

Druckstollen und Druckschächte

Bemessung – Konstruktion – Ausführung

Von Gerhard Seeber

Unter Mitarbeit von R. Friedrich

ENKE im Georg Thieme Verlag
Stuttgart · New York 1999

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	XIII
Symbole/Indizes	XIV
1 Allgemeines, Definition	1
1.1 Druckstollen von Wasserkraftwerken	2
1.2 Entwurfskriterien	3
1.2.1 Allgemeines	3
1.2.2 Kriterien aus der Topografie	3
1.2.3 Kriterien aus der Geologie	3
1.2.4 Felsmechanische Kriterien	3
1.2.5 Bautechnische Kriterien	3
1.2.5.1 Vortrieb	3
1.2.5.2 Auskleidungsart	6
1.2.6 Hydraulische Kriterien	6
1.2.7 Betriebliche Kriterien	7
1.2.8 Besonderheiten bei Hangstollen	8
1.3 Besondere Kriterien für den Kraftabstieg	9
1.3.1 Druckschacht oder freie Druckrohrleitung	9
1.3.2 Bautechnische Bedingungen	9
1.3.3 Wahl zwischen Schrägschacht und Lotschacht	10
1.3.4 Regelfähigkeit des Kraftwerkes	11
1.4 Trassierungsmöglichkeiten	11
1.4.1 Klassische, alpine Lösung	11
1.4.2 Direkte, gerade Verbindung vom Speicher zum Krafthaus	12
1.4.3 Schwedische Lösung	13
1.5 Aufgabe und Wirkung von Druckstollenauskleidungen	14
1.5.1 Aufgabe der Druckstollenauskleidung	14
1.5.2 Zur Frage der Dichtheit von Druckstollenauskleidungen	14
1.5.2.1 Wirkung von Wasseraustritten bei Betonauskleidungen	14
1.5.2.2 Wirtschaftliche Grenze von Wasserverlusten	14
2 Grundlagen der Berechnung und Bemessung	19
2.1 Allgemeines	19
2.2 Die Theorie des Rohres und der gelochten Scheibe	23
2.2.1 Allgemeines	23
2.2.1.1 Vorzeichenfestlegung für Druckstollenstatik	23
2.2.1.2 Geometrische Beziehungen, Randbedingungen, Elastizitätsbeziehungen	23
2.2.2 Das dünnwandige Rohr (Membrantheorie)	24
2.2.3 Das dickwandige Rohr	26
2.2.3.1 Allgemeines	26
2.2.3.2 Die gelochte Scheibe – Bettung des Rohres im Gebirge	29

2.2.3.3	Das gerissene Rohr als Modell für die gerissene Zone des Gebirges	32
2.2.3.4	Auskleidung und Gebirge als Doppelrohr	34
2.2.4	Die gelochte Scheibe – Primärer und sekundärer Spannungszustand	35
2.2.4.1	Tiefliegender Stollen	35
2.2.4.2	Seicht liegender Druckstollen	40
2.2.5	Geneigte Geländeoberfläche	40
2.2.6	Elliptischer Querschnitt	40
2.3	Belastung durch den hydraulischen Innendruck	40
2.3.1	Der statische Innendruck	40
2.3.2	Der dynamische Innendruck	40
2.3.3	Wirkung des Innendruckes	44
2.3.4	Wirkung von austretendem Druckwasser	45
2.4	Bergwasserdruck (Kluftwasserdruck)	47
2.4.1	Allgemeines	47
2.4.2	Der ruhende Bergwasserdruck	48
2.4.2.1	Wirkung auf die Druckstollenauskleidung	52
2.4.2.2	Messung des Bergwasserdruckes	54
2.4.2.3	Ermittlung des Durchtrennungsgrades	55
2.4.3	Sickerwasserströmung	55
2.4.3.1	Allgemeines	55
2.4.3.2	Die Sickerströmung als Potentialströmung – logarithmische Druckabnahme	61
2.4.3.3	Das poröse, dickwandige Rohr	62
2.4.3.4	Lineare Kluftwasserdruckänderung	64
2.4.3.5	Überlagerung mit mechanischen Spannungen (p_F)	66
2.4.3.6	Doppelwandiges Rohr	66
2.4.3.7	Betonauskleidung und Gebirge	67
2.4.3.8	Reichweite der Sickerströmung	70
2.4.3.9	Spannungen und Dehnungen in Auskleidung und Gebirge	70
2.5	Gebirgsspannung – Gebirgsdruck	71
2.5.1	Allgemeines	71
2.5.2	Primärer Spannungszustand	72
2.5.2.1	Vertikale Hauptspannung	72
2.5.2.2	Horizontale Hauptspannung	72
2.5.2.3	Tektonische Spannungen	73
2.5.2.4	Besonderer Spannungszustand an steilen Hängen	74
2.5.2.5	Quelldruck	75
2.5.2.6	Temperaturspannungen	75
2.5.3	Sekundärer Spannungszustand	76
2.5.3.1	Elastischer Zustand	76
2.5.3.2	Elastoplastischer Zustand	77
2.5.3.3	Auswirkung eines Ausbauwiderstandes, der wie ein Innendruck wirkt (tertiärer Spannungszustand)	80
2.5.3.4	Verformungen bei elastoplastischem Verhalten	81
2.5.4	Gebirgsmitwirkung	81
2.5.4.1	Nutzbare Gebirgsmitwirkung	82
2.5.5	Messung der Gebirgsmitwirkung	85
2.6	Überlagerung der Belastungen von Gebirge und Innendruck	86
2.6.1	Allgemeines	86
2.6.2	Chronologischer Aufbau der Belastungen	86
2.6.3	Unverkleideter Druckstollen	87

2.6.4	Betonauskleidungen	87
2.6.4.1	Standfestes Gebirge	87
2.6.4.2	Nicht standfestes Gebirge	87
2.6.5	Berechnungsvorgang	88
2.7	Gebirgsverhalten – Messung der felsmechanischen Kennwerte	89
2.7.1	Erforderliche Kennwerte	89
2.7.2	Übersicht über Fels- und Materialkennwerte	89
2.7.3	Messung der Primärspannung	89
2.7.4	Messung der Gebirgsverformung	95
2.7.4.1	Radialpresse	95
2.7.4.2	Andere Großversuche	121
2.7.4.3	Laborversuche an Bohrkernen	121
2.7.5	Anisotropie	123
2.7.5.1	Anisotropie der Verformung	123
2.7.5.2	Anisotropie der Druckfestigkeit	124
2.7.5.3	Anisotropie der Scherfestigkeit	124
2.7.5.4	Überlagerung der anisotropen Wirkung	125
3	Berechnung und Bemessung	126
3.1	Allgemeines	126
3.2	Historischer Überblick	129
3.3	Berechnung und Bemessung	132
3.3.1	Analytische Verfahren	132
3.3.1.1	Allgemeines	132
3.3.1.2	Voraussetzung für die Anwendbarkeit analytischer Verfahren	132
3.3.2	Methode der finiten Elemente (FEM)	134
3.3.2.1	Allgemeines	134
3.3.2.2	Anwendung der FE-Methode für Druckstollen	137
3.4	Berechnung des Spannungszustandes um einen Hohlraum im Gebirge	137
3.4.1	Elastischer Zustand	137
3.4.2	Elasto-plastischer Zustand	140
3.4.2.1	Berechnung nach Kastner	140
3.4.2.2	Berechnung nach Amberg	144
3.4.2.3	Erfassung des Einflusses der dritten Hauptspannung nach Feder – Arwanitakis	144
3.4.2.4	Tertiärer Spannungszustand bei elastoplastischem Verhalten	145
3.5	Berechnung des Verformungszustandes um einen Hohlraum im Gebirge	146
3.5.1	Elastischer Zustand	146
3.5.2	Elasto-plastischer Zustand	147
3.6	Berechnung der Interaktion Gebirge/Stützauskleidung Kennlinienverfahren	152
3.6.1	Allgemeines	152
3.6.2	Ermittlung der Kennlinie für das einen Hohlraum umgebende Gebirge	156
3.6.3	Kennlinien (= Arbeitslinien) der Stützmittel	159
3.6.4	Stabilisierung des Gebirges – Bemessung der Stützauskleidung	162
3.6.4.1	Streuung der felsmechanischen Kennwerte	164
3.6.4.2	Zeiteinfluß	164
3.6.5	Eichung der Kennlinien durch Messungen	165
3.6.6	Erfassung nachträglicher Veränderungen	167
3.6.7	Bemessung einer Systemankerung/Ermittlung von Ankerkennlinien	169
3.7	Berechnung von Druckstollenauskleidungen auf Innendruck bei Gebirgs- mitwirkung. Analytisch-Grafisches-Berechnungs-/Bemessungsverfahren	174
3.7.1	Allgemeines	174

3.7.2	Dünne Auskleidungen (z.B. Stahlpanzerung)	175
3.7.2.1	Elastischer Zustand	176
3.7.2.2	Nicht elastisches Verhalten	177
3.7.2.3	Begrenzung der Gebirgsmitwirkung	178
3.7.2.4	Berücksichtigung eines Temperaturspaltes	178
3.7.2.5	Berücksichtigung einer Spaltinjektion	180
3.7.2.6	Berücksichtigung des Gebirgskriechens	181
3.7.2.7	Berücksichtigung der Anisotropie	181
3.7.2.8	Berücksichtigung von kritischen Grenzzuständen bei Panzerungen – Reißüberbrückung	182
3.7.3	Dickwandige Auskleidung (Beton)	185
3.7.3.1	Allgemeines	185
3.7.3.2	Elastischer Zustand, ohne Spalt	185
3.7.3.3	Berücksichtigung der nichtlinearen Arbeitslinie und der Einflüsse aus Temperatur und Schwinden	188
3.7.4	Dickwandige Betonauskleidungen mit Vorspannung gegen das Gebirge ..	189
3.7.4.1	Vorspannverluste	193
3.7.4.1.1	Abkühlung	193
3.7.4.1.2	Schwinden	195
3.7.4.1.3	Kriechen des Betonringes	196
3.7.4.1.4	Kriechen des Gebirges	201
3.7.4.1.5	Zusammenwirken von Beton- und Gebirgskriechen	202
3.7.4.1.6	Wirksamer Injektionsdruck	205
3.7.4.1.7	Verbleibende Vorspannung und Sicherheit	205
3.7.4.2	Zusammenfassende Berechnung und Bemessung – analytisch-graphisch	206
3.7.5	Vorgespannte Betonauskleidung mit Dichtfolie	209
3.7.6	Vorgespannte Betonauskleidung mit dünnwandiger Panzerung	210
3.7.6.1	Vorspannverluste	211
3.7.6.1.1	Abkühlung (siehe auch Pkt. 3.7.4.1.1)	211
3.7.6.1.2	Kriechen (siehe auch Pkt. 3.7.4.1.5)	211
3.8	Sickerwasserströmung	213
3.9	Berechnung von Druckstollenpanzerungen auf hydraulischen Außendruck	215
3.9.1	Allgemeines	215
3.9.2	Berechnungsverfahren	215
3.9.2.1	Klassische Beulformel	215
3.9.2.2	Beulberechnung nach Amstutz	216
3.9.2.3	Semi-empirische Beulformel von Montel	218
3.9.2.4	Beulberechnung nach Jacobsen	219
3.9.2.5	Neuere Untersuchungen des Arbeitskreises „Beulversuche“	219
4	Auskleidungsarten, Konstruktion und Ausführung	220
4.1	Allgemeines	220
4.2	Unausgekleidete Druckstollen und Druckschächte	221
4.3	Betonauskleidungen	224
4.3.1	Spritzbetonauskleidung	224
4.3.1.1	Allgemeines	224
4.3.1.2	Anwendungsbereiche	224
4.3.2	Ortbetonauskleidung (Unbewehrt, nicht vorgespannt)	225
4.3.2.1	Allgemeines	225
4.3.2.2	Anwendungsbereich	226
4.3.2.3	Betonspezifische Probleme	226

4.3.2.4 Die Dichtheit der Betonauskleidung.....	227
4.3.3 Bewehrte Betonauskleidung.....	228
4.4 Vorgespannte Betonauskleidungen.....	229
4.4.1 Aktive Vorspannung, Vorspannung durch vorgespannte Bewehrung.....	229
4.4.2 Vorspannung gegen das Gebirge.....	231
4.4.2.1 Vorspannung durch Bohrlochinjektion.....	231
4.4.2.2 Vorspannungsverfahren nach Kieser „Kernring-Auskleidung“.....	233
4.4.2.3 TIWAG – Spaltinjektionsverfahren.....	237
4.4.3 Vorgespannte Betonauskleidungen mit Dichthaut.....	244
4.4.3.1 Allgemeines, Anwendungsbereich.....	244
4.4.3.2 Vorgespannte Betonauskleidung mit Dichtfolie.....	244
4.4.3.3 Vorgespannte Betonauskleidung mit Dünnwandiger Panzerung.....	250
4.4.3.4 Vergleich der Anwendung von Foliendichthaut und dünnwandiger Panzerung.....	253
4.4.4 Übergang dünnwandige – dickwandige Panzerung.....	254
4.5 Konventionelle, dickwandige Panzerung.....	256
4.5.1 Allgemeines.....	256
4.5.2 Konkrete Bemessung auf Innendruck mit Gebirgsmitwirkung.....	256
4.5.2.1 Einflußfaktoren auf die Bemessung mit Gebirgsmitwirkung.....	257
4.5.2.2 Auswirkung dynamischer Belastungen.....	259
4.5.3 Sicherung gegen Außendruck - Beulsicherung.....	264
4.5.3.1 Allgemeines, Beulvorgang.....	264
4.5.3.2 Erhöhung der Beulfestigkeit von Panzerrohren.....	266
4.5.3.3 Herabsetzung des Außendruckes; Drainagen; Rückschlagventile.....	270
4.5.4 Bauvorgang.....	270
4.5.4.1 Rohrfertigung und Montage.....	270
4.5.4.2 Kontrolle der Rohrfertigung und Montage.....	271
4.5.4.3 Schweißung großer Wanddicken, Spannungsfreiglühen.....	272
4.5.4.4 Hinterbetonierung.....	273
4.5.4.5 Spaltinjektion.....	274
4.5.4.6 Druckprobe.....	277
4.6 Anwendungsbereiche von Druckstollenauskleidungen – Übersicht.....	278
4.7 Nachträgliche Behandlung von zu spät erkannten Schwachstellen im Gebirge und in der Auskleidung.....	279
4.7.1 Allgemeines.....	279
4.7.2 Schwachstellen treten beim Ausbruch auf.....	280
4.7.3 Schwachstellen treten erst nach Füllung des Druckstollens bzw. nach Betriebsbeginn auf.....	281
5 Beispiele.....	283
5.1 Der Druckstollen des Inn-KW Prutz-Imst der TIWAG; Bauzeit 1953–1956.....	283
5.2 Der Druckstollen und Druckschacht des Kaunertal-Kraftwerkes der TIWAG; Bauzeit 1961–1964.....	287
5.2.1 Der Druckstollen.....	289
5.2.2 Die dünnwandigen Panzerungen.....	291
5.2.2.1 Druckstollen.....	291
5.2.2.2 Wasserschloß – Schrägschacht.....	293
5.2.3 Der Druckschacht.....	294
5.3 Kraftwerksgruppe Sellrain-Silz TIWAG; Bauzeit 1977–1981.....	297
5.3.1 Der Druckschacht der Oberstufe Kühtai.....	300
5.3.2 Der Druckstollen und Druckschacht der Hauptstufe Silz.....	300

5.4	Pumpspeicherwerk Drakensberg der Electricity Supply Commission of South Africa (ESCOM) (Projektant Gibb Hawkins & Partners, Reading/London); Bauzeit 1977–1981	305
5.5	Kraftwerk Uttendorf II der Österreichischen Bundesbahnen; Bauzeit 1987–1990 ..	310
5.5.1	Allgemeines	310
5.5.2	Der Druckstollen	311
5.5.3	Der Kraftabstieg	312
5.5.3.1	Trassenwahl	312
5.5.3.2	Geotechnische Verhältnisse	315
5.5.3.3	Bestimmung der Stützmittel	315
5.5.3.4	Bemessung der Auskleidungen	315
5.5.3.5	Bauausführung	316
	Literatur	326
	Sachverzeichnis	341