschnitt | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| q | $M=q \cdot r_0 \cdot r_2(A3.m+B3)$ [kNm] | 45,38 | -1,27 | -44,23 | 2,70 | 39,83 |
| | $N=q \cdot r_2(C3.m+D3)$ [kN] | 3,61 | 43,17 | 81,31 | 120,29 | 48,15 |
| e | $M=e \cdot r_0 \cdot r_2 A4.m$ [kNm] | -8,56 | 0,00 | 8,56 | 0,00 | -8,56 |
| | $N=C4.e \cdot r^2$ [kN] | 14,08 | 7,04 | 0,00 | 7,04 | 14,08 |
| g | $M=g \cdot r_0^2 \cdot A5$ [kNm] | 16,65 | 0,65 | -18,13 | 0,65 | 16,65 |
| | $N=g \cdot r_0 \cdot C5$ [kN] | 0,00 | 13,35 | 37,76 | 47,34 | 48,07 |
| p _g | $M=-\gamma_w \cdot r_0 \cdot r_2^2 \cdot A6$ [kNm] | -24,55 | -0,97 | 26,74 | -0,97 | -24,55 |
| | $N=-\gamma_w(r_2^2 \cdot C6-r_2 \cdot h_g)$ [kN] | 163,46 | 154,16 | 143,23 | 154,16 | 163,46 |
| p _s - z | $M=p_s \cdot r_0 \cdot r_2(A3.m+B3)$ [kNm] | 38,12 | -1,07 | -37,15 | 2,26 | 33,46 |
| | $N=p_s \cdot r^2(C3.m+D3)$ [kN] | 3,03 | 36,26 | 68,30 | 101,03 | 40,44 |
| p _s - x | $M=p_s \cdot r_0 \cdot r_2 A4.m$ [kNm] | -41,52 | 0,00 | 41,52 | 0,00 | -41,52 |
| | $N=C4.p_s \cdot r_2$ [kN] | 68,30 | 34,15 | 0,00 | 34,15 | 68,30 |
| q _s | $M=q_s \cdot r_0 \cdot r_2(A3.m+B3)$ [kNm] | 2,85 | -0,08 | -2,77 | 0,17 | 2,50 |
| | $N=q_s \cdot r_2(C3.m+D3)$ [kN] | 0,23 | 2,71 | 5,10 | 7,55 | 3,02 |
| e _s | $M=e_s \cdot r_0 \cdot r_2 A4.m$ [kNm] | -0,51 | 0,00 | 0,51 | 0,00 | -0,51 |
| | $N=C4.e_s \cdot r_2$ [kN] | 0,85 | 0,42 | 0,00 | 0,42 | 0,85 |
| g _s | $M=g_s \cdot r_0^2 \cdot A5$ [kNm] | 1,04 | 0,04 | -1,14 | 0,04 | 1,04 |
| | $N=g_s \cdot r_0 \cdot C5$ [kN] | 0,00 | 0,84 | 2,37 | 2,97 | 3,02 |
| i | $M=i \cdot r_0 \cdot r_2[A.m+B+C.n.(1+m)]$ [kNm] | 39,96 | -33,25 | 9,48 | 7,69 | -12,34 |
| | $N=i \cdot r_2.[D.m+F+G.n.(1+m)]$ [kN] | 336,85 | 504,45 | 626,00 | 627,03 | 635,09 |

| 1.1.Abschnitt | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------|------------------------------|----------|--------|----------|--------|----------|
| q | σ_1 kN/m ² | -1692,70 | 155,70 | 1862,06 | 199,62 | -1373,32 |
| | σ_2 kN/m ² | 1710,76 | 60,17 | -1455,50 | 401,82 | 1614,07 |
| e | σ_1 kN/m ² | 356,27 | 17,61 | -321,06 | 17,61 | 356,27 |
| | σ_2 kN/m ² | -285,85 | 17,61 | 321,06 | 17,61 | -285,85 |
| g | σ_1 kN/m ² | -624,25 | 8,93 | 774,39 | 93,91 | -504,07 |
| | σ_2 kN/m ² | 624,25 | 57,82 | -585,61 | 142,80 | 744,43 |
| p _g | σ_1 kN/m ² | 1329,19 | 421,79 | -644,67 | 421,79 | 1329,19 |
| | σ_2 kN/m ² | -511,88 | 349,01 | 1360,82 | 349,01 | -511,88 |

| | | | | | | | |
|-----------|------------|-------------------|----------|---------|----------|---------|----------|
| $p_s - z$ | σ_1 | kN/m ² | -1421,74 | 130,78 | 1563,99 | 167,67 | -1153,49 |
| | σ_2 | kN/m ² | 1436,91 | 50,54 | -1222,51 | 337,50 | 1355,70 |
| $p_s - x$ | σ_1 | kN/m ² | 1727,58 | 85,37 | -1556,83 | 85,37 | 1727,58 |
| | σ_2 | kN/m ² | -1386,09 | 85,37 | 1556,83 | 85,37 | -1386,09 |
| q_s | σ_1 | kN/m ² | -106,18 | 9,77 | 116,81 | 12,52 | -86,15 |
| | σ_2 | kN/m ² | 107,32 | 3,77 | -91,30 | 25,21 | 101,25 |
| e_s | σ_1 | kN/m ² | 21,42 | 1,06 | -19,30 | 1,06 | 21,42 |
| | σ_2 | kN/m ² | -17,18 | 1,06 | 19,30 | 1,06 | -17,18 |
| g_s | σ_1 | kN/m ² | -39,16 | 0,56 | 48,58 | 5,89 | -31,62 |
| | σ_2 | kN/m ² | 39,16 | 3,63 | -36,74 | 8,96 | 46,70 |
| i | σ_1 | kN/m ² | -656,39 | 2507,87 | 1209,48 | 1279,19 | 2050,59 |
| | σ_2 | kN/m ² | 2340,64 | 14,39 | 1920,50 | 1855,95 | 1124,87 |

| | | | | | | |
|--|-------------------|----------------|-----------------|--|---------|----------|
| Grundkombination (trockener Fels) - q+e+g | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | -1960,67 | 182,23 | 2315,39 | 311,13 | -1521,12 |
| σ_2 | kN/m ² | 2049,16 | 135,60 | -1720,05 | 562,23 | 2072,66 |
| Grundkombination (feuchter Fels) - q+e+g+p _g | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | -631,49 | 604,03 | 1670,72 | 732,93 | -191,93 |
| σ_2 | kN/m ² | 1537,28 | 484,62 | -359,23 | 911,24 | 1560,78 |
| Sonderkombination (trockener Fels) - q+e+g+(q _s +e _s)+g _s | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | -2045,44 | 193,06 | 2412,90 | 324,71 | -1585,85 |
| σ_2 | kN/m ² | 2139,30 | 140,44 | -1792,05 | 588,49 | 2156,73 |
| Sonderkombination (trockener Fels) - q+e+g+(p _s ^z +p _s ^x)+g _s | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | -1654,84 | 398,38 | 2322,56 | 564,17 | -947,03 |
| σ_2 | kN/m ² | 2099,99 | 271,52 | -1385,73 | 985,10 | 2042,27 |
| Sonderkombination (feuchter Fels) - q+e+g+p _g +(q _s +e _s)+g _s | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | -716,25 | 614,85 | 1768,23 | 746,51 | -256,66 |
| σ_2 | kN/m ² | 1627,42 | 489,45 | -431,23 | 937,51 | 1644,85 |
| Sonderkombination (feuchter Fels) - q+e+g+p _g +(p _s ^z +p _s ^x)+g _s | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | -364,81 | 820,73 | 1726,46 | 991,86 | 350,53 |
| σ_2 | kN/m ² | 1627,27 | 624,16 | -61,64 | 1343,07 | 1577,09 |
| $\sigma_{1(max)}$ | kN/m ² | 2412,90 | -2045,44 | $\sigma_{1, zul} = 1010 \text{ kN/m}^2 \text{ (Zug)}$ | | |
| $\sigma_{2(max)}$ | kN/m ² | 2156,73 | -1792,05 | $\sigma_{2, zul} = 14320 \text{ kN/m}^2 \text{ (Druck)}$ | | |

2. Abschnitt: f=1,5

| 2.Abschnitt | q | e | g | i | p _s | q _s | e _s | g _s | p _g |
|-------------|-------|------|------|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | MPa |
| | 41,40 | 6,09 | 9,48 | 200,00 | 23,99 | 2,65 | 0,37 | 0,61 | 0,11 |

| 2.Abschnitt | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| q | $M=q \cdot r_0 \cdot r_2(A3 \cdot m+B3)$ [kNm] | 62,22 | -1,75 | -60,65 | 3,70 | 54,62 |
| | $N=q \cdot r_2(C3 \cdot m+D3)$ [kN] | 4,93 | 58,97 | 111,06 | 164,29 | 65,76 |
| e | $M=e \cdot r_0 \cdot r_2 A4 \cdot m$ [kNm] | -9,97 | 0,00 | 9,97 | 0,00 | -9,97 |
| | $N=C4 \cdot e \cdot r^2$ [kN] | 16,34 | 8,17 | 0,00 | 8,17 | 16,34 |
| g | $M=g \cdot r_0^2 \cdot A5$ [kNm] | 16,78 | 0,66 | -18,28 | 0,66 | 16,78 |
| | $N=g \cdot r_0 \cdot C5$ [kN] | 0,00 | 13,40 | 37,91 | 47,53 | 48,26 |
| p _g | $M=-\gamma_w \cdot r_0 \cdot r_2^2 \cdot A6$ [kNm] | -25,02 | -0,99 | 27,25 | -0,99 | -25,02 |
| | $N=-\gamma_w(r_2^2 \cdot C6-r_2 \cdot h_g)$ [kN] | 307,28 | 297,84 | 286,74 | 297,84 | 307,28 |
| p _s - z | $M=p_s \cdot r_0 \cdot r_2(A3 \cdot m+B3)$ [kNm] | 36,05 | -1,01 | -35,14 | 2,14 | 31,64 |
| | $N=p_s \cdot r^2(C3 \cdot m+D3)$ [kN] | 2,86 | 34,16 | 64,34 | 95,18 | 38,10 |
| p _s - x | $M=p_s \cdot r_0 \cdot r_2 A4 \cdot m$ [kNm] | -39,27 | 0,00 | 39,27 | 0,00 | -39,27 |
| | $N=C4 \cdot p_s \cdot r_2$ [kN] | 64,34 | 32,17 | 0,00 | 32,17 | 64,34 |
| q _s | $M=q_s \cdot r_0 \cdot r_2(A3 \cdot m+B3)$ [kNm] | 3,98 | -0,11 | -3,88 | 0,24 | 3,49 |
| | $N=q_s \cdot r_2(C3 \cdot m+D3)$ [kN] | 0,32 | 3,77 | 7,11 | 10,51 | 4,21 |
| e _s | $M=e_s \cdot r_0 \cdot r_2 A4 \cdot m$ [kNm] | -0,61 | 0,00 | 0,61 | 0,00 | -0,61 |
| | $N=C4 \cdot e_s \cdot r_2$ [kN] | 1,00 | 0,50 | 0,00 | 0,50 | 1,00 |
| g _s | $M=g_s \cdot r_0^2 \cdot A5$ [kNm] | 1,07 | 0,04 | -1,17 | 0,04 | 1,07 |
| | $N=g_s \cdot r_0 \cdot C5$ [kN] | 0,00 | 0,86 | 2,43 | 3,04 | 3,09 |
| i | $M=i \cdot r_0 \cdot r_2[A \cdot m+B+C \cdot n \cdot (1+m)]$ [kNm] | 40,42 | -33,63 | 9,59 | 7,78 | -12,48 |
| | $N=i \cdot r_2[D \cdot m+F+G \cdot n \cdot (1+m)]$ [kN] | 339,38 | 508,24 | 630,70 | 631,74 | 639,86 |

| 2.Abschnitt | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------|------------------------------|----------|--------|----------|--------|----------|
| q | σ_1 kN/m ² | -2321,02 | 212,91 | 2552,11 | 272,09 | -1883,71 |
| | σ_2 kN/m ² | 2345,69 | 81,93 | -1996,83 | 549,34 | 2212,52 |
| e | σ_1 kN/m ² | 414,70 | 20,42 | -373,86 | 20,42 | 414,70 |
| | σ_2 kN/m ² | -333,02 | 20,42 | 373,86 | 20,42 | -333,02 |
| g | σ_1 kN/m ² | -629,19 | 8,86 | 780,14 | 94,18 | -508,53 |
| | σ_2 kN/m ² | 629,19 | 58,15 | -590,62 | 143,46 | 749,84 |
| p _g | σ_1 kN/m ² | 1706,29 | 781,67 | -305,04 | 781,67 | 1706,29 |
| | σ_2 kN/m ² | -169,91 | 707,50 | 1738,73 | 707,50 | -169,91 |

| | | | | | | | |
|-----------|------------|-------------------|----------|---------|----------|---------|----------|
| $p_s - z$ | σ_1 | kN/m ² | -1344,74 | 123,35 | 1478,62 | 157,64 | -1091,37 |
| | σ_2 | kN/m ² | 1359,03 | 47,47 | -1156,91 | 318,27 | 1281,88 |
| $p_s - x$ | σ_1 | kN/m ² | 1633,34 | 80,43 | -1472,48 | 80,43 | 1633,34 |
| | σ_2 | kN/m ² | -1311,63 | 80,43 | 1472,48 | 80,43 | -1311,63 |
| q_s | σ_1 | kN/m ² | -148,52 | 13,62 | 163,31 | 17,41 | -120,54 |
| | σ_2 | kN/m ² | 150,10 | 5,24 | -127,78 | 35,15 | 141,58 |
| e_s | σ_1 | kN/m ² | 25,43 | 1,25 | -22,92 | 1,25 | 25,43 |
| | σ_2 | kN/m ² | -20,42 | 1,25 | 22,92 | 1,25 | -20,42 |
| g_s | σ_1 | kN/m ² | -40,26 | 0,57 | 49,92 | 6,03 | -32,54 |
| | σ_2 | kN/m ² | 40,26 | 3,72 | -37,79 | 9,18 | 47,98 |
| i | σ_1 | kN/m ² | -667,28 | 2531,66 | 1217,15 | 1287,65 | 2067,83 |
| | σ_2 | kN/m ² | 2364,18 | 9,55 | 1936,34 | 1871,04 | 1131,48 |

| | | | | | | |
|--|-------------------|----------------|-----------------|--|---------|----------|
| Grundkombination (trockener Fels) - q+e+g | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | -2535,51 | 242,19 | 2958,39 | 386,69 | -1977,53 |
| σ_2 | kN/m ² | 2641,86 | 160,50 | -2213,58 | 713,23 | 2629,34 |
| Grundkombination (feuchter Fels) - q+e+g+p _g | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | -829,22 | 1023,87 | 2653,35 | 1168,37 | -271,24 |
| σ_2 | kN/m ² | 2471,95 | 868,00 | -474,85 | 1420,73 | 2459,43 |
| Sonderkombination (trockener Fels) - q+e+g+(q _s +e _s)+g _s | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | -2658,60 | 257,07 | 3098,77 | 405,36 | -2072,64 |
| σ_2 | kN/m ² | 2771,54 | 166,99 | -2318,44 | 749,63 | 2750,50 |
| Sonderkombination (trockener Fels) - q+e+g+(p _s ^z +p _s ^x)+g _s | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | -2246,90 | 445,98 | 2964,53 | 624,77 | -1435,56 |
| σ_2 | kN/m ² | 2689,27 | 288,39 | -1898,01 | 1111,93 | 2599,59 |
| Sonderkombination (feuchter Fels) - q+e+g+p _g +(q _s +e _s)+g _s | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | -952,31 | 1038,74 | 2793,74 | 1187,03 | -366,35 |
| σ_2 | kN/m ² | 2601,63 | 874,49 | -579,71 | 1457,13 | 2580,59 |
| Sonderkombination (feuchter Fels) - q+e+g+p _g +(p _s ^z +p _s ^x)+g _s | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | -580,88 | 1228,22 | 2709,41 | 1412,47 | 238,19 |
| σ_2 | kN/m ² | 2559,62 | 999,62 | -197,07 | 1828,61 | 2477,67 |
| $\sigma_{1(max)}$ | kN/m ² | 3098,77 | -2658,60 | $\sigma_{1, zul} = 1010 \text{ kN/m}^2 \text{ (Zug)}$ | | |
| $\sigma_{2(max)}$ | kN/m ² | 2771,54 | -2318,44 | $\sigma_{2, zul} = 14320 \text{ kN/m}^2 \text{ (Druck)}$ | | |

3. Abschnitt: f=3

| 3.Abschnitt | q | e | g | i | p _s | q _s | e _s | g _s | p _g |
|-------------|-------|------|------|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | MPa |
| | 22,71 | 7,14 | 9,48 | 200,00 | 23,35 | 1,52 | 0,57 | 0,63 | 0,2189 |

| 3.Abschnitt | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| q | $M=q \cdot r_0 \cdot r_2(A3.m+B3)$ [kNm] | 33,46 | -0,94 | -32,61 | 1,99 | 29,37 |
| | $N=q \cdot r_2(C3.m+D3)$ [kN] | 2,67 | 31,92 | 60,12 | 88,94 | 35,60 |
| e | $M=e \cdot r_0 \cdot r_2 A4.m$ [kNm] | -11,46 | 0,00 | 11,46 | 0,00 | -11,46 |
| | $N=C4 \cdot e \cdot r^2$ [kN] | 18,90 | 9,45 | 0,00 | 9,45 | 18,90 |
| g | $M=g \cdot r_0^2 \cdot A5$ [kNm] | 16,55 | 0,65 | -18,03 | 0,65 | 16,55 |
| | $N=g \cdot r_0 \cdot C5$ [kN] | 0,00 | 13,31 | 37,64 | 47,20 | 47,93 |
| p _g | $M=-\gamma_w \cdot r_0 \cdot r_2^2 \cdot A6$ [kNm] | -24,20 | -0,96 | 26,36 | -0,96 | -24,20 |
| | $N=-\gamma_w(r_2^2 \cdot C6-r_2 \cdot h_g)$ [kN] | 588,32 | 579,12 | 568,31 | 579,12 | 588,32 |
| p _s - z | $M=p_s \cdot r_0 \cdot r_2(A3.m+B3)$ [kNm] | 34,40 | -0,97 | -33,53 | 2,04 | 30,19 |
| | $N=p_s \cdot r^2(C3.m+D3)$ [kN] | 2,75 | 32,83 | 61,82 | 91,45 | 36,61 |
| p _s - x | $M=p_s \cdot r_0 \cdot r_2 A4.m$ [kNm] | -37,47 | 0,00 | 37,47 | 0,00 | -37,47 |
| | $N=C4 \cdot p_s \cdot r_2$ [kN] | 61,82 | 30,91 | 0,00 | 30,91 | 61,82 |
| q _s | $M=q_s \cdot r_0 \cdot r_2(A3.m+B3)$ [kNm] | 2,24 | -0,06 | -2,18 | 0,13 | 1,97 |
| | $N=q_s \cdot r_2(C3.m+D3)$ [kN] | 0,18 | 2,14 | 4,03 | 5,96 | 2,38 |
| e _s | $M=e_s \cdot r_0 \cdot r_2 A4.m$ [kNm] | -0,92 | 0,00 | 0,92 | 0,00 | -0,92 |
| | $N=C4 \cdot e_s \cdot r_2$ [kN] | 1,52 | 0,76 | 0,00 | 0,76 | 1,52 |
| g _s | $M=g_s \cdot r_0^2 \cdot A5$ [kNm] | 1,11 | 0,04 | -1,21 | 0,04 | 1,11 |
| | $N=g_s \cdot r_0 \cdot C5$ [kN] | 0,00 | 0,89 | 2,52 | 3,16 | 3,21 |
| i | $M=i \cdot r_0 \cdot r_2[A.m+B+C.n.(1+m)]$ [kNm] | 39,62 | -32,96 | 9,40 | 7,62 | -12,24 |
| | $N=i \cdot r_2[D.m+F+G.n.(1+m)]$ [kN] | 334,95 | 501,61 | 622,47 | 623,49 | 631,51 |

| 3.Abschnitt | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------|------------------------------|----------|---------|----------|---------|----------|
| q | σ_1 kN/m ² | -1247,90 | 115,02 | 1373,23 | 147,83 | -1012,20 |
| | σ_2 kN/m ² | 1261,26 | 44,60 | -1072,60 | 296,89 | 1190,22 |
| e | σ_1 kN/m ² | 476,88 | 23,63 | -429,62 | 23,63 | 476,88 |
| | σ_2 kN/m ² | -382,37 | 23,63 | 429,62 | 23,63 | -382,37 |
| g | σ_1 kN/m ² | -620,56 | 8,97 | 770,10 | 93,70 | -500,74 |
| | σ_2 kN/m ² | 620,56 | 57,58 | -581,87 | 142,31 | 740,39 |
| p _g | σ_1 kN/m ² | 2378,29 | 1483,67 | 432,23 | 1483,67 | 2378,29 |
| | σ_2 kN/m ² | 563,29 | 1411,93 | 2409,33 | 1411,93 | 563,29 |

| | | | | | | | |
|-----------|------------|-------------------|----------|---------|----------|---------|----------|
| $p_s - z$ | σ_1 | kN/m ² | -1283,11 | 118,27 | 1411,97 | 152,00 | -1040,76 |
| | σ_2 | kN/m ² | 1296,84 | 45,86 | -1102,86 | 305,27 | 1223,80 |
| $p_s - x$ | σ_1 | kN/m ² | 1559,60 | 77,28 | -1405,05 | 77,28 | 1559,60 |
| | σ_2 | kN/m ² | -1250,49 | 77,28 | 1405,05 | 77,28 | -1250,49 |
| q_s | σ_1 | kN/m ² | -83,56 | 7,70 | 91,95 | 9,90 | -67,78 |
| | σ_2 | kN/m ² | 84,45 | 2,99 | -71,82 | 19,88 | 79,70 |
| e_s | σ_1 | kN/m ² | 38,37 | 1,90 | -34,57 | 1,90 | 38,37 |
| | σ_2 | kN/m ² | -30,77 | 1,90 | 34,57 | 1,90 | -30,77 |
| g_s | σ_1 | kN/m ² | -41,55 | 0,60 | 51,57 | 6,27 | -33,53 |
| | σ_2 | kN/m ² | 41,55 | 3,86 | -38,96 | 9,53 | 49,58 |
| i | σ_1 | kN/m ² | -648,29 | 2490,07 | 1203,71 | 1272,83 | 2037,68 |
| | σ_2 | kN/m ² | 2323,05 | 17,98 | 1908,64 | 1844,65 | 1119,90 |

| | | | | | | |
|--|-------------------|----------------|-----------------|--|---------|----------|
| Grundkombination (trockener Fels) - q+e+g | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | -1391,58 | 147,62 | 1713,70 | 265,16 | -1036,05 |
| σ_2 | kN/m ² | 1499,45 | 125,81 | -1224,85 | 462,83 | 1548,24 |
| Grundkombination (feuchter Fels) - q+e+g+p _g | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | 986,71 | 1631,30 | 2145,93 | 1748,83 | 1342,23 |
| σ_2 | kN/m ² | 2062,75 | 1537,73 | 1184,47 | 1874,76 | 2111,54 |
| Sonderkombination (trockener Fels) - q+e+g+(q _s +e _s)+g _s | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | -1436,77 | 157,23 | 1771,08 | 276,96 | -1065,46 |
| σ_2 | kN/m ² | 1553,14 | 130,70 | -1262,10 | 484,61 | 1597,17 |
| Sonderkombination (trockener Fels) - q+e+g+(p _s ^z +p _s ^x)+g _s | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | -1115,08 | 343,17 | 1720,62 | 494,43 | -517,21 |
| σ_2 | kN/m ² | 1545,80 | 248,94 | -922,67 | 845,38 | 1521,55 |
| Sonderkombination (feuchter Fels) - q+e+g+p _g +(q _s +e _s)+g _s | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | 941,52 | 1640,90 | 2203,31 | 1760,63 | 1312,83 |
| σ_2 | kN/m ² | 2116,43 | 1542,62 | 1147,22 | 1896,54 | 2160,46 |
| Sonderkombination (feuchter Fels) - q+e+g+p _g +(p _s ^z +p _s ^x)+g _s | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | 1221,65 | 1827,45 | 2204,42 | 1984,38 | 1827,54 |
| σ_2 | kN/m ² | 2150,64 | 1664,72 | 1447,70 | 2266,83 | 2134,42 |
| $\sigma_{1(max)}$ | kN/m ² | 2204,42 | -1436,77 | $\sigma_{1, zul} = 1010 \text{ kN/m}^2 \text{ (Zug)}$ | | |
| $\sigma_{2(max)}$ | kN/m ² | 2266,83 | -1262,10 | $\sigma_{2, zul} = 14320 \text{ kN/m}^2 \text{ (Druck)}$ | | |

4. Abschnitt: f=5

| 4.Abschnitt | q | e | g | i | p _s | q _s | e _s | g _s | p _g |
|-------------|------|------|------|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | MPa |
| | 8,57 | 0,00 | 8,30 | 200,00 | 33,58 | 0,63 | 0,00 | 0,61 | 0,3538 |

| 4.Abschnitt | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| q | $M=q \cdot r_0 \cdot r_2(A3.m+B3)$ [kNm] | 12,52 | -0,35 | -12,20 | 0,74 | 10,99 |
| | $N=q \cdot r_2(C3.m+D3)$ [kN] | 1,00 | 11,98 | 22,56 | 33,37 | 13,36 |
| e | $M=e \cdot r_0 \cdot r_2 A4.m$ [kNm] | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | $N=C4.e \cdot r^2$ [kN] | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| g | $M=g \cdot r_0^2 \cdot A5$ [kNm] | 14,39 | 0,56 | -15,68 | 0,56 | 14,39 |
| | $N=g \cdot r_0 \cdot C5$ [kN] | 0,00 | 11,61 | 32,84 | 41,18 | 41,81 |
| p _g | $M=-\gamma_w \cdot r_0 \cdot r_2^2 \cdot A6$ [kNm] | -23,86 | -0,94 | 25,99 | -0,94 | -23,86 |
| | $N=-\gamma_w(r_2^2 \cdot C6-r_2 \cdot h_g)$ [kN] | 926,23 | 917,13 | 906,45 | 917,13 | 926,23 |
| p _s - z | $M=p_s \cdot r_0 \cdot r_2(A3.m+B3)$ [kNm] | 49,04 | -1,38 | -47,80 | 2,91 | 43,05 |
| | $N=p_s \cdot r^2(C3.m+D3)$ [kN] | 3,93 | 46,94 | 88,40 | 130,77 | 52,35 |
| p _s - x | $M=p_s \cdot r_0 \cdot r_2 A4.m$ [kNm] | -53,42 | 0,00 | 53,42 | 0,00 | -53,42 |
| | $N=C4.p_s \cdot r_2$ [kN] | 88,40 | 44,20 | 0,00 | 44,20 | 88,40 |
| q _s | $M=q_s \cdot r_0 \cdot r_2(A3.m+B3)$ [kNm] | 0,93 | -0,03 | -0,90 | 0,06 | 0,81 |
| | $N=q_s \cdot r_2(C3.m+D3)$ [kN] | 0,07 | 0,89 | 1,67 | 2,47 | 0,99 |
| e _s | $M=e_s \cdot r_0 \cdot r_2 A4.m$ [kNm] | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | $N=C4.e_s \cdot r_2$ [kN] | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| g _s | $M=g_s \cdot r_0^2 \cdot A5$ [kNm] | 1,07 | 0,04 | -1,16 | 0,04 | 1,07 |
| | $N=g_s \cdot r_0 \cdot C5$ [kN] | 0,00 | 0,86 | 2,43 | 3,05 | 3,10 |
| i | $M=i \cdot r_0 \cdot r_2[A.m+B+C.n.(1+m)]$ [kNm] | 39,28 | -32,68 | 9,32 | 7,56 | -12,13 |
| | $N=i \cdot r_2.[D.m+F+G.n.(1+m)]$ [kN] | 333,05 | 498,77 | 618,94 | 619,96 | 627,94 |

| 4.Abschnitt | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------|------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| q | σ_1 kN/m ² | -610,17 | 51,43 | 662,02 | 58,94 | -499,93 |
| | σ_2 kN/m ² | 615,90 | 17,02 | -533,11 | 131,78 | 576,27 |
| e | σ_1 kN/m ² | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | σ_2 kN/m ² | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| g | σ_1 kN/m ² | -705,01 | 5,56 | 861,81 | 90,04 | -585,54 |
| | σ_2 kN/m ² | 705,01 | 60,79 | -674,14 | 145,27 | 824,48 |
| p _g | σ_1 kN/m ² | 3814,79 | 2666,57 | 1317,07 | 2666,57 | 3814,79 |
| | σ_2 kN/m ² | 1477,93 | 2574,19 | 3862,64 | 2574,19 | 1477,93 |

| | | | | | | | |
|-----------|------------|-------------------|----------|---------|----------|---------|----------|
| $p_s - z$ | σ_1 | kN/m ² | -2390,80 | 201,52 | 2593,96 | 230,92 | -1958,82 |
| | σ_2 | kN/m ² | 2413,24 | 66,69 | -2088,83 | 516,33 | 2257,94 |
| $p_s - x$ | σ_1 | kN/m ² | 2868,86 | 126,28 | -2616,30 | 126,28 | 2868,86 |
| | σ_2 | kN/m ² | -2363,73 | 126,28 | 2616,30 | 126,28 | -2363,73 |
| q_s | σ_1 | kN/m ² | -45,20 | 3,81 | 49,04 | 4,37 | -37,03 |
| | σ_2 | kN/m ² | 45,62 | 1,26 | -39,49 | 9,76 | 42,68 |
| e_s | σ_1 | kN/m ² | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | σ_2 | kN/m ² | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| g_s | σ_1 | kN/m ² | -52,22 | 0,41 | 63,83 | 6,67 | -43,37 |
| | σ_2 | kN/m ² | 52,22 | 4,50 | -49,93 | 10,76 | 61,07 |
| i | σ_1 | kN/m ² | -972,16 | 3025,57 | 1312,02 | 1401,11 | 2388,31 |
| | σ_2 | kN/m ² | 2875,33 | -175,47 | 2224,80 | 2141,54 | 1199,90 |

| | | | | | | |
|--|-------------------|----------------|-----------------|--|---------|----------|
| Grundkombination (trockener Fels) - q+e+g | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | -1315,18 | 57,00 | 1523,83 | 148,98 | -1085,47 |
| σ_2 | kN/m ² | 1320,91 | 77,81 | -1207,25 | 277,04 | 1400,75 |
| Grundkombination (feuchter Fels) - q+e+g+p _g | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | 2499,61 | 2723,57 | 2840,90 | 2815,55 | 2729,33 |
| σ_2 | kN/m ² | 2798,84 | 2652,00 | 2655,39 | 2851,24 | 2878,68 |
| Sonderkombination (trockener Fels) - q+e+g+(q _s +e _s)+g _s | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | -1360,38 | 60,81 | 1572,87 | 153,34 | -1122,50 |
| σ_2 | kN/m ² | 1366,53 | 79,07 | -1246,74 | 286,80 | 1443,43 |
| Sonderkombination (trockener Fels) - q+e+g+(p _s ^z +p _s ^x)+g _s | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | -837,12 | 384,80 | 1501,50 | 506,18 | -175,43 |
| σ_2 | kN/m ² | 1370,42 | 270,78 | -679,79 | 919,65 | 1294,96 |
| Sonderkombination (feuchter Fels) - q+e+g+p _g +(q _s +e _s)+g _s | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | 2454,41 | 2727,38 | 2889,93 | 2819,92 | 2692,30 |
| σ_2 | kN/m ² | 2844,46 | 2653,26 | 2615,90 | 2861,00 | 2921,36 |
| Sonderkombination (feuchter Fels) - q+e+g+p _g +(p _s ^z +p _s ^x)+g _s | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | 2925,45 | 3051,79 | 2882,40 | 3179,42 | 3595,99 |
| σ_2 | kN/m ² | 2900,57 | 2849,47 | 3132,92 | 3504,60 | 2833,96 |
| $\sigma_{1(max)}$ | kN/m ² | 3595,99 | -1360,38 | $\sigma_{1, zul} = 1010 \text{ kN/m}^2 \text{ (Zug)}$ | | |
| $\sigma_{2(max)}$ | kN/m ² | 3504,60 | -1246,74 | $\sigma_{2, zul} = 14320 \text{ kN/m}^2 \text{ (Druck)}$ | | |

5. Abschnitt: f=2

| 5.Abschnitt | q | e | g | i | p _s | q _s | e _s | g _s | p _g |
|-------------|-------|------|------|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | MPa |
| | 31,05 | 5,33 | 9,48 | 200,00 | 32,06 | 2,43 | 0,40 | 0,74 | 0,2578 |

| 5.Abschnitt | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| q | $M=q \cdot r_0 \cdot r_2(A3.m+B3)$ [kNm] | 46,14 | -1,29 | -44,97 | 2,74 | 40,50 |
| | $N=q \cdot r_2(C3.m+D3)$ [kN] | 3,67 | 43,90 | 82,67 | 122,30 | 48,95 |
| e | $M=e \cdot r_0 \cdot r_2 A4.m$ [kNm] | -8,63 | 0,00 | 8,63 | 0,00 | -8,63 |
| | $N=C4 \cdot e \cdot r^2$ [kN] | 14,19 | 7,10 | 0,00 | 7,10 | 14,19 |
| g | $M=g \cdot r_0^2 \cdot A5$ [kNm] | 16,65 | 0,65 | -18,13 | 0,65 | 16,65 |
| | $N=g \cdot r_0 \cdot C5$ [kN] | 0,00 | 13,35 | 37,76 | 47,34 | 48,07 |
| p _g | $M=-\gamma_w \cdot r_0 \cdot r_2^2 \cdot A6$ [kNm] | -24,55 | -0,97 | 26,74 | -0,97 | -24,55 |
| | $N=-\gamma_w(r_2^2 \cdot C6-r_2 \cdot h_g)$ [kN] | 688,97 | 679,67 | 668,74 | 679,67 | 688,97 |
| p _s - z | $M=p_s \cdot r_0 \cdot r_2(A3.m+B3)$ [kNm] | 47,63 | -1,34 | -46,43 | 2,83 | 41,81 |
| | $N=p_s \cdot r^2(C3.m+D3)$ [kN] | 3,79 | 45,32 | 85,35 | 126,26 | 50,54 |
| p _s - x | $M=p_s \cdot r_0 \cdot r_2 A4.m$ [kNm] | -51,88 | 0,00 | 51,88 | 0,00 | -51,88 |
| | $N=C4 \cdot p_s \cdot r_2$ [kN] | 85,35 | 42,67 | 0,00 | 42,67 | 85,35 |
| q _s | $M=q_s \cdot r_0 \cdot r_2(A3.m+B3)$ [kNm] | 3,62 | -0,10 | -3,53 | 0,21 | 3,17 |
| | $N=q_s \cdot r_2(C3.m+D3)$ [kN] | 0,29 | 3,44 | 6,48 | 9,59 | 3,84 |
| e _s | $M=e_s \cdot r_0 \cdot r_2 A4.m$ [kNm] | -0,65 | 0,00 | 0,65 | 0,00 | -0,65 |
| | $N=C4 \cdot e_s \cdot r_2$ [kN] | 1,07 | 0,53 | 0,00 | 0,53 | 1,07 |
| g _s | $M=g_s \cdot r_0^2 \cdot A5$ [kNm] | 1,30 | 0,05 | -1,42 | 0,05 | 1,30 |
| | $N=g_s \cdot r_0 \cdot C5$ [kN] | 0,00 | 1,05 | 2,96 | 3,71 | 3,77 |
| i | $M=i \cdot r_0 \cdot r_2[A.m+B+C.n.(1+m)]$ [kNm] | 39,96 | -33,25 | 9,48 | 7,69 | -12,34 |
| | $N=i \cdot r_2[D.m+F+G.n.(1+m)]$ [kN] | 336,85 | 504,45 | 626,00 | 627,03 | 635,09 |

| 5.Abschnitt | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------|------------------------------|----------|---------|----------|---------|----------|
| q | σ_1 kN/m ² | -1720,96 | 158,30 | 1893,16 | 202,96 | -1396,26 |
| | σ_2 kN/m ² | 1739,33 | 61,18 | -1479,80 | 408,53 | 1641,03 |
| e | σ_1 kN/m ² | 358,97 | 17,74 | -323,49 | 17,74 | 358,97 |
| | σ_2 kN/m ² | -288,01 | 17,74 | 323,49 | 17,74 | -288,01 |
| g | σ_1 kN/m ² | -624,25 | 8,93 | 774,39 | 93,91 | -504,07 |
| | σ_2 kN/m ² | 624,25 | 57,82 | -585,61 | 142,80 | 744,43 |
| p _g | σ_1 kN/m ² | 2642,95 | 1735,56 | 669,09 | 1735,56 | 2642,95 |
| | σ_2 kN/m ² | 801,89 | 1662,78 | 2674,59 | 1662,78 | 801,89 |

| | | | | | | | |
|-----------|------------|-------------------|----------|---------|----------|---------|----------|
| $p_s - z$ | σ_1 | kN/m ² | -1776,67 | 163,42 | 1954,43 | 209,52 | -1441,45 |
| | σ_2 | kN/m ² | 1795,63 | 63,16 | -1527,70 | 421,75 | 1694,14 |
| $p_s - x$ | σ_1 | kN/m ² | 2158,85 | 106,68 | -1945,48 | 106,68 | 2158,85 |
| | σ_2 | kN/m ² | -1732,12 | 106,68 | 1945,48 | 106,68 | -1732,12 |
| q_s | σ_1 | kN/m ² | -134,91 | 12,41 | 148,40 | 15,91 | -109,45 |
| | σ_2 | kN/m ² | 136,35 | 4,80 | -116,00 | 32,02 | 128,64 |
| e_s | σ_1 | kN/m ² | 26,96 | 1,33 | -24,30 | 1,33 | 26,96 |
| | σ_2 | kN/m ² | -21,63 | 1,33 | 24,30 | 1,33 | -21,63 |
| g_s | σ_1 | kN/m ² | -48,94 | 0,70 | 60,70 | 7,36 | -39,51 |
| | σ_2 | kN/m ² | 48,94 | 4,53 | -45,91 | 11,19 | 58,36 |
| i | σ_1 | kN/m ² | -656,39 | 2507,87 | 1209,48 | 1279,19 | 2050,59 |
| | σ_2 | kN/m ² | 2340,64 | 14,39 | 1920,50 | 1855,95 | 1124,87 |

| | | | | | | |
|--|-------------------|----------------|-----------------|--|---------|----------|
| Grundkombination (trockener Fels) - q+e+g | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | -1986,25 | 184,97 | 2344,06 | 314,60 | -1541,36 |
| σ_2 | kN/m ² | 2075,57 | 136,74 | -1741,93 | 569,07 | 2097,45 |
| Grundkombination (feuchter Fels) - q+e+g+p _g | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | 656,70 | 1920,52 | 3013,15 | 2050,16 | 1101,59 |
| σ_2 | kN/m ² | 2877,46 | 1799,52 | 932,66 | 2231,85 | 2899,34 |
| Sonderkombination (trockener Fels) - q+e+g+(q _s +e _s)+g _s | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | -2094,19 | 198,71 | 2468,17 | 331,84 | -1623,85 |
| σ_2 | kN/m ² | 2190,28 | 142,87 | -1833,63 | 602,43 | 2204,46 |
| Sonderkombination (trockener Fels) - q+e+g+(p _s ^z +p _s ^x)+g _s | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | -1604,06 | 455,07 | 2353,01 | 630,81 | -823,96 |
| σ_2 | kN/m ² | 2139,08 | 306,58 | -1324,14 | 1097,51 | 2059,48 |
| Sonderkombination (feuchter Fels) - q+e+g+p _g +(q _s +e _s)+g _s | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | 548,76 | 1934,26 | 3137,26 | 2067,40 | 1019,11 |
| σ_2 | kN/m ² | 2992,17 | 1805,65 | 840,96 | 2265,21 | 3006,34 |
| Sonderkombination (feuchter Fels) - q+e+g+p _g +(p _s ^z +p _s ^x)+g _s | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | 989,95 | 2191,33 | 3082,81 | 2373,73 | 1779,48 |
| σ_2 | kN/m ² | 2989,90 | 1973,89 | 1304,54 | 2771,48 | 2919,72 |
| $\sigma_{1(max)}$ | kN/m ² | 3137,26 | -2094,19 | $\sigma_{1, zul} = 1010 \text{ kN/m}^2 \text{ (Zug)}$ | | |
| $\sigma_{2(max)}$ | kN/m ² | 3006,34 | -1833,63 | $\sigma_{2, zul} = 14320 \text{ kN/m}^2 \text{ (Druck)}$ | | |

6. Abschnitt: f=1,5

| 6.Abschnitt | q | e | g | i | p _s | q _s | e _s | g _s | p _g |
|-------------|-------|------|------|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | MPa |
| | 41,40 | 6,09 | 9,48 | 200,00 | 29,99 | 3,31 | 0,47 | 0,76 | 0,2424 |

| 6.Abschnitt | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| q | $M=q \cdot r_0 \cdot r_2(A3 \cdot m+B3)$ [kNm] | 61,34 | -1,72 | -59,79 | 3,64 | 53,84 |
| | $N=q \cdot r_2(C3 \cdot m+D3)$ [kN] | 4,89 | 58,42 | 110,02 | 162,76 | 65,15 |
| e | $M=e \cdot r_0 \cdot r_2 A4 \cdot m$ [kNm] | -9,83 | 0,00 | 9,83 | 0,00 | -9,83 |
| | $N=C4 \cdot e \cdot r^2$ [kN] | 16,18 | 8,09 | 0,00 | 8,09 | 16,18 |
| g | $M=g \cdot r_0^2 \cdot A5$ [kNm] | 16,61 | 0,65 | -18,10 | 0,65 | 16,61 |
| | $N=g \cdot r_0 \cdot C5$ [kN] | 0,00 | 13,34 | 37,72 | 47,30 | 48,03 |
| p _g | $M=-\gamma_w \cdot r_0 \cdot r_2^2 \cdot A6$ [kNm] | -24,43 | -0,97 | 26,61 | -0,97 | -24,43 |
| | $N=-\gamma_w(r_2^2 \cdot C6-r_2 \cdot h_g)$ [kN] | 649,19 | 639,92 | 629,03 | 639,92 | 649,19 |
| p _s - z | $M=p_s \cdot r_0 \cdot r_2(A3 \cdot m+B3)$ [kNm] | 44,44 | -1,25 | -43,31 | 2,64 | 39,00 |
| | $N=p_s \cdot r^2(C3 \cdot m+D3)$ [kN] | 3,54 | 42,32 | 79,70 | 117,90 | 47,20 |
| p _s - x | $M=p_s \cdot r_0 \cdot r_2 A4 \cdot m$ [kNm] | -48,40 | 0,00 | 48,40 | 0,00 | -48,40 |
| | $N=C4 \cdot p_s \cdot r_2$ [kN] | 79,70 | 39,85 | 0,00 | 39,85 | 79,70 |
| q _s | $M=q_s \cdot r_0 \cdot r_2(A3 \cdot m+B3)$ [kNm] | 4,91 | -0,14 | -4,78 | 0,29 | 4,31 |
| | $N=q_s \cdot r_2(C3 \cdot m+D3)$ [kN] | 0,39 | 4,67 | 8,80 | 13,02 | 5,21 |
| e _s | $M=e_s \cdot r_0 \cdot r_2 A4 \cdot m$ [kNm] | -0,75 | 0,00 | 0,75 | 0,00 | -0,75 |
| | $N=C4 \cdot e_s \cdot r_2$ [kN] | 1,24 | 0,62 | 0,00 | 0,62 | 1,24 |
| g _s | $M=g_s \cdot r_0^2 \cdot A5$ [kNm] | 1,33 | 0,05 | -1,45 | 0,05 | 1,33 |
| | $N=g_s \cdot r_0 \cdot C5$ [kN] | 0,00 | 1,07 | 3,02 | 3,78 | 3,84 |
| i | $M=i \cdot r_0 \cdot r_2[A \cdot m+B+C \cdot n \cdot (1+m)]$ [kNm] | 39,85 | -33,15 | 9,45 | 7,67 | -12,31 |
| | $N=i \cdot r_2[D \cdot m+F+G \cdot n \cdot (1+m)]$ [kN] | 336,22 | 503,50 | 624,82 | 625,85 | 633,90 |

| 6.Abschnitt | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------|------------------------------|----------|---------|----------|---------|----------|
| q | σ_1 kN/m ² | -2288,04 | 210,61 | 2517,25 | 270,23 | -1856,18 |
| | σ_2 kN/m ² | 2312,48 | 81,48 | -1967,15 | 543,55 | 2181,94 |
| e | σ_1 kN/m ² | 409,02 | 20,23 | -368,56 | 20,23 | 409,02 |
| | σ_2 kN/m ² | -328,10 | 20,23 | 368,56 | 20,23 | -328,10 |
| g | σ_1 kN/m ² | -623,02 | 8,94 | 772,96 | 93,84 | -502,96 |
| | σ_2 kN/m ² | 623,02 | 57,74 | -584,37 | 142,64 | 743,08 |
| p _g | σ_1 kN/m ² | 2539,15 | 1636,03 | 574,59 | 1636,03 | 2539,15 |
| | σ_2 kN/m ² | 706,80 | 1563,59 | 2570,58 | 1563,59 | 706,80 |

| | | | | | | | |
|-----------|------------|-------------------|----------|---------|----------|---------|----------|
| $p_s - z$ | σ_1 | kN/m ² | -1657,50 | 152,57 | 1823,55 | 195,76 | -1344,66 |
| | σ_2 | kN/m ² | 1675,21 | 59,03 | -1425,04 | 393,76 | 1580,64 |
| $p_s - x$ | σ_1 | kN/m ² | 2014,26 | 99,63 | -1815,00 | 99,63 | 2014,26 |
| | σ_2 | kN/m ² | -1615,75 | 99,63 | 1815,00 | 99,63 | -1615,75 |
| q_s | σ_1 | kN/m ² | -183,07 | 16,85 | 201,41 | 21,62 | -148,51 |
| | σ_2 | kN/m ² | 185,02 | 6,52 | -157,39 | 43,49 | 174,58 |
| e_s | σ_1 | kN/m ² | 31,36 | 1,55 | -28,26 | 1,55 | 31,36 |
| | σ_2 | kN/m ² | -25,15 | 1,55 | 28,26 | 1,55 | -25,15 |
| g_s | σ_1 | kN/m ² | -49,85 | 0,72 | 61,84 | 7,51 | -40,24 |
| | σ_2 | kN/m ² | 49,85 | 4,62 | -46,76 | 11,41 | 59,45 |
| i | σ_1 | kN/m ² | -653,69 | 2501,93 | 1207,56 | 1277,07 | 2046,28 |
| | σ_2 | kN/m ² | 2334,77 | 15,59 | 1916,54 | 1852,18 | 1123,22 |

| | | | | | | |
|--|-------------------|----------------|-----------------|--|---------|----------|
| Grundkombination (trockener Fels) - q+e+g | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | -2502,04 | 239,78 | 2921,66 | 384,30 | -1950,12 |
| σ_2 | kN/m ² | 2607,40 | 159,46 | -2182,96 | 706,42 | 2596,92 |
| Grundkombination (feuchter Fels) - q+e+g+p _g | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | 37,11 | 1875,81 | 3496,24 | 2020,33 | 589,02 |
| σ_2 | kN/m ² | 3314,20 | 1723,05 | 387,62 | 2270,01 | 3303,72 |
| Sonderkombination (trockener Fels) - q+e+g+(q _s +e _s)+g _s | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | -2653,75 | 258,18 | 3094,81 | 407,47 | -2067,28 |
| σ_2 | kN/m ² | 2767,27 | 167,53 | -2312,10 | 751,46 | 2746,35 |
| Sonderkombination (trockener Fels) - q+e+g+(p _s ^z +p _s ^x)+g _s | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | -2145,28 | 491,97 | 2930,20 | 679,69 | -1280,52 |
| σ_2 | kN/m ² | 2666,86 | 318,11 | -1793,00 | 1199,80 | 2561,81 |
| Sonderkombination (feuchter Fels) - q+e+g+p _g +(q _s +e _s)+g _s | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | -114,60 | 1894,21 | 3669,39 | 2043,50 | 471,87 |
| σ_2 | kN/m ² | 3474,07 | 1731,12 | 258,49 | 2315,05 | 3453,15 |
| Sonderkombination (feuchter Fels) - q+e+g+p _g +(p _s ^z +p _s ^x)+g _s | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | 344,02 | 2128,72 | 3566,63 | 2323,23 | 1218,38 |
| σ_2 | kN/m ² | 3423,51 | 1886,32 | 730,83 | 2774,80 | 3328,06 |
| $\sigma_{1(max)}$ | kN/m ² | 3669,39 | -2653,75 | $\sigma_{1, zul} = 1010 \text{ kN/m}^2 \text{ (Zug)}$ | | |
| $\sigma_{2(max)}$ | kN/m ² | 3474,07 | -2312,10 | $\sigma_{2, zul} = 14320 \text{ kN/m}^2 \text{ (Druck)}$ | | |

6.1. Abschnitt: f=1,5

| 6.1.Abschnitt | q | e | g | i | p _s | q _s | e _s | g _s | p _g |
|---------------|-------|------|------|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | kN/m | MPa |
| | 41,40 | 6,09 | 9,60 | 200,00 | 0,00 | 3,46 | 0,49 | 0,80 | 0 |

| 6.1. Abschnitt | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| q | $M=q \cdot r_0 \cdot r_2(A3 \cdot m+B3)$ [kNm] | 61,34 | -1,72 | -59,79 | 3,64 | 53,84 |
| | $N=q \cdot r_2(C3 \cdot m+D3)$ [kN] | 4,89 | 58,42 | 110,02 | 162,76 | 65,15 |
| e | $M=e \cdot r_0 \cdot r_2 A4 \cdot m$ [kNm] | -9,83 | 0,00 | 9,83 | 0,00 | -9,83 |
| | $N=C4 \cdot e \cdot r^2$ [kN] | 16,18 | 8,09 | 0,00 | 8,09 | 16,18 |
| g | $M=g \cdot r_0^2 \cdot A5$ [kNm] | 16,82 | 0,66 | -18,32 | 0,66 | 16,82 |
| | $N=g \cdot r_0 \cdot C5$ [kN] | 0,00 | 13,50 | 38,19 | 47,88 | 48,62 |
| p _g | $M=-\gamma_w \cdot r_0 \cdot r_2^2 \cdot A6$ [kNm] | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | $N=-\gamma_w(r_2^2 \cdot C6-r_2 \cdot h_g)$ [kN] | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| p _{s-z} | $M=p_s \cdot r_0 \cdot r_2(A3 \cdot m+B3)$ [kNm] | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | $N=p_s \cdot r^2(C3 \cdot m+D3)$ [kN] | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| p _{s-x} | $M=p_s \cdot r_0 \cdot r_2 A4 \cdot m$ [kNm] | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | $N=C4 \cdot p_s \cdot r_2$ [kN] | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| q _s | $M=q_s \cdot r_0 \cdot r_2(A3 \cdot m+B3)$ [kNm] | 5,12 | -0,14 | -4,99 | 0,30 | 4,50 |
| | $N=q_s \cdot r_2(C3 \cdot m+D3)$ [kN] | 0,41 | 4,88 | 9,19 | 13,59 | 5,44 |
| e _s | $M=e_s \cdot r_0 \cdot r_2 A4 \cdot m$ [kNm] | -0,79 | 0,00 | 0,79 | 0,00 | -0,79 |
| | $N=C4 \cdot e_s \cdot r_2$ [kN] | 1,30 | 0,65 | 0,00 | 0,65 | 1,30 |
| g _s | $M=g_s \cdot r_0^2 \cdot A5$ [kNm] | 1,40 | 0,06 | -1,53 | 0,06 | 1,40 |
| | $N=g_s \cdot r_0 \cdot C5$ [kN] | 0,00 | 1,13 | 3,19 | 4,00 | 4,06 |
| i | $M=i \cdot r_0 \cdot r_2[A \cdot m+B+C \cdot n \cdot (1+m)]$ [kNm] | 39,85 | -33,15 | 9,45 | 7,67 | -12,31 |
| | $N=i \cdot r_2[D \cdot m+F+G \cdot n \cdot (1+m)]$ [kN] | 336,22 | 503,50 | 624,82 | 625,85 | 633,90 |

| 6.1. Abschnitt | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------|------------------------------|----------|--------|----------|--------|----------|
| q | σ_1 kN/m ² | -2288,04 | 210,61 | 2517,25 | 270,23 | -1856,18 |
| | σ_2 kN/m ² | 2312,48 | 81,48 | -1967,15 | 543,55 | 2181,94 |
| e | σ_1 kN/m ² | 409,02 | 20,23 | -368,56 | 20,23 | 409,02 |
| | σ_2 kN/m ² | -328,10 | 20,23 | 368,56 | 20,23 | -328,10 |
| g | σ_1 kN/m ² | -630,79 | 9,05 | 782,60 | 95,01 | -509,23 |
| | σ_2 kN/m ² | 630,79 | 58,46 | -591,65 | 144,42 | 752,35 |
| p _g | σ_1 kN/m ² | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | σ_2 kN/m ² | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

| | | | | | | | |
|-----------|------------|-------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $p_s - z$ | σ_1 | kN/m ² | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | σ_2 | kN/m ² | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| $p_s - x$ | σ_1 | kN/m ² | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | σ_2 | kN/m ² | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| q_s | σ_1 | kN/m ² | -191,10 | 17,59 | 210,24 | 22,57 | -155,03 |
| | σ_2 | kN/m ² | 193,14 | 6,81 | -164,30 | 45,40 | 182,24 |
| e_s | σ_1 | kN/m ² | 32,73 | 1,62 | -29,50 | 1,62 | 32,73 |
| | σ_2 | kN/m ² | -26,26 | 1,62 | 29,50 | 1,62 | -26,26 |
| g_s | σ_1 | kN/m ² | -52,68 | 0,76 | 65,36 | 7,94 | -42,53 |
| | σ_2 | kN/m ² | 52,68 | 4,88 | -49,41 | 12,06 | 62,84 |
| i | σ_1 | kN/m ² | -653,69 | 2501,93 | 1207,56 | 1277,07 | 2046,28 |
| | σ_2 | kN/m ² | 2334,77 | 15,59 | 1916,54 | 1852,18 | 1123,22 |

| Grundkombination (trockener Fels) - q+e+g | | | | | | |
|--|-------------------|----------------|-----------------|--|--------|----------|
| σ_1 | kN/m ² | -2509,81 | 239,89 | 2931,29 | 385,47 | -1956,39 |
| σ_2 | kN/m ² | 2615,17 | 160,18 | -2190,24 | 708,19 | 2606,19 |
| Grundkombination (feuchter Fels) - q+e+g+p _g | | | | | | |
| F σ_1 | kN/m ² | -2509,81 | 239,89 | 2931,29 | 385,47 | -1956,39 |
| σ_2 | kN/m ² | 2615,17 | 160,18 | -2190,24 | 708,19 | 2606,19 |
| Sonderkombination (trockener Fels) - q+e+g+(q _s +e _s)+g _s | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | -2668,17 | 259,10 | 3112,04 | 409,66 | -2078,69 |
| σ_2 | kN/m ² | 2782,05 | 168,60 | -2325,04 | 755,21 | 2762,16 |
| Sonderkombination (trockener Fels) - q+e+g+(p _s ^z +p _s ^x)+g _s | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | -2509,81 | 239,89 | 2931,29 | 385,47 | -1956,39 |
| σ_2 | kN/m ² | 2615,17 | 160,18 | -2190,24 | 708,19 | 2606,19 |
| Sonderkombination (feuchter Fels) - q+e+g+p _g +(q _s +e _s)+g _s | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | -2668,17 | 259,10 | 3112,04 | 409,66 | -2078,69 |
| σ_2 | kN/m ² | 2782,05 | 168,60 | -2325,04 | 755,21 | 2762,16 |
| Sonderkombination (feuchter Fels) - q+e+g+p _g +(p _s ^z +p _s ^x)+g _s | | | | | | |
| σ_1 | kN/m ² | -2562,49 | 240,65 | 2996,66 | 393,41 | -1998,92 |
| σ_2 | kN/m ² | 2667,85 | 165,06 | -2239,66 | 720,26 | 2669,02 |
| $\sigma_{1(max)}$ | kN/m ² | 3112,04 | -2668,17 | $\sigma_{1, zul} = 1010 \text{ kN/m}^2 \text{ (Zug)}$ | | |
| $\sigma_{2(max)}$ | kN/m ² | 2782,05 | -2325,04 | $\sigma_{2, zul} = 14320 \text{ kN/m}^2 \text{ (Druck)}$ | | |

7.4. Statische Überprüfung der Panzerung

7.4.1. Tragfähigkeitsüberprüfung auf Innenwasserdruck

Die Tangentialzugspannungen, die vom Innenwasserdruck hervorgerufen werden, sind durch die Beziehungen für den entsprechenden Fall ermittelt worden:

- Mit Berücksichtigung der Felsmassivgegenwirkung

$$\sigma_z = \frac{p_i \cdot r_0 + a \cdot k_{0,u}}{t + 4,33 \cdot 10^{-6} \cdot r_0 \cdot k_{0,u}} \quad [\text{MPa}]$$

p_i – Innenwasserdruck; $p_i = \gamma_w \cdot H_{\text{dyn}}$

H_{dyn} – Dynamische Wasserdruckhöhe

$$H_{\text{dyn}} = H_{\text{br}}^{\text{max}} - 30\% H_{\text{br}}^{\text{max}}$$

$$r_0 = \frac{r_1 + r_2}{2} \quad \text{– mittlerer Radius der Panzerung}$$

r_1 – Innenradius der Panzerung

r_2 – äußerer Radius der Panzerung; $r_2 = r_1 + t$

t – Stärke der Panzerung

a – Breite der Fuge zwischen der Panzerung und dem Füllbeton

$$a = 4,33 \cdot 10^{-4} \cdot r_0$$

$k_{0,u}$ – umgerechneter Koeffizient der relativen elastischen Gegenwirkung

$$k_{0,u} = \frac{1}{\frac{1}{E_b} \cdot \ln\left(\frac{r_3}{r_0}\right) + \frac{1}{k_0}} \quad [\text{N} / \text{cm}^2]$$

r_3 – äußerer Radius der Betonauskleidung; $r_3 = r_2 + d_6 + a$

k_0 – Koeffizient der relativen elastischen Gegenwirkung in N/cm^3

Zulässige Spannungen

$$\sigma_z \leq \sigma_{\text{zul}} = \frac{\gamma_c \cdot R_u}{\gamma_n \cdot \gamma_u} = \frac{0,75 \times 490}{1,25 \times 1,3} = 226,15 \text{ MPa}$$

$\gamma_c = 0,75$ – Koeffizient der Arbeitsbedingungen für die entsprechende Bauphase

$\gamma_n = 1,25$ – Zuverlässigkeitskoeffizient für I^{ste} Werkklasse

$\gamma_u = 1,3$ – Koeffizient der Zuverlässigkeit von Bauteilen

R_u – Bemessungszugfestigkeit vom Stahl; Tabelle 15

- Ohne Berücksichtigung der Felsmassivgegenwirkung und wenn die Bedingung $a_r/r_0 > B$ erfüllt ist

$$B = 4,33 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{P_i \cdot r_0}{t}$$

Die Tangentialspannungen werden in diesem Fall wie folgt berechnet:

$$\sigma_z = \frac{P_i \cdot r_0}{t} \quad [\text{MPa}]$$

Zulässige Spannungen

$$\sigma_z \leq \sigma_{zul} = \frac{\gamma_c \cdot R_y}{\gamma_n} = \frac{0,75 \times 355}{1,25} = 213 \text{ MPa}$$

$\gamma_c = 0,75$ – Koeffizient der Arbeitsbedingungen für die entsprechende Bauphase

$\gamma_n = 1,25$ – Zuverlässigkeitskoeffizient für I^{ste} Werkklasse

R_y – Bemessungsfließgrenze vom Stahl; Tabelle 15

Für die Panzerung wird warmgewalztes Stahlblech vom Stomana Industrie Katalog ausgewählt:

| Stahlklasse | | Fließgrenze | Zugfestigkeit |
|-------------|-----------|-------------------------|-------------------------|
| BDS | 10HSND | $R_y = 355 \text{ MPa}$ | $R_u = 490 \text{ MPa}$ |
| Din 17100 | St 52-3 N | | |
| BS4360 | 50D | | |
| EN10025 | S355J2G3 | | |

Tabelle 15 - Stahlklasse nach verschiedenen Codes

| Tragfähigkeitsüberprüfung auf Innenwasserdruck | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----------------|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|----------|-----------------|--------------|----------------|
| N_0 | k_0 | p_i | t | r_1 | r_2 | r_0 | a | d_b | r_3 | a_r/r_0 | B | $k_{0,u}$ | σ_z | σ_{zul} |
| | N/cm^3 | MPa | m | - | - | N/cm^3 | MPa | MPa |
| 1 | 1000 | 0,501 | 0,015 | 2,40 | 2,415 | 2,408 | 0,00104 | 0,400 | 2,816 | 0,0004 | > 0,0003 | 995,54 | 80,44 | < 213 |
| 1.1 | 1000 | 0,586 | 0,015 | 2,40 | 2,415 | 2,408 | 0,00104 | 0,400 | 2,816 | 0,0004 | > 0,0004 | 995,54 | 93,99 | < 213 |
| 2 | 500 | 0,662 | 0,015 | 2,40 | 2,415 | 2,408 | 0,00104 | 0,400 | 2,816 | 0,0004 | < 0,0005 | 498,88 | 104,67 | < 226 |
| 3 | 1500 | 0,815 | 0,015 | 2,40 | 2,415 | 2,408 | 0,00104 | 0,400 | 2,816 | 0,0004 | < 0,0006 | 1489,99 | 115,15 | < 226 |
| 4 | 2500 | 1,045 | 0,015 | 2,40 | 2,415 | 2,408 | 0,00104 | 0,350 | 2,766 | 0,0004 | < 0,0007 | 2475,45 | 124,87 | < 226 |
| 5 | 1000 | 1,159 | 0,015 | 2,40 | 2,415 | 2,408 | 0,00104 | 0,400 | 2,816 | 0,0004 | < 0,0008 | 995,54 | 150,86 | < 226 |
| 6 | 500 | 1,196 | 0,015 | 2,40 | 2,415 | 2,408 | 0,00104 | 0,400 | 2,816 | 0,0004 | < 0,0008 | 498,88 | 168,26 | < 226 |
| 6.1 | 500 | 1,206 | 0,015 | 2,40 | 2,415 | 2,408 | 0,00104 | 0,400 | 2,816 | 0,0004 | < 0,0008 | 498,88 | 169,52 | < 226 |

In den Abschnitten 1 und 1.1 ist der Fall wiedergegeben, wo die Felsmassivgegenwirkung fehlt. In allen anderen Abschnitten wird die Felsmassivgegenwirkung berücksichtigt.

Die Kontrollen ergaben, das die Auskleidung mit der ausgewählten Panzerungsstärke von $t=15\text{mm}$, Markenprodukt aus Stahl, Betonklasse und Betonschichtstärke gegenüber dem Innenwasserdruck in allen Abschnitten beständig ist.

7.4.2. Tragfähigkeitsüberprüfung auf Grundwasserdruck

$$\sigma_z = \frac{p_g \cdot r_0}{t} \quad [\text{MPa}] - \text{ die Kesselsformel}$$

$$p_g = 0,5 \cdot h_a / 100 \quad [\text{MPa}]$$

p_g – Grundwasserdruck

h_a – Abraumhöhe

Zulässige Spannungen

$$\sigma_z \leq \sigma_{zul} = \frac{\gamma_c \cdot R_y}{\gamma_n} = \frac{0,75 \cdot 355}{1,25} = 213 \text{ MPa}$$

$\gamma_c = 0,75$ – Koeffizient der Arbeitsbedingungen für die entsprechende Bauphase

$\gamma_n = 1,25$ – Zuverlässigkeitskoeffizient für I^{ste} Werkklasse

R_y – Bemessungsfließgrenze vom Stahl; Tabelle 15

| Tragfähigkeitsüberprüfung auf Grundwasserdruck | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|------------|----------------|
| № | h_a | p_g | t | r_0 | σ_z | σ_{zul} |
| | m | MPa | m | m | MPa | MPa |
| 1 | 50,12 | 0,251 | 0,015 | 2,408 | 40,22 | < 213 |
| 1.1 | 62,94 | 0,315 | 0,015 | 2,408 | 50,51 | < 213 |
| 2 | 60,08 | 0,300 | 0,015 | 2,408 | 48,21 | < 213 |
| 3 | 53,54 | 0,268 | 0,015 | 2,408 | 42,97 | < 213 |
| 4 | 37,76 | 0,189 | 0,015 | 2,408 | 30,30 | < 213 |
| 5 | 28,12 | 0,141 | 0,015 | 2,408 | 22,57 | < 213 |
| 6 | 24,58 | 0,123 | 0,015 | 2,408 | 19,73 | < 213 |
| 6.1 | 17,30 | 0,087 | 0,015 | 2,408 | 13,88 | < 213 |

Die Kontrollen ergaben, das die Auskleidung mit der ausgewählten Panzerungsstärke von $t=15\text{mm}$, Markenprodukt aus Stahl, Betonklasse und Betonschichtstärke gegenüber dem Grundwasserdruck in allen Abschnitten beständig ist.

7.4.3. Tragfähigkeit auf axiale Kräfte

- Axialspannungen von Temperaturänderungen /bei der inneren und äußeren Seite des dünnwandigen Rohr/

$$\sigma_{x,1} = \beta \cdot E \cdot \Delta t \quad [\text{MPa}]$$

β – linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient des Materials

$\beta = 1,2 \cdot 10^{-5}$ – für Stahl

$E = 0,21 \cdot 10^6$ MPa – Elastizitätsmodul vom Stahl;

$\Delta t = \pm(10 \div 20)^\circ\text{C}$

Angenommen: $\Delta t = 15^\circ\text{C}$

$$\sigma_{x,1} = \beta \cdot E \cdot \Delta t = 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 0,21 \cdot 10^6 \cdot \Delta t = 2,52 \cdot \Delta t \quad [\text{MPa}]$$

$$\sigma_{x,1}^{\Delta t} = -2,52 \Delta t = -2,52 \times 15 = -37,8 \text{ MPa} \quad \text{– beim Grundwassergruck}$$

$$\sigma_{x,1}^{\Delta t} = +2,52 \Delta t = 2,52 \times 15 = +37,8 \text{ MPa} \quad \text{– beim Innenwassergruck}$$

- Axialspannungen vom Poisson-Effekt /bei Verformungshinderung in axialer Richtung werden Verformungen in tangentialer Richtung hervorgerufen/

$$\sigma_{x,2} = -\nu \cdot \sum \sigma_z \quad [\text{MPa}]$$

$\nu = 0,3$ – Poissonbeiwert

$$\sigma_{x,2} = -\nu_{st} \cdot \sigma_z^{P_{int}} \quad \text{– beim Innenwasserdruck}$$

$$\sigma_{x,2} = -\nu_{st} \cdot \sigma_z^{P_{ext}} \quad \text{– beim Grundwasserdruck}$$

| Axialspannungen vom Poisson-Effekt | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------|
| № | $\sigma_{z, \text{пв}}$ | $\sigma_{z, \text{вн}}$ | $\sigma_{x,2 \text{ пв}}$ | $\sigma_{x,2 \text{ вн}}$ | $\sigma_{\text{доп}}$ |
| | MPa | MPa | MPa | MPa | MPa |
| 1 | 40,22 | 80,44 | -12,07 | -24,13 | < 213 |
| 1.1 | 50,51 | 93,99 | -15,15 | -28,20 | < 213 |
| 2 | 48,21 | 104,67 | -14,46 | -31,40 | < 213 |
| 3 | 42,97 | 115,15 | -12,89 | -34,55 | < 213 |
| 4 | 30,30 | 124,88 | -9,09 | -37,46 | < 213 |
| 5 | 22,57 | 150,87 | -6,77 | -45,26 | < 213 |
| 6 | 19,73 | 168,26 | -5,92 | -50,48 | < 213 |
| 6.1 | 13,88 | 169,53 | -4,16 | -50,86 | < 213 |

▪ Axialspannungen vom Eigengewicht des Rohres

In Abschnitten mit einer Neigung von $i < 10\%$ kann das Eigengewicht des Rohres vernachlässigt werden. In Abschnitten mit einer Neigung von $i > 10\%$ wird berechnet:

$$\sigma_{x,3} = - \frac{\gamma_{St} \cdot \sum (r_i \cdot t_i \cdot \sin \alpha)}{r_i \cdot t} \quad [\text{MPa}]$$

$\gamma_{St} = 78,5 \text{ kN/m}^3$ – Wichte vom Stahl

t_i – Panzerungsstärke im entsprechenden Abschnitt

α – Neigung vom Abschnitt

l – Länge vom Abschnitt

| Axialspannungen vom Eigengewicht | | | | | | |
|----------------------------------|-------|-------|-------|----------|----------------|-----------------------|
| № | t | r_i | l | α | $\sigma_{x,3}$ | $\sigma_{\text{Доп}}$ |
| | m | m | m | ° | MPa | MPa |
| 1 | 0,015 | 2,40 | 7,00 | 0,00 | - | < 213 |
| 1.1 | 0,015 | 2,40 | 19,60 | 18,00 | -0,466 | < 213 |
| 2 | 0,015 | 2,40 | 17,73 | 18,00 | -0,422 | < 213 |
| 3 | 0,015 | 2,40 | 35,47 | 18,00 | -0,844 | < 213 |
| 4 | 0,015 | 2,40 | 53,20 | 18,00 | -1,266 | < 213 |
| 5 | 0,015 | 2,40 | 26,60 | 18,00 | -0,633 | < 213 |
| 6 | 0,015 | 2,40 | 8,73 | 18,00 | -0,208 | < 213 |
| 6.1 | 0,015 | 2,40 | 9,00 | 0,00 | - | < 213 |

▪ Gesamte Axialspannungen

$$\sigma_x = \sigma_{x,1} + \sigma_{x,2} + \sigma_{x,3} \quad [\text{MPa}]$$

| Gesamte Axialspannungen | | | | | | | | |
|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|---------------|---------------|----------------|
| № | $\sigma_{x,1g}$ | $\sigma_{x,1i}$ | $\sigma_{x,2g}$ | $\sigma_{x,2i}$ | $\sigma_{x,3}$ | σ_{xg} | σ_{xi} | σ_{zul} |
| | MPa | MPa | MPa | MPa | MPa | MPa | MPa | MPa |
| 1 | -37,80 | 37,80 | -12,07 | -24,13 | 0,00 | -49,87 | 13,67 | < 213 |
| 1.1 | -37,80 | 37,80 | -15,15 | -28,20 | -0,47 | -53,42 | 9,14 | < 213 |
| 2 | -37,80 | 37,80 | -14,46 | -31,40 | -0,42 | -52,69 | 5,98 | < 213 |
| 3 | -37,80 | 37,80 | -12,89 | -34,55 | -0,84 | -51,53 | 2,41 | < 213 |
| 4 | -37,80 | 37,80 | -9,09 | -37,46 | -1,27 | -48,16 | -0,93 | < 213 |
| 5 | -37,80 | 37,80 | -6,77 | -45,26 | -0,63 | -45,20 | -8,09 | < 213 |
| 6 | -37,80 | 37,80 | -5,92 | -50,48 | -0,21 | -43,93 | -12,89 | < 213 |
| 6.1 | -37,80 | 37,80 | -4,16 | -50,86 | 0,00 | -41,96 | -13,06 | < 213 |

7.4.4. Überprüfung nach der ersten Gruppe von Grenzzuständen

Der volle Spannungszustand von der Auskleidung wird durch eine fiktive Gegenspannung gekennzeichnet:

$$\sigma_i = \sqrt{(\sigma_{z,i})^2 + (\sigma_{x,i})^2} - (\sigma_{z,i}) \cdot (\sigma_{x,i}) \leq \frac{R_y \cdot \gamma_c}{\gamma_n} \quad [\text{MPa}]$$

$$\sigma_g = \sqrt{(\sigma_{z,g})^2 + (\sigma_{x,g})^2} - (\sigma_{z,g}) \cdot (\sigma_{x,g}) \leq \frac{R_y \cdot \gamma_c}{\gamma_n} \quad [\text{MPa}]$$

| Überprüfung nach der ersten Gruppe von Grenzzuständen | | | | | | | |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|------------|------------|----------------|
| № | $\sigma_{x,g}$ | $\sigma_{x,i}$ | $\sigma_{z,g}$ | $\sigma_{z,i}$ | σ_g | σ_i | σ_{zul} |
| | MPa | MPa | MPa | MPa | MPa | MPa | MPa |
| 1 | -49,87 | 13,67 | 40,22 | 80,44 | 78,17 | 74,55 | < 213 |
| 1.1 | -53,42 | 9,14 | 50,51 | 93,99 | 90,02 | 89,77 | < 213 |
| 2 | -52,69 | 5,98 | 48,21 | 104,67 | 87,41 | 101,81 | < 213 |
| 3 | -51,53 | 2,41 | 42,97 | 115,15 | 81,95 | 113,97 | < 213 |
| 4 | -48,16 | -0,93 | 30,30 | 124,88 | 68,53 | 125,35 | < 213 |
| 5 | -45,20 | -8,09 | 22,57 | 150,87 | 59,77 | 155,07 | < 213 |
| 6 | -43,93 | -12,89 | 19,73 | 168,26 | 56,44 | 175,06 | < 213 |
| 6.1 | -41,96 | -13,06 | 13,88 | 169,53 | 50,36 | 176,42 | < 213 |

Die Kontrollbedingungen für erste Gruppe von Grenzzuständen sind erfüllt. Bei den so gewählten Bedingungen ist der Druckstollen beständig.

7.4.5. Überprüfung gegen Einbeulen

- Methode der "Baurichtlinien und -vorschriften", [7] /noch Russischer Methode/

$$p_g < p_i = \frac{\gamma_c \cdot p_{kr} \cdot \xi}{\gamma_n}$$

Es wird davon ausgegangen, dass das Rohr glatt ist. Der kritische Wasserdruck, der das Einbeulen des Rohrs verursacht, ist von [6], Abb.37, S.64 abgelesen:

$$\frac{a}{r_0} = 4,33 \times 10^{-4}; \quad \frac{r_0}{t} \quad \text{и} \quad R_y = 355 \text{MPa} \rightarrow p_{kr} = 0,41 \text{MPa}$$

$$\xi = f \left(\frac{p_{kr} \cdot r_0}{t \cdot R_y} \right) \quad \text{Abgelesen in [6] Tabelle.13, S.62}$$

$$\xi = \frac{p_{kr} \cdot r_0}{t \cdot R_y} = \frac{0,41 \times 2,41}{0,015 \times 355} = 0,186 \rightarrow \xi = 1,126$$

| Überprüfung gegen Einbeulen nach [7] | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------|----------------|-------------------|---------|------------------|-----------------|----------------|----------------|
| № | t | r ₁ | r ₁ /t | a | a/r ₁ | p _{kr} | p _g | p _i |
| | m | m | m | m | m | MPa | MPa | MPa |
| 1 | 0,015 | 2,40 | 160,00 | 0,00104 | 0,0004 | 0,41 | 0,315 | 0,277 |
| 1.1 | 0,015 | 2,40 | 160,00 | 0,00104 | 0,0004 | 0,41 | 0,300 | 0,277 |
| 2 | 0,015 | 2,40 | 160,00 | 0,00104 | 0,0004 | 0,41 | 0,268 | 0,277 |
| 3 | 0,015 | 2,40 | 160,00 | 0,00104 | 0,0004 | 0,41 | 0,189 | 0,277 |
| 4 | 0,015 | 2,40 | 160,00 | 0,00104 | 0,0004 | 0,41 | 0,141 | 0,277 |
| 5 | 0,015 | 2,40 | 160,00 | 0,00104 | 0,0004 | 0,41 | 0,123 | 0,277 |
| 6 | 0,015 | 2,40 | 160,00 | 0,00104 | 0,0004 | 0,41 | 0,087 | 0,277 |
| 6.1 | 0,015 | 2,40 | 160,00 | 0,00104 | 0,0004 | 0,41 | 0,000 | 0,277 |

Bei der ausgewählten Panzerungsstärke ist die Kontrolle in allen Abschnitten mit Ausnahme der ersten zwei erfüllt. In Abschnitten 1 und 1.1 ist der Grundwasserdruck größer als der Innenwasserdruck, deswegen wird mit einer größeren Panzerungsstärke wieder berechnet.

$$\frac{a}{r_0} = 4,33 \times 10^{-4}; \frac{r_0}{t} \text{ и } R_y = 355 \text{ MPa} \rightarrow p_{kr} = 0,72 \text{ MPa}$$

$$\xi = \frac{p_{kr} \cdot r_0}{t \cdot R_y} = \frac{0,72 \times 2,41}{0,02 \times 355} = 0,244 \rightarrow \xi = 1,102$$

| Überprüfung gegen Einbeulen nach [7] | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------|----------------|----------------|----------------|-------------------|---------|------------------|-----------------|----------------|----------------|------------------|
| № | t | r ₁ | r ₂ | r ₀ | r ₁ /t | a | a/r ₁ | p _{kr} | p _g | p _i | σ _{zul} |
| | m | m | m | m | m | m | 0,000 | MPa | MPa | MPa | MPa |
| 1 | 0,020 | 2,40 | 2,42 | 2,41 | 120,00 | 0,00104 | 0,0004 | 0,72 | 0,251 | 0,476 | < 213 |
| 1.1 | 0,020 | 2,40 | 2,42 | 2,41 | 120,00 | 0,00104 | 0,0004 | 0,72 | 0,315 | 0,476 | < 213 |

- Amstutz Methode /für glatte Rohre/

Bedingung gegen Einbeulen:

$$(\sigma_N - \sigma_V) \cdot \left[\left(\frac{r}{i} \right)^2 \cdot \frac{\sigma_N}{E} \right]^{3/2} \leq (\sigma_F - \sigma_N) \cdot \left(\frac{n}{2} \right) \cdot 1,73 \cdot \left(\frac{r}{e} \right) \cdot \left[1 - 0,225 \cdot \left(\frac{r}{e} \right) \cdot \frac{\sigma_F - \sigma_N}{E} \right]$$

$$p_{kr} = \frac{F \cdot \sigma_N}{r_1 \cdot \left[1 + 0,175 \cdot \left(\frac{r_1}{e} \right) \cdot \frac{\sigma_F - \sigma_N}{E} \right]} \cdot \frac{1}{k_s}$$

k_s - Sicherheitskoeffizient; $k_s = 1,5$

$$i = \frac{t}{\sqrt{12}} = \frac{15}{\sqrt{12}} = 4,33 \text{ mm}$$

$$e = \frac{t}{2} = \frac{15}{2} = 7,5 \text{ mm}$$

$$F = t = 15 \text{ mm}$$

$$\sigma_v = - \left(\frac{k_0}{r} \right) \cdot E_{St}, \quad a = \frac{k_0}{r} = 3 \times 10^{-4} \Rightarrow \sigma_v = -65,93 \text{ MPa}$$

$$E = \frac{E_{St}}{1 - \nu_{St}^2} = \frac{210000}{\sqrt{1 - 0,3^2}} = 220140 \text{ MPa}$$

$$\sigma_F = \mu \cdot R_y \cdot \sqrt{1 - \nu_{St}^2 + \nu_{St}^2} = 315,5 \text{ MPa}$$

$$\mu = 1,5 - 0,5 \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{4}{R_y}} \right)^2 = 1,5 - 0,5 \times \left(\frac{1}{1 + \frac{4}{335}} \right)^2 = 1,01$$

n – Anzahl der Gewölbe, die durch das Einbeulen verursacht werden; Angenommen ist $n = 2$

E_{St} – Elastizitätsmodul vom Stahl

ν_{St} – Poissonzahl für Stahl

$$(84,7 - (-65,93)) \cdot \left[\left(\frac{2400}{4,33} \right)^2 \cdot \frac{84,7}{220140} \right]^{3/2} \leq (315,5 - 84,7) \cdot 1,73 \cdot \left(\frac{2400}{7,5} \right) \cdot \left[1 - 0,225 \cdot \left(\frac{2400}{7,5} \right) \cdot \frac{315,5 - 84,7}{220140} \right]$$

$$p_{kr} = \frac{15 \cdot 84,7}{2400 \cdot \left[1 + 0,175 \cdot \left(\frac{2400}{7,5} \right) \cdot \frac{315,5 - 84,7}{220140} \right]} \cdot \frac{1}{1,5} = 0,333 \text{ MPa}$$

$$\sigma_N = 84,7 \text{ MPa} \Rightarrow p_{kr} = 0,333 \text{ MPa}$$

Bei $\sigma_N = 84,7 \text{ MPa}$ ist die Bedingung gegen Einbeulen erfüllt und der entsprechende Wert von $p_{kp} = 0,333 \text{ MPa}$ ist größer als dieser des Grundwasserdrucks für alle Abschnitte.

- Österreichische Methode nach Montel, 1960

$$p_{kr} = \frac{5 \cdot R_y}{\left(\frac{r_2}{t}\right)^2 \left[1 + 1.2 \left(\eta + 2 \cdot a \cdot \frac{1}{t}\right)\right]} \cdot k_s$$

k_s - Sicherheitskoeffizient; $k_s = 1,5$

$$\eta = w_1 \cdot \left[1 - \cos\left(\frac{50^\circ \pi}{180^\circ}\right)\right]; \quad w_1 = 5 \cdot 10^{-4} \cdot a; \quad a = 4,33 \cdot 10^{-4} \cdot r_0$$

| Überprüfung gegen Einbeulen nach Montel | | | | | | |
|---|-------|---------|----------------|---------|-----------------|----------------|
| № | t | a | r ₂ | η | p _{kr} | p _g |
| | m | m | m | - | MPa | MPa |
| 1 | 0,015 | 0,00104 | 2,415 | 1,4E-07 | 0,496 | 0,251 |
| 1.1 | 0,015 | 0,00104 | 2,415 | 1,4E-07 | 0,496 | 0,315 |
| 2 | 0,015 | 0,00104 | 2,415 | 1,4E-07 | 0,496 | 0,300 |
| 3 | 0,015 | 0,00104 | 2,415 | 1,4E-07 | 0,496 | 0,268 |
| 4 | 0,015 | 0,00104 | 2,415 | 1,4E-07 | 0,496 | 0,189 |
| 5 | 0,015 | 0,00104 | 2,415 | 1,4E-07 | 0,496 | 0,141 |
| 6 | 0,015 | 0,00104 | 2,415 | 1,4E-07 | 0,496 | 0,123 |
| 6.1 | 0,015 | 0,00104 | 2,415 | 1,4E-07 | 0,496 | 0,087 |

- Einbeulbedingungen nach Jacobsen, 1974

Das Gleichungssystem von Jacobsen:

$$\left| \frac{r_1}{t} \right| = \sqrt{\frac{\left(\frac{9\pi^2}{4\beta^2} - 1\right) \cdot \left[\pi - \alpha + \beta \cdot \left(\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}\right)^2\right]}{12 \cdot \left(\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}\right)^3 \cdot \left[\alpha - \pi \cdot a - \beta \cdot \left(\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}\right) \left(1 + \frac{\text{tg}^2(\alpha + \beta)}{4}\right)\right]}}$$

$$\left| \frac{p_{kr}}{E} \right|_* = \frac{\left(\frac{9\pi^2}{4\beta^2} - 1\right)}{12 \cdot \left(\frac{r_1}{t}\right)^3 \cdot \left(\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}\right)^3}$$

$$\left| \frac{R_y}{E^*} = \frac{t}{2r_1} \cdot \left(1 - \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} \right) + \frac{p_{kr} \cdot r_1 \cdot \sin\alpha}{E^* \cdot t \cdot \sin\beta} \cdot \left[1 + \frac{4\beta \cdot r_1 \cdot \sin\alpha \cdot \text{tg}(\alpha - \beta)}{\pi \cdot t \cdot \sin\beta} \right] \right|$$

$$E^* = \frac{E_{St}}{1 - \nu_{St}^2}; \nu_{St} = 0,3$$

Der Sicherheitskoeffizient für den kritischen Druck $k_s = 1,5$ ist auch hier zu berücksichtigen.

$\alpha \rightarrow 1/2$ von dem gegenüberliegenden Zentralwinkel / Abb.12 /

$\beta \rightarrow 1/2$ von dem gegenüberliegenden Winkel, der vom neuen Radius gebildet wird / Abb.12 /

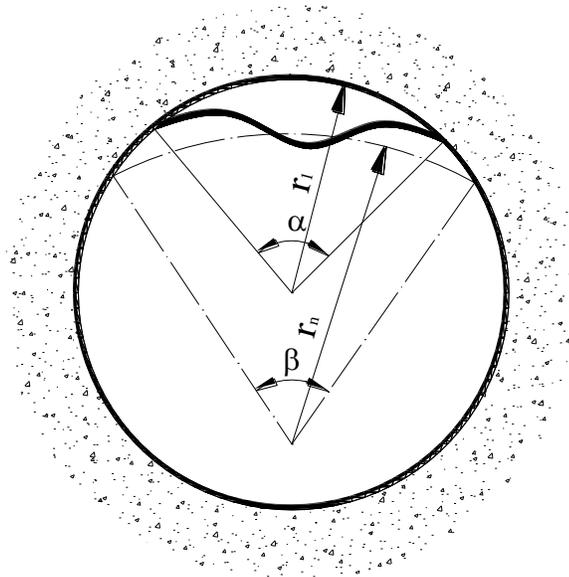


Abb.12. Querschnittsparameter von der Druckrohrleitung bei der Überprüfung nach Jacobsen

| Überprüfung gegen Einbeulen nach Jacobsen | | | | | | | |
|---|-------|----------|---------|----------|---------|----------|-------|
| № | t | α | β | α | β | p_{kr} | p_g |
| | m | rad | rad | ° | ° | MPa | MPa |
| 1 | 0,015 | 0,6 | 0,2 | 34,377 | 11,459 | 0,461 | 0,251 |
| 1.1 | 0,015 | 0,6 | 0,2 | 34,377 | 11,459 | 0,461 | 0,315 |
| 2 | 0,015 | 0,6 | 0,2 | 34,377 | 11,459 | 0,461 | 0,300 |
| 3 | 0,015 | 0,6 | 0,2 | 34,377 | 11,459 | 0,461 | 0,268 |
| 4 | 0,015 | 0,6 | 0,2 | 34,377 | 11,459 | 0,461 | 0,189 |
| 5 | 0,015 | 0,6 | 0,2 | 34,377 | 11,459 | 0,461 | 0,141 |
| 6 | 0,015 | 0,6 | 0,2 | 34,377 | 11,459 | 0,461 | 0,123 |
| 6.1 | 0,015 | 0,6 | 0,2 | 34,377 | 11,459 | 0,461 | 0,087 |

- Vergleich der Ergebnisse

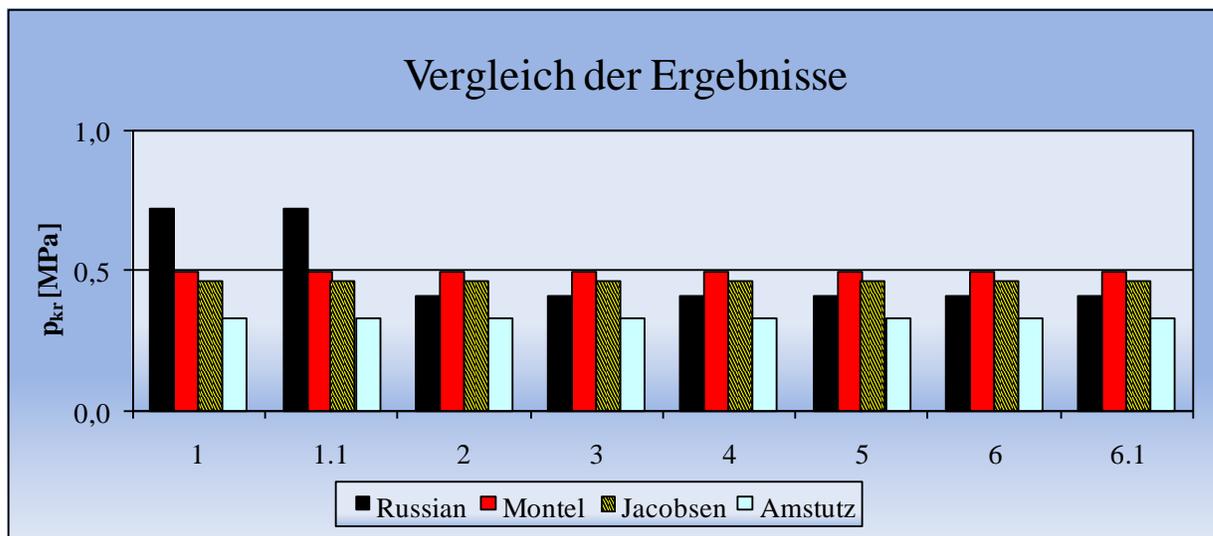


Abb.13. Vergleich der Ergebnisse von allen Methoden

$p_{kr} = 0,333$ MPa, der nach der Methode von Amstutz ermittelt wurde, ist der niedrigste bzw. maßgebende Wert des kritischen Drucks. Der Grundwasserdruck ist bei einer Panzerungsstärke von 15mm kleiner als der maßgebende kritische Druck für alle Abschnitte.

7.4.6. Ermittlung der Panzerungsstärke bei der Verengung und bei der Verzweigung der DRL

Die Durchmesseränderung am Ende der Druckrohrleitung ist von 4,80 m auf 3,40 m.

$t_{min} = \frac{800 + 4800}{400} = 14$ mm – die Mindeststärke von der Panzerung, die ihre Stabilität beim Transport und Montage sichert.

$$R_{gr} = R_y \cdot c \cdot \frac{\gamma_c}{\gamma_m \cdot \gamma_n} = 355 \times 1,15 \times \frac{0,60}{1,30 \times 0,75} = 251,230 \text{ MPa}$$

R_{gr} – Grenzfestigkeit

$c = 1,15$ – Beanspruchungskoeffizient

$\gamma_c = 0,60$ – Koeffizient der Arbeitsbedingungen

$\gamma_m = 1,30$ – Koeffizient der Zuverlässigkeit des Materials

$\gamma_n = 0,75$ – Koeffizient der Zuverlässigkeit der Ausrüstung

$$t_{gr} = \frac{p_g \cdot D_1}{2 \cdot \varphi \cdot R_{gr}} = \frac{1,206 \times 4800}{2 \times 0,9 \times 251,230} = 12,8 \text{ mm} \approx 13 \text{ mm}$$

φ – Koeffizient, der die Qualität der Schweißnähte berücksichtigt; $\varphi = (0,90 \div 1,00)$

$$t_{\text{maß}} = t_{\text{gr}} + \delta_0$$

$\delta_0 = 1 \div 2 \text{ mm}$ – Reserve gegen Korrosion

$$t_{\text{maß}} = t_{\text{gr}} + \delta_0 = 13 + 1 = 14 \text{ mm} = t_{\text{min}}$$

Tragfähigkeitsüberprüfung:

$$R = \frac{p_g \cdot D_1}{2 \cdot \varphi \cdot t_{\text{maß}}} = \frac{1,206 \times 4800}{2 \times 0,9 \times 14} = 229,71 \text{ mm} < R_{\text{gr}}$$

Die Stärke der Panzerung beim kleineren Durchmesser von 3,40 m wird wie folgt berechnet:

$t_{\text{min}} = \frac{800 + 3400}{400} = 10,5 \text{ mm}$ – die Mindeststärke von der Panzerung, die ihre Stabilität beim Transport und Montage sichert.

$$t_{\text{gr}} = \frac{p_g \cdot D_1}{2 \cdot \varphi \cdot R_{\text{gr}}} = \frac{1,206 \times 3400}{2 \times 0,9 \times 251,230} = 9,07 \text{ mm} \approx 9 \text{ mm}$$

$$t_{\text{maß}} = t_{\text{gr}} + \delta_0$$

$\delta_0 = 1 \div 2 \text{ mm}$ – Reserve gegen Korrosion

$$t_{\text{maß}} = t_{\text{gr}} + \delta_0 = 9 + 2 = 11 \text{ mm} > t_{\text{min}}$$

Tragfähigkeitsüberprüfung:

$$R = \frac{p_g \cdot D_1}{2 \cdot \varphi \cdot t_{\text{maß}}} = \frac{1,206 \times 3400}{2 \times 0,9 \times 11} = 207,09 \text{ mm} < R_{\text{gr}}$$

8. Bauverfahrenstechnik für den Bau des Druckstollens

8.1. Abbauarbeiten

8.1.1. Abbautechnik

8.1.2. Abfuhrtechnik

8.2. Einbautechnologie von Ankern mit mechanischer Verankerung

8.3. Einbautechnologie von Stahlbögen und Verbesserung des Felses durch Grouting

8.4. Einbautechnologie von Spritzbeton

8.5. Auskleidungsarbeiten

8.5.1. Montage der Rohrsektionen

8.5.2. Betonarbeiten

8.6. Abdichtungsarbeiten

8.6.1. Verfüllinjektion

8.6.2. Packer - Injektion

8.6.3. Korrosionsschutz

In diesem Teil ist die angenommene Bautechnologie für die Realisierung der Hauptbauprozesse prinzipiell beschrieben.

Am Anfang des Druckstollens, auf der Seite vom WKW Sarnitsa ist eine Baustelle anzuordnen, deren Abmessungen mit den erforderlichen Hilfsbauten und mit der Möglichkeit für Manöver von Fahrzeugen und Bautechnik zusammenhängend sind. Die Organisation an der Baustelle soll die Kontinuität der Bauarbeiten sichern.

Der Druckstollen für WKW Sarnitsa hat eine Gesamtlänge von $L = 177,33$ m /der unterirdische Teil/ und $L = 30$ m (außerhalb des Felsmassivs) und einen Durchmesser von $D = 4,80$ m. Der Druckstollen ist in drei Abschnitten geteilt:

- Portalabschnitt
- stark geneigter Abschnitt
- Horizontalschnitt

8.1. Abbauarbeiten

Die Abbauarbeiten beginnen von der Baustelle am WKW Sarnitsa mit Arbeitsrichtung von unten nach oben. Bei einer Neigung bis zu $30^\circ / 18^\circ$ beim stark geneigten Abschnitt/ ist die Bautechnik im Reifen- oder Raupengang einsetzbar. Der Grundvorteil vom Maschinenabbau im Vergleich zu Sprengverfahren ist, dass wesentliche Verzerrungen und die Bildung von großen gestörten Zonen im Felsmassiv verhindert werden. Als Ergebnis wird die natürliche Festigkeit des Felsmassivs erhalten. Damit ergibt sich ein geringerer Bergdruck. Von besonderer Bedeutung ist auch, dass beim Maschinenverfahren eine relativ kleine Rauigkeit der Wände erreicht wird. Das führt zur Reduzierung der Füllbetonmenge. Andere Vorteile der gewählten Abbautechnologie bei entsprechend abgestimmten Leistungen aller Maschinen sind:

- größerer Fortschritt der Abbauarbeiten
- Minderung der Arbeitskraft
- bessere Arbeitsbedingungen
- die Betriebseinführung der Anlage kann früher statt finden.

Alle Vorteile führen zur Minderung der Kosten pro Meter von dem Druckstollen.

8.1.1. Abbautechnik [15]

Eine Teilschnittmaschine vom schwedischen Hersteller Sandvik wird für die Durchführung der Abbauarbeiten ausgewählt. Der Hersteller bietet auch Ausrüstung für Verladungs-, Transport-, Bohr- und Hilfsarbeiten an. Sandvik verfügt über Tiefbaumaschinen mit Schneidköpfen, deren technischen Daten in einem großen Bereich variieren. Für die konkreten geologischen und geometrischen Parameter der Anlage ist eine Teilschnittmaschine vom Typ „MR620 Roadheader“ /alter Name ist Alpine Miner AM 105-IC/ vorgesehen.

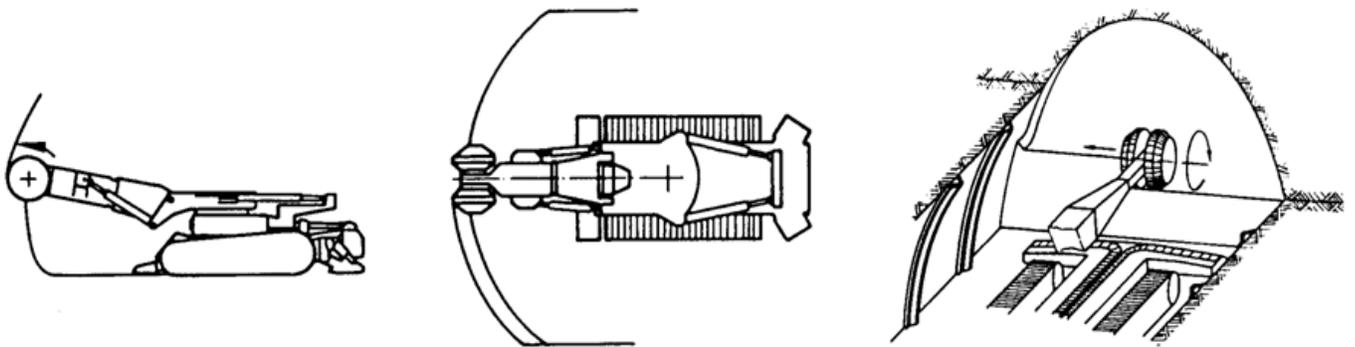
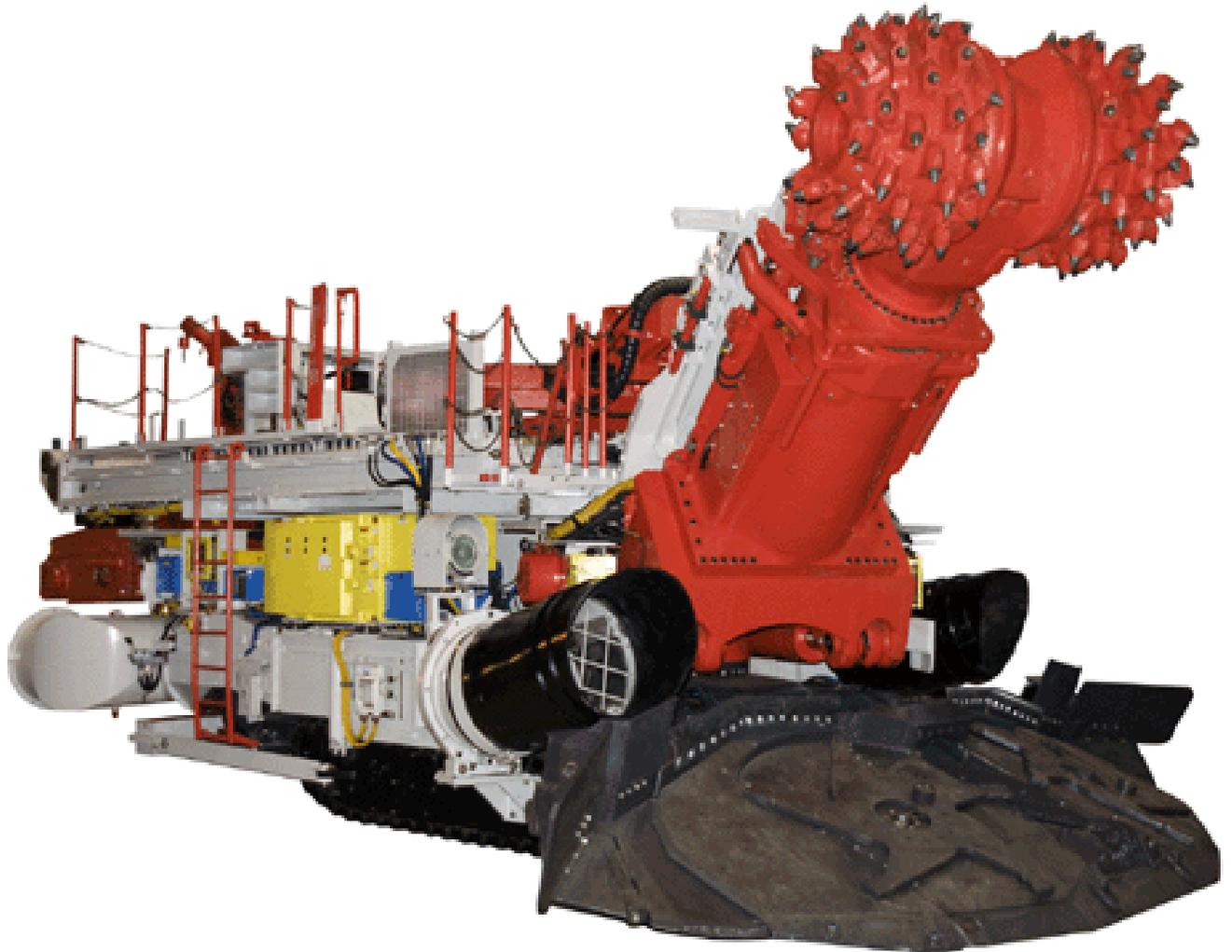
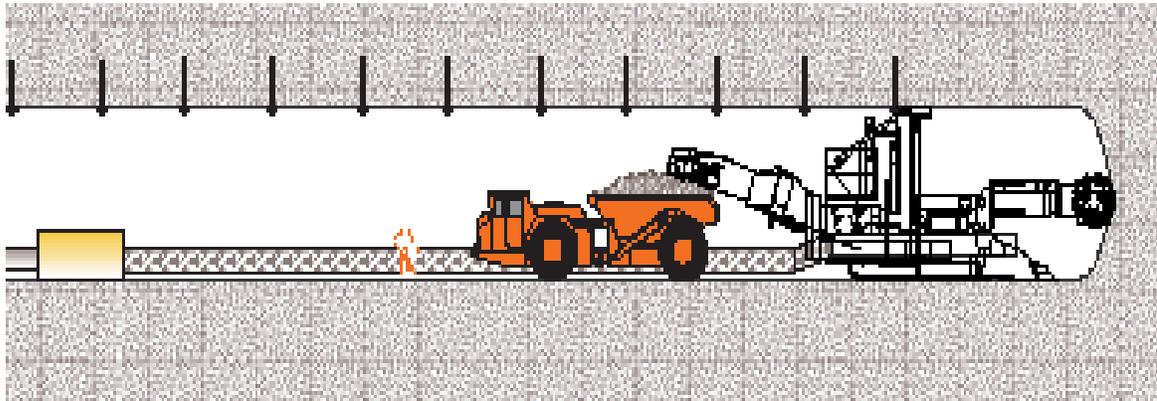


Abb.14. Teilschnittmaschine MR620 Roadheader [15]

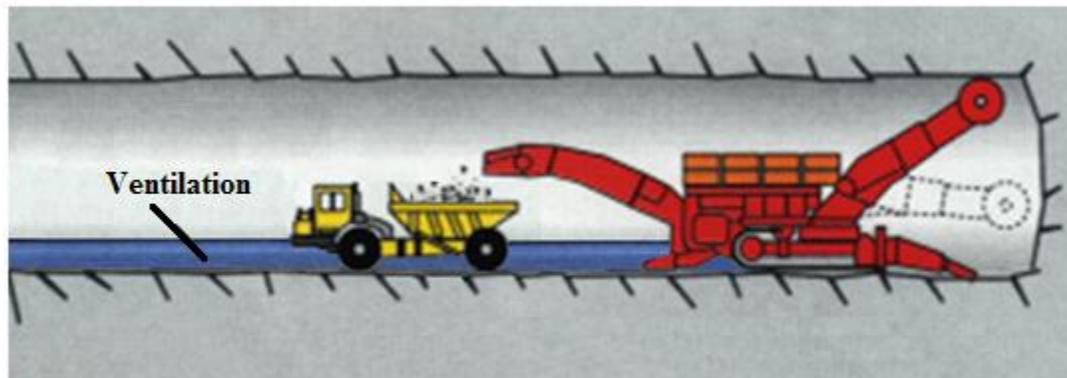
Abbauverfahren mit MR620 Roadheader, die mit Bohrsystem ausgerüstet ist



Das Modell bietet die Möglichkeit der zusätzlichen Installation einer Bohrvorrichtung. Die Bohrlöcher für die Anker und die Verankerungsarbeiten werden direkt von der Maschine gemacht. Unmittelbar nach den Abbau- und Verankerungsarbeiten werden der Baustahlgitter und danach der Spritzbeton eingebaut.

Dieses System sichert einen ununterbrochenen Zyklus der Abbau- und Abstützungsarbeiten, was zur Verringerung der Bauzeit führt. In diesem Fall sind keine Manöverräume für die Baumaschinen vorzusehen.

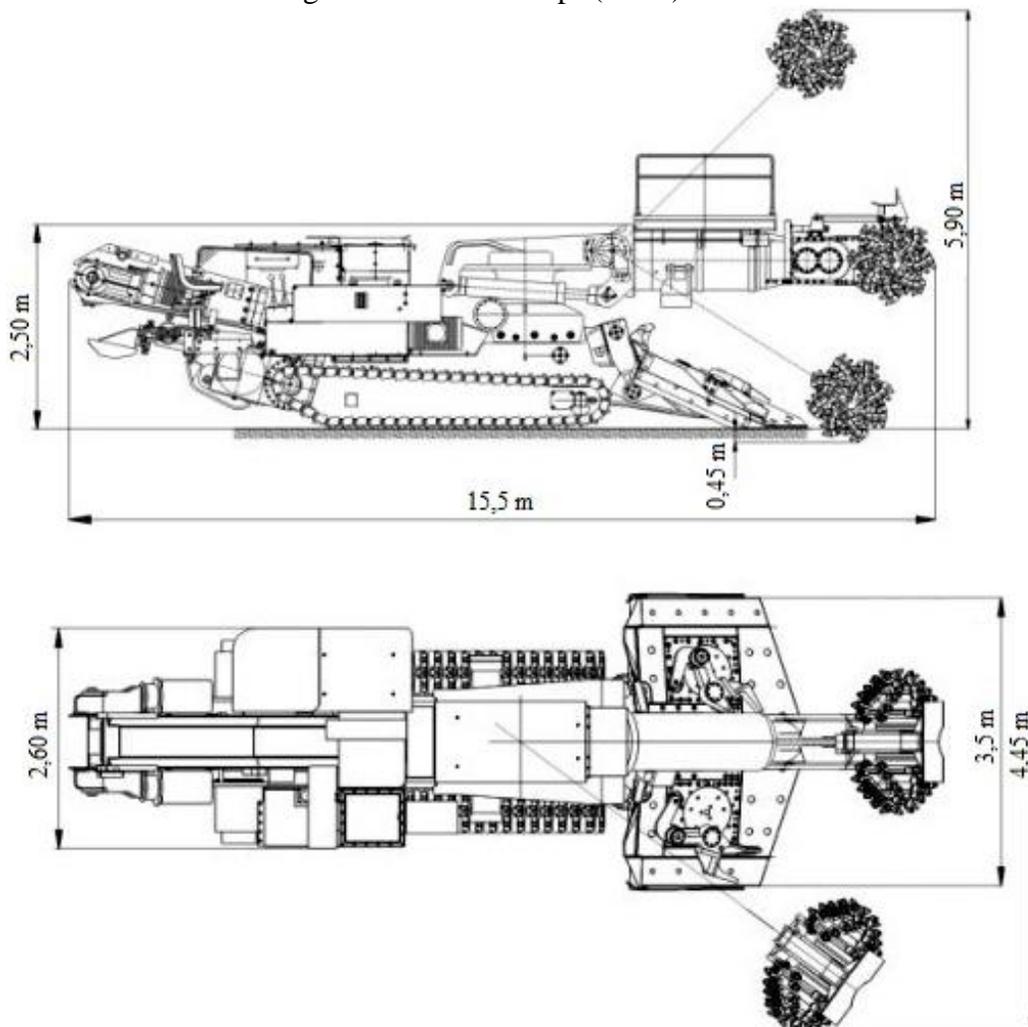
Abbauverfahren mit MR620 Roadheader ohne Bohrsystem



Bei diesem Arbeitsschema werden die Bohr- und Ankerarbeiten nach den Abbauarbeiten durchgeführt. Auch Manöverräume für die Baumaschinen sind vorzusehen. Der Vorteil dieses Arbeitsverfahren ist, dass die Bohrmaschine mobil und unabhängig von der Teilschnittmaschine ist. So finden parallel mit den Abbauarbeiten in anderen Bereichen auch Bohrarbeiten statt. Die für die Abbaumaschine unzugänglichen Räume werden problemlos behandelt.

Wichtigste technische Daten der Teilschnittmaschine MR620 Roadheader [15]

| | |
|-----------------|---|
| 15,5 m | Länge Maschine mit Förderband |
| 2,5 m | Höhe |
| 2,60 m | Breite |
| 3,50 m | Breite des Ladeschurre |
| 5,4÷5,9 m | Maximale Höhe, wenn eingefahren / ausgefahren Boom der Schneidkopf |
| 7,9÷8,9 m | Maximale Breite wenn eingefahren / ausgefahren Boom der Schneidkopf |
| +/-37° | Drehwinkel der Schneidkopf (horizontal) |
| 0,45 m | Tiefe der Baugrube unter dem Niveau der Maschine |
| +/- (20° ÷ 25°) | Maximale Neigung ohne Stabilisierung |
| 540 kW | Elektromotor |
| 300 kW | Motor des Schneidkopfs |
| 2 x 36 kW | Motor für Schaufelantrieb |
| 2 x 11 kW | Motor für die Fördertechnik |
| 15 m/min | Bewegungsgeschwindigkeit (max) |
| 1,4 m/s | Geschwindigkeit der Schneidkopf (50Hz) |



Das Modell ist für den Einsatz in Gesteinen mit unterschiedlichen Kennwerten entwickelt. MR620 Roadheader ist bei sehr widerstandsfähigen Felsen zu solchen mit niedrigeren Festigkeitseigenschaften einsetzbar. Sandvik hat einen der größten Nachteile bei dieser Art von Abbausrüstung verbessert - die Unfähigkeit sehr harte und starke Felsen abzubauen. In diesem Bereich hat der Hersteller erhebliche Fortschritte erzielt.

Das Design der Schneidköpfe machen sie leicht anpassbar an alle Modelle der Maschinen, die entsprechend der spezifischen geologischen Bedingungen zum Einsatz kommen. Zur Bestimmung der Art des Schneidkopfes ist es nicht ausreichend nur die Festigkeit der Gesteine zu wissen. Viele andere Faktoren wie Abrieb, Risse etc. beeinflussen die Abnutzung der Schneidezähne. Der Hersteller verfügt über eine Technik für die Bestimmung des am besten geeigneten Schneidkopfs - minimaler Verschleiß der Schneidvorrichtungen für einen bestimmten Felsen.

Die Bewegung der Schneidköpfe durch das ganze Abbauprofil, bei der die maximale Produktivität erreicht ist, ist in horizontaler Richtung. Beim Erreichen der Abbaukontur bewegt sich der Arm vertikal und nimmt eine neue Höhenposition.

Der Aushub wird durch die Ladeschürze entfernt. Auf der Schürze sind rotierende Ladenschaukeln montiert, die das Material auf das rotierende Band befördern. Die Höhenposition des Bands entspricht der Höhe des Muldenkippers für die Abfuhr von Aushubmassen.

Bei Anwendung dieser Art von Technik wird der Tunnel erheblich verstaubt. Dafür ist die Teilschnittmaschine mit Belüftungs- und Staubinstallation ausgestattet.

8.1.2. Abfuhrtechnik

Unmittelbar hinter der Abbaumaschine, unter dem Förderband wird der Muldenkipper positioniert. Zu diesem Zweck wurde der Dumper vom Typ Sandvik 417 /alter Namen EJC 417/ [15] gewählt. Er hat optimierte Abmessungen und ist bei sehr steilen Strecken einsetzbar.

Die Ermittlung der erforderlichen Anzahl von Transporteinheiten dieser Art ist Gegenstand einer detaillierten technisch-wirtschaftlichen Analyse. Für den Fall ist nur eine Transporteinheit vorgesehen. Die Rechtfertigung ist ein relativ kurzer Druckstollen und die Verfügbarkeit einer Deponie für Aushubmaterial in der Nähe des Portals. Die Wartezeit der Teilschnittmaschine ist minimal und Erweiterungen im Tunnel sind nicht vorgesehen.

Die steigende Richtung der Abbauarbeiten führt zu einer Verringerung der Transportkosten, womit Treib- und Schmierstoffe verbunden sind. Wenn sich der Muldenkipper abwärts bewegt, ist er geladen und wenn der Widerstand bei der Neigung zu überwinden ist, dann ist er leer.



Wichtigste technische Daten von Sandvik 417 [15]

| | |
|---|--|
| 15,4 t | Nutzlast |
| 30,4 t | Gewicht mit voller Mulde |
| 6.9-8.4 m ³ | Muldenvolumen |
| 7,01 m | Länge |
| 2,235 m | Breite |
| 2,184 m | Höhe |
| 1 ^{BA} -6,1km/h | Geschwindigkeit in verschiedenen Gängen |
| 2 ^{PA} -8,0 km/h | |
| 3 ^{TA} -11,0 km/h | |
| 4 ^{TA} -14,5 km/h | |
| 5 ^{TA} -19,2 km/h | |
| 6 ^{TA} -25,5 km/h | |
| Detroit Diesel Series 40E 6 Zylinder | Dieselmotor |
| Vollinjektion + inter cooler | |
| 156 kW | Leistung |
| Wasser | Kühlung |
| 14:00 R24 | Reifen |
| Dana 13.7 LMHR 32421 | Getriebe |
| Dana 16D2149 | Achsen |
| | HTI Skimming System mit Abgasreinigungskatalysator und Schalldämpfer, elektronische Steuerung der Funktionen, Elektronische Navigation und Überwachung der verschiedenen Parameter |

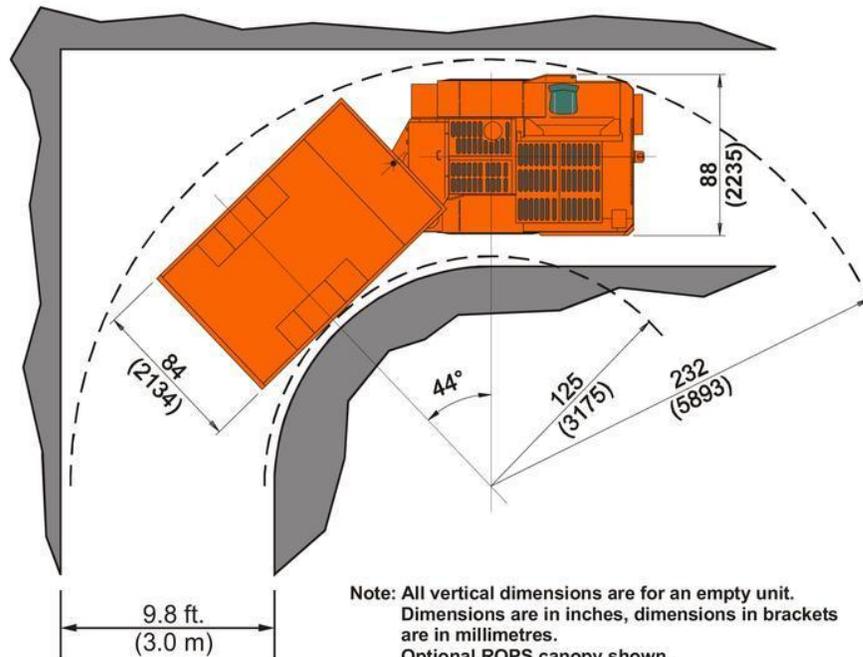
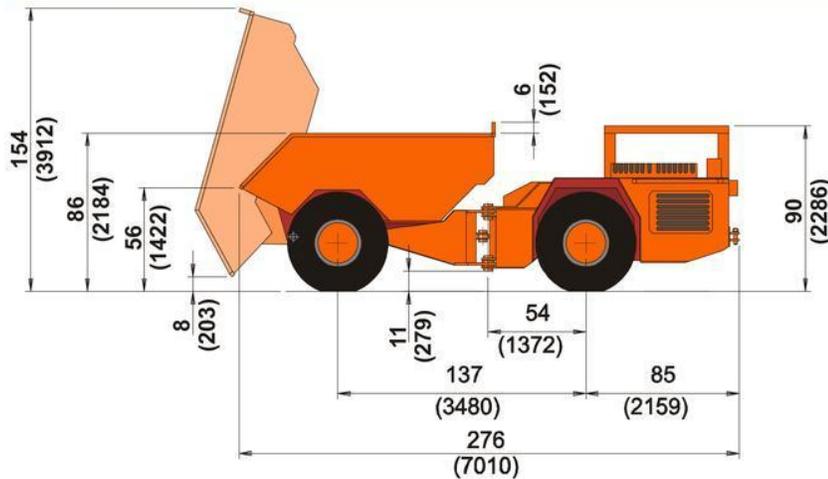


EJC 417

Technical Specification
T06417-1

1/12

General Arrangement



Note: All vertical dimensions are for an empty unit.
Dimensions are in inches, dimensions in brackets
are in millimetres.
Optional ROPS canopy shown.

Sandvik Mining and Construction Canada Inc.
4445 Fairview Street, Burlington Ontario, Canada L7L 2A4
Tel.: (905) 632-4940



Revision Date: 2006-2-08
Web: <http://www.sandvik.com>

© 2006 Sandvik Mining and Construction Canada Inc.
Sandvik Mining and Construction reserves the right to
change this specification without notice.

Abb.15. Abmessungen von Sandvik 417 /alter Namen EJC 417/ [8]

8.2. Einbautechnologie von Ankern mit mechanischer Verankerung [3]

▪ Keilanker [3]

Vorgesehen sind Keilanker zur Abstützung des vierten Abschnitts, in welchem die mechanischen Eigenschaften vom Felsmassiv die besten sind. Bei dieser Gruppe von Ankern werden die Kräfte auf die Wände des Lochs durch mechanische Vorrichtungen übertragen, wodurch die hervorgerufene Reibung zum Verkeilen führt.

Vorbereitung der Anker [3]

Die Anker werden aus Rundstahl St 52-3 N mit einem Durchmesser vom $D = 20\text{mm}$ hergestellt. Am Ende der Anker gibt es eine Spannvorrichtung. Beim Schneiden der Stahlstangen für die Anker wird darauf geachtet, dass die Oberfläche des Segments senkrecht zur Längsachse der Stange ist. Am Ende der Stange wird ein Längsschnitt von 160-170mm hergestellt, so dass ein Stahlkeil eingefügt werden kann. Der Schnitt wird nicht breiter als 4 mm auf einer Fräsmaschine gemacht. Am anderen Ende der Stange werden Rippen mit einer Länge von 180mm geschnitten.

Die Keile werden ebenfalls aus Stahl St 52-3 N mit einer Höhe von 160mm hergestellt. Die Breite ist 24mm, das obere Ende ist 24mm dick und das untere ca. 1-2mm.

Die Halteplatte wird aus Stahlblech mit einer Dicke von 6 mm hergestellt. Jede Platte hat die Abmessungen im Plan 150/150 mm.

Die Spannmutter sind sechseckig mit einer Höhe von 20mm.

Bohrungen[3]

Die Bohrarbeiten erfolgen direkt aus der Teilschnittmaschine. Zu diesem Zweck ist sie mit Bohrgerät mit Schock-Spin-Wirkung ausgestattet. Der Durchmesser der Löcher ist nicht mehr als 40mm. Verwendet werden Bohrer mit auswechselbaren Köpfen. Beim Bohren von Löchern ist es nicht erlaubt, mit mehr als zwei Bohrer zu arbeiten. Streng beachtet wird die Richtung der Bohrer, welche senkrecht zu den Schichten sein muss. Die Bohrlochtiefe wird durch eine Begrenzungsvorrichtung am Bohrgereät kontrolliert. Die Verankerungstiefe ist entscheidend für die Sicherheit der Abstützung, deswegen wird die Tiefe, die bereits analytisch berechnet ist, für die konkreten Bedingungen in situ wiedergeprüft.

Die Entfernungen und die Lage der Löcher sind nach den derzeitigen Gegebenheiten und den Beschaffenheiten vom Gestein vorgegeben.

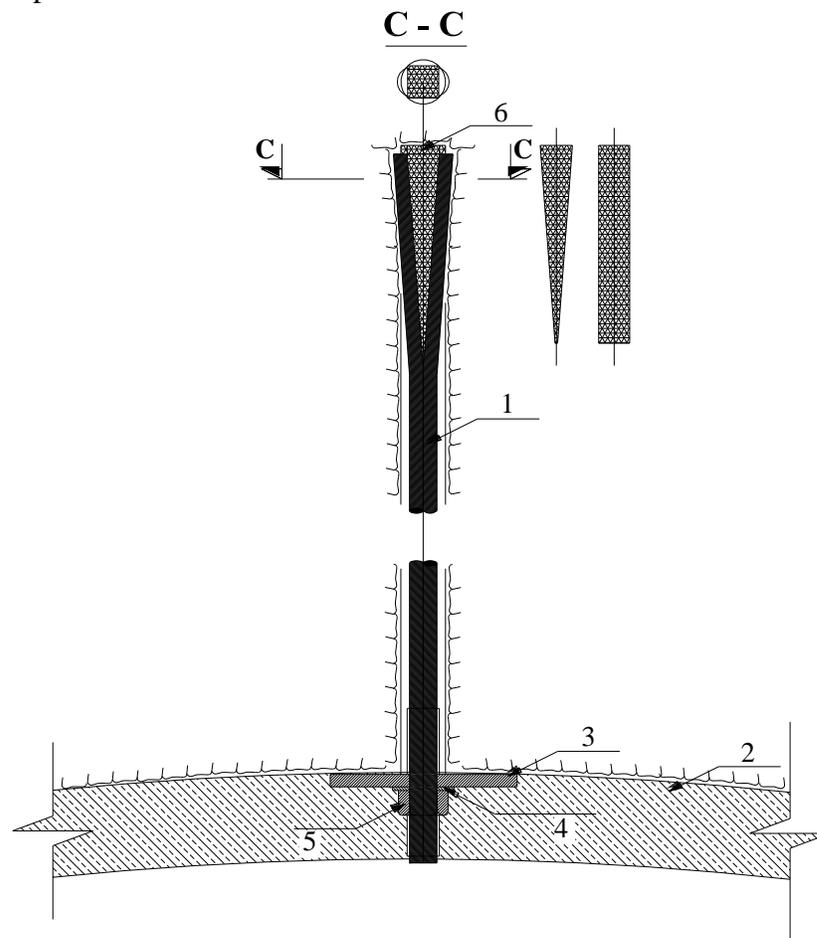
Das Einsetzen von Ankern

[3] “Vor dem Einsetzen der Ankerstange wird geprüft, ob der Felsen an der Unterseite des Lochs eine ausreichende Festigkeit aufweist. Die Stange wird vorsichtig zusammen mit dem Keil in das Bohrloch gesteckt. Sobald der Anker den Boden berührt, wird er mit einem pneumatischen Hammer

gerammt. Um das Gewinde der Spannvorrichtung nicht zu verformen, empfiehlt es sich die Mutter nicht ganz einzuschrauben. Die Ankerstangen sind bis zum vollständigen Eindringen des Keils oder bis zum Aufhören der Vorwärtsbewegung der Stange zu treiben. Es kann durch den Klang beim Rammen festgestellt werden, ob die Stange vollständig eingedrungen ist.

Alle Vorsprünge und Unebenheiten im Bereich der Halteplatte werden entfernt, um den ordnungsgemäßen und dichten Kontakt zu gewährleisten. Die Mutter wird entfernt, um die Platte einzubauen. Danach wird die Mutter endgültig bis zum Versagen eingeschraubt.

Der Verkeilungsgrad der Anker wird durch Tensometer getestet. Das Gerät stellt ein Kreisring zwischen zwei Stahlplatten dar. Im Ring befindet sich eine tarierte Feder rund um einen Reifen, welcher sich beim Spannen ausdehnt und die Feder zieht.”



1. Ankerstange - $\Phi 20$, St 52-3 N
2. Spritzbeton - Bo 2.0
3. Halteplatte - 200/200/6 mm
4. Scheibe - $\Phi 50$, 3mm
5. Spannmutter - 44/36/20 mm
6. Stahlkeil

Abb.16. Keilanker

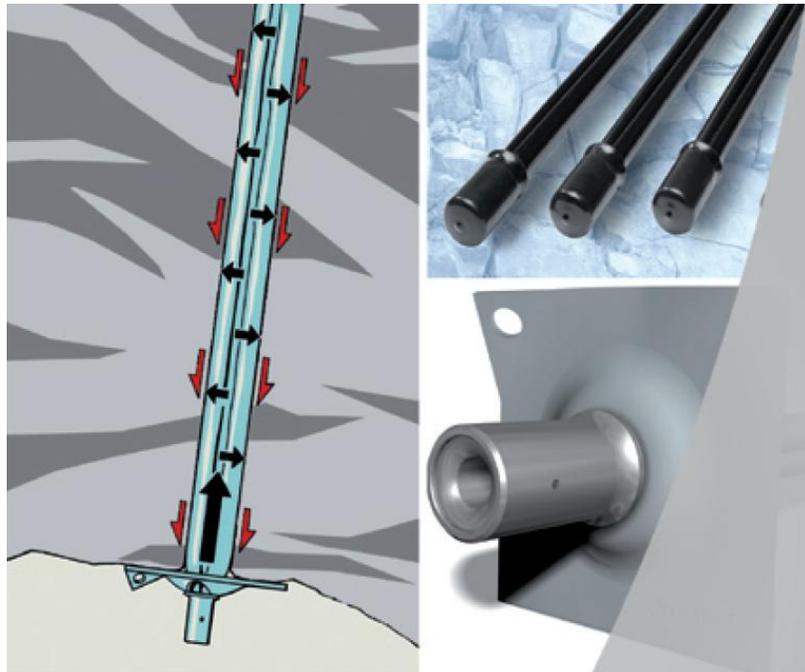
Überprüfung und Instandhaltung der Anker [3]

Beim Einbauen nächster Anker werden die vorherigen 3-4 Ankerreihen durch Zugtest geprüft. Drei oder vier Tage nach dem Einbau werden die Anker geprüft. Spannmütter, die von der Belastung geschwächt sind, werden wieder eingeschraubt. Falls sich Risse zwischen den Ankern bilden, werden an diesen Stellen zusätzliche Anker eingebaut.

▪ Swellex Gebirgsanker von Atlas Copco

Die Arten von Swellex Gebirgsankern, die bei der Unterstützungskonstruktion gewählt wurden, sind aus der Premium-Linie Serie und haben werkseitig voreingestellte Parameter /siehe Tabelle 7/. Swellex Premium-Linie sind relativ harte Anker, die im Tunnel- und Bergbau eingesetzt werden und eine perfekte Montage und schnelle Stärkung bieten.

Zubehör für den Einbau von Swellex Gebirgsanker werden von der Firma Atlas Copco zur Verfügung gestellt.



Manuelle Installation [4]

Die Einfachheit des Systems erklärt seine Leistungsfähigkeit /Abb.17/. Der Arbeiter bohrt ein Loch in das Gestein und setzt den Anker. Der Swellex Gebirgsanker ist an einem Ende verschweißt, das andere Ende ist mit einer speziellen Endhülse für die Auffaltung und den Halt der Kalottenplatten /Halteplatte/ ausgestattet. Der Anker wird mit Hilfe einer Hochdruckpumpe und unter einem festgelegten Druck aufgebläht. Die Ausdehnung des Ankers im Bohrloch erzeugt die Reibung und Verzahnung des Ankers mit dem Bohrloch. Durch diesen Effekt sichert der Anker das Gebirge über seine gesamte Länge. Die Pumpe kommt zum Stillstand, wenn der empfohlene Druck erreicht ist, welcher die Qualität der Installation gewährleistet.

Die Firma bietet auch farbige Kappen für die Anker an. Die Idee ist, bestimmte Merkmale bei den Ankern /Länge, Typ usw./ zu bezeichnen. Dies ist eine einfache und effektive Hilfe bei der Durchführung der Qualitätskontrolle des gesamten Ankersystems.

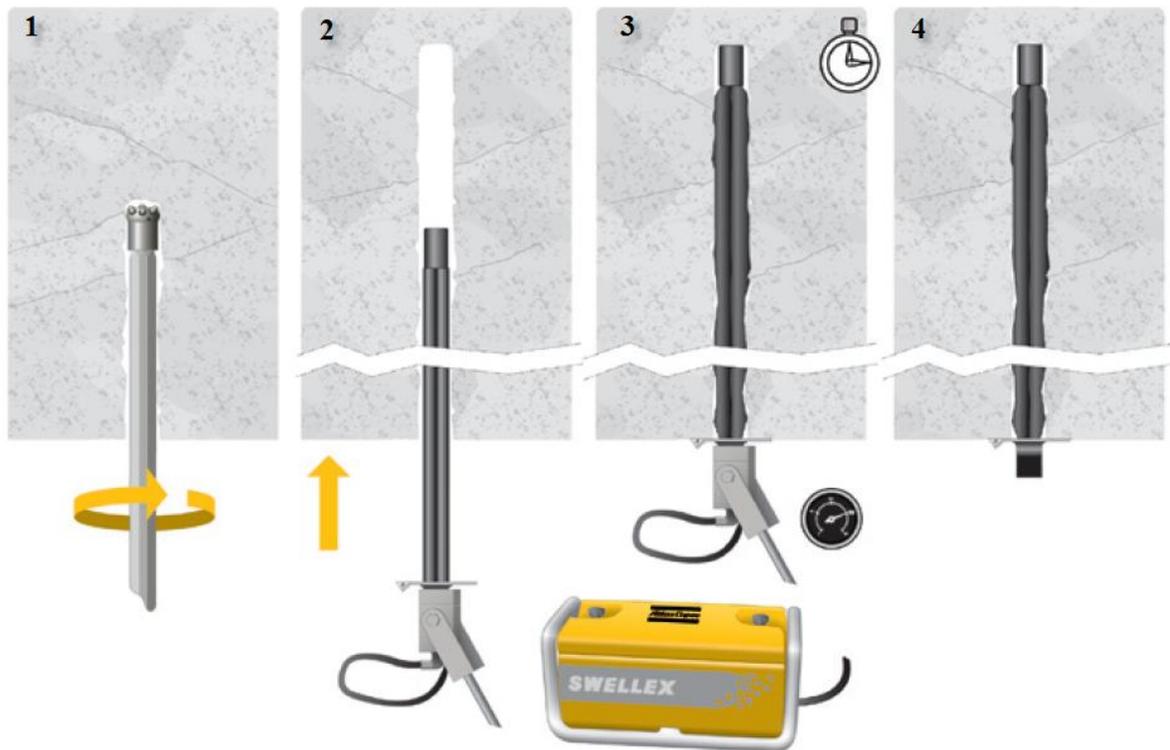


Abb.17. Einbau von Swellex Gebirgsanker [4]

Swellex face plates Pm12, Mn12

| Name | General Description | Suitable conditions | Data | Product number | |
|----------------------------|---------------------|---|--|----------------|--------------|
| Normal Strength *** | | | | | |
| VR12/ VR12L | Domed plate | Normal ground conditions with medium stress level & small convergence | Steel: HSLA Gr 75 ksi Plate size: 151 x 151 mm Hole size: 30.2 mm ± 0.3 mm Thickness: 3.8 mm Breaking load: 110 kN ASTM grade 2 | Standard | 9899 7006 32 |
| | | | | Bent corner | - |
| | | | | Lance | 9899 7012 90 |

Swellex face plates Pm16, Pm 24, Mn16, Mn24

| Name | General Description | Suitable conditions | Data | Product number | |
|----------------------------|---------------------|--|--|----------------|--------------|
| Normal Strength *** | | | | | |
| NR24 | Domed plate | Normal ground conditions with low to medium stress level & small convergence | Steel: S355JR Plate size: 151 x 151 mm Hole size: 40.0 mm ± 0.3 mm Thickness: 4.0 mm Breaking load: 100 kN ASTM grade 2 | Standard | 9899 7014 21 |
| | | | | Bent corner | - |
| | | | | Lance | - |

| Description | Sleeve length | Weight (kg) | Product number |
|-----------------------------------|---------------|-------------|----------------|
| Swellex Pm12 | 300 mm | 0.5 | 9899 7014 54 |
| Swellex Mn12 | 300 mm | 0.5 | 9899 7014 54 |
| Swellex Pm16, Pm24, Mn16, Mn24 | 300 mm | 1.0 | 9899 7006 76 |

Abb.18. Ankerzubehör von Atlas Copco [4]

Als Zusatz zu dem speziell entwickelten System der hydraulischen Pumpe Swellex ist ein Manometer notwendig, um den Druck aus der Pumpe festzustellen.

| Description | Diameter | Weight (kg) | Product number |
|---|----------|-------------|----------------|
| Pressure gauge for Pm12, Mn12 | 30 mm | 0.9 | 8613 1101 01 |
| Pressure gauge for Pm16, Pm24, Mn16, Mn24 | 40 mm | 0.9 | 8613 1101 02 |

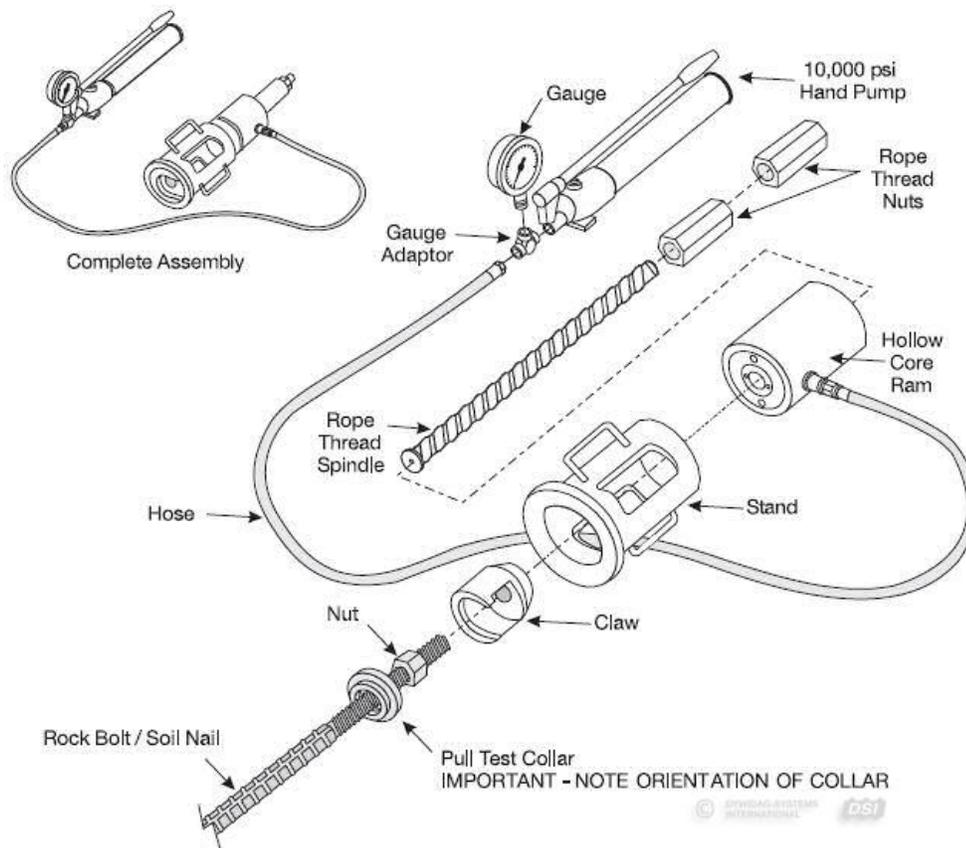
Abb.19. Manometer für die Atlas Copco hydraulische Swellex Pumpe [4]

Überprüfung und Instandhaltung der Anker [4]

Swellex Anker können jederzeit ohne Verzögerung durch einem Pull Tester /Zugtest/ geprüft werden. Er erfüllt die hohen Anforderungen an Präzision und Mobilität. Der Druck wird von dem System gemessen und in Belastung umgewandelt. Auch Anker ohne montierte Platten können getestet werden.

| Description | Weight (kg) | Product number |
|----------------------------------|-------------|----------------|
| Pull tester complete | 62.0 | 8613 1108 00 |
| Mechanical parts for pull tester | 22.3 | 8613 1108 01 |
| Pull tester hose, 700 bars, 6 m | 2.1 | 8613 1108 80 |

Abb.20. Pull Tester für Swellex Anker [4]



8.3. Einbautechnologie von Stahlbögen und Verbesserung des Felses durch Grouting

[3] Das grundlegende Erfordernis für einen Einbau im instabilen Fels ist die effektive Verhinderung gegen Einbruch der Baugrube und gegen Eindringen von Wasser oder verflüssigtem Boden. Die Stützbögen sind sehr gut geeignet für Abstützung in Lockergestein. Sie sollen in den Abschnitten 2 und 6 eingebaut werden, weil in diesen die geologischen Bedingungen die ungünstigsten sind. Es ist auch notwendig, zusätzliche Maßnahmen für den Durchgang von der Abbaumaschine in diesen Bereichen zu ergreifen. Da die Mächtigkeit der Schichten mit ungünstigen mechanischen Eigenschaften relativ klein ist /ca. 18m/, ist es auch möglich nur nach einer Verfestigung des Bodens weiter zu arbeiten.

Die Verbesserung ist in diesem Fall durch Injektion des Felsens zu erreichen. [3] “In schwachen Bereichen wird am Tunnelstroß eine wasserdichte Wand gemacht. Zunächst werden Sondierungen gemacht, um die Ansatzmethode und die Bedingungen zu bestätigen. Dann werden Bohrlöcher kegelförmig in die schwache Zone ausgeführt und schrittweise das Injektionsgut eingebracht. Die Beziehung Z:W des Injektionsguts ist vom Aufnahmevermögen des Felsmassivs abhängig. Dieses wird bei den vorläufigen Untersuchungen durch Sondieren festgestellt. Das Injektionsgut soll konsistenter mit der Zeit werden. Das passiert bis zum Erreichen der vorläufig bestimmten Beziehung Z:W. Auf diese Weise werden auch die schmalsten Risse ausgefüllt. Nach dem Erstarren des Einpressgutes kann in der Regel angenommen werden, dass der Fels die notwendige Stabilität und Dichtigkeit aufweist.”

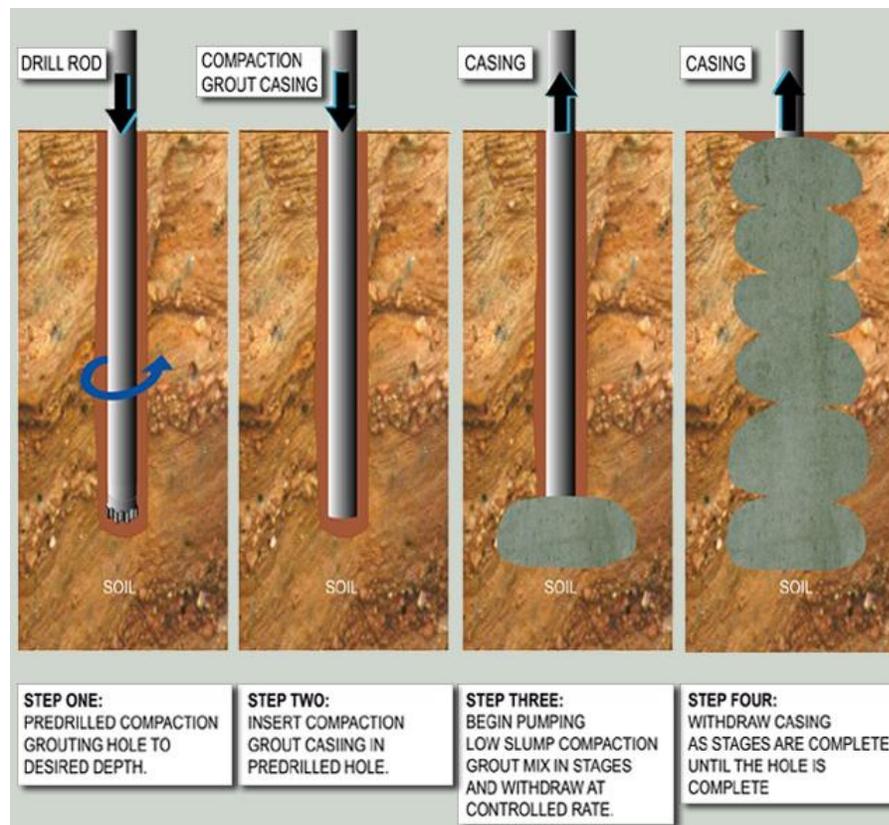


Abb.21. Grouting [9]

[10] Zur Förderung des Injektionsgutes ist die Hydraulikpumpe ChemGrout CG-555 ausgewählt worden. Der maximale Einpressdruck von ChemGrout CG-555 ist 2 MPa und das Gerät hat eine Kapazität von 170l. Die Abmessungen der Pumpe sind kompakt 60/31/58, so dass ihre Benutzung keine Verschiebung anderer Maschinen erfordert.



Abb.22. ChemGrout CG-555 Grout Pump [10]

Sobald das Felsmassiv zuverlässig verbessert ist, werden die Abbauarbeiten ähnlich wie in den anderen Bereichen durchgeführt. Die Abstützungskonstruktion wird sofort nach den Abbauarbeiten eingebaut.

Es ist keine spezielle Baumaschine für den Einbau der Stahlrippen erforderlich. Nach der Form und den Abmessungen des Abbauprofils werden die Stahlrippen zuverlässig in Längsrichtung stabilisiert. Auf diesem Stahlrahmen wird die Spritzbetonschicht eingebaut, wodurch sich eine räumliche Rippenstruktur mit großer Tragfähigkeit ergibt.

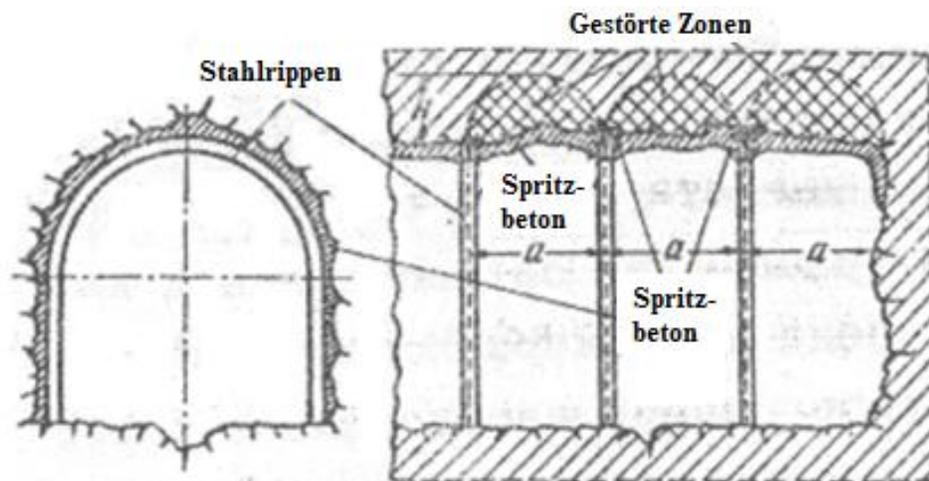


Abb.23. Abstützungskonstruktion aus Stützbögen und Spritzbeton

8.4. Einbautechnologie von Spritzbeton

Die Spritzbetonabstützung stellt eine Betonschicht dar, die unter hohem Druck auf die instabile Felsoberfläche eingebracht wird. Bei instabilen Gesteinen wird er auf einem Bewehrungsgitter gesprüht. Die Befestigung des Betons wird durch die Wirkung als eine räumliche Struktur mit hoher Zugfestigkeit und durch die gute Haftung mit dem Felsmassiv erklärt. Die Spritzbetonschicht hat eine zusätzliche Stärkungswirkung - Vorfüllen von Rissen, Stärkung und Festigung der losen Teile des Felsmassivs.

Ausgewählt wird eine universelle Maschine Sika - PM500, durch die der Spritzbeton aufgebracht wird. Der Beton wird durch sequentielle Schichtung eingebracht, bis die gewünschte Dicke erreicht ist. Beim bewehrten Spritzbeton wird zunächst das Bewehrungsgitter durch die Anker befestigt, dann wird der Spritzbeton aufgespritzt.

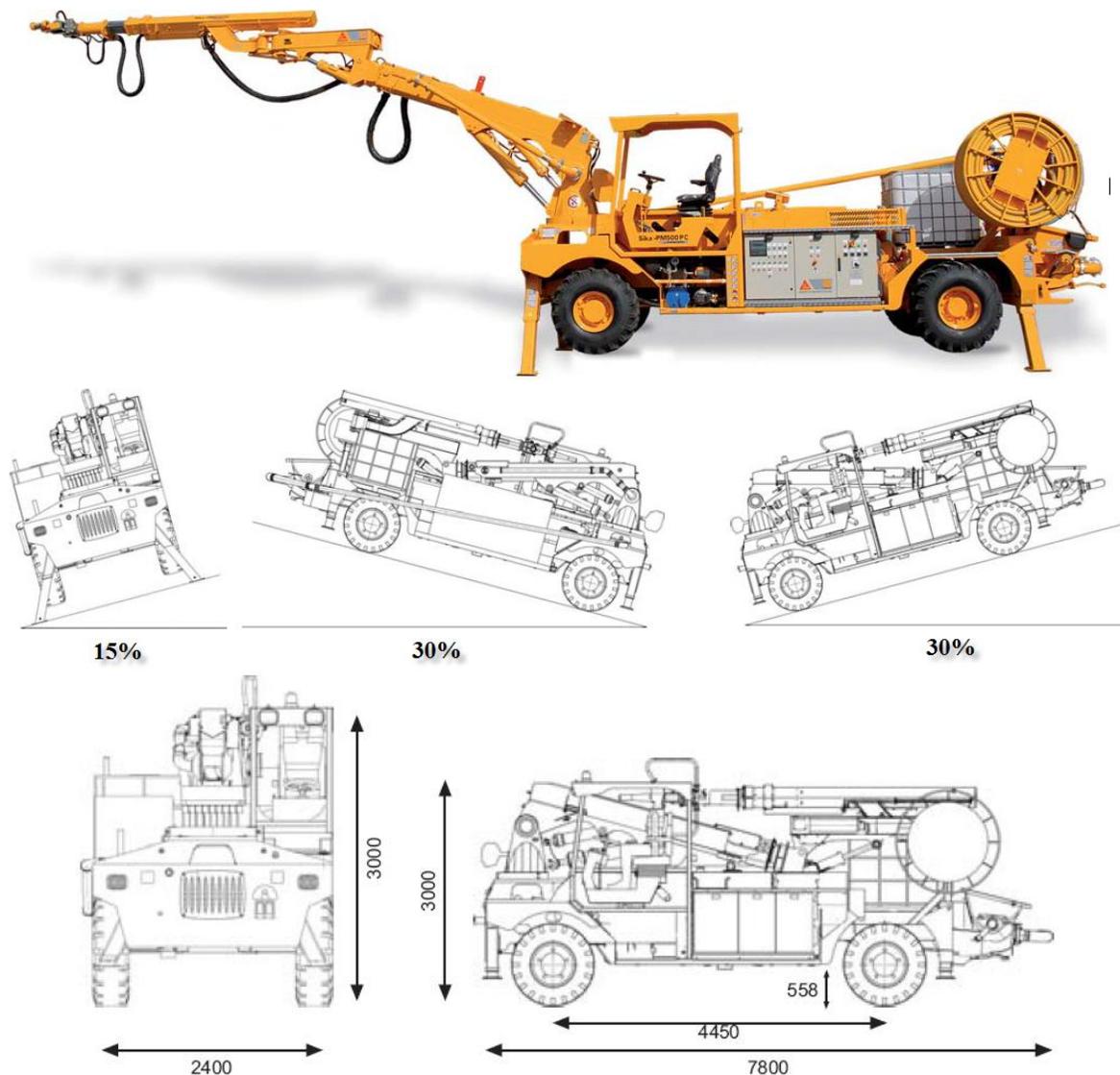


Abb.24. Universelle Spritzbetonmaschine Sika - PM500 [11]

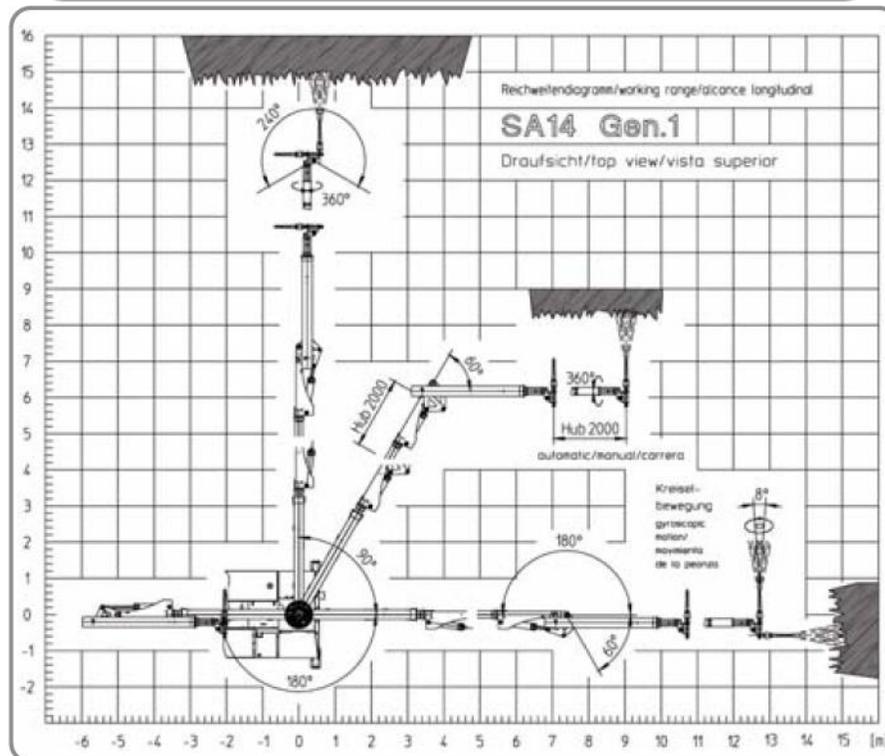
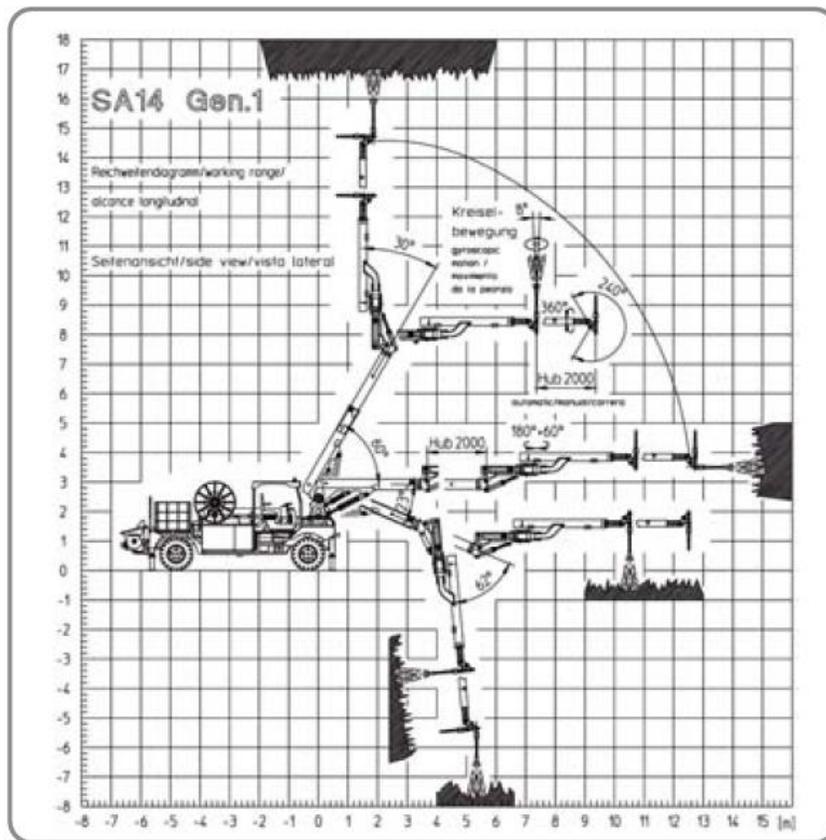


Abb.25. Parameter der Spritzbetonmaschine Sika - PM500 [11]

Wichtigste technische Daten von Sika - PM500 [11]

| | |
|---------------------------------------|--|
| Gesamtgewicht der Maschine | 35,7 t |
| Außenradius bei Kurvenfahrt | Außen – 6,1 m Innen – 2,6 m |
| Dieselmotor | Leistung 75 kW Hydraulischer Antrieb 4x4 Kühlwasser Geschwindigkeit bis 20 km/h |
| Teleskoparm | SA 14 |
| Spritzbetonmaschine | Φ180 mm Erforderliche Düsenentfernung vom Wand 1000 mm |
| Spender für Flüssigkeiten | Aliva-403.5 Leistung - 1,1 kW Kapazität 30 - 700 l/h |
| Kompressor | 110 kW/600 cfm Kapazität 11,5 m ³ /min. |
| Zusätzlicher Behälter | 1000 l |
| Wasserbehälter für Hochdruckreinigung | Leistung 10 kW Kapazität 25 l/min. Druck max. 220 bar |
| Kabeltrommel | 50-120 m Spannung 400 V 50 Hz Hydraulisches Ein- /Ausrollen |
| Hebevorrichtung | Aliva-285 |

Die Fernsteuerung des Sprühsystems kann entweder schnurlos oder verkabelt sein.

8.5. Auskleidungsarbeiten [6]

Der Druckstollen wird mit Panzerung ausgekleidet. Die Stahlrohre werden in Rohrsektionen in der Länge von 6,0 m aus Stahl (Din 17100) St 52-3N hergestellt. Alle Verschweißungen werden auf Wasserdichtigkeit überprüft, indem 25% der Längs-, 10% der Quer- und 50% der Montageschweißnähte mit γ -Strahlen oder durch Ultraschalldichtmessung geprüft werden. Bei der Montage werden 100% der Schweißnähte überprüft.

[6] “Zur Erleichterung des Einbaus werden die Rohrleitungssektionen noch in der Fabrik abgebunden und dann wird die genaue Position des Rohres gekennzeichnet. Auf der Außenoberfläche werden die laufende Nummer der Rohrsektion, ihr Gewicht und die Richtung des Wassers markiert.

Die fertigen Rohre werden vorläufig von der Innenseite mit kreuzförmigen Profilstählen verstärkt, damit sie ihre kreisförmige Form während des Transports und der Montage nicht verlieren. Nach Möglichkeit wird diese Verstärkung erst nach dem Erhärten des Betons hinter den Rohrleitungen abgeschnitten.

Der Stollenquerschnitt muss zur Montage der Stahlpanzerung vergrößert werden. Bei einem relativ stabilen Felsmassiv und keinem Grundwasserzustrom ist eine gründliche Reinigung der Einbauoberfläche mit Druckwasser üblich.

Bei Grundwasserzustrom muss das Wasser abgeführt werden, so dass dieses die zukünftige Konstruktion nicht belastet. In solchen Fällen ist eine Abfuhr des Wassers vorzunehmen, das von dem eingespritzten Beton nicht zurückgehalten wurde. Zu diesem Zweck ist eine frühstandfeste Zementmischung zu verwenden, die aus Portlandzement, Wasser und einem speziellen Beschleuniger zubereitet ist. Der Beschleuniger muss plastische Viskositätseigenschaften der Mischung herbeiführen. Zu der Zustromstelle wird ein Kunststoffschlauch oder ein Metallrohr eingebaut. Dann wird die frühstandfeste Zementmischung um das Rohr eingebracht.

Am häufigsten wird das Grundwasser durch eine Rohrleitung weggeführt, die sich hinter der Panzerung befindet. In dieser Rohrleitung sind die Rohre der gesonderten Wassersammelstellen hineinzustecken, die danach in der Betonauskleidung eingebaut werden. Eine Rohrleitung wirkt wie eine ununterbrochene Dränage. Sie wird aus geriffelten PVC-Rohren ϕ 180 ausgeführt und ist mit einer Dränageschicht umhüllt, die ein leichtes Eindringen des dränierten Wassers in die Rohrleitung erlaubt. Damit eine Reinigung der Ablagerungen, die bei dem Spritzen des Felses möglich sind, werden Öffnungen an bestimmten Stellen vorgesehen. Während der Betriebsperiode wird die Dränage nur bei einer eventuellen Reparatur geöffnet, die das Entleeren des Druckstollens erfordert. Auf diese Weise wird das natürliche Niveau des Grundwassers nicht geändert und es ergibt sich keine Strömung durch die Risse, die zu einem Schwächen des Felsmassivs führen könnte.”

8.5.1. Montage der Rohrsektionen [6]

[6] “In dem auf vorher beschriebene Weise vorbereiteten Sollenausbruch sind die Rohrsektionen von unten nach oben einzubauen. Zu diesem Zweck werden spezielle Loren benutzt, die sich auf einem Schienenweg bewegen, dieser Weg wird später einbetoniert. Die Rohre werden in den Stollen mittels eines Stahlseils und eines Aufzugs hinuntergelassen.

Zur Erleichterung der Montage der Rohre gibt es am oberen Rand einen äußeren Stahlring, der zur Halterung hilft. Nach der Anpassung werden die Sektionen durch kleine Betonblocks oder Holzkeile befestigt. Die Anpassung kann leichter durchgeführt werden, wenn die Rampen, auf den sich die Rohre bei der Montage befinden, mit einem hydraulischen Antrieb ausgestattet sind.

Nach der Endanpassung der Verbindungen werden die Sektionen von Hand verschweißt. Jede Schweißnaht wird überprüft und wenn es notwendig ist, wird sie zusätzlich bearbeitet. Damit die Temperaturverformungen im Bereich der Schweißnaht vermieden werden, wird diese vorher auf 120° bis 160° C erhitzt. Nach der Beendigung des Verschweißens werden die Schweißnähte an der Innenseite geschliffen.”



Abb.26. Panzerung des Druckstollens

[6] “Die Endüberprüfung der Schweißnähte wird nach der Reihenfolge durchgeführt:

1. Rissüberprüfung – zwei Verfahren: Überprüfung durch magnetische Staubpartikeln oder Durchdringen von Farbstoff;
2. Ultraschallmessung der ganzen Nahtlänge;
3. Röntgen- oder Isotopenprüfung dieser Stellen, wo die Ergebnisse von der Ultraschallmessung nicht sehr überzeugend sind. Beim Auftauchen eines Defekts wird diese Stelle geschliffen, verschweißt und wieder geprüft.”

8.5.2. Betonarbeiten

Vorbereitung zum Betonieren

[6]“Der oberste Bereich der Rohrsektion verbleibt nicht hinterfüllt (ca. 1m lang). Falls auf der äußeren Oberfläche der neumontierten Rohrsektion Rost, Erde oder andere Schmutzpartikeln zu bemerken sind, so müssen diese unbedingt beseitigt und bearbeitet werden.

Die Rohre sind gegen Aufschwimmen während des Betonierungsprozesses zu befestigen. Zu diesem Zweck werden Rippen auf den Beton unter dem befestigt, so dass ein lokales Beulen oder Aufheben des Rohrs durch die Betonierung ausgeschlossen ist.

Die Fuge zwischen zwei Rohrsektionen muss vor dem Betonieren gereinigt werden, bis es sich eine Betonoberfläche ohne unbefestigte Teilchen ergibt. Die Felsoberfläche, die Fuge und die äußere Oberfläche der Rohre werden durch Wasser-/Luftdruckstrom gereinigt. Das in den niedrigen Stellen gebliebene Wasser wird durch Druckluft beseitigt.”

Betonieren des schrägen Abschnittes

Die Ausfüllung des Raums zwischen dem Rohr und dem Fels wird mit einer Betonmischung ausgeführt, die durch spezielle Rohrleitungen und mit der Hilfe einer pneumatischen Betonpumpe eingebracht wird. Das Einbringen der Seitenausfüllung mit Beton wird in Abschnitten [6] von 18 m ausgeführt, die aus drei miteinander verbundenen Sektionen, jede 6 m lang, bestehen. Deswegen werden drei Verbindungsnahte gleichzeitig bearbeitet:

Erste Verbindungsnaht (befindet sich zwischen den obersten zwei Rohrsektionen) – Montage und Befestigung;

Zweite Verbindungsnaht (befindet sich zwischen der mittleren und dritten Rohrsektionen) – Montage und Befestigung;

Dritte Verbindungsnaht (befindet sich zwischen der dritten und schon betonierten Rohrsektionen) – Überprüfung;

Der Beton wird erst dann eingebracht, wenn die erste (oberste) Verbindungsnaht überprüft ist.

Der Beton wird zur Betonpumpe geliefert, die sich im Wasserschlosse befindet. Dies geschieht mit Hilfe einer Förderleitung, die an der Wasserschlosswand befestigt ist. Die Betonzulieferung mit Schlauch kommt direkt vom Betonmischer. Der Beton wird in einem Trichter gegossen, welcher am Ende des Schlauchs befestigt ist. Dies wird von der am Wasserschloss vorgesehenen Baustelle durchgeführt. Durch das Einwirken der Schwerkraft erreicht die Betonmischung die Betonpumpe. (In diesem Moment muss der überirdische Teil des Wasserschlosses noch nicht errichtet werden) Die Betonförderleitung ist mit Einrichtungen je 10m ausgestattet, die den fallenden Beton verzögert.

[6] “Der Schlauch der Betonpumpe wird an der Kalotte des Tunnels auf Rollen aufgehängt. Das Ende des Schlauchs muss 2 m tief in dem Beton getaucht sein und langsam herausgezogen werden, was sicherstellt, dass der ganze Betonquerschnitt unter Druck ist.

Die Betonausfüllung wird auf solche Weise ausgeführt, dass das Rohr gleichmäßig an beiden Seiten belastet wird. Arbeitsfugen sind unzulässig und die zulässige Pause zum Abbinden der Betonmischung ist 2 Stunden. Der Beton ist in Querrichtung von unten nach oben auszufüllen. Mit großer Aufmerksamkeit muss das Betonieren der Kalotte erfolgen. Dabei ist auf Poren oder Hohlräume zu achten, die sich beim verzögerten Betonieren ergeben können.”

An den gegossenen Beton werden hohe Anforderungen gestellt, insbesondere an seine Dichte, Widerstand gegen das Eindringen aggressiver Stoffe, Festigkeit und Widerstand gegen Alterung.

8.6. Sondierungs- und Verdichtungsarbeiten [3]

8.6.1. Verfüllinjektion

[3] “Die Verfüllinjektion hat zum Ziel alle Hohlräume auszufüllen, die zwischen der Auskleidung und dem Felsmassiv geblieben sind. In Abhängigkeit von der Größe der Hohlräume wird Zementmischung oder Zement-Sand-Gemisch im Verhältnis 1:1 bis 1:3 verwendet, welches eine Sandkorngröße bis zu 2 mm aufweist.

Die Öffnungen werden durch unter Druck eingebrachtes Wasser ausgeführt, mit einem Kronendurchmesser von 42÷45 mm. Die Arbeiten werden für den ganzen Verdichtungsring /Querschnitt/ durchgeführt. In einem Ring werden drei oder vier Löcher gebohrt, wobei der Abstand zwischen den Ringen 2,5 m ist. Die Tiefe der Sondierung ist die Dicke der Auskleidung plus 15 cm. Das Injizieren wird in Abschnitten von 30m ausgeführt. In Querrichtung wird das Einpressen von der untersten Bohrung vorgenommen und wird bis zum Mörtelauslaufen aus einer Nachbarbohrung fortgesetzt. Die Vorgehensweise wird nach oben bis zur letzten Öffnung wiederholt.

Es ist normalerweise etappenweise, durch aufeinanderfolgende Verfüllung der Öffnungen zu injizieren. Zuerst werden Hauptöffnungen gebohrt und verpresst. Nach dem Hartwerden des Mörtels werden Kontrollöffnungen dazwischen gebohrt. Wenn die Wasseraufnahme unter der vorgeschriebenen Grenze ist, bedeutet das, dass die Injektionsarbeiten erfolgreich sind. Andernfalls sind die Kontrollöffnungen auch Injektionsöffnungen in welche Mörtel gepresst werden kann. Es folgt die Herstellung von neuen Kontrollöffnungen, wobei das Verfahren bis zu einem befriedigenden Ergebnis wiederholt wird. Nach dem Einspritzen einer Sondierung wird die Öffnung durch eine Muffe geschlossen.”

Dieses Verdichtungsverfahren ist zweckgemäß nach einer Probefüllung des Druckstollens auszuführen.

8.6.2. Packer - Injektion

[3] “Bei den Panzerauskleidungen ergibt sich nach einer gewissen Zeit um die Rohrleitung herum ein Hohlraum zwischen dem Stahlrohr und dem Beton. Das passiert infolge der Austrocknung von Beton und der Stahlabkühlung. Diese Erscheinung ist im statischen Sinne für die Auskleidungsfunktion sehr ungünstig, weswegen muss dieser Hohlraum gefüllt werden. Zu diesem Zweck wird Zementmörtel zwischen dem Stahlrohr und der Betonauskleidung gepresst, der die Hohlräume ausfüllt.

Ein altes Verfahren zum Entdecken der Stellen, wo sich das Stahlrohr vom Beton gelöst hat, ist mittels Klopfen /widerhallende Stellen/. Nach ihrem Entdecken erfolgt das Injizieren, das wie folgt durchgeführt wird:

Der Einpressmörtel wird durch die in der Panzerung vorausgesehenen Öffnungen eingebracht. Das passiert in Richtung vom Boden zur Kalotte. In den Öffnungen wird zuerst eine Probewasserpressung durchgeführt. Wenn Wasser durch die Nebenöffnungen ausläuft, werden diese injiziert. Das Einpressen wird mit einer Kolbenpumpe und Packer durchgeführt. Der Druck muss weniger als der kritische sein, der zur Verformung des Rohres führt. Dadurch werden die Hohlräume gereinigt und die Verbindung zwischen den einzelnen Öffnungen überprüft. Kann eine Öffnung nicht mehr Wasser bei der Wasserpressung aufnehmen, so wird der Packer abgebaut und in der nächsten Öffnung montiert.”

In diesem Projekt wird ein neueres österreichisches Verfahren angewendet, das von TWAG ausgearbeitet wurde, da es einige Besonderheiten der Panzerung gibt, welche unten dargestellt sind. Die Anwendung des Verfahrens, (convergence-confinement), (Lauffer Seeber 1964:Österr Patent Nr.240795) [12] sichert sowohl eine ausreichende Dichtung der nach dem Betonieren verbliebenen Hohlräume, als auch eine vorherige Überspannung der Auskleidung.

Die maximale Dicke der Panzerung beträgt 15mm. Bei Dicken unter 25 mm in den zur Einpresssondierungen vorausgesehenen Stellen / die Stellen für die Packer/ sind vorher Stahlscheiben mit einer $\Phi 100\text{mm}$ und Dicke 30 mm zu schweißen, in denen das Gewinde für die Öffnungen und die nötige Ausrüstung anzufertigen ist. Der Einbau solcher Scheiben bei der Rohrherstellung könnte die Auskleidung verteuern. Dies ist in diesem Fall nicht notwendig.

Damit ein maximaler Effekt von den Injektionsarbeiten erreicht wird, ist eine Probefüllung vorzusehen. Auf diese Weise öffnen sich die Fugen in Folge der Rohrabkühlung, es wird eine radiale Rissbildung verursacht und der Einfluss von plastischen Verformungen des Felsmassivs wird beseitigt.

Verfahren ausgearbeitet von TIWAG /Bild 27/:

[12] “Vier Einpressleitungen werden bei dem horizontalen und vertikalen Durchmesser eingebaut. Diese werden auf der äußeren Oberfläche der Panzerung befestigt. Das System ist auf ihrer Gesamtlänge mit einer Schutzfolie beklebt. Die Einpressleitungen /Stahlrohre $\Phi 1,4$ ”/ werden im Abstand von 1,5 m entlang des Rohres verlegt und sind mit Manschettenventilen ausgerüstet. An jedem kleinen Rohr gibt es 10 Öffnungen $\Phi 4\text{mm}$, durch die der Einpressmörtel ausläuft. Die Öffnungen für die Mörtelzugabe liegen in zwei Querschnitten im Abstand von max. 20m. In diesem Fall werden Rohre mit einer Länge von 6,0 m eingebaut, daraus folgt, dass sich die Eingabeöffnungen im Abstand von 5,5m befinden.

Der Einpressmörtel weist ein $W : Z = 1 : 0,4$ auf, hat Bentonitzusätze, die 3% vom Zementgewicht sind und hat auch Plastifizierersätze, die 0,6% vom Zementgewicht betragen.

Der Einpressdruck ist zu berechnen, bei dem der berechnete kritische Druck, der zur Verformung der Panzerung führt, mit 3÷5 atm reduziert wird.” In dem entsprechenden Fall ist: $p_{inj}=0,24\div0,44\text{Mpa}$.

Eine zusätzliche Wirkung vom Injizieren ist die Vorspannung. Bei den gemäß europäischen Vorschriften ausgeführten Druckstollen, die identische Parameter haben, beträgt diese Vorspannung ca. 0,25% der maßgebenden Verformung. Diese Vorspannung führt zu einem günstigeren Spannungszustand bei der Inbetriebnahme.

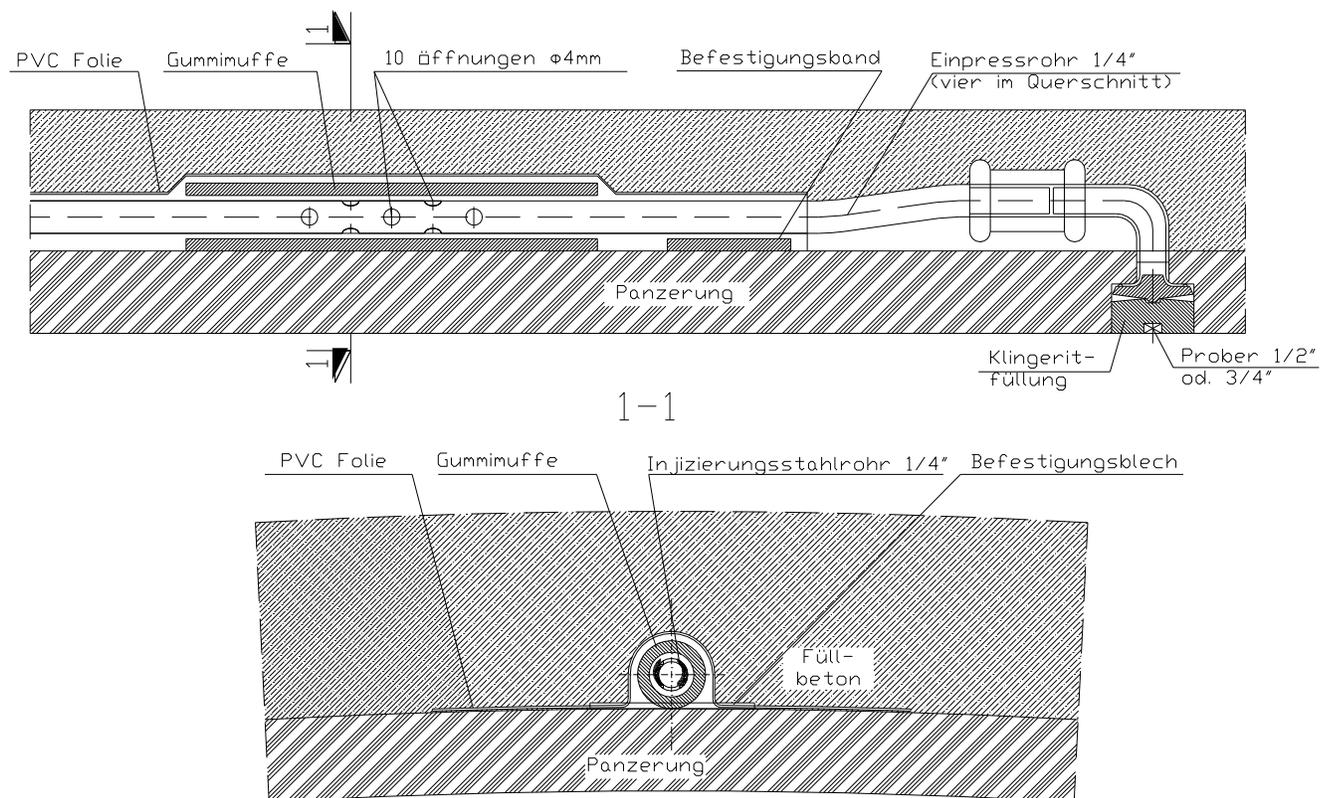


Abb.27. Subkutane Injektion

Die Verwendung dieses Sonderverfahrens ist mit Minimalbeschädigung der Stahlpanzerung und ohne zusätzliche Kosten verbunden.

8.6.3. Korrosionsschutz

Von großer Bedeutung für den Betrieb des Druckstollens ist der Korrosionsschutz der Panzerung. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, damit Stahlrohre vor den schädlichen Auswirkungen von Korrosion geschützt werden - Mehrfachbeschichtungen mit Mennige, Ölfarbe, Asphalt, Kunstharzen und anderen sind in unterschiedlicher Weise an der Innenseite des Rohres nach Fertigstellung der Anlage anzubringen.

Für die Schutzbeschichtung in dieser Projektlösung eignen sich ausgezeichnet zwei Produkte von dem Unternehmen "SIKA" - Icosit-Poxicolor ® SW und Icosit ® SW500. Sie sind für den Korrosionsschutz von Metalloberflächen gegenüber mechanischen Auswirkungen vom Wasser entwickelt worden. Diese Produkte können bei verschiedenen chemischen Parametern vom Wasser verwendet werden. Sie haben eine sehr gute Haltbarkeit und geben keine gefährlichen Stoffe in die Umgebung ab.

[16] Das Mischen von Icosit-Poxicolor SW und Icosit SW500 wird durch eine Wärmebehandlung durchgeführt. Das genaue Rezept für das Verhältnis der beiden Komponenten wird vom Hersteller angegeben. Zur Optimierung der glatten und dichten Beschichtung wird empfohlen, dass das erhitzte Gemisch mit einer Pistole unter einem minimalen Druck von 180bar eingebracht wird. Der Durchmesser des Schlauchs beträgt 8mm und die Düse 0,53÷0,66 mm bei einem Injektionswinkel von 40°÷80°. Verunreinigungen an der Rohroberfläche müssen entfernt werden. Weiterhin muss die Basis gut getrocknet werden.

Es ist vor dem Beginn des Prozesses zu überprüfen, ob die Einbaumethode für die konkreten Bedingungen passend ist, ob die erforderliche Dicke und Qualität bei den konkreten Bedingungen und der gewählten Methode erreicht werden kann.



Abb.28. Das Einbringen von Schutzschicht

Bei der Durchführung aller Bauarbeiten sollten die Vorschriften über den Arbeitsschutz beachtet werden!

9. Umweltschutzmaßnahmen

9.1. Bewertung der Umwelt im Arda Tal

9.2. Umweltschutzmaßnahmen

- 9.2.1. Bauwege
- 9.2.2. Aushubarbeiten
- 9.2.3. Einsatz von Baumaschinen und Verkehr
- 9.2.4. Abfall
- 9.2.5. Deponie
- 9.2.6. Gewässerschutz
- 9.2.7. Gefährliche Stoffe
- 9.2.8. Lärmverschmutzung
- 9.2.9. Auswirkungen auf die Flora und die Fauna in der Anlagenumgebung

9.1. Bewertung der Umwelt im Arda Tal [13]

[13] “Die spezifische biogeographische Lage der Rhodopen, das erhebliche geologische Alter des Gebirges und viele andere Faktoren machen das Tal zu einem der wichtigsten Bereiche in Bulgarien im Bezug auf die biologische Artenvielfalt. Diese Tatsache liegt hinter der Nationalen Strategie zur Erhaltung der Biodiversität, die im Jahr 1994 entwickelt und von der Regierung als offizielles Dokument zu Beginn des Jahres 1998 angenommen wurde. Die Strategie stellt die Vorbildfunktion der Rhodopen insbesondere im Hinblick auf die Artenvielfalt, endemische und seltene Taxonomien und die biologische Vielfalt als Ganzes dar.

Der Baubereich der vorgeschlagenen Kaskade Gorna Arda liegt vollständig innerhalb der Zone mit der höchsten Bedeutung im Bezug auf die Artenvielfalt, endemische und seltene Taxonomen /S. 47 der Strategie/.

Es sollte angemerkt werden, dass dies bei relativ unvollständiger Untersuchung der Region festgestellt worden ist, d.h. es ist möglich, dass die Region eine noch wesentlich bedeutendere Rolle im Bezug auf die biologische Vielfalt hat.”

Bewertung der Lebensräume in der Region

[13] “Das Tal des Arda Flusses, im Bereich zwischen Madan und Kardjali Stausee, wird durch eine einzigartige Kombination von Komponenten des Reliefs, der geologischen und Bodeneigenschaften, der Vegetation und der Tierwelt gekennzeichnet. In Bulgarien gibt es kein zweites Flusstal mit solcher Biodiversität.”

Ökologische Rolle des Arda Tals

[13] “Das Tal des Arda Flusses in der Region des Bauunternehmens hat eine außerordentlich wichtige ökologische Rolle des natürlichen Korridors, welcher Austausch zwischen Populationen und die Migration verschiedener Arten erleichtert. Bekannt ist die große Bedeutung, die solche natürliche ökologische Korridore haben. Von ihrem Zustand und Funktionen hängt weitgehend das Überleben von Arten und Ökosystemen viel größerer Gebiete ab. In diesem Sinne ist die Rolle des Arda-Tals auch für die umgehenden Regionen in erheblichem Maße wichtig.”

9.2. Umweltschutzmaßnahmen

Bei der Durchführung von Bauarbeiten sollen in jedem Fall Maßnahmen getroffen werden, so dass Störfaktoren nur geringe oder keine Auswirkungen auf die Umgebung haben, d.h. Bauarbeiten sollten keine geschützten Gebiete, historische Denkmäler usw. beeinflussen.

Im Fall sind die Umweltschutzmaßnahmen von besonderer Bedeutung wegen der wichtigen ökologischen Gegebenheiten des Gebietes.

9.2.1. Bauwege

Während des Baus des Wasserkraftwerks Sarnitsa und der Druckrohrleitung werden vorwiegend Landstraßen und Wege von der bereits vorhandenen Infrastruktur verwendet.

Die Baustelle, die dem Bau von dem Wasserkraftwerk dient, liegt an der Landstraße entlang des Arda Flusses und an dem Eingang zu der Druckrohrleitung. Wegen dem Bau des Wasserkraftwerkes soll diese Strecke der Landstraße durch eine andere ersetzt werden. Die neue Landstraße ist 20m höher verschoben und liegt fast parallel zu der vorhandenen. Eine Baustelle, die an dem neuen Landstraßenabschnitt liegt, ist auch beim Zugangsstollen vorgesehen.

Ein Zugang zu der Wasserschlossbaustelle ist durch den Bau eines Straßenabschnitts mit einer Länge von etwa 720m gesichert. Dieser Abschnitt bleibt permanent als Betriebsweg.

Die Länge und das Vorhandensein von neu gebauten Straßenabschnitten wird so optimiert, dass so wenig wie möglich die Baustellenumgebungen gestört wird. Überall, wo vorübergehende Einrichtungen gebaut werden und der Boden gestört wird, ist es notwendig, Maßnahmen für die Rekultivierung und die Wiederherstellung der beschädigten Bereiche zu unternehmen.

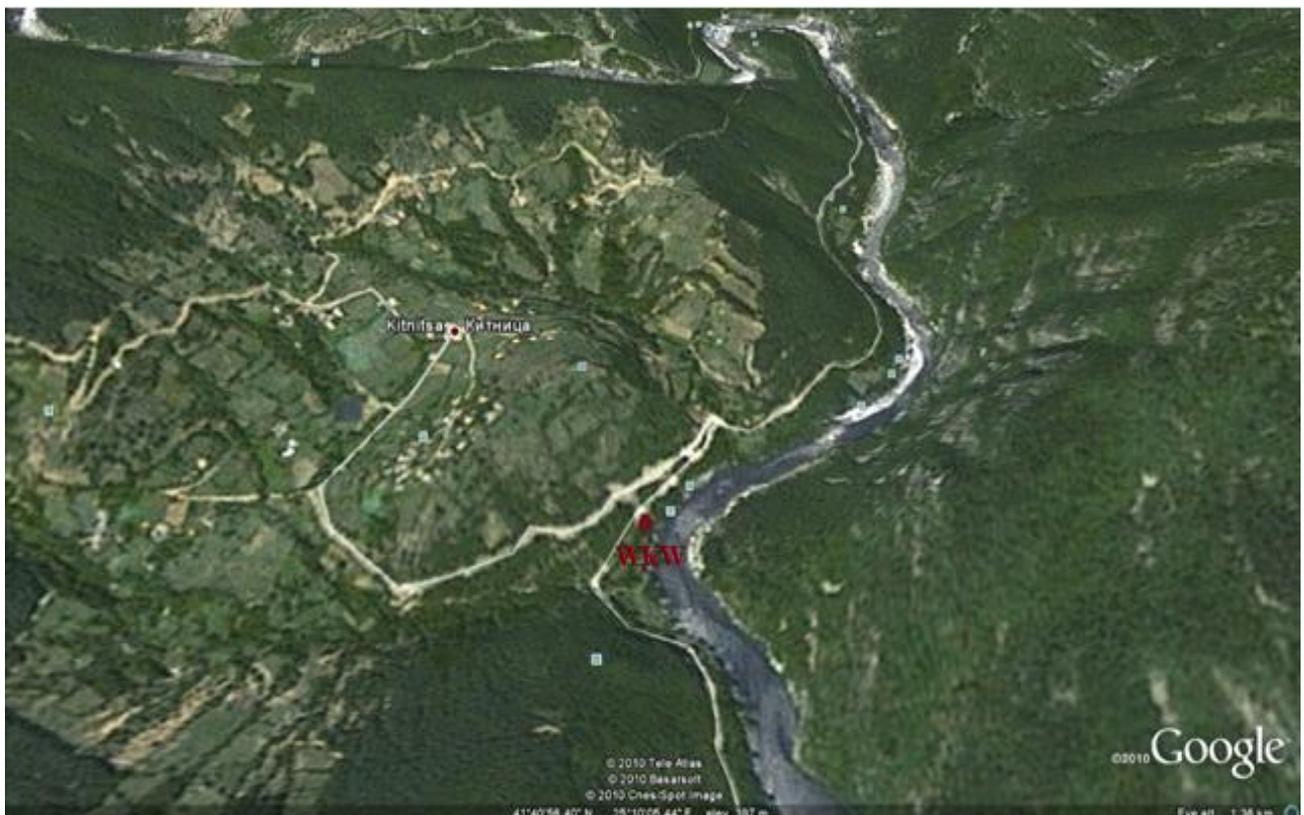


Abb.16. Bestehende Straßeninfrastruktur im Bereich des Wasserkraftwerks

9.2.2. Aushubarbeiten

Infolge von Abbau-, Verladungs- und Transportarbeiten bildet sich eine große konzentrierte Staubmenge. Zur Reduzierung des Umweltrisikos und zur Unterdrückung der Emissionen kommen Technologien zum Einsatz, die üblicherweise in solchen Fällen angewendet werden. Zum Beispiel: speziell vorgesehene Fahrzeuge befeuchten die Bauwege während der Dürren und intensiver Fahrzeugbewegung. Selbst die Teilschnittmaschine ist mit Staubsaug- und Belüftungsanlage ausgestattet.

9.2.3. Einsatz von Baumaschinen und Verkehr

Zur Reduzierung der Abgasmenge wird der Leerlauf der Fahrzeuge minimiert. Beim Transport von Materialien, welche eine Verstaubung verursachen, ist eine Bedeckung erforderlich. Permanente Überwachung des technischen Zustandes der Mechanisierung soll gesichert werden.

9.2.4. Abfall

Zwischen den Standorten für die Abfallbehandlung und an Grenzen mit Siedlungen wird eine hygienische Schutzzone gebildet. Die Funktion dieser Zone ist einen Gesundheitsschutz sicherzustellen. Der Abfall wird in geschlossenen Fahrzeugen transportiert und soll auf keinen Fall im Flussbett entsorgt werden.

Abfälle, die während der Bauphase entstehen:

- Kommunalabfälle werden in Fässern gesammelt. Es ist sowohl während der Bauphase als auch während des Betriebes erforderlich, dass diese Abfälle bis zur dafür bestimmten Deponie transportiert werden.
- Die unnötigen Erdmassen und Fels sind bis zur dafür bestimmten Deponie zu transportieren. Möglicherweise werden nur Bauwege verwendet.
- Metalle /Bewehrung, Schrott u.a./ zur Wiederverwertung
- Kraftstoff und Schmiermittel werden in speziellen abgedichteten Behältern gesammelt. Versickerung in den Boden und ein Vermischung mit Wasser sollen auf jeden Fall verhindert werden.
- Überschüssiges Holz wird wegtransportiert, damit Fäulnisprozesse im Anlagenbereich verhindert werden.

9.2.5. Deponie [17]

Die Abfallbehandlungsplätze, wo Emissionen von Staub, Schadstoffen oder schlechtem Geruch zu erwarten sind, werden in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung positioniert. Wohnflächen, benachbarte Baustellen und andere Stellen, wo Gesundheit gewährleistet ist, sollen von den Emissionen nicht beeinflusst werden.

[17] Deponieplätze werden nach folgenden geotechnischen Kriterien bestimmt:

- Geomorphologie des Gebietes
- geologische Struktur, lithologische Zusammensetzung, physiko-mechanische Eigenschaften und Verformungsverhalten
- tektonische Struktur
- physikalische und geologische Prozesse und Phänomene in der Region
- hydrogeologische Bedingungen und Grundwasserregime, einschließlich die Anwesenheit von Grundwasser, den Grundwasserspiegel und seine wichtigsten Parameter, die Interaktion zwischen verschiedenen Grundwasserspiegeln und ihre Zonen, die chemische Zusammensetzung des Grundwassers und der Bewertung ihrer Aggressivität, die hydraulische Verbindung zwischen den Oberflächen und dem Grundwasser, die Belüftungszonen
- Tragfähigkeit und Verformungen des Bodens
- Bodenstabilität (Rutschgefahr)
- Verhalten beim Erdbeben und andere dynamische Einflüsse
- Dauerhaftigkeit natürlicher und künstlicher Barrieren
- Einpassung der Anlage in die bestehende Landschaft
- Notwendigkeit einer weiteren Verstärkung und Drainage des Bodens
- Voraussetzungen für die Migration von Schadstoffen ins Wasser und Boden
- Unfallrisikos
- Zuverlässigkeit der natürlichen geologischen Barriere und der natürlichen Materialien für die Isolierung.

[17] Erfordernisse für die Deponie:

- keine Gefahr durch Anzünden
- getrennte Behälter für die verschiedenen Abfälle
- Überwachung von allen Seiten
- Sammlung und Ableitung von Oberflächenwasser
- Alle Fahrzeuge werden desinfiziert
- Geländeüberprüfung, Feststellung von eventuellen Schwachstellen, welche mit dem Grundwasser verbunden sein können.

Eine Schließung und eine Rekultivierung der Deponie und der beschädigten Bereiche werden nach einem speziell angefertigten Projekt durchgeführt. Die Realisierung nach dem Projekt soll Umweltverträglichkeit und Gesundheitssicherheit gewährleisten.

In gewissen Stufen der Deponiefüllung werden Bodenschichten mit einer Dicke von 0,90 m eingebracht. Die letzte Abfallschicht wird mit Ton bedeckt. Die Mächtigkeit der Tonschicht ist 2m. Oberhalb des Tons wird eine Humusschicht eingebracht.

Die Landschaft von den Abfallbehandlungsplätzen wird mit Rasen, Pflanzen, Bäumen und Sträuchern im Hinblick auf ihre Gesundheits- und Schutzzeigenschaften, dekorative Qualität und ihre Beständigkeit gegen Schadstoffe in Luft und Boden wiedergebaut. Wenn möglich wird die vorhandene Vegetation beibehalten.

9.2.6. Gewässerschutz

Die Wasserverschmutzung wird vorwiegend vom hohen Gehalt an Feinstaub in der Luft verursacht. Die Staubemissionen stammen aus Bohrarbeiten, Felsoberflächenspülung, Ladung, Aushubtransportierung u.a.

Im Pannenfall oder bei fehlerhafter täglicher Überwachung des technischen Zustandes von Baumaschinen ist das Austreten von Öl möglich. Zur Steuerung möglicher Leckagen sind Schlamm- und Ölabscheide einzubauen.

Das Kommunalabwasser wird in Gruben ausgeleitet. Infiltrationsbehälter werden gebaut. Nach der Behandlung wird das Wasser auf keinen Fall in die Flüsse abgeleitet. Es kommt wieder zum Einsatz beim Befeuchten von Bauwegen. Das Regenwasser wird durch Kanäle erfasst und in einen Fluss umgeleitet.

9.2.7. Gefährliche Stoffe

Gefährliche Stoffe, deren Lage, Zugriffsmodus, Sicherheitsmodus und Aufbewahrung streng geregelt sein müssen, werden noch bei der Ausführungsplanung besprochen.

9.2.8. Lärmverschmutzung

Die Hauptquelle von Lärm für die Siedlungen in der Umgebung sind die Lastkraftwagen.

Die Baustellen als Lärmquellen haben keinen negativen Auswirkungen auf die Umwelt, weil sie sich weit genug von bewohnten Gebieten befinden und die Geräuschemissionen vollständig von den Besonderheiten des Reliefs abgeschirmt sind.

9.2.9. Auswirkungen auf die Flora und die Fauna in der Anlagenumgebung

Die Komponenten der Umwelt, auf die die Luft eine Auswirkung während der Bauphase hat:

- Verunreinigungen durch Staub, die in den Bewuchs in der Nähe der Baustelle gelangen
- Beschwerden des Lebens im Bereich von Vögeln, Säugetieren, Reptilien, Amphibien und Viehzucht vor allem durch Geräusche von Fahrzeugen und Vibrationen von Baumaschinen.

10. Anhang

10.1. Ergebnisse von der Untersuchung der maximalen Erhöhung der Druckhöhe mit HIUD Programm

10.2. Ergebnisse von der Untersuchung der maximalen Minderung der Druckhöhe mit HIUD Programm

10.3. Betriebsmuschelkurve der PO115 Turbine

10.1. Ergebnisse von der Untersuchung der maximalen Erhöhung der Druckhöhe mit HIUD Programm

NUMMERISCHE MODELIERUNG DES DRUCKSTOSSES IN DER DRL MIT HIUD PROGRAMM

EINGABEDATEN

| | |
|---|-------------------------|
| NUMMER DER PUNKTE | 21 |
| AUSDRUCKSCHRITTE | 5 |
| GRENZBEDINGUNG AM ANFANG | 5 |
| GRENZBEDINGUNG AM ENDE | 3 |
| LÄNGE DER DRL | 207.33m |
| DURCHMESSER | 4.800m |
| FORTPFLSNZUNGSGESCHWINDIGKEIT DER WELLE | 1036.50m/s |
| RAUHIGKEITSBEIWERT | 0.012 |
| Q ₀ | 72.000m ³ /s |
| DRUCKHÖHE AM ANFANG | 99.06m |
| DRUCKHÖHE AM ENDE | 97.81m |
| PUMPENIVEAU | 0.00m |
| SCHLIESSZEIT ENDE | 9.s |

TURBINE AM ENDE DER DRL

SCHLIESSGESETZ

SCHLIESSZEIT, s [h]

0. 1.000

9. 0.000

9. 0.000

ERBENISSE BEI T = 1.000s

ALFA = 1.000

H,m

99.06 99.52 99.98 100.44 100.90 101.36 101.82 102.28 102.74 103.20
103.66 104.12 104.58 105.04 105.50 105.96 106.42 106.88 107.34 107.79 108.25

V,m/s

3.698 3.698 3.698 3.698 3.698 3.698 3.697 3.697 3.697 3.697
3.697 3.696 3.696 3.696 3.696 3.696 3.695 3.695 3.695 3.695 3.694

Q,m³/s

66.925 66.922 66.919 66.916 66.913 66.909 66.906 66.903 66.899 66.896
66.892 66.889 66.885 66.881 66.878 66.874 66.870 66.866 66.862 66.858 66.853

ERBENISSE BEI T = 2.000s

ALFA = 1.000

H,m

99.06 99.57 100.07 100.58 101.09 101.59 102.10 102.61 103.11 103.62
104.12 104.63 105.14 105.64 106.15 106.66 107.16 107.67 108.18 108.68 109.19

V,m/s

3.217 3.217 3.217 3.217 3.217 3.217 3.217 3.217 3.217 3.217
3.217 3.217 3.217 3.217 3.217 3.217 3.217 3.217 3.217 3.217

Q,m³/s

58.215 58.215 58.215 58.215 58.215 58.214 58.214 58.214 58.214 58.214
58.214 58.214 58.214 58.214 58.213 58.213 58.213 58.213 58.213 58.212 58.212

ERBENISSE BEI T = 3.000s

ALFA = 1.000

H,m

99.06 99.57 100.08 100.60 101.11 101.62 102.13 102.64 103.16 103.67
104.18 104.69 105.20 105.72 106.23 106.74 107.25 107.76 108.28 108.79 109.30

V,m/s

2.725 2.725 2.725 2.725 2.725 2.725 2.725 2.725 2.725 2.725
 2.725 2.725 2.725 2.725 2.725 2.725 2.725 2.725 2.725 2.725 2.725
 Q,m³/s
 49.308 49.308 49.308 49.308 49.308 49.308 49.308 49.308 49.308 49.308
 49.308 49.308 49.308 49.308 49.308 49.308 49.308 49.307 49.307 49.307 49.307

ERBENISSE BEI T = 4.001s

ALFA = 1.000
 H,m
 99.06 99.58 100.09 100.61 101.12 101.64 102.15 102.67 103.18 103.70
 104.21 104.73 105.24 105.76 106.27 106.79 107.31 107.82 108.34 108.85 109.37
 V,m/s
 2.232 2.232 2.232 2.232 2.232 2.232 2.232 2.232 2.232 2.232
 2.232 2.232 2.232 2.232 2.232 2.232 2.232 2.232 2.232 2.232
 Q,m³/s
 40.386 40.386 40.386 40.386 40.386 40.386 40.386 40.386 40.386 40.386
 40.386 40.386 40.386 40.386 40.386 40.386 40.385 40.385 40.385 40.385 40.385

ERBENISSE BEI T = 5.001s

ALFA = 1.000
 H,m
 99.06 99.58 100.10 100.61 101.13 101.65 102.17 102.69 103.20 103.72
 104.24 104.76 105.28 105.79 106.31 106.83 107.35 107.87 108.38 108.90 109.42
 V,m/s
 1.738 1.738 1.738 1.738 1.738 1.738 1.738 1.738 1.738 1.738
 1.738 1.738 1.738 1.738 1.738 1.738 1.738 1.738 1.738 1.738
 Q,m³/s
 31.456 31.456 31.456 31.456 31.456 31.456 31.456 31.456 31.456 31.456
 31.456 31.456 31.456 31.456 31.456 31.456 31.456 31.456 31.456 31.456 31.455

ERBENISSE BEI T = 6.001s

ALFA = 1.000
 H,m
 99.06 99.58 100.10 100.62 101.14 101.66 102.18 102.70 103.22 103.74
 104.26 104.78 105.30 105.82 106.34 106.86 107.38 107.90 108.42 108.94 109.46
 V,m/s
 1.245 1.245 1.245 1.245 1.245 1.245 1.245 1.245 1.245 1.245
 1.245 1.245 1.245 1.245 1.245 1.245 1.245 1.245 1.245 1.245
 Q,m³/s
 22.521 22.521 22.521 22.521 22.521 22.521 22.521 22.521 22.521 22.521
 22.520 22.520 22.520 22.520 22.520 22.520 22.520 22.520 22.520 22.520 22.520

ERBENISSE BEI T = 7.001s

ALFA = 1.000
 H,m
 99.06 99.58 100.10 100.62 101.15 101.67 102.19 102.71 103.23 103.75
 104.27 104.80 105.32 105.84 106.36 106.88 107.40 107.92 108.45 108.97 109.49
 V,m/s
 0.751 0.751 0.751 0.751 0.751 0.751 0.751 0.751 0.751 0.751
 0.751 0.751 0.750 0.750 0.750 0.750 0.750 0.750 0.750 0.750 0.750
 Q,m³/s
 13.581 13.581 13.581 13.581 13.581 13.581 13.581 13.581 13.581 13.581
 13.581 13.581 13.581 13.581 13.581 13.581 13.581 13.581 13.581 13.581 13.581

ERBENISSE BEI T = 8.001s

ALFA = 1.000
 H,m
 99.06 99.58 100.10 100.63 101.15 101.67 102.19 102.71 103.24 103.76
 104.28 104.80 105.33 105.85 106.37 106.89 107.41 107.94 108.46 108.98 109.50
 V,m/s
 0.256 0.256 0.256 0.256 0.256 0.256 0.256 0.256 0.256 0.256
 0.256 0.256 0.256 0.256 0.256 0.256 0.256 0.256 0.256 0.256 0.256
 Q,m³/s
 4.639 4.639 4.639 4.639 4.639 4.639 4.639 4.639 4.639 4.639
 4.639 4.639 4.639 4.639 4.639 4.639 4.639 4.639 4.638 4.638 4.638

ERBENISSE BEI T = 9.001s

ALFA = 1.000

H,m
 99.06 98.54 98.02 97.49 96.97 96.45 95.93 95.41 94.88 94.36
 93.84 93.32 92.86 92.86 92.86 92.86 92.86 92.86 92.86 92.86 92.86
 V,m/s
 0.040 0.040 0.040 0.040 0.040 0.040 0.040 0.040 0.040 0.040
 0.040 0.040 0.040 0.035 0.030 0.025 0.020 0.015 0.010 0.005 0.000
 Q,m³/s
 0.727 0.727 0.727 0.727 0.727 0.727 0.727 0.727 0.727 0.727
 0.727 0.727 0.715 0.626 0.537 0.447 0.358 0.268 0.179 0.089 0.000

ERBENISSE BEIT = 9.301s

ALFA = 1.000

H,m
 99.06 99.58 100.10 100.63 101.15 101.67 102.19 102.71 103.24 103.76
 104.28 104.80 105.33 105.85 106.37 106.89 107.41 107.94 108.46 108.53 108.53
 V,m/s
 0.009 0.009 0.009 0.009 0.009 0.009 0.009 0.009 0.009 0.009
 0.009 0.009 0.009 0.009 0.009 0.009 0.009 0.009 0.005 0.000
 Q,m³/s
 0.167 0.167 0.167 0.167 0.167 0.167 0.167 0.167 0.167 0.167
 0.167 0.167 0.167 0.167 0.167 0.167 0.167 0.167 0.167 0.089 0.000

| S,m | Hmin,m | Hmax,m |
|---------|--------|--------|
| 0.000 | 99.06 | 99.06 |
| 10.366 | 98.54 | 99.58 |
| 20.733 | 98.02 | 100.10 |
| 31.100 | 97.49 | 100.63 |
| 41.466 | 96.97 | 101.15 |
| 51.833 | 96.45 | 101.67 |
| 62.199 | 95.93 | 102.19 |
| 72.565 | 95.40 | 102.72 |
| 82.932 | 94.88 | 103.24 |
| 93.299 | 94.36 | 103.76 |
| 103.665 | 93.84 | 104.28 |
| 114.032 | 93.32 | 104.80 |
| 124.398 | 92.79 | 105.33 |
| 134.764 | 92.27 | 105.85 |
| 145.131 | 91.75 | 106.37 |
| 155.497 | 91.23 | 106.89 |
| 165.864 | 90.71 | 107.41 |
| 176.230 | 90.18 | 107.94 |
| 186.597 | 89.66 | 108.46 |
| 196.964 | 89.14 | 108.98 |
| 207.330 | 88.68 | 109.50 |

10.2. Ergebnisse von der Untersuchung der maximalen Minderung der Druckhöhe mit HIUD Programm

NUMMERISCHE MODELIERUNG DES DRUCKSTOSSES IN DER DRL MIT HIUD PROGRAMM

EINGABEDATEN

| | |
|---|-------------------------|
| NUMMER DER PUNKTE | 21 |
| AUSDRUCKSCHRITTE | 5 |
| GRENZBEDINGUNG AM ANFANG | 5 |
| GRENZBEDINGUNG AM ENDE | 3 |
| LÄNGE DER DRL | 207.33m |
| DURCHMESSER | 4.800m |
| FORTPFLSNZUNGSGESCHWINDIGKEIT DER WELLE | 1036.50m/s |
| RAUHIGKEITSBEIWERT | 0.012 |
| Q ₀ | 36.000m ³ /s |
| DRUCKHÖHE AM ANFANG | 61.66m |
| DRUCKHÖHE AM ENDE | 60.42m |
| PUMPENIVEAU | 0.00m |
| SCHLIESSZEIT ENDE | 9.s |

TURBINE AM ENDE DER DRL

SCHLIESSGESETZ

SCHLIESSZEIT, s [h]

| | |
|----|-------|
| 0. | 1.000 |
| 9. | 2.000 |
| 9. | 2.000 |

ERBENISSE BEI T = 1.000s

ALFA = 1.000

H,m

61.66 61.43 61.20 60.96 60.73 60.49 60.26 60.02 59.79 59.55
59.32 59.09 58.85 58.62 58.38 58.15 57.91 57.68 57.44 57.21 56.97

V,m/s

2.158 2.158 2.158 2.158 2.158 2.158 2.158 2.158 2.158 2.158
2.158 2.158 2.158 2.158 2.158 2.158 2.158 2.159 2.159 2.159 2.159

Q,m³/s

39.042 39.043 39.045 39.046 39.047 39.048 39.049 39.050 39.051 39.052
39.053 39.054 39.055 39.056 39.057 39.058 39.059 39.060 39.061 39.062 39.062

ERBENISSE BEI T = 2.000s

ALFA = 1.000

H,m

61.66 61.42 61.17 60.93 60.68 60.44 60.20 59.95 59.71 59.46
59.22 58.97 58.73 58.48 58.24 57.99 57.75 57.50 57.26 57.01 56.77

V,m/s

2.381 2.381 2.381 2.381 2.381 2.381 2.381 2.381 2.381 2.381
2.381 2.381 2.381 2.381 2.381 2.381 2.381 2.381 2.381 2.381 2.381

Q,m³/s

43.089 43.089 43.089 43.089 43.089 43.089 43.089 43.089 43.089 43.089
43.089 43.089 43.089 43.089 43.089 43.089 43.089 43.089 43.089 43.089 43.089

ERBENISSE BEI T = 3.000s

ALFA = 1.000

H,m

61.66 61.42 61.17 60.92 60.68 60.43 60.19 59.94 59.69 59.45
59.20 58.95 58.71 58.46 58.21 57.97 57.72 57.48 57.23 56.98 56.74

V,m/s

2.607 2.607 2.607 2.607 2.607 2.607 2.607 2.607 2.607 2.607

2.607 2.607 2.607 2.607 2.607 2.607 2.607 2.607 2.607 2.607 2.607
 Q,m³/s
 47.171 47.171 47.171 47.171 47.171 47.171 47.171 47.171 47.171 47.171
 47.171 47.171 47.171 47.171 47.171 47.171 47.171 47.172 47.172 47.172 47.172

ERBENISSE BEI T = 4.001s

ALFA = 1.000
 H,m
 61.66 61.42 61.17 60.92 60.67 60.43 60.18 59.93 59.68 59.43
 59.19 58.94 58.69 58.44 58.20 57.95 57.70 57.45 57.20 56.96 56.71
 V,m/s
 2.832 2.832 2.832 2.832 2.832 2.832 2.832 2.832 2.832 2.832
 2.832 2.832 2.832 2.832 2.832 2.832 2.832 2.832 2.832 2.832
 Q,m³/s
 51.254 51.254 51.254 51.254 51.254 51.254 51.254 51.254 51.254 51.254
 51.254 51.255 51.255 51.255 51.255 51.255 51.255 51.255 51.255 51.255 51.255

ERBENISSE BEI T = 5.001s

ALFA = 1.000
 H,m
 61.66 61.41 61.17 60.92 60.67 60.42 60.17 59.92 59.67 59.42
 59.17 58.92 58.67 58.43 58.18 57.93 57.68 57.43 57.18 56.93 56.68
 V,m/s
 3.058 3.058 3.058 3.058 3.058 3.058 3.058 3.058 3.058 3.058
 3.058 3.058 3.058 3.058 3.058 3.058 3.058 3.058 3.058 3.058
 Q,m³/s
 55.335 55.335 55.335 55.335 55.335 55.335 55.335 55.335 55.335 55.335
 55.335 55.335 55.335 55.335 55.335 55.335 55.335 55.336 55.336 55.336

ERBENISSE BEI T = 6.001s

ALFA = 1.000
 H,m
 61.66 61.41 61.16 60.91 60.66 60.41 60.16 59.91 59.66 59.41
 59.16 58.91 58.66 58.41 58.16 57.90 57.65 57.40 57.15 56.90 56.65
 V,m/s
 3.283 3.283 3.283 3.283 3.283 3.283 3.283 3.283 3.283 3.283
 3.283 3.283 3.283 3.283 3.283 3.283 3.283 3.283 3.283 3.283
 Q,m³/s
 59.413 59.413 59.413 59.413 59.413 59.413 59.413 59.413 59.413 59.413
 59.413 59.413 59.413 59.413 59.413 59.413 59.413 59.413 59.413 59.413

ERBENISSE BEI T = 7.001s

ALFA = 1.000
 H,m
 61.66 61.41 61.16 60.91 60.66 60.40 60.15 59.90 59.65 59.39
 59.14 58.89 58.64 58.39 58.13 57.88 57.63 57.38 57.12 56.87 56.62
 V,m/s
 3.508 3.508 3.508 3.508 3.508 3.508 3.508 3.508 3.508 3.508
 3.508 3.508 3.508 3.508 3.508 3.508 3.508 3.508 3.508 3.508
 Q,m³/s
 63.487 63.487 63.487 63.487 63.487 63.487 63.487 63.487 63.487 63.487
 63.487 63.487 63.487 63.487 63.487 63.488 63.488 63.488 63.488 63.488

ERBENISSE BEI T = 8.001s

ALFA = 1.000
 H,m
 61.66 61.41 61.16 60.90 60.65 60.39 60.14 59.89 59.63 59.38
 59.13 58.87 58.62 58.36 58.11 57.86 57.60 57.35 57.09 56.84 56.59
 V,m/s
 3.733 3.733 3.733 3.733 3.733 3.733 3.733 3.733 3.733 3.733
 3.733 3.733 3.733 3.733 3.733 3.733 3.733 3.733 3.733 3.733
 Q,m³/s
 67.558 67.558 67.558 67.558 67.558 67.558 67.558 67.558 67.558 67.558
 67.558 67.558 67.558 67.558 67.558 67.558 67.559 67.559 67.559 67.559

ERBENISSE BEI T = 9.001s

ALFA = 1.000

H,m
 61.66 61.51 61.36 61.21 61.06 60.91 60.76 60.61 60.46 60.31
 60.16 60.01 59.86 59.74 59.62 59.49 59.37 59.25 59.13 59.01 58.89
 V,m/s
 3.930 3.930 3.930 3.930 3.930 3.930 3.930 3.930 3.930 3.930
 3.930 3.930 3.930 3.930 3.930 3.929 3.929 3.929 3.929 3.928 3.928
 Q,m³/s
 71.123 71.123 71.123 71.123 71.123 71.123 71.123 71.123 71.123 71.123
 71.123 71.122 71.122 71.117 71.112 71.107 71.102 71.097 71.092 71.087 71.082

ERBENISSE BEIT = 9.301s

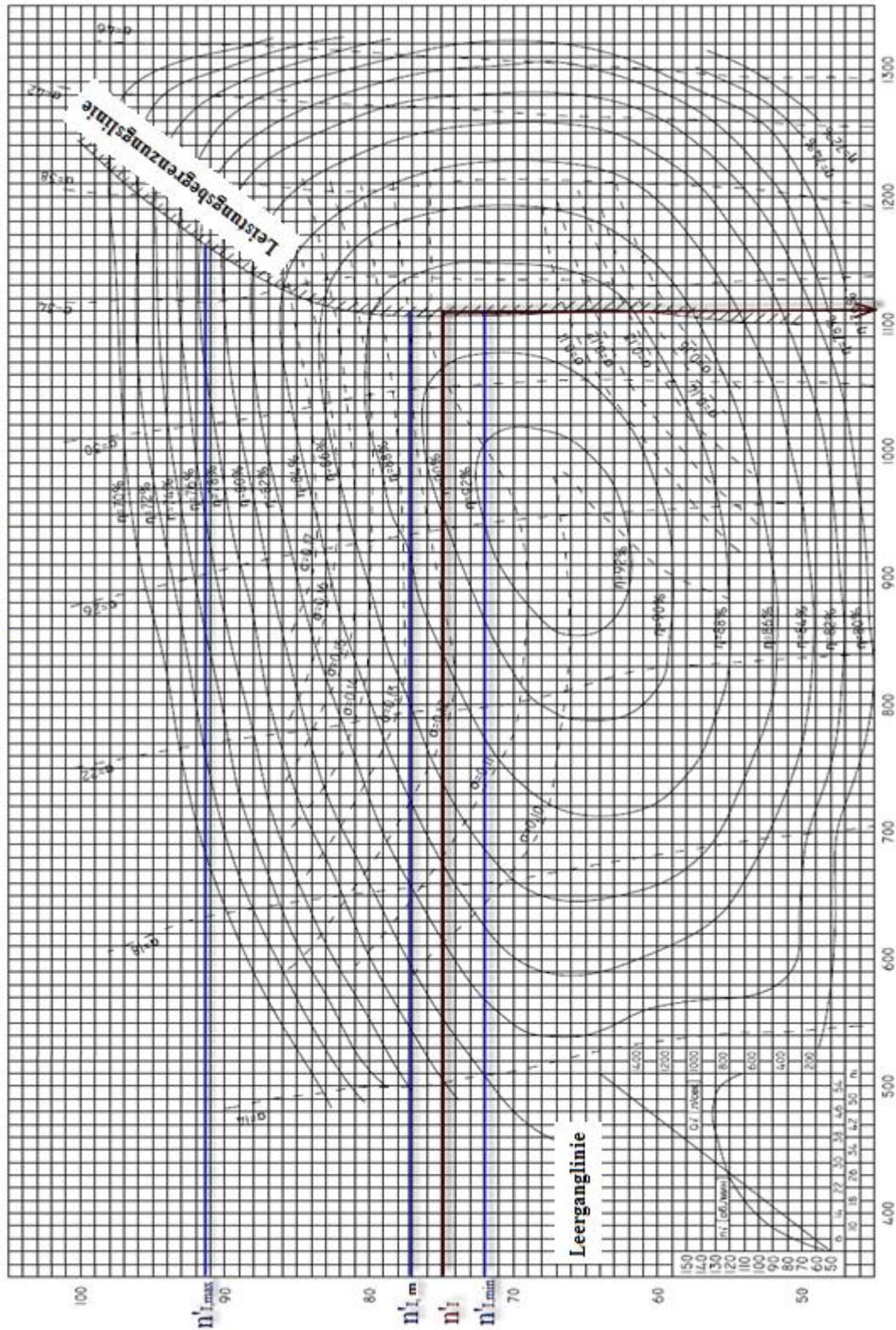
ALFA = 1.000

H,m
 61.66 61.57 61.48 61.39 61.30 61.20 61.11 61.02 60.93 60.83
 60.74 60.65 60.56 60.47 60.37 60.28 60.19 60.10 60.01 59.89 59.77
 V,m/s
 3.958 3.958 3.958 3.958 3.958 3.958 3.958 3.958 3.958 3.958
 3.958 3.958 3.958 3.958 3.958 3.958 3.958 3.958 3.958 3.957
 Q,m³/s
 71.622 71.622 71.622 71.622 71.622 71.622 71.622 71.622 71.622 71.622
 71.622 71.622 71.622 71.622 71.621 71.621 71.621 71.621 71.621 71.617 71.612

| S,m | Hmin,m | Hmax,m |
|---------|--------|--------|
| 0.000 | 61.66 | 61.66 |
| 10.366 | 61.41 | 61.60 |
| 20.733 | 61.15 | 61.54 |
| 31.100 | 60.90 | 61.48 |
| 41.466 | 60.64 | 61.41 |
| 51.833 | 60.39 | 61.35 |
| 62.199 | 60.13 | 61.29 |
| 72.565 | 59.88 | 61.23 |
| 82.932 | 59.62 | 61.17 |
| 93.299 | 59.37 | 61.10 |
| 103.665 | 59.11 | 61.04 |
| 114.032 | 58.86 | 60.98 |
| 124.398 | 58.60 | 60.92 |
| 134.764 | 58.35 | 60.85 |
| 145.131 | 58.10 | 60.79 |
| 155.497 | 57.84 | 60.73 |
| 165.864 | 57.59 | 60.67 |
| 176.230 | 57.33 | 60.60 |
| 186.597 | 57.08 | 60.54 |
| 196.964 | 56.82 | 60.48 |
| 207.330 | 56.57 | 60.42 |

10.3. Betriebsmuschelkurve der PO115 Turbine

PO115 Turbine geprüft auf H=4m



QUELLENANGABE

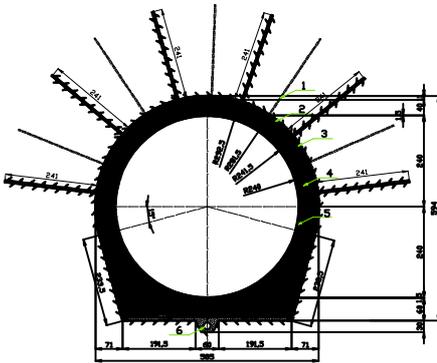
- [1] "HANDBUCH FÜR KURSPROJEKTIERUNG VON WASSERKRAFTANLAGEN" – 1991-UABG - Univ.Prof. Dipl.-Ing. Tsano Tsolovski, Univ.Prof. Dipl.-Ing. Rossitsa Nikolaeva
- [2] "HYDRAULIK" 1994-UABG – unter der Redaktion von Univ.Prof. Dipl.-Ing. Emil marinov
- [3] "TUNNEL IM WASSERBAU" 1989-UABG – Univ.Prof. Dipl.-Ing. Ljubomir Georgiev
- [4] <http://www.minovausa.com/pdfs/Products/SwellexRockBolts.pdf>
- [5] http://folk.ntnu.no/charliel/Conf_swellex_Aus99.pdf
- [6] "UNTERIRDISCHE WASSERKRAFTANLAGEN" 1990-UABG – Univ.Prof. Dipl.-Ing. Ljubomir Georgiev
- [7] "BAURICHTLINIEN- UND VORSCHRIFTEN SEIT 02.06.2009"
- [8] <http://www.stroyteh.ru/wiki/image/EJC%20417%20%284%2>
- [9] http://www.laynegeo.com/limitedmobilitygrouting_technical.html
- [10] <http://www.chemgrout.com/>
- [11] http://www.allentownshotcrete.com/data/downloads/TS_3945_GB.pdf 9
- [12] "DRUCKSTOLLEN UND DRUCKSCHÄCHTE" – 1999-Stuttgart-New York – Gerhard Seeber
- [13] http://bspb.org/print_page.php?id=305&menu_id=
- [14] arda-river.com/files/File/Kaskada%20Gorna%20Arda%2009_09_2009.doc
- [15] www.sandvik.com
- [16] http://www.sika.com.tr/pdf/products/1240323563_en.pdf
- [17] <http://energy.europe.bg/htmls/cd/directive9931.htm> - EU-Richtlinie **1999/31** für Deponien und Abfälle seit 26. April 1999

"ORGANISATION UND VERWALTUNG IM BEWÄSSERUNGS- UND WASSERBAU – TEIL I" – 1999-UABG – Univ.Prof. Dipl.-Ing. Alexander Jantschulev - Teil 8

AUSKLEIDUNG DER DRUCKROHRLEITUNG ZUM WKW "SARNITSA"

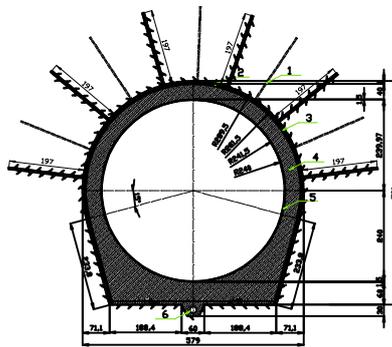
M 1:50

Swellex Anker mit mechanischer Verankerung und bewehrter Spritzbeton
Abschnitte 1 und 5; $f=2$



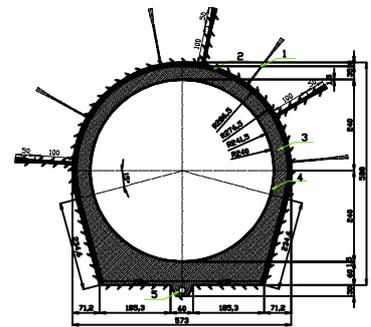
1. Anker Swellex Pn16 mit mechanischer Verankerung
 $d_{a1}=48\text{mm}$; Halteplatte 151/151/4mm
2. Spitzbeton $B_0 2,0$; $d=11\text{cm}$
3. Netzwerk $\varnothing 5$ 10/10
4. Füllbeton B30 $d=40\text{cm}$
5. Stahlrohr $d=15\text{mm}$
6. PVC Dränagerohr

Swellex Anker mit mechanischer Verankerung und bewehrter Spritzbeton
Abschnitt 3; $f=3$



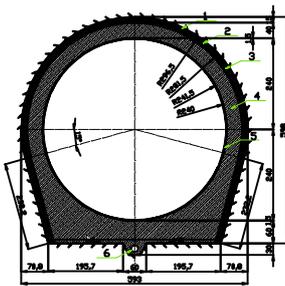
1. Anker Swellex Pn12 mit mechanischer Verankerung
 $d_{a1}=36\text{mm}$; Halteplatte 151/151/3,8mm
2. Spitzbeton $B_0 2,0$; $d=8\text{cm}$
3. Netzwerk $\varnothing 5$ 10/10
4. Füllbeton B30 $d=40\text{cm}$
5. Stahlrohr $d=15\text{mm}$
6. PVC Dränagerohr

Konventionelle Keilanker und unbewehrter Spritzbeton
Abschnitt 4; $f=5$



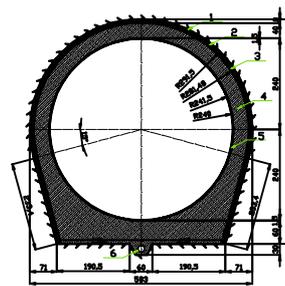
1. Konventionelle Keilanker
 $d_{a1}=40\text{mm}$; Halteplatte 200/200/6mm
2. Spitzbeton $B_0 2,0$; $d=10\text{cm}$
4. Füllbeton B30 $d=35\text{cm}$
5. Stahlrohr $d=15\text{mm}$
6. PVC Dränagerohr

Stahl-Rippenwerk und bewehrter Spritzbeton
Abschnitt 2; $f=1,5$



1. Stahlrippen I14, Längsrippen I10
2. Spritzbeton $B_0 2,0$; $d=15\text{cm}$
3. Netzwerk $\varnothing 5$ 10/10
4. Füllbeton B30 $d=40\text{cm}$
5. Stahlrohr $d=15\text{mm}$
6. PVC Dränagerohr

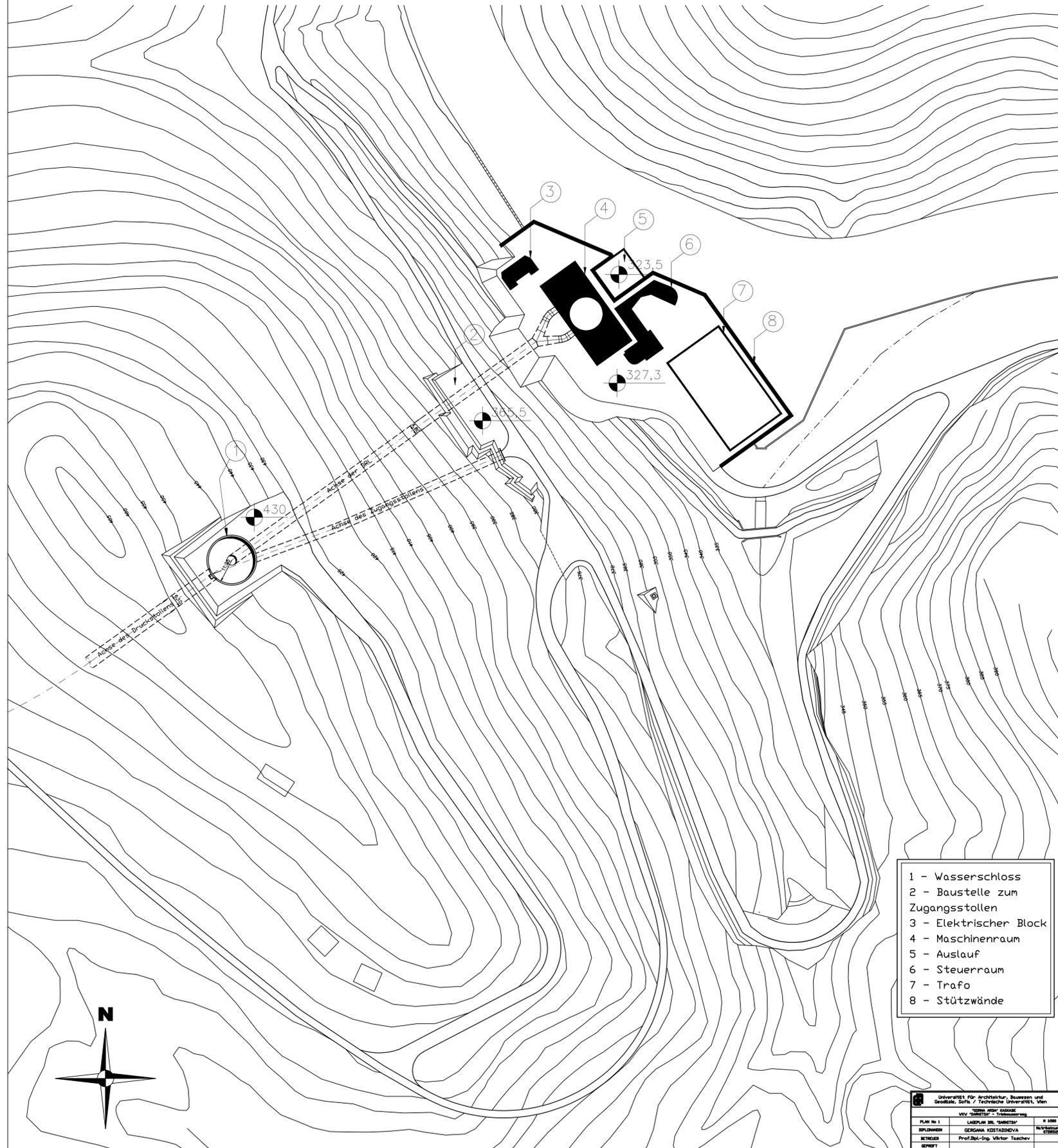
Stahl-Rippenwerk und bewehrter Spritzbeton
Abschnitt 6; $f=1,5$



1. Stahlrippen I10, Längsrippen I10
2. Spritzbeton $B_0 2,0$; $d=10\text{cm}$
3. Netzwerk $\varnothing 5$ 10/10
4. Füllbeton B30 $d=40\text{cm}$
5. Stahlrohr $d=15\text{mm}$
6. PVC Dränagerohr

| Universität für Architektur, Bauwesen und Geodäsie, Sofia / Technische Universität, Wien VIB - VISIT - VISUM VISUM - VISIT - VISUM | | |
|---|---|------------|
| PLAT No 4 | AUSKLEIDUNG DER DRUCKROHRLEITUNG IM WKW "SARNITSA" | 11.10.2017 |
| ZEICHNER | GERDA KREJCIKOVÁ | PROJEKTANT |
| STRUKTUR | Prof. Ing. Miroslav Tomšik | |
| SKUPY | | |

LAGEPLAN DRL "SARNITSA"
M 1:500

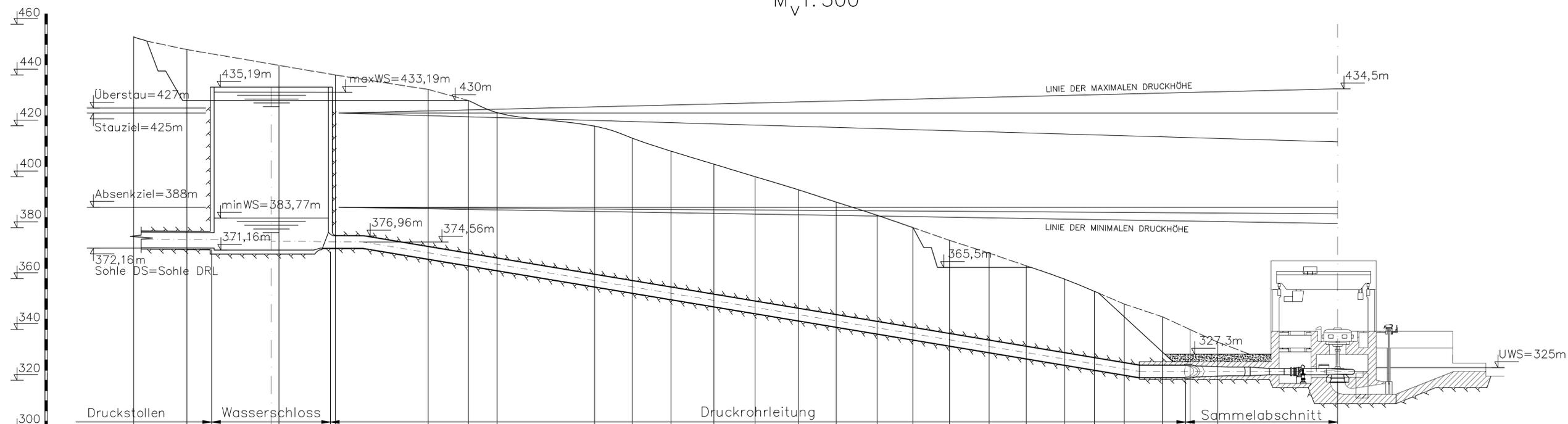


- 1 - Wasserschloss
- 2 - Baustelle zum Zugangsstollen
- 3 - Elektrischer Block
- 4 - Maschinenraum
- 5 - Auslauf
- 6 - Steerraum
- 7 - Trafo
- 8 - Stützwände

| | | |
|--|--------------------------|--------------|
| Universität für Architektur, Bauesen und Geodäsie, Sofia / Technische Universität, Wien | | |
| VCV "SARNITSA" - Trassenbau | | |
| PLAN Nr. 1 | LAGEPLAN DRL "SARNITSA" | M 1:500 |
| ENTWURFER | GENEVANA KOSTADINOVA | VERGLEICHNER |
| BEZEUGER | Prof. Ing. Viktor Tachev | |
| GEPROBT | | |

LÄNGSSCHNITT DER DRUCKROHRLEITUNG ZUM WKW "SARNITSA"

M_h 1: 250
M_v 1: 500



| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|------|---------|------------------------|--|---|---------|--|---------|---------|---------|---------|---------|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--|---|-------------------|----------|----------|--------------------|
| PUNKTNUMMERIERUNG | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | |
| GELÄNDEHÖHE | 455 | 450 | 445 | 440 | 435 | 430 | 425 | 420 | 415 | 410 | 405 | 400 | 395 | 390 | 385 | 380 | 375 | 370 | 365 | 360 | 355 | 350 | 345 | 340 | 335 | |
| HORIZONTALER ABSTAND | 7,47 | 18,14 | 11,08 | 18,28 | 7,91 | 5,66 | 19,19 | 7,38 | 7,63 | 8,44 | 8,14 | 8,51 | 7,45 | 8,05 | 7,03 | 7,24 | 7,77 | 7,31 | 7,56 | 5,84 | 5,87 | 7,52 | 5,43 | 5,49 | | |
| ACHSE DER DRL | | 374,86 | 374,86 | 374,48 | 370,12 | 367,48 | 365,60 | 359,20 | 356,74 | 354,74 | 351,40 | 348,68 | 345,80 | 343,38 | 340,86 | 338,36 | 335,94 | 333,36 | 330,96 | 328,40 | 326,46 | 324,50 | 323,50 | 323,50 | 323,50 | 323,50 |
| KILOMETRIERUNG | | 0+0,00 | 0+1,53 | 0+12,61 | 0+30,89 | 0+38,80 | 0+44,46 | 0+63,65 | 0+71,03 | 0+78,66 | 0+87,10 | 0+95,24 | 0+103,75 | 0+111,20 | 0+119,25 | 0+126,28 | 0+133,52 | 0+141,29 | 0+148,60 | 0+156,16 | 0+162,00 | 0+167,81 | 0+175,39 | 0+180,82 | 0+186,31 | 0+209,87 |
| LÄNGE/NEIGUNG | | i=0,18% | D _{WS} =22,5m | i=1,0% L=7,0m | i=1,0% L=161,33m | | | | | | | | | | | | | | | | | i=33,37% | i=0,00% L=9,0m | | | i=0,00% L=30,0m |
| EIGENSCHAFTEN DES FELSMASSIVS | | | | k ₀ =1000N/cm ³ f=2 | k ₀ =500N/cm ³ f=1,5 | | k ₀ =1500N/cm ³ f=3 | | | | | | k ₀ =2500N/cm ³ f=5 | | | | | | | | k ₀ =1000N/cm ³ f=2 | k ₀ =500N/cm ³ f=1,5 | | | | |

| | | | | | | |
|---------------|--|---|--|--|--|---|
| ABSCHNITT | 0 ⁺ 11,65 – 0 ⁺ 38,25 | 0 ⁺ 38,25 – 0 ⁺ 55,98 | 0 ⁺ 55,98 – 0 ⁺ 91,72 | 0 ⁺ 91,72 – 0 ⁺ 144,92 | 0 ⁺ 144,92 – 0 ⁺ 171,52 | 0 ⁺ 171,52 – 0 ⁺ 189,25 |
| UNTERSTÜTZUNG | Mechanische Anker vom Typ Swellex und bewehrter Spritzbeton d _{s.b.} =0,11m Netzwerk ø5 10/10 | Stahl-Rippenwerk und bewehrter Spritzbeton vom Typ Swellex und bewehrter Spritzbeton d _{s.b.} =0,15m Netzwerk ø5 10/10 | Mechanische Anker vom Typ Swellex und bewehrter Spritzbeton d _{s.b.} =0,08m Netzwerk ø5 10/10 | Konventionelle mechanische Anker und Spritzbeton d _{s.b.} =0,10m | Mechanische Anker vom Typ Swellex und bewehrter Spritzbeton d _{s.b.} =0,11m Netzwerk ø5 10/10 | Stahl-Rippenwerk und bewehrter Spritzbeton d _{s.b.} =0,10m Netzwerk ø5 10/10 |
| FÜLLBETON | B30 d _{f.b.} =0,40m | B30 d _{f.b.} =0,40m | B30 d _{f.b.} =0,40m | B30 d _{f.b.} =0,35m | B30 d _{f.b.} =0,40m | B30 d _{f.b.} =0,40m |
| PANZERUNG | d _{panz} =0,15m Stahlblech DIN17100 St 52-3N | d _{panz} =0,15m Stahlblech DIN17100 St 52-3N | d _{panz} =0,15m Stahlblech DIN17100 St 52-3N | d _{panz} =0,15m Stahlblech DIN17100 St 52-3N | d _{panz} =0,15m Stahlblech DIN17100 St 52-3N | d _{panz} =0,15m Stahlblech DIN17100 St 52-3N |

Universität für Architektur, Bauwesen und Geodäsie, Sofia / Technische Universität, Wien

"GRANA ARSA" KASKADE
WKW "SARNITSA" – Triebwasserweg

PLAN No 2
LÄNGSSCHNITT DER DRUCKROHRLEITUNG ZUM WKW "SARNITSA" M_h 1:250
M_v 1:500

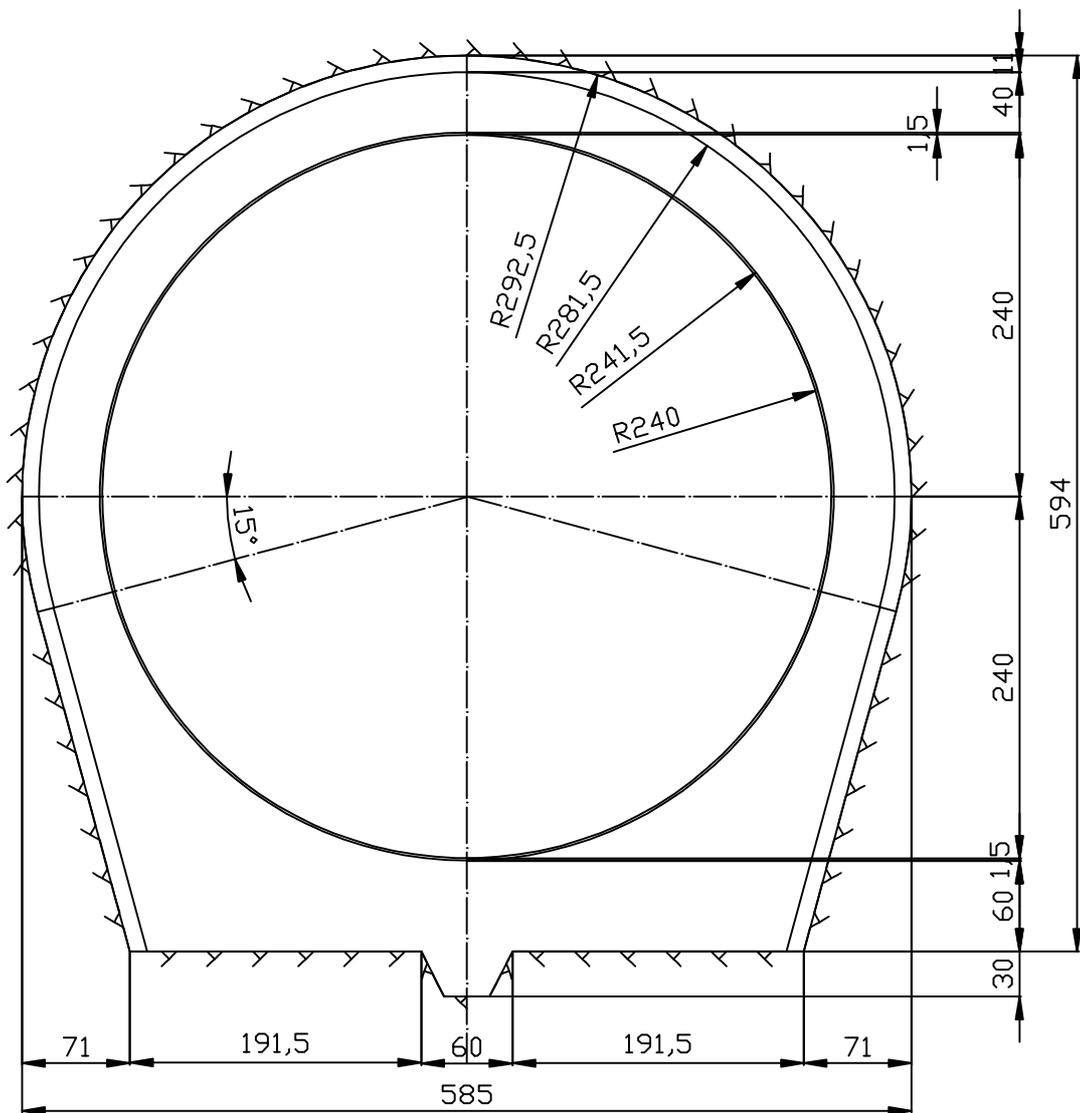
DIPLOMANIN
GERGANA KISTADINOVA

BETREUER
Prof. Dipl.-Ing. Viktor Tashev

GEPRÜFT

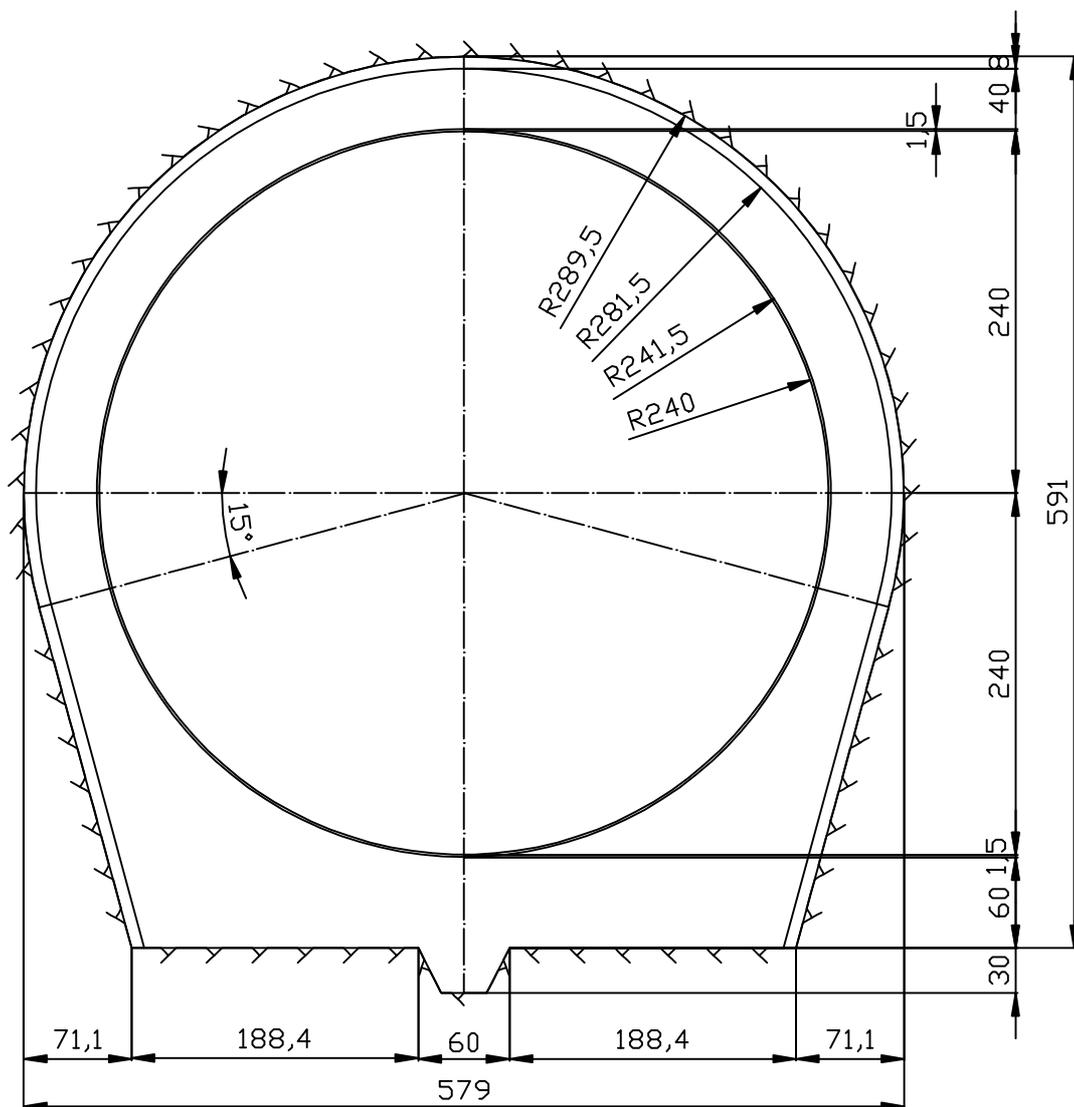
Querschnitt der
1. und 5. Abschnitte; $f=2$

M 1:50



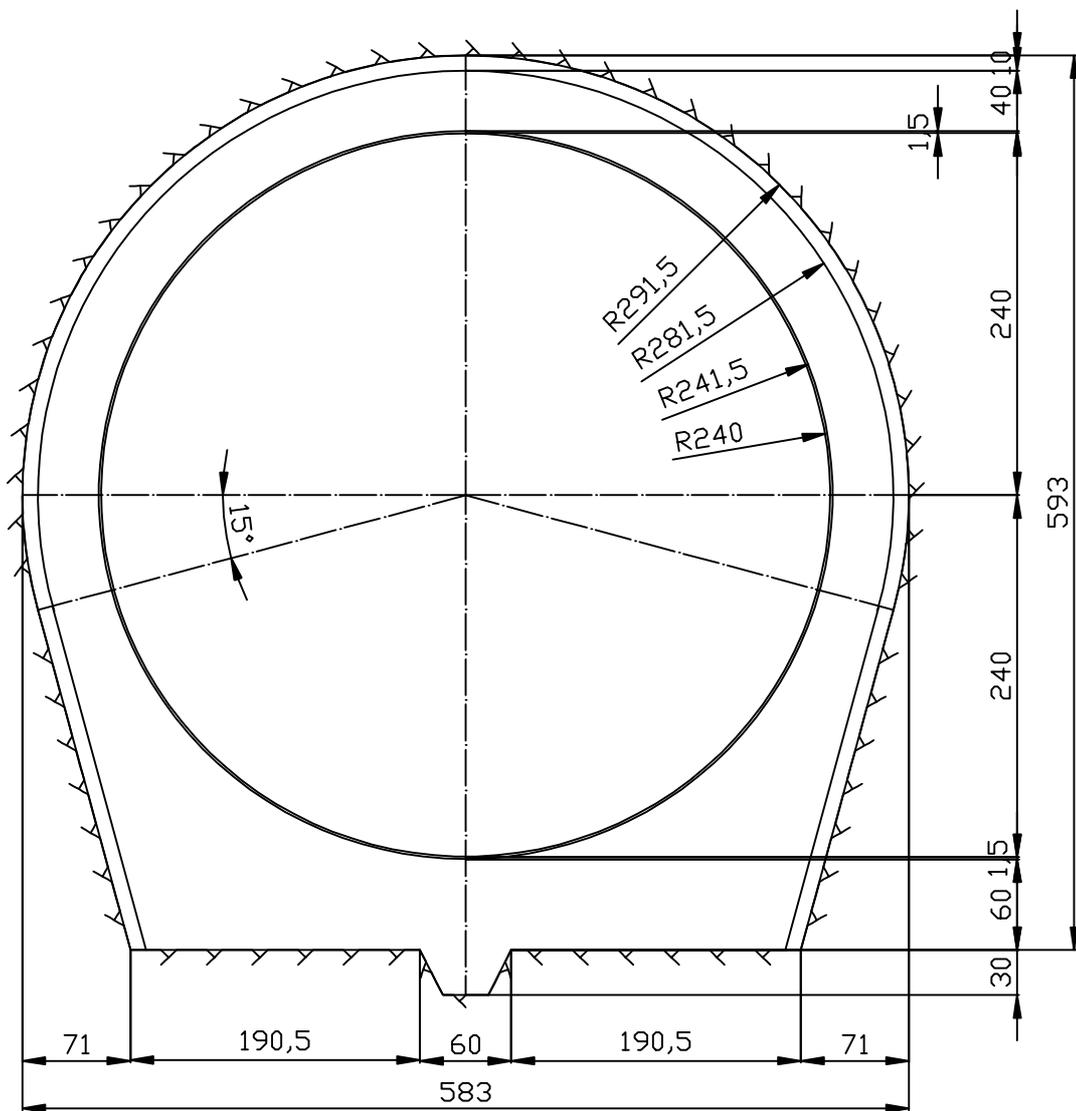
Querschnitt des
3. Abschnitts; $f=3$

M 1:50



Querschnitt des
6. Abschnitts; $f=1,5$

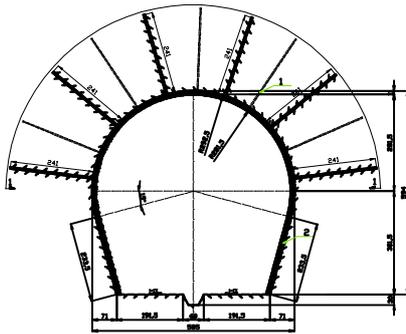
M 1:50



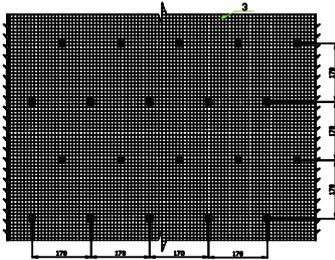
UNTERSTÜTZUNGSKONSTRUKTION DER DRUCKROHRLEITUNG ZUM WKW "SARNITSA"

M 1:50

Swellex Anker mit mechanischer Verankerung und bewehrter Spritzbeton
Abschnitte 1 und 5; f=2

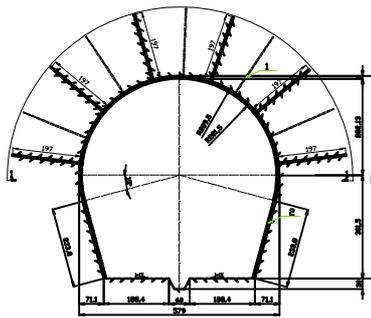


1-1

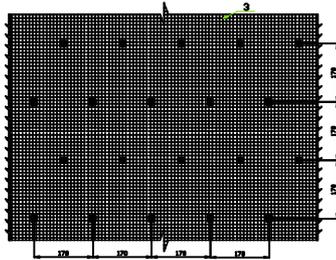


1. Anker Swellex mit mechanischer Verankerung d_{st} = 40mm Halteplatte 200/200/6mm
2. Spritzbeton B₀2,0; d=11cm
3. Netzwerke Ø5 10/10

Swellex Anker mit mechanischer Verankerung und bewehrter Spritzbeton
Abschnitt 3; f=3

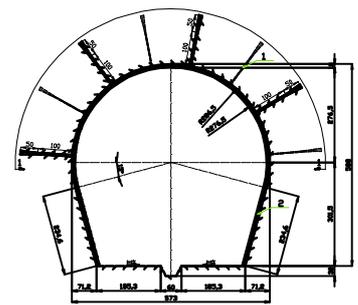


1-1

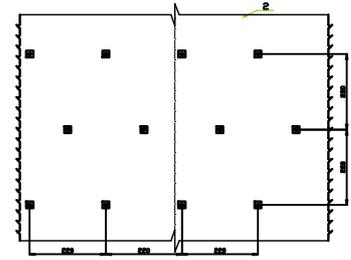


1. Anker Swellex mit mechanischer Verankerung d_{st} = 36mm Halteplatte 150/150/6mm
2. Spritzbeton B₀2,0; d=8cm
3. Netzwerke Ø5 10/10

Konventionelle Kellanker und unbewehrter Spritzbeton
Abschnitt 4; f=5

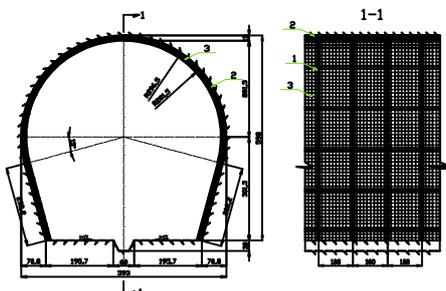


1-1



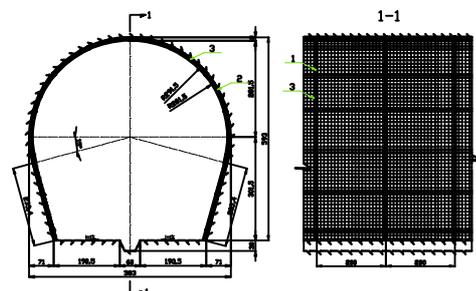
1. Konventionelle Kellanker d_{st} = 40mm Halteplatte 200/200/6mm
2. Spritzbeton B₀2,0; d=10cm

Stahl-Rippenwerk und bewehrter Spritzbeton
Abschnitt 2; f=1,5



1. Stahlrippen I14, Längsrippen I10
2. Spritzbeton B₀2,0; d=15cm
3. Netzwerk Ø5 10/10

Stahl-Rippenwerk und bewehrter Spritzbeton
Abschnitt 6; f=1,5



1. Stahlrippen I10, Längsrippen I10
2. Spritzbeton B₀2,0; d=10cm
3. Netzwerk Ø5 10/10

| | |
|--|--|
| Technische Zeichnung Projekt: ... Blatt: ... | |
| Blatt Nr. ... Maßstab: ... Datum: ... Gezeichnet: ... Geprüft: ... | Blatt Nr. ... Maßstab: ... Datum: ... Gezeichnet: ... Geprüft: ... |