

# Hochwasserentlastungsstollen Thun Druckluftarbeiten im Hydroschildvortrieb

Daniel Kohler, dipl. Bauing. ETH/SIA, ARGE Hochwasserentlastungsstollen Thun, PraderLosinger SA, Sion/Zürich

Von Juli 2007 bis April 2008 wurde der Hochwasserentlastungsstollen Thun in den siltig-sandigen Schottern im Zweischichtbetrieb mit Monatsleistungen von 200 bis 250 m aufgeföhren. Die beste Tagesleistung betrug 19.80 m bzw. 16 Ringe in 17 Stunden, und im Tagesdurchschnitt wurden 9 bis 10 Ringe verbaut. Die stark abrasive Geologie führte zu einer grossen Abnützung der Werkzeuge auf dem Schneirad, was umfangreiche Revisionsarbeiten zur Folge hatte. Bei Werkzeugkontrollen und -wechsel wurden insgesamt 438 Arbeitsstunden unter Überdruck von bis zu 2.6 bar geleistet. Auch aufgrund der speziell für die Baustelle erstellten Dekompressionstabellen für das Ausschleusen mit Sauerstoff waren keine Dekompressionsbeschwerden zu verzeichnen.

## 1. Projektübersicht

### 1.1 Projektgrundlage

Die historische Umleitung der Kander im Jahr 1714 hat das Einzugsgebiet des Thunersees praktisch verdoppelt (vgl. Abb. 1). Bei Weitem nicht im gleichen Mass zugenommen hat aber die Abflusskapazität in Thun. Deshalb weist der Thunersee bei starken Niederschlägen kein ausreichendes Speichervolumen mehr auf und so gerät das «System Thunersee» bei ausserordentlichen Zuflüssen zwangsläufig aus dem Gleichgewicht. So flossen am 14. Mai 1999 zeitweise mehr als 700 m<sup>3</sup>/s in den Thunersee hinein. In Thun können aber heute maximal 350 m<sup>3</sup>/s schadlos abgeföhrt werden.

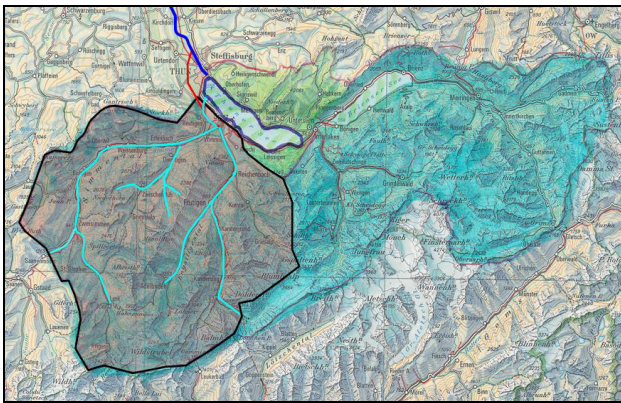


Abb. 1: Verdoppelung des Einzugsgebiets des Thunersees mit Kanderdurchstich

Die Hochwassersituation am Thunersee ist vor allem durch folgende Randbedingungen bestimmt:

- Mit der Umleitung der Kander in den See ist das Einzugsgebiet fast verdoppelt worden.
- Die Abflusskapazität beim Seeausfluss in Thun ist ungenügend.
- Der Thunersee weist von allen Schweizer Seen bezogen auf das Einzugsgebiet die kleinste Oberfläche auf (vgl. Abb 2).
- Das Speichervermögen ist im Vergleich zu anderen Seen klein. Die Differenz vom mittleren Sommerseespiegel bis zur Geföhrengrenze beträgt lediglich ca. 50 cm (vgl. Abb. 3).

Diese Gründe führen dazu, dass der See häufig die Geföhrengrenze übersteigt. Die einzigen Möglichkeiten zur Ver-

besserung dieser Situation sind einerseits ein permanentes Tieferhalten des Seespiegels oder andererseits die Erhöhung der Abflusskapazität der Aare in Thun. Der letztere Ansatz ist erfolversprechender, denn das alleinige Optimieren des Speichervolumens reicht bei Weitem nicht aus, um künftige Hochwasser bei länger dauernden starken Zuflüssen in den Thunersee zu verhindern.

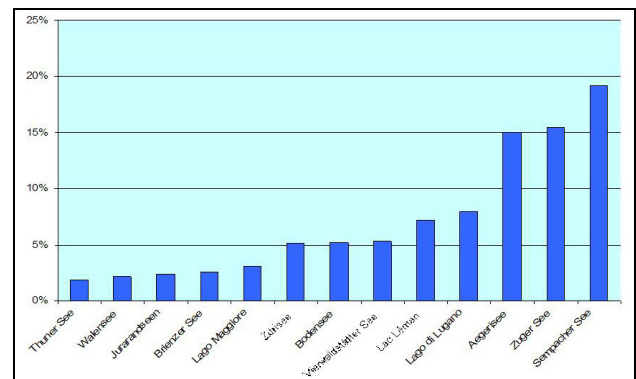


Abb. 2: Seeoberfläche in Prozent zum Einzugsgebiet

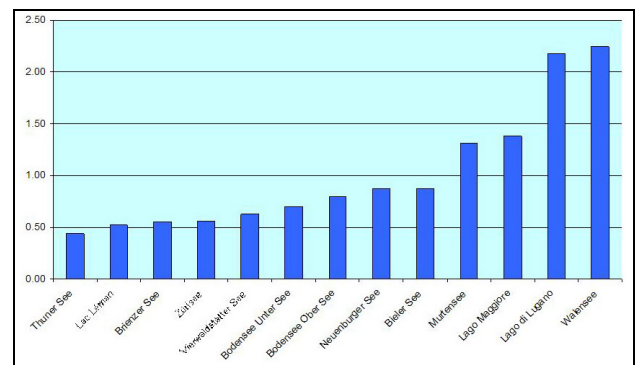


Abb. 3: Tolerierbarer Schwankungsbereich

Die bestehenden Schleusen in Thun sind heute noch in Gebrauch und unterliegen dem Denkmalschutz. Abhilfe soll nun der neue Entlastungsstollen unter dem Bahnhofareal schaffen. Unter Nutzung des bestehenden Schiffahrtskanals wird die Abflusskapazität der Aare so weit erhöht, dass Schäden wie bei den Extremereignissen von 1999 und 2005 nicht mehr auftreten können (vgl. Abb. 4).



Abb. 4: Hochwasser 2005 (Thuner Tagblatt)

Mit dem Entlastungsstollen kann die Abflusskapazität um etwa 100 m<sup>3</sup>/s erhöht werden. Aufgrund von verschiedenen Indikatoren im Einzugsgebiet (Niederschlag, Bodenfeuchte, Zunahme der Zuflüsse, Schneeschmelzwasserdisposition) soll der Stollen rechtzeitig vor einem Hochwasserereignis in Betrieb genommen werden. In einem Betriebsreglement wird festgehalten, wie der Stollen betrieben wird, wann er geöffnet und unter welchen Umständen auch wieder geschlossen wird. Es wird darin auch sichergestellt, dass die Unterlieger keine Nachteile

durch den Betrieb erleiden. Alle Betroffenen wurden bei der Entwicklung des Reglements mit eingebunden.

Neben dem Betriebsreglement soll auch der Seestand im Sommer neu geregelt werden. Zukünftig soll der See während den Sommermonaten generell 10 cm tiefer gehalten werden. Damit ist insbesondere bei schnell eintretenden Hochwassern eine bessere Reaktion möglich.

**Projektdate**

Stollenlänge	1'205.45 m
• Einlaufbauwerk	21.39 m
• Bergmännischer Stollen	1'169.47 m
• Auslaufbauwerk	14.59 m
Maximale Neigung	9.8%
Maximale Überdeckung	ca. 16 m
Minimale Überdeckung	1.57 m
Stollenaussendurchmesser	6.00 m
Stolleninnendurchmesser	5.40 m
Tübbingstärke	0.30 m
Tübbingbreite	1.20 m

Tab. 1: Projektdaten

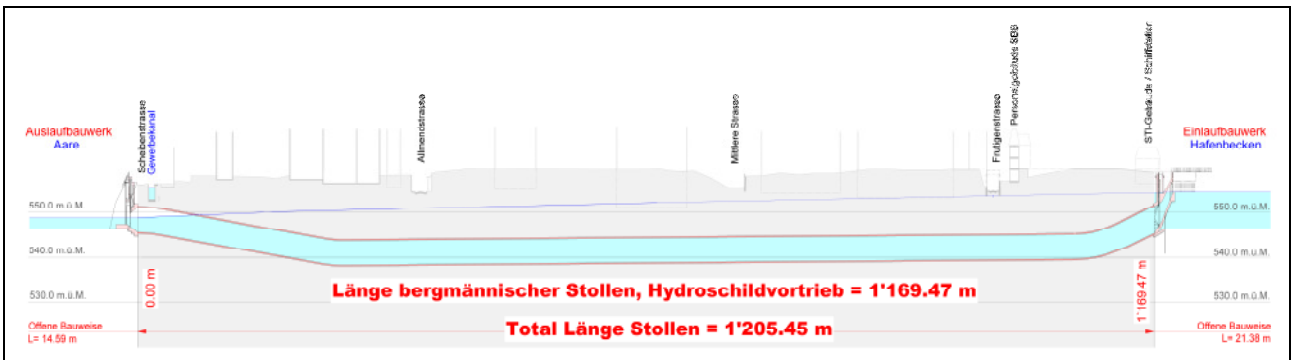


Abb. 5: Längenprofil



Abb. 6: Situation

## 1.2 Geologie und Hydrologie

Der Baugrund besteht vorwiegend aus siltig-sandigen Schottern. Sie sind mitteldicht bis dicht gelagert, gut tragfähig und gut durchlässig. Die letzten rund 60 m liegen vollständig im Ton. Der Grundwasserspiegel liegt entlang dem Stollentrasssee zwischen 4 und 6 m unter der Terrainoberkante (vgl. Abb. 5).

## 1.3 Linienführung

Der als Düker ausgebildete Entlastungstollen nutzt das Wasserspiegelgefälle zwischen der Aare unterhalb des Kraftwerks und dem Schifffahrtskanal (vgl. Abb. 5). Er weist eine Länge von rund 1'205 m und einen nominalen Innendurchmesser von 5.40 m auf. Der Stollen führt vom Ende des Schifffahrtskanals in Verlängerung des Thunersees entlang des Bahntrassees bis zur Aare unterhalb des Kraftwerks Thun (vgl. Abb. 6). Das Bauwerk unterteilt sich in die drei Abschnitte Einlaufbauwerk, bergmännisch aufgefahrener Stollen und Auslaufbauwerk.

Der Stollen wurde entgegen der Fliessrichtung aufgefahren. Ab der Startbaugrube beim Auslaufbauwerk weist er ein Gefälle von 3.4% auf und erreicht nach den ersten 225 m den Tiefpunkt. Auf dieser Strecke werden eine Strasse, ein Gewerbekanal und eine Bahnlinie unterquert. Danach steigt er über 860 m mit 0.16% an, wobei die Terrainüberdeckung rund 14 bis 16 m beträgt (vgl. Abb. 7). Dabei werden drei Strassenunterführungen mit einem Abstand von 9 bis 11 m, ein Gebäude der SBB und der stark befahrene Bahnhofplatz unterfahren. Auf den letzten 84 m bis zur Zielbaugrube beim Einlaufbauwerk steigt der Stollen bis max. 9.8% an. Die minimalen horizontalen und vertikalen Radien betragen 400 m.

Die horizontale Linienführung wurde so gewählt, dass die Stollenachse zwischen den bestehenden Gebäuden und den Bahngleisen zu liegen kommt (vgl. Abb. 6).

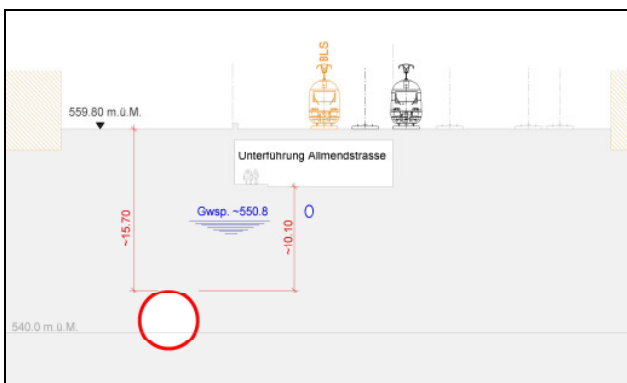


Abb. 7: Querprofil

## 1.4 Termine

Der Projektstart erfolgte im Herbst 2002, und im Herbst 2006 wurden die Bauarbeiten vergeben. Mit dem Spatenstich im Dezember 2006 und dem Vortriebsbeginn im Juli 2007 wurde ein äusserst sportliches Bauprogramm vorgegeben (vgl. Tab. 2). Dank der tatkräftigen Mitarbeit aller Beteiligten, insbesondere auch des Maschinenlieferanten, konnten die Termine eingehalten werden. Trotz eines Vortriebsunterbruchs von rund

drei Wochen infolge eines Wasser- und Materialeinbruchs bei der Erstellung der Baugruben für das Einlaufbauwerk erfolgte der Durchstich anfangs April 2008, und die TVM konnte in die geflutete Zielbaugrube ausgefahren werden.

Das Einlaufbauwerk ist bis Ende Jahr fertig erstellt und das Auslaufbauwerk bis Anfang nächstes Jahr. Im Spätherbst werden zuvorderst beim Kleistinseli in Thun Uferverstärkungsmassnahmen realisiert, da der Schifffahrtskanal bei offenem Stollen zu einem Fließgewässer wird. Im Frühling 2009 kann der Stollen in Betrieb genommen werden, und der Schutz vor Hochwasser wird für die Bevölkerung um den Thunersee viel grösser als bisher sein.

### Termine

Projektstart	1. Oktober 2002
Konzessionsprojekt eingereicht	28. Mai 2004
Abgabe bereinigtes Bauprojekt	13. Dezember 2005
1. Submission (Eingabetermin)	20. Februar 2006
2. Submission (Eingabetermin)	4. August 2006
Vergabe der Bauarbeiten	September 2006
Spatenstich	15. Dezember 2006
Beginn Auslaufbauwerk	Januar 2007
Beginn Einlaufbauwerk	Oktober 2007
Vortriebsbeginn	12. Juli 2007
Durchstich	8. April 2008
Abschluss Einlaufbauwerk	Ende 2008
Abschluss Auslaufbauwerk	Anfangs 2009
Uferverstärkung Keistinseli	Herbst 2008
Inbetriebnahme	Frühling 2009

Tab. 2: Termine

## 2. Hydroschild-Tunnelvortriebsmaschine

Da der Stollen praktisch vollständig durch grundwassergesättigte Schotter führt, wurde das setzungsarme Hydroschildverfahren gewählt. Das achtarmige Felgenschneidrad der Tunnelvortriebsmaschine (TVM) der Firma Herrenknecht AG wurde speziell auf die Thuner Geologie abgestimmt und so mit 64 Schälmessern und 23 Rollenmeisseln bestückt (vgl. Tab. 3 und Abb. 8).

Der Hydroschild mit einem Durchmesser von 6.28 m bestand aus Schneidrad (60 t), Schneidenschuss (110 t), Mittelschuss (75 t), Schildschwanz (40 t) und Erektor (15 t). Dahinter folgte ein vierteiliger Nachläufer (vgl. Abb. 11 und 12), auf dem hydraulische und elektrische Anlagen, Steuerstand, Mörtelanlage, Förderpumpe zur Rückführung von Bentonit und Ausbruchmaterial, teleskopierbare Speise- und Förderleitungen zum Verlängern der Rohre, Transformator, Fluchtcontainer, Hochspannungskabelbobine, Luttenspeicher sowie Tübbingumschlagkrane und -magazin installiert waren.



Technische Daten TVM	
Hersteller	Herrenknecht AG, Schwanau (D)
Typ	Hydroschild
Gesamtgewicht	450 t
Gesamtlänge	60 m
Installierte elektr. Leistung	1'000 kVA
Antriebsart	elektrisch
Antriebsleistung	330 kW
Ausbruchdurchmesser	6.32 m
Anzahl Schälmesser	64 Stück
Anzahl Rollenmeissel	23 Stück
Meisselringdurchmesser	17"
max. Drehzahl Schneidrad	3 U/min
Schilddurchmesser	6.28 m
Schildlänge	8.00 m
max. Vorschubkraft	20'440 kN

Tab. 3: Technische Daten TVM



Abb. 8: Hydroschild-TVM

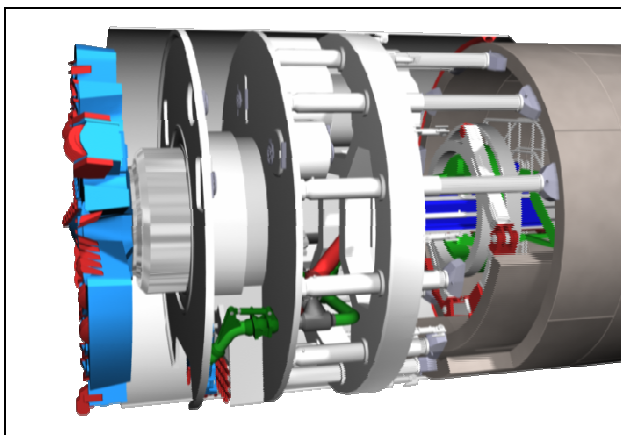


Abb. 9: Vortriebsausrüstung

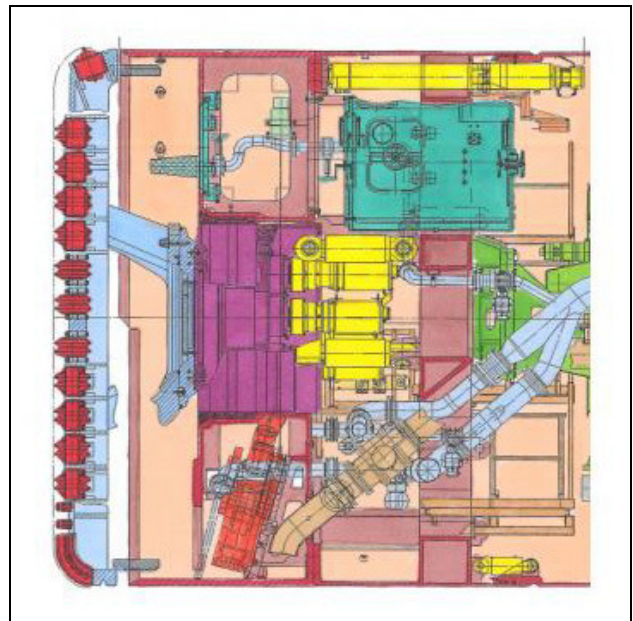


Abb. 10: Querschnitt des Schildes

Der Schild bestand aus folgenden Teilen (vgl. Abb. 9 und 10):

- dem Schneidrad,
- dem Hauptlager mit den Antriebsmotoren,
- der Abbau- und der Arbeitskammer, welche durch die unten offene Tauchwand getrennt sind,
- der Druckwand mit dem durchdringenden Schleusensystem,
- der Materialansaugstelle mit Steinbrecher und Rechen,
- den Vorschubzylindern,
- dem Erektor zum Einbau der Tübbinge und
- der Schildschwanzdichtung

Zur Verhinderung des Einbrechens der Ortsbrust und damit grösserer Setzungen an der Oberfläche war der Abbauraum des Hydroschildes mit einer Stützflüssigkeit gefüllt. Der über ein Druckluftpolster über die Samson-Anlage (vgl. Abb. 13) regulierbare Stützdruck lag je nach Überdeckung, Grundwasserspiegel, Überbauungen und Verkehrsachsen bei maximal 3 bar. Weil der Überdruck auch bei Arbeitspausen ständig aufrechterhalten werden musste, wurden umfangreiche Sicherheitsmassnahmen getroffen wie das Bereitstellen von Notstromgruppen, die Absicherung mit redundanten Systemen und die Überwachung der Messgrössen.

Um in Arbeitsräume mit einer Druckluftatmosphäre zu gelangen, müssen Personen und Werkzeuge Schleusen passieren, in denen der Luftdruck im Arbeitsbereich erhöht wird. Bei einem Überdruck ab 0.1 bar spricht man von Arbeiten in Druckluft. In Thun betrug der maximal erforderliche Überdruck bei Einstiegen 2.6 bar.



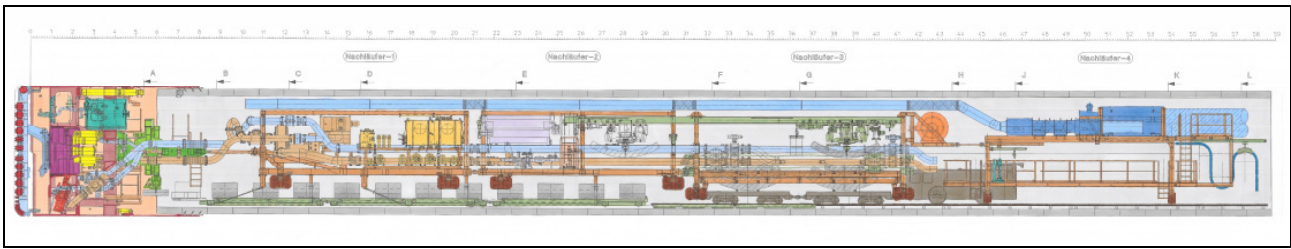


Abb. 11: Längsschnitt TVM

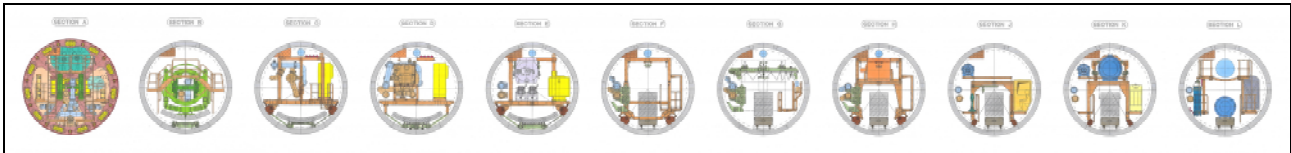


Abb. 12: Querschnitte TVM



Abb. 13: Druckluftregelungsanlage Samson



Abb. 15: Materialschleuse



Abb. 14: Personenschleuse mit Eingangskammer (links) und Hauptkammer (rechts)



Abb. 16: Rollenmeissel in der Materialschleuse

Die Personenschleuse mit einem Betriebsdruck von 3.0 bar und einem Prüfdruck von 4.5 bar besteht aus einer Eingangs- und einer Hauptkammer (vgl. Abb 14). Bei TVM grösseren Durchmessers liegen diese beiden Kammern hintereinander. Bei der in Thun eingesetzten Maschine waren die beiden Kam-

mern nebeneinander angeordnet und durch eine Zwischentüre verbunden.

Die Materialschleuse befanden sich auf der rechten Seite auf Höhe Stollenachse (vgl. Abb. 15). Während der Druckluftarbeiten wurden darin die Abbaugeräte vom Atmosphä-

ren- in den Überdruck und umgekehrt verschoben (vgl. Abb. 16).

Die dreireihige auf der Tübbingaussenseite gleitende Bürstendichtung am Ende des 8 m langen Schilds verhinderte ein Eindringen von Wasser, Boden, umlaufender Stützflüssigkeit oder Verpressmörtel in den Schild. Dieser Dichtungstyp ermöglichte das Verpressen direkt durch den Schildschwanz, an der Entstehungsstelle des Ringspalts zwischen Tübbing und Baugrund. Die vollumfängliche Verpressung mit Maxit-Mörtel erfolgte druck- und mengengesteuert.

Die als Stützflüssigkeit eingesetzte Bentonitsuspension zirkulierte in einem Rohrkreislauf und förderte auf dem Rückfluss vom Abbauraum zur Separieranlage das Ausbruchmaterial. Der vom Schneidrad abgetragene Boden vermischte sich mit der Bentonitsuspension. Dieses Gemisch wurde aus der Abbaukammer abgepumpt. Ein Steinbrecher zerkleinerte grössere Blöcke bis zu einer Kantenlänge von 60 cm, so dass das Bentonit-Boden-Gemisch problemlos das Förderrohr DN 300 mm passieren konnte. Auf der Separieranlage wurde der Ausbruch mit Sieben und Zyklonen von der Bentonitsuspension getrennt. Bei Bedarf wurde dem Kreislauf frischer Bentonit zugeführt. Altbentonit und feinste, nicht abtrennbare Bodenfraktionen wurden in einer Kammerfilterpresse zu Filterkuchen eingedickt und in Inertstoffdeponien transportiert. Die Kies- und Sandfraktionen des Ausbruchmaterials konnten als Betonzuschlagstoffe verkauft werden.

### 3. Notwendigkeit und Risiken von Druckluftarbeiten

#### 3.1 Notwendigkeit

Beim Hydroschildverfahren sind Einstiege für das Bergen von Hindernissen, welche mit dem Schneidrad nicht abgebaut werden können, sowie die Kontrolle und Auswechslung der Abbauwerkzeuge erforderlich (vgl. Abb 17). Hindernisse können Anker, Stahlträger und Pfahlbewehrungen ehemaliger Baugruben, aber auch im Baugrund eingebettete grössere Hölzer sein.

Beim Hochwasserentlastungsstollen Thun lagen auf rund 50 m Vortriebslänge im Bahnhofplatzbereich die Anker des Baus eines unterirdischen Parkhauses nur wenig über der Firste. Glücklicherweise wurden diese Anker damals plangemäss erstellt und es ragte keiner in den Stollenquerschnitt hinein. Ansonst wurden auf der ganzen Vortriebsstrecke keine Hindernisse ehemaliger Baugruben angetroffen.

Drucklufteinsätze reduzieren die Vortriebsleistung und sind möglichst zu vermeiden. Daher wurde beim Auffahren des Hochwasserentlastungsstollens Thun mindestens wöchentlich jeweils gegen Schichtende eine Kontrolle der Abbauwerkzeuge durchgeführt. Aufgrund der abrasiven Geologie wurde das Intervall periodisch auch verkürzt. Zu den Werkzeugen zählen die Schälmesser, die Räumer und die Rollenmeissel. Diese bestehen jeweils aus einer auf die Grundkonstruktion aufgeschweissten Halterung und aus einem auswechselbaren Bau-

teil. Die Schälmesser und Räumer sind mit Hartmetalleinlagen und –aufschweissungen versehen. Nach Möglichkeit muss eine Beschädigung der Halterungen vermieden werden, denn diese können nur mit aufwändigen Schweissarbeiten unter Druckluft repariert werden. In Thun konnten dank intensiver Kontrollen und grosser Aufmerksamkeit des Personals Beschädigungen an den Halterungen gänzlich vermieden werden. Entsprechend war auch des Schneidrad nach dem Ausfahren in die Zielbaugrube in einem sehr guten Zustand.

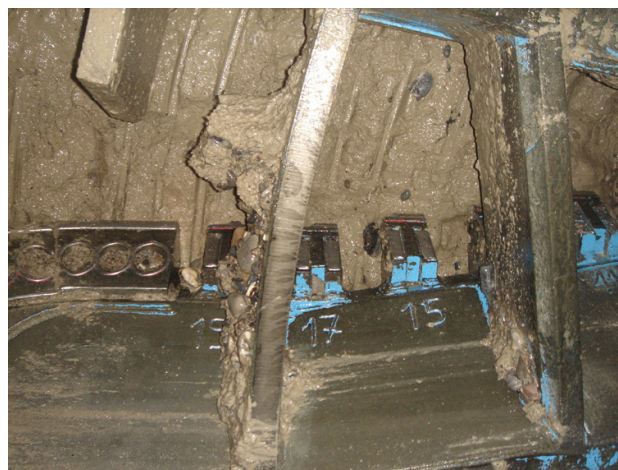


Abb. 17: Blick auf die Ortsbrust mit Spuren der Rollenmeissel

#### 3.2 Risiken

Durch die hohen Temperaturen, die Feuchtigkeit und das verringerte Schwitzen sind die Druckluftarbeiter einer grösseren Hitzebelastung ausgesetzt, weshalb das Trinken besonders wichtig ist.

Die nitrosen Gase und Ozon, die beim Schweiessen und Brennen entstehen, wirken im Überdruck erheblich gesundheitsschädlicher als unter atmosphärischen Bedingungen. Daher muss stets zusätzlich zur Belüftung des Arbeitsplatzes und der örtlichen Rauchabsaugung eine von der Umgebungsluft unabhängige Atemluftversorgung für den Schweiesser und den Schweißhelfer eingerichtet werden. Der Einsatz der umgebungsluftunabhängigen Atemluftversorgung darf nicht vom Umfang und Dauer der Arbeiten abhängig gemacht werden.

Giftige Dämpfe aus verunreinigtem Erdreich können zu Atembeschwerden führen und erfordern das Tragen von Atemluftmasken. Weitere Risiken bestehen durch die starke Arbeitsbelastung, die eingeschränkte Kommunikation zwischen Schleusenwärter und Druckluftarbeiter, Verletzungen durch Klettern und Heben und nicht zuletzt bei Ausbläsern, welche bei Druckverlusten eine plötzliche Dekompression erfordern.

### 4. Betriebskonzept

#### 4.1 Rechtsgrundlagen

Für Druckluftarbeiten in der Schweiz gilt wie für alle Arbeiten übergeordnet die Verordnung über die Unfallverhütung und die Bauarbeitenverordnung. Im Speziellen ist die Verordnung über



die technischen Massnahmen zur Verhütung von Unfällen und Berufskrankheiten bei Arbeiten unter Druckluft von 1961 zu beachten. Diese ist in einigen Bereichen überholt und spiegelt nicht mehr den Stand der Technik, sie ist jedoch nach wie vor anwendbar. So sind in der Verordnung beispielsweise nur Auf-tauchtabellen für Taucher- und nicht für eigentliche Druckluft-arbeiten enthalten.

In der Praxis wird zwar die aktuelle schweizerische Verordnung angewandt, zusätzlich werden aber verschärfte Teile ausländischer Vorschriften beigezogen. Dies erfolgt in gegenseitiger Absprache mit der SUVA. So wird in der Regel die deutsche Druckluftverordnung von 1972 verwendet. Mit 36 Jahren entspricht dieses Werk auch nicht mehr dem heutigen Stand. Die Ausschleustabellen sind überholt und berücksichtigen nicht, dass heute bis zu 8 bar Überdruck Arbeiten ausgeführt werden. Da die Druckluftverordnung verhältnismässig nur wenige Personen betrifft, ist das Interesse einer Überarbeitung seitens der Behörden und Politiker klein. Zudem dauert dies lange und die neue Verordnung kann bei Inkraftsetzung allenfalls bereits wieder überholt sein. Deshalb hat Deutschland im Jahre 2003 in der RAB 25 (Regeln zum Arbeitsschutz auf Baustellen) mit einer Konkretisierung zur Druckluftverordnung den Stand der Technik wiedergegeben.

Die deutsche Druckluftverordnung und die RAB 25, beschreiben die verschiedenen Sicherheitsmassnahmen gegen physiologische Gefahren durch Überdruck. Nachfolgend eine Auswahl der wichtigsten medizinischen, technischen und betrieblichen Massnahmen.

#### 4.1.1 Medizinische Massnahmen

- ärztliche Vorsorgeuntersuchung (gilt für D und CH)
- Altersbeschränkung:  
Für Arbeitnehmer unter 18 und über 50 Jahren besteht ein Beschäftigungsverbot (Aufsichtsfunktion möglich).
- Ärztliche Überwachung:  
Bei Druckluftarbeiten muss ein fachkundiger Arzt während der Arbeits- und Wartezeiten jederzeit erreichbar sein und in einer angemessenen Zeit (max. 30 min) auf der Arbeitsstelle sein. Bei einem Arbeitsdruck von mehr als 2.0 bar muss dieser ständig vor Ort anwesend sein.
- Gesundheitskartei:  
Für jeden, welcher sich der Druckluftumgebung aussetzt, ist eine Gesundheitskartei zu führen. Diese muss neben allen persönlichen Daten (Name, Anschrift, Krankenversicherungsträger etc.) Informationen bezüglich ärztlicher Untersuchungen, Beschäftigungs- und Tätigkeitsarten und jede einzelne Schleusung enthalten.

#### 4.1.2 Betriebliche Massnahmen

- Begrenzung des Überdrucks:  
Arbeiten in Druckluft sind auf einen maximalen Überdruck von 3.6 bar begrenzt (Ausnahmen sind möglich, jedoch gibt es keine offiziellen Erkenntnisse über Arbeiten bei höheren Drücken).
- Anzeigepflicht / Vorankündigung:

Arbeiten in Druckluft müssen spätestens zwei Wochen vor Arbeitsbeginn bei der zuständigen Behörde angezeigt werden.

- Prüfungen:  
Vor dem ersten Betrieb sind alle Druckluft- und elektrischen Anlagen einer Sachverständigenprüfung zu unterziehen. Ausserdem müssen die Sachkundigen die Anlagen ständig überwachen und die Druckluftanlage ist täglich einer Dichtigkeitsprobe zu unterziehen.
- Benennung von Fachpersonal:
  - ein Fachkundiger, der die Arbeiten leitet und ständig überwacht und dessen Vertreter (Druckluftbauleiter)
  - ein Sachkundiger für das gesamte Druckluftsystem
  - ein Sachkundiger für die elektrischen Anlagen
  - ein Schleusenwärter
  - zwei Sachkundige für Brandbekämpfung
  - zwei Betriebshelfer für Erste Hilfe-MassnahmenEine Person kann auch mehrere Funktionen übernehmen.
- Belehrungen und Probeschleusungen:
  - Alle Personen, die sich dem Überdruck aussetzen, sind zu belehren.
  - Bei jeder Person, die sich erstmals Druckluft aussetzen wird, ist eine Probeschleusung durchzuführen.
- Ausschleus- und Wartezeiten:  
Die Ausschleustabellen (mit und ohne Sauerstoff) und Wartezeiten der aktuellsten Druckluftverordnung sind mindestens einzuhalten.
- Schleusenbuch:  
Es ist ein Schleusenbuch zu führen.
- Betriebsanweisung:  
Es ist eine Betriebsanweisung zu erstellen, welche u.a. folgende Punkte umfasst:
  - Zuständigkeiten
  - Arbeiten unter Druckluft
  - Verwendete Schleusentabellen (i.A. mit Sauerstoffdekompression)
  - Verhalten bei Drucklufterkrankungen
  - Aufgaben und Pflichten des Schleusenwärters
  - Meldesystem bei Drucklufterkrankungen
  - Schulung der Mitarbeiter (jeweils vor jedem Druckluftein-satz)

#### 4.1.3 Technische Massnahmen

- Getrennte Schleusen für Personen und Material
- Ausreichend dimensionierte Kompressorstation (auch für Notfälle)
- Zweite Energiequelle (auch Notstromversorgung)
- Reservekompressoren (Druckbehälter als Vorratsspeicher für Notfälle)
- Doppelte Luftzuleitung
- Filteranlagen für Sauerstoffversorgung (regelmässige Kontrollen)
- Lecksicherungen
- Krankendruckluftkammer mit Sauerstoffatmung (ab 0.7 bar Arbeitsdruck Pflicht)
- Sprechverbindung zwischen allen wichtigen Betriebspunkten

- Besondere Anforderungen an die Schleusen und Aufenthaltsräume (z.B. Mindesthöhe von 1.60 m und isolierte Sitzgelegenheiten)
- Geeignete Feuerschutzeinrichtungen (Feuerlöscher müssen auf den Druck in der Arbeitskammer eingestellt sein; brennbares Material darf nicht in der Arbeitskammer gelagert werden)
- Spezielle Anforderungen an die Arbeitskammer (Mindesthöhe, aufrechtes Stehen etc.)

#### 4.2 Umsetzung der Rechtsgrundlagen ins Betriebskonzept

Das Betriebskonzept für Druckluftarbeiten beim Bau des Hochwasserentlastungsstollens Thun basiert auf den Erfahrungen der Projekte Skymetro auf dem Flughafen Zürich, SBB-Bahntunnel Zürich – Thalwil und Oenzbergtunnel der SBB-Neubaustrecke Mattstetten – Rothrist. Nebst den veralteten schweizerischen und deutschen Verordnungen wurde auch deren Konkretisierung aus dem Jahr 2003, die RAB 25 berücksichtigt. Weiter dienen die «Vorgabe für die sicherheitstechnische Dokumentation von Untertagarbeiten unter Druckluft» der SUVA als Grundlage.

Bei den erwähnten Projekten erfolgte die Dekompression mit Druckluft und den Tauchtabellen von Dr. med. Bühlmann des Universitätsspitals Zürich. Die Verwendung von medizinischem Sauerstoff als Dekompressionsgas ist heute Stand der Technik und gilt in Deutschland als Pflicht. Druckluft ist nur bei kurzzeitigen Einstiegen oder in Ausnahmefällen zugelassen. Deshalb hat sich die ARGE Hochwasserentlastungsstollen Thun entschieden, die Ausschleusung auch mit medizinischem Sauerstoff durchzuführen. Weil der Sauerstoff den Stickstoff aus dem Körper verdrängt, treten mit diesem Dekompressionsgas erfahrungsgemäss weniger Beschwerden auf.

Für die Beratung und Erarbeitung des Betriebskonzepts wurden zudem mit dem Druckluftarzt, Dr. med. Karl-Peter Faesecke, Hamburg (D) und Claus Mayer von der Nordsee-Taucher GmbH, Ammersbek (D) zwei ausgewiesene und weltweit tätige Spezialisten beigezogen.

Während die SUVA in der Schweiz das Vorhalten einer Behandlungskammer vor Ort nicht vorschreibt, ist dies in England, Frankreich, Holland, Deutschland und den USA Pflicht. So steht in der deutschen Verordnung, dass der Arbeitgeber dafür zu sorgen hat, dass dort, wo eine Arbeitskammer betrieben wird, bei einem Arbeitsdruck von 0.7 bar oder mehr eine Krankendruckluftkammer vorzuhalten ist, die für einen Arbeitsdruck von mindestens 5.5 bar ausgelegt sein muss.

In der Schweiz sieht die gängige Praxis vor, Druckluftarbeiter mit Dekompressionsbeschwerden mit der REGA nach Basel oder Lausanne zu transportieren und dort in den beiden einzigen noch vorhandenen Kammern zu behandeln. Bis Ende der Neunzigerjahre war im Universitätsspital Zürich ebenfalls eine Behandlungskammer verfügbar, welche mittlerweile aber aus Kostengründen stillgelegt wurde.

Eine auf der Baustelle vorhandene Behandlungskammer würde das Vertrauen der Mitarbeiter in die Sicherheitsvorkehrungen zusätzlich stärken, insbesondere wenn der verantwortliche Druckluftarzt sichtbar anwesend ist, bevor sie in Druckluft einschleusen. Der mit Stickstoff teilgesättigte menschliche Organismus, in dem bereits Gasblasen entstanden sind (Symptome der Druckluftkrankheit), sollte nicht zusätzlichen Erschütterungen wie im Fahrzeug oder Hubschrauber ausgesetzt werden, weil dadurch die Blasenentstehung gefördert wird. Selbst das Treppensteigen kann ein zusätzliches Risiko darstellen. Eine Behandlungskammer vor Ort kann auch für die empfohlene Probeschleusung auf den erwarteten Arbeitsdruck für neu eingetretene Mitarbeiter benutzt werden, um die Fähigkeit zum aktiven Druckausgleich nachzuweisen.

Gegenüber einer externen klinischen Einrichtung ist das erfahrene medizinische Personal auf der Baustelle mit den spezifischen Symptomen und Anzeichen der Druckfallkrankheit nach Arbeit in Druckluft vertraut und wird eine individuell abgestimmte Therapie unverzüglich einleiten. Es gibt keine festen Therapieschemata, und die Mitarbeiter werden nach ärztlicher Beurteilung der Gesamtsituation in die Tätigkeit zurückgeführt. Die Hemmschwelle der Mitarbeiter vor dem Aufsuchen einer medizinischen Einrichtung ist bei deren Einbindung in die Baustelle deutlich niedriger gegenüber einer externen. Sie bleiben in ihrer gewohnten Umgebung und werden von vertrauten Kollegen betreut.

In Absprache mit der SUVA verzichtete die ARGE Hochwasserentlastungsstollen Thun auf das Vorhalten einer Behandlungskammer. Um Dekompressionsbeschwerden möglichst vermeiden zu können, wurden die Ausschleuszeiten entsprechend konservativ angesetzt.

In Zusammenarbeit der drei deutschsprachigen Länder Deutschland, Österreich und der Schweiz (DACH) ist die gemeinsame Erarbeitung eines Grundlagenpapiers im Sinne der fachmedizinischen und technischen Vorbereitung von angepassten gesetzlichen Vorschriften in den jeweiligen Ländern im Gange. Insbesondere aufgrund der Frage der Notwendigkeit des Vorhaltens einer Druckluftkammer vor Ort wäre es sehr zu begrüssen, wenn dieses Projekt forciert würde.

#### 4.3 Dekompressionstabellen

Weil die schweizerische Verordnung keine und die deutsche nur veraltete Dekompressionstabellen für das Ausschleusen mit Sauerstoff enthält, wurden für die Druckluftarbeiten beim Bau des Hochwasserentlastungsstollens in Thun durch Dr. med. Karl-Peter Faesecke spezielle Tabellen ausgearbeitet.

Wegen der Höhenlage, der zu erwartenden Arbeitsschwere bei Druckluftarbeiten in der TVM und des Fehlens einer Rekompensationsmöglichkeit vor Ort wurde die maximale Arbeitszeit in Überdruck auf drei Stunden und die längste Ausschleusung auf eine Stunde limitiert. Die Tabellen wurden auf der Grundlage der zwanzig Jahre umfassenden Datensammlung des Verfassers erstellt und sind auf eine «Zero - bends rate» konzipiert (vgl. Abb. 18). Von daher ergeben sich die Abweichungen zu



den derzeit in Deutschland eingeführten Tabellen und die konsequente Einhaltung der vorgegebenen Druckwerte, und Zeiten ist zwingend erforderlich.

Thuner-Tunnel-Tabellen (2,0-2,8 bar)							
(Blaue Zahlen = Sauerstoffatmung)							
Arbeitsdruck in bar Überdruck	Aufenthalt i. C. in Minuten	Aufstieg in Min.	Aufenthalt 1-bar-Stufe in Minuten	Aufstieg in Min.	Aufenthalt 0,5-bar-Stufe in Minuten	Ausschleusungszeit in Minuten	Gesamtzeit in Überdruck in Std.:Min
2,0	30	4	3	2	4	13	0 : 43
	60	4	7	2	7	20	1 : 20
	120	6	19	2*	19	46	2 : 46
2,1	30	4	3	2	5	14	0 : 44
	60	4	8	2	8	22	1 : 22
	120	7	20	2*	20	49	2 : 49
2,2	30	4	3	2	6	15	0 : 45
	60	4	9	2	9	24	1 : 24
	120	8	21	2*	21	52	2 : 52
2,3	30	4	4	2	6	16	0 : 46
	60	4	10	2	10	26	1 : 26
	120	8	22	2*	23	55	2 : 55

Abb. 18: Auszug aus der Dekompressionstabelle

Abhängig von Druck und Zeit erreicht das menschliche Gewebe bei Überdruckexposition eine zusätzliche Stickstoffsättigung. Dieser Stickstoffüberschuss kann in engen physiologischen Grenzen vom Organismus beim Übergang zum Normaldruck kontrolliert über die Lunge wieder abgegeben werden. Dabei sind bestimmte Druckstufen (Haltestufen) für tabellarisch festgelegte Mindestzeiten einzuhalten, auf denen das Dekompressionsgas Sauerstoff geatmet wird.

In den Abb. 19 und 20 sind die Dekompressionsdiagramme bei einem Arbeitsdruck von 1.6 bzw. 2.2 bar dargestellt. Bis zu einem Arbeitsdruck von 1.9 bar wurde eine Aufenthaltszeit von max. 180 Minuten zugelassen, und entsprechend sind die Druckstufen für Aufenthaltszeiten in Überdruck während 30, 60, 120 und 180 Minuten angegeben. Bei einem Arbeitsdruck ab 2.0 bar wurde die Aufenthaltszeit auf 120 Minuten begrenzt, um Dekompressionsbeschwerden möglichst vermeiden zu können.

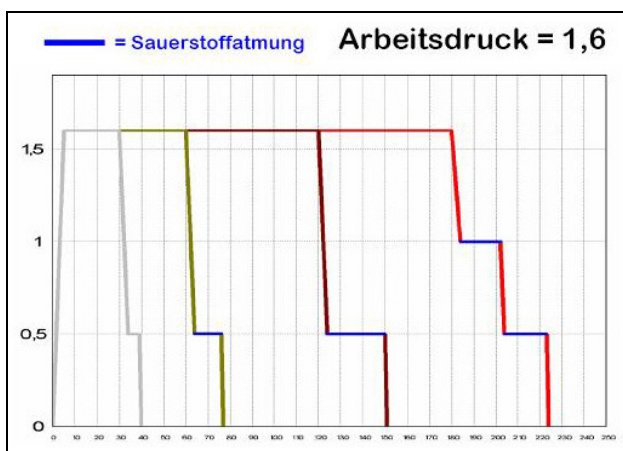


Abb. 19: Dekompressionsdiagramm bei einem Arbeitsdruck von 1.6 bar

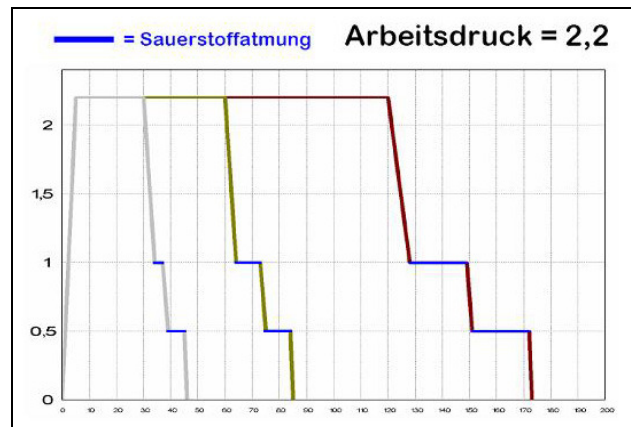


Abb. 20: Dekompressionsdiagramm bei einem Arbeitsdruck von 2.2 bar

Der Schleusenwärter stoppt die Zeit ab dem Einstieg und informiert die im Überdruck arbeitenden Personen laufend über die Zeitreserve, denn die maximale Aufenthaltszeit darf keinesfalls überschritten werden. Bei einem Arbeitsdruck von 2.4 bar und einer Aufenthaltszeit von 110 Minuten wird mit den Druckstufen der nächsthöheren Aufenthaltszeit von 120 Minuten ausgeschleust. Während der ersten 8 Minuten steigen die in der Hauptkammer sitzenden Arbeiter von 2.2 auf 1.0 bar auf. Anschliessend ziehen die Personen die Masken an und atmen während der folgenden 21 Minuten medizinischen Sauerstoff ein. Ab Aufenthaltszeiten von über 15 Minuten werden die Masken beim zweiminütigen Aufstieg von 1.0 auf 0.5 bar abgezogen. Mit dieser Erholungsphase wird das Bewegen der Maske während der Sauerstoffatmung und das unerwünschte Austreten von Sauerstoff in die Schleuse vermieden. Nach weiteren 21 Minuten können die Masken entfernt und der Druck auf 0 bar reduziert werden. Dies ergibt eine Ausschleusungszeit von 52 Minuten und eine Gesamtarbeitszeit von knapp 3 Stunden in Überdruck. Analog zum Untertagezuschlag erhalten die Arbeitnehmer eine Zusatzentschädigung für die Druckluftarbeiten.

## 5. Sicherheitsplan

Der Sicherheitsplan ist ein wichtiges Hilfsmittel für die Arbeiten im Vortrieb (vgl. Abb. 21). Die Poliere führen den aktuellen Stand des Vortriebs immer nach und können sich somit orientieren, welche Hindernisse mit welcher Überdeckung gerade unterfahren werden. In diesem Plan wird die verpresste Mörtelmenge der Ringspaltverfüllung zwischen Tübbing und Baugrund pro Ring grafisch dargestellt. In der Situation sind die Tachymeterstandorte und die Messpunkte der Oberflächenüberwachung eingezeichnet, und im Längsschnitt sind die geologischen Formationen ersichtich.

In Planmitte ist im Stützdruckband der erforderliche Stützdruck in der Abbaukammer für niedrigen und hohen Grundwasserstand angegeben. Der erforderliche Druck des Luftpolsters geht aus der Stützdruckberechnung hervor, die aus den Elementen Geologie, Überdeckung, Grundwasserstand sowie ständige (z. B. Häuser) und veränderliche Lasten (z.B. Verkehr) erarbeitet wurde. Die Berechnung erfolgte in 28 verschiedenen Quer-

schnitten. Dazwischen werden die Werte für die Einstellung der Druckluftregelanlage auf der TVM linear interpoliert.

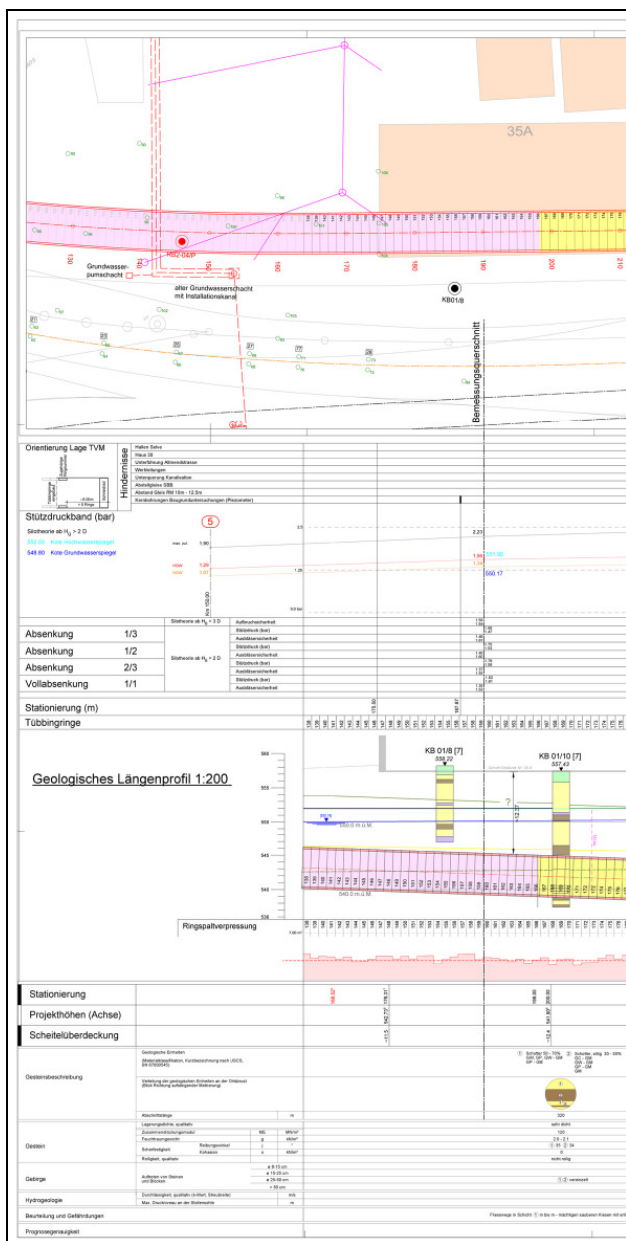


Abb. 21: Auszug aus dem Sicherheitsplan

Für das Ausführen von Druckluftarbeiten muss die Bentonit-suspension in der Arbeits- und Abbaukammer abgesenkt werden. Im Sicherheitsplan sind die Werte des Stützdrucks und der Ausbläsesicherheit für die verschiedenen Absenk-niveaus aufgeführt. Dabei wird zwischen Drittel-, Halb-, Zweidrittel- und Vollabsenkung unterschieden. Für Werkzeugkontrollen wird normalerweise halb abgesenkt, während für das Auswechseln der Abbauwerkzeuge zwei Drittel mit Druckluft versehen ist. Eine Vollabsenkung wird nur für Reparaturen am Steinbrecher benötigt und war in Thun nie erforderlich.

Als weitere Information ist aus dem Sicherheitsplan ersichtlich, in welchen Bereichen Einstiege nicht zulässig sind. Sei dies

aufgrund der Berechnungen von Stützdruck und Ausbläsesicherheit oder dem Unterfahren von Infrastrukturbauten wie Bahnlinie und Strassenunterführungen mit hohen Anforderungen an die Betriebssicherheit.

## 6. Personalbedarf für Drucklufteinsatz

### 6.1 Grundlagen

Für den reibungslosen und sicheren Ablauf eines Einsatzes unter Überdruck sind Teams von je 3 + 1 + 1 erforderlich. Die Aufgaben sind wie folgt verteilt:

- 3 Druckluftarbeiter / -techniker:
  - Ausführung Arbeit
  - Zudiener
  - Verbindung zu Schleusenwärter
- 1 Schleusenwärter / Kammerfahrer
- 1 Einsatzleiter / Befähigungsscheininhaber

Druckluftarbeiter und -techniker, welche nicht in Überdruck arbeiten, unterstützen den Schleusenwärter und das Personal in Überdruck. Der Schleusenwärter ist für das Ein- und Ausschleusen von Personen in die Arbeitskammer verantwortlich und hat u.a. folgende Anweisungen zu befolgen:

- Er darf nur Personen einschleusen, welche nach einer schriftlichen Bescheinigung eines ermächtigten Arztes gesundheitlich tauglich sind. Er belehrt über das beim Einschleusen erforderliche Verhalten und vergewissert sich über die Fähigkeit jedes Einzelnen zum Druckausgleich. Personen, welche unter Alkoholeinwirkung stehen, dürfen nicht eingeschleust werden. Der Schleusenwärter ist dafür verantwortlich, dass kein Unbefugter die Druckluftventile bedient und nicht mehr Personen gleichzeitig ein- und ausgeschleust werden.
- Die Schleuse wird von aussen durch den Schleusenwärter gefahren. Er ist für die Einhaltung der für das Ein- und Ausschleusen festgelegten Bestimmungen verantwortlich. Der Zeitbedarf für das Einschleusen richtet sich nach dem Schleuseninsassen, der den Druckausgleich am langsamsten erreicht. Während des Einschleusens behält er die geschleusten Personen ständig im Auge. Treten bei einer Person Beschwerden auf, senkt er den Druck in der Schleuse umgehend wieder ab und steigert diesen langsamer als vorher. Treten dabei erneut Beschwerden auf, wird die betreffende Person ausgeschleust.
- Das Ausschleusen von Personen erfolgt entsprechend der Tabelle grundsätzlich mit Sauerstoff (Ausnahme nur bei kurzen Einsätzen gem. Tabelle). Dabei müssen alle Personen die Sauerstoffmasken fest anziehen. Die Zeiten und Druckangaben müssen exakt eingehalten und korrekt im Schleusenbuch dokumentiert werden.
- Liegen die Aufenthaltszeiten in der Arbeitskammer zwischen den in den Tabellen angegebenen Werten, muss jeweils die für die höhere Aufenthaltszeit angegebene Ausschleuszeit eingehalten werden. Wenn die für den Aufstieg vorgegebenen Zeiten überschritten werden, muss trotzdem die auf den Stufen vorgesehene Haltezeit voll eingehalten werden.
- Während des Ausschleusens wird die Schleuse mit Frischluft gespült.

- Treten während des Ausschleusvorgangs Krankheitserscheinungen oder Beschwerden auf, so muss der Ausschleusvorgang sofort unterbrochen und auf der momentanen Druckstufe gewartet werden, bis die Symptome verschwunden sind. Ist dies nach einigen Minuten nicht der Fall, muss der Druck wieder auf den vorherigen Druck erhöht werden. Der Schleusenwärter veranlasst die sofortige Benachrichtigung des zuständigen Druckluftarztes und schleust den Mitarbeiter nach dessen Anweisung besonders vorsichtig und langsam aus. Die Geschwindigkeit wird vom Druckluftarzt vorgegeben.
- Bei allen Erkrankungen oder Unfällen von Personen in Druckluft muss der Druckluftarzt vor Beginn der Ausschleusung verständigt werden. Die Ausschleusung von Erkrankten oder Verletzten darf nur nach Anweisung dieses Arztes vorgenommen werden.
- Bei allen Abweichungen vom Normalbetrieb (Ausfall der Sauerstoffatemanlage, absehbares Überschreiten der Aufenthaltszeit in Überdruck, Nichteinhaltung der Zeit- und/oder Druckvorgaben bei der Ausschleusung) muss umgehend der Druckluftarzt verständigt und nach dessen Weisung gehandelt werden.

Alle Mitarbeiter haben den Anweisungen des Schleusenwärters zu folgen, auch die Vorgesetzten.

Auf der Baustelle müssen zwei Befähigungsscheininhaber anwesend sein, der Einsatzleiter und sein ständiger Stellvertreter. Diese haben folgende Pflichten:

- Leiten der Arbeiten in Druckluft und ständiges Überwachen des Betriebs der Arbeitskammer
- Mitwirken bei der Erstellung und erforderlichen Anpassung der Anzeige von Druckluftarbeiten bei der zuständigen Behörde
- Mitwirken bei Anträgen für Ausnahmegenehmigungen
- Veranlassen von Prüfungen durch Sachverständige
- Verhindern eines Drucklufteinsatzes ungeeigneter Personen
- Zusammenarbeit mit dem ermächtigten Arzt
- Führen der Gesundheitskartei
- Mitwirken bei der Ausstattung mit Krankendruckluftkammer, Erholungsräume und sanitäre Einrichtungen
- Mitwirken bei der Auswahl und Bestellung von Sachkundigen, Schleusenwärtern und Betriebsshelfern
- Belehren der Arbeitnehmer
- Gewährleisten ordnungsgemässer Schleusungen

## 6.2 Umsetzung

Als Befähigungsscheininhaber leitete der Baustellenchef oder sein Vertreter die Drucklufteinsätze. Die Schleusenwärter und die Druckluftarbeiter konnten aus dem Vortriebspersonal der ARGE rekrutiert werden. Alle Mitarbeiter hatten beim von der SUVA ermächtigten Arzt Dr. med. Thomas Toth in Thun eine arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchung zu absolvieren. Für Drucklufteinsätze standen so drei Ingenieure, ein Polier und zehn Arbeiter zur Verfügung. Vor dem ersten Einsatz mussten sich alle Mitarbeiter einer Probeschleusung unterziehen. Denn auch mit erfolgreich absolvierter Vorsorgeuntersuchung kann es sein, dass jemand den Druckausgleich nicht machen kann oder

sich aus psychischen Gründen in den engen Schleusen nicht wohl fühlt. Schlussendlich basiert das Bestreiten von Druckluftarbeiten auf Freiwilligkeit. Jemanden zu verpflichten wäre der falsche Weg, denn in der Druckluft müssen sich die Mitarbeiter im Dreierteam aufeinander verlassen können.

Vor Aufnahme der Vortriebsarbeiten wurden das Kader sowie die Schild- und Erektorfahrer auf der Baustelle während drei Halbtagen in die Druckluftarbeiten eingeführt und erlangten den Ausweis «Techniker für Arbeiten in Überdruck» (vgl. Abb 22). In zwei Halbtagen bestritt Claus Mayer den betrieblichen und technischen Teil, während Dr. med. Karl-Peter Faesecke am dritten Halbtage die arbeitsmedizinischen Aspekte aufzeigte.



Abb. 22: Ausweis «Techniker für Arbeiten in Überdruck»

Schleusenwärter müssen zuverlässig sein und in der Schicht auf grosses Vertrauen zählen können. Nebst den beiden Polieren wurden zwei Tunnelbauer als Schleusenwärter geschult.

## 7. Einrichtungen für Druckluftarbeiten

Nebst der Personen- und Materialschleuse sind für die Ausführung von Druckluftarbeiten weitere Installationen vorzusehen:

Die Druckluftanlage beinhaltete u.a. fünf Elektro-Kompressoren, welche eine verfügbare Luftmenge von 72 m<sup>3</sup>/min lieferten, etwas mehr als die doppelte Ausbruchfläche (vgl. Abb. 23). Die Druckluft wurde in vier Windkesseln mit total 42 m<sup>3</sup> Inhalt zwischengespeichert. Nach dem Erzeugen der komprimierten Luft musste diese zwingend entwässert und entölt werden, wozu Kältetrockner sowie Öl-, Wasser-, Partikel- und Aktivkohlefilter eingesetzt wurden. Die Kältetrockner und Filterstrassen wurden wie die in den Stollen führenden Druckluftleitungen aus Sicherheitsgründen redundant montiert. Da die Druckluftproduktion auch bei einem Stromunterbruch gewährleistet werden musste, wurden aus Sicherheitsgründen Notstromaggregate mit Netzausfallautomatik installiert.





Abb. 23: Druckluftanlage

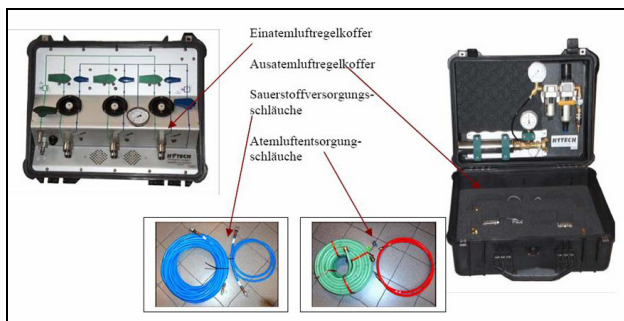


Abb. 24: Mobile Sauerstoffanlage



Abb. 25: Medizinischer Sauerstoff

Auf der TVM wurde eine mobile Sauerstoffanlage eingesetzt, da kein Dauerbetrieb gewährleistet werden musste. Die Anlage bestand aus den Ein- und Ausatemluftkoffern sowie den Sauerstoffversorgungs- und Atemluftentsorgungsschläuchen (vgl. Abb. 24). Vor einem Drucklufteinsatz wurden die Bündel mit medizinischem Sauerstoff zum Nachläufer 3 gefahren (vgl. Abb. 25) und von dort mit dem blauen Sauerstoffversorgungsschlauch mit den Durchführungsventilen der Schleuse verbunden. Der grüne Ausatemluftschlauch führte von der Schleuse zum Ausatemluftregelkoffer. Dieser war auf dem Nachläufer 4 beim Austritt der Ventilationslutte platziert, damit die Konzen-

tration des explosiven Sauerstoffs sofort wieder abnahm. Nach erfolgtem Einsatz wurde die Anlage aus der Personenschleuse entfernt, gereinigt und desinfiziert.

## 8. Ablauf der Druckluftarbeiten

### 8.1 Vorbereitung

Die Druckluftarbeiten wurden nach dem Ablaufschema in Abb. 26 durchgeführt. In der Vorbereitungsphase wurden die Rettungskräfte Druckluftarzt, örtlicher Arzt und REGA informiert. Die REGA bestätigte dabei die Verfügbarkeit mindestens einer Behandlungskammer in Basel oder Lausanne. War dies nicht der Fall, wurden die Druckluftarbeiten auf einen späteren Zeitpunkt verschoben. Weiter wurde das Material bereitgestellt und kontrolliert und aufgrund des benötigten Absenkniveaus der erforderliche Arbeitsdruck festgelegt.

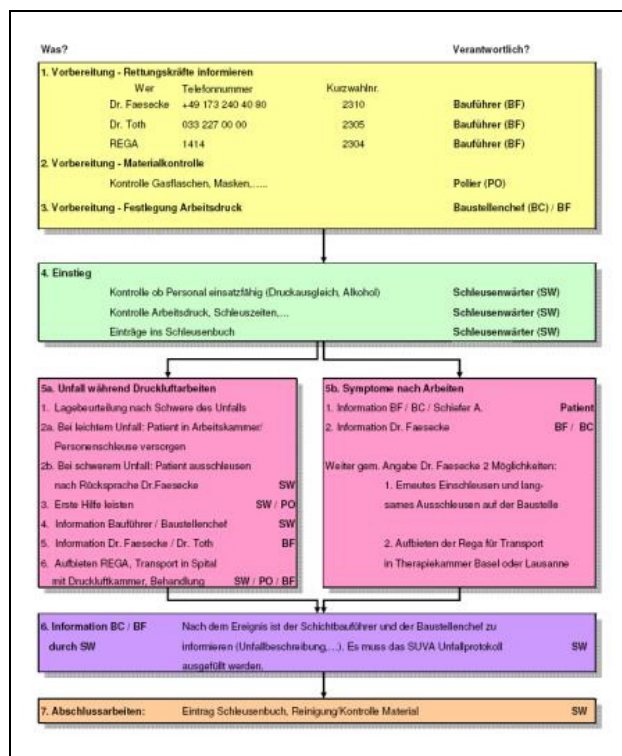


Abb. 26: Ablaufschema für Druckluftarbeiten

### 8.2 Einschleusen

Der Schleusenwärter kontrollierte die Einsatzfähigkeit des Personals, den Arbeitsdruck, die Schleuszeiten etc. und führte das Schleusenbuch nach (vgl. Abb. 27). Die Verbindung mit dem eingeschleusten Personal wurde mit dem Festnetztelefon sichergestellt. Über dieses konnte direkt von der Schleuse aus der Druckluftarzt kontaktiert oder die Rettungskräfte aufgebeten werden. Bei einem Ausfall würde das netzunabhängige Nottelefon zur Verfügung stehen (vgl. Abb 28).

Schleusenbuch No. 01 Projekt: TBM5-000  
 Name, Stadt, Land

NSF-Hydraulic Tunnel Construction and Design

Druckluftschalter	Arbeitsbeginn		Arbeitsende		Anschließen in Minuten		Schleusenende		Anschließen		Gesamtdauer		Schleusenfehler	
	in bar	Zeit in bar	in bar	Zeit in bar	in bar	in bar	in bar	in bar	in bar	in bar	in bar	in bar	in bar	in bar
1														
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														
9														
10														
11														
12														
13														
14														
15														
16														
17														
18														
19														
20														

\*Während der Druckpressen, 0,5 Min Luftpausen alle 10 Min.

Fachlehrer Überdruck: \_\_\_\_\_ Seite \_\_\_\_\_ von \_\_\_\_\_

Abb. 27: Schleusenbuch



Abb. 28: Netzunabhängiges Notfalltelefon (links) und Festnetztelefon (rechts)

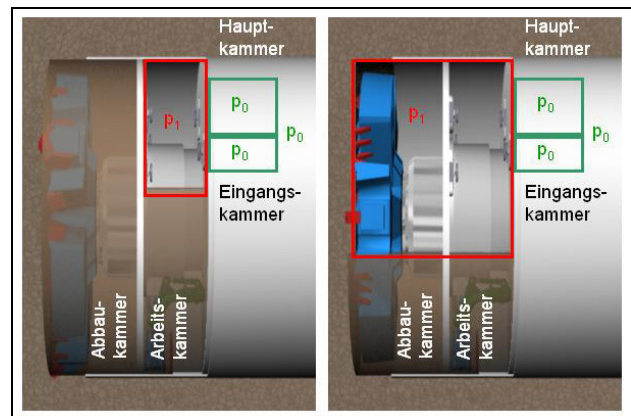


Abb. 29: Stützflüssigkeit während des Vortriebs (links) und in abgesenktem Zustand für Einstiege (rechts)

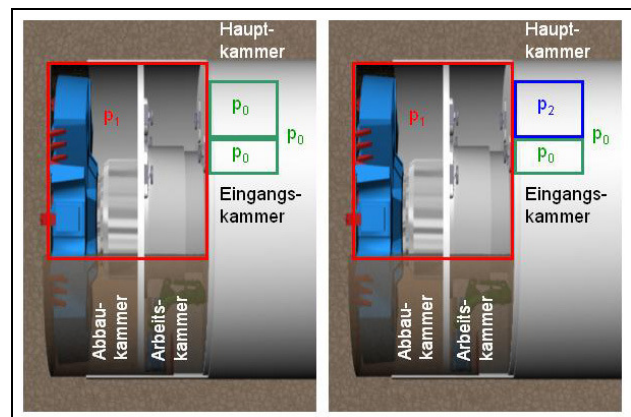


Abb. 30: Druckverhältnisse vor (links) und während des Einschleusens (rechts)

Vor dem Einschleusen wird die Stützflüssigkeit durch Frischbentonit ersetzt, damit auf der Ortsbrust ein möglichst guter Filterkuchen aufgebaut werden kann, und die Druckluft nicht entweichen kann. Anschliessend wird in den Abbau- und Arbeitskammern die Stützflüssigkeit abgesenkt und der erforderliche Stützdruck über die Druckluftregelanlage eingestellt (vgl. Abb. 29).

In der Ausgangssituation steht nur die Abbaukammer unter Druck  $p_1$  (vgl. Abb. 30). Auf der TVM herrscht der Atmosphärendruck  $p_0$  von 1 bar. Wenn alle Voraussetzungen für das ordnungsgemässe Schleusen erfüllt sind, kann nun mit dem Einschleusen begonnen werden. Dabei erhöht der Schleusenwärter den Druck in der Hauptkammer vom Atmosphärendruck  $p_0$  auf den Stützdruck  $p_1$ . In der Hauptkammer herrscht der Differenzdruck  $p_2$  vor, welcher zwischen  $p_0$  und  $p_1$  liegt (vgl. Abb. 30). Sobald in der Hauptkammer das Niveau des Stützdrucks  $p_1$  erreicht wird, ist das Einsteigen in die Arbeits- und Abbaukammer möglich (vgl. Abb. 31).

Soll eine weitere Person nachgeschleust werden, erfolgt dies über die Eingangskammer. Die nachzuschleusende Person wird dabei auf den Druck  $p_1$  der Hauptkammer angepasst (vgl. Abb. 31).

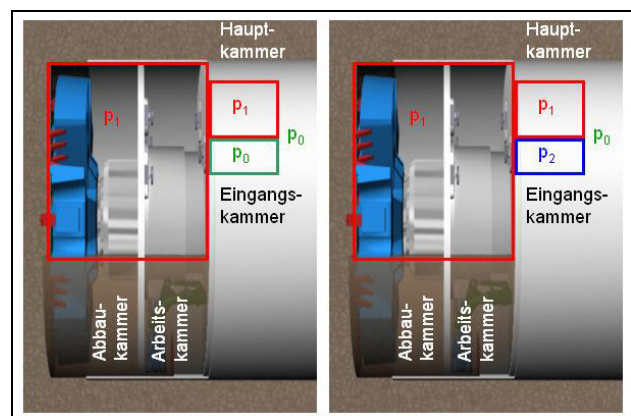


Abb. 31: Druckverhältnisse nach dem Einschleusen (links) und beim Nachschleusen (rechts)

Der zu schnelle Übergang vom Normal- zum Überdruck kann zu akuten Krankheitserscheinungen wie Ohren-, Kopf- und Zahnschmerzen sowie Gleichgewichtsstörungen führen. Auch eine Behinderung des Druckausgleichs (z.B. bei Erkältung) zu luftgefüllten Hohlräumen (z.B. Nasennebenhöhle, Paukenhöhle, Magen-Darm-Trakt, schlechte Zahnfüllungen) kann Beschwer-



den hervorrufen. Deshalb muss der Schleusenwärter jeden Mitarbeiter vor dem Einstieg den Druckausgleich testen lassen.

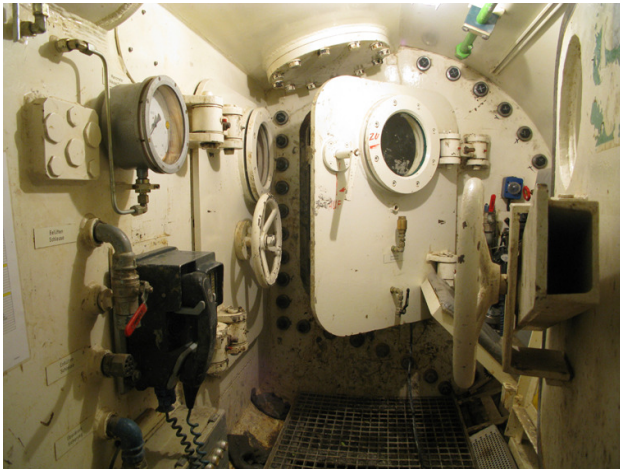


Abb. 32: Hauptkammer mit Verbindungstür zur Eingangskammer (links) und offener Tür zur Arbeitskammer

In Tab. 4 sind die Merkmale für das Einschleusen zusammengefasst.

#### Merkpunkte für das Einschleusen

- Kontrolle der Druckluftregelanlage auf Dichtheit und Funktion vor Einschleusen
- nur bei einwandfreien Schleusen arbeiten, andernfalls Information an Schleusenwärter
- bei Befindlichkeitsstörungen Schleusung stoppen, allenfalls abbrechen
- Einnehmen grösserer Mahlzeiten und Rauchen sind vom Beginn des Einschleusens bis zum Ende des Ausschleusens verboten
- keine blähende Speisen (Hülsenfrüchte) zu sich nehmen
- Personen, die unter Alkoholeinwirkung stehen, dürfen nicht eingeschleust werden
- keine kohlenensäurehaltigen Getränke vor / während des Schleusvorgangs trinken
- Personen mit Schnupfen oder Grippe dürfen nicht eingeschleust werden
- bei Erkrankungen des Innenohrs oder grippalen Infekten (Mittelohrentzündung, Kieferhöhlen) sollen keine Druckluftarbeiten durchgeführt werden
- viel trinken, ansonsten Austrocknung, was eine schnellere Dekompressionskrankheit zur Folge haben könnte
- trockene Kleider in Schleuse mitnehmen
- bei längeren Aufenthalten in Schleuse Essen mitnehmen

Tab. 4: Merkmale für das Einschleusen (Nordseetaucher GmbH)

Atemluft ist ein Gemisch mit den wesentlichen Bestandteilen Sauerstoff ca. 21% und Stickstoff ca. 79% (vgl. Tab. 5). Der

menschliche Organismus ist unter Normalatmosphäre von 1 bar mit Stickstoff von etwa 0.79 bar in allen Körperstrukturen gesättigt. Dabei wird mit jedem Atemzug die gleiche Menge Stickstoff eingeatmet, die anschliessend wieder ausgeatmet wird, da dieser für den Stoffwechsel des Körpers keinerlei Funktion hat. Sauerstoff als lebensnotwendiges Oxidationsgas wird entsprechend den aktuellen Energieanforderungen des Organismus von den Körperzellen im Stoffwechsel verarbeitet.

#### Zusammensetzung der Atemluft bei Atmosphärendruck von 1 bar

- ca. 79% Stickstoff (N<sub>2</sub>)
- ca. 21% Sauerstoff (O<sub>2</sub>)
- ca. 0.9% Argon (Ar)
- 0.03% Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)
- verschiedene Gase und Edelgase

Tab. 5: Zusammensetzung von Atemluft bei 1 bar

Durch Komprimierung nehmen die Moleküle pro Volumen zu. So sind bei einem Umgebungsdruck von 2 bar dreimal mehr Moleküle als bei atmosphärischem Druck vorhanden (vgl. Abb. 33). Dabei hat die Zunahme des Sauerstoffs keinen Einfluss auf den menschlichen Körper. Die Körpergewebe werden mit dem für den Stoffwechsel notwendigen Sauerstoff versorgt. Dieser schleppt den Stickstoff mit sich. Der Stickstoff löst sich physikalisch in allen Geweben, denn diese bestehen aus Wasser. Die Löslichkeit ist abhängig von der Kreislaufsituation: dem Druck, der Dauer der Exposition, der Belastung und der spezifischen Löslichkeit.

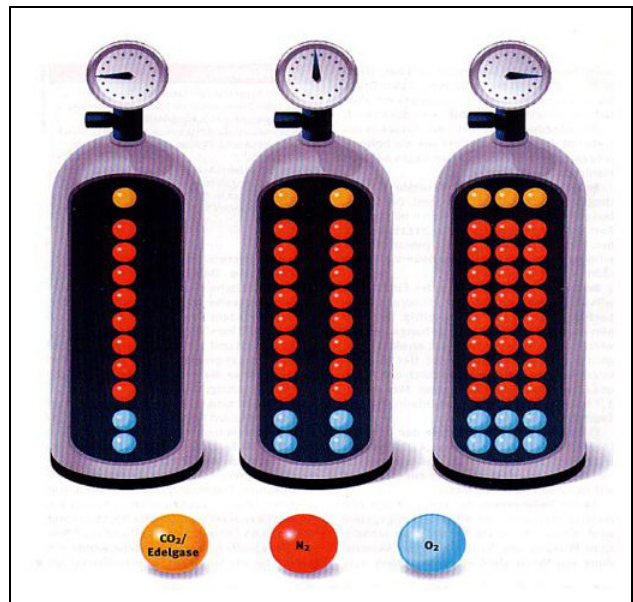


Abb. 33: Zunahme der Moleküle pro Volumen durch Komprimierung



Auf neuem Druckniveau beginnt nun eine Aufsättigung aller Körpergewebe mit Stickstoff, wobei er sich bis zur vollständigen Sättigung lösen kann. Dabei bestehen erhebliche Unterschiede in der Stickstoffaufnahme-fähigkeit verschiedener Gewebe. So lösen Fettgewebe beispielsweise fünfmal mehr Stickstoff als Blut. Das menschliche Gewebe ist in der Lage, einen gewissen Differenzdruck zwischen erworbenem, erhöhtem Stickstoffgewebedruck und Umgebungsdruck symptomlos zu akzeptieren. Beim Überschreiten dieses individuellen inneren Grenzwerts kommt es zu zunehmendem Wechsel des Aggregatzustands von gelöstem Stickstoff in die Gasphase. Auf allen Gewebestrukturerebenen vom Nervengewebe bis zu den stoffwechselbezogen langsamsten Geweben wie Bänder, Knorpel und Knochen beginnen dann organische Störungen aufzutreten, die klinisch als sogenannte Dekompressionserkrankung in Erscheinung treten und zu unverzüglicher spezifischer druckluftmedizinischer Behandlung zwingen.

Der Anstieg des Stickstoffs kann ab 3 bar eine Stickstoffnarkose verursachen, eine alkoholähnliche Wirkung im Gehirn. Dies kann mit individueller Verschiedenheit zu Störungen im Verhalten und Verringerung der manuellen Geschicklichkeit führen.

### 8.3 Ausführung der Druckluftarbeiten

Beim ersten Einstieg im Rahmen eines mehrschichtigen Drucklufteinsatzes mussten vor Aufnahme der Arbeiten die Abbaukammer und das Schneirad gereinigt werden. Für ein sicheres Begehen der Kammer wurden Podeste und Leitern in die dafür vorgesehenen Halterungen montiert (vgl. Abb. 34). Anschliessend konnten Werkzeugkontrollen oder –wechsel ausgeführt werden (vgl. Abb. 35). Das Drehen des Schneirads konnte dabei vom Verbindungsmann in der Schleusen-hauptkammer vor Ort erfolgen.

Vor der Bahnunterquerung mussten unter einem ehemaligen Tanklager die Werkzeuge kontrolliert werden. Doch unmittelbar nach dem Öffnen des Druckwandschiebers wurde ein stark ölhaltiger Geruch festgestellt, worauf sich die Mannschaft wieder ausschleuste. Mit speziellen Atemmasken konnte dann die Kontrolle ordnungsgemäss durchgeführt werden. Schälmesser und Räumler (vgl. Abb. 36) werden visuell und Rollenmeissel mit Hilfe einer Schablone kontrolliert (vgl. Abb. 37).

Die stark abrasive Geologie führte zu einer weitaus grösseren Abnutzung der Werkzeuge als erwartet. Bei Werkzeugkontrollen und –wechsel wurden insgesamt 438 Arbeitsstunden unter Überdruck von bis zu 2.6 bar geleistet. Dank der intensiven und seriös durchgeführten Kontrollen konnten Beschädigungen an den Werkzeughalterungen vermieden werden. In einem Bereich im sandigen Schotter wurden die Werkzeuge nach einem erfolgten Wechsel auf wenigen Vortriebsmetern stark abgeschliffen (vgl. Abb. 38). Mit drei Druckluftschichten wurden in fünf Arbeitstagen 42 Schälmesser, 10 Rollenmeissel und 8 Räumler ausgewechselt. Um Zeit gewinnen zu können, wurden für den Wochenendeinsatz Drucklufttechniker der Nordsee-taucher GmbH aufgeboden, welche innerhalb 24 Stunden auf Platz waren. Allfällige Schweissarbeiten unter Druckluft wären

auch durch diese spezialisierten Arbeiter ausgeführt worden, da die Belegschaft der ARGE dazu nicht ausgebildet und ausgerüstet war.



Abb. 34: Podeste und Leitern in der Abbaukammer



Abb. 35: Auswechseln von Schälmessern



Abb. 36: Praktisch neuwertiges Schälmesser





Abb. 37: Kontrolle eines Rollenmeissels



Abb. 38: Ausgewechselte, abgeschliffene Schälmesser



Abb. 39: Transport eines demontierten Rollenmeissels von der Materialschleuse zum Tübbingmagazin

Die rund 170 kg schweren Rollenmeissel müssen vom Ringbaubereich mit Kettenzügen in die Materialschleuse gehoben werden (vgl. Abb. 39). In der Arbeits- und Abbaukammer konnten die Werkzeuge ebenfalls mit Kettenzügen in die richtige Position transportiert werden. Je nach Zustand der Schrauben und

Keile dauerte der Wechsel eines Meissels gut 120 Minuten, was einer maximalen Aufenthaltszeit unter Druckluft bei einem Arbeitsdruck über 2.0 bar entspricht.

Bei mehreren hintereinanderfolgenden Drucklufteinstiegen wird der Bentonitpiegel in der Abbaukammer nicht jedes Mal wieder angehoben, um nicht Zeit für die Demontage der Leitern und Podeste sowie der Reinigung beim erneuten Einstieg zu verlieren. Wenn der Filterkuchen auszutrocknen beginnt und die Druckluft in den Boden entweicht, muss die Ortsbrust zur Gewährleistung deren Stabilität zwischen zwei Einstiegen wieder mit Bentonit benetzt werden. In Thun lag der Luftverbrauch bei versiegelter Ortsbrust bei rund 10 bis 15 m<sup>3</sup>/min. Stieg dieser auf über 30 m<sup>3</sup>/min an, wurde das Bentonitniveau wieder angehoben. Beim Einblasen einer hohen Luftmenge ist die Verständigung aufgrund des starken Lärms nicht mehr möglich.

#### 8.4 Rettung von Verunfallten in Überdruck

Bei Unfällen in der Arbeits- oder Abbaukammer im Überdruckbereich ist eine Rettung aus eigener Kraft nicht möglich. So haben die beiden Arbeitskollegen des eingestiegenen Dreier-teams dem Verunfallten zu bergen und gemäss Ablaufschema eine Lagebeurteilung vorzunehmen (vgl. Abb. 26). Bei einem leichten Ereignis wird der Verunfallte in der Arbeitskammer oder der Personenschleuse versorgt. Um eine effiziente Erste Hilfe-Leistung zu ermöglichen, hatten die Mitarbeiter beim Samariterverein Thun einen Kurs absolviert und kurz nach Vortriebsbeginn wurde unter fachkundiger Aufsicht eine Rettungsübung durchgeführt.

Bei einem schweren Unfall muss der Patient nach Rücksprache mit dem Druckluftarzt ausgeschleust werden, was aufgrund der engen Platzverhältnisse äusserst schwierig sein kann. Dabei ist nicht zu unterschätzen, dass die Blutung im Überdruck infolge verdünntem Blut massiv stärker ist als unter Atmosphärendruck. Je nach Verletzung können auf Anordnung des Druckluftarztes auch weitere Helfer eingeschleust werden. Nach der Dekompression erfolgt der Transport ins Freie und zum Spital nach Angaben des Druckluftarztes.

Drei Kadermitarbeiter des Rettungsdienstes STS AG hatten die «Arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchung für Arbeitnehmer Druckluft» der SUVA durchlaufen, womit für allfällige Rettungseinsätze in der Überdruckkammer rund um die Uhr eine professionelle medizinische Versorgung zur Verfügung gestanden wäre.

#### 8.5 Ausschleusen

Das Ausschleusen erfolgt unter normalen Bedingungen nur über die Hauptkammer, wobei die in der Tabelle 6 aufgelisteten Merkmale zu beachten sind. Die Eingangskammer bleibt dabei stets drucklos, damit im Notfall ein Ersthelfer jederzeit eingeschleust werden kann. Gemäss der Dekompressionstabelle senkt der Schleusenwärter den Druck vom Stützdruck  $p_1$  auf den Atmosphärendruck  $p_0$  ab (vgl. Abb. 40).

**Merkmale für das Ausschleusen**

- trockene, wärmende Kleidung anziehen
- Frieren vermeiden, ev. Wolldecken umlegen
- Flache Atmung vermeiden, auf korrekten Sitz der Atemmaske achten (auch beim Nebenmann)
- keine Zwangshaltung einnehmen, auf Einschlafen der Beine achten (Störung der Durchblutung)
- regelmässig aufstehen, Arme und Beine bewegen

Tab. 6: Merkmale für das Ausschleusen (Nordseetaucher GmbH)

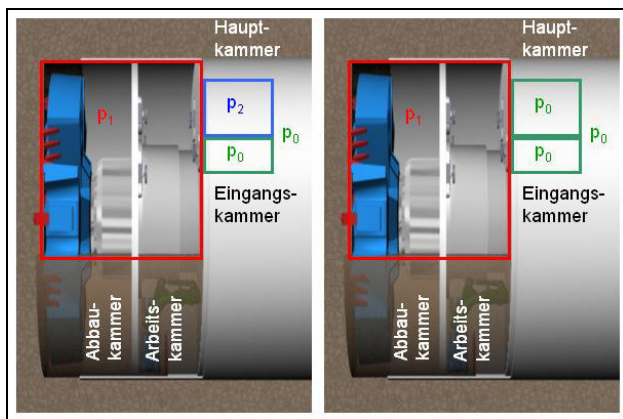


Abb. 40: Druckverhältnisse beim Ausschleusen

Die gelösten Gase müssen beim Ausschleusen über das Kreislaufsystem und die Lunge wieder ausgeschieden werden, was Zeit erfordert. Die Dauer der Dekompression ist abhängig von der Arbeitstiefe und der Zeit, die unter Druckluft verbracht wurde sowie dem Dekompressionsgas (Luft oder Sauerstoff). Die Dekompression findet stufenweise statt und wird unterhalb von 1 bar durch Sauerstoff unterstützt (vgl. Abb. 41). Dadurch wird das Druckgefälle vergrössert und die Dekompressionszeit nimmt um bis zu 50% ab. Für die Stickstoffentsättigung darf der Ausstossvorgang nicht zu schnell sein. Bis aller Stickstoff aus dem Körper ist, vergehen rund 24 Stunden.



Abb. 41: Sauerstoffdekompression

Der Körper toleriert eine gewisse Stickstoffübersättigung. Ist die Dekompression unzureichend oder findet sie zu schnell statt, können sich im Körper Stickstoffblasen bilden. Die dadurch auftretenden Gasembolien sind die häufigste Ursache der durch Arbeit im Überdruck entstehenden Schädigungen. Ausserdem kann die Freisetzung von Gasen innerhalb der Zellen vorübergehende oder bleibende Gewebeschäden verursachen. Sie können schon während der Druckminderung, aber auch Stunden danach, auftreten.

**Auswirkungen von Dekompressionsbeschwerden**

- im Kreislauf durch venöses Blut, welches durch das rechte Herz und die Lunge fliesst, «chokes» (z.B. Husten, Schmerzen hinter Brustbein, Blutdruckabfall, Kreislaufschock)
- im Kreislauf durch arterielles Blut, welches durch das linke Herz und das Gewebe fliesst und dieses verstopft, Ischämie (z.B. Hirninfarkt, Schlaganfallsymptomatik)
- in Körperzellen Schäden und Funktionsstörungen
- im Muskel-Skelettsystem schmerzende Gelenke «bends» und Muskelschmerzen
- unter der Haut Einblutungen und rot-blaue Flecken
- im Innenohr Störungen von Gehör und Gleichgewicht

Tab. 7: Auswirkungen von Dekompressionsbeschwerden (Dr. med. Karl-Peter Faesecke)

Prinzipiell müssen alle Formen von Dekompressionsbeschwerden (vgl. Tab. 7) unverzüglich mit Rekompensation und Sauerstoffatmung behandelt werden. Dies erfolgt in einer Behandlungskammer bei einem Minimaldruck von 1.2 bar für leichte Fälle.

Unter Anwendung der Sauerstoffdekompression konnte die Häufigkeit von Dekompressionserkrankungen signifikant gesenkt werden. Voraussetzung für solche Ergebnisse ist jedoch der sichere Umgang mit Sauerstoff. Die fortlaufende Analyse der Kammerluft als primäre Brandschutzmassnahme ist ebenso zwingend wie die unbedingte Einhaltung der Expositionsgrenzen für Sauerstoff nach Druck und Zeit. Sauerstoff ist ein Medikament mit der Gefahr einer gefährlichen Überdosierung. Die Einbindung eines fachkundigen ermächtigten Arztes in die Überwachung der Druckluftexpositionen sichert auch bei notfallmässigen Überschreitungen der Expositionsgrenzen vor den Gefahren einer Sauerstoffvergiftung.

Trotz aller Vorsichtsmassnahmen kann es vorkommen, dass während der Ausschleusung Krankheitserscheinungen auftreten. Zeigt eine Person solche Dekompressionsbeschwerden an, so muss der Ausschleusvorgang sofort unterbrochen und auf der momentanen Druckstufe geblieben werden, bis die Symptome verschwunden sind. Ist dies nach einigen Minuten nicht der Fall, so muss der Druck in der Schleuse wieder auf den vorherigen Druck erhöht werden. Der Schleusenwärter benachrichtigt den Druckluftarzt und schleust den Kranken



besonders vorsichtig nach Angaben desselben aus. Anschliessend sind die entsprechenden Behandlungsmassnahmen wie Erste Hilfe oder Transport in die Behandlungskammer zur Rekompensation auszuführen.

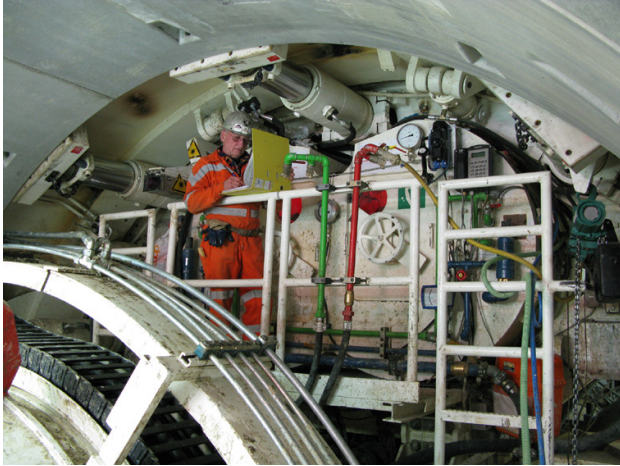


Abb. 42: Schleusenwärter notiert die Daten im Schleusenbuch

### 8.6 Nach dem Ausschleusen

Nach dem Ausschleusen ist eine körperliche Belastung während mindestens einer Stunde möglichst zu vermeiden. Das Ausführen von leichten Arbeiten wie Reinigung und Kontrolle des Materials ist möglich. Das Hinausfahren mit einer Stollenbahn ist aufgrund der Vibrationen zu vermeiden. Denn bei Teilsättigung kann in Normalatmosphäre das überschüssige Gasvolumen durch externe Energiezufuhr (Vibrationen, Schlaglöcher, abrupte Bewegungen etc.) zu Gasen zusammenfliessen. Dies führt zum gleichen Effekt wie beim Schütteln einer kohlen-säurehaltigen Mineralwasserflasche. Die Reduktion des Umgebungsdrucks wie beispielsweise Lufttransport kann die Blasenbildung verstärken.

Treten nach Abschluss der Arbeiten Symptome von Dekompressionsbeschwerden auf, sind gemäss Ablaufschema die Kadermitarbeiter und der Druckluftarzt zu informieren (vgl. Abb. 26). Dieser entscheidet, ob ein erneutes Einschleusen und langsames Ausschleusen auf der Baustelle erfolgt oder ob die REGA aufgeboten und der Patient in eine Behandlungskammer nach Basel oder Lausanne transportiert wird.

Beschwerden treten zu 90% in unteren Extremitäten, v.a. in Gelenken und weniger in Muskeln auf. Durch das Sitzen in der engen Personenschleuse findet in den Beinen keine Durchblutung statt. Das Blut steht und nach dem Ausschleusen wird dieses beim Gehen in Bewegung gesetzt. Damit werden die Schmerzen erst spürbar.

Die Dauer bis zum Auftreten der Beschwerden kann nach Erfahrung bis zu 14 Stunden betragen. Jene zum Aufsuchen der stationären Behandlungskammer beträgt bis zu 23 Stunden nach dem Ausschleusen. Die Merkmale nach dem Ausschleusen sind in Tab. 8 aufgeführt.

### Merkmale nach dem Ausschleusen

- schwere körperliche Arbeit (z.B. Treppenturm steigen) sowie Zwangshaltungen, Erschütterungen und Vibrationen vermeiden
- nicht zu lange und zu heiss duschen, reichlich trinken
- nach Beendigung der Arbeit in Druckluft sind folgende Wartezeiten vor dem Verlassen der Baustelle einzuhalten:
  - nach dem Ausschleusen mit einer Druckstufe: 30 Min.
  - nach dem Ausschleusen mit zwei Druckstufen: 60 Min.
  - bei Entfernen von der Arbeitsstelle für länger als 12 Stunden: 90 Min.
- vor Antritt von Flugreisen bzw. Bergfahrten ist ein druckluftfreies Intervall von mind. 24 Stunden einzuhalten
- bei den ersten Anzeichen von Druckfallstörungen sind unverzüglich der Baustellenchef und der Betriebshelfer sowie der Druckluftarzt zu informieren, der alles weitere veranlasst. Abwarten verschlimmert die Symptome und verschlechtert die Heilungsaussicht!
- Zu Druckfallstörungen können gehören:
  - Juckreiz und / oder rötlich – blaue Verfärbung der Haut
  - Schmerzen in Muskeln und / oder Gelenken
  - Schmerzen beim tiefen Atmen
  - Kreislaufstörungen
  - Schwindelgefühl, Übelkeit
  - Gefühlsstörungen in Armen und Beinen

Tab. 8: Merkmale nach dem Ausschleusen (Nordseetaucher GmbH)

Nach Möglichkeit wurden am Freitag vor der Heimreise Druckluftarbeiten vermieden. Die deutsche Druckluftverordnung schreibt vor, dass bei Arbeiten in Druckluft bei einem Arbeitsdruck von mehr als 1 bar vor Entfernung von der Arbeitsstelle, die länger als 12 Stunden dauert, 90 Minuten Wartezeit einzuhalten sind. Für den Fall, dass dennoch Dekompressionsbeschwerden auftreten, wurde den Druckluftarbeitern eine Notfallkarte abgegeben (vgl. Abb. 43).



Abb. 43: Druckluft-Notfallkarte

### 8.7 Brandschutz bei Druckluftarbeiten

Bei Arbeiten in Druckluft sind aufgrund des hohen Sauerstoffgehalts besondere Massnahmen für den Brandschutz erforderlich. Dazu zählen der primäre Brandschutz als Brandverhütung und der sekundäre als Brandbekämpfung.

### Brandverhütung

- Entfernen beweglicher brennbarer Stoffe aus der Arbeitskammer (Lagern verboten)
- Sichern nicht beweglicher brennbarer Teile durch nass halten und/oder abschirmen (z.B. durch nicht brennbare Decken)
- Prüfen und Überwachen der Brenngeräte
- nur qualifiziertes Fachpersonal einsetzen
- Bereitstellen von Schutzkleidung
- Gasflaschen dürfen nicht in der Arbeitskammer gelagert werden
- Brandwachen bei Feuerarbeiten (z.B. Schweißen) aufstellen
- Besondere Regeln beim Schweißen und Schneiden in Druckluft beachten

Tab. 9: Brandverhütung (Nordseetaucher GmbH)

### Brandbekämpfung

- Bereitstellen von erforderlichen Löschmitteln wie:
  - Feuerlöscher (Betriebsdruck beachten)
  - Wasserschlauch (Betriebsdruck beachten)
  - Löschdecken
- Einsatz von geeigneten Helfern in ausreichender Zahl
- Brandschutz und Überwachung von Gasflaschen
- Personal, welches nicht zur Brandbekämpfung eingeteilt ist, muss die Arbeitskammer unverzüglich verlassen und sich in die Schleuse begeben
- externe Feuerbekämpfung nur im äussersten Notfall einsetzen, besser die Arbeitskammer räumen und den Brand ersticken

Tab. 10: Brandbekämpfung (Nordseetaucher GmbH)

### 8.8 Auswertung der Drucklufteinsätze

Im Diagramm in Abb. 44 sind die Schleusungen der drei häufigsten Druckbereiche bei 1.6, 1.9 und 2.2 bar aufgezeichnet. Auf der x-Achse ist die Aufenthaltszeit in Überdruck und auf der y-Achse die Ausschleusungszeit jeweils in Minuten aufgetragen. Alle Expositionen sind oberhalb der vorgegebenen Ausschleusungsachse geblieben, d.h. es gab keine fehlerhafte Schleusenbedienung – ein Lob den Schleusenwärtern. Im Weiteren ist ersichtlich, dass die theoretisch möglichen Maximalzeiten von 120 Minuten bei 2.2 bar sowie 180 Minuten bei 1.6 und 1.9 bar voll ausgenutzt wurden. Die bisherigen Drucklufttabellen berücksichtigten nur den Dekompressionsaspekt bei maximaler Aufenthaltsdauer, nicht aber die endliche Belastbarkeit der Druckluftarbeiter. Dies wurde beim Bau des Hochwasserentlastungstollens Thun mit dem Erfolg geändert, dass keine Druckluftbeschwerden aufgetreten sind.

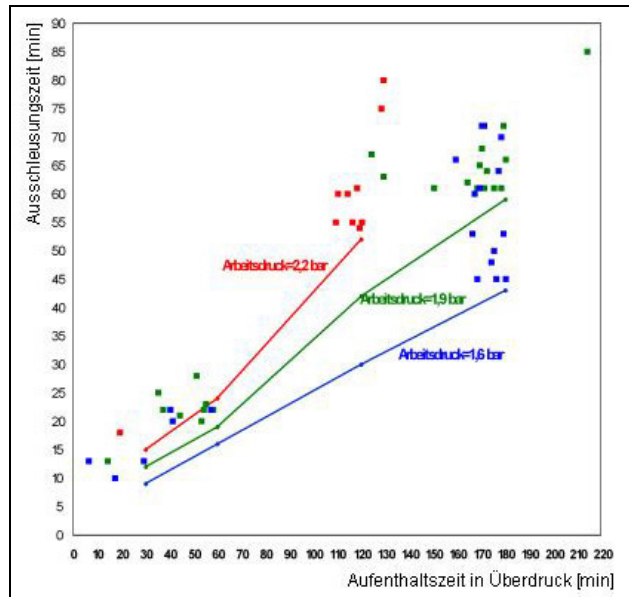


Abb. 44: Diagramm der Schleusungen der drei häufigsten Druckbereiche (Dr. med. Klaus-Peter Faesecke)

### Am Bau Beteiligte

#### Bauherrschaft

Bund, Kanton Bern und Stadt Thun

#### Projekt- und Bauleitung

IG ThunerSeeAare (IG TSA):

- Kissling + Zbinden AG, Spiez
- IUB Ingenieur-Unternehmung AG, Bern
- Bächtold & Moor AG, Bern

#### Oberbauleitung

Marchand + Partner AG, Bern

#### Geologe

Geotechnisches Institut, Spiez

#### Überwachung

Riesen & Stettler AG, Urtenen-Schönbühl

#### Bauausführung

ARGE Hochwasserentlastungstollen Thun:

- Walo Bertschinger AG, Bern/Zürich
- PraderLosinger SA, Sion/Zürich

#### Betriebskonzept Druckluftarbeiten

- Druckluftarzt: Dr. med. Karl-Peter Faesecke, Hamburg (D)
- Druckluftarbeiten: Nordseetaucher GmbH, Ammersbek (D)

Tab. 11: Am Bau Beteiligte

Weitere Informationen: [www.hochwasserschutzthunersee.ch](http://www.hochwasserschutzthunersee.ch)