

# Diplomarbeit

zum Erwerb des akademischen Grades eines  
Diplomingenieurs  
der Studienrichtung Bergwesen

ausgeführt am  
Lehrstuhl für Subsurface Engineering  
an der Montanuniversität Leoben

von Joachim Geißbauer  
Schubertweg 5, 4063 Hörsching

Hörsching, im November 2006

Thema

**Entwicklung einer  
In-Situ Langzeit-Druckversuchsanlage**

### **Eidesstattliche Erklärung:**

Hiermit versichere ich eidesstattlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angeführten Quellen nicht benutzt und die wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Hörsching, im November 2006

Joachim Geißbauer

## **Danksagung**

An dieser Stelle sei Herrn em.O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Johann Golser bzw. Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Robert Galler für die Ausbildung und für die Ermöglichung der Durchführung dieser Arbeit am Lehrstuhl für Subsurface Engineering ehemals Institut für Geomechanik, Tunnelbau und Konstruktiven Tiefbau gedankt.

Besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Stefan Kainrath-Reumayer für seine Geduld und Unterstützung bei der Ausarbeitung dieser Diplomarbeit, ebenso Herrn Dipl.-Ing. Dr.mont. Gerhard Pittino für seine Betreuung, sowie allen Mitarbeitern am Lehrstuhl für Subsurface Engineering für ihre freundliche Hilfe.

Weiterer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Johann Golser jr., Geschäftsführer der Firma Geodata, für die gute Zusammenarbeit.

Dank auch an die Herren Ing. Rainer Eibl und Dipl.-Ing. (FH) Harald Eibl, Geschäftsführer der Firma Eibl Hydraulik & Drives OEG, für die Einführung in ihre Welt der Hydraulik und Regelungstechnik.

Besonderer Dank an meine Freundin Andrea, meine Eltern und Geschwister, die immer für mich da waren.

## **Abstract**

The thesis describes the development of an in-situ longterm testing device for shotcrete in subsurface construction especially tunnelling.

The novel concept integrates the specimen as part of the shotcrete lining, which is therefore exposed to the same influences. The testing device is able to load the specimen in freely selectable stress-levels in a range of 0,3 to 25 MPa.

The necessary load for the testing is created by a hydraulic-unit and a hydraulic cylinder with an operating pressure of 700 bar. The constant load is ensured by a closed loop pressure control.

The layout and the functionality of the four main components – casing hydraulic installations, closed loop control, data acquisition and recoding – are described.

The assembly and the instrumentation of the unit and the specimen are demonstrated by an application on a construction site. Furthermore a listing of some reference installations, and their measuring results and graphical interpretations are part of this thesis.

## **Kurzfassung**

Die Diplomarbeit beinhaltet die Entwicklung einer In-Situ Langzeit-Druckversuchsanlage für Spritzbeton im untertägigen Hohlraumbau, insbesondere im Tunnelbau.

Das neuartige Konzept sieht den Probenkörper als integralen Bestandteil der Spritzbetonschale, der denselben Umwelteinflüssen unterliegt. Die Versuchsanlage kann den Probenkörper frei wählbaren Belastungsstufen innerhalb eines Spannungsbereiches von 0,3 bis 25 MPa aussetzen.

Die erforderliche Kraft wird mittels Hydraulikaggregat und Hydraulikzylinder mit einem maximalen Arbeitsdruck von 700 bar erzeugt. Die konstante Belastung innerhalb einer Prüfstufe wird dabei durch eine Druck-Regelung gewährleistet.

Der Aufbau und die Funktionsweise der vier Hauptkomponenten – Schalung, Hydraulikanlage, Regelung, Datenaufzeichnung – werden beschrieben.

Anhand eines Baustelleneinsatzes werden der Einbau und die Instrumentierung der Anlage bzw. des Probenkörpers dargestellt. Weiters erfolgt eine Auflistung einiger Referenzinstallationen, der dort erhaltenen Messergebnisse, sowie deren grafische Auswertungen.

---

# Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung .....	2
2	Zusammenfassung .....	3
3	Einleitung.....	4
4	Entwicklung und Aufbau einer einaxialen In-Situ Druckversuchsanlage .....	9
4.1	Anforderungen an die Druckversuchsanlage .....	9
4.2	Beschreibung der Hauptkomponenten der In-Situ Druckversuchsanlage .....	10
4.2.1	Hydraulikanlage.....	10
4.2.1.1	Hydrauliköltank (Pos. 01).....	12
4.2.1.2	Drehstrommotor (Pos. 02) .....	14
4.2.1.3	Hydraulikpumpe (Pos. 03).....	16
4.2.1.4	Wegesitzventile 3/2 bzw. 2/2 (Pos. 08, Pos. 10).....	17
4.2.1.5	10 t Hydraulikzylinder doppelt wirkend (Pos. 11) .....	19
4.2.1.6	100 t Hydraulikzylinder einfach wirkend (Pos. 12).....	20
4.2.1.7	Hydrokleinspeicher Typ AC (Pos. 14-17) .....	21
4.2.1.8	Druckabhängige Schließventile (Pos. 19-20) .....	22
4.2.1.9	Frequenzumrichter 4 kW (Pos. 21).....	23
4.2.2	Regelung .....	24
4.2.2.1	Anforderungen an die Regelung .....	24
4.2.2.2	Regelungsaufbau.....	24
4.2.2.3	Funktionsweise der In-Situ Druckversuchsanlage.....	31
4.2.3	Schalung.....	32
4.2.4	Datenaufzeichnung .....	35
5	Versuche .....	38
5.1	Einbau .....	38
5.2	Versuchsergebnisse.....	45
5.2.1	Versuch Birgl 01 .....	45
5.2.2	Versuch Terfens 01 .....	47
5.2.3	Versuch Terfens 02 .....	49
6	Abschließende Bemerkungen .....	52
7	Literatur .....	53

# 1 Aufgabenstellung

„Die Besonderheit des Tunnelbaus aus Spritzbeton besteht darin, dass bereits dem jungen Spritzbeton, der sich noch im Erhärtungsprozess befindet, große Verformungen aufgezwungen werden. Dieser Spritzbeton entwickelt erst mit der Zeit seine endgültige Festigkeit und Steifigkeit, seine Verformungseigenschaften zeichnen sich durch ein ausgeprägtes Kriechverhalten aus.

Die immer wieder auftretenden Schwierigkeiten mit der Interpretation von Messergebnissen aus Versuchen mit hydraulischen Druckmessdosen im Spritzbeton und die mangelnde Aussagekraft führten zu vermehrtem Einsatz von Dehnungsmessungen im Spritzbeton und zu weiteren Untersuchungen der Zusammenhänge von Dehnungen und Spannungen im Spritzbeton.“ [5]

Die Berechnung des Auslastungsgrades einer Spritzbetonschale kann nun über geeignete Materialgesetze erfolgen. Dazu ist es notwendig die Materialparameter durch Versuche zu ermitteln. Beim Testen von jungem Spritzbeton zur Gewinnung von Materialparametern stößt man immer wieder auf die Schwierigkeit, Betonproben zu erstellen, und diese ohne strukturelle Veränderung durch den Transport und in kurzer Zeit in eine Versuchsanlage zu überstellen.

Um diese Probleme auszuschließen und die Zeitdauer zwischen Einspritzvorgang und Versuchsbeginn so weit als möglich zu verringern, soll im Zuge dieser Diplomarbeit eine für den Baustellenbetrieb geeignete einaxiale In-Situ Langzeit-Druckversuchsanlage für Spritzbeton entwickelt werden.

Weiters wurde eine Schalung entwickelt, die an der Tunnellaibung befestigt wird und welche es erlaubt einen Probenkörper mit definierter Querschnittsfläche als Teil der Schale herzustellen, aber von dieser getrennt zu beproben. [3]

Durch die Kombination einer In-Situ Druck-Versuchsanlage und dem Herstellen des Probenkörpers als Teil der Spritzbetonschale, ist es möglich die Versuchsdurchführung auf die Baustelle zu verlegen. Dadurch werden die Probleme der Probengewinnung, des Transportes und der zeitverzögerten Beprobung im Labor eliminiert.



## **2 Zusammenfassung**

Die Diplomarbeit beinhaltet die Entwicklung einer In-Situ Langzeit-Druckversuchsanlage für Spritzbeton im untertägigen Hohlraumbau, insbesondere im Tunnelbau.

Das neuartige Konzept sieht den Probenkörper als integralen Bestandteil der Spritzbetonschale, der denselben Umwelteinflüssen unterliegt. Die Versuchsanlage kann den Probenkörper frei wählbaren Belastungsstufen innerhalb eines Spannungsbereiches von 0,3 bis 25 MPa aussetzen.

Die erforderliche Kraft wird mittels Hydraulikaggregat und Hydraulikzylinder mit einem maximalen Arbeitsdruck von 700 bar erzeugt. Die konstante Belastung innerhalb einer Prüfstufe wird dabei durch eine Druck-Regelung gewährleistet.

Der Aufbau und die Funktionsweise der vier Hauptkomponenten – Schalung, Hydraulikanlage, Regelung, Datenaufzeichnung – werden beschrieben.

Anhand eines Baustelleneinsatzes werden der Einbau und die Instrumentierung der Anlage bzw. des Probenkörpers dargestellt. Weiters erfolgt eine Auflistung einiger Referenzinstallationen, der dort erhaltenen Messergebnisse, sowie deren grafische Auswertungen.

### 3 Einleitung

Seit dem Beginn des Einsatzes der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode stellt Spritzbeton in Verbindung mit Ankern, Stahlbögen, etc., aber auch ohne diese eines der wesentlichen Stützmittel bei der Anwendung der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode dar.

„Die Bestimmung der formalen Zusammenhänge (im speziellen der Kriechverformung) von jungem Spritzbeton ist mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden. Das Hauptproblem liegt darin, die Einflüsse aus der fortschreitenden Betonerhärtung auszuschließen. Das bedeutet, dass nur eine begrenzte Zeit zur Probenverarbeitung bzw. Versuchsdurchführung verfügbar ist.“ [5]

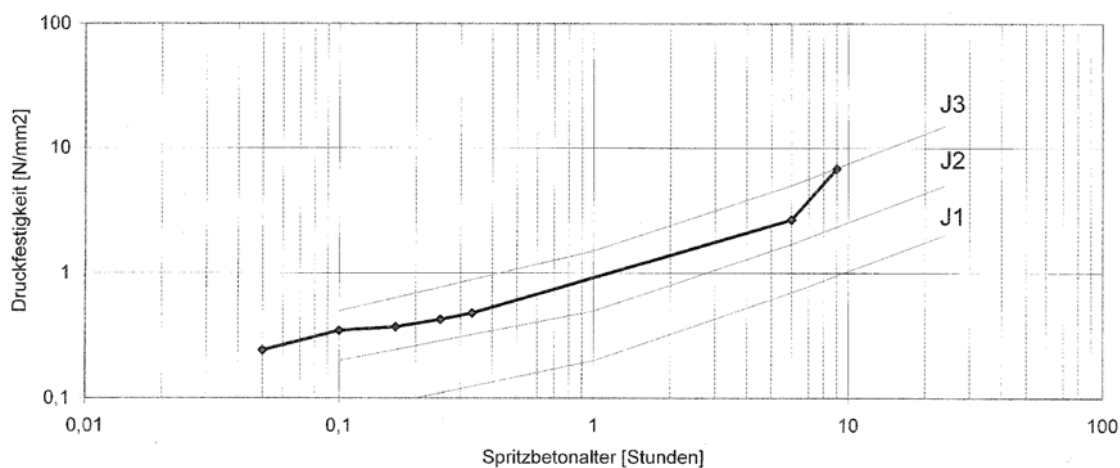


Abb. 1.: Beispiel Frühfestigkeitsentwicklung junger Spritzbeton

„Die bisher im Labor durchgeführten Versuche an Spritzbeton haben den Nachteil, dass von der Probenherstellung auf der Baustelle über den Weg ins Labor mit den Problemen der Erschütterung dieser jungen Proben während des Transportes und dem Zeitaufwand für den Probeneinbau in die Druckpresse und für die Instrumentierung wertvolle Zeit verloren geht. In dieser Zeit gehen im Spritzbeton wesentliche Abbinde- und Erhärtungsvorgänge vor sich, währenddessen der Spritzbeton im Tunnel in Wirklichkeit durch aufgezwungene Verformungen beansprucht wird.“ [5]

„Bisher hatte man aus der Spritzbetonschale Kernbohrungen zur Ermittlung der Materialparameter für Spritzbeton entnommen. Da die Beanspruchungsrichtung einer Tunnelschale nicht in Spritzrichtung, sondern in Umfangsrichtung erfolgt, lieferten diese Versuche nicht hinreichend genau Werte. Dies gilt insbesondere für stahlfaserbewehrten Spritzbeton, der sich sehr anisotrop verhält.“ [5]



Abb. 2.: Ergebnisse von Bohrversuchen [3]

Das Bohren von Prüfkernen hat einen weiteren Nachteil: Bohrbarkeitsversuche zur Gewinnung von jungem Spritzbeton durch Kernbohrungen zeigten, dass erst nach 8 Stunden ein für weitere Versuche brauchbarer Kerngewinn möglich war. [3] (vgl. Abbildung 2)

„Die notwendigen Langzeit-Druckversuche sollten daher auf die Baustelle verlegt werden, wozu spezielle, für den Baustellenbetrieb geeignete, Versuchsstände vorhanden sein müssen. So besteht die Möglichkeit, das Materialverhalten von Spritzbeton von Anfang an zu erfassen und nicht Zeit zu verlieren, die auch im praktischen Tunnelbau für die Spritzbetonbeanspruchung ausschlaggebend ist.“ [5]

Im Zuge dieser Überlegungen wurden am Lehrstuhl für Subsurface Engineering, vormals Institut für Geomechanik, Konstruktiven Tiefbau und Tunnelbau in Zusammenarbeit mit der Firma Geodata Leoben mehrere Arbeiten verfasst und ein Prüfstand für den praktischen Einsatz auf einer Tunnelbaustelle entwickelt. (Probst 1999 [1], Müller 2000 [4])



Abb. 3.: In-Situ-Versuchsanlage DA Müller (2000) [4]

Diese erste Langzeitdruckversuchsanlage besteht im Wesentlichen aus drei Hauptbestandteilen:

1. Pressrahmen mit Hydraulikzylinder zur Aufnahme des Probenkörpers
2. Regelung inklusive Kompressor
3. Steuerungseinheit mit PC

Der Probenkörper entsteht durch direktes Einspritzen in den Pressrahmen und ist somit nicht Teil des Bauwerkes.

Der Inhalt dieser Diplomarbeit ist eine Weiter- bzw. Neuentwicklung einer Langzeitdruckversuchsanlage für den Baustelleneinsatz. Der wichtige Unterschied zu bisherigen Entwicklungen der oben genannten Arbeiten ist, dass vor dem Aufbringen

des Spritzbetons eine Holzschalung an der Tunnellaibung montiert und der Probenkörper durch den Einspritzvorgang als Teil des Tunnelbauwerks hergestellt wird.

Diese Vorgehensweise verbindet mehrere Vorteile:

- a) Keine Kernbohrungen und Probenbearbeitung notwendig
- b) Wirklichkeitsnahe Orientierung des Probenkörpers
- c) Keine zeitliche Verzögerung durch Herstellung und Transport der Probe
- d) Bauwerk und Probe entstehen in einem Einspritzvorgang und unterliegen somit selben Umgebungseinflüssen

Die folgende Abbildung zeigt die Orientierung des Probenkörpers bei Kernbohrungen und bei der zu entwickelnden In-Situ Druckversuchsanlage.

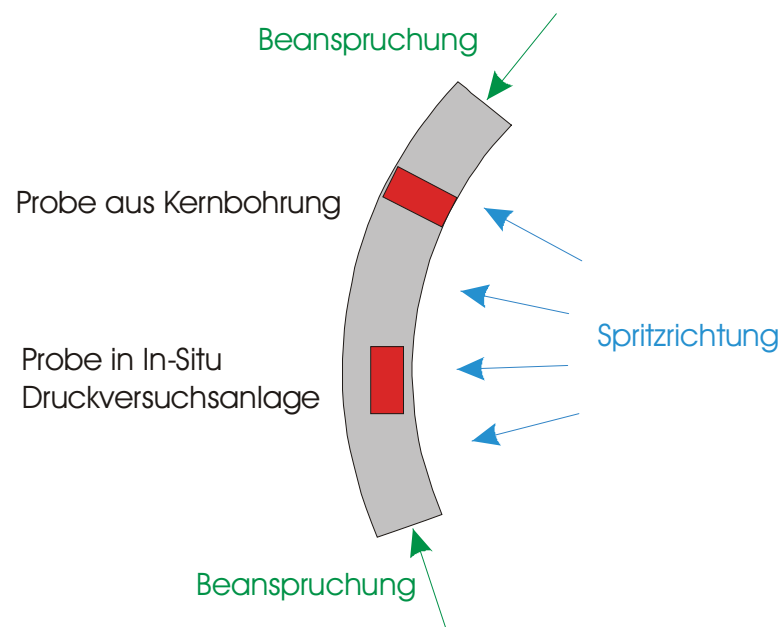


Abb. 4.: Probenkörper durch Kernbohrung und als Teil der Spritzbetonschale in In-Situ Schalung [nach 1]

Um die oben angeführten Vorteile ausnützen zu können war es notwendig eine neue In-Situ Langzeit-Druckversuchsanlage zu entwickeln. Die Anlage besteht aus folgenden Hauptbestandteilen.

1. Hydraulikaggregat und Hydraulikzylinder
2. Regelung mit Frequenzumrichter zum
3. Schalung
4. Steuerungseinheit mit PC

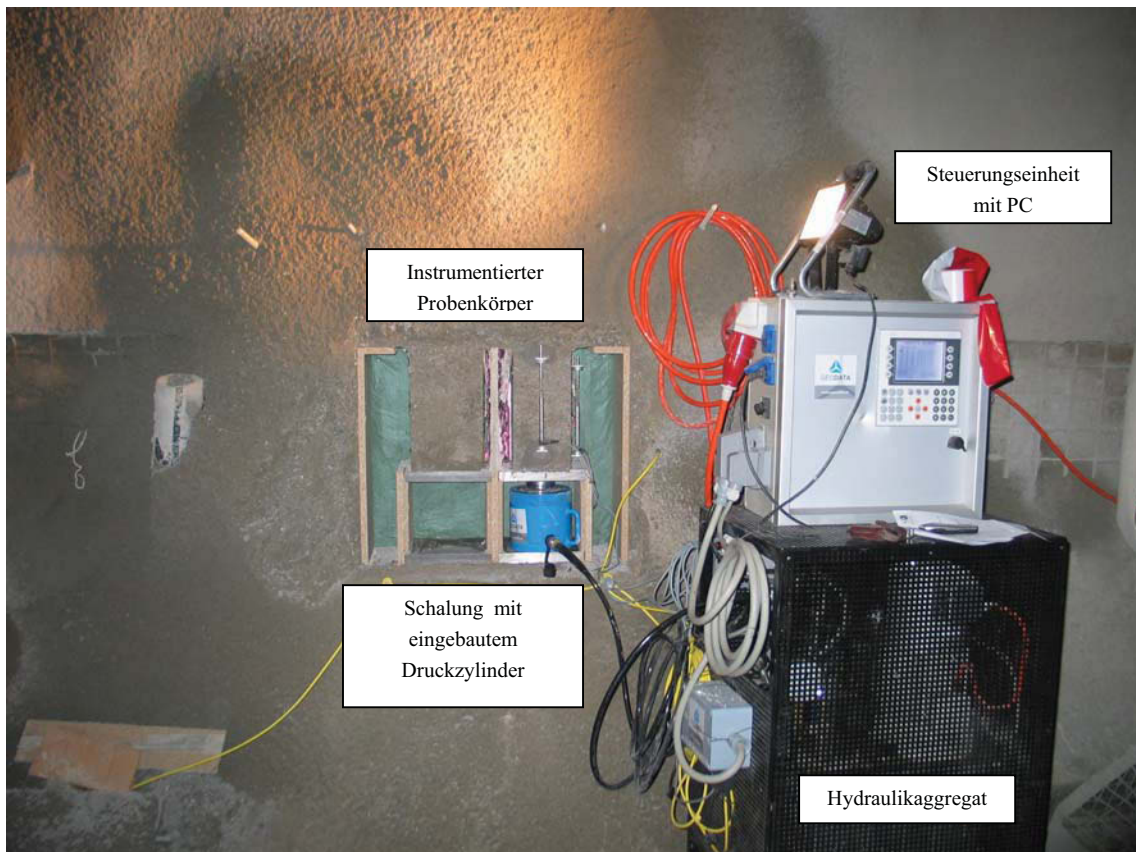


Abb. 5.: *Einaxiale In-Situ Langzeit-Druckversuchsanlage*

Abbildung 5 zeigt die In-Situ Druckversuchsanlage und den instrumentierten Probenkörper während eines Langzeitversuches.

Die Beschreibung der Hauptbestandteile und die Funktionsweise der Anlage erfolgt im Kapitel 4 Entwicklung und Aufbau einer einaxialen In-Situ Druckversuchsanlage.

## 4 Entwicklung und Aufbau einer einaxialen In-Situ Druckversuchsanlage

### 4.1 Anforderungen an die Druckversuchsanlage

Für die Weiter- bzw. Neuentwicklung einer In-Situ Druckversuchsanlage stellten sich folgende Anforderungen.

- Kompakte baustellengerechte Ausführung der Hydraulikanlage

Die Einaxiale In-Situ Langzeit-Druckversuchsanlage wird während des gesamten Druckversuches im Tunnel eingesetzt. Somit ist eine wichtige Voraussetzung für die Funktionalität eine kompakte und wartungsarme Anlage, die so konzipiert werden muss, dass sie den Umwelteinflüssen im Tunnelvortrieb (Staub, Temperatur, Feuchtigkeit) unbeschadet ausgesetzt werden kann. Weiters darf durch die Versuchsanlage der Bauablauf nicht behindert werden. Der Einbau und Umsetzungsvorgänge sollen mit möglichst geringem Personal- bzw. Maschineneinsatz vollzogen werden. Daraus ergibt sich eine Begrenzung in Dimension und Gewicht.

- Einfacher Schalungsaufbau

Die Einbauzeit der Schalung und damit die Störung des Bauablaufes ist zu minimieren. Bei der Ausführung der Schalung ist darauf zu achten, dass beim Einspritzvorgang ein qualitativ hochwertiger Probenkörper (Homogenität, Rückprallfrei, keine Spritzschatten) entsteht. Weiters darf an der Probenkörperrückseite kein Kontakt mit der Tunnellaibung bestehen, um eine reibungsfreie Belastung der Probe zu garantieren. Bei den Baumaterialien ist auf eine kostengünstige Ausführung zu achten.

- Unkomplizierte schwingungsfreie Regelung

Wie sich bei Vorversuchen einer In-Situ Prüfanlage (Meldearbeit Kainrath / Geißbauer 2002 [2]) gezeigt hat, muss die Regelung bei Lastwechseln ein Überschwingen des Druckkreislaufes und ein damit verbundenes Induzieren von Spannungsspitzen in die Probe verhindern. Weiters muss bei Stromausfällen gewährleistet sein, dass der eingestellte Druck in der aktuellen Laststufe gehalten wird und es bei Wiederaufnahme des Stromkreislaufes zur Fortsetzung des vorgegebenen Belastungsplanes kommt.

- Überwachungsarme Datenaufzeichnung

Aufgrund der Dauer des Versuches (28 Tage) muss die Datenaufzeichnung vollautomatisch erfolgen.

## ***4.2 Beschreibung der Hauptkomponenten der In-Situ Druckversuchsanlage***

Die Abbildung 6 zeigt die im Tunnel installierte In-Situ Druckversuchsanlage. In den folgenden Abschnitten werden die Hauptkomponenten (Hydraulikanlage, Regelung, Schalung und Datenaufzeichnung) und deren Funktionsweise näher erläutert.



*Abb. 6.: In-Situ Druckversuchsanlage*

### **4.2.1 Hydraulikanlage**

Zu Beginn der Entwicklung der Druckversuchsanlage stand die Überlegung bezüglich des Probenquerschnittes und dem dadurch notwendigen Druckbereich des Hydraulikaggregates um die gewünschten Belastungsstufen einstellen zu können.

Ausgehend von einem Spannungsbereich von 0,3 bis 25 MPa im Probenquerschnitt und einem Probenquerschnitt von 200\*200 mm ergab sich bei einem verwendeten 100 t Hydraulikzylinder mit einer Kolbenfläche von 143,1 cm<sup>2</sup> ein notwendiger Druckbereich von 0 bis 700 bar für das Hydraulikaggregat.



	Probenspannung	Probenfläche	Kolbenfläche	Anlagendruck
	[MPa]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[bar]
UntererGrenzwert	0,3	400	143,1	8,4
ObererGrenzwert	25	400	143,1	698,8

Tab. 1: Grenzwerte Druckbereich Hydraulikaggregat

Nach dem Festsetzen des Druckbereiches und der Auswahl des Hydraulikzylinders konnten nun die anderen Hydraulikkomponenten der In-Situ Druckversuchsanlage gewählt werden.

Die Hauptkomponenten der Anlage werden an Hand des folgenden Hydraulikschaltplans und der zugehörigen Datenblätter erklärt.

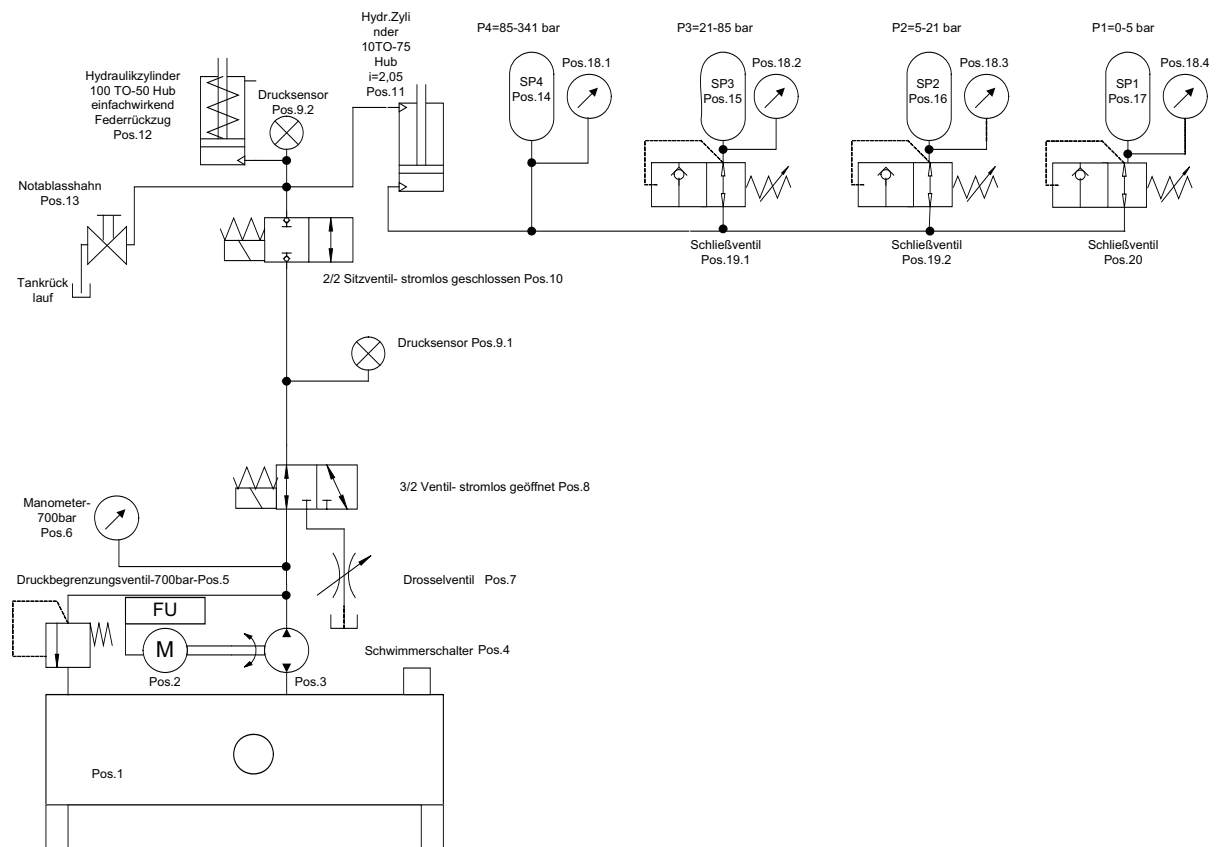


Abb. 7.: Hydraulikschaltplan In-Situ Druckversuchsanlage[13]

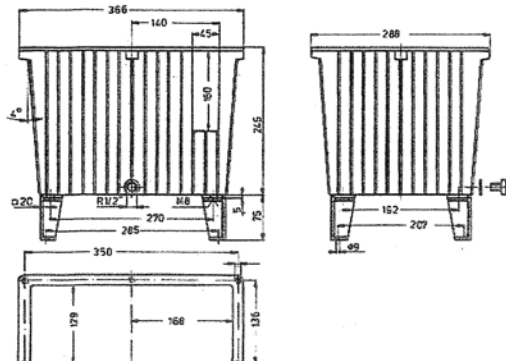
Pos. 01	Hydrauliktank - Nutzvolumen 20 Liter
Pos. 02	E-Motor 3 kW
Pos. 03	Radialkolbenpumpe 0,9 L/min bei n = 1450 U/min
Pos. 04	Schwimmerschalter
Pos. 05	Druckbegrenzungsventil - 700 bar
Pos. 06	Manometer - 700 bar Anzeige
Pos. 07	Drosselventil
Pos. 08	3/2 Magnetventil - 24 V - stromlos offen (P-A)
Pos. 09	Drucksensor
Pos. 10	2/2 Sitzventil - stromlos geschlossen
Pos. 11	Hydraulikzylinder 10 TO - 75 Hub - doppeltwirkend
Pos. 12	Hydraulikzylinder 100 TO - 50 Hub - einfachwirkend
Pos. 13	Kugelhahn - 700 bar
Pos. 14	Speicher 4AC13 - 1/4
Pos. 15	Speicher 3AC13 - 1/4
Pos. 16	Speicher 2AC13 - 1/4
Pos. 17	Speicher 1AC13 - 1/4
Pos. 18	Manometer
Pos. 19	Schließventil bis 100 bar
Pos. 20	Schließventil bis 40 bar
Pos. 21	Frequenzumrichter 4 kW

Tab. 2: Stückliste Hydraulikschaltplan In-Situ Druckversuchsanlage [13]

#### 4.2.1.1 Hydrauliköltank (Pos. 01)

Da die Anzahl und Dimension aller Hydraulikkomponenten klein ist, wird nur ein geringes Hydraulikölvolumen benötigt. Auch die bewegte Ölmenge ist durch die geringe Anzahl der Schaltvorgänge während eines Versuches gering und daher die Wärmeentwicklung minimal. Deshalb kommt ein Hydrauliktank mit einem Fassungsvermögen von 20 l zur Ausführung. Weiters soll das Gesamtgewicht der Anlage nicht zu groß werden, deswegen wird ein Aluminiumbehälter der Firma Rahmer und Jansen mit einer Masse von 2,2 kg verwendet.

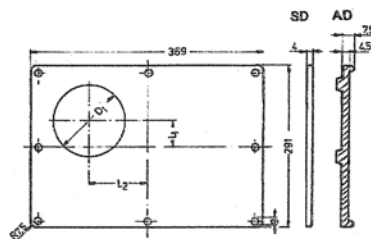
**Alubehälter NG 20 - Al oiltank NG 20**



**Zubehör / Accessories**

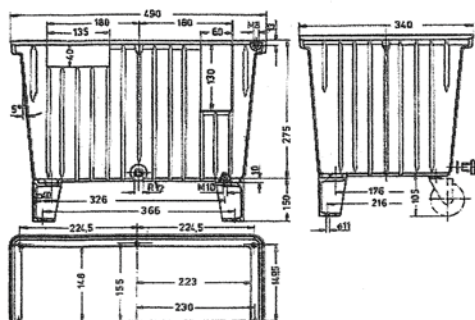
- Flachdichtung / Flatgasket
- Gußfüße 75 mm hoch / Cast feet 75 mm high
- Verschlussschraube G1/2" mit Dichtung / Drain plug G1/2" with seal
- Ölstandsanzeiger SF1 oder SF2 / Oil level gauge SF1 or SF2
- Einfüll- und Belüftungsfilter E 35 ES / Filler incl. breather filter E 35 ES

**Stahl- oder Aludeckel - Steel- or Al-lid**



Stahldeckel Steellid	Maße / Dimensions [mm]			Gewicht Weight [kg]
	L1	L2	D1	
SD 20	----	----	----	3,6
SD 20/160	45	85	112	3,1
SD 20/200	25	65	147	3,0
SD 20/250	----	40	192	2,2
Aludeckel Al-lid	Maße / Dimensions [mm]			Gewicht Weight [kg]
	L1	L2	D1	
AD 20	----	----	----	1,25
AD 20/160	45	85	112	1,15
AD 20/200	25	65	147	1,1
AD 20/250	----	40	192	0,8

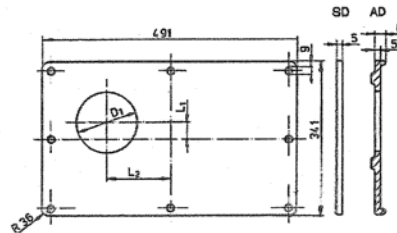
**Alubehälter NG 30 - Al oiltank NG 30**



**Zubehör / Accessories**

- Rundschnurdichtung NBR 6 mm / Round section seal NBR 6 mm
- Gußfüße 150 mm hoch / Cast feet 150 mm high
- Lenkrollen 100 mm hoch / Castors 100 mm high
- Verschlussschraube G1/2" mit Dichtung / Drain plug G1/2" with seal
- Ölstandsanzeiger SF1 / Oil level gauge SF1
- Einfüll- und Belüftungsfilter E 35 ES oder EB 80-10/ Filler incl. breather filter E 35 ES or EB 80-10

**Stahl- oder Aludeckel - Steel- or Al-lid**



Stahldeckel Steellid	Maße / Dimensions [mm]			Gewicht Weight [kg]
	L1	L2	D1	
SD 30	----	----	----	6,4
SD 30/200	50	120	147	5,7
SD 30/250	25	95	192	4,9
SD 30/300	----	70	236	
Aludeckel Al-lid	Maße / Dimensions [mm]			Gewicht Weight [kg]
	L1	L2	D1	
AD 30	----	----	----	2,6
AD 30/200	50	120	147	2,3
AD 30/250	25	95	192	2,0
AD 30/300	----	70	236	1,9

Abb. 8.: Datenblatt Hydraulikölbehälter Fa. Rahmer und Jansen [9]

#### 4.2.1.2 Drehstrommotor (Pos. 02)

Der Antrieb der Hydraulikpumpe erfolgt mittels eines Drehstrommotors mit folgenden Kenndaten:

Nennleistung P	3,0[kW]
Motordrehzahl n1	1435 [1/ min]
Spannung	D/Y 230/400 [V]
Frequenz	50 [Hz]
Nennstrom	11,5 / 6,7 [A]
Cos φ	0,78
Isolationsklasse	F
Schutzart	IP 55
Abtriebsflansch	Ø 250 mm
Abtriebswelle	Ø 28*60 mm
Zubehör	Fremdlüfter 230 V AC
Gewicht	42 kg

Da der Drehstrommotor ständig bestromt wird um das notwendige Drehmoment für den Hydraulikdruck im System aufrecht zu erhalten, muss die entstehende Verlustleistung durch Kühlung abgeführt werden.

Verlustleistung	$P=R \cdot I^2$	[kW]
Widerstand	R	[Ω]
Strom	I	[A]

Um dies zu gewährleisten ist der Drehstrommotor mit einer integrierten Fremdbelüftung ausgestattet. Die Situation eines Stromausfalles wird im Abschnitt 4.2.2.3 näher beschrieben.

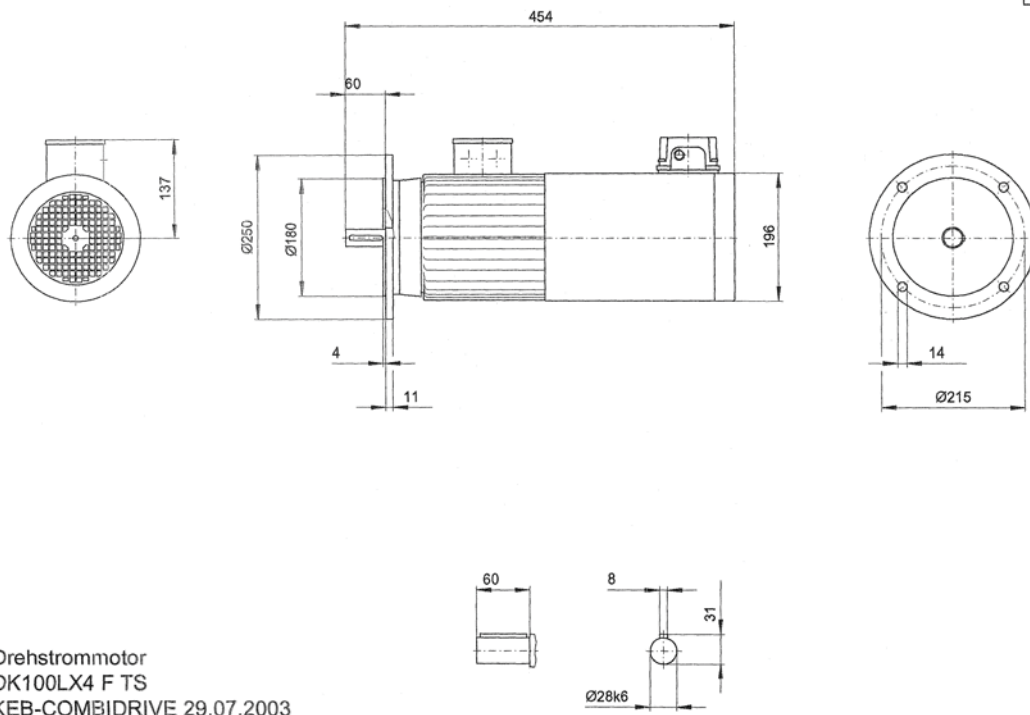


Abb. 9.: Datenblatt Drehstrommotor 3 kW Fa. KEB[8]

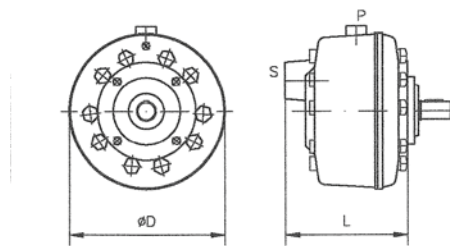
### 4.2.1.3 Hydraulikpumpe (Pos. 03)

Da der Belastungsvorgang (Ausfahren des 100 t Zylinders) der Probe langsam ablaufen soll, um keine Spannungsspitzen in der Probe zu erzeugen, wurde eine Pumpe mit geringem Durchflussvolumen gewählt. Eingebaut wird eine Radialkolbenpumpe mit einer Förderleistung von 0,9 l/min. Die Radialkolbenpumpe wird direkt an den Drehstrommotor angeflanscht und im Hydrauliktank montiert.

Pumpen

Abmessungen

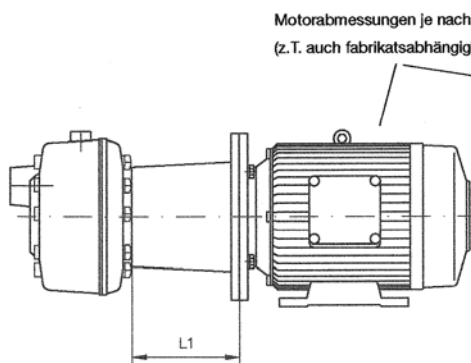
Einzelpumpe



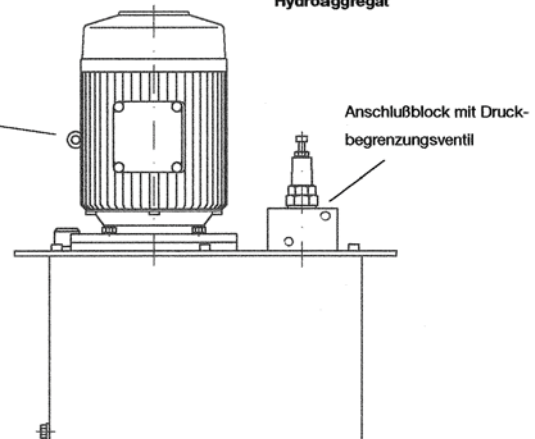
Baugruppe	D	L	L1 <sub>max</sub>	m (kg) <sup>3)</sup>
7631	130	53	109	3,2
6010	174	82,5	113	3,1
6011	185	86	155	5,8
6012	185	146	188	10,5
6014	218	250	188	24,2
6016	238	311	212	39,1

<sup>3)</sup> Masse der Einzelpumpe

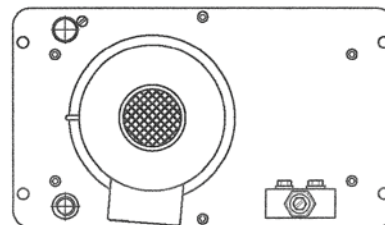
Motorpumpe



Hydroaggregat



Alle Maße in mm, Änderungen vorbehalten !



Baugröße	B6	B13	B20	B30	B40	B50	B75	B100	B160	B250	B400
H	230	230	320	320	320	403	478	536	666	575	825
B	253	368	368	448	448	600	600	650	650	1000	1000
T	315	260	260	320	440	420	420	500	500	600	600
V <sub>max</sub> Behälter (l)	9,3	17	25	39	55	85	107	152	193	309	469

Abb. 10.: Datenblatt Radialkolbenpumpe Fa. HAWE[10]

### 4.2.1.4 Wegesitzventile 3/2 bzw. 2/2 (Pos. 08, Pos. 10)

Das 3/2 Wegesitzventil dient zum Beaufschlagen des Druckzylinders während des Versuches. Das 2/2 Wegesitzventil verhindert bei Stromausfall und dem damit verbundenen Ausfall der Hydraulikpumpe einen Abfall des Druckes im Zylinder und gewährleistet die Notversorgung über die Dämpfungseinheit.

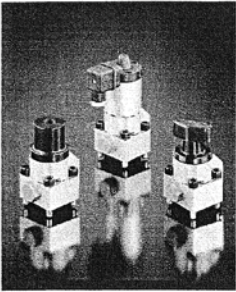
Die Wegesitzventile mit unterschiedlichen Betätigungen umfassen Plattenaufbauventile auf der Basis leckölfrei dichter, federbelasteter Kugelsitzventile.

Das verwendete Betätigungselement (Elektromagnet 24 V) bringt über Winkelhebel und Stößel das Ventil in die jeweilige Schaltstellung.

**HAWE**  
HYDRAULIK

## Wegesitzventile mit verschiedenen Betätigungen

Sitzventile



**Typenbezeichnung:**

Betätigung — GR 2 - 3

Baugröße

Schallsymbol

**Geräteart:** Wegesitzventil, leckölfrei dicht

---

**Ausführung:** Einzel-Plattenaufbauventil  
Kombination mit Anschlußblock für Rohrleitungsanschluß

---

**Betätigung:** elektromagnetisch druckbetätigt

- hydraulisch
- pneumatisch
- mechanisch
  - Tastrolle
  - Taststift
  - manuell
    - Tasthebel
    - Drehknopf

---

**P<sub>max</sub>:** 320 ... 700 bar

---

**Q<sub>max</sub>:** 6 ... 120 l/min

**Grundtypen und Hauptparameter**

Baugröße	Volumenstrom Q <sub>max</sub> (l/min)	Grundtyp (Betätigung) mit Betriebsdruck P <sub>max</sub> (bar)								Gewindeanschlüsse P, R, A, B <sup>1)</sup>	
		elektromagnetisch		druckbetätigt		mechanisch		manuell			
		G	WG	H	P	K	T	F	D		
0	6	300 ... 500	500	500	—	—	—	—	—	G 1/4	1) bei Kombination mit Anschlußblock für Rohrleitungsanschluß
1	12	350 ... 500 (700)	500 ... 700	500 ... 700	400 ... 700	400 ... 700	400 ... 700	400 ... 700	400 ... 700	G 1/4 und G 3/8	
2, 22	25, 12	350 ... 500 (700)	500	500	400 ... 500	400 ... 500	400 ... 500	400 ... 500	400 ... 500	G 3/8 und G 1/2	
3	65	350 ... 400	400	400	350 ... 400	—	—	—	—	G 1/2 und G 3/4	
4	120	350	—	—	—	—	—	—	—	G 3/4 und G 1	

**Schallsymbole**

Kennbez.	2/2-Wegeventil		3/2-Wegeventil		3/3-Wegeventil	4/3-Wegeventil	4/2-Wegeventil
	R2	S2	3	Z3	21, 39	22 <sup>2)</sup> , 49	4 <sup>3)</sup>
Schallsymbol (durch Betätigungssymbol ergänzen)							
	vereinfachte Symbole bei 3/3-, 4/3- und 4/2-Wegefunktion						
	<sup>2)</sup> nicht für Baugröße 4 <sup>3)</sup> nur in Baugröße 1						

Abb. 11.: Datenblatt Wegesitzventile 01 Fa. HAWE[10]

Befähigungen ↓

elektromagnetisch	druckbetätigt		mechanisch		manuell	
	hydraulisch	pneumatisch	Tastrolle	Taststift	Tasthebel	Drehgriff
G      WG	H	P	K	T	F	D
<b>Magnetspannungen:</b>	<b>Steuerdruck p<sub>St max</sub> (bar)</b>		<b>Schaltkraft (N)</b>		<b>Schaltkraft (N)</b>	
12V DC, 24V DC (Typ G)	400 ... 700	15	25 ... 80	51 ... 20	25 ... 80	45 ... 98
230V AC 50/60 Hz (Typ WG)	<b>Steuerdruck p<sub>St min</sub> (bar)</b>		<b>Schaltwege (mm)</b>		<b>Schaltwege (mm)</b>	
Weitere Spannungen auf Anfrage!	9 ... 16	2,5 ... 4	10,5 ... 30	4 und 5	20,5 ... 45	

weitere Ausführungen

- Einzelventile mit Einsteckblende, -rückschlagventil im Pumpenkanal oder/und Rückdrucksperre im Rücklaufkanal
- Anschlußblöcke mit Umkehrungs-rückschlagventil oder Druckbegrenzungsventil zwischen P und R
- Anschlußblock mit Rückschlagventil in Graetzschaltung für sinnmäßigen Durchfluß bei wechselseitiger Strömungsrichtung
- 2/2- und 3/2-Wegesitzventil Baugröße 1 mit Anschlußmaßen nach CETOP3 bzw. ISO 4401, Nenngroße 6 <sup>4)</sup>
- Wegesitzventile mit Gleichstrom-Magnetbetätigung in explosionsgeschützter Ausführung (Ex)s G4 <sup>4)</sup>

<sup>4)</sup> siehe auch unter "weitere Informationen"

Bestellbeispiele

PR 2-1

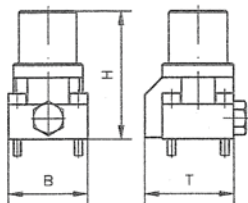
Wegesitzventil pneumatisch betätigt mit Schaltsymbol R2, Baugröße 1

G 3-2-3/8-G24

Wegesitzventil elektromagnetisch betätigt mit Schaltsymbol 3, Baugröße 2, Anschlußblock für Rohrleitungsanschluß G 3/8 und Magnetspannung 24V DC

Abmessungen

Einzelventil (siehe Bestellbeispiel)

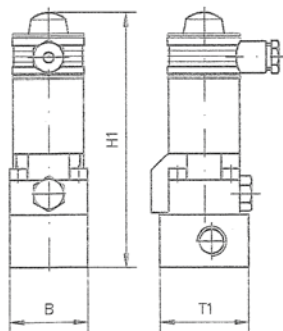


Baugröße	H <sub>max</sub> <sup>5)</sup>	H1 <sub>max</sub> <sup>5)</sup>	B		T <sub>max</sub>	T1	m <sub>max</sub> (kg) <sup>6)</sup>
			2/2- und 3/2-Wege	3/3- und 4/3-Wege			
0	90,5	110,5	36	75	41,5	40	0,8/1,0
1	115	145	45	92	50	50	1,4/1,9
2, 22	126,5, 134,5	156,5, 161,5	56, 56	116, 116	62,5, 67,5	56, 56	2,9/3,9, 3,0/4,0
3	162	202	70	144	91,5	70	5,9/7,1
4	226	226	80	162	127	125	16,3/20,1

<sup>5)</sup> Werte gelten für elektromagnetische Betätigung

<sup>6)</sup> Einzelventil/Ventil mit Anschlußblock

Ventil mit Anschlußblock (siehe Bestellbeispiel)



Alle Maße in mm, Änderungen vorbehalten!

weitere Informationen

- Wegesitzventile D 7300
- Ventilverbände Typ VB D 7302
- Gerätestecker mit Leuchtdioden u.a. D 7163
- Gerätestecker mit Sparschaltung D 7813, D 7833
- Wegesitzventile mit Norm-Anschlußbild (CETOP3, NG 6) D 7300 N
- Wegesitzventile in explosionsgeschützter Ausführung D 7300 Ex
- Wegesitzventile mit Hubüberwachung D 7300 H
- siehe auch Kapitel "Geräte für besondere Einsatzfälle" (Geräte für explosionsgeschützte Anlagen, Geräte bis 700 bar)

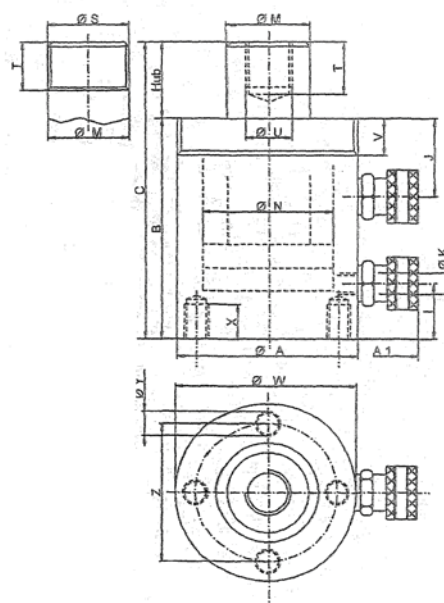
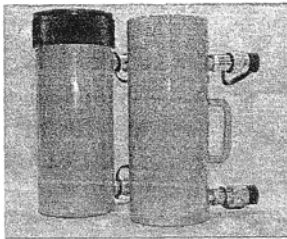
Kapitel- und Seitenangaben zu den zusätzlich genannten Geräten im Typenindex

Abb. 12.: Datenblatt Wegesitzventile 02 Fa. HAWE[10]



### 4.2.1.5 10 t Hydraulikzylinder doppelt wirkend (Pos. 11)

Um die gesamte Dämpfungs- und Speichereinheit leichter und kostengünstiger auszuführen, wird zwischen dem 100 t Zylinder (Pos. 12) und der Dämpfungs- und Speichereinheit ein doppelt wirkender 10 t Zylinder zwischengeschaltet. Der doppelt wirkende Hydraulikzylinder hat aufgrund seiner verschieden großen Kolbenflächen ein Untersetzungsverhältnis von  $i = 2,05$  und bewirkt damit eine Halbierung des anstehenden Druckes im Bereich der Dämpfungseinheit. Damit kann die gesamte Dämpfungseinheit kleiner dimensioniert werden. Der Hub des verwendeten 10 t Zylinders beträgt 75 mm. (In Abbildung 13 oberste Zeile des markierten Bereiches)



Modell	Kraft t	kN	Abmessungen in mm						Z	Ø Y	X	Ø W	V	Ø U	T	J	Ø K	A1	Ø M	Ø N	Optional Ø S	T	Gewicht - kg	Fläche cm <sup>2</sup>	Volumen cm <sup>3</sup>	Modell
			Hub	Ø A	B	C	Z	Ø A																		
ZD 005 075	5	50	75	185	260	45	25				M 45 x 2	20	M6	20	40			107	18	30	M16	16	2	7,0	52,5	ZD 005 07
ZD 010 075	10	100	75	200	275	45	25		M6	10	M 70 x 2	27	M12	20				132	30	43	M27	30	6	14,5	108,7	ZD 010 07
ZD 010 150	10	100	150	175	428	70	30				M 70 x 2	27	M12	20				132	30	43	M27	30	6	14,5	217,2	ZD 010 15
ZD 010 200	10	100	200	220	525	70	30				M 70 x 2	27	M12	20				132	30	43	M27	30	6	14,5	280,0	ZD 010 20
ZD 020 075	20	200	75	205	280	45	25				M 90 x 2	35		23	53			142	40	60	M35	35	5	21,5	108,0	ZD 020 07
ZD 020 150	20	200	150	280	430	45	25				M 90 x 2	35		23	53			142	40	60	M35	35	12	28,2	423,0	ZD 020 15
ZD 020 200	20	200	200	330	530	45	25				M 90 x 2	35		23	53			142	40	60	M35	35	14	33,3	588,0	ZD 020 20
ZD 020 250	20	200	250	395	645	45	25		M8		M 100 x 2	49	M18	25				162	48	73	M42	42	17	41,8	705,0	ZD 020 25
ZD 030 075	30	300	75	288	300	60	30				M 100 x 2	49		27	57			162	48	73	M42	42	16	41,8	318,0	ZD 030 07
ZD 030 150	30	300	150	300	450	60	30				M 100 x 2	49		27	57			162	48	73	M42	42	16	41,8	627,0	ZD 030 15
ZD 030 200	30	300	200	360	550	60	30				M 100 x 2	49		27	57			162	48	73	M42	42	18	48,0	830,0	ZD 030 20
ZD 030 250	30	300	250	415	665	60	30				M 100 x 2	49		27	57			162	48	73	M42	42	21	55,5	1.045,0	ZD 030 25
ZD 050 075	50	500	75	340	315	65	30				M 125 x 2	50	M30	28	68			187	70	95	M60	50	21	53,0	531,0	ZD 050 07
ZD 050 150	50	500	150	315	465	65	30				M 125 x 2	50	M30	28	68			187	70	95	M60	50	26	70,6	1.082,0	ZD 050 15
ZD 050 200	50	500	200	365	565	65	30				M 125 x 2	50	M30	28	68			187	70	95	M60	50	30	70,6	1.416,0	ZD 050 20
ZD 050 250	50	500	250	430	660	65	30				M 125 x 2	50	M30	28	68			187	70	95	M60	50	35	77	1.770,0	ZD 050 25
ZD 100 075	100	1000	75	460	345	90	30				M 175 x 3	51	M35	38	83			237	105	135	M80	60	28	107,5	2.394,0	ZD 100 07
ZD 100 150	100	1000	150	460	495	90	30				M 175 x 3	51	M35	38	83			237	105	135	M80	60	35	119	3.090,0	ZD 100 15
ZD 100 200	100	1000	200	505	595	90	30				M 175 x 3	51	M35	38	83			237	105	135	M80	60	48	143,0	4.072,5	ZD 100 20
ZD 100 250	100	1000	250	560	695	90	30				M 175 x 3	51	M35	38	83			237	105	135	M80	60	58	171,0	5.275,0	ZD 100 25
ZD 150 075	150	1500	75	500	380	130	30				M 215 x 3	55	M42	45	40			277	125	165	M110	70	48	171,0	4.280,0	ZD 150 07
ZD 150 150	150	1500	150	365	515	130	30				M 215 x 3	55	M42	45	40			277	125	165	M110	70	79	213,8	5.602,5	ZD 150 15
ZD 150 250	150	1500	250	460	730	130	30				M 215 x 3	55	M42	45	40			277	125	165	M110	70	119	242,5	7.342,5	ZD 150 25
ZD 200 075	200	2000	75	500	380	150	30				M 250 x 3	60	M48	51	125			312	145	190		80	150	283,3	4.250,0	ZD 200 07
ZD 200 150	200	2000	150	428	578	150	30				M 250 x 3	60	M48	51	125			312	145	190		80	150	283,3	5.200,0	ZD 200 15
ZD 200 200	200	2000	200	473	678	150	30				M 250 x 3	60	M48	51	125			312	145	190		80	150	283,3	6.202,5	ZD 200 20
ZD 300 150	300	3000	150	535	685	190	30				M 300 x 3	65	M60	75	125			422	185	235	M150	80	407	433,5	75.000,0	ZD 300 15
ZD 400 150	400	4000	150	600	750	210	30				M 350 x 3	70	M72	100	144			472	205	270	M175	90	593	572,2	8.583,0	ZD 400 15
ZD 500 150	500	5000	150	650	780	250	30				M 400 x 3	75	M84	115	153			522	230	300	M200	100	743	617,0	17.166,0	ZD 500 15
ZD 500 200	500	5000	200	780	1050	250	30				M 400 x 3	75	M84	115	153			522	230	300	M200	100	791	705,5	21.097,5	ZD 500 20

Abb. 13.: Datenblatt Hydraulikzylinder doppelt wirkend Fa. Hydro Tec [11]

#### 4.2.1.6 100 t Hydraulikzylinder einfach wirkend (Pos. 12)

Mit diesem Druckzylinder wird während des Versuches der Probenkörper belastet. Der Zylinder wird nach dem Einspritzvorgang und dem Anbringen der induktiven Wegaufnehmer auf dem Probekörper in die Schalung eingebaut. Da der Zylinder während des Versuches nur in einer Richtung mit Druck beaufschlagt werden muss und zum Ausbau aus der Schalung drucklos geschaltet wird, kommt ein einfach wirkender Zylinder mit Federrückzug zur Ausführung. Der Hub des verwendeten 100 t Zylinders beträgt 50 mm. (In Abbildung 14 oberste Zeile des markierten Bereiches)

Die Regelung des Zylinders wird im Abschnitt 4.2.2 Regelung genauer erklärt.

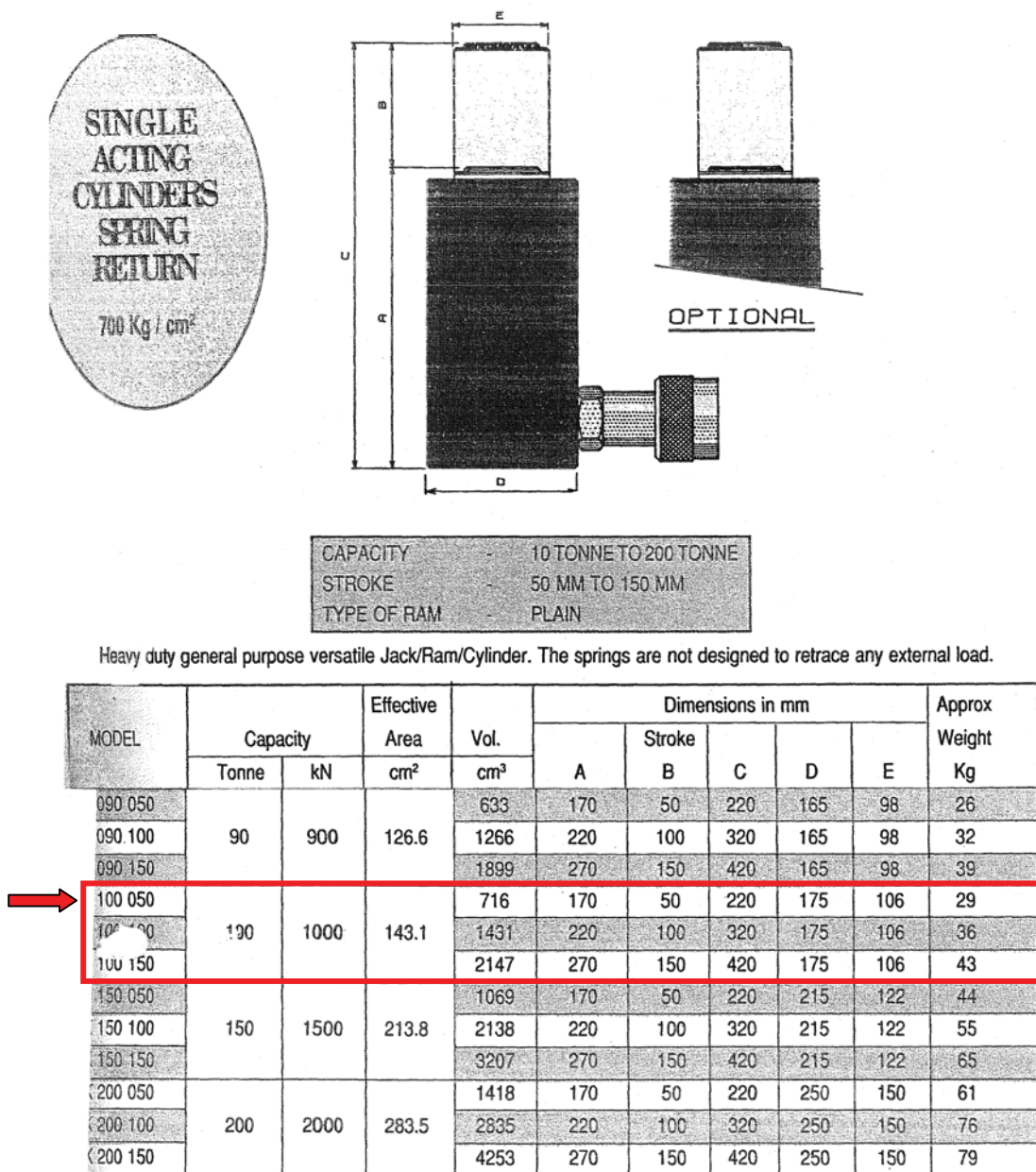


Abb. 14.: Datenblatt Hydraulikzylinder einfach wirkend Fa. Hydro Tec [11]

### 4.2.1.7 Hydrokleinspeicher Typ AC (Pos. 14-17)

Die vier Hydrokleinspeicher werden zur Deckung eventueller Leckölverluste, als Druckölquelle für Notbetätigungen, für einen Volumenausgleich bei Temperaturschwankungen oder zur Schwingungsdämpfung druckdifferenzbetätigter Funktionsteile verwendet. Die Druckbereiche der Hydrokleinspeicher betragen:

Speichernummer	Druckbereich
SP 1	0 bis 5 bar
SP 2	5 bis 21 bar
SP 3	21 bis 85 bar
SP 4	85 bis 341 bar

Hydrozubehör



## Hydrokleinspeicher Typ AC

<b>Geräteart:</b>	Kleinst-Membran-Speicher
<b>Ausführung:</b>	Einschraubversion
<b>P<sub>max</sub>:</b>	400...500 bar
<b>V<sub>0</sub>:</b>	13 bzw. 40 cm <sup>3</sup>



Grundtypen und Hauptparameter

Grundtyp und Baugröße	V <sub>0</sub> (cm <sup>3</sup> )	Druck P <sub>max</sub> (bar)	max. Gasfülldruck p <sub>0</sub> (bar)	Gewindeanschlüsse	Schalt-symbol
<b>AC 13-1/4</b>	13	500	250	G 1/4	
ACS 13-1/4 <sup>1)</sup>	13	500	250	G 1/4	
AC 40-1/4	40	400	250	G 1/4	

<sup>1)</sup> Version mit Schließventil

weitere Ausführungen

- Verlängerungen zur Abstandsvergrößerung
- Anschlußelemente (siehe auch unter "weitere Informationen")

Bestellbeispiele

ACS 13 - 1/4 - 50/110

Hydrokleinspeicher Typ ACS, mit Schließventil, Baugröße 13  
Anschlußgewinde G 1/4A, Gasfülldruck 50 bar,  
Schließventil-Einstelldruck 110 bar

AC 40 - 1/4 - 150

Hydrokleinspeicher Typ AC, Baugröße 40, Anschlußgewinde G 1/4A,  
Gasfülldruck 150 bar


Abb. 15.: Datenblatt Hydrokleinspeicher Fa. HAWE [10]

### 4.2.1.8 Druckabhängige Schließventile (Pos. 19-20)

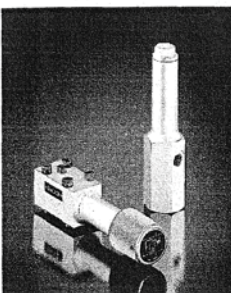
Druckabhängige Schließventile in Sitzausführung sperren den Durchflussstrom zu einem nachgeschalteten Verbraucher bei Erreichen und Überschreiten eines eingestellten Druckwertes in der Verbraucherleitung leckölfrei dicht ab.

Die Ventile öffnen wieder, wenn der Druck auf der Einlassseite unter den Einstellwert der Feder absinkt. Durch die druckabhängigen Schließventile werden die Hydrokleinspeicher Pos. 14 bis 17 vor Überbelastung bei hohen Druckstufen geschützt. Der Schließdruck für das Ventil Pos. 20 beträgt 40 bar, für die Ventile Pos. 19.1 bzw. Pos.19.2 100 bar.

Druckventile

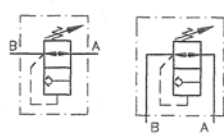


## Druckabhängige Schließventile Typ DSV und CDSV



<b>Geräteart:</b>	Schließventil
<b>Ausführung:</b>	Einzelventil für Rohrleitungsanschluß Einzel-Plattenaufbauventil Einschraubventil
<b>Verstellbarkeit:</b>	mit Werkzeug (fest eingestellt) von Hand (regelbar)
<b>P<sub>max</sub>:</b>	600 bar
<b>Q<sub>max</sub>:</b>	60 l/min

**Grundtypen und Hauptparameter**

Grundtyp	CDSV 1	DSV 2 und DSVP 2 <sup>1)</sup>			Schaltsymbol
<b>Bauart</b>	Einschraubventil	Ausführung für Rohrleitungsanschluß bzw. Plattenaufbauventil			CDSV 1 DSV 2
<b>Baugröße</b>	1	1	2	3	
<b>Volumenstrom</b>	10	20	40	60	
<b>Q<sub>max</sub> (l/min)</b>					
<b>Druckbereich:</b>	C: 120	D: 40	D: 20	D: 20	
<b>Druck P<sub>max</sub> (bar)</b>	B: 350	C: 100	C: 60	C: 60	
	A: 600	B: 220	B: 120	B: 120	
		A: 600	A: 400	A: 400	
<b>Gewindeanschlüsse</b>	M 16 x 1,5	G 1/4	G 3/8	G 1/2	

<sup>1)</sup> Plattenaufbauventil nur in Baugröße 1

**weitere Ausführungen**

- Druckeinstellungen von Hand verstellbar

- Typ CDSV auch mit Anschlußblock für Rohrleitungsanschluß möglich

**Bestellbeispiele**

**CDSV 1 A - 550**  
Schließventil (Einschraubventil) Typ CDSV, Druckbereich 20 ... 600 bar (Kennzeichen A), werksseitige Einstellung 550 bar

**DSV 2 - 2 BR**  
Schließventil (Ausführung für Rohrleitungsanschluß), Baugröße 2, Druckbereich (D)...120 bar (Kennzeichen B), Druck von Hand verstellbar (Kennzeichen F)

Abb. 16.: Datenblatt Schließventile Fa. HAWE [10]

#### 4.2.1.9 Frequenzumrichter 4 kW (Pos. 21)

Die Funktionsweise des Frequenzumrichters mit PID Regler wird im Abschnitt 4.2.2 Regelung genauer beschrieben.

## 4.2.2 Regelung

Im Zuge früherer Arbeiten am Institut für Geomechanik, Tunnelbau und Konstruktiver Tiefbau (Meldearbeit Kainrath / Geißbauer 2002 [2]) zeigte sich der große Einfluss geeigneter Regelkomponenten auf die Versuchsergebnissen.

Es sind dies vor allem drei entscheidende Einflussfaktoren, die bei der Auswahl der Regelungskomponenten beachtet werden müssen.

### 4.2.2.1 Anforderungen an die Regelung

- Großer Druckbereich

Bei einem 28 Tage Versuch ist es notwendig einen Spannungsbereich von 0,3 bis 25 MPa im Probenkörper abzudecken. Dies ergibt bei einem gewählten Probenquerschnitt von 20\*20 cm einen notwendigen Hydraulikdruck im Zylinder von 8 bis 700 bar. Dieser große Druckbereich macht es unmöglich die Regelung mit Proportionalventilen auszuführen.

- Schwingungsarme langsame Regelung

Bei den Versuchen im Zuge der Meldearbeit Kainrath / Geißbauer [2] wurde versucht mit Drosselventilen den Öldurchfluss zu regeln um ein langsames und schwingungsarmes Anfahren der Belastungsstufen zu garantieren.

Es kam dabei zu Druckschwankungen und einem Aufschaukeln des Regelvorganges vor allem in den kleinen Druckbereichen (0 bis 50 bar). Dies kann gerade beim jungen Spritzbeton zu einer Überbelastung und zum Bruch der Probe führen.

- Druckhaltigkeit bei Stromausfall

Da die Druckversuchsanlage im Baustellenbetrieb eingesetzt werden soll, muss gewährleistet sein, dass bei Stromausfall die eingestellte Laststufe gehalten wird und es zu keinen Spannungsschwankungen in der Probe kommt.

### 4.2.2.2 Regelungsaufbau

Um die aufgelisteten Anforderungen zu erfüllen werden bei dieser Versuchsanlage zwei Lösungsansätze verknüpft:

- Direktansteuerung des Drehstrommotors mit einem Frequenzumrichter (FU)
- Dämpfung- und Speichereinheit bestehend aus Hydrokleinspeichern mit Schließventilen

Der Aufbau und die Funktionsweise dieser Bauteile wird in den folgenden Abschnitten beschrieben.

#### 4.2.2.2.1 Frequenzumrichter

Die Ansteuerung und Regelung des Drehstrommotors erfolgt mittels Frequenzumrichter.

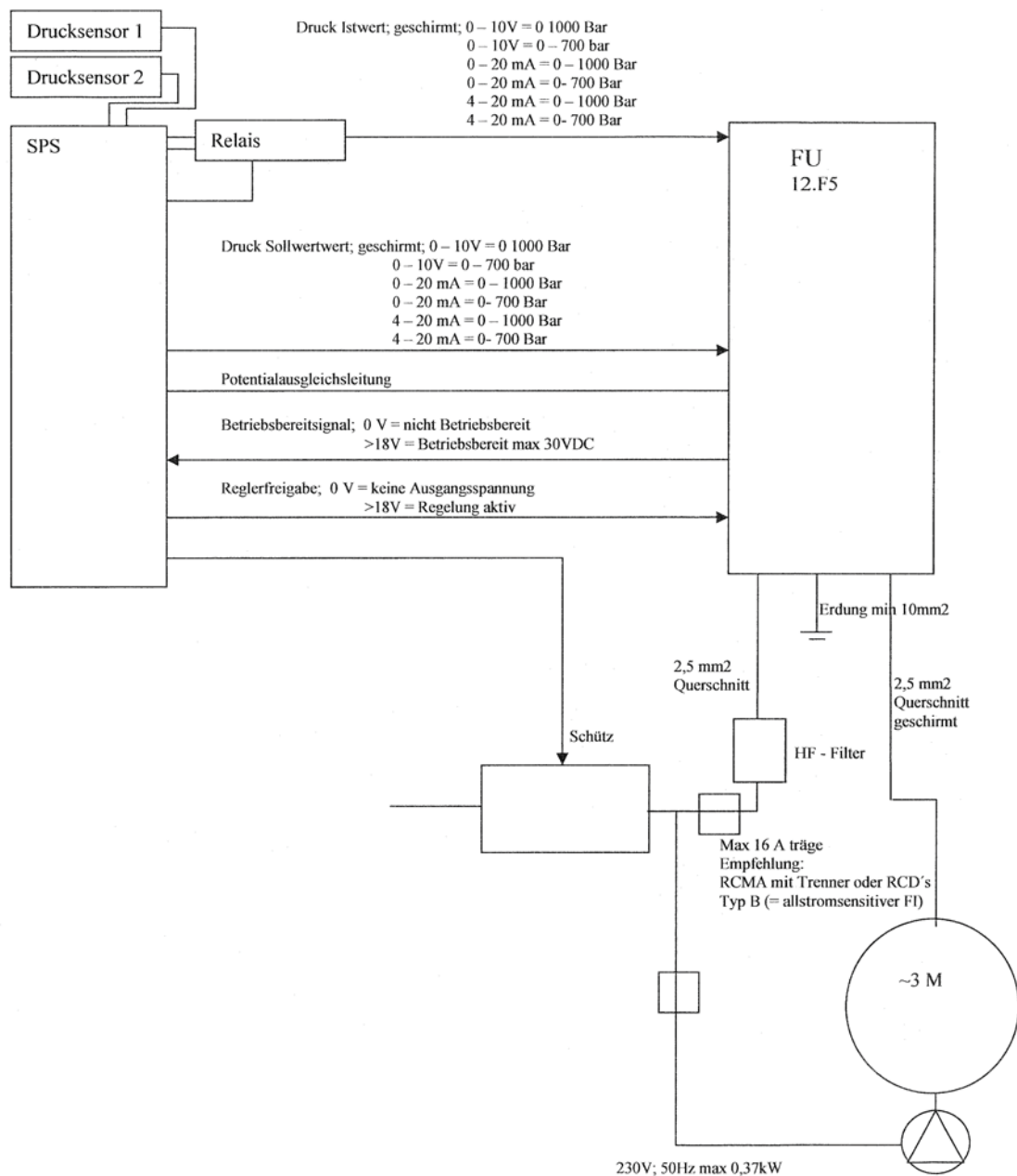


Abb. 17.: Blockschaltbild für Druckregelung/ In-Situ Druckversuchsanlage [13]

Bei diesem Regelkreis kommt es zu einem Soll-Ist Vergleich zwischen den Drucksensoren (Ist Wert) und dem in der SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung) gespeicherten Soll Druckwert. Bei einer Differenz dieser beiden Werte erfolgt ein Signal an den Frequenzumrichter und die Drehzahl des Motors wird erhöht, um die notwendige Ölmenge zur Druckerhöhung nachzuliefern.

Sollte der Ist-Wert im Druckzylinder (Pos. 12) höher als der Soll-Wert sein wird über das 3/2 Wegeventil (Pos. 08) und das daran angeschlossene Drosselventil (Pos. 07) langsam Öl abgelassen um die Differenz auszugleichen.

Als Regelglied kam bei dieser Anlage ein PID-Regler zum Einsatz. Die Funktionsweise dieses Reglers wird im Folgenden kurz erklärt.

Der PID-Regler lässt sich als Parallelschaltung je eines Proportional-, Integral- und Differentialgliedes darstellen.

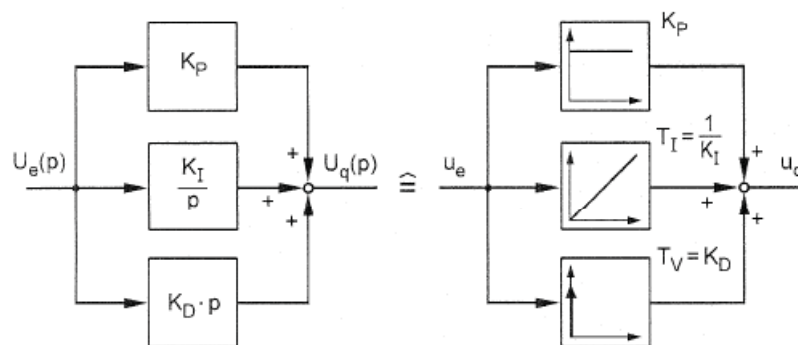


Abb. 18.: PID Regler (Übung Regelungstechnik Uni Stuttgart) [7]

Der Proportionalregler bildet die Differenz des Soll- und Ist-Wertes und multipliziert diese mit einem Verstärkungsfaktor. Damit bewirkt der P-Regler eine umso größere Stellgröße, je größer die Regelabweichung ist.

$$y_{pt} = V * (x_{soll} - x_{ist})$$

- $y_{pt}$             Stellgröße
- $V$                 Verstärkungsfaktor
- $x_{soll} - x_{ist} = x_t$     Regelabweichung

Beim Integralregler ist die Stellgröße proportional zum Zeitintegral der Regelabweichung. Ist der Eingangswert Null, so ändert sich der Ausgangswert nicht. Wird ein konstanter Wert ungleich Null angelegt, ändert sich die Ausgangsgröße mit konstanter Steigung. Vergrößert sich der Eingangswert gleichförmig, so ändert sich der Ausgangswert immer schneller.

$$y_{it} = K_i * \frac{dx_t}{dt}$$

- $y_{it}$             Stellgröße
- $x_t$             Regelabweichung
- $K_i$             Verstärkungsfaktor des Integralgliedes (proportional der Nachstellzeit)



Bei einem Differentialregler ist die Stellgröße proportional zur Änderungsgeschwindigkeit der Regelabweichung. Bei einer sprunghaften Änderung der Regelgröße steigt die Stellgröße kurzzeitig an und sinkt dann wieder auf ihren ursprünglichen Wert ab.

$$y_{dt} = K_d * \frac{dx_t}{dt}$$

$y_{dt}$  Stellgröße

$x_t$  Regelabweichung

$K_d$  Verstärkungsfaktor des Differentialgliedes (proportional der Vorhaltezeit)

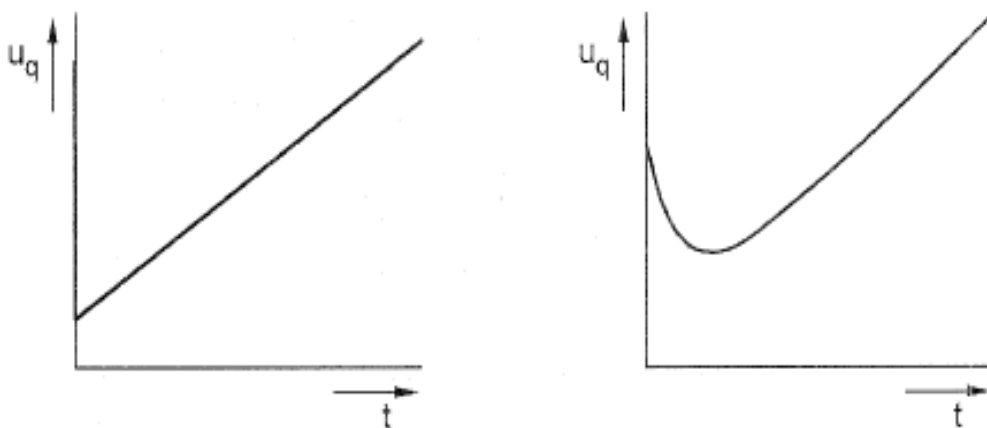


Abb. 19.: Sprungantwort eines idealen (links) und eines realen (rechts) PID-Reglers [7]

Das Stellglied dieses Regelkreises ist der Frequenzumrichter, seine Funktionsweise wird kurz erläutert.

In der folgenden Abbildung ist der grundsätzliche Aufbau des Leistungsteiles eines Frequenzumrichters mit Gleichspannungszwischenkreis dargestellt.

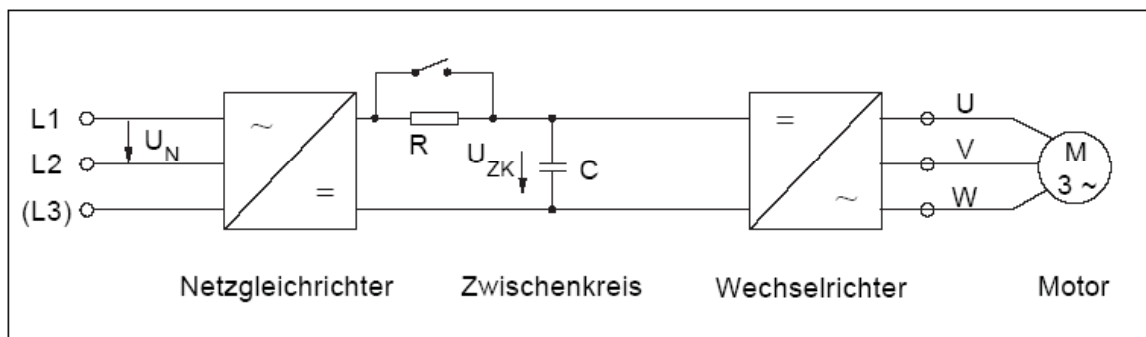


Abb. 20.: Aufbau Frequenzumrichter [8]

Der Netzgleichrichter besteht aus einer ungesteuerten dreiphasigen Brückenschaltung. Seine Aufgabe ist es die Wechselspannung des Netzes in eine Gleichspannung umzuwandeln, die durch den Zwischenkreiskondensator geglättet wird.

Die eigentliche Aufgabe des Frequenzumrichters, eine nach Frequenz und Amplitude variable Ausgangsspannung zur Steuerung eines Drehstrommotors zu erzeugen, übernimmt der Wechselrichter.

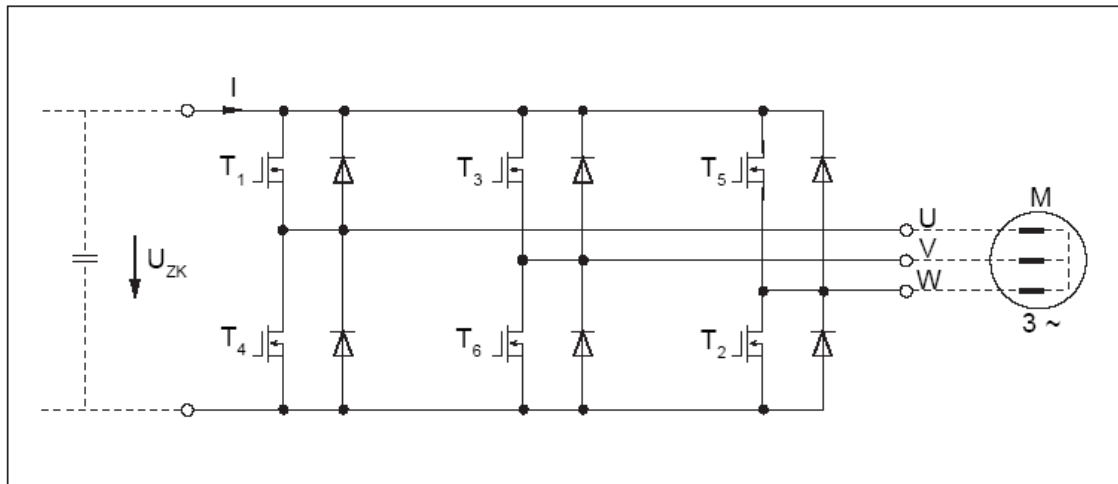


Abb. 21.: Schaltung des Wechselrichters [8]

Durch zyklisches Schalten der Transistoren T1 - T6 wechselt der Strom in den drei Ausgangsphasen um  $120^\circ$  versetzt ständig seine Richtung. Es entsteht ein symmetrisches Drehstromsystem, dessen Frequenz von der Zyklusdauer der Wechselrichterzündfolge abhängt und dessen Amplitude durch das Verhältnis von Einschaltdauer zu Ausschaltdauer bestimmt wird.

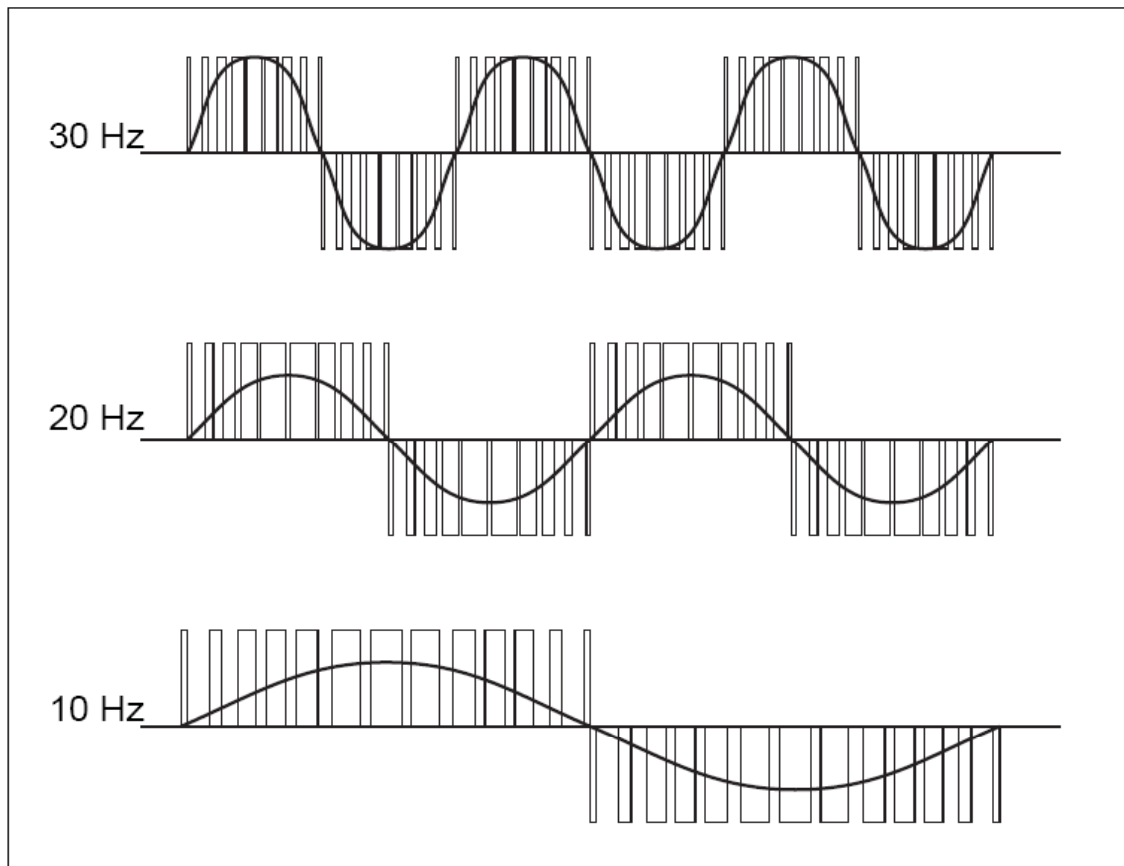


Abb. 22.: Ausgangsspannung des Frequenzumrichters [8]

#### 4.2.2.2 Dämpfungs- und Speichereinheit

Durch den Einbau einer Dämpfungs- und Speichereinheit bestehend aus Hydrokleinspeichern mit Schließventilen soll die Dämpfung bei den Regelvorgängen erhöht werden und bei Stromausfall eine Notversorgung sichergestellt werden.

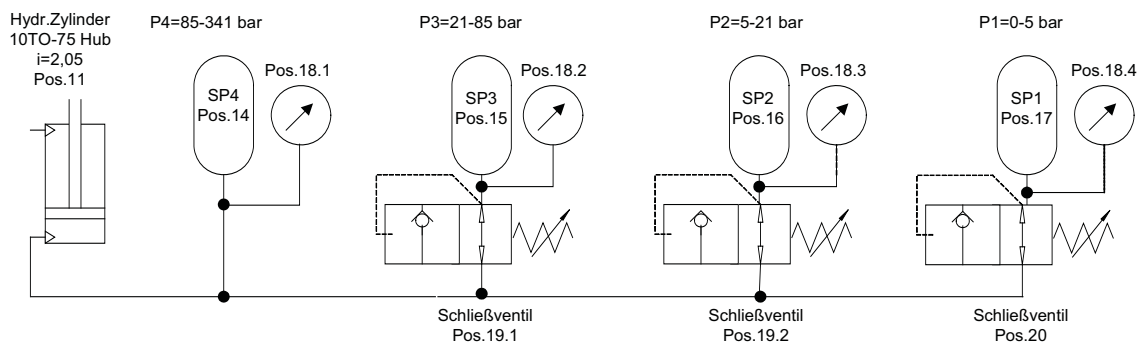


Abb. 23.: Dämpfungs- und Speichereinheit der Versuchsanlage [13]

Der oben dargestellte Hydraulikschaltplan zeigt die Dämpfungs- und Speichereinheit der Versuchsanlage. Dieser Anlagenteil gewährleistet die Druckstabilität im Hydrauliksystem bei Stromausfall.

Um das maximale Druckniveau von 700 bar zu reduzieren wird vor der Dämpfungs- und Speichereinheit ein doppelt wirkender Hydraulikzylinder (Pos. 11) geschaltet.

Durch die verschieden großen Kolbenflächen im Zylinder ergibt sich ein Untersetzungsverhältnis von  $i = 2,05$ .

Dadurch wird die gesamte Dämpfungs- und Speichereinheit mit max. 341 bar beaufschlagt, dies führt zu kleineren Dimensionen und zur kostengünstigeren Ausführung der Hydraulikkomponenten.

Die Dämpfungs- und Speichereinheit unterteilt sich in vier Speichereinheiten für die folgenden Druckstufen:

1. Druckstufe	0 - 5 bar	Pos. 17
2. Druckstufe	5 - 21 bar	Pos. 16
3. Druckstufe	21 - 85 bar	Pos. 15
4. Druckstufe	85 - 341 bar	Pos. 14

*Tab. 3: Druckbereiche der Dämpfungs- und Speichereinheit*

Diese Unterteilung der Speicher in kleinere Druckstufen ermöglicht eine „weichere“ Regelung, da die einzelnen Speicher optimal für den jeweiligen Druckbereich ausgelegt werden können.

Im Folgenden soll anhand eines Beispiels die Funktionsweise der In-Situ Druckversuchsanlage erläutert werden.

#### 4.2.2.3 Funktionsweise der In-Situ Druckversuchsanlage

- Regelbetrieb

Beim Starten des Versuches wird der Drehstrommotor (Pos. 02) über den Frequenzumrichter (FU) angesteuert, und treibt somit die Hydraulikpumpe (Pos. 03) an. Gleichzeitig werden mit dem Starten des Versuches das 2/2 Sitzventil (Pos. 10) geöffnet und der Kreislauf zum 100 t Hydraulikzylinder geschlossen. Damit kommt es zum Aufbau des durch die Steuerung vorgegebenen Druckes.

Bei Erreichen des vorgegebenen Druckes, dies wird durch die Drucksensoren (Pos. 9.1 bzw. 9.2) registriert, wird durch den Frequenzumrichter die Drehzahl des Motors und damit der Pumpe gedrosselt, um den eingestellten Druck weiter zu halten.

Wenn durch äußere Einflüsse (Stauchung der Probe, Kriechen, Schwinden, Ölverluste im System) der Druck im Zylinder fällt, wird die Motordrehzahl und dadurch die Förderleistung der Hydraulikpumpe durch den Frequenzumrichter erhöht, bis das eingestellte Druckniveau wieder erreicht ist.

- Stromausfall

Bei einem Stromausfall und dem damit verbundenen Ausfall des Drehstrommotors schließt das 2/2 Wegesitzventil (Pos. 10) durch den Federrückzug selbstständig. Die Versorgung des Hydraulikzylinders findet nun über das in der Dämpfungseinheit gespeicherte Ölvolumen statt.

Somit ist gewährleistet, dass bei Stromausfall der Druck im Hydraulikzylinder konstant bleibt und das Belastungsniveau gehalten werden kann.

- Funktionsweise Speichereinheit

Die Funktionsweise der vier Speichereinheiten wird am Beispiel des Speichers für den Druckbereich 0 bis 5 bar (Pos. 17) erläutert. Es soll dabei ein Druck von 30 bar im Druckzylinder, entspricht 14,6 bar in der Speichereinheit, erreicht werden.

Wie bereits ausgeführt schaltet das 2/2 Sitzventil (Pos. 10) beim Starten des Versuches in die Durchgangsposition. Somit beginnt der Druckaufbau im Zylinder (Pos. 12) und gleichzeitig wird über den Druckminderer (Pos. 11) auch der erste Speicher gefüllt.

Beim Erreichen von 5 bar im ersten Speicher schließt das Ventil (Pos. 20) und der zweite Speicher (Pos. 16) mit dem Druckbereich 5 bis 21 bar beginnt sich zu füllen. Bei höheren Drücken füllt sich so ein Speicher nach dem anderen.

Beim Erreichen des eingestellten Druckes von 30 bar im Druckzylinder regelt der Frequenzumrichter den Drehstrommotor zurück und der Hydraulikdruck im System bleibt konstant.

### 4.2.3 Schalung

Wie bereits im Abschnitt 4.1 Anforderungen an die Druckversuchsanlage beschrieben, ist es notwendig die Schalung für den Baustelleneinsatz möglichst einfach und kostengünstig herzustellen.

Bei früheren Versuchen am Institut für Geomechanik, Tunnelbau und Konstruktiver Tiefbau (Diplomarbeit Probst 1999 [1]) wurde der Probenkörper durch Einspritzen in einen Stahlrahmen erzeugt. Dabei wurde der Stahlrahmen seitlich mit Styroporplatten und rückseitig mit einer Pressspanplatte ausgekleidet. Nach Beendigung des Einspritzvorganges wurden die Holz- und Styroporkörper entfernt und die Probe für den Versuch vorbereitet.



Abb. 24.: Schalung vor dem Einspritzvorgang (links), Instrumentierter Probenkörper im Pressenrahmen (rechts) [1]

Die Abbildung 24 zeigt links den Pressenrahmen mit der vorbereiteten Schalung und rechts die instrumentierte Probe nach dem Einspritzen und Entfernen der Schalungsteile.

Da bei der Weiterentwicklung der In-Situ Druckversuchsanlage der Probenkörper ein Teil des Bauwerkes ist, war es notwendig eine neue Schalungsform zu entwickeln.

Die im Labor vorgefertigte Schalung wird an der Tunnellaibung fixiert. Die Probenkörper können nun in einem Arbeitsgang mit der Spritzbetonschale hergestellt werden.

Die Rückseite der Schalung verbleibt in der Spritzbetonschale und auch die seitlichen Teile werden beim Freilegen des Probenkörpers zerstört.

Durch den Verlust der Schalung bei jedem Versuch müssen möglichst kostengünstige Baumaterialien eingesetzt werden. Die Lastplatten können nach dem Versuch ausgebaut und für weitere Einsätze verwendet werden.

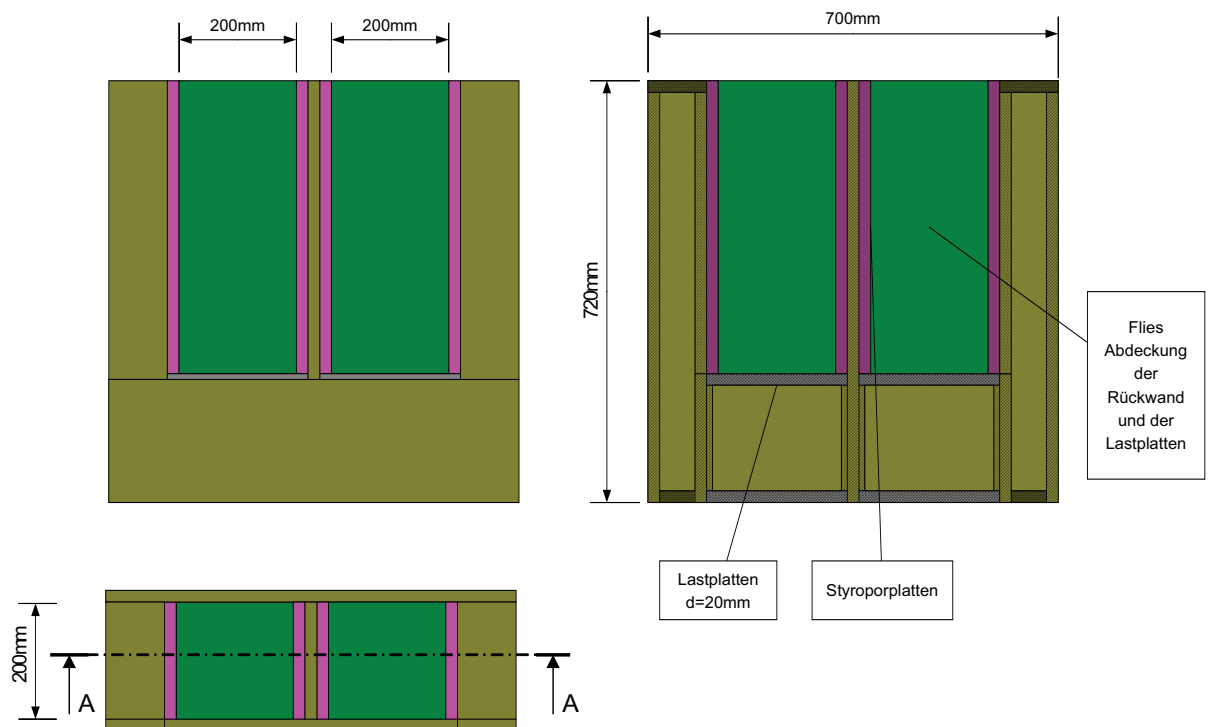


Abb. 25.: Bauzeichnung Schalung

<b>Bezeichnung</b>	<b>Stück</b>	<b>Dimension</b>
<b>Pressspanplatten</b>		
Rückenplatte	1	720*700*20 mm
Seitenplatte außen	2	700*200*20 mm
Seitenplatte innen groß	2	480*200*20 mm
Seitenplatte innen klein	2	220*200*20 mm
Mittelplatte	1	720*200*20 mm
Deckelplatte	2	200*100*20 mm
Frontabdeckung groß	1	700*210*20 mm
Frontabdeckung klein	2	510*100*20 mm
Bodenplatte	2	200*60*20 mm
Abstandshalter	4	200*180*10 mm
<b>Flies</b>		
Rückenabdeckung	1	720*700 mm
Lastplattenabdeckung	2	500*240 mm
<b>Styropor</b>		
Seitenabdeckung	4	480*200*20 mm
<b>Stahl</b>		
Lastplatte	4	240*200*20 mm

Tab. 4: Stückliste Schalungskörper

Die Schalung besteht größtenteils aus Pressspanplatten (in Abbildung 26 braun), welche an der Rückseite des Probenkörpers mit einem Flies (grüne Fläche) überzogen werden um beim Einspritzvorgang einen besseren Haftgrund für den Spritzbeton zu bieten.

Die obere Lastplatte wird ebenfalls an der probenzugewandten Seite mit Flies bespannt. Die Seitenbegrenzung des Probenkörpers bilden zwei 20 mm starke Styroporplatten (rosa Flächen) die vor dem Instrumentieren der Probe mittels eines Heizstabes thermisch herausgeschnitten werden.

Teilbereiche der Frontseite der Schalung werden für das Einspritzen mit einer Pressspanplatte verkleidet um die Hohlräume unter bzw. neben dem Probenkörper zu verschließen. Diese Hohlräume dienen später der Aufnahme des Hydraulikzylinder und eines Wegaufnehmers. Die Frontabdeckungen werden mit dem Schalungskörper verschraubt und die Schraubenköpfe mit Klebeband abgedeckt. Dies erleichtert nach dem Einspritzvorgang die Demontage der Frontabdeckung.

Die Schalung wurde so ausgeführt, dass in einem Arbeitsvorgang zwei Probenkörper entstehen. Dadurch kann nach dem Einspritzen und einer Kontrolle der Probenqualität die qualitativ hochwertigere Probe für den Versuch ausgewählt werden.



#### 4.2.4 Datenaufzeichnung

Als Recheneinheit wird ein Industriecomputer der Firma Bernegger und Rainer eingesetzt. Der LCD Bildschirm dient als Benutzeroberfläche und der Visualisierung des Versuchablaufes. Die Eingabe der Belastungsstufen und der Belastungsintervalle erfolgt über einen Touchscreen.



Abb. 26.: Bedienungsoberfläche der Programmier- und Datenspeichereinheit

Die Programmierung erfolgt unter Verwendung des LAB-View Programms von Microsoft. Das folgende Bild (Abbildung 26) zeigt die Programmier- und Speichereinheit der Druckversuchsanlage im Labor. Mit Hilfe eines angeschlossenen Notebooks können bereits im Labor oder auf der Baustelle die Regelparameter des PID Reglers eingestellt werden. Über die Bedienungsoberfläche wird das Belastungsprogramm vor Versuchsbeginn eingegeben. Es kann auch während des laufenden Versuches das Belastungsprogramm abgeändert werden.

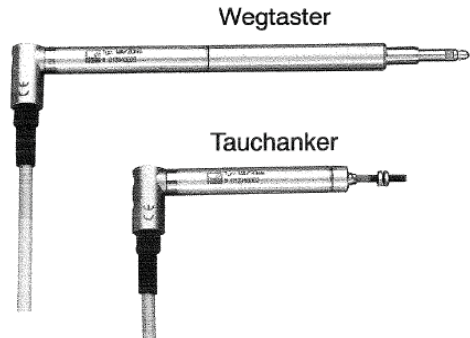


*Abb. 27.: Programmier- und Datenspeichereinheit mit angeschlossenem Notebook*

Die Aufnahme der Verschiebung der Probe erfolgt mit zwei induktiven Wegaufnehmern der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (HBM) mit der Firmenbezeichnung K-WA-T-010W-32K-K1-F1-2-2.

# WA

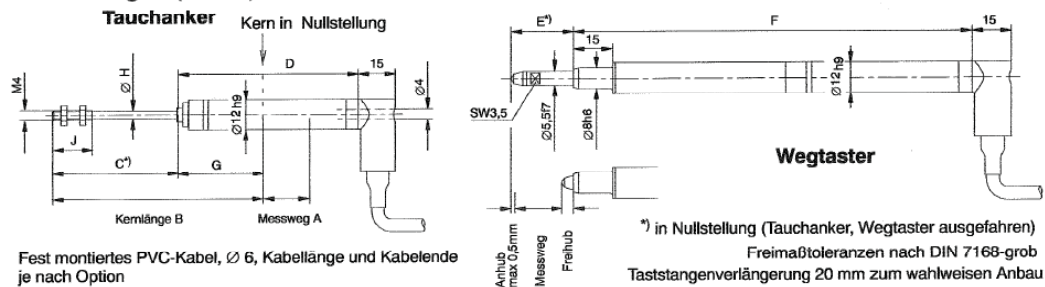
## Induktive Standard-Wegaufnehmer



### Charakteristische Merkmale

- Wegtaster und Aufnehmer mit losem Tauchanker
- Gute Temperaturstabilität bei Temperaturgradienten
- Platzsparend durch kurze Bauform
- Druckfeste Aufnehmer für Wegmessung im Hydraulikzylinder
- Hohe Lebensdauer durch Beschleunigungsfestigkeit
- Option: Hochtemperaturversion bis 150 °C
- Ausgangssignal wählbar: 80 mV/V, 0,5-10 V

### Abmessungen (in mm)



Fest montiertes PVC-Kabel,  $\varnothing 6$ , Kabellänge und Kabelende je nach Option

Messbereich	Tauchanker							Wegtaster		
	A	B	C	D	G	$\varnothing H$	J	A	E	F
0...2 mm	2	75,5	40	69	35,5	1,2	15	2	14	130
0...10 mm	10	66	40	69	26 ± 0,5	3,7	16	10	14	130
0...20 mm	20	67	55	64	32 ± 0,5	3,7	16	20	24	170
0...50 mm	50	117	85	114	32 ± 0,5	3,7	16	50	54	230
0...100 mm	100	180	134	181,6	46 ± 10	3,7	16	100	104	372,6
0...200 mm	200	280	234	281,6	46 ± 10	3,7	16			
0...300 mm	300	380	334	381,6	46 ± 10	3,7	16			
0...500 mm	500	580	534	581,8	46 ± 10	3,7	16			

Abb. 28.: Datenblatt Wegeaufnehmer Fa. Hottinger Baldwin Messtechnik [12]

Die verwendeten Wegeaufnehmer haben einen Messbereich von 0 bis 10 mm. Die Gesamtmessstrecke beträgt 250 mm.

## 5 Versuche

### 5.1 Einbau

Vor Beginn des Einspritzvorganges wird die Tunnellaibung abgelautet. Anschließend werden Löcher für die Steckeisen gebohrt, die Eisen darin versetzt und der Schalungskörper darauf montiert. Die Schalung wird zusätzlich mit Drähten verspannt, um durch die beim Einspritzen wirkenden Kräfte nicht verschoben zu werden.



*Abb. 29.: Schalung vor dem Einspritzen*

Abbildung 29 zeigt die an der Tunnellaibung montierte Schalung vor dem Einspritzen.



*Abb. 30.: Spritzen des Sockel (Widerlager für den Druckzylinder)*

Beim Einspritzen wird zuerst unter der Schalung ein Sockel gespritzt der als Auflager für den Druckzylinder dient. Beim Einspritzen ist darauf zu achten, dass unterhalb der Schalung kein Spritzschatten entsteht und der Rückprall im Bereich des Sockelfußes abrollen kann. Dazu wurde wie in Abbildung 30 ersichtlich der Sohlbereich eingetieft.



*Abb. 31.: Einspritzen der Schalung*

Nachdem der Sockel gespritzt ist wird der Spritzvorgang seitlich und in der Schalung nach oben fortgesetzt. Dies soll möglichst in einem Zug und kontinuierlich geschehen um ein homogenes Betongefüge im Probenkörper zu erreichen.



*Abb. 32.: Nach Einspritzen der Schalung*

Nach dem Einspritzen der Schalung wird die Vorderseite der Probe vorsichtig abgezogen um einen Probenkörper mit einer definierten Querschnittsfläche zu gewährleisten. (Abbildung 33)



*Abb. 33.: Abgezogene Probenkörper*

Nach einer Aushärtezeit von ca. einer Stunde kann mit dem Freilegen und Instrumentieren der Probe begonnen werden.

Dazu werden die vorderen Abdeckplatten der Schalung abgeschraubt und die seitlichen Styroporplatten vorsichtig mit einem Heizstab thermisch herausgeschnitten. Durch das Entfernen der Styroporplatten ist die Probe seitlich vollständig frei beweglich. An der Rückseite ist die Probe durch die Gleitfläche zwischen Flies und der Pressspanplatte ebenfalls frei beweglich.

Auf den freigelegten Probenkörper werden nun mit Hilfe von Schnellklebemörtel vorne und seitlich Aluwinkel aufgebracht, auf denen später die Wegaufnehmer montiert werden. Es werden zwei Wegaufnehmer angebracht um einerseits die gemessenen Werte mitteln zu können und die Gefahr des Ausfalles eines Wegaufnehmers durch den Baustellenbetrieb (Erschütterung durch Fahrzeuge, Beschädigung durch Personen) zu minimieren.





*Abb. 34.: Instrumentierung der Probe*

Während der Schnellklebemörtel aushärtet wird der Druckzylinder unter der Probe eingebaut und an die Hydraulikanlage angeschlossen.

Das Abgleichen und Freilegen, bzw. Instrumentieren der Probe benötigt insgesamt ca. drei bis vier Stunden, nach dieser Zeit ist es möglich den einaxialen In-Situ Langzeit-Druckversuch zu starten. Weiters ist garantiert, dass der Probenkörper den selben Umgebungsbedingungen (Belastung, Belastungsrichtung, Schwinden, Kriechen, Temperatur, Alter) wie die Tunnelschale unterliegt.



Abb. 35.: *eingebaute In-Situ Druckversuchsanlage*

## 5.2 Versuchsergebnisse

Im Zuge dieser Diplomarbeit wurden drei In-Situ Langzeit Druckversuche durchgeführt, um das Regelverhalten und die Baustellentauglichkeit der Anlage zu überprüfen und erste Versuchsergebnisse zu erhalten.

Versuchsnummer	Versuchsort	Versuchszeitraum	Versuchsbezeichnung
1	Tunnel Birgl	27.03.03 - 24.04.04	Birgl 01
2	Tunnel Terfens	23.10.03 - 24.11.03	Terfens 01
3	Tunnel Terfens	17.02.04 - 18.03.04	Terfens 02

Tab. 5: Durchgeführte Langzeitversuche

Im Folgenden werden die theoretischen Belastungspläne, die Programmierereinstellungen und die graphische Auswertung des Spannungs-Stauchungsverhaltens der oben aufgelisteten Versuche dargestellt.

### 5.2.1 Versuch Birgl 01

Belastungsplan						
Zylinderdruck	Druck auf Probe	Spannung	Fläche Probe	Fläche Kolben	Probenlänge	Probenbreite
[bar]	[bar]	[MPa]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm]	[cm]
8	3	0,3	400	143,1	20	20
20	7	0,7	400	143,1	20	20
70	25	2,5	400	143,1	20	20
210	75	7,5	400	143,1	20	20
280	100	10	400	143,1	20	20

Tab. 6: Belastungsplan Birgl 01

Programmiereinstellungen der Druckversuchsanlage			
Intervall	Dauer	Einstelldruck	Probenspannung
	[h]	[bar]	[MPa]
1	3	8,4	0,3
2	18	19,6	0,7
3	144	69,9	2,5
4	168	209,6	7,5
5	168	279,5	10
6	168	0	0
Versuchsdauer	669	Versuchsbeginn: 27.03.2003 18:20Uhr	
Probenalter bei Versuchsbeginn	3	Versuchsende: 24.04.2003 18:30 Uhr	
Gesamtdauer	672		

Tab. 7: Programmierereinstellungen Birgl 01

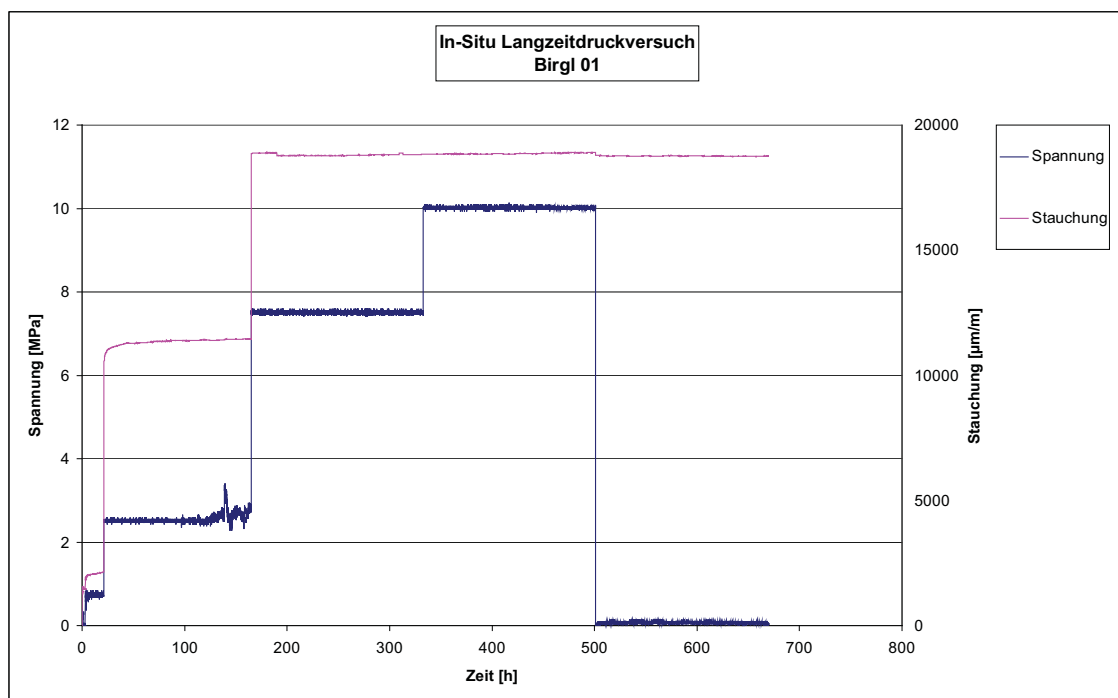


Abb. 36.: In-Situ Versuch Birgl 01

Beim ersten In-Situ Versuch auf der Baustelle des Birgl Tunnels kam es am Ende der dritten Belastungsstufe von 2,5 MPa zu einer so großen Verformung der Probe, dass der Hydraulikzylinder bis zum Anschlag ausgefahren wurde. Der voreingestellte Druck konnte dadurch wieder aufgebaut werden.



Abb. 37.: Probe Birgl 01 beim Ausbau der Versuchsanlage

Abbildung 37 zeigt die vorgefundene Situation beim Ausbau der Anlage nach 28 Tagen. Es kam bei diesem Versuch nicht zum spröden Bruch der Probe, sondern zu einer plastischen Verformung der Probe nach vorne. Dabei wurde die untere Aufnahme des Wegaufnehmers ebenfalls nach vorne geschoben. Der Wegaufnehmer fiel dabei nicht aus der Verankerung und erreichte einen Endwert von ca. 18.700  $\mu\text{m/m}$ .

Beim Versuch Birgl 01 wurde eine Schalung verwendet, mit der es möglich war nur an der Frontseite des Probenkörpers einen einzigen Wegaufnehmer zu installieren. Für die folgenden Versuch wurde der Schalungsaufbau (siehe Abschnitt 4.2.3 Schalung) modifiziert um auch an der Seite einen Wegaufnehmer installieren zu können.

### 5.2.2 Versuch Terfens 01

Belastungsplan						
Zylinderdruck	Druck auf Probe	Spannung	Fläche Probe	Fläche Kolben	Probenlänge	Probenbreite
[bar]	[bar]	[MPa]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm]	[cm]
8	3	0,3	400	143,1	20	20
20	7	0,7	400	143,1	20	20
70	25	2,5	400	143,1	20	20
210	75	7,5	400	143,1	20	20
280	100	10	400	143,1	20	20

Tab. 8: Tabelle Belastungsplan Terfens 01

Programmiereinstellungen der Druckversuchsanlage			
Intervall	Dauer	Einstelldruck	Probenspannung
	[h]	[bar]	[MPa]
1	3	8,4	0,3
2	18	19,6	0,7
3	144	69,9	2,5
4	168	209,6	7,5
5	168	279,5	10
6	168	0	0
Versuchsdauer	668	Versuchsbeginn: 23.10.2003 20:00Uhr	
Probenalter bei Versuchsbeginn	4	Versuchsende: 24.11.2003 18:00 Uhr	
Gesamtdauer	672		

Tab. 9: Programmierereinstellungen Terfens 01

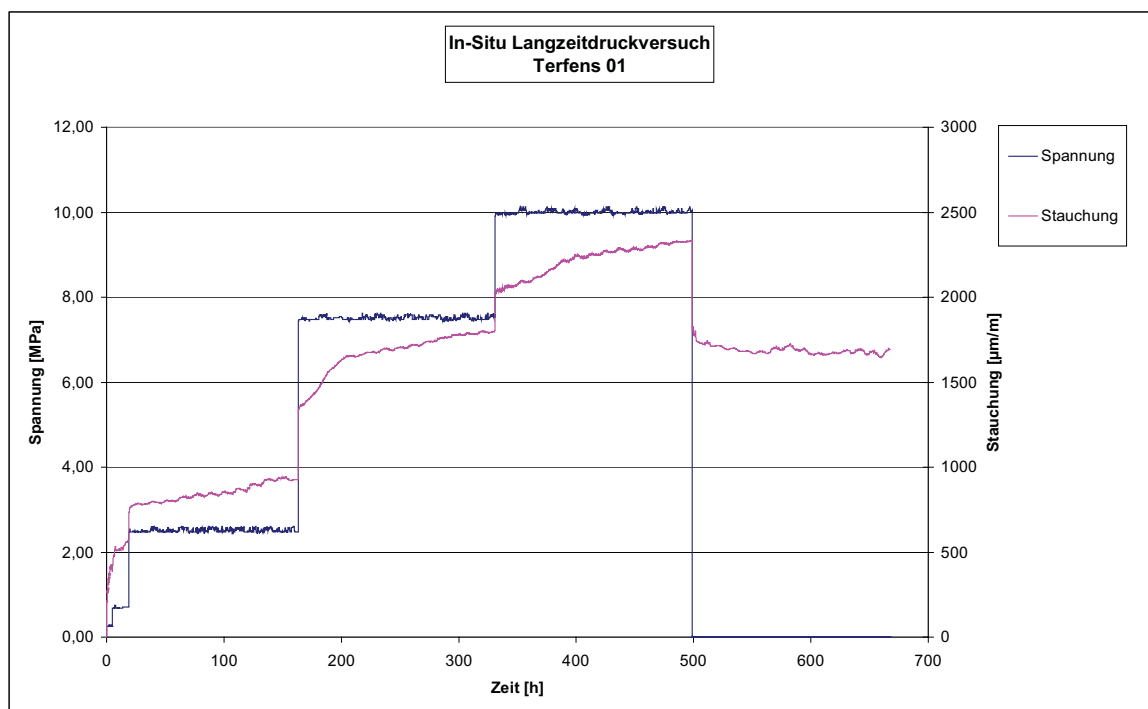


Abb. 38.: In-Situ Versuch Terfens 01

Beim ersten Langzeitdruckversuch auf der Baustelle des Tunnel Terfens wurde der identische Belastungsplan wie bereits am Birgl Tunnel angewendet. Der Versuch lief ebenfalls über den Zeitraum von 28 Tagen. Abbildung 37 zeigt das Spannungs-Stauchungsverhalten. Das Regelverhaltens der Anlage war bei diesem Versuch sehr

gute. Während der gesamten Versuchsdauer kam es im Probenquerschnitt nur zu sehr geringen Druckschwankungen im Bereich von +/- 0,1 MPa.



Abb. 39.: Probe Terfens 01 nach Versuch

Nach Beendigung des Versuches und Abbau der Wegaufnehmer wurde ein Belastungstest der Anlage durchgeführt und die Probe bis zum Bruch belastet. Es wurden dabei keine Datenaufzeichnungen aufgenommen. Abbildung 39 zeigt die Probe nach dem Belastungsversuch.

### 5.2.3 Versuch Terfens 02

Belastungsplan						
Zylinderdruck	Druck auf Probe	Spannung	Fläche Probe	Fläche Kolben	Probenlänge	Probenbreite
[bar]	[bar]	[MPa]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm]	[cm]
28	10	1	400	143,1	20	20
70	25	2,5	400	143,1	20	20
175	62,5	6,25	400	143,1	20	20
280	100	10	400	143,1	20	20
335	120	12	400	143,1	20	20
419	150	15	400	143,1	20	20

Tab. 10: Belastungsplan Terfens 02

Programmiereinstellungen der Druckversuchsanlage			
Intervall	Dauer	Einstelldruck	Probenspannung
	[h]	[bar]	[MPa]
1	6	28	1
2	14	69,9	2,5
3	24	174,7	6,25
4	144	279,5	10
5	168	335,4	12
6	168	419,3	15
6	168	0	0
Versuchsdauer	692	Versuchsbeginn: 17.02.2004 19:00Uhr	
Probenalter bei Versuchsbeginn	4	Versuchsende: 18.03.2004 18:00 Uhr	
Gesamtdauer	696		

Tab. 11: Programmierereinstellungen Terfens 02

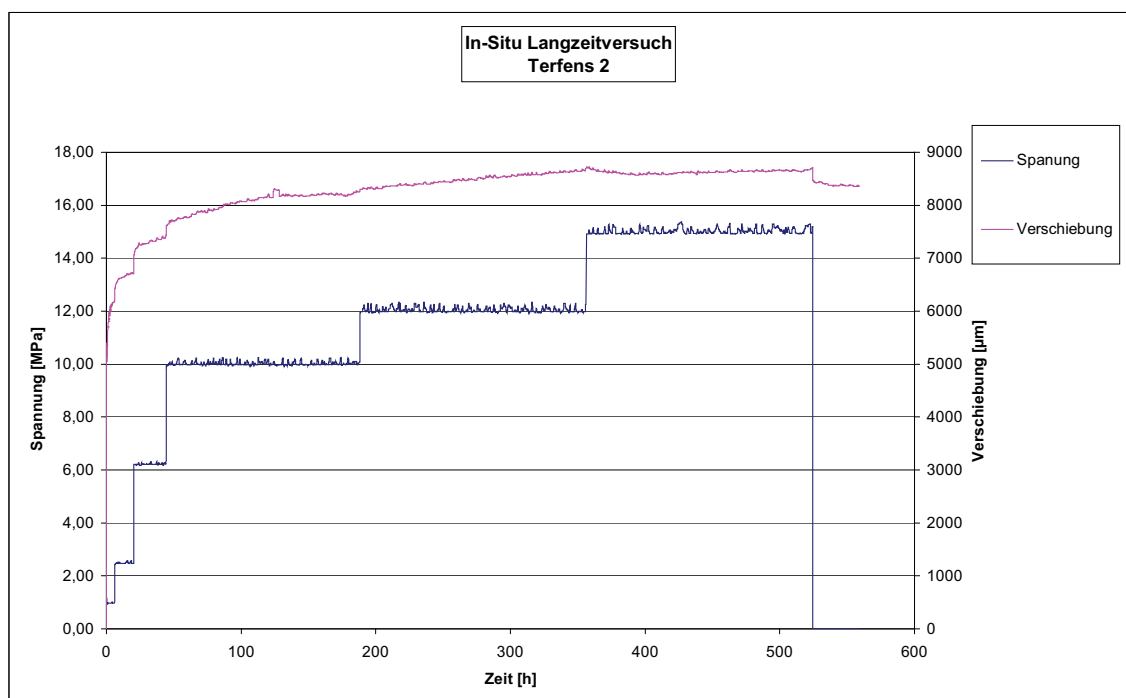


Abb. 40.: In-Situ Versuch Terfens 02



Beim In-Situ Langzeitversuch Terfens 02 wurde ein geändertes Belastungsprogramm angewendet. Die Probe wurde in der ersten Belastungsstufe mit einer Spannung von 1 MPa belastet, dabei dürfte es zum Bruch der Probe gekommen sein. Bis zur Belastungsstufe 4 (10 MPa) kam es aber zu weiteren Sofortverschiebungen der Probe bei Belastungssteigerung.



*Abb. 41.: Probe Terfens 02*

Abbildung 41 zeigt die vorgefundene Situation beim Ausbau der Anlage. Der Druckzylinder war vollständig ausgefahren und die Probe gebrochen. Ähnlich wie beim Versuch Birgl 01 war der Probenkörper leicht nach vorne verschoben. Das Spannungs-Verschiebungsdiagramm lässt vermuten, dass der Wegaufnehmer erst bei der abschließenden Entlastung aus seiner Halterung gefallen ist.

## 6 Abschließende Bemerkungen

Wie sich bei den drei durchgeführten Versuchen zeigte, ist es von großer Wichtigkeit einen Probenkörper von guter Qualität herzustellen um die Prüfspannung vor allem im Frühstadium des Versuches ohne Versagen des Probenkörpers aufbringen zu können. Es ist die Frühfestigkeitsentwicklung des auf der Baustelle eingesetzten Spritzbetons zu beobachten, um den Spritzbeton vor allem in der Anfangsphase des In-Situ Langzeit-Druckversuches nicht zu überlasten.

Am Beispiel des Versuches Terfens 01 ist ersichtlich, dass bei einer qualitativ hochwertigen Probe und einem der Frühfestigkeitsentwicklung entsprechenden Belastungsprogramm es zu verwertbaren Ergebnissen aus dem In-Situ Langzeit-Druckversuch kommt.

Hilfreich bei der Versuchsauswertung wäre die Aufzeichnung des Kolbenweges im Druckzylinder um die aufgenommenen Daten der Wegaufnehmer besser interpretieren zu können.

Weiters sollte während des Langzeitdruckversuches der Versuchsaufbau in regelmäßigen Abständen kontrolliert und aufgezeichnet werden.

Mit dem Einsatz der In-Situ Langzeitdruck-Versuchsanlage ist es nun möglich den Versuchsablauf vom Labor auf die Baustelle zu verlegen. Damit entfällt die Gewinnung von Bohrkernen aus der Spritzbetonschale oder aus Spritzkisten und der Transport zu geeigneten Labors. Der In-Situ Versuch kann bereits drei bis vier Stunden nach dem Einspritzvorgang begonnen werden.

Die aus den In-Situ Langzeitversuchen gewonnenen Erkenntnisse dienen der Weiterentwicklung von Materialgesetzen. Diese sind notwendig um über Dehnungsmessungen die Spritzbetonauslastung bestimmen zu können. Durch die Verwertung der Ergebnisse dieser Versuche in der Fließratenmethode oder in rheologischen Modellen in numerischen Berechnungen kann das Verhalten einer Spritzbetonschale realistisch simuliert werden und ein Beitrag zur wirtschaftlichen und sicheren Dimensionierung geleistet werden. [1]

---

## 7 Literatur

- [1] Probst, B.: Entwicklung einer Langzeitdruckversuchsanlage für den Baustellenbetrieb zur Bestimmung des Materialverhaltens von jungem Spritzbeton. Diplomarbeit, Montanuniversität Leoben, 1999.
- [2] Kainrath-Reumayer, S., Geißbauer, J.: Beitrag zur Entwicklung einer In-Situ Druckversuchsanlage zur Bestimmung von Materialeigenschaften von Spritzbeton. Meldearbeit, Montanuniversität Leoben, 2001.
- [3] Pittino, G.; et.al.: Spritzbeton - der etwas andere Beton, Untersuchungen und Prüfung zum Materialverhalten von Spritzbeton. Beton- und Stahlbetonbau, Heft 2/2004, 99. Jahrgang, S.97-102
- [4] Müller M.: Kriechversuche an jungem Spritzbeton zur Ermittlung der Parameter für Materialgesetze. Diplomarbeit, Montanuniversität Leoben, 2001.
- [5] Kienberger, G.: Einschaliger Tunnelausbau-Einfluss des zeitabhängigen Materialverhaltens auf die Ausbaubeanspruchung. Dissertation, Montanuniversität Leoben, 1999.
- [6] Litz, L.: Empirische Verfahren zur Reglereinstellung am Beispiel eines Dreikomponenten Reglers. Vorlesungsskript, Universität Kaiserslautern.
- [7] Roth-Stielow, J.: PID-Regler. Übungsskript, Universität Stuttgart.
- [8] Fa. KEB Antriebstechnik: Datenblätter
- [9] Fa. Rahmer + Jansen GmbH: Datenblätter
- [10] Fa. HAWE Hydraulik: Datenblätter
- [11] Fa. HydroTEC GmbH International: Datenblätter
- [12] Fa. Hottinger Baldwin Messtechnik: Datenblätter
- [13] Fa. Eibl Hydraulik & Drives: Datenblätter