

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

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



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

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

DIPLOMARBEIT Master Thesis

Grundlagen zum hydraulischen Entwurf von Grundablässen

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

unter der Leitung von

Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Reinhard Prenner

E222

Institut für Konstruktiven Wasserbau

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Hubert Strenn

0426551

Michael Gruber Weg 313, 2042 Guntersdorf

Wien, am 17.9.2013

A handwritten signature in blue ink that reads 'Hubert Strenn'.

Abstract

This master thesis treats different issues of a bottom outlet. The special focus is directed on the layout design of the bottom outlet properly to different types of dams. Furthermore this subject is discussed in detail from the intake structure towards to energy dissipation. The hydraulic phenomena like cavitation, aeration and cross waves are going to be discussed in a separate chapter.

For an efficient hydrodynamically design of the pressure tunnel is – beside the intake structure – also the transition of the pressure tunnel cross section to the gate chamber cross section particularly important, because this could result due to flow separation to a pressure drop and finally to cavitation generation. In order to prevent this detrimental flow conditions a sufficient aeration of the free flow tunnel section is necessary by means of an aeration pipe. Additionally devices (bottom and wall aerator) to prevent cavitation erosion damages on the tunnel lining can be installed by occurrence of low pressure conditions.

By means of the gates the water discharge in the bottom outlet can be regulated. The gates are differentiated in sliding gates and roller gates. Both need seals and a gate guidance. To prevent gate vibrations a definite flow separation point has to be guaranteed by a rectangular bottom seal.

The layout design of the bottom outlet influences the flow behaviour more or less significantly. In case of the existence of several gates in the gate chamber, disadvantageous flow conditions can occur during asymmetric gate operation conditions. In consequence chocking effects can disturb the regular flow behaviour and could finally cause damages on the tunnel lining.

In order to protect the downstream river bed against massive erosion damages, the energy of the maximum discharge of the bottom outlet has to be dissipated properly. For this purpose, a stilling basin or a ski jump solution are appropriate. Finally it is stated that the dimension of a scour is influenced by the degree of the jet disintegration, the impact angle, the downstream depth and the river bed (fractured rock size) material.

Kurzfassung

Diese Diplomarbeit behandelt die verschiedenen Bereiche eines Grundablasses. Der besondere Fokus richtet sich nach einer Abhandlung über die verschiedenen Möglichkeiten der Linienführung bei Talsperrenspeichern auf den eigentlichen Entwurf des Grundablassstollen. Dieser wird im Detail vom Einlaufbauwerk bis zur Energieumwandlung behandelt. Die hydraulischen Phänomene, wie Kavitation, Belüftung und die Stosswellen werden in einem eigenen Kapitel diskutiert.

Eine strömungsgünstige Ausbildung des oberwasserseitigen Druckbereichs ist neben dem Einlaufbauwerk auch für den Verzug des Stollenquerschnitts zur Apparatekammer und für die Kammer selbst notwendig, da jede Strömungsablösung die Abfuhrkapazität durch Wirbelbildung vermindert, und zum Auftreten von Unterdruck und Kavitationsbildung führen kann. Um das Auftreten von Unterdruck im Abfluss des Freispiegelstollens hintanzuhalten, muss eine entsprechende Belüftung unmittelbar nach der Apparatekammer vorgesehen werden. Bei Bedarf ist zusätzlich zur Vermeidung von Kavitationserrosionsschäden im nachfolgenden Freispiegelstollen der Einbau von Sohl- und Wandbelüftern erforderlich.

Das Wasser wird am Abfließen aus dem Staubecken durch Schütze oder mittels Drucksegmenten gehindert, wobei die Schütze nach der Art der Lagerung in Gleit- und Rollschütze eingeteilt werden können. Im Gegensatz zu Schützen benötigen Drucksegmente keine seitliche Führung. Beide Verschlussarten benötigen eine Abdichtung mittels Dichtungen und eine klar definierte Ablösekante an der Unterkante des Verschlusses, damit der Verschluss nicht zum Schwingen angeregt wird.

Die Linienführung des Stollens beeinflusst das Abflussverhalten. Weiters hat, für den Fall, dass mehrere Verschlüsse im Stollen angeordnet werden die Ausbildung des Vorhofes Einfluss auf die Abfuhrleistung. Bei einem einseitigen Betrieb der Verschlüsse kann es im Anschluss an die Apparatekammer zu ungünstigen Abflusszuständen kommen, wodurch ein Zuschlagen des Querschnittes möglich ist. Dieses Zuschlagen sollte bei der Stollendimensionierung vermieden werden, da ansonst der Lufttransport gestört wird.

Am Ende des Freispiegelstollens muss zum Schutz der Gewässersohle eine Energieumwandlung vorgesehen werden. Das Tosbecken und die Sprungschanze sind hierfür besonders geeignet. Abschließend wird festgehalten, dass die Ausbildung des Kolkes einer Sprungschanze vom Grad der Zerstäubung, dem Auftreffwinkel, der vorliegenden Wassertiefe sowie dem anstehenden Untergrund abhängig ist.

Danksagung

Ich möchte die Gelegenheit nutzen, um mich an dieser Stelle zunächst bei meiner Freundin zu bedanken, ohne die ich mein Studium nie zu einem positiven Abschluss gebracht hätte. Sie hat mir in den letzten Jahren stets den Rücken gestärkt und es geschafft, mich immer wieder zu motivieren.

Ein besonderer Dank gebührt weiters meinem ersten Korrekturleser Hannes, der es gemeistert hat, meine teilweise verworrenen Gedanken in einwandfreies Deutsch zu bringen.

Ein herzliches Dankeschön möchte ich an meinen Betreuer Ao. Univ. Prof. Dipl. Ing. Dr. techn. Reinhard Prenner richten, der durch seine Anregungen und Ideeneinbringung wesentlich zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen hat. Für die rasche Korrektur, die große Flexibilität und seine studentenfreundliche Art möchte ich mich ganz besonders bei ihm bedanken.

Dank richte ich an all jene, die es mir durch sonstige Tätigkeiten, sei es durch fachliche Ratschläge (Andrea), alltägliche Dienste (Maria) oder aufmunternde Worte (Barbara und Matthias) ermöglicht haben, meine Konzentration auf das Studium zu lenken.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Gliederung der Arbeit.....	1
2. Grundablass.....	3
2.1 Führung des Grundablasses	4
2.1.1 Talsperren.....	6
2.1.2 Staudämme	7
2.1.3 Kombination mit Hochwasserentlastung.....	7
2.2 Berechnung der Abflussleistung eines Grundablasses	8
3. Einlaufbauwerk.....	11
3.1 Arten.....	11
3.2 Abfuhrvermögen	13
3.3 Einlaufkonstruktion	14
3.3.1 Einlaufellipse	14
3.3.2 Dammbalken	14
3.4 Probleme	15
3.4.1 Lufteinzug.....	15
3.4.1.1 Beschreibung der Einlaufwirbel	15
3.4.1.2 Bestimmung der kritischen Überdeckung.....	17
3.4.2 Verlandung	19
3.4.2.1 Maßnahmen zur Verhinderung der Verlandung.....	21
3.4.2.2 Auswahl der Methode zur Verhinderung und Beseitigung von Verlandungen	26
4. Apparatekammer	29
4.1 Zulaufbereich zur Apparatekammer	31
4.2 Ausführungsarten.....	31
4.2.1 Querschnittsgestaltung	31
4.2.2 Pfeilerausbildung.....	33
4.2.3 Tiefschütze	33
4.2.4 Belüftung hinter den Absperrorganen.....	35
4.3 Verschlüsse.....	35
4.3.1 Schütze	36
4.3.1.1 Gleitschütz.....	37
4.3.1.2 Rollschütz	38
4.3.1.3 Stoney-Rollerschütz.....	39
4.3.2 Segmentverschlüsse	40
4.3.3 Dichtung	42
4.3.3.1 Profiltypen.....	43
4.3.3.2 Sohlendichtung.....	44

4.3.3.3 Dichtungen für Gleit- und Rollschütz	44
4.3.4 Downpullkräfte.....	45
4.3.5 Belüftung	47
4.3.5.1 Vereinfachte Ermittlung des Luftbedarfs.....	47
4.3.5.2 Verschiedene Berechnungsansätze für den erforderlichen Luftbedarf	49
4.3.5.3 Berücksichtigung der Stollenform bei der Berechnung des Luftbedarfs.....	50
4.3.6 Schwingungen	52
4.3.6.1 Schützenform	53
4.3.6.2 Gleitschütz.....	55
4.3.6.3 Rollschütz	55
4.3.6.4 Vibrationen durch Fehlstellen in den Dichtungen	56
4.3.7 Betriebseinrichtungen.....	57
4.3.7.1 Elektromechanische Betriebseinrichtungen	58
4.3.7.2 Ölhydraulische Betriebseinrichtungen.....	58
4.3.7.3 Hubgeschwindigkeit	59
4.3.7.4 Hub- und Senkkräfte	60
4.3.8 Korrosionsschutz	61
4.3.8.1 Material	62
4.3.8.2 Kathodischer Schutz	63
4.4 Nischenausbildung	64
5. Druck- und Freispiegelstollen.....	67
5.1 Druckstollen.....	67
5.1.1 Linienführung	67
5.1.1.1 Horizontale Linienführung	67
5.1.1.2 Vertikale Linienführung.....	68
5.1.2 Arten von Druckstollen	68
5.1.2.1 Unausgekleidete Druckstollen	69
5.1.2.2 Spritzbetonauskleidung.....	70
5.1.2.3 Einfache und bewehrte Betonauskleidung	70
5.1.2.4 Passiv vorgespannte Betonauskleidung.....	70
5.1.2.5 Aktiv vorgespannte Betonauskleidung	72
5.1.2.6 Betonauskleidung mit Foliendichtung	73
5.1.2.7 Dünnwandige Panzerung mit Betoninnenring.....	73
5.1.2.8 Vollpanzerung aus Stahl	73
5.1.3 Druckstoß	74
5.1.3.1 Plötzliche Durchflussänderung.....	74
5.1.3.2 Lineare Durchflussänderung	77
5.1.4 Bemessung von Druckstollen	79
5.1.4.1 Belastungsfälle bei Druckstollen	79
5.1.4.2 Innenwasserdruck	80
5.1.5.3 Außenwasserdruck.....	82
5.2 Freispiegelstollen.....	83
5.2.1 Ausführungsvarianten	83
5.2.2 Hydraulische Bemessung	84
5.2.3 Fließzustände	87

5.2.3.1 Strömungen in Grundablässen.....	87
5.2.3.2 Die ebene turbulente Grenzschichtströmung.....	90
5.2.3.3 Stoßwellen.....	90
5.2.3.4 Rückstau und Wechselsprung	91
5.2.4 Belüftung	92
5.2.5 Erosion und Abrasion der Baustoffe	92
6. Energieumwandlung	94
6.1 Tosbecken.....	94
6.1.1 Ausführungsvarianten	95
6.1.1.1 Tosbecken ohne Sohlspünge	95
6.1.1.2 Tosbecken mit positiver Sohlschwelle	95
6.1.1.3 Tosbecken mit negativer Stufe.....	95
6.1.1.4 Tosbecken mit Endschwelle	96
6.1.1.5 Tosbecken mit Störkörper	96
6.1.2 Hydraulische Wirkungsweise und Bemessung.....	97
6.1.2.1 Hydraulische Wirkungsweise	97
6.1.2.2 Bemessung	98
6.1.3 Zusätzliche Maßnahmen für eine bessere Energieumwandlung.....	101
6.1.3.1 Aufweitung des Tosbeckens.....	102
6.1.3.2 Gegenströmung.....	103
6.1.3.3 Störkörper	104
6.2 Sprungschancen	104
6.2.1 Abwurf.....	105
6.2.2 Näherungsweise Berechnung der Wurfweite.....	107
6.2.3 Kolkbildung.....	109
7. Hydraulische Phänomene	111
7.1. Kavitation	111
7.1.1 Das physikalische Phänomen	111
7.1.1.1 Definition	111
7.1.1.2 Der Gasdruck	111
7.1.1.3 Kavitationsausbildung	113
7.1.1.4 Typische Situationen, die Kavitation begünstigen	116
7.1.1.5 Schäden durch Kavitation	117
7.1.2 Methoden zur Reduktion von Kavitationsschäden.....	119
7.1.2.1 Methoden zum Schutz	119
7.1.2.2. Gestaltung von Schutzmaßnahmen	120
7.1.3 Luftmitführung im Abfluss	123
7.1.3.1 Oberflächenbelüftung	123
7.1.3.2 Sohlbelüftung	125
7.2 Stosswellen.....	125
7.2.1 Aufhebung von Stosswellen	126
7.3 Belüftung	127
7.3.1 Belüftungsprozess	127

7.3.2 Teilströme, Luftbedarf, Luftaufnahme und Luftkonzentration	127
7.3.2.1 Teilströme	128
7.3.2.2 Luftbedarf	128
7.3.2.3 Luftaufnahme	130
7.3.2.4 Luftkonzentration.....	131
7.3.3 Beginn des Lufteintrags bei Sohlnischen.....	132
8. Conclusio	134
Literaturverzeichnis.....	137

1. Einleitung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird der grundsätzliche Entwurf von Grundablässen größerer Leistungsfähigkeit behandelt.

1.1 Problemstellung

Ein Grundablass ist die für die Gewährleistung der Betriebssicherheit einer Talsperre maßgebende Einrichtung. Im meist verschlossenen Zustand, in dem das Staulevel gehalten wird, dabei steht lediglich der Bereich oberwasserseitig des Schützes unter Wasserdruck. Der unterwasserseitige Bereich steht dagegen unter dem Atmosphärendruck.

Im Betriebsfall sind die Grundablässe sehr großen Belastungen ausgesetzt, sei es aufgrund der großen Druckhöhen oder der, beim Abfluss auftretenden großen Strömungsgeschwindigkeiten. Die dabei auftretenden Belastungen können bei Betätigung der Verschlussorgane zu den unterschiedlichsten Problemen führen. Außerdem kann Kavitation an jeglicher Kante zur Reduktion der Dauerhaftigkeit und Schäden an der Bauteiloberfläche führen. Um die Dauerhaftigkeit des Freispiegelstollens zu gewährleisten, muss eine entsprechende Belüftung vorgesehen werden. Außerdem müssen beim Freispiegelabfluss für die Dimensionierung des Stollens die unterschiedlichsten Strömungserscheinungen berücksichtigt werden.

Die Einleitung des Grundablassdurchflusses in das Unterwasser führt zu Erosionserscheinungen, die eine Eintiefung der Sohle des Gewässers verursacht. Aufgrund dessen muss eine entsprechende Energieumwandlung vorgesehen werden, damit eine solche Erosion der Gewässersohle womöglich verhindert wird.

1.2 Gliederung der Arbeit

Mit dieser Arbeit soll ein Überblick über sämtliche relevanten Einflüsse bei der Planung eines Grundablasses gegeben werden. Aufgrund dessen wird neben den unterschiedlichen Parametern, die Einfluss auf den Querschnitt haben sowie die Neigung in Längsrichtung, auch auf Faktoren eingegangen, die die Langlebigkeit reduzieren. Deswegen wurde die Arbeit, vom Oberwasser ausgehend bis zu dem Unterwasser wie folgt aufgebaut.

Während Kapitel 1 die Einleitung und die Problemstellung darstellt, behandelt das 2. Kapitel die Varianten des Grundablasses. Deswegen wird hier auf die Eigenheiten der verschiedenen Linienführungsvarianten eingegangen. Außerdem wird eine erste näherungsweise Berechnung des Grundablasses diskutiert.

Im 3. Kapitel wird das Einlaufbauwerk in das Zentrum des Interesses gerückt. Außerdem soll auf die unterschiedlichen Probleme, die beim Anströmen des Einlaufbauwerks entstehen können, eingegangen und Ideen zur Verbesserung dargebracht werden.

Im 4. Kapitel wird der Bereich der Apparatekammer behandelt. Dabei wird mit der Beschreibung oberwasserseitig der Verschlüsse bei dem Verzugbereich begonnen. Dann werden die

unterschiedlichen Ausführungsvarianten der Apparatekammer mit den verschiedenen Verschlüssen hinsichtlich der unterschiedlichen Anforderungen besprochen. Am Ende des Kapitels soll noch ein erster kurzer Einblick in die Nischenausbildung gegeben werden.

Im 5. Kapitel werden die Zu- und Ableitungen der Apparatekammer, sprich die Druck- und Freispiegelstollen diskutiert, wobei insbesondere die Planung des Abflussquerschnittes im Zentrum steht.

Im 6. Kapitel wird die notwendige Energieumwandlung im Anschluss an den Freispiegelstollen näher beleuchtet, damit die Sohle des Gewässers vor Erosion geschützt wird. Das besondere Augenmerk wird dabei auf die Dimensionierung und die verschiedenen Einflussparameter der Energievernichtung gelegt.

Das 7. Kapitel behandelt die bei einem Grundablass auftretenden hydraulischen Phänomene. Diese sind die Kavitation, die Stosswellen und die Belüftung. Im Zuge der Arbeit wird versucht Maßnahmen aufzuzeigen die, die Ausbildung verhindern oder wie bei der Belüftung den Eintrag von Luft begünstigen.

Abbildung 1 stellt einen Überblick über den Aufbau der Arbeit dar.

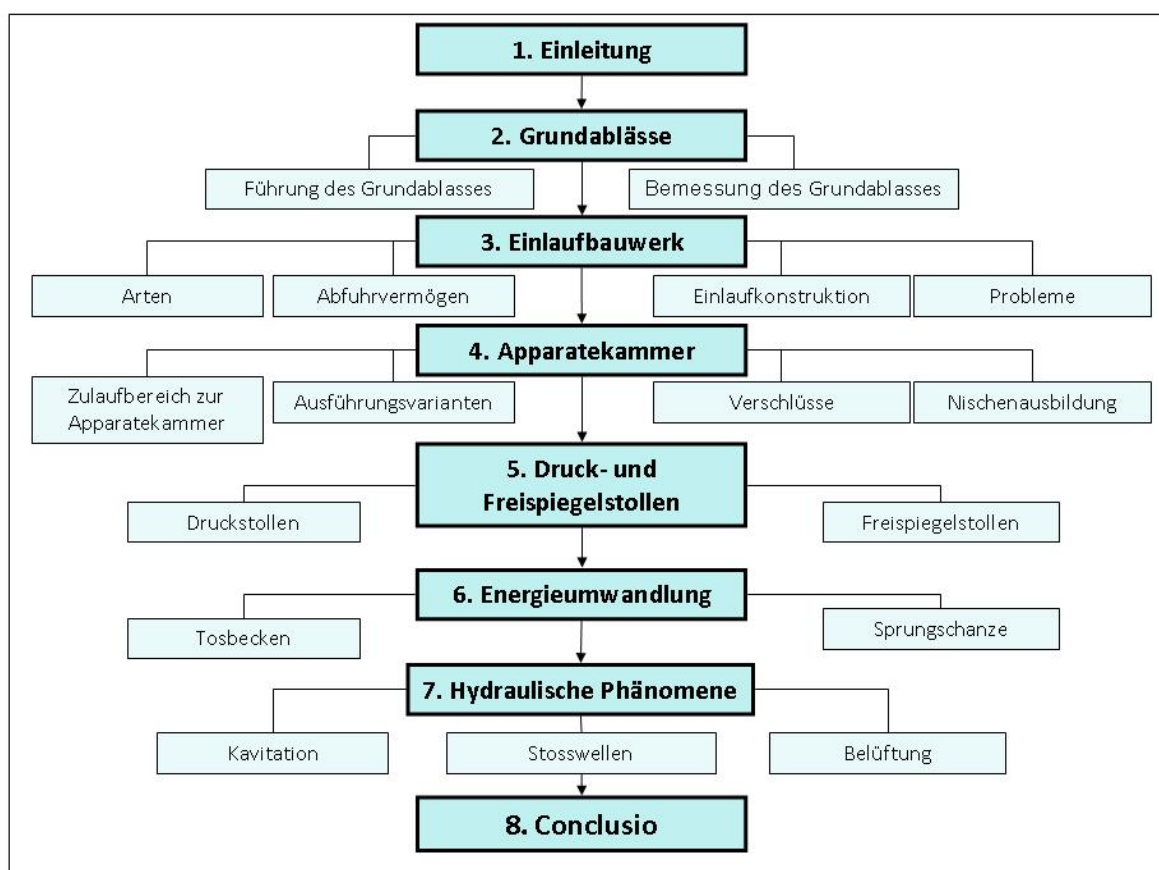


Abbildung 1: Aufbau der Arbeit

2. Grundablass

Ein Grundablass wird grundsätzlich für die rasche Absenkung des Wasserspiegels einer Talsperre verwendet und ist im Endeffekt eine tiefliegende Wasserfassung. Er ist neben der Hochwasserentlastungsanlage der einzige Bauteil, der für die Sicherheit einer Talsperre verantwortlich ist. Aus diesem Grund wird ein Grundablass zur Vermeidung nachstehender Anforderungen und Probleme projiziert:¹

- Kontrolle der Sperre
- Erdbebeneinwirkungen
- Hohe Sickerwasserverluste
- Verlust der Auftriebssicherheit
- Hochwasser (vor allem bei Laufkraftwerken)
- Blockade der Hochwasserentlastung
- Verschiebungen der Widerlager
- Hangbewegungen, Fels- und Bergstürze in den Stauraum
- Vandalismus
- Restwasserabgabe

In den meisten Fällen ist eine Absenkung des Wasserspiegels bei Erkennung der Gefahr die adäquateste Maßnahme, um die Sicherheit gewährleisten zu können. Dabei kann schon eine Teilabsenkung zu einer signifikanten Entlastung einer Sperre führen. In die Standfestigkeit einer Gewichtsmauer fließt die Stauhöhe mit der zweiten Potenz und bei einer Bogenmauer mit der dritten Potenz ein.²

Für die Dimensionierung eines Grundablasses muss auf die Abflusskapazität des Unterwasserbereichs Rücksicht genommen werden. Hierfür darf das Gewässer mit einem Hochwasserabfluss mit einer Jährlichkeit von einem Jahr veranschlagt werden, ist auf die Uferstabilität im Staubecken Rücksicht zu nehmen, um ein Abgleiten des Hanges zu verhindern.

Die Situierung der meisten Talsperren im Alpenraum hat zur Folge, dass durch den Eintrag von Geschiebe und Feinstoffen sowie durch Verringerung der Geschwindigkeit im Staubecken ein allmähliches Verlanden des Staubeckens auftritt. Dies führt mit fortschreitender Anlandung zu einem Verlust des Speichervermögens. Dem kann mit verschiedenen Baumaßnahmen, aber auch durch eine intermittierende Spülung, entgegen gewirkt werden.

¹ Vgl. Vischer D., Huber A. (2002), S.141f

² Vgl. Boes R. (2012), S.5

Der Aufbau eines Grundablasses setzt sich im wesentlichen aus dem Einlaufbereich, der Zu-
leitung zu den Verschlusseinrichtungen, der Apparatekammer, der Belüftungseinheit sowie
dem Unterwasserstollen mit angeschlossener Energievernichtung zusammen. Dabei gibt es
je nach vorliegender Talsperre unterschiedliche Ausführungsvarianten.

Bei einer Betonsperre besteht die Möglichkeit, den Grundablass durch die Sperre zu führen,
oder die Bauumleitung zu adaptieren. Dem gegenüber wird bei einem Damm der Grundab-
lass meist in die Bauumleitung integriert, da bei Durchführung durch den Damm die Abdich-
tung wesentlich schwieriger herzustellen ist.

Vorteilhaft wirkt sich aus, dass der Druckstollen durch den Wasserdruck des Speichers be-
aufschlagt wird, wohingegen auf den unterhalb der Absperreinrichtung liegenden Grundab-
lassstollen nur der Bergdruck wirkt. Wesentlich dabei ist, dass im Bereich des Druckstollens
der Abfluss unter Druck erfolgt und nach den Schützen ein Freispiegelabfluss vorliegt.
Grundsätzlich können die Schützen auf der gesamten Länge des Stollens eingebaut werden,
allerdings führt dies zu sehr negativen Auswirkungen. Oberwasserseitig des Abdichtungs-
schirmes würde der Grundablassstollen in einem Bereich situiert sein, in dem der Wasser-
druck sehr groß ist. Ein Versetzen in Richtung der Luftseite des Injektionsschirmes führt zu
einer Reduktion des äußeren Wasserdrucks auf den Stollen. Für die konstruktive Ausbildung
wäre für beide angeführten Ausführungsvarianten mit einem hohen finanziellen Mehrauf-
wand zurechnen. Deshalb ist es für die Situierung des Grundablasses entscheidend, die Ap-
paratekammer im Bereich der Abdichtungsebene zu situieren.³

Für die Bemessung der Leistungsfähigkeit der Grundablässe kann z.B. die schadlos aufnehmbare
Abflussmenge im Unterwasser maßgebend sein (Auslegung auf das fünf- bis zehnfache
Mittelwasser), aber auch andere Bemessungskriterien (Länderspezifisch) wie z.B. Absenkhöhe
innerhalb eines gewissen Zeitraums etc. herangezogen werden.⁴

2.1 Führung des Grundablasses

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Führung des Grundablasses, je nach dem, ob es sich
um eine Mauer oder einen Damm handelt. Der wesentlichste Entscheidungsgrund liegt da-
bei in der Art der Sperre sowie und die Frage, ob es sich um eine Talsperre oder einen Damm
handelt. Wie aus Abbildung 2 ersichtlich gibt es verschiedene Möglichkeiten der Führung der
Bauumleitung. Dabei ist A1 die Umleitung durch Stollen. Diese können später entweder ver-
plombt werden oder zu einem Grundablass umgebaut werden. Da die Bauumleitung Hoch-
wässer bis zu einer Jährlichkeit von 30 Jahren, normal wird sie mit einer Jährlichkeit von fünf
bis zehn Jahren ausgelegt, fassen muss, besteht die Möglichkeit einen zweiten Stollen zu
graben. Dies bringt wesentliche Vorteile beim Umbau zu einem Grundablassstollen. A2 zeigt
die Möglichkeit der Durchleitung des Wassers durch Teile der Baugrube. Die Wahl der Umlei-

³ Vgl. Speerli J. (1999), S.21

⁴ Vgl. Lattermann E. (2005), S.162

tung richtet sich dabei nach der anfallenden Menge des Wassers. Für kleine Mengen ist ein eigens zu errichtender Umleitungsstollen unwirtschaftlich. Hier ist die Möglichkeit einer Durchleitung durch die Sperre vorzuziehen.⁵

Für alle, in der Abbildung 2 gezeigten Möglichkeiten der Führung des Grundablasses müssen ein oder mehrere Rechen in feiner oder grober Ausführung angeordnet werden, deren Funktion es ist, unerwünschte Stoffe, wie Steine, Geschwemmsel etc. aus dem Grundablass fernzuhalten. Dadurch kann es zu einer Beeinträchtigung des Betriebes durch Verlandung sowie zu Schäden an den Oberflächen, aber auch an der Ausrüstung selbst kommen.⁶

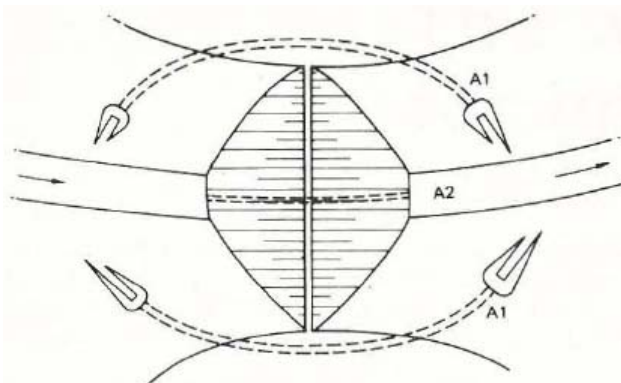


Abbildung 2: Varianten der Führung der Bauumleitung, [Blind H. (1985), S. 31]

Die Auslegung der Abflusskapazität richtet sich nach jener Zeitspanne, die für die Entleerung des Stauvolumens zur Verfügung steht und zwar unter Rücksichtnahme auf konstruktive limitierende Faktoren. Im Zuge der Weiterentwicklung diesbezüglicher Literatur konnten die folgenden Punkte für eine Bemessung von Grundablässen erstellt werden:⁷

- Gelegentliche Abfuhr zur Stauspiegelabsenkung.
- Bestehen der Notwendigkeit, während des Betriebes beträchtliche Mengen an Wasser in einem bestimmten Zeitraum abzuscheiden.
- Möglichkeit der Kontrolle des Speichervolumens, beispielsweise bei Auftreten einer Hochwasserereignisses, den Stauspiegel vorher abzusenken
- Im Fall einer bedeutenden Gefahr für den Damm selbst, z.B. bei einem großen Hangrutsch in das Staubecken, kann ein rasches Absenken erforderlich sein. Ein rasches Absenken ist vorwiegend möglich, wenn ein Betriebsstollen vorhanden ist. Für Dämme mit kleineren Abgabeleistungen würde sich dieser Prozess zu langwierig gestalten. In solchen Fällen stellt ein effizienter Grundablass eine entsprechende Alternative dar.

⁵ Vgl. Blind H. (1985), S.31

⁶ Vgl. Blind H. (1985), S.31

⁷ Vgl. Blind H. (1985), S.32

- In vielen Fällen basiert die Berechnung des maximalen Hochwassers auf nicht vertrauenswürdigen Daten. In diesen Fällen stellt der Grundablass daher eine sicherheitsergänzende Maßnahme zu den Hochwasserentlastungsanlagen dar.
- Für den Fall, dass eine Reparatur im Reservoir oder am Dammbauwerk notwendig ist, und keine weiteren Ablässe vorhanden sind, muss der Grundablass, die ankommende Wassermenge bis zu einer Jährlichkeit von einem Jahr abführen zu können.

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die Varianten für die verschiedenen Linienführungen in Abhängigkeit des verwendeten Talsperrentyps angeführt.

2.1.1 Talsperren

Die Ausführung des Grundablasses bei Talsperren ist im Vergleich zu Dämmen wesentlich einfacher zu realisieren, da die Möglichkeit besteht, den Grundablass direkt in die Sperre einzubauen. In diesem Fall liegen jedoch viel höhere Abflussgeschwindigkeiten vor, weswegen der gesamte Grundablass gepanzert ausgeführt werden muss. Dabei muss besonderes Augenmerk auf die Ausbildung der Energieumwandlung gelegt werden. Dies kann durch die Ausbildung von Anlagen zur Energievernichtung, wie Tosbecken, Toskammern oder einer Sprungschanze erfolgen. Bei großen Talsperren besteht die Möglichkeit, weitere Entnahmebauwerke einzuplanen, die über die Höhe verteilt werden. Diese werden als Zwischenablass bezeichnet. Dies ist aus Abbildung 3 ersichtlich.⁸

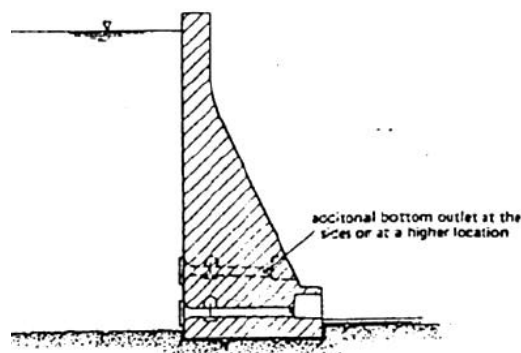


Abbildung 3: Gewichtsmauer mit Grund- und Zwischenablass, [Sepatware J.P. (1997), S.6]

Für den Fall, dass im Unterliegerbereich die geologischen Voraussetzungen nicht gegeben sind, mit der Folge, dass das Gestein dem Auftreffen des Wasserstrahles nicht widerstehen kann, ist eine Verlegung des Grundablasses in die Bergflanken anzustreben, da es ansonsten zu einer Kolkausbildung in unmittelbarer Nähe der Staumauer kommen wird. Für den Fall, dass für die Bauumleitung ein Stollen verwendet wird, besteht durch die Verlegung des

⁸ Vgl. Schöberl F., Reindl R. (1994), S.32

Grundablasses die Möglichkeit, eine Kolkausbildung in unmittelbarer Nähe der Sperre zu verhindern.

2.1.2 Staudämme

Die Führung der Grundablässe bei Staudämmen unterliegt der Beschränkung, dass die Führung des Wassers durch die Sperre aufgrund der Probleme mit der Herstellung der Dichtigkeit und Verhinderung der Schaffung von Wegigkeit für das Wasser durch den Damm, auf die angrenzenden Hänge oder in die Fundierung verschoben werden sollte. Damit kann die Anbindung an den Untergrund sowie die Herstellung der Dichtungsachse ohne störende und hinderliche Einbauten erreicht werden. Außerdem wird die Hochwasserentlastung sowie das Entnahmebauwerk an dem Damm vorbei geleitet und so die Überströmung bzw. die Durchströmung des Dammes verhindert. Bei Dämmen ist trotz höherer Kosten für die Errichtung eines Grundablasses, die Variante mit einem Stollen zu wählen, da man bei dieser Form der Ableitung des Wassers keine Probleme mit dem Sperrenbauwerk hat.

2.1.3 Kombination mit Hochwasserentlastung

Die Kombination des Grundablasses mit der Hochwasserentlastung ist eine Möglichkeit, dem verschärften Sicherheitsdenken der letzten Jahre Rechnung zu tragen. Im Zuge dieser soll der Grundablass mit einer Hochwasserentlastung kombiniert werden, um die steigenden Hochwasserdurchflüsse zu beherrschen. Dies kann mit dem Bau eines Fallschachtes gelingen, der mit dem Grundablass verbunden ist. Durch eine entsprechende Begrenzung des Abflusses kann ein Zuschlagen des Freispiegelstollens verhindert werden, dafür ist eine Kombination der Bemessung des Fassungsvermögens auf Basis des Freispiegelstollens erforderlich. Der Abfluss durch den Grundablass soll dabei nur als Entlastung der Hochwasserentlastungsanlage dienen.⁹

Nach dem die einzelnen Anwendungsfälle diskutiert wurden, steht die Berechnung der Abflussleistung im Zentrum des Interesses.

⁹ Vgl. Geisler T. et al. (2004), S.1fd

2.2 Berechnung der Abflussleistung eines Grundablasses

Der Grundablass ist höhenmäßig zwischen dem Betriebsauslass und dem tiefsten Punkt des Staubeckens vorzusehen. Die Situierung der Betriebseinrichtungen des Grundablasses kann, wie Abbildung 4 zeigt, auf gleicher Höhe mit dem tiefsten Punkt des Stauesees oder höher oder tiefer davon liegen.¹⁰

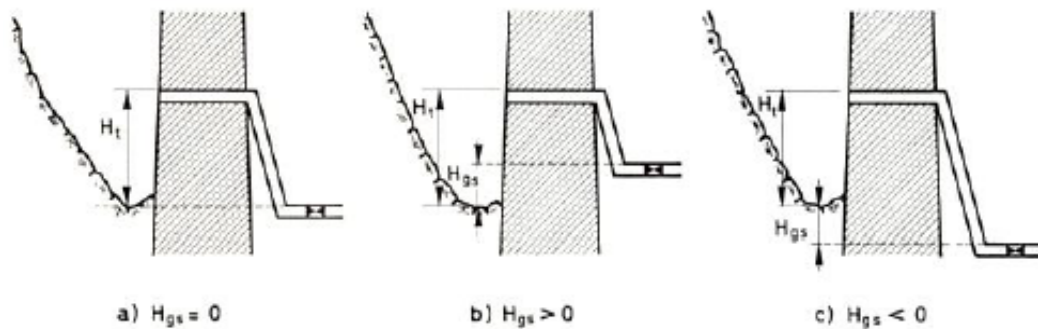


Abbildung 4: Drei verschiedene Fälle für die Höhendifferenz (H_{gs}) zwischen dem Grundablassaustritt und dem tiefsten Seegrund, [Kühne A. (1977), S.49]

Die Berechnung des Durchflusses des Grundablasses, wird weiter führend als Q_g bezeichnet, erfolgt mit folgender Formel:¹¹

$$Q_g = C_g \cdot \sqrt{H_g} = C_g \cdot \sqrt{H - H_{gs}} \quad (2.1)$$

H_g ...Höhendifferenz zwischen Stauespiegel und Grundablassaustritt auf Höhe der Schützen

H ...Stauhöhe

H_{gs} ...Höhendifferenz zwischen Grundablassaustritt und tiefstem Seegrund

C_g '...In die Konstante der Grundablasscharakteristik fließen die Erdbeschleunigung, der Querschnitt der Leitung sowie die gesamten Verlustbeiwerte ein

Die Höhendifferenz der drei Fälle aus Abbildung 4 verändert sich im Laufe der Zeit nicht, wobei die Höhe zwischen den Fällen folgendermaßen variiert, nämlich $H_{gs} \cong 0$, $H_{gs} > 0$ und $H_{gs} < 0$. Als Normalfall kann der Fall $H_{gs} \cong 0$ bezeichnet werden, da er für einen Großteil realisierten Staumauern maßgebend ist, wohingegen die anderen beiden Fälle dort maßgebend werden, wo die Schützen über bzw. unter dem tiefsten Seegrund liegen. Für den Fall,

¹⁰ Vgl. Kühne A. (1977), S.48

¹¹ Vgl. Akademischer Verein Huette (1970) in Kühne A. (1977), S.48

dass die Schützen oberhalb des Seebodens liegen, gilt ($H_{gs} / H \ll 1$) und damit kann H_{gs} in der Formel (2.1) vernachlässigt werden.¹²

Das Volumen des Speichersees V steht in direktem Verhältnis zu der Stauhöhe H , wobei die Faktoren a und b , entweder mittels graphischem oder numerischen Ausgleichsverfahren berechnet werden.¹³

$$V = a * H^b \quad (2.2)$$

Für das Volumen des Totraumes kann die Formel (2.2) abgeändert werden zu $V_t = a * H_t^b$, wobei sich $H_t \geq 0$ auf die Höhendifferenz zwischen dem Einlauf des Grundablasses und dem niedrigsten Punkt des Staubeckens bezieht. Durch die Tatsache, dass die Schützen nie oberhalb des Einlaufbauwerks des Grundablasses liegen, gilt $H_t > H_{gs}$. Mit Hilfe der Formel

(2.2) kann die Stauhöhe in eine Abhängigkeit des Volumens gebracht werden, $H = \left(\frac{V}{a}\right)^{1/b}$.

Durch Einsetzen der neuen Beziehung in Formel (2.1) lassen sich für die verschiedenen Fälle folgende Formeln ableiten:¹⁴

$$\text{a) Fall } H_{gs} \cong 0: Q_g(V) = C_g * \sqrt{(V/a)^{1/b}} = C_g * V^{1/2b} \quad (2.3)$$

$$\text{wobei } C_g = C_g * a^{-1/2b}$$

b) Fall $H_{gs} > 0$:

$$W = a * H_{gs}^b \dots \text{rechnerisches Volumen, wobei } V_t \geq W \text{ ist} \quad (2.4)$$

(2.2) und (2.4) in (2.1) eingesetzt ergibt $Q_g(V) = C_g * \sqrt{(V/a)^{(1/b)} - (W/a)^{(1/b)}}$ bzw.

$$Q_g(V) = C_g * \sqrt{V^{(1/b)} - W^{(1/b)}} = C_g * V^{(1/2b)} * \sqrt{1 - (W/V)^{1/b}} \quad (2.5)$$

c) Fall $H_{gs} < 0$:

$$Q_g(V) = C_g * \sqrt{(V/a)^{(1/b)} - |H_{gs}|} = C_g * V^{1/2b} * \sqrt{1 + (W'/V)^{1/b}} \quad (2.6)$$

$$W' = a |H_{gs}|^b$$

Im Zuge dieses vorliegenden 2. Kapitels wurden zunächst die wesentlichen Gründe für den Bau eines Grundablasses dargestellt, wie beispielsweise Kontrolle der Sperre, Erdbebensicherung und Geschiebeabfuhr. Weiters wurden die Unterschiede in der Führung des Grund-

¹² Vgl. Kühne A. (1977), S.49

¹³ Vgl. Kühne A. (1977), S.50

¹⁴ Vgl. Kühne A. (1977), S.50

ablasses behandelt und eine Näherung der Abflussberechnung angeführt. Das nächste Kapitel analysiert den ersten Teil des Grundablasses der mit dem Wasser in Kontakt kommt, das Einlaufbauwerk.

3. Einlaufbauwerk

Das Einlaufbauwerk hat die Funktion, das anströmende Wasser zu fassen und in den Drucksollen oder den Mauerdurchlass zu leiten. Um die Abflusskapazität nicht zu stark zu reduzieren, ist eine entsprechende hydraulische Ausbildung erforderlich. Weiters ist eine entsprechend gleichmäßige Anströmung und eine mindest Überdeckungshöhe des Wassers anzustreben, um einen Lufteinzug zu vermeiden. Für die Dimensionierung stehen verschiedene Richtlinien zur Verfügung.¹⁵

Aufgrund der Tatsache, dass der Grundablass mit einer gewissen Wasserhöhe überdeckt ist, befindet sich der Bereich des Stollens bis zu den Verschlussorganen ständig unter Wasser und steht damit unter Druck. Die Bauumleitung wird für die Ableitung eines Hochwassers mit einer Jährlichkeit von fünf bis zehn Jahren ausgelegt. Dafür wird der Querschnitt und die Neigung des Stollens derart geplant, dass die Baustelle während eines Hochwasserereignisses nicht überschwemmt wird. Es ist weiters eine Verschlussmöglichkeit am Einlaufbauwerk vorzusehen, um die regelmäßige Überprüfung der Betriebschützen durchführen zu können.¹⁶

Das vorliegende Kapitel 3 analysiert zunächst die unterschiedlichen Arten des Einlaufbauwerks, um im zweiten Schritt das Abfuhrvermögen zu diskutieren. Abgerundet wird das Kapitel mit der Diskussion der Probleme, die an einem Einlaufbauwerk auftreten können.

3.1 Arten

Je nach topographischer und geologischer Gegebenheit können die verschiedensten Fassungen unterschieden werden, nämlich eine Fassung am Ufer, auf dem Seegrund, oder jene durch die Talsperre. Dabei ist es wichtig, den Einlauf trompetenförmig auszubilden, wobei zu beachten ist, dass der anschließende Querschnitt der Apparatkammer meist rechteckig ausgeführt ist. Da der anschließende Stollen meist rund ausgeführt ist, muss eine entsprechende Übergangsform vorgesehen werden.¹⁷

Da das Stauvolumen mitunter großen Schwankungen unterworfen ist, muss der tiefste Wasserspiegel oberhalb des Grundablasses liegen. Dafür ist eine Überdeckung von zumindest ein bis drei Metern üblich, um den Einzug von Luft zu verhindern. In Abbildung 5 ist ein Schnitt durch einen Einlauf dargestellt.¹⁸

¹⁵ Vgl. Sebatware J.P. (1997), S.14

¹⁶ Vgl. Hassinger R. (1988), S.25

¹⁷ Vgl. Vischer D., Huber A. (2002), S.90ff

¹⁸ Vgl. Patt H., Gonsowski P. (2011), S.219f

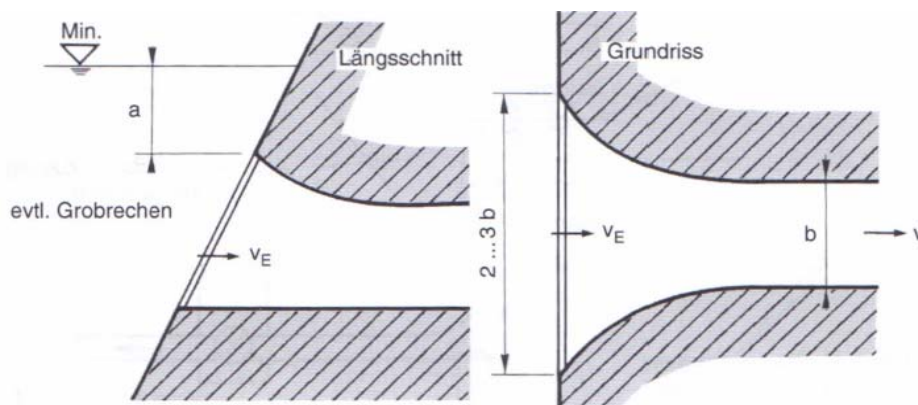


Abbildung 5: Schnitte durch ein Einlaufbauwerk einer Seefassung; [Patt H., Gonsowski P. (2011), S.219]

Je nach Situierung des Einlaufbauwerks kann zwischen folgenden Punkten unterschieden werden:¹⁹

- Entnahme am Ufer: Bei der Situierung am Ufer kommen die topographische Lage und die geologischen Bedingungen zur Geltung. Für die Verschließung des Querschnittes können verschiedene Schütztypen angewendet werden, je nach dem, ob es sich um einen Notverschluss oder um ein Regulierorgan handelt.

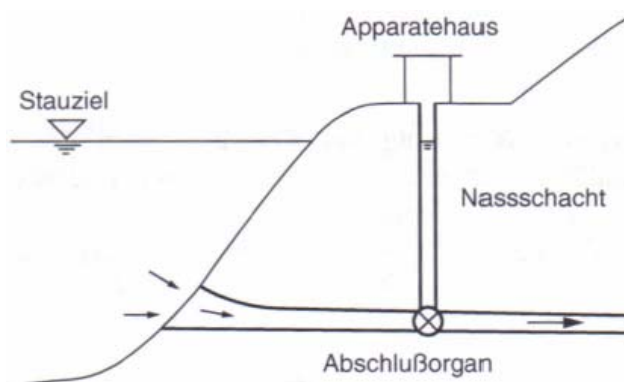


Abbildung 6: Seewasserfassung am Ufer mit Abschlussorganen im Nassschacht; [Patt H., Gonsowski P. (2011), S.220]

- Entnahme im See: Hier kommt meist der Entnahmeturm zur Anwendung, der mittels eines Steges mit dem Land verbunden ist. In dem Turm ist ein Notverschluss z.B. ein Zylinderschütz eingebaut, um für Revisionsfälle den Druckstollen trockenlegen zu können. Eine weitere Ausführungsmöglichkeit ist eine versenkte Entnahme, die ohne Verschluss ausgeführt wird.

¹⁹ Vgl. Patt H., Gonsowski P. (2011), S.220f

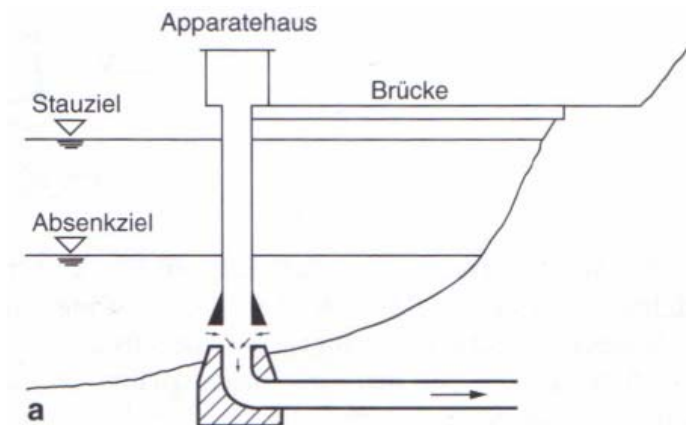


Abbildung 7: Seewasserfassung mit Entnahmeturm; [Patt H., Gonsowski P. (2011), S.221]

- Entnahme in der Talsperre: Die einfachste Möglichkeit ist die Führung der Entnahme durch die Talsperre. Diese Art der Fassung kommt häufig bei Betonsperren zur Anwendung, da sie leicht hergestellt werden können. Für Staudämme wird von dieser Möglichkeit nicht Gebrauch gemacht, da die Anbindung an das Dammmaterial schwierig herzustellen ist.

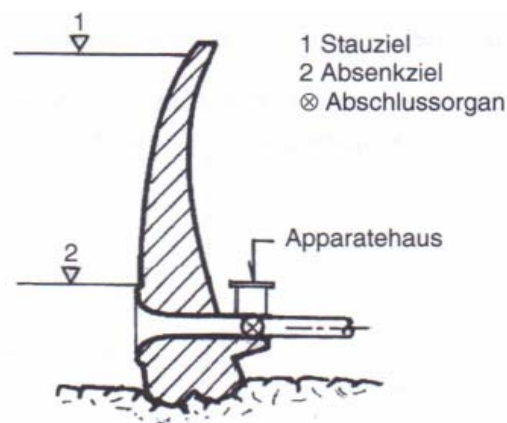


Abbildung 8: Fassungen in Staumauern; [Patt H., Gonsowski P. (2011), S.222]

Nach dem die Arten von Einlaufbauwerken besprochen wurden, soll anschließend das Thema Abfuhrvermögen und die Einlaufkonstruktion behandelt werden

3.2 Abfuhrvermögen

Das Abfuhrvermögen lässt sich mit einfachen Mitteln berechnen, dies erfolgt mit einer simplen hydraulischen Berechnung, bei der die Rechenverluste sowie die Verluste durch die Einlauftrompete zu berücksichtigen sind. Da durch die Auskleidung des Druckstollens die Fließgeschwindigkeit von 10m/s nicht überschritten werden soll, kann der Durchfluss durch einen Grundablass mit Formel (3.1) für eine erste Näherung berechnet werden.²⁰

²⁰ Vgl. Lattermann E. (2005), S.162

$$Q = A * \sqrt{\frac{2 * g}{1 + \sum \xi}} * \sqrt{H} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (3.1)$$

$\sum \xi$...Summe der Verlustbeiwerte, bestehend aus Eintritts-, Schieber-, Rohrreibung- und Krümmerverluste

A ...kleinster Durchflussquerschnitt

Q ...Durchfluss

H ...Stauhöhe

Die Summe der Verlustbeiwerte kann am Beginn als konstant angenommen werden. Um den Durchfluss bei sinkendem Stauspiegel konstant zu halten, kann der Durchflussquerschnitt verändert werden.²¹

3.3 Einlaufkonstruktion

Zur Einlaufkonstruktion werden die Einlaufellipse und zum Verschließen die Dammbalken gezählt.

3.3.1 Einlaufellipse

Die Einlaufellipse muss derartig ausgebildet sein, dass es zu keinen Strömungsablösungen und damit zu keiner Kavitationsausbildung kommt. Außerdem muss die Ausbildung der Fassung so ausgeführt werden, dass möglichst geringe Verluste der Energiehöhe und damit eine Reduktion des Durchflusses erreicht wird. Für eine strömungsgünstige Ausbildung der Ellipse empfiehlt sich die Anwendung der Formel (3.2), wobei es verschiedene Formeln für die Ermittlung der Ellipse gibt.²²

$$\frac{x^2}{h^2} + \frac{y^2}{(0,33 * h)^2} = 1 \quad (3.2)$$

3.3.2 Dammbalken

Dammbalken bieten eine Möglichkeit, die Einlauföffnung eines Grundablasses als Revisionsmaßnahme zu verschließen und werden mit Hilfskränen in die Nuten eingesetzt. Diese Nuten sind meist im Anschluss an den Grobrechen situiert. Die Dammbalken sind als balkenartige Elemente ausgeführt, die übereinander gestapelt und mit Hilfe einer, zwischen den einzelnen Elementen angeordnete Dichtung abgedichtet werden. In Abbildung 9a ist ein Schnitt durch einen Dammbalken mit den wesentlichen Details dargestellt. Die Lagerung der Elemente ist entweder als Gleit- oder als Rollenlager ausgeführt, was in Abbildung 9b er-

²¹ Vgl. Lattermann E. (2005), S.162

²² Vgl. Boes R. (2012), S.41

sichtlich ist. Dammbalken können nur bei geschlossenen Schützen gesetzt werden. Um das Einstellen vieler Balken zu verhindern, können anstatt einiger Dammbalken Tafeln eingesetzt werden, die in ihrer Ausführung einem Hubschütz ähneln.²³

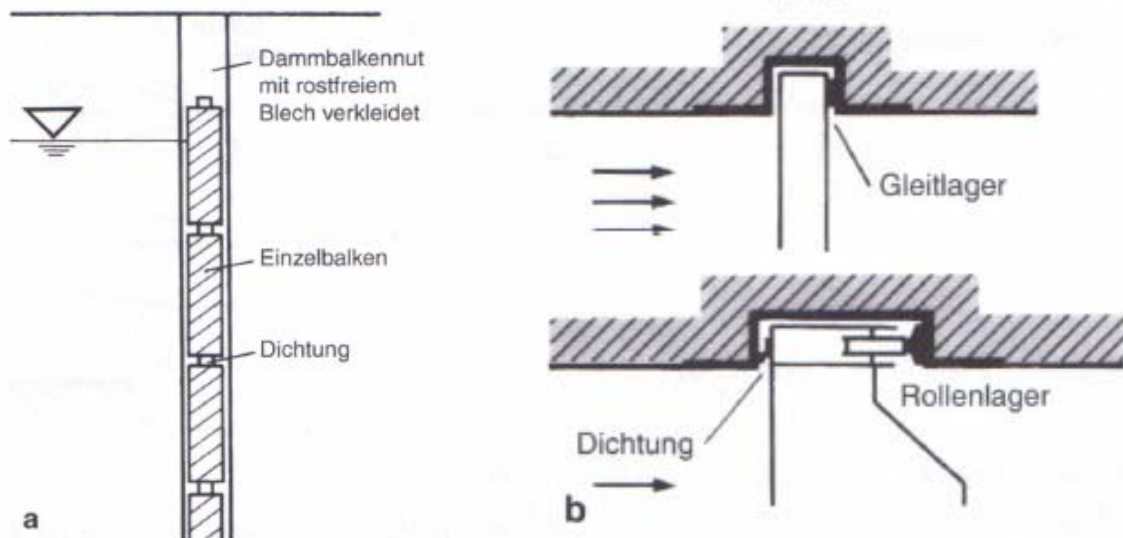


Abbildung 9: Grundsätzliche Anordnung von Dammbalken mit Gleit- oder Rollenlager. a Schnitt, b Grundriss, [Patt H., Gonsowski P. (2011), S.145]

Das nächste Unterkapitel des dritten Kapitels beschäftigt sich mit den Problemen, die im Zusammenhang mit dem Anströmen des Wassers auftreten können.

3.4 Probleme

In den Unterpunkten des Kapitels werden die verschiedenen negativen Einflüsse, die auf einen Grundablass wirken, aufgezeigt und die Möglichkeiten erläutert wie diesen Einflüssen begegnet werden kann.

3.4.1 Lufteinzug

Beim Einlaufbauwerk eines Grundablassstollens sollte sichergestellt werden, dass ein Lufteinzug vermieden wird, da es ansonsten zu Problemen im Abfluss kommen kann.

3.4.1.1 Beschreibung der Einlaufwirbel

Zur möglichst einfachen Beschreibung der Strömungsvorgänge, die zu der Entstehung von Saugwirbeln führen, werden die Maße des Einlaufes zu einer kreisförmigen Öffnung an der Sohle vereinfacht (Abbildung 10). Hierbei erfolgt die Anströmung des Auslasses radial, das bedeutet, dass der Strömung keine Rotation vorgegeben wird. Durch Analyse der Strömung mittels Potentialtheorie kommt es in der Mitte des Wirbels zu einem Singularitätspunkt. Die theoretische Analyse führt in diesem Punkt zu unendlich großen Strömungsgeschwindigkei-

²³ Vgl. Patt H., Gonsowski P. (2011), S.145

ten, dieser unrealistische Fließzustand wird jedoch durch die Annahme eines Bereiches mit Ablösungserscheinungen revidiert. Die Geschwindigkeitsunterschiede zwischen Strömung und Ablösebereich werden durch eine Zirkulation ausgeglichen. Wenn zwei Faktoren, nämlich geringe Entnahmegeschwindigkeit und eine große Entnahmegeschwindigkeit, zusammenkommen, führt dies zur Verstärkung der Rotation und in einem weiteren Schritt zum Auftreten eines Saugwirbels.²⁴

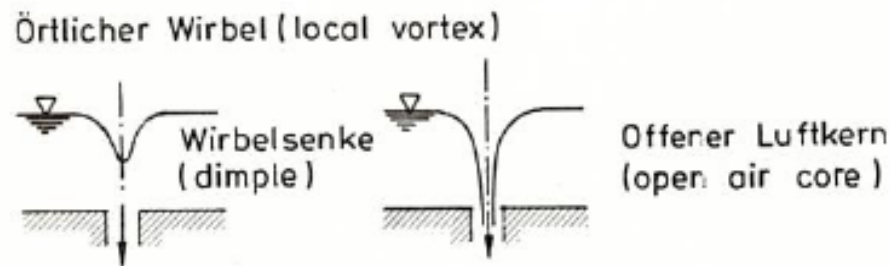


Abbildung 10: Unterscheidung der Wirbelzustände, [Kraus-Klein T.(1984), S.18]

Durch eine Zuströmung zum Entnahmebauwerk, die nicht normal darauf erfolgt, kann es zur Verstärkung eines kleinen Einlaufwirbels zu einer Vergrößerung des Wirbels kommen. Begünstigend wirkt sich auch ein Ablösewirbel aus, der durch Diskontinuitäten zum Bereich über dem Einlaufbauwerk getragen wird. Die Rotationsrichtung des Wirbels wird durch die Zulaufrichtung beeinflusst.²⁵

Es kann grundsätzlich zwischen drei verschiedenen Arten von Wirbeln unterschieden werden.²⁶

- Lokale Wirbel (siehe Abbildung 11) stellen die wichtigste Art dar
- Konzentrischer Wirbel bilden sich bei der Entnahme senkrecht nach oben bei geringer Überdeckung aus
- Wirbel, die an festen Rändern entstehen.



Abbildung 11: Unterscheidung der Wirbelarten, [Kraus-Klein T.(1984), S.18]

Die in Abbildung 10 dargestellten Wirbel, die sich von der Senke bis zum offenen Luftkern verändern können, stellen die kritische Situation der Wirbelbildung dar, nämlich den Start

²⁴ Vgl. Krause-Klein T. (1984), S.15f

²⁵ Vgl. Krause-Klein T. (1984), S.16

²⁶ Vgl. Kraus-Klein T.(1984), S.16

des Lufteinzuges in das Einlaufbauwerk. Deswegen stellen diese Vorgänge die vom Übergang von der Senke bis zum lufteinziehenden Wirbelschlauch führen, das maßgebende Kriterium für die Beurteilung eines Wirbels dar.²⁷

Durch die Tatsache, dass die Bestimmung der Stärke der Wirbelausbildung messtechnisch oft nicht möglich ist, erfolgt die Zuordnung der Stärke anhand der optischen Ausbildung, diese Klassen der Wirbelstärken sind in Abbildung 12 dargestellt. Die Erfassung der Dauer, wie lange ein Wirbeltyp aufgetreten ist, kann der maßgebende Wirbeltyp mit Hilfe der Aufstellung eines Histogrammes bestimmen. Zur Definition des kritischen Zustandes wird meist der Typ fünf aus Abbildung 12 herangezogen. Bei diesem Typ werden vereinzelt Luftblasen in das Einlaufbauwerk gesaugt.²⁸

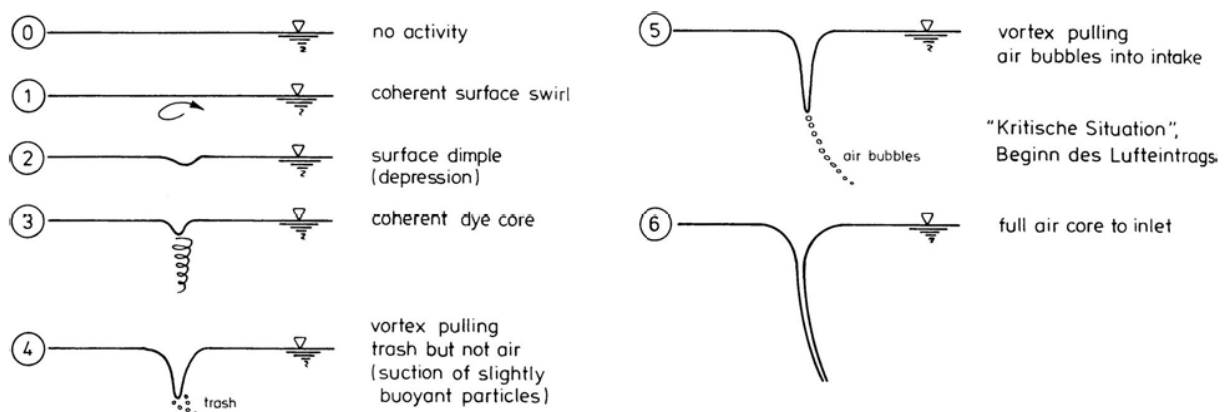


Abbildung 12: Klassifikation der signifikanten Phasen der Einlaufwirbelbildung in Typen 0 bis 6 [Knaus J. (1983), in Möller G., Pinotti M., Boes R., S.5]

3.4.1.2 Bestimmung der kritischen Überdeckung

Einlaufwirbel entstehen meist aufgrund der vorliegenden Gegebenheiten in der Anströmung. Einen maßgeblichen Einfluss auf die Ausbildung und Anfachung eines Wirbels haben die Anströmungsbedingungen sowie die Ausbildung der Wände. Um bei Versuchen eine einfache Nachvollziehbarkeit der Randbedingungen zu erreichen, werden die Wirbel durch Leitkränze stabilisiert oder durch zylindrische Behälter mit einem zentrischen Auslauf simuliert. Dies führt zu leichteren Untersuchungsmöglichkeiten, allerdings ist eine Umlegung in die Realität aufgrund der vorliegenden Geometrien und Zuströmung sehr fraglich.²⁹

Um einen Praxisbezug herzustellen, hat KNAUSS (1983) zur Findung von einheitlichen Bemessungsregeln nur praxisbezogene Untersuchungen herangezogen. Dafür wird ein charakteristischer Zirkulationsparameter definiert, der das Verhältnis der Zentrifugalkräfte und der Schwerkraft angibt, da diese beiden Größen Wirbel maßgeblich beeinflussen:³⁰

²⁷ Vgl. Kraus-Klein T.(1984), S.18

²⁸ Vgl. Kraus-Klein T.(1984), S.18f

²⁹ Vgl. Kraus-Klein T.(1984), S.19

³⁰ Vgl. Kraus-Klein T.(1984), S.19ff

$$\frac{c}{\sqrt{g} * d^{3/2}} = \frac{c}{v_d * d} * \frac{v_d}{\sqrt{g} * d} = Z * Fr_e \quad (3.2)$$

Fr_e ...Froudezahl im Einlauf

$c = v_t * r = const$...Zirkulationskonstante

$Z = v_t * r / v_d * d$...Zirkulationszahl

v_t ...Tangentialgeschwindigkeit im Abstand r von der Wirbelachse

r ...Abstand von der Wirbelachse

d ...Einlaufdurchmesser

v_d ...mittlere Geschwindigkeit im Einlauf

Ein weiterer Parameter wurde definiert, um das Verhältnis der Zentrifugalkräfte mit der Viskosität anzugeben.³¹

$$\frac{c}{\nu} = Z * Re \quad (3.3)$$

$Re = v_d * d / \nu$...Reynoldszahl im Einlauf

ν ...kinematische Zähigkeit

Da die Bestimmung der Zirkulationskonstante c nur mit Schwierigkeiten durchgeführt werden kann, werden hier nun die wichtigsten Möglichkeiten zur Messung der Zirkulation angeführt. Im Zuge unterschiedlicher Untersuchungen hat sich gezeigt, dass der Ort der Messung keinen Einfluss auf die Zirkulationskonstante c hat. Da eine Störung des Wirbels einen negativen Einfluss auf die Ausbildung des Wirbels hat, sind für die Messung optische Verfahren vorzuziehen.³²

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass aufgrund der Entstehung von Einlaufwirbel und dem damit verbundenen Lufteinzug in das Einlaufbauwerk es zu einer Reduktion der Abflussleistung des Grundablasses kommt.

³¹ Vgl. Kraus-Klein T.(1984), S.21

³² Vgl. Kraus-Klein T.(1984), S.21f

3.4.2 Verlandung

Bei den Zuflüssen in Stauseen kommt es zu einer Reduzierung der Geschwindigkeit und damit zu einem Absinken der Schwebstoffe auf den Grund. Dabei hat das Gewicht der Schwebstoffe Einfluss auf die Sinkgeschwindigkeit und den Ort der Ablagerung, außerdem darf der Einfluss des Abflusses nicht unberücksichtigt bleiben. Im Zuge dieses Vorganges bildet sich ein Delta aus, das mit fortschreitender Verlandung in die Nähe des Grundablasses kommt. Dort führt es zu einer Verstopfung des Einlaufbereiches, wodurch eine regelmäßige Spülung unbedingt erforderlich wird, was auch zu einer intermittierenden Vergrößerung des Stauvolumens führt. Aufgrund der notwendigen Freihaltung des Grundablasses werden etwaige Entnahmeöffnungen in dessen Nähe angeordnet, dies wird in Abbildung 13 dargestellt.³³

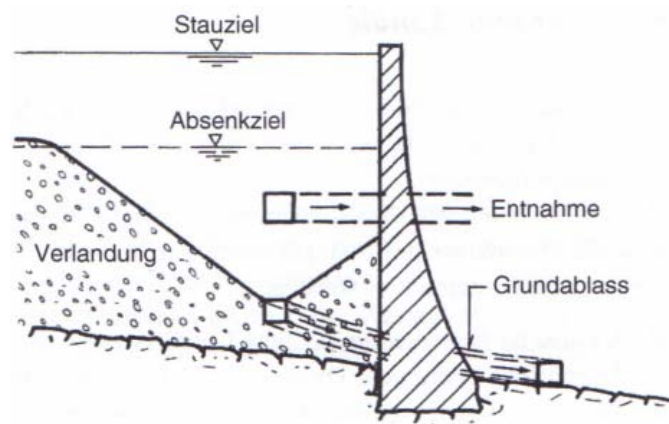


Abbildung 13: Freihaltung einer Wasserfassung am Ufer durch periodische Spülungen mittels des Grundablasses; [Patt H., Gonsowski P. (2011), S.223]

Durch die Kombination der Strömungsverhältnisse und der Topographie des Sees kann es zur Ausbildung von Dichteströmen kommen, die sich auch weitab vom Delta bemerkbar machen würden. In Abbildung 14 ist eine typische Verlandungserscheinung bei einer geringen Staupegelschwankung dargestellt.

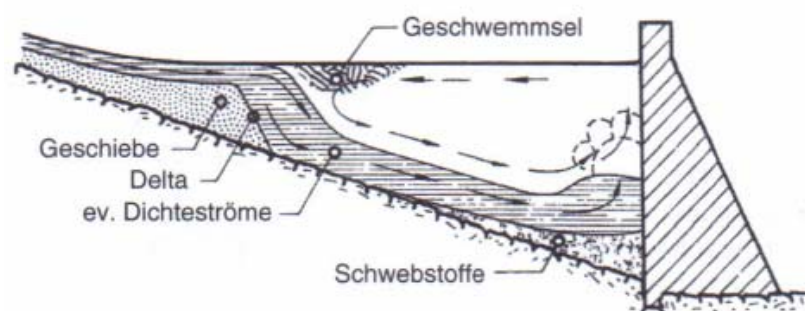


Abbildung 14: Typische Verlandungserscheinungen in einem Stausee mit geringen Wasserspiegelschwankungen; [Patt H., Gonsowski P. (2011), S.222]

³³ Vgl. Vischer D., Huber A. (2002), S.93ff

Eine Anforderung an den Grundablass ist, die Verhinderung der Verkleinerung des Staubeckenvolumens durch den Eintrag von Feststoffen durch regelmäßiges Spülen. Je nach Situierung der Speicher kann es zu einer Variation des Speichereintrages kommen, wobei in einem Gebiet mit bestehenden oder abgeschmolzenen Gletschern mit einem erhöhten Eintrag zu rechnen ist. Die Geschiebefrachten können Werte von 1000 bis 4000m³/km² Einzugsgebietfläche pro Jahr Feststoffeintrag umfassen. Aufgrund von Betrachtungen österreichischer Talsperren ist es möglich, gewisse topographische Abhängigkeiten für die Verlandungstendenz festzustellen. Auf Basis von Messungen konnte gezeigt werden, dass bei österreichischen Talsperren mit einem Feststoffeintrag von 100 bis 2000m³/km² und Jahr gerechnet werden muss.³⁴

Durch Fassung von Bächen, beispielsweise mit Tirolerwehren, kann es zu einem weiteren Eintrag von Feststoffen, vor allem Sedimenten in das Staubecken kommen. Dabei nehmen Staubecken den Charakter von Seen an, bei denen es zu einer sukzessiven Verlandung durch eingetragene Schwebstoffe kommt. Wie aus Abbildung 15 zu sehen ist, ergibt sich ein Verlust des für den Betrieb der Talsperre zur Verfügung stehenden Volumens. Dabei muss aufgezeigt werden, dass es bereits nach 20 Jahren zu Komplikationen bei Betätigung des Grundablasses kommen kann. Für Berechnungen des Verlandungszeitraumes des gesamten Speichers ergibt sich ein Zeitraum von 1000 bis 10000 Jahren.³⁵ Wesentlich von Vorteil können dabei natürliche Gletscherseen seien, die sich vor dem Speicherbecken befinden und für eine gewisse Zeit die Verlandungstendenzen des Speichers reduzieren.

Durch den Betrieb von Speichern mit Leerung und anschließender Füllung kommt es zu einem Sedimenttransport durch die Strömung in Richtung der Betriebseinrichtungen. Daher werden die Entnahmestellen für die Nutzung des Wassers immer in der Nähe des Grundablasses situiert. Auch wenn bei großen Staubecken die Verlandungstendenz eine nicht so große Ausprägung hat, muss trotzdem auf die Funktionstüchtigkeit des Grundablasses geachtet werden, damit die Möglichkeit bestehen bleibt, bei beginnender Verstopfung des Grundablasses den Stollen zu spülen.³⁶

³⁴ Vgl. Schöberl F., Reindl R. (1994) in Sebatware J.P. (1997), S.27

³⁵ Vgl. Sebatware J.P. (1997), S.27

³⁶ Vgl. Sebatware J.P. (1997), S.28

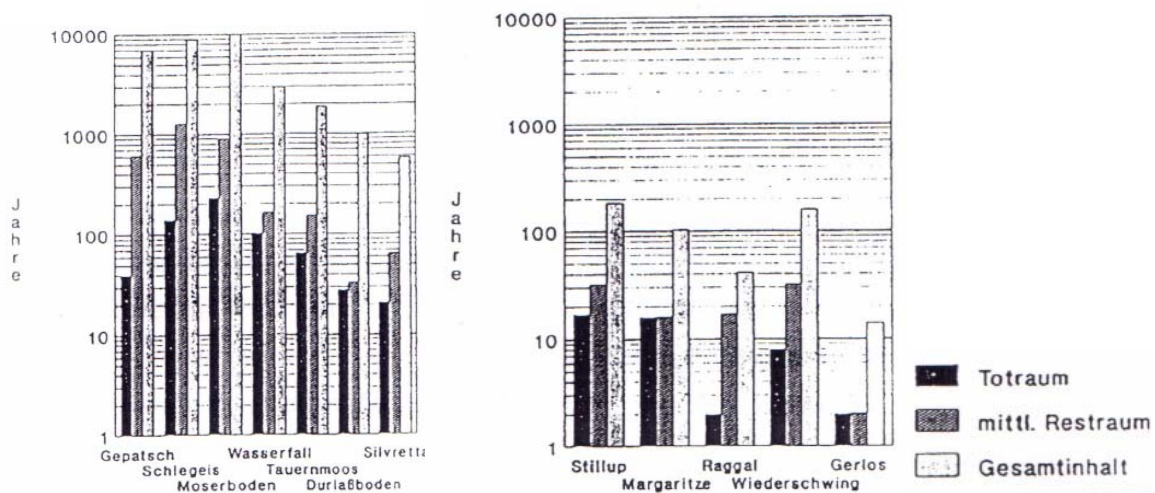


Abbildung 15 Verlandungstendenzen österreichischer Talsperren, linke Seite alpine Jahresspeicher, Mittig alpine Tages- bzw. Wochenspeicher, rechte Seite Legende; [Sebatware J.P. (1997), S.28f]

Durch die Tatsache, dass jeder See wie ein Entsander wirkt, kann es bei Becken mit einem kleinen Volumen mit einer Wochen- oder einer Tagesspeicherung bereits nach wenigen Jahren zu ernsthaften Probleme hinsichtlich des Speichervolumens kommen. Eine Möglichkeit dieses Problem für die erste Zeit zu minimieren, ist die Auslegung des Speichers mit einer entsprechenden Ausbildung eines Totraumvolumens unterhalb des Grundablasses. Wegen der Speicherverlandung ist es für kleine Becken unbedingt notwendig neben der Möglichkeit der Spülung auch im Voraus Maßnahmen zu setzen, damit das Speichervolumen aufrechterhalten werden kann.³⁷

3.4.2.1 Maßnahmen zur Verhinderung der Verlandung

Der wichtigste Punkt ist die Sicherstellung der Funktionsweise des Grundablasses, dabei soll eine Verlegung des Einlaufbereiches durch Sedimente selbstständig gesäubert und die abgelagerten Sedimente durch den Grundablass an das Unterwasser abgegeben werden. Hierbei hat sich gezeigt, dass die Einleitung von Wasser oberhalb des Grundablasses mit Bypassleitungen, die das Wasser zur Grundablassöffnung bzw. vor die Schützen führen, eine Erosion der Ablagerungen bewirkt und damit zu einer Entfernung der Verstopfung beiträgt.³⁸

Die Hydraulik des Stollens bei Sedimentaustrag ist mit einem Geschiebeabzug vergleichbar. Durch das Abhalten von großen Gesteinen kommen hauptsächlich Feinsedimente zur Austragung aus dem Speicherbecken. Trotz der Tatsache, dass die Feinsedimente der Hauptbestandteil der Austragung ist, muss sich an der Sohle eine Deckschicht ausbilden. Vor allem bei einer Absenkung des Stauziels auf die Höhe des Grundablasses kann es bei Änderungen des Querschnittes sowie der Neigung der Sohle zu Ablagerungen kommen, die in weiterer Folge zu einer Verstopfung des Querschnittes führen. Auch aus diesem Grund ist beim Ent-

³⁷ Vgl. Patt H., Gonsowski P. (2011), S.223

³⁸ Vgl. Sebatware J.P. (1997), S.30

wurf des Grundablasses darauf zu achten, ihn möglichst kurz zu halten und nach Möglichkeit Änderungen des Querschnittes zu unterlassen.³⁹

Weiters ist für die Abführung der Sedimente durch den Freispiegelstollen die Aufrechterhaltung der Schleppkraft des Wassers im Freispiegelstollen von essentieller Bedeutung.⁴⁰

Die Abfuhrleistung des Grundablasses sollte nach vorliegenden Erkenntnissen zumindest die Möglichkeit bieten, Hochwasser mit einer Jährlichkeit von einem Jahr abzuführen. Um diese Abflussmenge zu erreichen, ist die Vermeidung von Stellen mit rückstauer Wirkung unbedingt erforderlich. Für den Fall, dass aus konstruktiver Sicht Einengungen notwendig werden, ist es notwendig, entsprechende Kompensationsmaßnahmen zu treffen, vor allem wenn im Bereich der Apparatekammer Querschnittsverengungen erforderlich sind. Besonders günstig wirkt sich ein breiter Querschnitt aus, im Bereich der Schützen sollte auf Einbauten im Bereich der Sohle verzichtet werden.⁴¹

Eine Möglichkeit, die Geschiebefracht in einen Stauraum zu verringern, ist die Platzierung von Staubecken in den Nebentälern. In diesem Fall dann kann das Wasser ohne bzw. nur mit geringem Geschiebeanteil in den Stausee im Haupttal weitergeleitet werden. In dieser Anordnung der Stauseen würden durch Verkleinerung der Geschiebeeinzugsfläche in das Hauptbecken nur geringe Geschiebefrachten gelangen. Allerdings gelingt der vollständige Geschieberückhalt nicht und es gelangen weiter hin kleine Kornfraktionen in den Speicher.⁴²

Folgende Abbildung 16 zeigt eine Vielzahl von Maßnahmen, die eine Verlandung verhindern sollen. Diese können an der Quelle gesetzt werden, oder durch Entfernung von gefährdeten Orten. Des Weiteren können Maßnahmen hinsichtlich ihres Ortes unterschieden werden, nach Einzugsgebiet, Stauraum und Talsperre. Im weiteren Verlauf soll auf drei ausgewählte Maßnahmen eingegangen werden, nämlich Freispülen der Auslassorgane, mechanische Räumung und Umleitstollen.⁴³

³⁹ Vgl. Sebatware J.P. (1997), S.30

⁴⁰ Vgl. Sebatware J.P (1997), S.30

⁴¹ Vgl. Sebatware J.P. (1997), S.31

⁴² Vgl. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (1994), S.14

⁴³ Vgl. Knoblauch H. et al. (2007), S.234ff

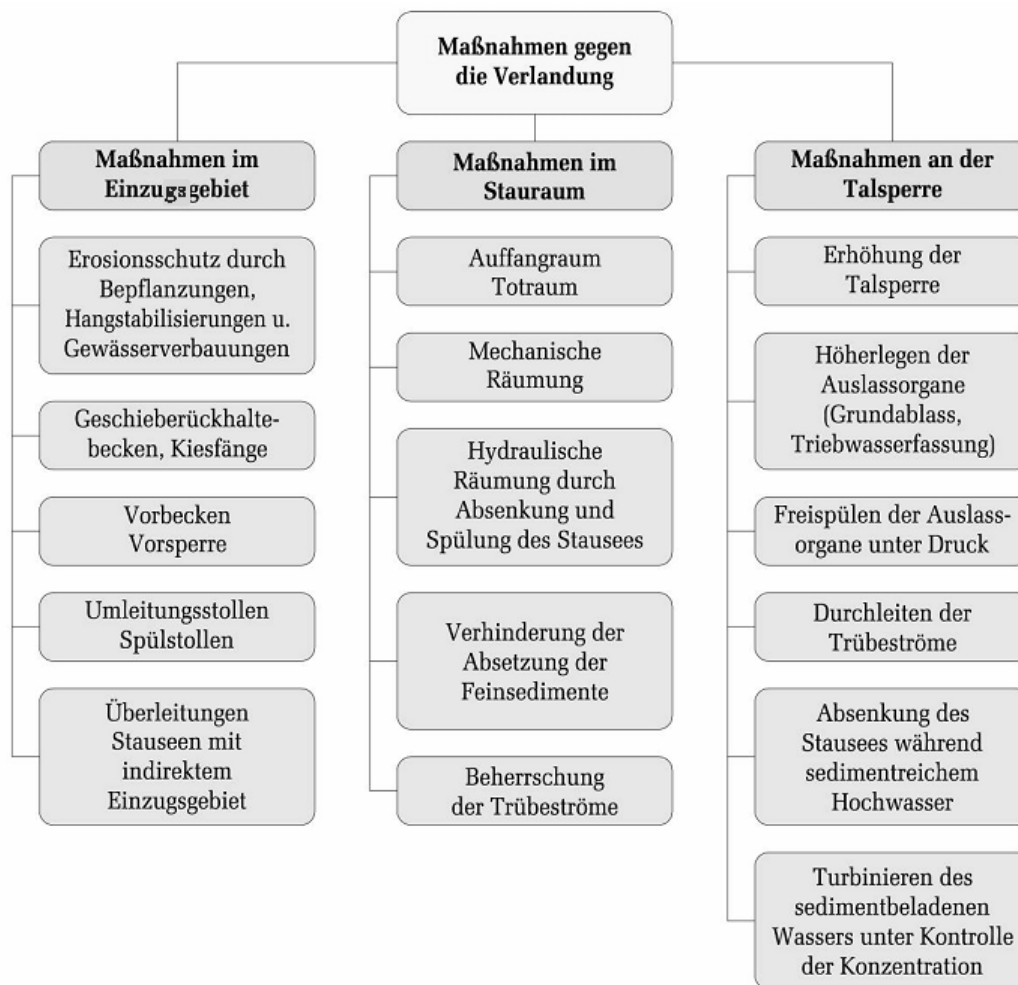


Abbildung 16: Maßnahmen gegen die Verlandung [Knoblauch H. et al. (2007), S. 234]

3.4.2.1.1 Freispülen

Abhängig vom Zweck der Spülung und der vorliegenden konstruktiven Durchbildung der Auslassorgane werden unterschiedliche Spülungsvarianten zur Anwendung kommen. Zwei Spülungsziele können differenziert werden, die durch Öffnung der Grundablässe Feinteile in das Unterwasser ausschwemmen:⁴⁴

- a) Das Freispülen der im Nahbereich eingesandeter Verschlussorgane wird bei vollem Staulevel durchgeführt und soll das Funktionieren der Absperreinrichtungen gewährleisten. Dies ist eine Forderung der Talsperrenverordnung
- b) Die Stauraumabsenkung bzw. die Totalentleerung wenn Revisionsarbeiten notwendig werden oder zur Rückgewinnung von Nutzvolumen. Hier spricht man von Spülung.

Im weiteren Verlauf soll hier auf die Spülungsvarianten näher eingegangen werden um einen genaueren Überblick über die zur Verfügung stehenden Verfahren zu geben.

⁴⁴ Vgl. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (1994), S.15

Als Spülung unter Druck, Fall a) in Abbildung 18, versteht man das Spülen beim Wasserspiegel auf Stauzielniveau. In regelmäßigen Abständen müssen die angelagerten Sedimente in der Nähe des Einlaufbauwerks des Grundablasses entfernt werden. Hierfür werden meist kurze Spülstöße verwendet, welche bei Vollstau und offenen Grundablassverschlüssen durch den vorherrschenden Druck und den beim Abfließen entstehenden Sog einen Erosionstrichter schaffen (siehe dazu Abbildung 17). Die dem Unterwasser dabei zugeführten Sedimentmengen sind nicht sehr groß und durch die Möglichkeit der Verdünnung durch das Wasser aus dem Speicher nicht relevant. Für den Fall, dass die Möglichkeit der Verstopfung des Grundablasses mit Sedimenten und Geschiebe besteht, kann ein Siphon oder Injektor-schacht im Bereich des Einlaufes vorgesehen werden, damit beim Öffnen der Schieber das Material über die Sog- und Spülwirkung des Wassers mitgerissen und der Grundablass geräumt wird. Durch die Tatsache, dass die Strömungsgeschwindigkeit und damit die Schleppkraft des Wassers mit zunehmender Entfernung vom Grundablass stark abnimmt, ist die Wirkung der Spülung als räumlich begrenzt anzusehen.⁴⁵

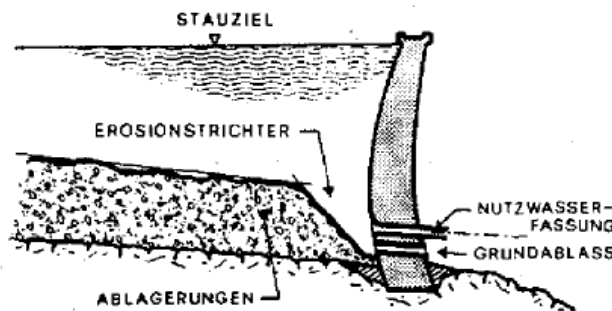


Abbildung 17: Längsschnitt einer Sperre mit Grundablass und darüber liegender Fassung, [Vischer D. (1981), in Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (1994), S.16]

Als Spülung bei freiem Wasserspiegel, Fall b) in Abbildung 18, kann das Spülen bei abgesenktem Wasserspiegel verstanden werden. Dabei erfolgt die Absenkung so lange wie möglich über die Entnahmebauwerk für Betriebszwecke, wobei schon in diesem Zeitraum finden Umlagerungen der Sedimente stattfinden. Zu einem späteren Zeitpunkt erfolgt die Öffnung der Grundablassverschlüsse und je nach Situierung des Sedimentationskegels gelangt eine unterschiedliche Menge von Feinsedimenten in das Unterwasser. Wesentlich für den Erfolg der Spülung ist dabei die Schlussphase, dafür hauptverantwortlich ist die am Ende der Absenkung noch vorhandene Wassermenge. Eine weitere Entfernung der Sedimente kann mit den Zuflüssen oder mittels mechanischer Räumung durch Maschinen erfolgen.⁴⁶ In Abbildung 18c) und d) sind die verschiedenen Situationen während des Absenkens des Wasserspiegels mit einem Injektionsschacht abgebildet. Man kann erkennen wie die Strömung während der Absenkung nach und nach den Abtransport der Sedimente bewerkstelligt.

⁴⁵ Vgl. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (1994), S.16

⁴⁶ Vgl. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (1994), S.16f

Der Zeitpunkt der Durchführung der Spülung hat Einfluss auf die Konzentration der Sedimente im Vorfluter. Beeinflusst kann die Konzentration durch Verdünnen, Ausnutzung von Hochwasser- und Regenereignissen sowie durch die Stellung der Schieber werden. Die Beeinträchtigung für die Lebewesen im Unterwasser durch eine Spülung ist groß bis sehr groß, da große Mengen von Geschiebe und Sedimenten aus dem Staubecken ausgetragen werden.⁴⁷

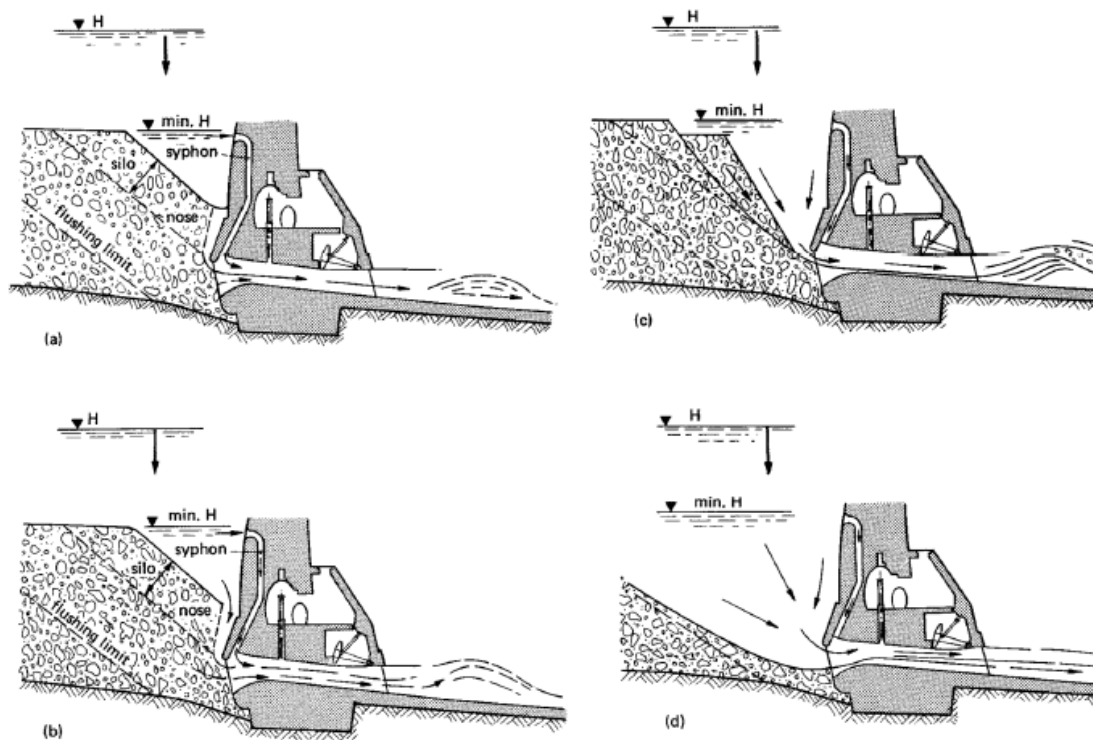


Abbildung 18: Maßnahmen gegen Verstopfen mit einem Injektionsschacht, [Boes R. (2012), S.44]

3.4.2.1.2 Mechanische Räumung

Da es im Verlauf von Spülungen zu Problemen mit den gesetzlichen Regelungen kommen kann, da für die Ökologie der Gewässer mit negativen Folgen zu rechnen ist. Aus diesem Grund stellt die mechanische Räumung eine gute Alternative zur Spülung dar. Auf jeden Fall sollte über Alternativen zur Spülung in Hinblick auf damit einhergehende Energie- und Kostenaufwendungen nach gedacht werden. Deswegen werden hier verschiedene Methoden zur Entfernung mittels Baggern angeführt.⁴⁸

- Trockenbaggerung erfolgt bei entleerten Staubecken in Kombination von Bagger mit Tiefladern, allerdings sind dafür Zufahrten vorzusehen. Dieses Verfahren ist nur für kleine Beckengrößen mit einem festen, ebenen Untergrund anzuwenden.

⁴⁷ Vgl. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (1994), S.17

⁴⁸ Vgl. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (1994), S.17f

- Nassbaggerung wird bei Wasserspiegel auf oder einem abgesenkten Stauziel durchgeführt. Da die Tiefe der Entnahme durch die Länge des Auslegers begrenzt ist, ist dieses Verfahren für Staubecken nicht anzuwenden.
- Bei einer Saugbaggerung erfolgt die Entfernung der Sedimente mit Hilfe einer Absaugvorrichtung, die stationär am Rand des Beckens oder auf einem schwimmenden Ponton stationiert ist. Dabei kann bis zu einer Tiefe von 200m Schlamm mit einer mittleren Leistung von 400m³/h, bei einem Wasseranteil von 80% gefördert werden. Dabei fällt eine Feststofffracht von 60 bis 80m³/h bis zu einem maximalen Korndurchmesser von 60mm an.
- Saugbaggerung mit Sedimentabgabe in den Vorfluter: dabei können die geförderten Sedimente in das Unterwasser abgegeben oder nach Zwischenlagerung kontinuierlich in Hochwasserphasen abgegeben werden. Vorteilhaft wirkt sich dabei auf die Stauhaltung aus, dass keine Wasserspiegelabsenkung notwendig ist.

3.4.2.1.3 Umleitstollen

Um die Geschiebefracht in das Speicherbecken zu reduzieren, besteht die Möglichkeit, an der Speicherwurzel eine Vorsperre zu errichten. Dadurch wird die Strömung in Richtung eines Umleitungsstollens gelenkt, mit dessen Hilfe das Geschiebe gefasst werden kann und um den Speicher herumgeleitet wird. Im Fall eines Hochwasserereignisses kann das im Umleitungsstollen abgelagerte Geschiebe und Sediment am Staubecken vorbei geleitet werden. In Abbildung 19 ist die Anordnung eines Spülstollens und der Vorsperre als Leitwerk exemplarisch dargestellt.

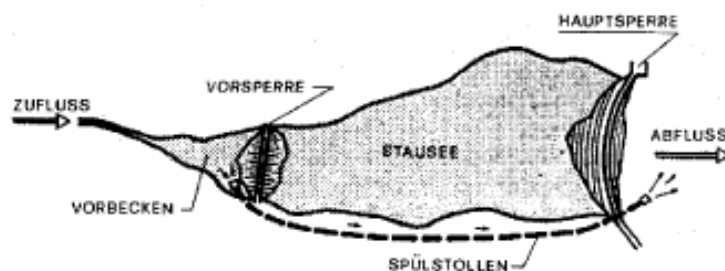


Abbildung 19 Situation eines Staubecks mit einem Vorbecken, das mit einem ins Unterwasser mündenden Stollen gespült wird, [Vischer D. (1981) in Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (1994), S.14]

3.4.2.2 Auswahl der Methode zur Verhinderung und Beseitigung von Verlandungen

Um die entstehenden Auswirkungen von Maßnahmen die zur Entfernung von Sedimenten und Geschiebe aus dem Staubecken zum Ziel haben, müssen im Voraus verschiedene Untersuchungen und Erhebungen erfolgen. Dabei ist die Anzahl der zu setzenden Maßnahmen davon abhängig, ob es sich um eine Erstentlandung, oder eine reine Folgemaßnahme nach einer Erstentlandung bzw. eine intermittierende Maßnahme handelt. Außerdem ist der Zeit-

punkt der gesetzten Maßnahme im Maßnahmenkatalog anzuführen. Folgende Punkte führen die maßgebenden Parameter für die Auswahl einer Arbeit an:⁴⁹

- Sedimenterkundung
 - Geochemische Belastung
 - Geophysikalische Eigenschaften
 - Auswirkung auf die Wassergüte
 - Mengen
 - Abfälle
- Hydrologie
 - Abflüsse/Ganglinie
 - Klimatische Randbedingungen
- Wasserwirtschaft
 - Mögliche Wasserspiegellagen
 - Jahreszeit
 - Zeitliche Einschränkungen
- Technologie
 - Technische Machbarkeit
 - Deponien, Zwischenlager, etc.
 - Überwachungsmaßnahmen
- Umwelt/Ökologie
 - Zeitliche und räumliche Begrenzungen
 - Emissionsbegrenzungen
 - Transportmöglichkeiten
- Kosten
- Verwertung oder Beseitigung der Sedimente
 - Genehmigungen
 - Transportmöglichkeiten
 - Deponien (räumliche und zeitliche Distanzen)

⁴⁹ Vgl. Schriftenreihe des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes (2000) in Knoblauch H. et al. (2007), S.236f

- Aufbereitungserfordernisse
- Rechtliche Situation, Genehmigungen
 - Wasser-, Abfall-, Naturschutzrecht
 - Planfeststellung, -genehmigung
 - Adaptierung an nationale Rechtslage
- Grunderwerb
 - Vorübergehende -, dauernde Inanspruchnahme
- Sonstige Parameter
 - Morphologische Situation
 - Bewirtschaftung des Einzugsgebietes
 - Abstimmung mit Ober- und Unterlieger,...

Im Zuge des Kapitels Einlaufbauwerk wurde versucht die unterschiedlichen Ausführungsvarianten darzulegen. Der größte Fokus wurde dabei auf die Möglichkeit der Verlandung des Stauraumes und damit der Verstopfung des Grundablasses gewidmet. Dabei wurde versucht die häufigsten Massnahmen, wie die mechanische Räumung und die Spülung näher behandelt. Das nächste Kapitel handelt von den unterschiedlichen Möglichkeiten das Verschließen des Grundablasses und ist als Apparatenummer zusammengefasst.

4. Apparatekammer

Nach dem Einlaufbauwerk und die unterschiedlichen Probleme, mit denen man konfrontiert sein kann, besprochen wurde, soll nun einer der Kernbereiche eines Grundablasses, nämlich die Apparatekammer besprochen werden.

Grundablässe, die durch das Sperrenbauwerk geführt werden, sind im Vergleich zu Grundablässen als Umgehungsstollen hydraulisch wesentlich einfacher zu berechnen. Im weiteren Verlauf wird das Hauptaugenmerk auf die Umleitungsstollen gelegt. Bei diesen liegen durch die konstruktive Ausbildung unterschiedliche Probleme vor, wie im Druckbereich der Stollen, sowie im Anschluss an die Apparatekammer.⁵⁰

Durch die Tatsache, dass große Stollenquerschnitte nicht durch ein einziges Verschlussorgan abgesperrt werden können, da die auftretenden Kräfte zu groß wären, ist es notwendig, eine Unterteilung des Stollenquerschnittes vorzunehmen, wie in Abbildung 20 dargestellt wird. Ein weiterer wesentlicher Unterschied zu einer Mauerdurchführung liegt in der Tatsache, dass der Freispiegelbereich in einem Umleitungsstollen von der Schützenkammer, bis zur Energievernichtungseinrichtung wesentlich länger ist.⁵¹

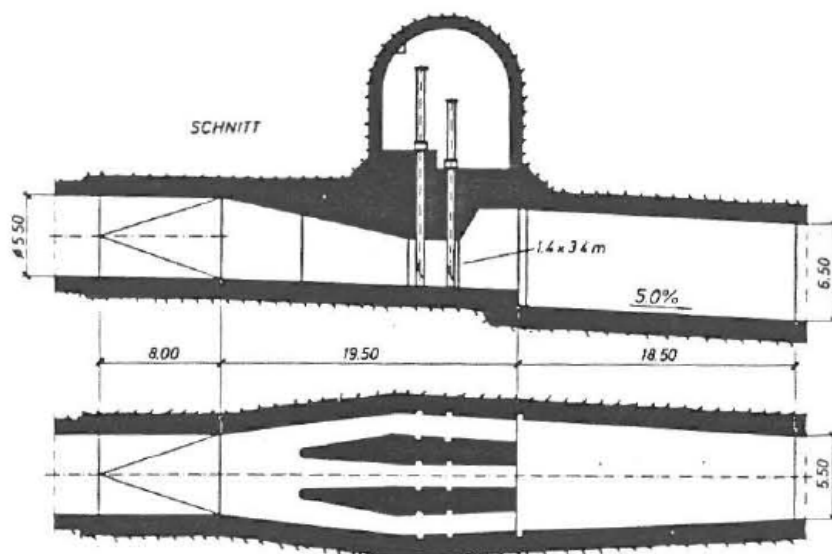


Abbildung 20: Situation und Schnitt durch eine Schützenkammer mit drei Tafelschützen zur Verschließung, [Anastasi G. (1983), S.12]

Durch die Notwendigkeit, die vorhandene Wassermenge abführen zu können, ergibt sich die konstruktive und betriebliche Erfordernis von Schützen, da ansonst kein kontrolliertes Abgeben einer Wassermenge möglich wäre. Die Stollenanzahl richtet sich aufgrund der hohen Herstellungskosten nach der notwendigen Abflusskapazität, wofür die errichteten Baumleitungen herangezogen werden können. Dieser Umstand bedingt, dass es zu einer Anordnung

⁵⁰ Vgl. Anastasi G. (1983), S.8

⁵¹ Vgl. Sebatware J.P. (1997), S.11

von mehr als einem Schütz in einem Stollen kommt. Um eine entsprechend gleichmäßige Anströmung der Stollen zu ermöglichen, ist eine strömungsgünstige Ausbildung der Apparatekammer erforderlich. Um die Strömungsableitung auch bei asymmetrischem Betrieb der Schützen einwandfrei gewährleisten zu können, muss hier größtes Augenmerk auf die strömungsgünstige Ausführung gelegt werden. Im geschlossenen Freispiegelstollen kann es sonst nach der Schützenkammer zu einem Auftreten von unvorteilhaften Abflusszuständen kommen.⁵²

Weiters soll hier eine Zusammenfassung über Grundsätze für die konstruktive Ausbildung des Einlaufbauwerks gegeben werden, diese werden im Folgenden angeführt:⁵³

- Für den Fall, dass der Grundablassstollen im Bereich der Apparatekammer in mehreren Verschlüssen aufgeteilt wird, ist es erforderlich, dass es zu keiner Querschnittsaufweitung vor der Schützenkammer kommt.
- Der oberhalb der Schützen liegende Querschnitt darf nicht die gleichen Abmessungen aufweisen, da es in bestimmten Bereichen zum Auftreten von Unterdruck kommen würde. Dies wird durch eine entsprechende Verkleinerung des Querschnittes in kavitationsgefährdeten Bereichen verhindert, da damit ein entsprechender Überdruck erzeugt wird.
- Durch eine spitzwinkelige Ausführung des Trennpfeilers kann es zu Problemen bei der Anströmung der Schützen kommen. Es ist daher eine möglichst gleichmäßige Anströmung der Schützen anzustreben, da ansonsten Strömungserscheinungen auftreten können, die einen negativen Einfluss auf die Gerinnestabilität haben, außerdem kann dieser Zustand zu Druckschwankungen führen.
- Durch den auftretenden Sog im, nicht unter Druck stehenden Ablaufquerschnitt, kann ein Unterdruck auftreten, der sich bis in den Druckstollen vor den Absperrorganen ausbreitet. Dabei kann es zu einer Überlagerung des auftretenden Unterdruckes im Bereich der Schützen kommen.
- Im Anschluss der Apparatekammer muss der Ablaufquerschnitt des Freispiegelstollens entsprechend groß ausgebildet werden, damit die, durch einen Schussstrahl nach den Verschlussorganen auftretenden Stoßwellen entsprechend gedämpft werden.
- Im Bereich des Freispiegelstollens darf der Unterdruck des Belüftungssystems nicht kleiner als 10kPa betragen. Die Bemessung des Belüftungssystems erfolgt wie bei einer pneumatischen Leitung nach dem entsprechenden Luftbedarf. Der maßgebende Lastfall stellt sich bei 80%iger Öffnung der Schützen und bei maximaler Stauspiegellhöhe ein.

⁵² Vgl. Sepatware J.P. (1997), S.12

⁵³ Vgl. Anastasi G (1983), S.9

- Durch die Tatsache, dass bei Eintrag der Luft in das Wasser die Strömung verlangsamt wird, kommt es zu einer Vergrößerung des Ablaufquerschnittes des Wassers. Dies muss bei der Bemessung des Stollenquerschnittes berücksichtigt werden.
- Für die Vermeidung von Kavitation ist eine entsprechende Ausführung von Belüftungseinrichtungen erforderlich. Eine bestimmte Anordnung ist zu beachten, da durch den vergrößerten Lufteintrag eine Vergrößerung des Abflussquerschnittes einhergeht und damit ein größerer Querschnitt für die Belüftung von der Unterseite des Freispiegelstollen notwendig ist.
- Bei den Belüftungsschlitzen gilt es, die entsprechende Ausführung der Deflektoreneigung von größer als 1:12 zu vermeiden.
- Für die Nachvollziehbarkeit der Vorgänge in einem Grundablass sind Modellversuche unbedingt erforderlich. Dabei ist für eine entsprechende Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse ein möglichst großer Masstab notwendig.

Im Folgenden werden zunächst die Ausführungsarten der Apparatekammer analysiert, danach widmet sich das Kapitel den unterschiedlichen Verschlüssen, die verwendet werden können.

4.1 Zulaufbereich zur Apparatekammer

Die meist rechteckige Ausbildung der Apparatekammer bedingt einen Verzug des kreisförmigen Druckstollens auf ein viereckiges Profil, dieser Verzug geschieht im Vorhof. Dies führt zu einer Änderung der Form und der Abflussfläche, was wiederum mit hydraulischen Verlusten zusammenhängt. Außerdem darf in diesem Bereich keine Aufweitung des Querschnittes auftreten, da dies zu einer Ablösung der Strömung führt und damit die Gefahr der Kavitation sowie einer Wirbelbildung besteht.

4.2 Ausführungsarten

Im Zuge des Unterkapitels Ausführungsarten wird auf die Querschnittsgestaltung und die Pfeilerausbildung hinsichtlich der strömungsgünstigen Gestaltung eingegangen. Weiters werden die verschiedenen Tiefschütze angeführt und die Vor- und Nachteile der Führung der Dichtungsebene diskutiert.

4.2.1 Querschnittsgestaltung

Für die Ausführung der Abschlussorgane können zwei verschiedene Varianten zur Anwendung kommen, der Nassschacht, wie in Abbildung 6 dargestellt oder die Situierung der Verschlusseinrichtungen in einer Apparatekammer (siehe Abbildung 20). Der Unterschied der beiden Varianten besteht darin, dass beim Nassschacht die Verschlüsse über ein Apparate-

haus an der Geländeoberfläche gesteuert werden, während bei der Apparatekammer die Steuerung aus einer Kaverne erfolgt.⁵⁴

Der Wasserspiegel im Nassschacht hängt mit dem Stauspiegel als kommunizierendes Gefäß zusammen. Der Vorteil dieser Bauweise ist, dass im Berg keine Kaverne ausgebrochen werden muss, sondern nur ein Schacht, der sich mittels Aufwärtsbohrverfahren einfach herstellen lässt.

Je nach der abzuführenden Wassermenge werden die Sperrbereiche verkleinert, da die, auf die Verschlüsse einwirkenden Kräfte für große Querschnitte zu groß wären. So wird ein Mittelbauwerk eingezogen, der Querschnitt dadurch verkleinert und der auftretende Wasserdruck bleibt konstant. Da sich der Querschnitt verkleinert sind für die Schützen kleinere Steifigkeiten ausreichend und dadurch kostengünstiger herstellbar. Außerdem erhält man damit eine bessere Regelbarkeit des Abflusses. Bei asymmetrischem Betrieb der Absperrorgane besteht die Möglichkeit, dass sich Wirbel ausbilden, die sich schlagartig bis in den Vorhof erstrecken können, wobei die Wirbelbildung durch Ablösungen der Strömung hervorgerufen wird. Durch die Ablösungen wird nämlich eine Rotationsströmung induziert, die bei der offenen Sperre eine weitere Beschleunigung erfährt. Dies kann bis zu einer Ausbildung eines Luftkegels führen, der die Querschnittsfläche verkleinert, und damit eine Verringerung des Durchflusses zur Folge hat. Um sicherzustellen, dass die Querschnittsfläche sich konstant verjüngt, ist es empfehlenswert, ein Diagramm mit den Querschnittswerten herzustellen.⁵⁵

Für den Übergang von dem runden Querschnitt auf den Schützenbereich ist ein Vorhof vorzuschalten, in dem sich die Strömung an den strömungsgünstig gestalteten Pfeilern aufteilt und im Anschluss auch mit möglichst geringen Turbulenzen wieder zusammen geführt wird. Im Vorhof ist besonders darauf zu achten, dass es bei der Änderung des Querschnittes zu keiner Erweiterung, sondern immer nur zu einer Verschmälerung des Druckstollens kommt, da die Strömung von der Wand abgelöst und damit die gleichmäßige Strömung gestört wird. Mit Hilfe des im vorigen Absatz erwähnten Diagramms über die Querschnittsänderung, sind die Zunahme der Fließgeschwindigkeit und die Abnahme des Drucks ersichtlich.⁵⁶

Außerdem ist erwähnenswert, dass die Querschnittsfläche bei den Schützen immer kleiner als der Stollenquerschnitt sein muss. Das gilt auch für den Fall, dass mehrere Schützen vorhanden sind. Um den gefährlichen Unterdruck in der Schützenkammer zu vermeiden, besteht die Möglichkeit, die Schützen nur maximal 95% zu öffnen. Diese Methode der Teilöffnung ist aber nur als Notmaßnahme zu sehen, da die Schütze dabei beschädigt werden können. Die Anordnung einer festen Nase ist eine bessere Variante, da damit der Atmosphärendruck am Austrittsquerschnitt fixiert werden kann.⁵⁷

⁵⁴ Vgl. Patt H., Gonsowski P. (2011), S.220f sowie Vgl. Anastasi G. (1983), S.12

⁵⁵ Vgl. Anastasi G. (1983), S.503

⁵⁶ Vgl. Anastasi G. (1983), S.503

⁵⁷ Vgl. Anastasi G. (1983), S.503

4.2.2 Pfeilerausbildung

Im Zuge der Untersuchungen für den Grundablass der Anlage San Roque auf den Philippinen wurden Druckmessungen an einem Trennpfeiler durchgeführt. Durch diese konnte gezeigt werden, dass es bei einer scharfen Ausbildung der Pfeilerspitze, sprich bei einem kleinen Radius, zu großen Druckschwankungen bei asymmetrischer Anströmung kommt. Bei der Situierung der Pfeilerspitze sollte darauf geachtet werden, dass die Spitze nicht in einem Bereich mit geringem Druck liegt. Im Anschluss an die Spitzen sollte es zu einer Querschnittsverengung kommen.⁵⁸

Durch die Ausbildung der Pfeiler können die Druckschwankungen minimiert werden. Die elliptische Form nach Formel (4.1) führt bei asymmetrischer Schützenöffnung allerdings zu Bedingungen, die nicht ohne Probleme bleiben. In den Formeln (4.1) und (4.2) steht D für die Breite beim Ausgang. Im Zuge von Versuchen konnte gezeigt werden, dass die Austrittsbreite einen Wert bis zu $0,75 \cdot D$ annehmen kann. Außerdem konnte gezeigt werden, dass die Ausbildung des Pfeilers nach Formel (4.2) für den asymmetrischen Betrieb genauso möglich ist. Dabei ist vor allem die Krümmung der Pfeilerspitzen möglichst klein zu halten, weiters müssen jegliche Sprünge vermieden werden. Dies führt zu der Erkenntnis, dass kreisrunde Ausbildungen von Pfeilern ungünstig sind.⁵⁹

$$\left(\frac{X}{D}\right)^2 + \left(\frac{Y}{(D/3)}\right)^2 = 1 \quad (4.1)$$

$$\left(\frac{X}{(3D/4)}\right)^2 + \left(\frac{Y}{(D/4)}\right)^2 = 1 \quad (4.2)$$

4.2.3 Tiefschütze

Als Tiefschütze werden Verschlusseinheiten die tief unter dem Wasserspiegel liegen bezeichnet. Sie stellen den Verschluss eines Staubeckens dar und sind somit für die Gewährleistung der Dichtheit zuständig. Von ihrer Funktionstüchtigkeit hängt in einem Katastrophenfall sehr viel ab. Da die Abmessungen des Querschnittes bei solchen Verschlüssen oftmals nicht groß sind, spielt der statische Wasserdruck bei der Bemessung der Konstruktion eine untergeordnete Rolle. Viel wichtiger als das Stützgewicht sind die Reibungskräfte und die dynamischen Kräfte, die bei großen Überdeckungshöhen eine weit bedeutendere Rolle einnehmen.⁶⁰

Als Tiefschütze könne folgende Schützenarten eingesetzt werden:⁶¹

- Gleitschütz
- Rollschütz

⁵⁸ Vgl. Anastasi G. (1983), S.504

⁵⁹ Vgl. Anastasi G. (1983), S.504

⁶⁰ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.301

⁶¹ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.307ff

- Stoney - Schütz
- Raupenschütz
- Strahlschütz
- Ringschütz
- Segmentschütz

Die Schütze können nach der Situierung der Dichtungsebene und je nach dem, ob die Stauwand ober- oder unterwasserseitig situiert ist, unterschieden werden. Die Vorteile, im Rahmen der oberwasserseitigen Dichtungs- und Stauebene dominieren klar:⁶²

- + Eindeutig festgelegte Strahlablösungskante an der Unterseite der Schützwand bieten die größtmögliche Sicherheit gegen hydrodynamische Belastungen.
- + Die vom Antrieb aufnehmbare Senkkraft, die aus dem Eigengewicht der Konstruktion und den Reibungskräften besteht, kann eindeutig ermittelt werden.
- + Die erforderliche Senkkraft ist unabhängig von der durchströmenden Wassermenge.
- + Verklemmen beim Ziehen des Schützes kann ausgeschlossen werden.
- + Es sind keine zusätzlichen Belüftungsrohre erforderlich, da die Belüftung durch den Schacht erfolgen kann.
- + Bei geschlossenen Schützen ist eine Kontrolle und die Überholung der Tragkonstruktion über einen vorgenommenen Einstieg durch den Schützenschacht möglich. Außerdem können die Armaturen, Schienen sowie das gesamte Hubgestänge im Trockenen begutachtet werden. Der Druckstollen muss dafür nicht geleert werden.
- + Aufgrund der Tatsache, dass die Dichtung oberwasserseitig situiert ist, bleiben die Rollen vor dem Einfluss von Wasser verschont, wodurch die Betriebssicherheit erhöht wird.
- + Die Stauwand wird nur auf Druck beansprucht, wodurch eine Erhöhung der Sicherheit der Schweißnähte erzielt wird.
- Da die Tragkonstruktion zum Unterwasser gerichtet ist, kann es bei der Ausbildung einer Deckwalze zu zusätzlichen Belastungen auf das Schütz kommen.

Eine weitere Möglichkeit besteht aber auch darin, die Dichtungsebene unterwasserseitig anzubringen, wobei die Stauwand ober- oder unterwasserseitig situiert werden kann. Dabei ergeben sich verschiedene Nachteile, auf die hier nur überblicksweise eingegangen werden soll:⁶³

⁶² Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.301f

⁶³ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.302

- Die Formgebung der Unterkante des Schützes kann lediglich für eine Schützenstellung erfolgen. Damit entsteht die Gefahr, dass bei anderen Schützenstellungen zu Schwingungen der Schützen kommt.
- Laufarmaturen befinden sich in direktem Kontakt mit Wasser und werden durch die Querströmungen zusätzlich belastet.
- Im Fall einer Revision muss das gesamte Schütz ausgebaut werden.

4.2.4 Belüftung hinter den Absperrorganen

Die Belüftung hinter den Absperrorganen kann, je nach verwendetem Verschluss unterschiedlich ausgeführt werden. So ist es möglich, bei einem Schütz eine Sohlstufe, die mit seitlichen Nischen verbunden ist, auszubilden. Genauer wird hier auf die Belüftung nicht eingegangen, sondern es soll auf das Kapitel 4.3.5 verwiesen werden.

Der wichtigste Punkt des vorliegenden Unterkapitel 4.2 ist die Verhinderung der Querschnittsaufweitung beim Übergang des Druckstollens auf den Apparatebereich, da ansonsten die Gefahr der Strömungsablösung gegeben ist und damit Kavitation auftreten kann. Außerdem muss eine gleichmäßige Anströmung der Verschlüsse gewährleistet werden, um die Entstehung der Wirbel zu vermeiden. Im weiteren Verlauf wird im Rahmen der Apparatekammer auf die unterschiedlichen Verschlüsse näher eingegangen.

4.3 Verschlüsse

Für den Verschluss des Grundablasses kommen Gleit- und Rollschütze sowie Drucksegmente zur Anwendung. Die Abbildung 21 beruht auf den jeweils 15 größten ausgeführten Typen der verschiedenen Anlagen. Aus der Grafik ist ersichtlich, dass Gleitschütze bei hohen Stauhöhen und kleinen Verschlussflächen verwendet werden, während die Rollschütze dann zur Anwendung kommen, wenn die wirkenden Kräfte für den Betrieb zu groß werden würden.⁶⁴

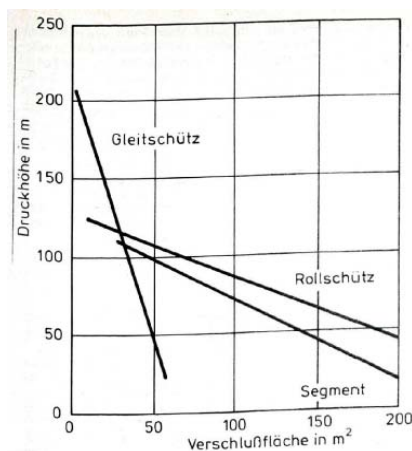


Abbildung 21: Einsatzbereich von Tiefschützen, [Bretschneider H. (1987), S.225]

⁶⁴ Vgl. Bretschneider H. (1987), S.224

4.3.1 Schütze

Tabelle 1: Vor- und Nachteile von Schützen, [Levin J. (1995), S.17]

Vorteile	Nachteile
+) Kleine Wandlänge der Stollen	-) Notwendigkeit von Nischen
+) Verteilung der Wasserauflast	-) Möglichkeit der Verlegung der Rollen mit Schmutz
	-) Notwendiger Überkopfbau
	-) Rollen, die sich unter Wasser bewegen müssen

Der Hauptteil der Schützen ist mit Gegengewichten ausgerüstet, um die Hubkraft zu reduzieren. Um die Gegengewichte vor Eintritt in das Wasser bei geöffnetem Schütz zu schützen, ist das Gegengewicht so ausgelegt, dass es nur die Hälfte der Distanz zurücklegt. Dies hat zur Folge, dass das 2,7fache des Schützengewichtes auf die Aufbauten wirken und damit kostenintensive Abstützmaßnahmen notwendig sind.⁶⁵

Die meisten Schütze des Typs mit fixierten Rollen werden in offenen Kanälen verwendet (siehe Abbildung 22). Bei Verschlüssen in offenen Kanälen werden die Rollen fliegend ausgeführt, damit der wirkende Wasserdruck gleichmäßig über die Rollen abgegeben wird. Ein unregelmäßiger Kontakt der Rollen mit dem Untergrund kann zu einer Überbeanspruchung der Rollen führen. Eine Möglichkeit, der gleichmäßigen Belastung der Rollen, ist auf der rechten Seite der Abbildung 22 dargestellt.⁶⁶

Die unterwasserseitige Dichtung eines Schützes wird bevorzugt, da das anstehende Wasser die Dichtung anpresst und so abdichtet. Die oberwasserseitige Dichtung wird verwendet, wenn ein Schütz in einem Schacht versenkt wird und das Schütz über diesen Schacht revidiert werden kann.⁶⁷

⁶⁵ Vgl. Levin J. (1995), S.17

⁶⁶ Vgl. Levin J. (1995), S.17

⁶⁷ Vgl. Levin J. (1995), S.17

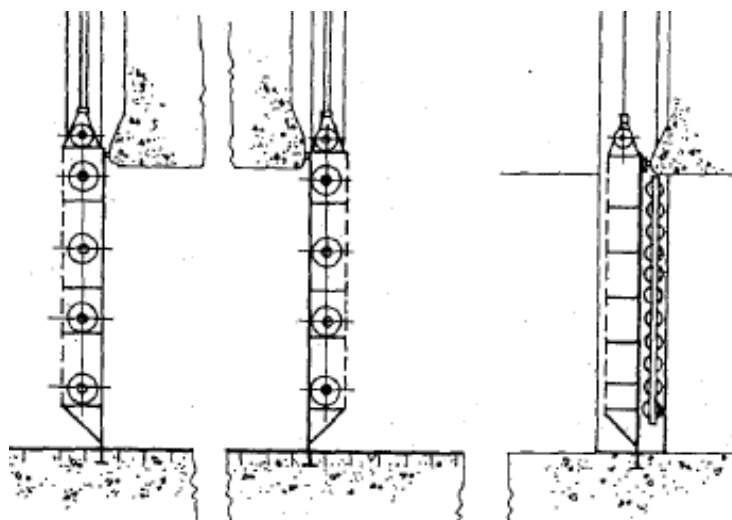


Abbildung 22: Rollenschütz mit fixierten Rollen mit Dichtung unter- und oberwasserseitig und ein Stoneyrollerschütz, [Levin J. (1995), S.18]

4.3.1.1 Gleitschütz

Gleitschütze sind meist rechteckig ausgeführt, dabei können die Reibungskräfte durch Führung des Schützes auf geschmierten Gleitflächen erfolgen. Das Öffnen erfolgt dabei vollständig ohne Vibrationen, wobei das Gleitschütz mit Öldruck-Servomotoren betrieben werden. Die Abdichtung kann mit Hilfe der Führungsschienen bewerkstelligt werden. Der Einfluss der Hubkräfte auf die Gesamtanlage ist der wesentliche Einflussfaktor auf die Auslegung des Servomotors. Bei großen Schützen, die im geöffneten Zustand vollständig im Schützenschacht versenkt werden, muss der Schacht und der Anschlussbereich gegen die Panzerung hin ausgesteift werden. Bei dem Schließvorgang erfährt der Haubendeckel die größte Beanspruchung, da er bei geringer Öffnung neben dem fast vollständigen Wasserdruck auch den höheren Reibungswiderstand aufnehmen können muss. Das Schütz kann zur Oberwasserseite gewölbt sein und verjüngt sich zur Seite hin. Es benötigt zur Führung noch seitliche Führungsschienen, die Nischen. Für die Stabilität werden die Schütze zur Aussteifung mit Quer- und Längsrippen in einem quadratischen Raster ausgesteift. Auf die Ausbildung der Unterkante wird vor allem bei Betrieb der Schütze zwischen Stellungen besonderen Wert gelegt. Eine Ausbildung der Unterkante als breite Sohle hat nur dann praktischen Sinn, wenn das Schütz entweder geschlossen oder vollständig geöffnet betrieben wird.⁶⁸

Der Schützkörper ist mittels Gewinde starr mit der Konstruktion verbunden. Dabei muss für die Erreichung der Dichtheit eine zusätzliche Dichtungsebene eingeplant werden. Bei einem Verschluss von 2,20 mal 2,20 Meter ist eine Bauhöhe der Gesamtkonstruktion von 9,70m notwendig. Seitlich entlang führen die Rohre zur Schmierung der Gleitflächen. Zur Verriegelung

⁶⁸ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.307

lung in oberster Lage des Schützes dient ein Handrad. Bei größer werdendem Wasserdruck und Querschnitt der Schützes werden mitunter zwei Servomotoren eingesetzt.⁶⁹

Um vollständige Abdichtung der Schützes zu erzielen, besteht die Möglichkeit des Einbaus einer Schlackenschleuse. Dabei werden vor jeder Dichtungsebene Rohre in den Schacht geführt, die in der Schieberkammer enden. Zur Abdichtung wird feine Schlacke oder ein anderes Granulat in die Schieberkammer eingeführt, dabei wird der obere Verschluss geschlossen und der untere geöffnet, damit das Mittel auf den Grund absinkt und etwaige Undichtheiten verschließt.⁷⁰

4.3.1.2 Rollschütz

Rollschütze werden zur Absperrung größerer Querschnitte verwendet, da bei der Bewegung des Schützes mittels Rollen die Reibungskräfte reduziert werden können. Je nach dem, ob eine größere oder kleinere Last abgetragen werden muss, werden die Rollen ungeführt oder geführt ausgebildet. Auf die ungeführte Variante wird deshalb zurückgegriffen, da im Rahmen der geführten Variante bei Bewegung unter Last mit einer geringen Schiefstellung die Führungsschienen abgeschert werden. Um dies zu verhindern, kann mit einer seitlich angeordneten Führung eine Zentrierung des Schützes sichergestellt werden. Abbildung 23 zeigt die mögliche Situierung der Rollen über die Höhe, außerdem sind in den Schnitten die Führungen und die Abdichtung zu erkennen.⁷¹

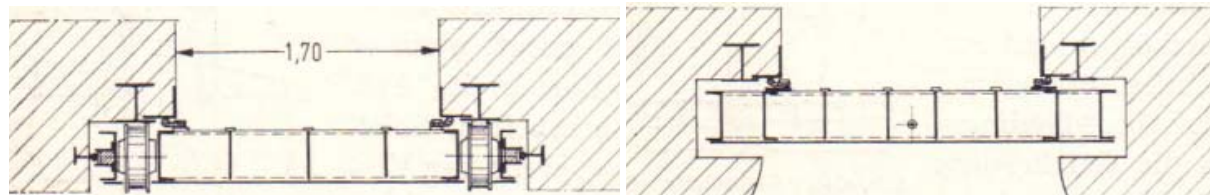


Abbildung 23: Schnitt durch ein Rollenschütz bei den Rollen und einmal darüber, [Wickert G., Schmausser G. (1971), S.308]

Bei kleinen Spannweiten kann auf die üblichen Walzprofile zurückgegriffen werden. Befindet sich die Stauwand in der gleichen Ebene wie die Dichtung, so kann es zum Verlegen und Verklemmen durch Fremdkörper kommen. Eine durchbrochene Konstruktion verhindert das Eindringen von Fremdkörpern, gewährleistet aber das Zuströmen von Wasser in die Konstruktion. Anstelle der Walzprofile besteht die Möglichkeit, Rohre als Hauptträger zu verbauen. Die Rohre haben neben der strömungsgünstigen Ausbildung auch den Vorteil, dass für den Fall, dass die Reibungskräfte beim Schließen zu groß werden, sie entweder aus Voll-

⁶⁹ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.307

⁷⁰ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.307f

⁷¹ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.308

profilen oder mit Ballast hergestellt werden können, damit sich das Schütz schließen lässt. In Abbildung 24 ist ein Schütz mit Rohren als Hauptträger dargestellt.⁷²

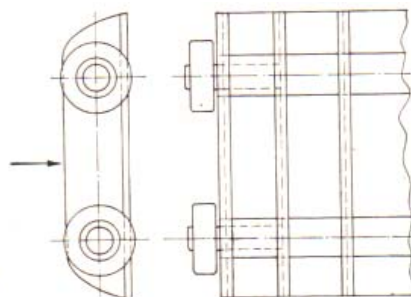


Abbildung 24: Rollschütz mit Rohren als Hauptträger, [Wickert G., Schmausser G. (1971), S.308]

Durch Situierung der Dichtung oberwasserseitig befinden sich die Tragkonstruktion und auch die Rollen bei geschlossenen Schützen im Trockenen. Um einen leichteren Transport und Montage zu erreichen, besteht die Möglichkeit der Zweiteilung eines Schützes.⁷³

Es gibt aber auch eine Lösung, bei der keine Hauptträger verbaut werden, sondern die Tragkonstruktion aus, miteinander verschweißten Breitflanschträgern besteht. Seitlich werden sie mit Endschotten verbunden, in denen die Achsen gelagert sind, die die Laufrollen tragen. Zur Lagerung dieser Achsen werden nicht alle Breitflanschträger bis zu den Endschotten weiter gezogen. Anstatt dessen werden die kürzeren Träger mit inneren Endschotten verbunden. Nachteilig bei dieser Konstruktion ist der höhere Materialbedarf.⁷⁴

Der Reibungswiderstand der Rollen hat einen großen Einfluss auf die Bedienfähigkeit eines Schützes. Deshalb muss bei der Wahl des Achslagers der Rollen auf die verschiedenen Materialeigenschaften und Lagerausführungen Rücksicht genommen werden. So hat eine Lagerung mit einer Bronz Buchse im Gegensatz zu einer Kugellagerlagerung einen beinahe 50fach höheren Reibungswiderstand.⁷⁵

4.3.1.3 Stoney-Rollerschütz

In Abbildung 22 rechts ist ein Stoney - Rollerschütz dargestellt. Die Rollen sind dabei in beiden Nischen situiert und bewegen sich mit der halben Geschwindigkeit des Schützes. Sie sind auf den Rollen, die eine Übersetzung von 2:1 aufweisen, gelagert. In der Praxis erfolgt die Lastverteilung nicht gleichmäßig von dem Schütz via Rollen auf die unebene Laufschiene. Der zulässige Kontaktdruck eines Stoney - Rollerschützes ist die Hälfte eines Rollenschützes. Die Rollbelastung wird über die Rollenoberfläche am Schütz zu der Schiene übertragen. Den einzig beweglichen Teil dabei stellen die Achsen der Rollen dar. Da sich die Rollen elastisch unter der Last verformen, kann die Belastung nicht mehr direkt übertragen werden. Dadurch

⁷² Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.308f

⁷³ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.310

⁷⁴ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.310

⁷⁵ Vgl. Levin J. (1995), S.121

treten Abweichungen in der Linearität der Rollen auf, wobei es zu übermäßiger Beanspruchung der Rollen kommen kann. Unter hohen Fließgeschwindigkeiten können Löcher in der Dichtung zur Entstehung von Schützenvibrationen beitragen. Die Stoney - Rollerschützen werden heute nur mehr selten ausgeführt.⁷⁶

4.3.2 Segmentverschlüsse

Unter Stollen-Segmentverschlüssen können Segmentverschlüsse verstanden werden, die unterhalb der Geländeoberkante situiert sind, dabei lassen sie sich durch die vorhandene Stirndichtung eindeutig kennzeichnen. Bei Drucksegmenten liegt diese Dichtung immer oberwasserseitig, was sie mit den Zugsegmenten unterscheidet. Je nach Anwendungsgebiet müssen diese Verschlüsse verschiedene Anforderungen bezüglich des Betriebes bei verschiedenen Öffnungsstellungen erfüllen. So müssen Segmentverschlüsse die zur Hochwasserentlastung oder in Grundablässen eingebaut sind, auch in Zwischenstellungen betrieben werden können. Wichtig hierbei ist, die dauernde Abdichtung gegen das Wasser zu gewährleisten weswegen hierfür die Dichtung nicht an dem Verschluss montiert, sondern mit der stirnseitigen Panzerung verbunden wird (siehe Abbildung 25). Bei der Konstruktion der Segmentarme ist auf möglichst kurze Stützarme zu achten.⁷⁷

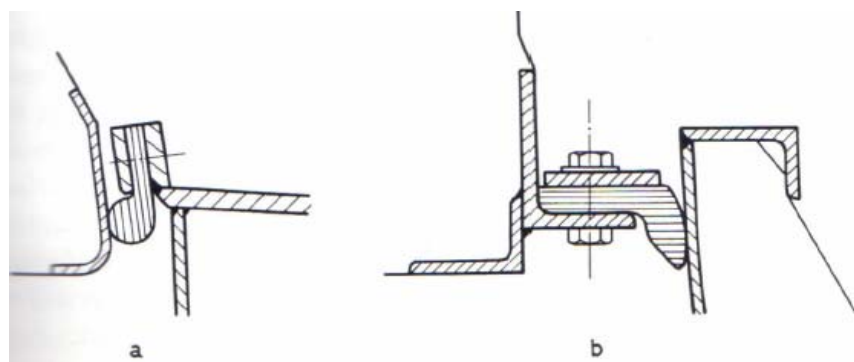


Abbildung 25: Unterschiedliche Dichtungsausführung je nach Betriebsweise des Segmentverschlusses, [Kollbrunner C., Milosavljevic S. (1967), S.49]

Die Art der Ausbildung und Anzahl der Stützarme ist abhängig von dem zur Verfügung stehenden Platzangebot. Die Drehlager können an der Stollenfirste situiert werden. Je nach der Breite des Querschnittes besteht die Möglichkeit der mehrfachen Abstützung der Stauwand über Fachwerkträger an den Stützenarmen oder aber bei kleinen Abmessungen mit nur zwei Stützenarmen je Seite, wobei hier die Auflagerungsbedingungen noch zu berücksichtigen sind. In Abbildung 26 ist eine Variante der Ausbildung mit einem Segmentverschluss dargestellt.⁷⁸ Die Tragstruktur der Segmentarme kann parallel, mit schrägen Stielen oder als Pen-

⁷⁶ Vgl. Levin J. (1995), S.18f

⁷⁷ Vgl. Kollbrunner C., Milosavljevic S. (1967), S.47f

⁷⁸ Vgl. Kollbrunner C., Milosavljevic S. (1967), S.48

delstütze erfolgen, wobei letzt genannte Variante wegen der Gefahr des Verkanntens bei ungleichförmiger Kraftwirkung nicht zu empfehlen ist.⁷⁹

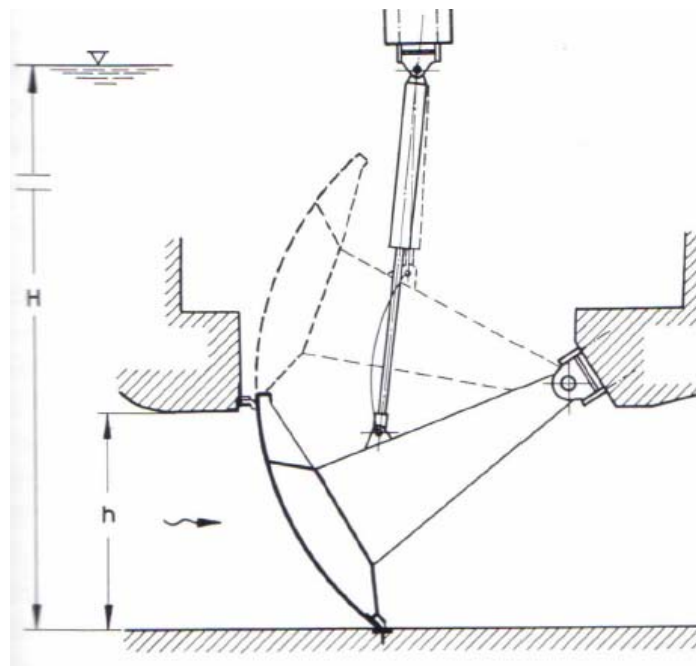


Abbildung 26: Stollen-Segmentverschluss, [Kollbrunner C., Milosavljevic S. (1967), S.49]

Bei großen Druckhöhen stellen Segmentverschlüsse eine gute Alternative zu den Schützen dar, da die Beeinträchtigung der Strömung durch Nischen und der Situierung der Drehlager oberhalb des Fließquerschnittes entfällt. Außerdem kann der Querschnitt durch Drehung des Verschlusses oberhalb der Firste vollständig vor einer Beeinträchtigung geschützt werden.⁸⁰

Als Antrieb der Segmentverschlüsse kommen vorwiegend ölhydraulische Hubwerke zur Anwendung, wobei die wesentlichen Kriterien für die Betriebssicherheit folgende sind:⁸¹

- Einsatzbereitschaft auch nach langen Stehzeiten
- Keine Schmierprobleme
- Leichte Austauschbarkeit des Motors oder einer Pumpe
- Die Präsenz mehrerer Pumpen, um Pumpenausfälle zu verhindern.
- Die Betriebssicherheit kann durch eine statische Überdruckprobe vom 1,5fachen der Zugkraft fast vollständig gewährleistet werden.

⁷⁹ Vgl. Kollbrunner C., Milosavljevic S. (1967), S.14ff

⁸⁰ Vgl. Kollbrunner C., Milosavljevic S. (1967), S.48

⁸¹ Vgl. Kollbrunner C., Milosavljevic S. (1967), S.34ff

4.3.3 Dichtung

Dichtungen werden benötigt um den Verlust von Wasser zu verhindern. Die fehlende Funktionstüchtigkeit von Dichtungen, ist eine Hauptquelle für Schützenschwingungen und Schützengeräusch. Diese Undichtheiten führen bei großen Druckhöhen zu Langzeitschäden am unterwasserseitigen Beton sowie zu unterwasserseitiger Korrosion. Deshalb muss auf die konforme Ausbildung der Dichtung großen Wert gelegt werden.⁸² Abhängig von der Materialart kann zwischen vier verschiedenen Arten von Dichtungen unterschieden werden:⁸³

- Gummidichtungen sind die am häufigsten angewendete Dichtungsart. Durch die hohe Zähigkeit und die große Elastizität kann die Dichtung leicht verarbeitet werden.
- Kunststoffdichtungen weisen die gleichen Eigenschaften wie Gummidichtungen auf.
- Metalldichtungen werden für Gleitdichtungen, wie sie bei Gleitschützen anzutreffen sind, angewendet.
- Holzdichtungen kommen bei kleinen Verschlüssen oder auch bei Stemmtoren zur Anwendung.

Heute wird vor allem Neopren zur Abdichtung verwendet, da es die notwendigen Eigenschaften für die Abdichtung aufweist, wie Bruchfestigkeit, Zerreißfestigkeit, niedrige Wasseraufnahme, geringe bleibende Verformungen, entsprechender Widerstand gegen UV-Licht und Antioxydantien. Normalerweise werden Dichtungen mit einer Shore-Härte von 65 mit einer Toleranz von ± 5 definiert. Da bei Grundablässen meist große Druckhöhen vorliegen, werden in der Regel Dichtungen größerer Härte verwendet. Bei kleiner werdender Härte steigt der Reibungskoeffizient zwischen der Dichtung und der Stahlgleitfläche.⁸⁴

Folgende Anforderungen werden von der Praxis an eine Dichtung gestellt:⁸⁵

- Simple konstruktive Durchbildung
- Zugänglichkeit für Kontrollzwecke
- Niedriger Reibungswiderstand
- Maximale Bewegungsmöglichkeit des Systems
- Nachstellbarkeit sowie eine konstruktive Ausbildung mit möglichst wenig Ecken
- Geringe Erhaltungskosten
- Leichter Tausch der Dichtungen

⁸² Vgl. Levin J. (1995), S.109

⁸³ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.403

⁸⁴ Vgl. Levin J. (1995), S.109

⁸⁵ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.404

Außerdem sollen folgende strömungstechnischen Anforderungen besonders hervorgehoben werden:⁸⁶

- Undichtigkeiten führen leicht zu Schwingungen. Diese Undichtigkeiten können durch einen ständig wirkenden Anpressdruck vermieden werden.
- Umströmt das Wasser Dichtungen während des Öffnens oder Schließens von Schützen, so ist auf die einwandfreie Führung zu achten.
- Dichtungen sollen so ausgebildet sein, dass sie nicht aus Teilen bestehen, die bei wechselndem Strömungsdruck in Schwingungen geraten.
- Sohlensatzdichtungen sind scharfkantig auszubilden, so dass sich der Wasserstrahl vollständig ablösen kann.

Da eine Gummidichtung viele der angeführten Anforderungen erfüllt, wird sie sehr häufig für die Abdichtung verwendet. Bei der Wahl der Härte der Gummimischung hat der, im Betrieb herrschende Wasserdruck, das gewählte Profil und die unterschiedlichen Wege, auf denen die Dichtung ihre Funktion gewährleisten muss, den wesentlichen Einfluss.⁸⁷

Die Bereiche im Stollen, bei denen die Dichtung anliegt, sollte geheizt ausgeführt werden, damit ein Betrieb des Verschlusses problemlos möglich ist, ohne die Dichtungen zu verletzen. Dazu können Heizdrähte hinter den Kontaktplatten im Beton verlegt werden, die mit elektrischer Energie betrieben werden.

4.3.3.1 Profiltypen

Am Beginn des Entwicklungsprozesses stand das Notenprofil, dessen Ausbildung als besonders betriebssicher galt. Das Anwendungsgebiet lag hauptsächlich in der Abdichtung der Nischen. Aus diesem Profil haben sich im Laufe der Zeit verschiedenste Formen der Dichtungen entwickelt, die entsprechend dem jeweiligen Anforderungsprofil umgebaut und erweitert wurden. Diese Entwicklung ist in der Abbildung 27 dargestellt.⁸⁸

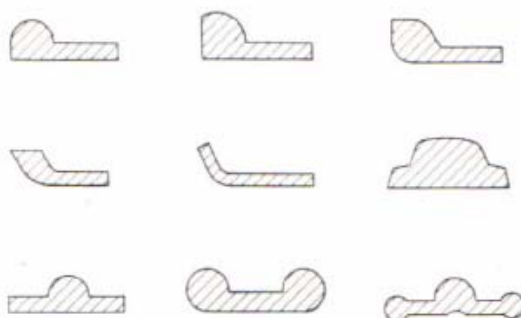


Abbildung 27: verschiedene Dichtungsprofile, [Wickert G., Schmausser G. (1971), S.405]

⁸⁶ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.404

⁸⁷ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.404

⁸⁸ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.405

4.3.3.2 Sohlendichtung

Die Sohlendichtung ist an der Unterseite eines Schützes situiert und wird für eine einwandfreie Strömungsablösung als Scheide ausgeführt. Der Gummi ist dabei als Flachgummi ausgebildet und wird, wie Abbildung 28 zeigt, entweder vor oder in der Stauwandkonstruktion situiert. Die Verbindung der Dichtung wird mit einer Klemmleiste, die mit Schrauben mit der Stauwand verbunden ist, hergestellt. Beim Schließvorgang wird der Gummi durch das Eigengewicht oder den Antriebsdruck solange zusammengepresst, bis das unterwasserseitige Blech satt aufsitzt und so das Eigengewicht in die Sohle ableitet.⁸⁹

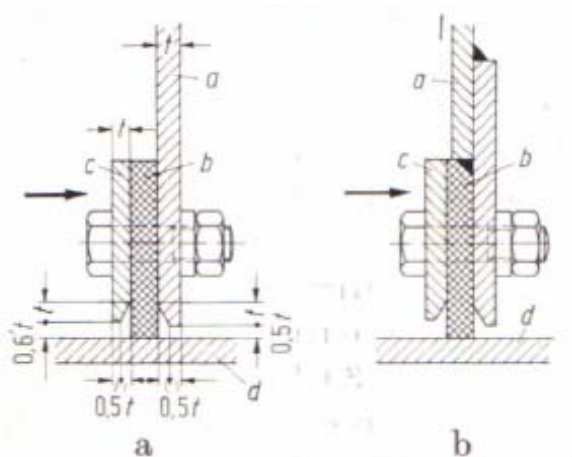


Abbildung 28: Sohlendichtung a) vor und b) in Stauwandkonstruktion, [Wickert G., Schmausser G. (1971), S.405]

In Abbildung 28a ist ersichtlich, dass der Gummi vor der Stauwand angebracht ist. Dies hat den Vorteil, dass die Stauwand durchgehend bis zur Sohle führt, bedingt allerdings den Nachteil, dass die vorstehende Klemmleiste und Flachdichtung bei der Unterströmung eine größere hydraulische Auflast erzeugen. Im Vergleich dazu ist in der Abbildung 28b zu sehen, dass der Flachgummi in der Dichtungsebene situiert ist. Dies hat zur Folge, dass die oberwasserseitige Auflastfläche reduziert wird, allerdings muss unterwasserseitig eine zusätzliche Schneide an die Stauwand angeschweißt werden.⁹⁰

4.3.3.3 Dichtungen für Gleit- und Rollschütz

Neben der Dichtung der Gleitschiene bei Gleitschützen gibt es die Möglichkeit, diese Abdichtungsmaßnahme durch eine Gummidichtung zu ersetzen bzw. zu ergänzen. Dabei muss auf die An- und Verbindung der verschiedenen Dichtungsebenen besonderes Augenmerk gelegt werden. Abbildung 29 zeigt die verschiedenen Ausbildungen einer Notendichtung im Bereich der Sohlendichtung.⁹¹

⁸⁹ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.405

⁹⁰ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.405f

⁹¹ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.406

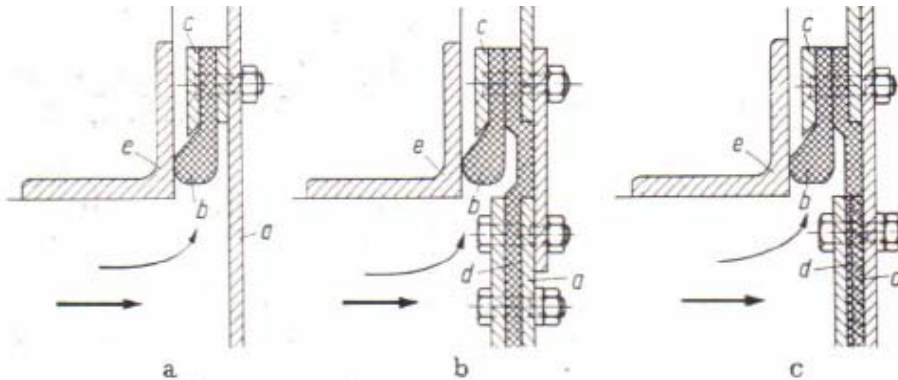


Abbildung 29: Schnitte durch eine seitliche Notenprofilabdichtung bei Gleit- bzw. Rollschützen b) Sohlendichtung vor Stauwandebene und c) Sohlendichtung in Stauwandebene, [Wickert G., Schmausser G. (1971), S.406]

Bei einem Rollenschütz kommt als Sohlendichtung eine Flachdichtung, wie im vorigen Kapitel beschrieben, zur Anwendung. Für die seitliche Abdichtung kann neben dem Notenprofil auch ein Winkelprofil verwendet werden, wobei besonders auf die seitliche Abdichtung zu achten ist. In Abbildung 30 sind verschiedene Winkelabdichtungen mit einer Verbindung an die Stauwandebene ersichtlich.⁹²

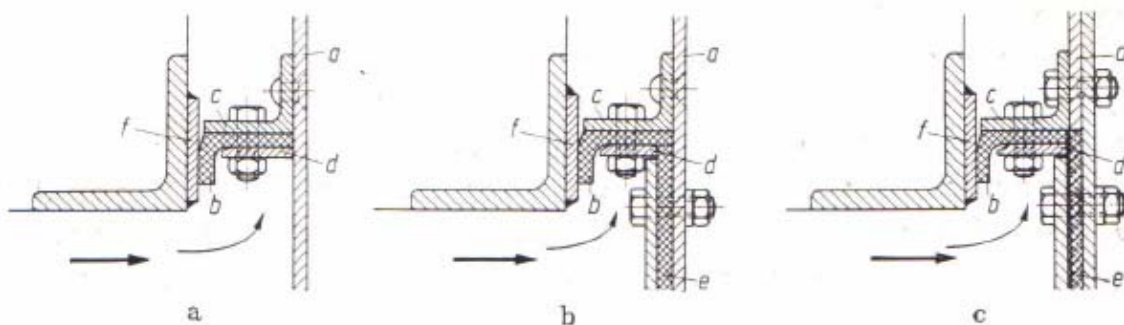


Abbildung 30: Schnitte durch seitliche Winkelprofilabdichtung bei Gleit- bzw. Rollschützen b) Sohlendichtung vor Stauwandebene und c) Sohlendichtung in Stauwandebene, [Wickert G., Schmausser G. (1971), S.407]

4.3.4 Downpullkräfte

Die hydraulischen Downpullkräfte unter einem Verschluss werden durch die Druckreduktion beim Abfließen des Wassers verursacht. Die Geometrie des Verschlusses hat einen wesentlichen Einfluss auf die Downpullkräfte. Änderungen des Abflusszustandes könne den Effekt des Herunterziehens des Schützes leicht beeinflussen. In Grundablässen mit großen Druckhöhen hat nicht nur die Geometrie einen großen Einfluss, sondern auch die Menge des Wassers, die über den Schützenkopf als auch darunter hinweg fließt. In Abbildung 31 werden die typischen Fließrichtungen sowie die unterschiedlichen Strömungsausbildungen dargestellt. Mit der Formel(4.3) kann die Downpullkraft ermittelt werden.⁹³

$$F = (\alpha_T - \alpha_B) * B * d * \rho * (V^2 / 2) \quad (4.3)$$

⁹² Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.406

⁹³ Vgl. Levin J. (1995), S.146ff

F ...Downpullkraft

α_T ...Downpullkoeffizient an der Oberseite des Schützes

α_B ...Downpullkoeffizient an der Unterseite des Schützes

B ...Breite des Schützes

d ...Dicke des Schützes

ρ ...Dichte des Wassers

V ...Geschwindigkeit im eingeschnürten Bereich nach dem Schütz

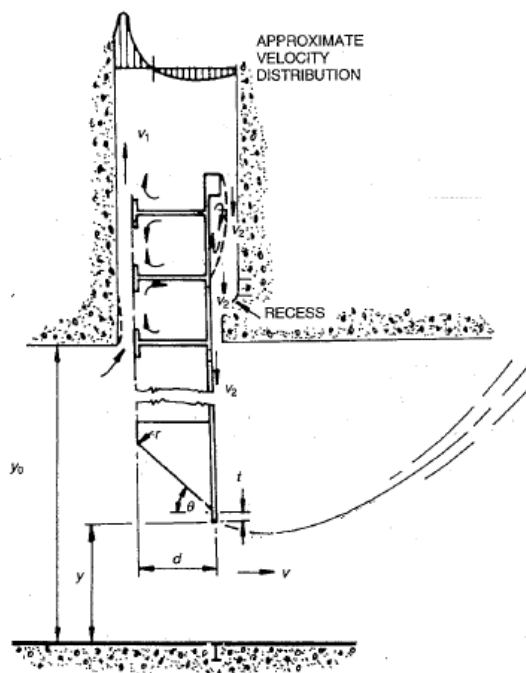


Abbildung 31: Strömungsbildung bei einem teilweise geöffnetem Schütz, [Levin J. (1995), S.147]

Die geometrischen Parameter die einen Einfluss auf den „Downpull Effekt“ ausüben sind:⁹⁴

- Das Öffnungsverhältnis, sprich das Verhältnis zwischen der Öffnungsweite des Schützes gebrochen durch die Stollenhöhe (y / y_0).
- Der Winkel θ , der an der Unterseite des Verschlusses vorliegt. Normalerweise beträgt er 45° , allerdings konnte durch Versuche gezeigt werden, dass eine Vergrößerung des Winkels auf 50° eine Reduktion der Downpullkräfte von 5% zur Folge hat.
- Das Verhältnis des Radius r zu der Dicke d des Schützes (r/d).
- Das Verhältnis der Größe der Schützenlippe zur Dicke (t/d).
- Die relative Stollenhöhe (y_0/d).

⁹⁴ Vgl. Levin J. (1995), S.148

4.3.5 Belüftung

Die Notwendigkeit der Belüftung rührt daher, dass es bei einer fehlenden oder einer zu klein bemessenen Belüftung es zu einer Pulsation des Abflusses kommt, wodurch Schützenschwingungen hervorgerufen werden. Außerdem kann Kavitation auftreten. Ein zu klein bemessener Querschnitt führt weiters aufgrund der hohen Luftgeschwindigkeit zu einer großen Lautstärkenentwicklung.⁹⁵

Verzichtet man hingegen auf eine Belüftung hinter den Schützen, führt dies zu einer Steigerung des Abflussvermögens, die mit zunehmender Druckhöhe kleiner wird. Allerdings treten dadurch dynamische Belastungen sowie Bereiche mit Unterdruck im Unterwasser auf, die wiederum einen Ausgangspunkt für Kavitation darstellen. Durch die Belüftung im Stollen ist es möglich, ausgedehnte Druckabsenkungen im Stollen zu minimieren, wobei die Druckabsenkungen örtlich an Kanten entstehen.⁹⁶

Durch Zuführen von Luft an der Sohle kann die Sohle vor Kavitation geschützt werden. Dies führt dazu, dass im Anschluss an die Schütze der Querschnitt vergrößert wird und damit Sprünge in der Sohle und der Wand entstehen. So gelingt es, einen viel größeren Oberfläche mit Luft in Berührung zu bringen. Durch diese Zuleitung von Luft kann sich das Wasser an dem Versatz ablösen und der Abfluss belüftet werden. Dies weist zwei unterschiedliche Ursachen auf:⁹⁷

- Vermischung von Wasser/Luft in der Trennfläche
- Das Auftreffen des Strahles führt durch die auftretende Turbulenz ebenfalls zu einem Einbringen von Luft in Wasser.

Das Bestreben eine seitliche Aufweitung vorzusehen, führt zur allseitigen Belüftung und zur Erhöhung der Erhöhung des Luftgehaltes im Wasser. Allerdings kommt es zu Problemen im Strömungsverlauf, sobald das Verhältnis der Schützquerschnittsbreite zu der Stollenbreite zu klein wird.⁹⁸

4.3.5.1 Vereinfachte Ermittlung des Luftbedarfs

Der Luftbedarf lässt sich mit der Formel (4.3) ermitteln, dabei muss es sich um einen Freispiegelabfluss handeln, bei dem auf alle Teilchen an der Oberfläche der gleiche Druck ausgeübt wird. Da die Trägheits- und die Schwerkraft maßgebend sind, liegt die Anwendung der Froudeschen Zahl zur Ermittlung des Luftbedarfs nahe.⁹⁹

$$Q_L = \beta * Q \tag{4.4}$$

⁹⁵ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.422

⁹⁶ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.423

⁹⁷ Vgl. Brettschneider H. (1987), S.225

⁹⁸ Vgl. Brettschneider H. (1987), S.225

⁹⁹ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.425

$$Fr = v^2 / (g * h_c) \quad (4.5)$$

v ... Geschwindigkeit des Schussstrahles bei der größten Einschnürung

h_c ... Abflusstiefe bei der größten Einschnürung

Im Zuge von Modellversuchen konnte die Verhältniszahl β als Funktion der Froude'schen Zahl ermittelt werden, wobei die Ergebnisse hieraus jeweils ein Minimum des Wertes darstellen. Dies ist in der Formel (4.6) abgebildet.

$$\beta = 0,04 * (Fr - 1)^{0,85} \quad (4.6)$$

Für die graphische Ermittlung der Verhältniszahl muss als erstes der Wert von $(Fr - 1)$ errechnet werden. Mit dem berechneten Wert wird über die x-Achse der Abbildung 32 eingesetzt und es ist möglich einen oberen und unteren Grenzwert für die Verhältniszahl β abzulesen. Somit kann der Luftbedarf für einen Öffnungszustand ermittelt werden, für andere Öffnungsweiten muss der Luftbedarf erneut berechnet werden. Die erhaltenen Werte sind als eine erste Näherung zu betrachten.¹⁰⁰

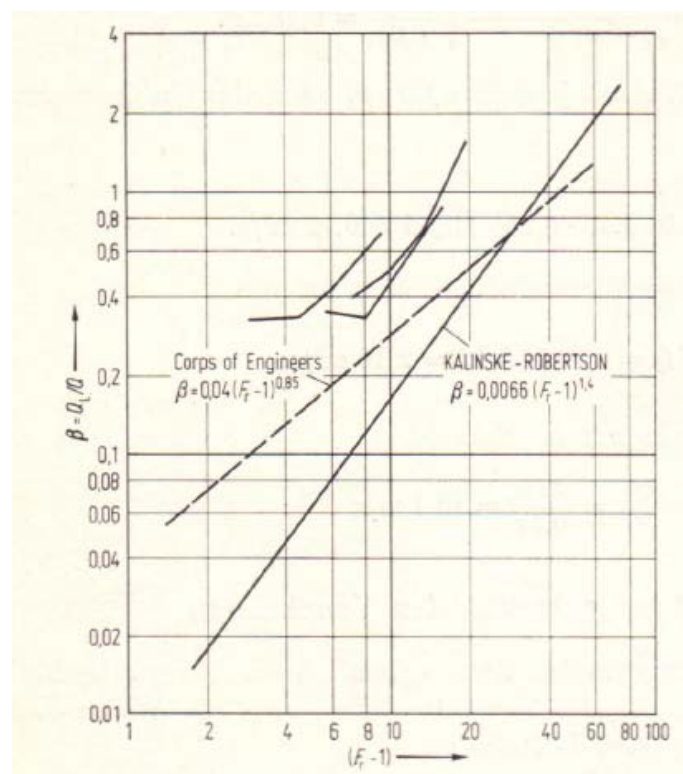


Abbildung 32: Abhängigkeit der Verhältniszahl β von der Froudeschen Zahl Fr , [Wickert G., Schmausser G. (1971), S.426]

¹⁰⁰ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.426

4.3.5.2 Verschiedene Berechnungsansätze für den erforderlichen Luftbedarf

Der Luftvolumenstrom Q_L ist abhängig davon, wie er durch die Belüftungsleitung (durch Form und Größe charakterisiert), dem Zustand des Abflusses, den Verschlusstyp sowie durch den Füllgrad des Freilaufstollens beeinflusst wird. Die Abbildung 33 stellt die Charakteristik des Belüftungssystems dar und gibt die Leitungsverluste wieder. Der Lufteintrag in das Wasser verursacht ein Abfallen des Luftdrucks unter den Atmosphärendruck, wodurch eine Luftströmung in den Zuleitungen entsteht. Der erzielbare Druckausgleich wird dabei von der Charakteristik der Belüftung bestimmt und entsprechend der durchgeführten Modellversuche auf die in der Natur vorherrschenden Verhältnisse abgeändert. Für den Fall, dass die Bemessung der Belüftungseinrichtung nicht ausreicht, kann der Luftvolumenstrom der an der Firste des Freilaufstollens zurückfließt berücksichtigt werden.¹⁰¹

Die Formel (4.4) gilt für den Fall, dass das Modell so betrieben wird, dass die Druckdifferenz zwischen dem Atmosphärendruck und dem Druck im Raum hinter dem Schütz gebrochen durch das Produkt der Dichte, der Erdbeschleunigung sowie der Schussstrahlwassertiefe in Natur und im Modell ungefähr gleich groß sind und dass das Verhältnis der Schützen- durch den Stollenquerschnitt kleiner als 0,33 ist. Dann ist der Luftbedarf β eine Funktion des Öffnungsverhältnisses und der Froude'schen Zahl.¹⁰²

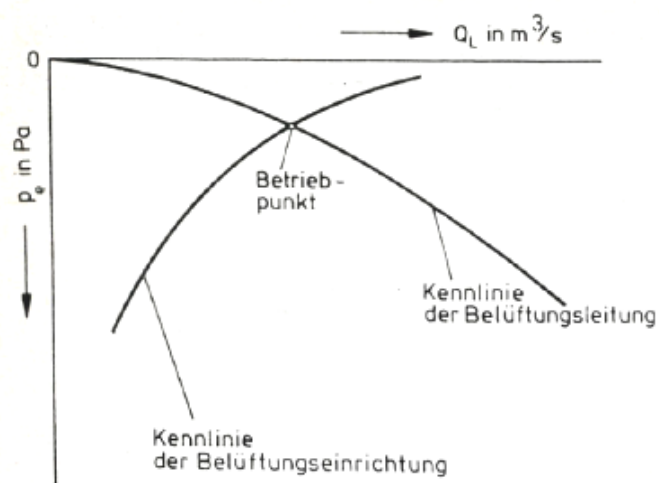


Abbildung 33: Charakteristik des Luftleitungssystems, [Brettschneider H. (1987), S.226]

Im Laufe der Zeit konnte für den Luftbedarf durch Modellversuche und Naturmessungen immer bessere Näherungen gefunden werden. Die Abbildung 34 zeigt die verschiedenen Funktionen der Luftgehalte mit den unterschiedlichen Berechnungsansätze. Diese Entwicklung soll hier kurz mit den jeweiligen Randbedingungen und Veröffentlichungen angegeben werden.¹⁰³

¹⁰¹ Vgl. Brettschneider H. (1987), S.225f

¹⁰² Vgl. Brettschneider H. (1987), S.226

¹⁰³ Vgl. Brettschneider H. (1987), S.226f

- $\beta = 0,04 * (Fr - 1)^{0,85}$, veröffentlicht von Campell und Guyton (1953); gilt nur für, von oben belüftete Abflüsse unter Schützen
- $\beta = 0,024 * (Fr - 1)^{1,4}$, veröffentlicht von Wisner (1965); gilt für, von drei Seiten belüftete Abflüsse
- $\beta = 0,09 * Fr$, veröffentlicht von Sharma (1976);
- $\beta = 0,94 * (A_L^* / A_u)^{0,9} * Fr^{0,62}$, veröffentlicht von Raaben (1984); gilt für $Fr < 40$ und $\alpha \leq 0,12$, wobei A_L^* den hydraulisch wirksamen Luftquerschnitt und A_u den Stollenquerschnitt angibt.

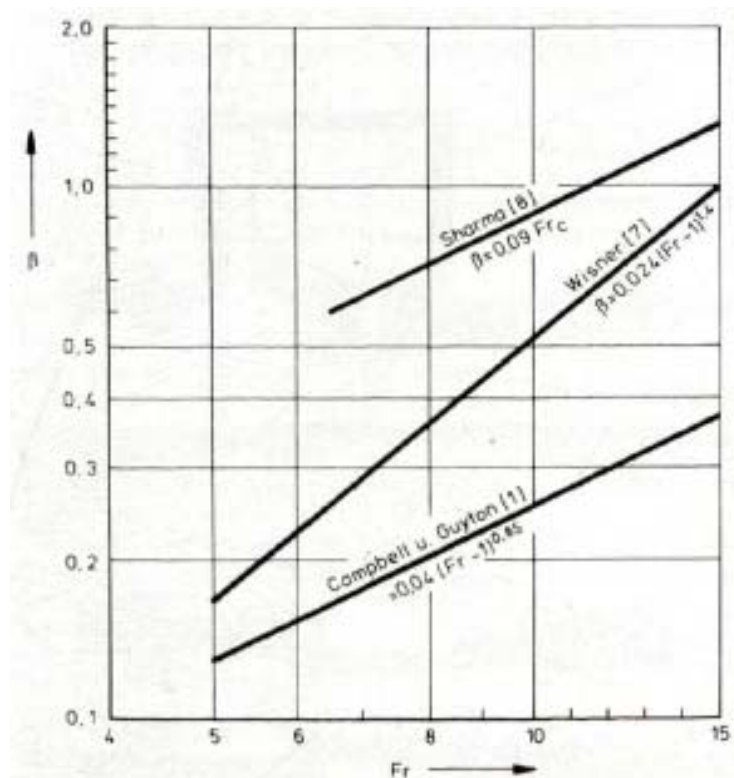


Abbildung 34: Luftgehalt als Funktion der Froudeschen Zahl, [Brettschneider H. (1987), S.226]

4.3.5.3 Berücksichtigung der Stollenform bei der Berechnung des Luftbedarfs

Bei Mitberücksichtigung des Stollenquerschnittes erhält man Formel (4.7) zur Berechnung des Belüftungsquerschnittes. Dabei ist der Belüftungsquerschnitt S_L abhängig von dem Formkoeffizient K laut Tabelle 2, dem Luftdruck p_u in [m Wassersäule], der Breite des Abflusses bei der Kontraktion B_c und der Höhe des Stauspiegels H . Die Abbildung 35 zeigt die verschiedenen möglichen Ausbildungen des Stollens im Bereich der Schützen.¹⁰⁴

¹⁰⁴ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.426f

$$S_L = \frac{K}{28} * \frac{B_c * h_c}{m_L} \sqrt{\frac{H}{p_u}} * \left(\sqrt{\frac{2H}{h_c}} - 1 \right) \quad (4.7)$$

$$\text{Wobei } m_L = \frac{1}{\sqrt{\left(\sum \xi + \lambda * \left(\frac{L}{D} \right) \right)}} \quad (4.8)$$

$\sum \xi$...Summe aller Einzelverluste

λ ...Reibungszahl

L u D ...Länge und Durchmesser des Belüftungsstollens, falls der Stollen nicht rund ausgebildet ist, wird $D = 4 * R = 4 * A / U_{\text{benetzt}}$ gesetzt.

h_c ...Abflusstiefe Venakcontracta

Das bedeutet, dass der Durchmesser gleich viermal dem hydraulischen Radius ist. Dieser ergibt sich aus der Abflussfläche dividiert durch den benetzten Umfang.¹⁰⁵

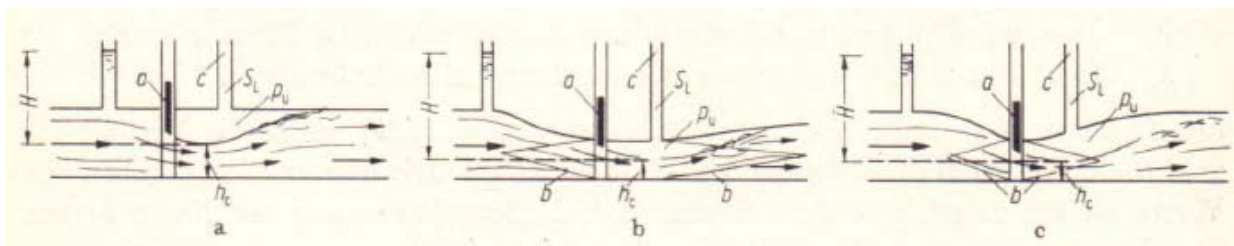


Abbildung 35: Abflussbedingungen für verschiedene Querschnittsausbildungen, [Wickert G., Schmausser G. (1971), S.426]

Tabelle 2: Formkoeffizient für die verschiedenen Abflussbedingungen, [Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.42]

Abflussbedingungen	Formkoeffizient K [-]
Kreisförmiger Stollen (Abbildung 32a)	0,025 - 0,04
Übergang Kreis-Rechteck, unterwasserseitig langsamer Übergang mit Winkel $\leq 10^\circ$ (Abbildung 32b)	0,04 - 0,06
Schneller Übergang vom Rechteck zum Kreis (Abbildung 32c)	0,08 - 0,12

Für weitere Informationen über die Belüftung sei hier auf das Kapitel 7.3 verwiesen.

¹⁰⁵ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.427

4.3.6 Schwingungen

Im Zuge von Untersuchungen wurde festgestellt, dass vor allem beim Öffnen der Schütze Strömungsverhältnisse auftreten, die Schwingungen von Verschlüssen verursachen. Die untere Kante des Schützes wird als sogenannte Ablösekante ausgebildet, dabei wird darauf geachtet, die Fläche möglichst klein zu halten. Damit soll ein gezieltes Ablösen des Strahls erzwungen werden. Durch diese zwei Anforderungen ergibt sich die Notwendigkeit der Ausbildung der Stauwand nach der Oberwasserseite und der Tragkonstruktion unterwasserseitig. Um eine optimale Ablösung gewährleisten zu können, ist es wichtig, einen entsprechenden Abstand der Tragkonstruktion von der Abflussoberfläche einzuhalten. Wird anstatt der Schützenunterkante eine Dichtung als Ablösekante verwendet, ist auf eine möglichst strömungsgünstige Ausbildung der Dichtung zu achten.¹⁰⁶

Je nach Öffnungsgrad des Schützes gibt es unterschiedliche Möglichkeiten des Auftretens von Schwingungen. So könnten an der Sohle Strahlaufreißer angebracht werden, die aber bei steigender Abflusshöhe ihre Wirksamkeit einbüßen, womit Schwingungen bei einer kleinen Öffnungsweite verhindert werden können. Falsch ausgebildete Abstürze führen zum Rückstau des Wassers und damit zu instabilen Abflussverhältnissen, die mit pulsierendem Schussstrahl auftreten. Dadurch können durch eine entsprechend vorhandene Angriffsfläche des Schützes infolge der Sogwirkungen von hydrodynamischen Kräften Schwingungen entstehen.¹⁰⁷

Bei der Planung eines Schützes sollte darauf geachtet werden, dass an dessen Unterseite eine definierte Ablösekante vorliegt. Dies verlangt, dass die Stauwand oberwasserseitig verläuft. Da in diesem Bereich die größte Beschleunigung der Wasserteilchen auftritt und sich die Situierung der Tragkonstruktion störend auf die Ausbildung der Stromlinien auswirkt. Falls dies nicht möglich ist, sollte eine möglichst strömungsgünstige Ausbildung des Schützes realisiert werden.¹⁰⁸

Schützenschwingungen können nach drei verschiedenen Kategorien klassifiziert werden:¹⁰⁹

- Fremdinduzierte Anregung, die durch Schwankungen der Strömung oder des Drucks entstehen, sind nicht Teil des vibrierenden Systems des Schützes.
- Durch Instabilität induzierte Anregung der Schützen, die durch eine Instabilität in der Strömung erzeugt wird. Exemplarisch kann die Wirbelablösung an der Schützenlippe und die alternierende Strömungsablösung an der Schützenunterseite angeführt werden.

¹⁰⁶ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.434

¹⁰⁷ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.434

¹⁰⁸ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.434f

¹⁰⁹ Vgl. Levin J. (1995), S.167

- Bewegungsinduzierte Anregung der vibrierenden Struktur, die unter Konditionen bei der die Strömung eine Kraft erzeugt, die die Beweglichkeit des Schützes verbessert.

Bei Ablösungserscheinungen eines Tiefschützes lassen sich die unterschiedlichen Grenzschichtausbildungen anhand folgender Punkte unterscheiden:¹¹⁰

- Anlegung der Grenzschicht nach einem Wirbel
- Die Grenzschicht berührt gerade noch die Schützunterkante
- Die Grenzschicht legt sich nicht wieder an.

Durch das regelmäßige Auftreten der verschiedenen Grenzschichten kann ein kontinuierlicher Wechsel zwischen anliegender und nicht anliegender Strömung auftreten, wodurch es zu zeitweiligen periodischen Druckschwankungen kommt, die das Schütz zum Schwingen anregt. Eine Rückkopplung mit anderen schwingenden Elementen, wie z.B. Druckwellen im Stollen oder Kavitation, führt zur Verstärkung der schwingungsinduzierenden Kräfte.¹¹¹

4.3.6.1 Schützenform

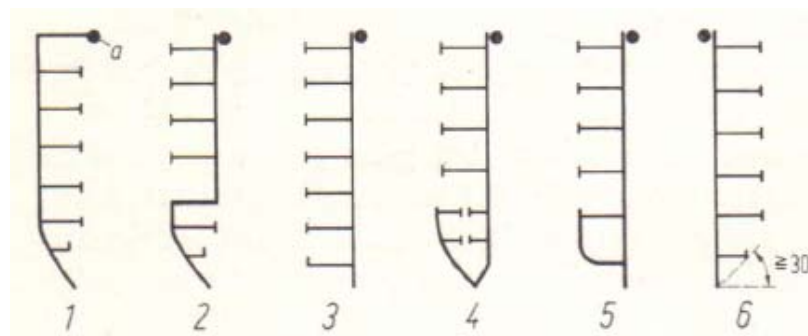


Abbildung 36: Verschiedene Schützenformen, [Wickert G., Schmausser G. (1971), S.440]

Um eine Beurteilung des Schwingungsverhaltens eines Schützes treffen zu können, ist es notwendig, die Situierung der Stauwand und der Dichtungsführung zu beachten. In der Abbildung 36 sind verschiedene Möglichkeiten der Führung der Abdichtung angeführt, wobei folgende Vor- bzw. Nachteile herrschen:¹¹²

- Führung der Stauwand und Dichtung bei der *Form 1* ist günstig ausgebildet, da durch diese Form eine instabile Strahlablösung reduziert wird und die Strömungsablösung bei der Schneide erfolgt. *Form 1* und *Form 2* sind als gleichartig zu betrachten.
- Bei *Form 3* ist die Stauebene unterwasserseitig situiert, dadurch ragt die Tragkonstruktion in das Oberwasser, wodurch ein regelmäßiges Ab- und Anlegen der Strömung entsteht, wodurch Schwingungen und Kavitation auftreten können. Das Gleiche gilt auch für *Form 5*.

¹¹⁰ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.439

¹¹¹ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.440

¹¹² Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.440f

- *Form 4* weist im Gegensatz zur *Form 3* eine strömungsgünstige Ausbildung der Unterkante auf und deswegen ein geringeres Schwingungsverhalten.
- Bei der *Form 6* ist die Situierung und Abmessungen der untersten Tragkonstruktion maßgebend für das Schwingungsverhalten. Zu Problemen führen rückgestaute Deckwalzen oder Abflüsse. Aus diesem Grund ist eine Verkleinerung des untersten Riegels erforderlich, so dass dieser den Öffnungswinkel von $\geq 30^\circ$ nicht verletzt, außerdem sind Löcher vorzusehen, damit das Wasser vom Riegel ablaufen kann.

Bei der Ausbildung der Verschlussunterkante sollte wegen des Einflusses auf die Downpullkräfte darauf geachtet werden, dass je nach dem ob eine ober- oder unterwasserseitige Stauwand vorliegt der Bereich, links bzw. rechts der Schützenlippe, wie in Abbildung 37 dargestellt, freigehalten wird. Bei der Ausbildung der Unterkante sollten die folgenden Punkten besonders beachtet werden, um die Downpullkräfte zu reduzieren und eine gute Strömungsablösung zu erreichen:¹¹³

- Die Schützenlippe sollte scharfkantig ausgeführt sein.
- Die Schützenlippe sollte so spitz wie möglich ausgebildet sein.
- Die Schützenlippe sollte sich so weit wie möglich unterhalb der Tragstruktur befinden.
- Bei oberwasserseitiger Stauwand sollte der Winkel mindestens 45° betragen.
- Das System sollte so biegesteif wie möglich sein.

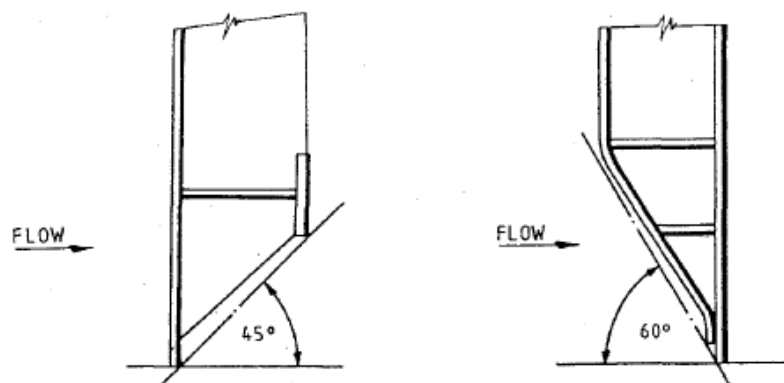


Abbildung 37: Tragstrukturordnung an der Unterkante bei ober- und unterwasserseitigen Stauwand, [Levin J. (1995), S.183]

¹¹³ Vgl. Levin J. (1995), S.181ff

4.3.6.2 Gleitschütz

Da bei Gleitschützen die Reibungskräfte bei einem geringen Öffnungsgrad vorherrschen, kann es nur zu einem geringen Auftreten von Schwingungen kommen. Erfolgt trotzdem eine Anregung, sollte die Unterwasserseite der ersten Tragkonstruktionen geschlossen werden, damit es zu keiner Anregung durch Walzen und dem Abfluss kommt.¹¹⁴

Außerdem kann eine zusätzliche Auflast beim Heben des Verschlusses auftreten, wenn das Wasser aus dem Schacht auf die Querrippen der Tragkonstruktion fällt. Dies kann durch ein Schließen der Tragkonstruktion oder Verlegung der Stauwand an die Unterwasserseite verhindert werden. Dies ist in Abbildung 38 ersichtlich, wobei die Länge e_1 größer als e_2 sein muss.¹¹⁵

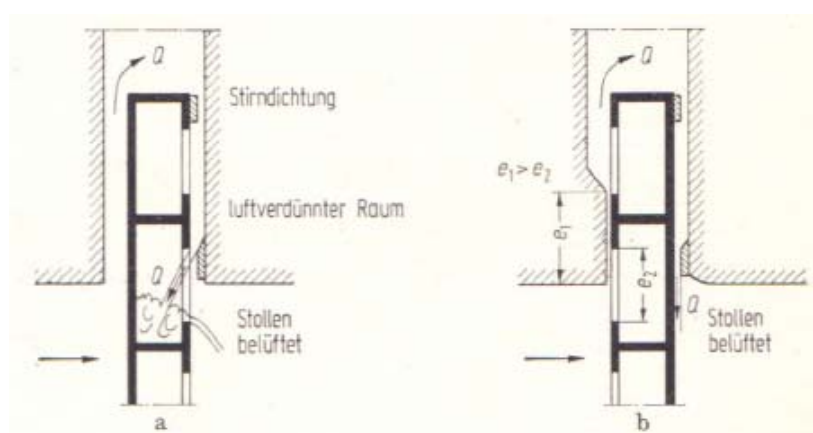


Abbildung 38: Schwingungsgefährdete Ausbildung von Gleitschützen, [Wickert G., Schmausser G. (1971), S.441]

4.3.6.3 Rollschütz

Bei einem Rollschütz ist aufgrund der geringeren Reibungskräfte in vertikaler Richtung eine Schwingungsanregung wesentlich einfacher möglich, wodurch der strömungsgünstigen Ausbildung des Schützes eine wesentlich größere Bedeutung zukommt. Bei vollkommener Öffnung des Schützes können Wirbel zu einer Schwingungsanregung führen. Dies hat zur Folge, dass die Lagerung der Schütze nur eine kleine Toleranz aufweisen darf.¹¹⁶

Da die Kombination eines Revisions- und Betriebsschützes bei Grundablässen vorherrscht und diese meist sehr knapp hintereinander situiert sind, führt ein gleichzeitiger Betrieb der Verschlüsse oftmals zu einer Schwingungserregung des unterwasserseitigen Schützes. Ist dies der Fall, kann durch Montage von Störkörpern ein Aufreißen der Strömung erzwungen und so die Anregung des Schützes behindert werden. Eine geeignete Ausbildung der Störeile-

¹¹⁴ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.441

¹¹⁵ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.441

¹¹⁶ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.441

mente ist erforderlich, damit sie im Schließvorgang ausweichen können und so das Schütz vollständig auf der Sohle auflagern kann, dazu sei auf Abbildung 39 verwiesen.

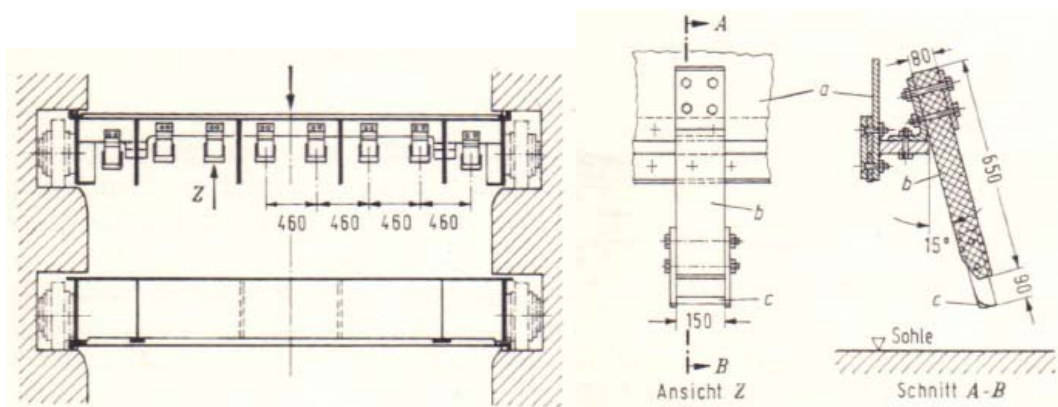


Abbildung 39: Ausbildung von Rollschützen mit Strahlstörern, [Wickert G., Schmausser G. (1971), S.442]

4.3.6.4 Vibrationen durch Fehlstellen in den Dichtungen

Vibrationen durch Fehlstellen ist der Hauptgrund für Schützenschwingungen. Im folgenden Kapitel wird auf die Sohldichtung und die seitliche Dichtung näher eingegangen.

4.3.6.4.1 Sohlenabdichtung

Sohlenabdichtungen sollten eine rechteckige Form aufweisen und mit einem mittel harten Elastomer (Shore-Härte 65) für Verschlüsse in offenen Kanälen und bei Mitteldruckverschlüssen ausgeführt werden. Für Verschlüsse mit großen Druckhöhen sollte eine Shore-Härte von 80 verwendet werden. Sohlendichtungen können mit Metall auf Metall aufgebaut sein, wobei dies die Vibrationen, die durch die Dichtung verursacht worden wären, verhindern würde. Allerdings gestaltet sich die Abdichtung bei dieser Konfiguration äußerst schwierig. Je nach anstehender Druckhöhe sollte die Sohldichtung nur mit drei bis fünf Millimeter die Sohlenplatte überragen. Dichtungen, die in Form einer Musiknote ausgebildet sind, eignen sich nicht für die Sohle. In Abbildung 40 sind verschiedene Beispiele korrekt ausgeführter Sohlendichtungen dargestellt.¹¹⁷

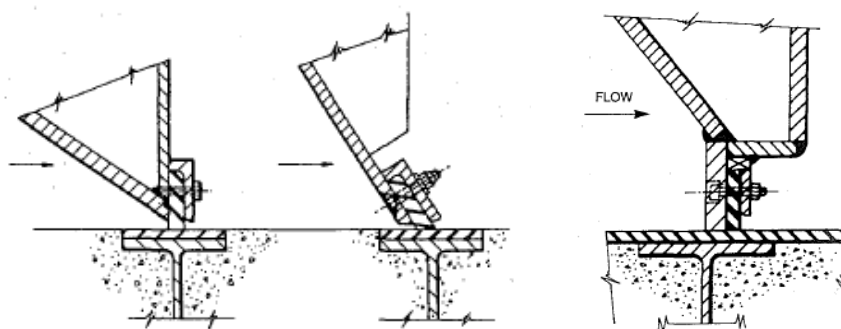


Abbildung 40: Korrekt ausgeführte Sohlendichtungen, [Levin J. (1995), S.177]

¹¹⁷ Vgl. Levin J. (1995), S.177

Geringe Vibrationen, die von Undichtheiten der Sohlendichtung herrühren, können normalerweise durch Vibration der Außenhaut und durch eine kleine Amplitude der oberwasserseitigen Welle des Schützes erkannt werden. Dabei hat Letzteres für einen Grundablass keine Bedeutung. Starke Vibrationen können zu hochfrequenten Bewegungen des Schützes führen. Diese werden von einem lauten Geräusch begleitet.¹¹⁸

4.3.6.4.2 Seitliche Dichtungen

Undichtheiten an der Seite eines Verschlusses führen nur selten zu Vibrationen, es kann jedoch zu einem Durchbiegen eines lokalen Bauteils kommen. Meist werden die Dichtungen zum Schwingen angeregt, was sich durch eine entsprechende Lautstärke bemerkbar macht. Eine serielle Anordnung der Dichtungen ist keine akzeptable Lösung, da die hintere Dichtung durch die vordere zum Schwingen angeregt werden kann. Die adäquate Dichtungsführung an den Eckpunkten des Verschlusses stellt dabei die größte Schwierigkeit dar, allerdings kann dem Problem mit der Führung der Dichtung in der gleichen Ebene begegnet werden.¹¹⁹

4.3.7 Betriebseinrichtungen

Betriebseinrichtungen für Verschlüsse können entweder elektromechanisch oder ölhydraulisch betrieben werden. Neben dem Antrieb spielen die Hubgeschwindigkeit und die Größe der Hub- bzw. Senkkräfte für den Betrieb eine entscheidende Rolle.¹²⁰

Elektromechanische Einrichtungen bestehen aus einem Elektromotor, der über ein Getriebe mit der Antriebseinheit für Ketten oder Seilzüge verbunden ist. Das Verschließen der Schütze erfolgt mit Hilfe der Schwerkraft. Das ist der Grund, warum solche Einrichtungen nicht für den Notfallbetrieb verwendbar sind. Allerdings ist das Öffnen des Verschlusses im Notfall der kritischste Augenblick. Deshalb wird das Schütz so ausgelegt, dass das Öffnen ohne Schwierigkeiten durchgeführt werden kann, währenddessen für den Schließvorgang eine größere Kraft aufzubringen ist.¹²¹

Ölhydraulische Betriebseinrichtungen werden mit einem Kolben, der normalerweise mit einem Servomotor verbunden ist ausgestattet. Das Besondere dieser Anlage ist, dass sie sowohl zum Schließen als auch Öffnen verwendet werden kann. In einigen Fällen ist die Betriebseinrichtung abhängig von der Konfiguration oder durch visuelle Gegebenheiten an Einsatzorte beschränkt. Beispielsweise kann eine elektrisch-mechanische Maschine bei Pfeilern oder an Pieren nicht akzeptiert werden.¹²²

¹¹⁸ Vgl. Levin J. (1995), S.177ff

¹¹⁹ Vgl. Levin J. (1995), S.179

¹²⁰ Vgl. Levin J. (1995), S.99

¹²¹ Vgl. Levin J. (1995), S.99

¹²² Vgl. Levin J. (1995), S.99

4.3.7.1 Elektromechanische Betriebseinrichtungen

Ein einzelner Motor, der mit einem Getriebe über Stangen mit einem mehrstufigen Getriebe verbunden ist, stellt die übliche Antriebsmethode dar. Für den manuellen Antrieb besteht die Möglichkeit, die Steuerung durch Betätigung einer Kurbel beim Motor sicherzustellen. Das Verschließen bzw. Öffnen der Verschlussorgane erfolgt dabei über zwei Seile. Für den Fall, dass ein Seil reißt, muss das Schließen mit dem zweiten erfolgen können. Statt den Seilen können auch Ketten verwendet werden. Um die Betriebssicherheit weiter zu steigern, kann ein zweiter Motor angeordnet werden.¹²³

Die Seile oder Ketten können für den Betrieb entweder ober- oder unterwasserseitig montiert werden. Der Nachteil der oberwasserseitigen Verankerung mit einem Seil ist, dass es Kontaktpunkte mit der auf die Stauenebene aufgeschweißten Verschleißplatte gibt und sich zwischen dem Seil und der Verschleißplatte Ablagerungen anlegen können. Ein weiterer Nachteil ist, dass sich das Seil während dem größten Teil seiner Lebensdauer unter Wasser befindet. Diese Variante wird trotz ihrer Nachteile oftmals angewandt, da die Situierung der Antriebseinheit einfacher zu realisieren ist. Für einen Grundablass ist diese Variante wegen der Abdichtung nicht geeignet. In Abbildung 41 sind die unterschiedlichen Möglichkeiten des Antriebs eines Segmentverschlusses dargestellt, wobei als Steuerung für Grundablässe die rechts abgebildete Variante aufgrund der Dichtungsführung zu wählen wäre.¹²⁴

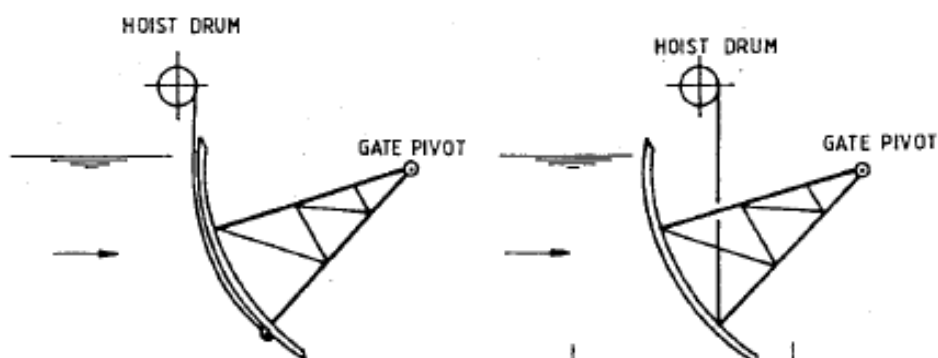


Abbildung 41: Varianten der Situierung des Antriebs eines Segmentverschlusses, [Levin J. (1995), S.103]

4.3.7.2 Ölhydraulische Betriebseinrichtungen

Ölhydraulischer Betrieb von Schützen erfolgt in der mittleren vertikalen Achse, wohingegen bei Segmentverschlüssen die Zylinder auf beiden Seiten angeordnet werden. Die beidseitige Situierung schafft eine flexiblere Anordnung der Maschineneinheit für den Betrieb, die Synchronisierung der Motoren erfolgt über einen Ringservomotor, der ein wesentlich komplexeres Kontrollsystem benötigt. Gleit- und Rollschütze, die unter unausgeglichene hydraulischen Bedingungen betrieben werden, wie bei einer teilweisen Öffnung, muss der Betrieb durch einen hydraulischen Servomotor erfolgen. Dabei können schwankende und variable

¹²³ Vgl. Levin J. (1995), S.100f

¹²⁴ Vgl. Levin J. (1995), S.102f

hydrodynamische Kräfte auf den Verschluss wirken. Um Schützenschwingungen zu verhindern, stehen der Kolben und damit die Hydraulikflüssigkeit unter Druck und zwar während des Öffnungs- und Schließvorganges. Bei großen Druckhöhen und damit großen Fließgeschwindigkeiten muss die Schließgeschwindigkeit kontrolliert werden, um die auftretenden Sogkräfte vor Beschleunigung des Schließvorganges zu hindern.¹²⁵

Schützen müssen während des Betriebes einen bestimmten Öffnungsgrad über längere Zeit halten und eine weitere Öffnung ist oft kritisch. Die Servomotoren werden benötigt, um den Druck über eine Zeitspanne zu halten, auch wenn die Pumpen nicht in Betrieb sind. Dies wird mit einem Hydraulikspeicher sichergestellt. Wenn der Druck in dem Hydraulikspeicher unter einen gewissen Wert abfällt, startet die Pumpe automatisch und stellt den Druck wieder her.¹²⁶

Für den Fall, dass ein Ölleck im Hydraulikzylinder bei der Zylinderdichtung auftritt, wird durch die Fortdauer des Austritts die Dichtung zusehends poröser. Durch Verlust des Drucks kommt es bei Zwischenstellungen zu einem automatischen Schließen der Schützen. Um über die genaue Schützenstellung bescheid zu wissen, werden Positionsindikatoren eingebaut. Ein verlässliches Hydrauliksystem sollte aus folgenden Teilen bestehen:¹²⁷

- Einlaufdüse in den Tank
- Zwei manuell operierende Pumpen
- Ein Überdruckventil, das mit einem Auslassventil kombiniert werden kann
- Pumpenwerke aus Edelstahl, die mit Anschlussklemmen mit geringen Toleranzen ausgebildet sind, vor allem in erdbebengefährdeten Gebieten
- Auslegung der Schlauchleitungen mit einer Reserve von 50% über dem Betriebsdruck

4.3.7.3 Hubgeschwindigkeit

Die Hubgeschwindigkeit eines Verschlusses beträgt normalerweise 300mm/min. In Verschlüssen, mit denen der Wasserlevel kontrolliert wird, erfolgt der Hub schrittweise mit anschließender Pause. Die Kontrolle erfolgt mit Timern oder mit einer Sollwertkontrolle.¹²⁸

Die Verschlussgeschwindigkeit des Servomotors ist normalerweise genau definiert. Dies kann mit hydraulisch gedämpften Zylindern erfolgen, die eine besondere Zylinderkopfausbildung aufweisen. Wenn hydraulisch variable Pumpen eingesetzt werden, kann die Pumpleistung zu dem Zeitpunkt reduziert werden, zu dem der Kolben vollständig ausgefahren ist. Bei einem parallelen Pumpenbetrieb kann eine Pumpe abgeschaltet werden und zwar bei Erreichung des Begrenzungsschalters. Die gleichmäßige Lieferung des Drucks für die Geschwin-

¹²⁵ Vgl. Levin J. (1995), S.103ff

¹²⁶ Vgl. Levin J. (1995), S.106

¹²⁷ Vgl. Levin J. (1995), S.106

¹²⁸ Vgl. Levin J. (1995), S.106f

digkeit beim Öffnen und Schließen ist von der Durchflussfläche des Hubes abhängig. Dieser Verlust wird durch das Zuschalten einer zweiten Pumpe reduziert, daher ist eine Anlage mit zwei Pumpen verlässlicher.¹²⁹

4.3.7.4 Hub- und Senkkräfte

Zum Öffnen und Schließen der Verschlüsse sind bei Schützen das Gewicht und die Reibungskräfte in senkrechter Richtung aufzunehmen. Bei der Berechnung der Antriebskraft ist es wichtig, sich darüber im Klaren zu sein, in welche Richtung die Wirkungskräfte gerichtet sind. In die Berechnung der Hubkraft fließen folgende Werte (Formel (4.8)) ein:¹³⁰

$$Z_{\max} = \left(E + E' - \Delta E + H + \frac{W_r}{W_{el}} + R_{DH} + R_{DS} \pm K_H - G - S \right) * \chi \quad (4.9)$$

E ...Eigengewicht der Konstruktion, mit einem Sicherheitszuschlag von 5%.

E' ...Gewicht der mitgenommenen Substanzen (Wasser, Sediment,...)

ΔE ...Scheinbare Gewichtsreduktion durch Auftrieb, wobei festgestellt werden muss, welche Teile des Schützes im Wasser eingetaucht sind.

H ...Eigengewicht des Hubmittels

W_r, W_{gl} ...Rollender bzw. gleitender Widerstand der Schütze

R_{DH}, R_{DS} ...Reibungskräfte der horizontalen bzw. der seitlichen Dichtung, abhängig von der Art der Dichtung, der Länge und dem Wasserdruck

K_H ...Statische und dynamische Kräfte aus den Wasserauflasten und der Strömung

G ...Eigengewicht von Gegengewichten

S ...Auftrieb durch Schwimmer

χ ...Sicherheitszuschlag für den Beginn des Hubvorganges, normalerweise reicht ein Zuschlag von 15 bis 20% aus. Wird ein Gesamtsicherheitsfaktor gewählt, können für die zuvor beschriebenen Werte die Zuschläge vernachlässigt werden.

Im Zuge eines Modellversuches an der TU Wien konnte gezeigt werden, wie durch konstruktive Maßnahmen die maximal auftretenden hydraulischen Kräfte reduziert werden können. In weiterer Folge kann die, für die Betätigung des Schützes erforderliche Hubkraft reduziert

¹²⁹ Vgl. Levin J. (1995), S.107

¹³⁰ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.451f

werden. Die Erfahrungen des Modellversuches der konstruktiven Gestaltung sind anhand der folgenden Punkte ersichtlich:¹³¹

- Beim freien Abfluss treten im Gegensatz zum rückgestauten Abfluss größere hydrodynamische Kräfte auf, wobei ein freier Abfluss bei ausreichender Belüftung und einem entsprechend dimensioniertem Querschnitt möglich ist.
- Die Vertikalkraft des Wassers im Nassschacht wird durch die Spaltweiten im Nassschacht ober- und unterwasserseitig beeinflusst. Deshalb sollte der unterwasserseitige Spalt so groß wie möglich ausgeführt werden, wobei dies allerdings durch die Ausbildung der Dichtung begrenzt ist. Da der unterwasserseitige Abstand den Durchfluss durch den Spalt bestimmt, sollte dieser kleiner als der oberwasserseitige ausgebildet sein.
- Oberwasserseitig sollte das Schütz nicht verkleidet werden.
- Durch eine tiefere Ausbildung der seitlichen Führungsnischen können die auftretenden hydrodynamischen Kräfte verringert werden.

4.3.8 Korrosionsschutz

Korrosionsschutz ist ein wesentlicher Faktor für die Langlebigkeit von Konstruktionen aus Metall. Die Korrosionserscheinungen treten durch Kontakt mit Luft, Wasser und Erde auf. Deshalb ist bei der Konstruktion von Schützen geschlossene Querschnitte einem aufgelösten Körper vorzuziehen, da bei geschlossenen Körpern die Angriffsfläche für Korrosion verringert werden kann. Es sollte weiters darauf geachtet werden, dass bei der Flächengestaltung möglichst großen Flächen ohne Sprünge oder sonstige Ecken und Kanten vorgesehen werden, da sich in jeder Nische Wasser sammeln kann und somit Grundlage für Korrosion schafft. Weiters sollten Verbindungen ausschließlich geschweißt ausgeführt werden, denn auch Schrauben oder Nieten können Ausgangspunkte für eine Korrosionsbildung darstellen.¹³²

Für die Dauerhaftigkeit der Schütze ist eine entsprechende Überprüfung der Schweißnähte unerlässlich. Weiters muss die Beschichtungsdicke überprüft werden, um die geforderten Normen einzuhalten. Es ist außerdem darauf zu achten, dass es nicht zu mechanischen Beanspruchungen wie beispielsweise im Rahmen des Geschiebeanpralls kommt, die die Schutzschicht verletzen könnte. Für eine entsprechende Wahl des Konservierungsmittels sollte analysiert werden, welche Teile beansprucht werden. Des Weiteren sollte man sich über die verschiedenen betrieblichen Beanspruchungen im Klaren sein, wie:¹³³

- Spritzwasserbereich
- Wasserdruck

¹³¹ Vgl. Seyerl J. (2001), S.94

¹³² Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.469

¹³³ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.469f

- Wassergeschwindigkeit
- Mitführung von Geschiebe
- Betriebstemperatur

Für die Verarbeitung der Konservierungsmittel ist eine entsprechend vorbereitete Oberfläche für den Haftungsverbund notwendig, wobei je nach Güte des Entrostungsgrades verschiedene Verfahren zur Entrostung angewendet werden, wie eine Entrostung von Hand, maschinell, mittels Flammstrahlen oder durch Sandstrahlen. Je schlechter der Entrostungsgrad ist, umso bessere Eigenschaften muss der Grundanstrichsstoff aufweisen. Weiters müssen die zu behandelnden Oberflächen absolut trocken sein.¹³⁴

Als Anstrichmaterialien sind nur solche Mittel geeignet, die ausreichende Beständigkeit gegen Wasser oder Feuchtigkeit aufweisen, die nicht quellen oder Wasser in jeglicher Art aufnehmen bzw. durchsickern lassen. Deswegen soll für Korrosionsschutzanstriche auf folgende Grundbausteine zurückgegriffen werden:¹³⁵

- Bituminöse Materialien
- Chlorkautschukmaterialien
- Epoxymaterialien
- Materialien aus Polyurethan, Polyester oder Vinyl
- Neoprene
- Metallstaubfarben
- Kombinationen der verschiedenen Typen

Eine weitere Möglichkeit des Korrosionsschutzes bildet das Feuerverzinken. Da hierbei die Teile in geschmolzenes Zink eingetaucht werden müssen, kann dieses Verfahren nicht für ein gesamtes Schütz angewendet werden. Das Verbindungsmittel muss ebenfalls verzinkt sein, da ansonst Korrosion auftreten wird.¹³⁶

In den folgenden Unterkapiteln wird auf die Wahl des Materials sowie den kathodischen Schutz eingegangen. Für die Wahl des Anstrichsystems wird auf die einschlägige Literatur verwiesen.

4.3.8.1 Material

Die meisten Verschlüsse werden aus kohlenstoffarmen Stahl hergestellt. Die Ausnahme stellen die Verschlüsse von Grundablässen dar, da die Federsteifigkeit oft der maßgebende Materialparameter ist. Wenn über die Korrosionsbeständigkeit entschieden wird, muss auf den

¹³⁴ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.472

¹³⁵ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.473

¹³⁶ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.475

Nickel- und Chromgehalt geachtet werden, da die beiden Stahlbestandteile entscheidend für die Korrosionsbeständigkeit sind. Rostbeständige Stähle werden oft auf normale Stähle aufgeschweißt. Wichtig dabei ist, dass die Schweißnaht ebenfalls Rostbeständigkeit aufweist. Die Kombination wird aufgrund geringer Kosten angewandt, dabei kann der nichtrostende Stahl auf den durch normalen Stahl aufgebaute Stauwand aufgerollt werden. Dies funktioniert bis zu einer Plattendicke von zumindest 1,0mm.¹³⁷

Für Teile, die sich jedoch permanent oder zumindest über längere Zeiträume unter Wasser befinden, ist ein hoher Chromgehalt unerlässlich. Rostbeständige Stähle aus Martensit sind für gewisse Anwendungen sehr nützlich, allerdings sind sie für schwerbelastete Teile, die gleichzeitig einer rotierenden Bewegung ausgesetzt werden, nicht geeignet.¹³⁸

4.3.8.2 Kathodischer Schutz

Der kathodische Schutz ist eine Technik, bei der die Korrosionsrate einer metallischen Struktur durch Schaffung eines stationären Zustandes oder durch Veränderung des elektrischen Korrosionspotentials des Metalls zu einem elektronegativen Zustand reduziert werden soll.¹³⁹

Wenn zwei artungleiche Metalle elektrisch verbunden sind und sich in einer Elektrolytlösung befinden, wie z.B. Wasser, besteht eine elektrische Verbindung in der Flüssigkeit und dem Metall, so dass Anionen über das Wasser zur Anode fließen und sich Elektronen von der Anode zur Kathode über die metallische Verbindung bewegen. Die Korrosionsschutzrate hängt von der Menge des elektrischen Flusses, der elektromagnetischen Energie und dem Widerstand des Kreislaufes ab.¹⁴⁰

Die anzulegende Stromstärke ist abhängig vom Zustand des Wassers sowie seinen Bestandteilen. Diese Unterschiede werden in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Stromstärken für den kathodischen Korrosionsschutz, [Levin J. (1995), S.222]

Zustand des Wassers und Bestandteile	Stromstärke [mA/m ²]
Fließendes Süßwasser	55-65
Tosbecken, bei turbulentem Abfluss	55-165
Salzwasser	55-300
Verschmutztes Wasser an Flussmündungen in das Meer	600-2000

¹³⁷ Vgl. Levin J. (1995), S.119f

¹³⁸ Vgl. Levin J. (1995), S.220

¹³⁹ Vgl. Levin J. (1995), S.221

¹⁴⁰ Vgl. Levin J. (1995), S.222

Die größte Verbreitung als Anode weist Magnesium auf. Die Zugabe von Aluminium reduziert die Auflösungserscheinungen, bei Bestandteilen wie Kupfer, Nickel und Eisen ist mit einer signifikant höheren Korrosionsrate zu rechnen, und somit die Wirksamkeit von Magnesium als Anode.¹⁴¹

Die Anwendung des kathodischen Schutzes ist theoretisch relativ einfach, praktisch allerdings weit komplizierter. Wenn der Korrosionsschutz nur Teile einer Struktur abdeckt, kann es zu einer vermehrten Korrosion der nicht geschützten Teile kommen.¹⁴²

Das Unterkapitel 4.3 umfasst Ausführungen zu den möglich Verschlüssen von Grundablässen. Nachdem die unterschiedlichen Arten von Schützen (Gleitschütze, Rollschütze, Stoney-Rollerschütze) diskutiert werden, widmet sich das Kapitel den Segmentverschlüssen und Dichtungen sowie den Downpullkräften. Es folgen Erläuterungen zum Thema der Belüftung sowie der möglicherweise entstehenden Schwingungen. Das Kapitel wird inhaltlich mit der Befassung mit Betriebseinrichtungen und dem Korrosionsschutz abgeschlossen. Mit der nachfolgenden Analyse der Nischenbildung schließen die Erläuterungen zur Apparatekammer.

4.4 Nischenausbildung

Gelagert werden Schütze in Nischen, die aus hydraulischen und statischen Gründen möglichst klein ausgebildet werden sollten. Bei der Ausbildung der Nische ist sehr sorgfältig vorzugehen, da die Gefahr der Verschmutzung sowie der Kavitation aufgrund Strömungsablösung und den bei Grundablässen hohe Geschwindigkeit und daraus bedingten Unterdruck, gegeben ist. Für eine strömungsgünstige Ausbildung der Nische ist es von Vorteil, die unterwasserseitige Kante aus der Flucht der oberen Kante nach hinten zu versetzen und geneigt mit der Flucht wieder zu verschneiden. Da bei großen Stauhöhen große Kräfte auf die Schütze wirken und diese an das Bauwerk weitergegeben werden müssen, kann der Rücksprung nicht beliebig groß ausgeführt werden. Bei Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass sich kleine Nischenbreiten günstig auf die Strömungscharakteristik auswirken. In Abbildung 42 sind für verschiedene Nischenausbildungen der dabei auftretende Druck an unterschiedlichen Stellen der Nische dargestellt.¹⁴³

¹⁴¹ Vgl. Levin J. (1995), S.222

¹⁴² Vgl. Levin J. (1995), S.222

¹⁴³ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.389ff

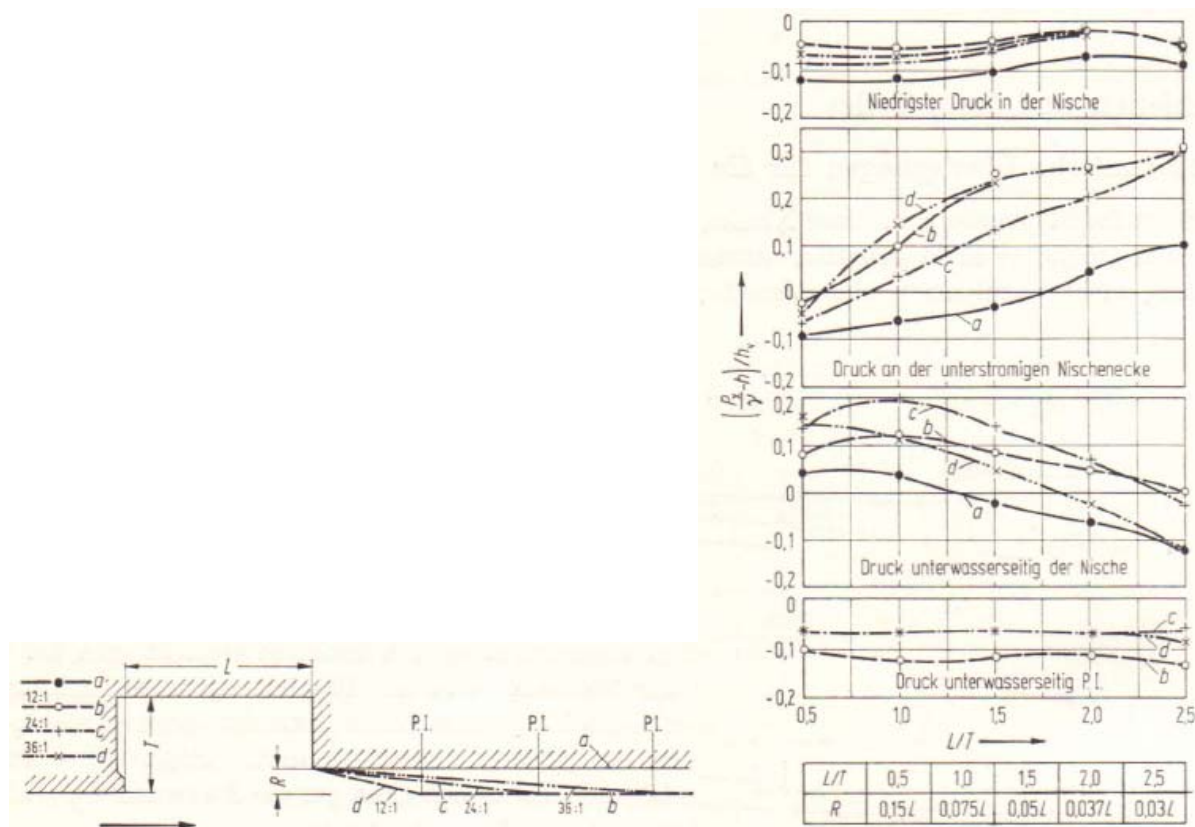


Abbildung 42: Druckverhältnisse in und unterwasserseitig der Nische in Abhängigkeit von der Nischenabmessung und der Neigung der unterwasserseitigen Anschlusswand, [Wickert G., Schmausser G. (1971), S.390]

Die Tiefe der Nische hängt von der verwendeten Art des Schützes ab. So ist es möglich, die Tiefe bei einem Gleitschütz geringer zu wählen, da es über die gesamte Höhe vollflächig aufliegt. Die Breite der Nische ist dabei abhängig von der Dicke des Schützes, die wiederum von der auftretenden Belastung abhängt. Die Führung lässt sich ebenfalls leichter bewerkstelligen, da die Gleitfläche ein größeres Spiel aufweist, über einen Winkel lässt sich das Schütz sehr einfach an der Nische führen (siehe Abbildung 43).¹⁴⁴

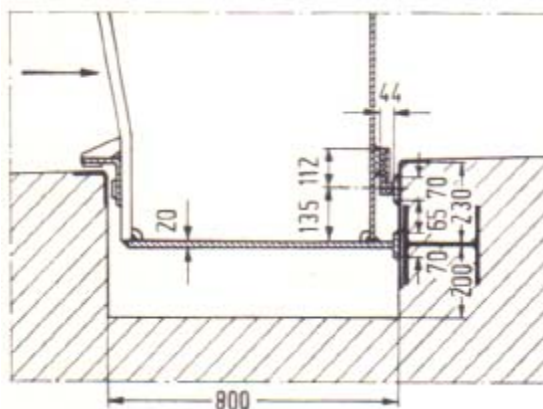


Abbildung 43: Nische für ein Gleitschütz, [Wickert G., Schmausser G. (1971), S.392]

¹⁴⁴ Vgl. Wickert G., Schmausser G. (1971), S.392f

Das Kapitel Apparatekammer stellt ein Kernkapitel der vorliegenden Diplomarbeit dar. Es wird versucht, neben der unterschiedlichen Ausbildung des Schützenbereiches und der Zu- und Ableitung zur Apparatekammer vor allem auf die unterschiedlichen Verschlüsse einzugehen. Dabei werden die Gleit- und Rollschütze, aber auch die Segmentverschlüsse näher behandelt. In weiterer Folge werden die verschiedenen Verschlüsse hinsichtlich der Abdichtung und des Betriebes analysiert. Für die Dichtungen liegen verschiedene Profile vor, die je nach Anforderung anzuwenden sind und die eine Ablösekannte der Strömung genau definieren, um eine Schwingungsanregung der Verschlüsse zu vermeiden.

Im weiteren Verlauf wird hier nun auf die Zu- und Ableitung des Wassers eingegangen, dabei handelt es sich zum einen um den Druckstollen und zum anderen um den Freispiegelstollen.

5. Druck- und Freispiegelstollen

Im Kapitel Druck- und Freispiegelstollen wird die Leitung vor und nach dem Dichtungsschirm der Talsperre behandelt. Die Aufteilung des Kapitels erfolgt in einen Teil für den Druckstollen und in einen für den Freispiegelstollen, da an beide unterschiedliche Anforderungen gestellt werden.

5.1 Druckstollen

Der Druckstollen besteht oft aus einem Betonkörper mit einer Panzerung aus Stahl. Dabei hat der Zustand des, beim Ausbruch des Stollen anzutreffenden Gebirges einen wesentlichen Einfluss auf die Dicke der Auskleidung. Im folgenden Unterkapitel wird zunächst die Linienführung besprochen, um danach die Arten von Druckstollen zu diskutieren und den Druckstoß und die Bemessung näher zu betrachten.

5.1.1 Linienführung

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die horizontale und die vertikale (das heißt die Neigung des Druckstollens) Linienführung hinsichtlich der wirtschaftlichsten und technisch sinnvollsten Achsenwahl behandelt.

5.1.1.1 Horizontale Linienführung

Ziel der Projektierung des Grundablasses hinsichtlich der Linienführung ist es, die wirtschaftlichste Route zu wählen. Dabei haben auf die Festlegung der horizontalen Linienführung folgende Punkte Einfluss:¹⁴⁵

- Auszubrechender Querschnitt,
- Geologie,
- Horizontale und vertikale Gebirgsüberdeckung
- Hydrogeologie
- Zwangspunkte.

Bei hohen Stauhöhen kommt es im Bereich des Druckstollens zu großen Innendrücker, deswegen sind große Überdeckungshöhen von Vorteil, da der Gebirgsdruck eine Entlastung des Stollens bewirkt. Bei sehr großen Gebirgsüberdeckungen führt der Gebirgsdruck zu Problemen bei der Herstellung des Stollenquerschnittes, sei es durch Gebirgsschlag oder durch Auspressen der Scherfugen. Um den Ausbruchsquerschnitt mit so wenig Sicherheitsmaßnahmen wie möglich zu sichern, empfiehlt es sich auf die geologischen Verhältnisse entspre-

¹⁴⁵ Vgl. Schleiss A. (1985), S.20

chend einzugehen und die Linienführung derart zu wählen, dass Zonen mit schlechten geologischen Verhältnissen möglichst normal durchstoßen werden.¹⁴⁶

Außerdem ist neben der Stabilität während des Ausbrechens auch die Sicherstellung der Dichtigkeit im Betriebszustand wichtig. Deswegen ist neben der Überdeckung vertikal und horizontal der anstehende Bergwasserspiegel zu beachten.¹⁴⁷

Zwangspunkte können die Linienführung durch den Bau selbst, aber auch durch den Betrieb der Baustelle beeinflussen. Diese sind neben der Lage der Deponie, die Lage der Fassung, etwaige Zuleitungen in den Grundablassstollen, die Lage der Apparatenumgebung sowie die unterwasserseitige Rückleitung des Wassers.¹⁴⁸ Aufgrund der Kavitationsgefahr und der Ausbildung der Strömung im Freispiegelstollen sollte eine möglichst gerade Linienführung gewählt werden.

5.1.1.2 Vertikale Linienführung

Für die Planung der vertikalen Linienführung können die gleichen Punkte wie im vorigen Kapitel herangezogen werden. Allerdings bedingt die Führung der Entwässerung im Bauzustand ein natürliches Gefälle zum Unterwasser hin. So kann es beim Erststau zu keiner Bildung von Luftblasen an der Stauwand kommen.¹⁴⁹

Nachdem die möglichen Arten der Linienführung erläutert wurden, soll im Folgenden die Arten von Druckstollen diskutiert werden.

5.1.2 Arten von Druckstollen

Der Ausbruch eines Druckstollens erfolgt in den meisten Fällen mit einer Tunnelbohrmaschine, in diesem Fall ist die runde Form des Stollens vorgegeben. Beim konventionellen Ausbruch wird der Querschnitt aufgrund der Beanspruchungen durch die Überdeckung, aber auch durch das anstehende Wasser und durch den herrschenden Innendruck kreisförmig gewählt. Neben den gerade angeführten konstruktiven Punkten muss auf die hydraulischen Anforderungen, wie die hydraulische Rauigkeit, die Aufnahme des Innendruckes, aber auch den Austritt von Wasser in den Berg, Rücksicht genommen werden.¹⁵⁰ Der Druckstollen weist aufgrund des geringeren Einflusses auf das Gebirge meist eine kreisrunde Form auf.

Das Ziel der Stollenauskleidung ist die Sicherstellung der Betriebssicherheit über die Lebensdauer. Dies kann durch Kombination und Abstimmung der folgenden Anforderungen auf die unterschiedlichen örtlichen Gegebenheiten erfolgen.¹⁵¹

¹⁴⁶ Vgl. Schleiss A. (1985), S.20

¹⁴⁷ Vgl. Schleiss A. (1985), S.21

¹⁴⁸ Vgl. Schleiss A. (1985), S.21

¹⁴⁹ Vgl. Schleiss A. (1985), S.22

¹⁵⁰ Vgl. Vischer D., Huber A. (2002), S.211f

¹⁵¹ Vgl. Schleiss A. (1985), S.26

- Dichtigkeit,
- Beschränkung der Wasserverluste,
- Erhaltung der hydrogeologischen Verhältnisse im Gebirge,
- Einschränkung der Druckverluste,
- Dauerhaftigkeit,
- Vermeidung von Unterhaltsarbeiten,
- Erhaltung der mechanischen und chemischen Festigkeit des Gebirges,
- Gewährleistung der Stabilität des Hohlraumes im Betrieb.

Die Herstellung der Dichtigkeit ist nicht unbedingt erforderlich, oft genügt es, die Wasserverluste klein zu halten. Allerdings kann es durch das austretende Wasser zum Ausspülen von Klüften und zur Veränderung des Zustandes des Gesteins (z.B. Anhydrit) kommen. Außerdem kann durch den herrschenden Wasserdruck die Kluft geweitet und durch die Strömung ausgewaschen werden. Dies führt zur Veränderung der Gesteinsfestigkeit. Damit kann man erkennen, dass die Sicherstellung der Dichtigkeit auch Einfluss auf die mechanische und chemische Festigkeit des Gebirges hat. Die Sicherstellung der Dichtigkeit ist weiters notwendig, um den Wasserzutritt in den Stollen zu verhindern.¹⁵²

Die Einschränkung der Druckverluste ergibt die Forderung nach der Herstellung einer glatten Druckstollenauskleidung, dabei soll sie möglichst dauerhaft hergestellt werden. Die Forderung der Glattheit ergibt sich aus den hohen Geschwindigkeiten im Druckstollen, in denen jede Unebenheit eine Quelle der Kavitation sein kann. Dies würde zu einer Verringerung der Dauerhaftigkeit führen und damit den Aufwand für Erhaltungsarbeiten vergrößern.¹⁵³

Unter der Druckstollenauskleidung versteht man die letzte Schichte, die beim Aufstau des Speichers mit Wasser in Kontakt kommt. Grundsätzlich verlangt die Freihaltung des Hohlraumes zuerst die entsprechende Sicherung gegen das Nachbrechen des anstehenden Gebirges. Dies geschieht durch Felsanker, Spritzbeton und Stahlbögen. Da die Deformationen des Hohlraumes bereits abgeklungen sind, muss die Auskleidung meist keine Tragfunktion mehr erfüllen.¹⁵⁴

5.1.2.1 Unausgekleidete Druckstollen

Die unausgekleideten Druckstollen sind vor allem in Bereichen mit sehr guten Felseigenschaften und einer entsprechenden Dichtheit anzutreffen. Allerdings ist der Druckstollen

¹⁵² Vgl. Schleiss A. (1985), S.27

¹⁵³ Vgl. Schleiss A. (1985), S.27

¹⁵⁴ Vgl. Schleiss A. (1985), S.28

aufgrund der Rauheit nicht als Grundablass geeignet, da die Geschwindigkeiten zu hoch sind und es so zu Kavitationserscheinungen kommen kann.¹⁵⁵

5.1.2.2 Spritzbetonauskleidung

Die Aufbringungsdicke beträgt drei bis zehn Zentimeter. Eine Abdichtung kann aber nur bei Gebirgen mit einem hohen Verformungsmodul erzielt werden. Außerdem dient der Spritzbeton als Schutz gegen Steinfall aus der Firste. Die Rauheit kann durch Glätten des frischen Spritzbetons auf über 40 bis 45[m^{1/3}/s] nach Manning-Strickler erhöht werden. Zur Erhöhung der Tragfähigkeit kann der Spritzbeton auch bewehrt ausgeführt werden wobei er mit Stahlfasern verstärkt werden kann.¹⁵⁶ Die erzielbaren Rauigkeiten sind für einen Druckstollen eines Grundablasses zu niedrig.

5.1.2.3 Einfache und bewehrte Betonauskleidung

Durch eine Betonauskleidung kann die Tragfähigkeit sichergestellt und die Verluste durch Reibung können vermindert werden. Allerdings sind zusätzliche Maßnahmen erforderlich, um die Dichtigkeit des Stollens herzustellen. Risse sind unvermeidlich, da die Dehnfähigkeit sehr leicht überschritten wird. Die Risse können durch Stahleinlagen im Beton, aber auch durch eine bewehrte Spritzbetonauskleidung verringert werden, dabei kommt es zu einer gleichmäßigen Verteilung über den Querschnitt. Allerdings ist der zu tätigende Aufwand sehr groß bei einem gleichzeitig schlechten Abdichtungsergebnis. Betonauskleidungen werden heute mit Injektionen des dahinterliegenden Felsen kombiniert.¹⁵⁷

5.1.2.4 Passiv vorgespannte Betonauskleidung

Unter einer passiv vorgespannten Betonauskleidung versteht man eine bauliche Maßnahme, bei der ein Betonring durch Injektion eines Injektionsmittels, das den passiven Gebirgsdruck mobilisiert, vorgespannt wird. Das Injektionsgut wird dabei in einen Hohlraum zwischen dem Gebirge und dem Innenring eingebracht. Der notwendige Gegendruck des Gebirges wird durch das Verpressen aktiviert. Das Ziel ist es, den Innenring so weit vorzuspannen, dass bei der Belastung durch das Wasser kein Zug auftritt, da dann der Innenring rissfrei bleibt und damit eine höhere Dichtigkeit aufweist.¹⁵⁸

Das erste Verfahren, das sich in der praktischen Anwendung bewährt hat, war die Kernringhinterpressung. Dabei wird innerhalb einer kreisrund betonierten Vorauskleidung, Betonformsteine und -platten eingebracht, die sich mit Nocken an der Vorauskleidung abstützen. Für die Injektion werden Rohrstützen, die in dem Kernring montiert sind verwendet. Dies ist der Abbildung 44 zu entnehmen weiters ist aus den beiden Schnitten ersichtlich, wie

¹⁵⁵ Vgl. Schleiss A. (1985), S.28f

¹⁵⁶ Vgl. Schleiss A. (1985), S.29

¹⁵⁷ Vgl. Schleiss A. (1985), S.29f

¹⁵⁸ Vgl. Schleiss A. (1985), S.30f

die Rohrstützen angeordnet werden. Die Begrenzung der Verpressstrecken erfolgt durch Anordnung von Stahlblechringen.¹⁵⁹

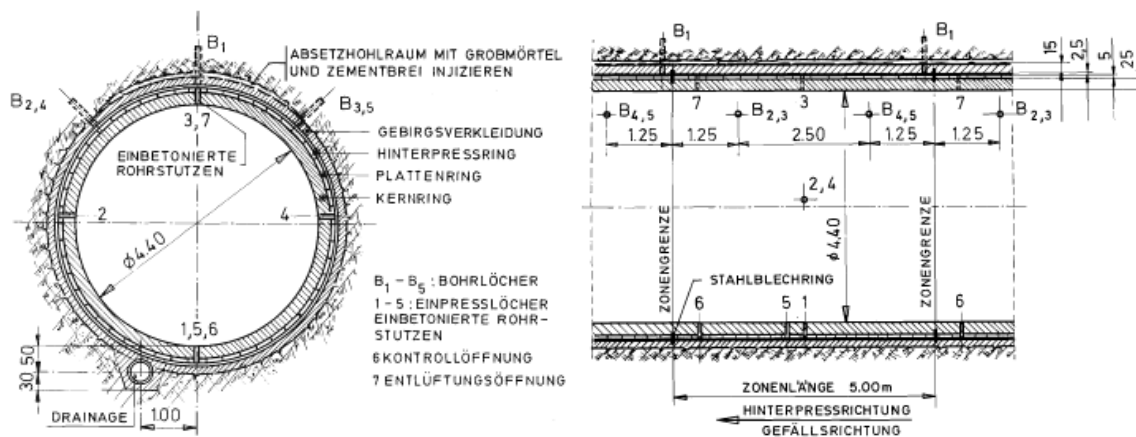


Abbildung 44: Quer- und Längsschnitt der Kernringauskleidung mit betoniertem Kernring, [Schleiss A. (1985), S.31f]

Dieses Verfahren wurde insofern weiterentwickelt und verbessert, als dass die Gebirgsverkleidung durch Spritzbeton ersetzt werden. Außerdem kann auf teure Nockensteine verzichtet werden, anstatt dessen können Folien an der Vorauskleidung oder direkt am Fels angebracht werden. Die Folie soll eine Injektion ermöglichen und bei stark klüftigem Gebirge ein rasches Abfließen des Injektionsgutes verhindern. Je nach Dichtigkeit des Gebirges kann eine mehr oder weniger durchlässige Folie verwendet werden.¹⁶⁰

Das Spaltinjektionsverfahren zur passiven Vorspannung von Druckstollen wurde von der Firma TIWAG entwickelt. Dabei wird ebenfalls ein Betonring in den ausgebrochenen Querschnitt betoniert, wobei ein Injektionsspalt durch Anstrich der Felsoberfläche mit Kalkmilch, Dispersionsfarbe oder durch eine Kunststoffolie sichergestellt wird. Für die Injektion an sich werden Schläuche, die jeden Meter perforiert sind, in einem Abstand von ein bis drei Metern verlegt (siehe Abbildung 45). Durch einen Weichgummi der darüber geschoben wird, kann ein Zurückfließen des Injektionsgutes verhindert werden. Außerdem lässt sich die Injektion, wenn der Schlauch nach Gebrauch gereinigt wird, wiederholen. Die Befestigung des Schlauches an der Gesteins- bzw. der Spritzbetonoberfläche erfolgt mit Blechlaschen und Schussbolzen. Das Verpressen kann an bis zu drei Schläuchen gleichzeitig erfolgen, wobei für jeden Schlauch eine Pumpe einzusetzen ist. Der Injektionsvorgang erfolgt kontinuierlich, ist ein Zieldruck erreicht, muss er für eine bestimmte Zeit gehalten werden. Danach kann die Pumpe am nächsten Schlauch angeschlossen werden. Zur Überprüfung der Deformation der Vorspannung wird in regelmäßigen Abständen der Ist- mit dem Sollwert verglichen.¹⁶¹

¹⁵⁹ Vgl. Schleiss A. (1985), S.31f

¹⁶⁰ Vgl. Schleiss A. (1985), S.32f

¹⁶¹ Vgl. Schleiss A. (1985), S.33ff

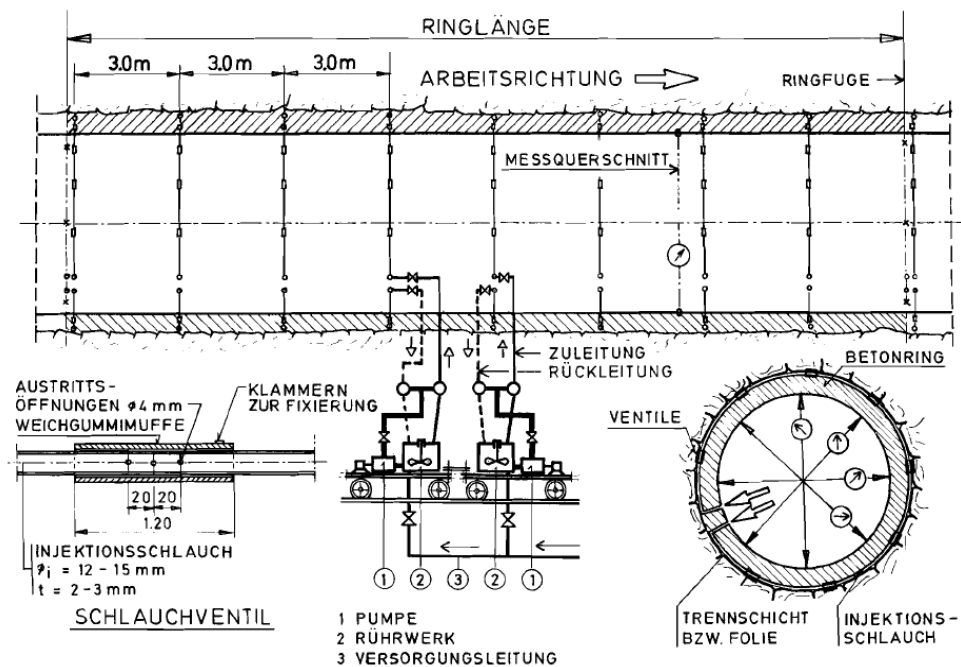


Abbildung 45: Vorspannpaltinjektion nach TIWAG Verfahren, [Schleiss A. (1985), S.34]

5.1.2.5 Aktiv vorgespannte Betonauskleidung

Die aktiv vorgespannte Betonauskleidung kommt zur Anwendung, wenn nicht mit einer mittragenden Wirkung des Gebirges zu rechnen ist. Dabei wird die Tragwirkung durch Spannen von, im Beton verlegten Spanngliedern, hergestellt. Da der Spannstahl sehr hohe Festigkeiten aufweist und hoch korrosionsgefährdet ist, müssen die Litzen mit einem entsprechenden Schutz versehen werden. Die Spannglieder können dabei entweder in einem Hüllrohr, das entweder verfüllt oder nicht verfüllt wird, oder direkt im Beton verlegt werden. Zur Vorspannung wird eine Presse in der Nische (siehe Abbildung 46) angeordnet. Die Vorspannung des Querschnittes erfolgt dann in der selben Weise wie auch im Hochbau und wird deshalb nicht weiter erörtert.¹⁶²

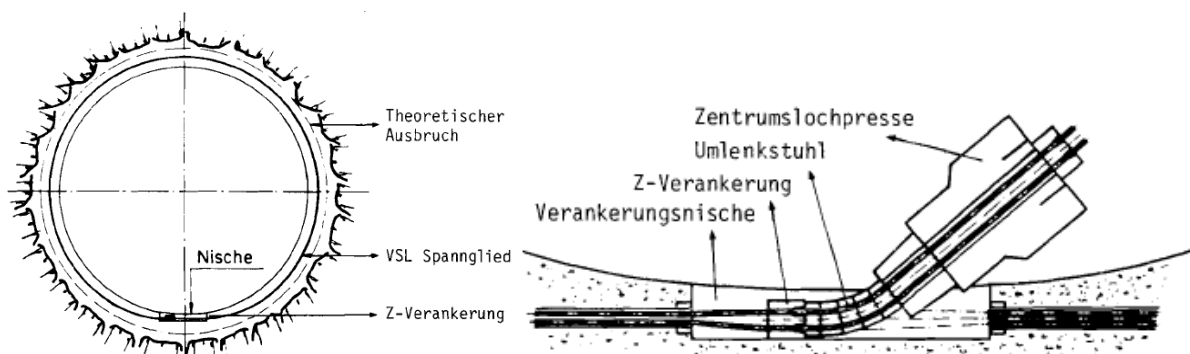


Abbildung 46: Querschnittführung im Querschnitt und Detail der Verankerungsnische mit der Presse, [Schleiss A. (1985), S.36]

¹⁶² Vgl. Schleiss A. (1985), S.35f

Da durch die Vorspannung der Querschnitt zusammengezogen wird, kommt es zur Erzeugung eines Spaltes zwischen dem Gestein und dem Betonquerschnitt. Dieser Spalt muss im Anschluss ausinjiziert werden. Die, bei der Vorspannung entstehenden Biegemomente müssen durch eine schlaffe Bewehrung aufgenommen werden.¹⁶³

Die Vorspanntechnik stellt zu der Panzerung mit Stahl eine wirtschaftliche Alternative dar, da keine Lieferfristen beachtet werden müssen, und der Transport wesentlich einfacher realisiert werden kann. Außerdem lassen sich auch komplizierte Formen leicht herstellen und Beulen kann im Gegensatz zur Stahlpanzerung nicht auftreten.¹⁶⁴

5.1.2.6 Betonauskleidung mit Foliendichtung

Als Foliendichtungen kommen vor allem Kunststofffolien zur Anwendung, die entweder an der Vorauskleidung oder bei maschinell hergestellten Stollen direkt, mittels Haftbolzen angebracht werden. Die Folie hat dabei eine reine Abdichtungsfunktion, wohingegen der Betonring die Folie schützen und die Tragwirkung übernehmen muss, man spricht hier von einer sogenannten Sandwichbauweise. Die Folie muss eine gewisse Flexibilität aufweisen, um Risse im Fels und am Betonring zu überbrücken. Außerdem ist es möglich, wie im Punkt Kapitel 5.1.3.4 beschrieben, die Konstruktion auch passiv vorzuspannen.¹⁶⁵

5.1.2.7 Dünnwandige Panzerung mit Betoninnenring

Die dünnwandige Panzerung mit Betoninnenring stellt ebenfalls eine Sandwichbauweise dar. Diese Panzerung übernimmt dabei neben der Dichtungsfunktion auch eine Tragwirkung. Dabei muss die Panzerung neben dem äußeren auch den innen Druck übernehmen. Der Betonring dient dabei als Beulsicherung für die Panzerung.¹⁶⁶

Wegen des Transportes und des Einbaues wird die dünnwandige Panzerung mit dem Innenring aus Beton versehen. Es ist möglich, durch Vorwärmen der Panzerung dem Betoninnenring eine passive Vorspannung einzuprägen. Der Betoninnenring kann auch vorgespannt werden, dies geschieht durch das Ausinjizieren des Spaltes zwischen der Panzerung und der Vorauskleidung.¹⁶⁷

5.1.2.8 Vollpanzerung aus Stahl

Die Vollpanzerung aus Stahl ist, wenn der Innendruck zu groß, oder das anstehende Gebirge nicht tragfähig ist, unumgänglich. Für den Fall, dass eine vollständige Abdichtung erforderlich ist, ist bei Druckstollen die Vollpanzerung aus Stahl eine Möglichkeit, diese Dichtigkeit herzu-

¹⁶³ Vgl. Schleiss A. (1985), S.37

¹⁶⁴ Vgl. Rölli P. (1982) in Schleiss A. (1985), S.37

¹⁶⁵ Vgl. Schleiss A. (1985), S.37f

¹⁶⁶ Vgl. Schleiss A. (1985), S.38

¹⁶⁷ Vgl. Schleiss A. (1985), S.38

stellen. Außerdem ist bei schlechten Felsqualitäten eine aktive Vorspannung der Auskleidung empfehlenswert.¹⁶⁸

Der Druckstoß ist ein weiteres wichtiges Thema, das im Rahmen der Diskussion um Druckstollen besprochen werden soll.

5.1.3 Druckstoß

Durchflussänderungen in Druckstollen führen zu Druckstößen, dabei handelt es sich um Druckwellen. In weiterer Folge sollen hier die Zusammenhänge dargestellt werden.

5.1.3.1 Plötzliche Durchflussänderung

Zunächst soll eine Erklärung der Joukowski-Formel erfolgen. Wie aus der Abbildung 47 ersichtlich ist, führt eine kleine Durchflussänderung, bei der das fließende Wasser verlangsamt wird, zu einer minimalen Kompression des Wassers. Dabei wird der Stollen minimal geweitet. Dieser Vorgang nennt sich Druckstoß, die Ausbreitungsgeschwindigkeit lässt sich von der Strömungsgeschwindigkeit v , subtrahiert von der Ausbreitungsgeschwindigkeit a des Druckstoßes im ruhenden Wasser berechnen. Die, beim Druckstoß auftretende Kraft lässt sich über den, nach der Zeit abgeleiteten Impulssatz ermitteln. Die Änderung des Impulses nach der Zeit abgeleitet, muss der Druckkraft entsprechen. Bei Vernachlässigung der infinitesimalen Änderungen der Dichte des Wasser und des Querschnittes kann Formel (5.1) hergeleitet werden.¹⁶⁹

$$-\frac{\rho * F * (a - v) * \Delta t * \Delta v}{\Delta t} = -\Delta p * F \quad (5.1)$$

Nach durchkürzen erhält man,

$$\rho * (a - v) * \Delta v = \Delta p \quad (5.2)$$

Für den Fall, dass $a \gg v$

$$\Delta p = \rho * a * \Delta v \quad (5.3)$$

Für die Ermittlung der entstehenden Druckhöhe kann die Formel (5.3) abgeändert werden zu:

$$\frac{\Delta p}{\rho * g} = \frac{a * \Delta v}{g} \quad (5.4)$$

F ...Querschnittsfläche des Stollens

Δt ...Zeitdauer seit Betätigung des Schiebers

¹⁶⁸ Vgl. Schleiss A. (1985), S.38f

¹⁶⁹ Vgl. Vischer D., Huber A. (2002), S.191f

Δv ...Änderung der Geschwindigkeit durch die Änderung des Durchflussquerschnittes

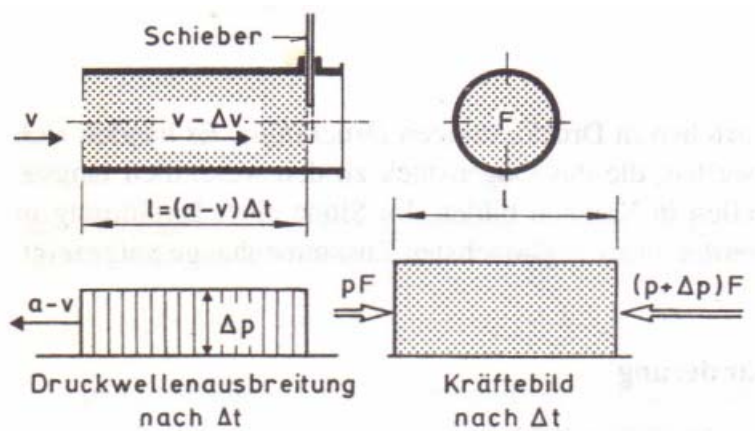


Abbildung 47: Druckstoß infolge plötzlicher Durchflussdrosselung am Schieber, [Vischer D., Huber A. (2002), S.192]

Für den Fall, dass der Schieber plötzlich geöffnet wird, muss in der Formel (5.4) der rechte Term mit einem negativen Vorzeichen versehen werden. Dies entspricht einer Dekompression und einer Verengung des Stollens. Formel (5.4) lässt sich so für den Schließvorgang mit einem positiven und für das Öffnen mit einem negativen Vorzeichen versehen. Aus Formel (5.5) kann geschlossen werden, dass sich die Extremwerte auch Betätigung des Schiebers bei Bemessungsdurchfluss ergeben.¹⁷⁰

$$\frac{\Delta p}{\rho^* g} = \pm \frac{a^* \Delta v}{g} \quad (5.5)$$

Die Druckstoßgeschwindigkeit lässt sich mit folgender Formel berechnen, wobei für eine erste Näherung $a \approx 1000 \text{ m/s}$ angenommen werden kann.¹⁷¹

$$a = \sqrt{\frac{1}{\rho^*} \frac{1}{\left(\frac{1}{E_w} + \frac{D}{s^* E_R} \right)}} \quad (5.6)$$

E_w ...Elastizitätsmodul des Wassers

E_R ...Elastizitätsmodul des Rohres

D ...Durchmesser des Rohres

s ...Wandstärke

Die Druckstoßreflexion lässt sich am besten an der Abbildung 48 erläutern, hier für den Schließvorgang. Dabei ist ersichtlich, dass zum Zeitpunkt des Schließens der Überdruck vom

¹⁷⁰ Vgl. Vischer D., Huber A. (2002), S.192f

¹⁷¹ Vgl. Vischer D., Huber A. (2002), S.193f

Schieber zum Speicher bewegt. Nach der Laufzeit (L/a) steht der gesamte Stollen unter Überdruck, anschließend wird der Überdruck reflektiert und zum Zeitpunkt ($2L/a$) ist der Überdruck auf Null reduziert. Bei der abermaligen Reflexion kommt es zum Unterdruck im Rohr, der zum Zeitpunkt ($3L/a$) das Einlaufbauwerk erreicht. Nun wird der Unterdruck reflektiert und zum Zeitpunkt ($4L/a$) ist der Unterdruck abgebaut. Dieser Vorgang würde sich unendlich fortsetzen, würde die Reibung nicht zu einer Dämpfung der Druckwelle führen.¹⁷²

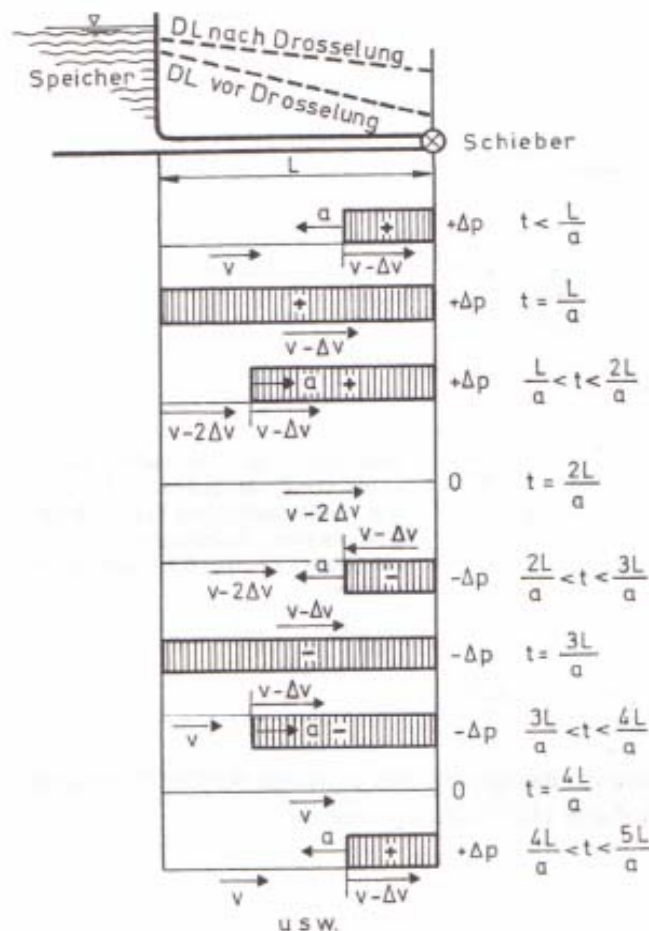


Abbildung 48: Druckstoß infolge plötzlicher Durchflussdrosselung am Schieber, Ausbreitungs- und Reflexionsverhältnisse oberhalb, stationäre Drucklinie vor dem Druckstoß und nach Abklingen desselben, [Vischer D., Huber A. (2002), S.195]

Der Anwendungsbereich der Joukowski-Formel ist allerdings aufgrund der technisch nahezu unmöglichen Umsetzung der Forderung von $T_{s,\ddot{\sigma}} = 0$, aus Formel (5.10) fast nur theoretischer Natur. In der Praxis wird die Durchflussänderung linear erfolgen, dieser Schließvorgang wird im folgenden Kapitel behandelt.¹⁷³

¹⁷² Vgl. Vischer D., Huber A. (2002), S.194f

¹⁷³ Vgl. Vischer D., Huber A. (2002), S.198

5.1.3.2 Lineare Durchflussänderung

Wie aus Abbildung 48 ersichtlich, ist die Druckwellenfront sehr steil. Die steile Front lässt sich durch eine langsamere Durchflussänderung verflachen (siehe Abbildung 49). Diese Änderung kann in Teilschritten oder linear ansteigend bzw. absteigend ausgeführt werden, je nach dem ob der Schieber geöffnet oder geschlossen wird. Das Ergebnis ist, wie aus Abbildung 49 ersichtlich dasselbe und kann mit der Formel (5.7) überprüft werden.¹⁷⁴

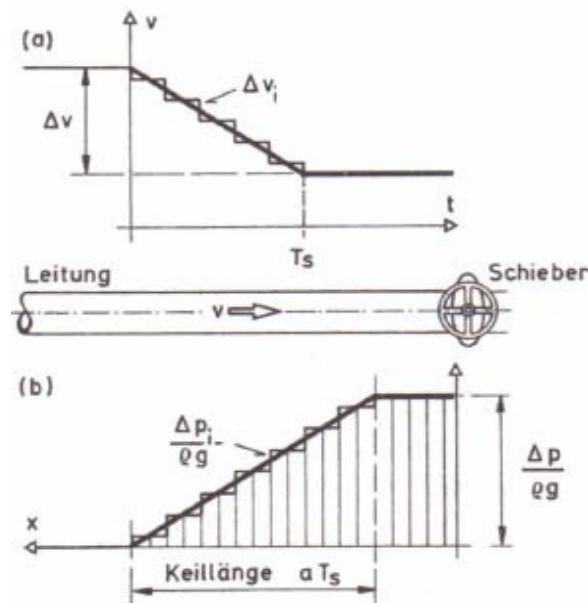


Abbildung 49: Lineare Drosselung um Δv in der Zeit T_s , wobei a) die Annäherung der Ganglinie durch plötzliche Änderungen darstellt und b) den auftretenden Druckstoß in einer langen Leitung, [Vischer D., Huber A. (2002), S.195]

$$\frac{\Delta p}{\rho * g} = \sum \frac{\Delta p}{\rho * g} = \frac{a}{g} \sum \Delta v_i = \pm \frac{a * \Delta v}{g} \quad (5.7)$$

Bei Umlegung der linearen Durchflussänderung auf die in Abbildung 48 dargestellten plötzlichen Durchflussänderung, kann gezeigt werden, dass sich der Joukowski-Stoß nicht voll ausbilden kann, wenn die Länge des Stollens kleiner als die halbe Keillänge ist, da es bei der Drosselung nicht zu Unterdruckausbildungen kommen kann (siehe Abbildung 50). Der größte Überdruck tritt dabei am Schieber auf und ist mit der Michaud-Allievi-Formel (Formel (5.8)) zu berechnen.¹⁷⁵

$$\frac{\Delta p^*}{\rho * g} = \frac{2 * \Delta v * L}{g * T_s} \quad (5.8)$$

T_s ...Schließzeit

¹⁷⁴ Vgl. Vischer D., Huber A. (2002), S.195f

¹⁷⁵ Vgl. Vischer D., Huber A. (2002), S.196

Für den Schließvorgang lässt sich die Formel (5.8) zu Formel (5.9) umbauen, wobei hier Unterdruck entsteht.¹⁷⁶

$$\frac{\Delta p^*}{\rho^* g} = - \frac{2 * \Delta v * L}{g * T_{\delta}} \tag{5.9}$$

T_{δ} ... Öffnungszeit

Durch Schließ- oder Öffnungsvorgängen bei der Bemessungslast treten die Maximalenwerte für den Druckstoß auf. So lassen sich die Formeln (5.8) und (5.9) folgendermaßen zusammenfassen.

$$\frac{\Delta p_{\max}^*}{\rho^* g} = \pm \frac{2 * \Delta v * L}{g * T_{s,\delta}} \tag{5.10}$$

Interessant dabei ist, dass die Formel (5.10) von der Druckstoßgeschwindigkeit unabhängig ist. Dies ergibt sich aus der Forderung, dass die Keillänge dem Ergebnis der Formel ($L = a * T_s$) entspricht.¹⁷⁷

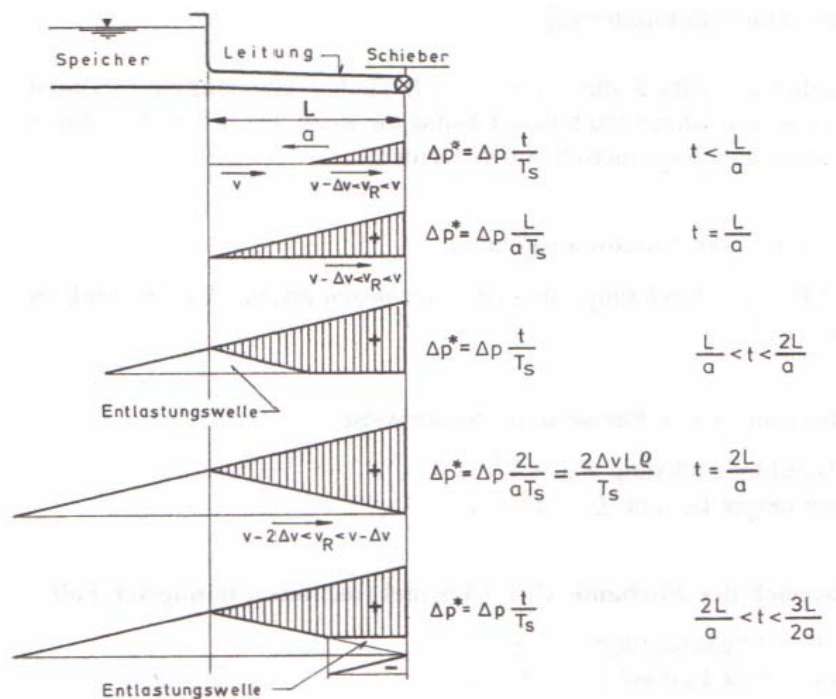


Abbildung 50: Druckstoß infolge einer langsamen linearen Durchflußdrosselung am Schieber, [Vischer D., Huber A. (2002), S.197]

Wegen des besser abzubildenden Schließvorganges wird die Michaud-Allievi-Formel für die Berechnung des Druckstoßes herangezogen, da die Forderung nach kontinuierlicher Durch-

¹⁷⁶ Vgl. Vischer D., Huber A. (2002), S.196

¹⁷⁷ Vgl. Vischer D., Huber A. (2002), S.196f

flussänderung $T_{s,\ddot{o}} \geq 2L/a$ oder jene nach einer kurzen oberwasserseitigen Stollenlänge von $L \leq a * T_{s,\ddot{o}} / 2$ wesentlich genauer wider gegeben werden kann.¹⁷⁸

Inhaltlich werden die Erörterungen zu den Druckstollen mit dem Kapitel der Bemessung abgeschlossen.

5.1.4 Bemessung von Druckstollen

Der erste Schritt der Bemessung von Druckstollen ist die Überprüfung der Überdeckungshöhe, da es bei zu geringer Überdeckung zu Gebirgsbrüchen und zum Versagen der Auskleidung kommt. Mit Formel (5.11) kann die notwendige Überlagerungshöhe t in Abhängigkeit der maximalen Innendruckhöhe h_{\max} sowie der Ausbildung des Stollens berechnet werden.¹⁷⁹

$$t \geq m * h_{\max} * \frac{\rho}{\rho_F} \quad (5.11)$$

t ...Überlagerungshöhe [m]

ρ_F ...Felsdichte (=2600 bis 2700kg/m³) [kg/m³]

m ...Vergleichszahl [-], un- bzw. verkleidet mit Beton $m=2$; gepanzelter Stollen $m=0,4$ bis $0,7$

h_{\max} ...maximale Innendruckhöhe [m]

ρ ...Wasserdichte [kg/m³]

5.1.4.1 Belastungsfälle bei Druckstollen

Die Belastungsfälle bei Druckstollen sind folgende:¹⁸⁰

- *Belastung durch Ausbruch:* Durch den Ausbruch kommt es zu einer Störung der natürlichen Gebirgsspannungen, wobei sich ein neuer Spannungszustand ausbildet. Im Fall, dass dieser Spannungszustand nicht durch Einbauten abgebaut wird, kommt es zu Verformungen des Ausbruchsquerschnittes. Diese Verformungen sind vor allem abhängig von den Gebirgseigenschaften und Materialeigenschaften, der Überdeckungshöhe, der Art der Herstellung des Ausbruchs und der Auskleidung. Weiters sind sie zeitabhängig.
- *Innenwasserdruck:* Der Innendruck bei einem Grundablass richtet sich nach der Stauhöhe sowie dem Druckstoß beim Öffnen bzw. Schließen des Verschlusses. Risse in

¹⁷⁸ Vgl. Vischer D., Huber A. (2002), S.197

¹⁷⁹ Vgl. Patt H., Gonsowski P. (2011), S.310

¹⁸⁰ Vgl. Schleiss A. (1985), S.103ff

der Auskleidung können durch Überbeanspruchung des Gebirges und des Betons entstehen.

- *Außenwasserdruck*: Der Außenwasserdruck ist abhängig vom saisonalen Wasserspiegel sowie der Durchlässigkeit des Gebirges. Im Revisionsfall ist der Außenwasserdruck stark zeitabhängig. Der Außendruck kann bei der Bemessung nicht auf den vom Gebirge übernommenen Lastanteil hinzu addiert und derart nicht als die der Auskleidung entlastende Kraft gerechnet werden. Der Außenwasserdruck wirkt hydraulisch gesehen ohne Einschränkungen auf die Auskleidung, außerdem wirkt er dem Potentialgefälle entgegen und reduziert die Wasserverluste.
- *Temperaturänderung*: Die Temperatureinflüsse sind bei Druckstollen nicht unerheblich, da Temperaturänderungen zu Dehnungen des Materials führen. Man kann also gerechtfertigt von Temperaturspannungen sprechen. Bei der Abkühlung kommt es zur Schrumpfung der Innenauskleidung und damit zu einem Spalt zwischen Fels bzw. Vorkonstruktion und der Innenausbildung. Dabei werden Zugspannungen auf die Auskleidung übertragen.
- *Zustandsänderung der Auskleidung*: Darunter versteht man das Schwinden und Kriechen der Betonauskleidung. Dabei führt das Schwinden zur dreidimensionalen Änderung der Abmessungen des Querschnittes, während sich das Kriechen nur in Richtung der Dauerbelastung richtet. Das Kriechen ist bei vorgespannten Konstruktionen von Bedeutung. Bauliche Maßnahmen können die Einflüsse von Schwinden und Kriechen verringern.
- *Zustandsänderung des Gebirges*: Darunter versteht man die Zustandsänderung infolge von Dauerbelastung des Gebirges.

5.1.4.2 Innenwasserdruck

Die Bemessung eines Druckstollens kann näherungsweise als zylindrischer Hohlraum mit einer unendlich dicken Wand berechnet werden. Nachfolgend soll die Berechnung schrittweise behandelt werden, dabei wird die Formel von Lamé mit $r_a \rightarrow \infty$ angewendet.¹⁸¹

$$\sigma_{t,r} = \mp p_i * \left(\frac{r_i}{r} \right)^2 \quad [\text{N/m}^2] \quad (5.12)$$

σ_t ...Tangentialspannung (oberes Vorzeichen) [N/m²]

σ_r ...Radialspannung (unteres Vorzeichen) [N/m²]

r_i ...Innenradius [m]

r ...Radius (variabel) [m]

¹⁸¹ Vgl. Patt H., Gonsowski P. (2011), S.311

p_i ...Innendruck [N/m²]

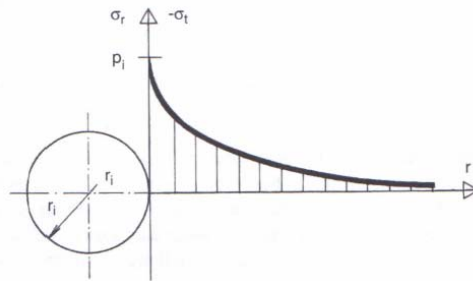


Abbildung 51: Unverkleideter Druckstollen unter Innendruck. Spannungsverteilung für die Radial- und Tangentialspannungen, [Patt H., Gonsowski P. (2011), S.311]

In Abbildung 51 ist die Spannungsverteilung für einen Innendruck dargestellt. Es ist dabei ersichtlich, dass die größten Spannungen an der Innenseite der Stollenauskleidung entstehen. Dabei tritt die Tangentialspannung an der Innenseite als maximale Zugkraft und die Radialspannung als maximale Druckkraft mit dem Wert des Innendruckes auf. Bei einem mit Beton verkleideten Stollen wird ein Verbundquerschnitt beobachtet, der mit folgenden Schritten berechnet wird:¹⁸²

1. Aufteilung des Druckstollens in die Betonverkleidung und den Fels, siehe Abbildung 52.
2. Ermittlung der Verschiebungen in radialer Richtung am Punkt A, die durch den Innendruck p_i verursacht werden und die des Außendruckes $\lambda * p_i$. Dabei entspricht λ einem noch unbekanntem Lastanteil. Außerdem muss die Radialverschiebung des Hohlraumes am Punkt A mit $\Delta r * F(\lambda)$ mit dem Innendruck $\lambda * p_i$ ermittelt werden.
3. Definition der Verträglichkeitsbedingung an der Stelle A: Dabei müssen die Verschiebungen in radialer Richtung $\Delta r * B(\lambda) = \Delta r * F(\lambda)$ gleich sein, daraus kann der Lastanteil λ berechnet werden.
4. Nun können die auftretenden Spannungen im Rohr, die durch den Innendruck p_i verursacht werden und der Außendruck $\lambda * p_i$ ermittelt werden. Der Außendruck des Rohres ist gleich dem Innendruck des Felsens.

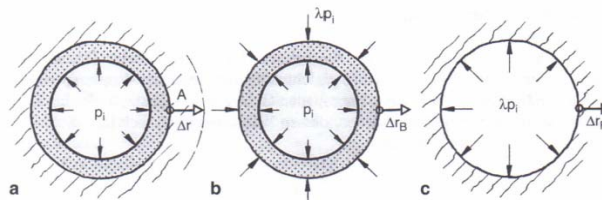


Abbildung 52: Verkleideter Druckstollen unter Innendruck, a) Verbundquerschnitt, b) Betonverkleidung als Rohr, c) Hohlraum im Fels als unendlich dickes Felsrohr, [Patt H., Gonsowski P. (2011), S.312]

¹⁸² Vgl. Patt H., Gonsowski P. (2011), S.311f

Unter Verwendung der Theorie des dickwandigen Rohres kann unter Berücksichtigung der Randbedingungen die Radialenverschiebung Δr an der Stelle r mit den Spannungen in radialer und tangentialer Richtung berechnet werden.¹⁸³

$$\Delta r = -\frac{1}{E} * (\sigma_t - \nu * \sigma_r) \quad [\text{m}] \quad (5.13)$$

E ...Elastizitätsmodul [N/m²]

ν ...Querdehnungszahl [-]

Wie Abbildung 52 zeigt, wirken bei einem Felshohlraum im Punkt A mit einem Innenradius r_F und einem Innendruck von $\lambda * p_i$ die folgenden Spannungen:¹⁸⁴

$$\sigma_{t,r} = \mp \lambda * p_i \quad [\text{N/m}^2] \quad (5.14)$$

Aus Kombination von (5.13) und (5.14) ergibt sich,

$$\Delta r_F = \frac{\lambda * p_i}{E_F} * (1 + \nu_F) * r_F \quad [\text{m}] \quad (5.15)$$

Für den Fall, dass eine Panzerung mit einer Betonauskleidung vorliegt, kann für die Berechnung das Stahlrohr und der Beton geteilt werden. Bei der Berechnung wird der Fels mit dem Betonquerschnitt zusammengefasst. Wenn der Betonquerschnitt als gerissen bei der Berechnung angenommen wird, können nur radiale Kräfte übertragen werden.¹⁸⁵

5.1.5.3 Außenwasserdruck

Aufgrund der enorm hohen Komplexität muss für die Berechnung der Beulgefahr auf die Literatur verwiesen werden. Unter Beulen versteht man das Versagen eines Rohres unter Außenüberdruck. Im Fall eines Grundablasses kann dieser Außenüberdruck durch den Bergwasserdruck im Bauzustand oder im Revisionszustand nach Absenkung des Wasserspiegels auftreten.¹⁸⁶

Nach dem die wichtigsten Punkte des Druckstollens, wie die Linienführung, die unterschiedlichen Varianten der Ausführung und der Bemessung behandelt wurden, gilt es nachfolgend den Abflussbereich der unter Atmosphärendruck steht zu erörtern, nämlich den Freispiegelstollen.

¹⁸³ Vgl. Patt H., Gonsowski P. (2011), S.312

¹⁸⁴ Vgl. Patt H., Gonsowski P. (2011), S.312

¹⁸⁵ Vgl. Patt H., Gonsowski P. (2011), S.312f

¹⁸⁶ Vgl. Patt H., Gonsowski P. (2011), S.313

5.2 Freispiegelstollen

Unter Freispiegelstollen versteht man den Bereich im Anschluss an die Apparatekammer, bei der der Abfluss unter Atmosphärendruck erfolgt. Je nach Füllgrad können unterschiedliche Abflusszustände auftreten, auf die im weiteren Verlauf eingegangen werden soll.

5.2.1 Ausführungsvarianten

Der Querschnitt des Freilaufstollens hängt vorwiegend von dem, beim Ausbruch angewendeten Verfahren ab. So kommen beim konventionellen Ausbruch das Torbogen- bzw. das Hufeisenprofil zur Anwendung, wohin gegen beim Ausbruch im druckhaften Gebirge aufgrund der besseren Eigenschaften das Kreisprofil verwendet wird. Die Auskleidung der Stollen richtet sich nach der vorliegenden Felsqualität sowie der gewünschten Wandrauigkeit. Je höher die auftretenden Geschwindigkeiten sind, umso größerer Bedeutung kommt der Rauigkeit zu. In Abbildung 53 werden unterschiedliche Ausführungsvarianten angeführt, wobei der Unterschied zu Freilaufstollen eines Grundablasses die gleichmäßige Gestaltung der Sohle darstellt. Diese Ausführungsvarianten können folgendermaßen unterschieden werden:¹⁸⁷

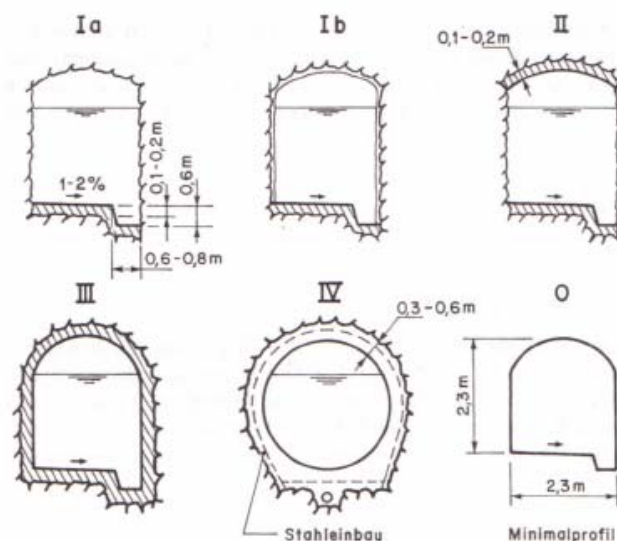


Abbildung 53: Ausbaustufen eines Freilaufstollens, [Vischer D., Huber A. (2002), S.179]

- *Typ Ia* im standfestem Gebirge, unverkleidet außer der Sohle mit Rigole zur Ableitung geringer Wassermengen; Rauigkeitsbeiwert nach Manning-Strickler k_{Str} gleich 25 bis 35; *Typ Ib* mit zusätzlicher Bentonitaufspritzung von 2 bis 3cm Stärke zur Reduktion der Wandrauheit.
- *Typ II* in etwas geringerer standfestem Gebirge mit Sicherung an der Firste, beispielsweise Spritzbeton

¹⁸⁷ Vgl. Vischer D., Huber A. (2002), S.178

- *Typ III* im leicht druckhaftem Gebirge; vollständige Betonauskleidung mit einem Zementgehalt von 250 bis 300kg/m³; Rauigkeitsbeiwert nach Manning-Strickler k_{Str} gleich 75 bis 85.
- *Typ IV* im druckhaftem Gebirge; Kreisprofil da statisch günstiger; Ausbruch der Sohle erfolgt horizontal.

Der Mindestausbruchsquerschnitt ist abhängig von der Bauweise, so beträgt die minimale Sohlenbreite 2,3m. Der Mindestdurchmesser bei der Anwendung einer bemannten Tunnelbohrmaschine im standfesten Gebirge beträgt 2,8m, wobei im leicht gebrächem Gebirge mit 3 Metern gearbeitet werden muss.¹⁸⁸

5.2.2 Hydraulische Bemessung

Die hydraulische Bemessung von Freispiegelstollen bzw. geschlossenen Kanälen wird für den stationären Abfluss durchgeführt. Voraussetzung für den stationären Abfluss ist, dass der Atmosphärendruck über dem freien Wasserspiegel herrscht. Dies bedingt eine entsprechend ausgelegte Belüftung in den Freispiegelstollen weiters sind die Geschwindigkeiten des Abflusses und die Abflusshöhe ebenfalls von Bedeutung, da die Froude'sche Zahl kleiner als vier sein muss, damit die Bemessung möglich und sinnvoll ist. Die Froude'sche Zahl gibt an, ob ein Abfluss schießend oder strömend ist, siehe Formel (6.4). Die Berechnung des Abflusses erfolgt unter Normalabfluss, dafür ist eine über weite Teile gerade Linienführung erforderlich.¹⁸⁹

Eine Besonderheit beim Abfluss im Stollen ist, dass es bei einem hohen Füllgrad nicht eindeutig ist, welche Abflusshöhe sich einstellen wird. Für einen Abfluss können zwei verschiedene Wasserspiegelhöhen vorliegen (siehe Abbildung 54). Diese Zweideutigkeit bedeutet, dass es zu einem plötzlichen „Zuschlagen“ des Stollenquerschnittes kommt, wodurch die Belüftung von der Unterwasserseite des Stollens nicht mehr gegeben ist. Deshalb wird bei der Auslegung des Stollens versucht, diese Wasserspiegellagen zu verhindern.¹⁹⁰

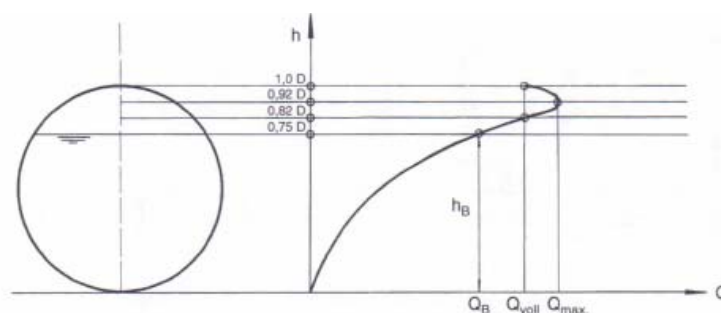


Abbildung 54: Abflusskurve im Kreisprofil mit der charakteristischen Zweideutigkeit bei hohen Füllgraden, [Patt H., Gonsowski P. (2011), S.246]

¹⁸⁸ Vgl. Vischer D., Huber A. (2002), S.178f

¹⁸⁹ Vgl. Patt H., Gonsowski P. (2011), S.245

¹⁹⁰ Vgl. Patt H., Gonsowski P. (2011), S.245

Mit der Formel (5.16) lässt sich die Abflussleistung für die verschiedenen Profile (siehe dazu Abbildung 55) berechnen.

$$Q = k_{Str} * I_S^{1/2} * A^{4/3} * r_F^{2/3} \quad [m^3/s] \quad (5.16)$$

k_{Str} ...Rauheit [$m^{1/3}/s$]

I_S ...Sohlgefälle [-]

A ...benetzte Querschnittsfläche [m^2]

$r_F = \sqrt{A}/U$...Formfaktor [-], (siehe Tabelle 4)

U ...benetzter Umfang [m]

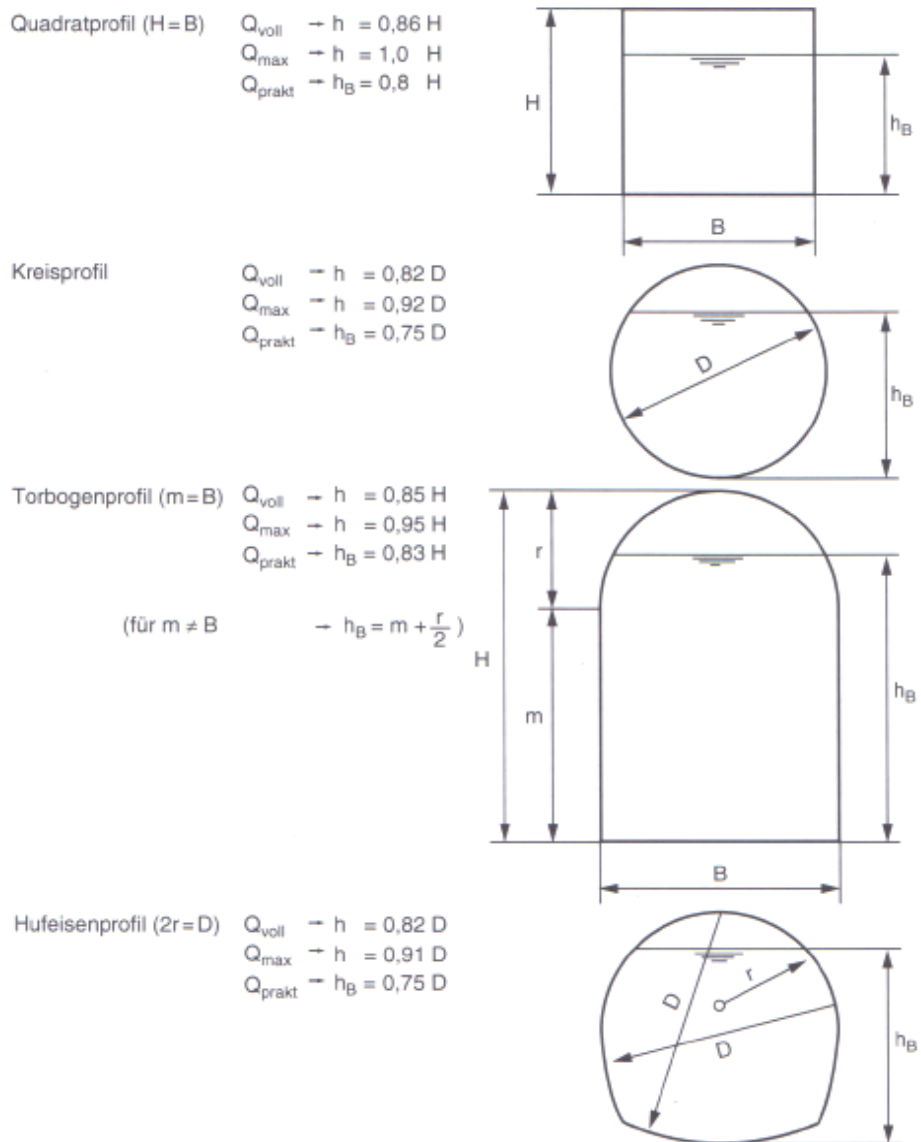


Abbildung 55: Abflusstiefen in geschlossenen Kanälen bei hohen Füllungsgraden h/D , [Patt H., Gonsowski P. (2011), S.247]

Tabelle 4: Formfaktoren r_F für verschiedene Profile, [Patt H., Gonsowski P. (2011), S.247]

Profil	Formfaktor r_F
Halbkreis	0,399
Kreis	0,282
Torbogen	0,265
Quadrat	0,250

Aufgrund der Tatsache, dass bei der Bemessung eines Grundablasses bekannt ist, welche Wassermengen abgeführt werden, wird ein Freispiegelstollen nie bis zum kompletten vollständig gefüllten Querschnitt bemessen. Das Zuschlagen des Stollens kann trotzdem durch verschiedene Strömungsbedingungen oder Rückstau passieren, darauf soll später eingegangen werden.

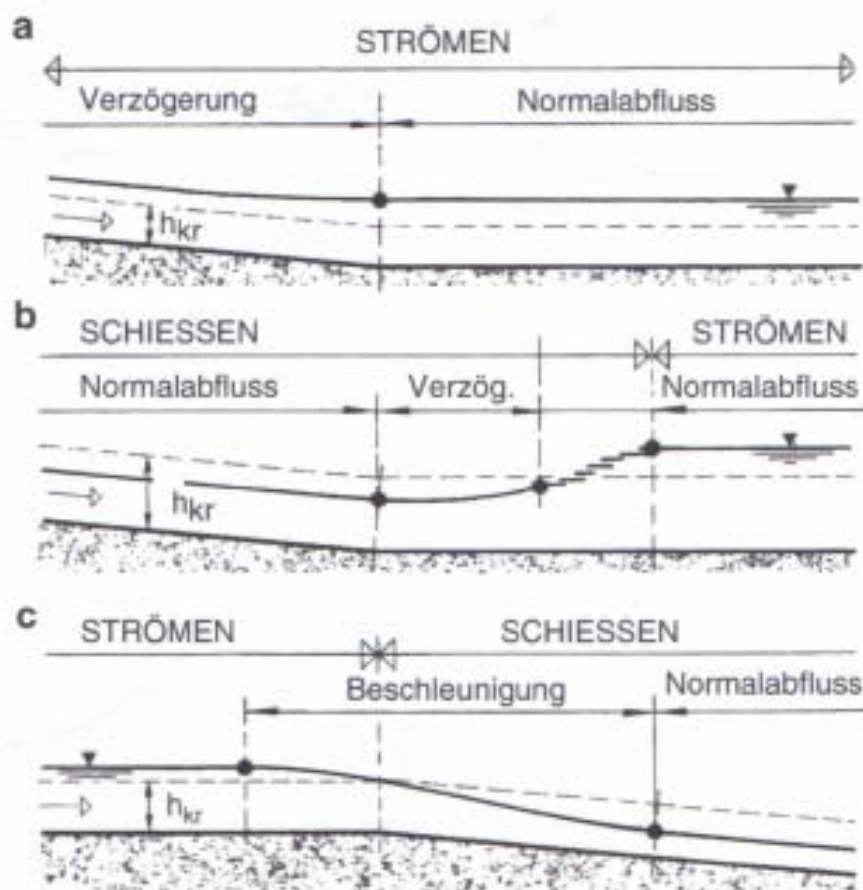


Abbildung 56: Auswirkungen von Gefälleknicken auf die Wasserspiegellage in einem Rechteckgerinne, [Patt H., Gonsowski P. (2011), S.249]

Wie Abbildung 56 zeigt, kommt es bei der Änderung der Neigung zu unterschiedlichen Abflussausbildungen, nämlich in Form eines beschleunigten oder verzögerten Abflusses. Hier soll kurz auf die auftretenden Phänomene der Abbildung 56 eingegangen werden:¹⁹¹

- a) In der Abbildung ist zu erkennen, dass unterhalb des Knicks Normalabfluss herrscht und die Abflusstiefe größer als die Grenztiefe für schießenden Abfluss ist. Es zeigt weiters, dass es oberwasserseitig des Knicks zu einer Verzögerung des Abflusses kommt, es bildet sich also kein Wechselsprung aus.
- b) Der Abfluss oberwasserseitig liegt unterhalb der Grenztiefe, wodurch ein schießender Abfluss vorliegt. Das Schießen setzt sich bis zum Normalabfluss fort, wobei eine Verzögerung des Abflusses bis zum Überschreiten der Grenztiefe zu beobachten ist und geht beim Wechselsprung zum strömenden Normalabfluss über.
- c) Wird der Abfluss im Bereich des Knicks beschleunigt, entsteht dabei ein Wechselsprung zum schießenden Abfluss und geht bei Erreichen einer stabilen Strömung in den Normalabfluss über.

5.2.3 Fließzustände

Im vorliegenden Unterkapitel werden die Strömungen in Grundablässen in Bezug auf unterschiedliche Fließzustände behandelt. Der weitere Fokus liegt auf der ebenen turbulenten Grenzschichtströmung, den Stosswellen hinsichtlich der Querschnittsgestaltung sowie dem Rückstau und Wechselsprung.

5.2.3.1 Strömungen in Grundablässen

Zu Beginn bildet sich am Einlaufbauwerk eine Einlaufströmung mit einer gleichmäßigen Geschwindigkeitsverteilung aus. Durch den Impulstransport kommt es zum Anwachsen der Grenzschicht von der Wand aus. Diese Kontinuität bedingt, dass die Strömung im Kern derart anwächst, dass jeder Querschnitt die gleiche Abflussmenge aufweist. Durch die Beschleunigung des Kerns kommt es zu einem Druckgefälle in der Rohrachse, wodurch die wandnahen Bereiche mit angetrieben werden. Während Versuchen konnte gezeigt werden, dass es bei rauen Rohren zum Zusammenwachsen der Wandgrenzschichten nach einer Länge von ca. 50mal den Rohrdurchmessern kommt. Nach dieser Strecke liegt neben einem gleichmäßigen Geschwindigkeitsprofil für alle Querschnitte auch eine vollständig ausgebildete turbulente Rohrströmung mit konstantem Druckgradienten vor. Da aber meist die Druckstollenlänge bis zur Schützenkammer kleiner als diese 50 Mal dem Rohrdurchmesser ist, kann meist keine vollständig ausgebildete Rohrströmung entstehen.¹⁹²

¹⁹¹ Vgl. Patt H., Gonsowski P. (2011), S.248f

¹⁹² Vgl. Skripalle J. (1994), S.33f

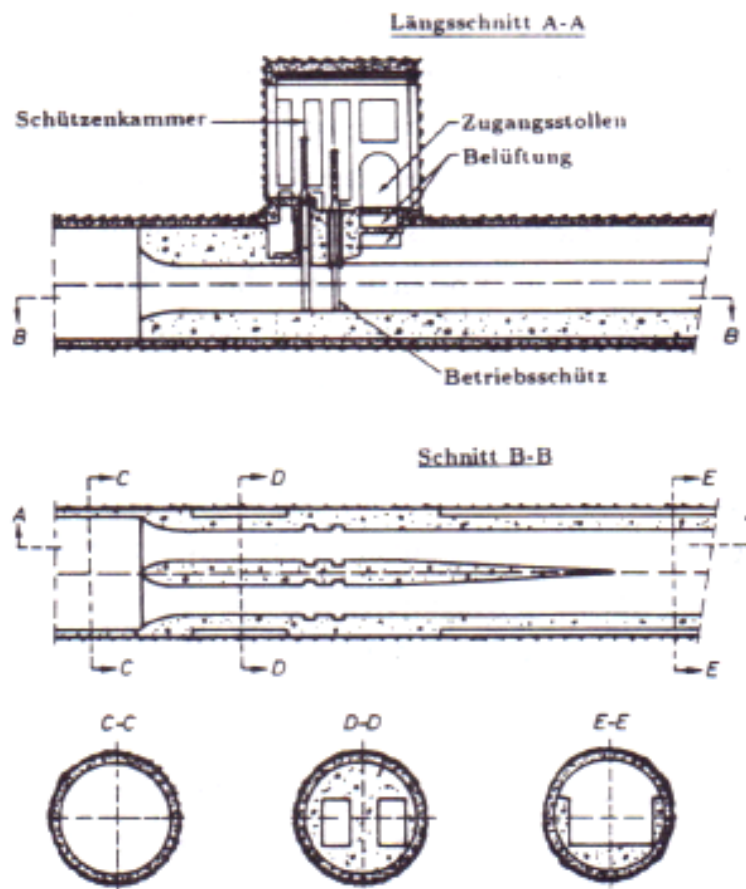


Abbildung 57: Grundablass des Alicura-Dammes in Argentinien, [Skripalle J. (1994), S.34]

Wie Abbildung 57 exemplarisch am Alicura Damm aus Argentinien zeigt, führt der Übergang von Schnitt C-C auf den Schnitt D-D zu einer Änderung des Geschwindigkeitsprofils, dabei hat die Beschleunigung der Strömung und der damit einhergehende Druckabfall einen großen Einfluss auf die Grenzschichtausbildung. Beim Übergang der Schnitte D-D auf E-E ändert sich die Strömung in eine ungleichförmige Gerinneströmung mit schießendem Abfluss, wobei die treibende Schwerkraftkomponente kleiner als der Reibungswiderstand am benetzten Umfang ist, dies führt zu einer Abbremsung der Strömung. Die Verzögerung hat einen Anstieg der Wassertiefe zur Folge, was sich im Geschwindigkeitsprofil in Form einer Abflachung auswirkt. Durch die, an der Wasseroberfläche auftretende Turbulenz, sei sie resultierend aus der Grenzschichtentwicklung an der Firste des Druckstollens oder durch die Schützenunterkante induziert, kommt es zu einer Oberflächenbelüftung direkt hinter den Schützen. Dieser Effekt muss bei der Abflusstiefenberechnung in Abhängigkeiten der eingetragenen Luft berücksichtigt werden.¹⁹³

¹⁹³ Vgl. Skripalle J. (1994), S.34f

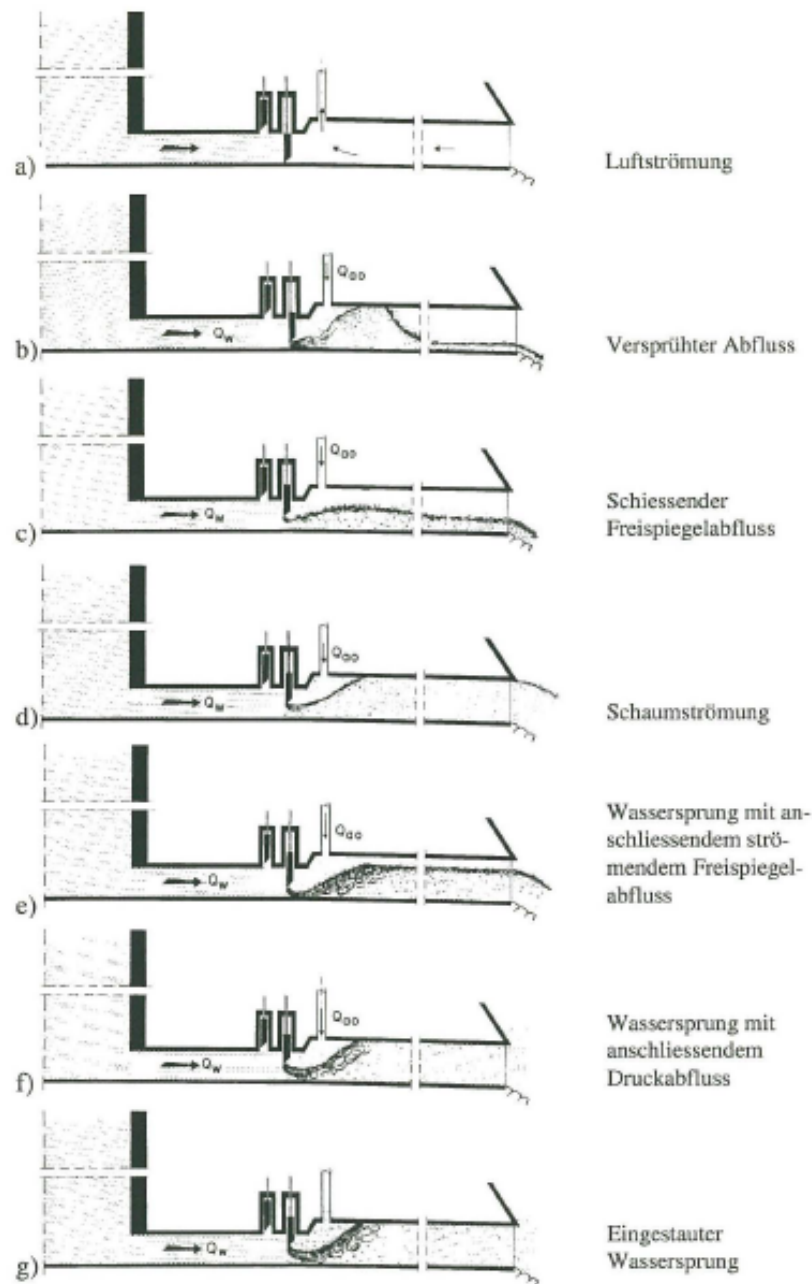


Abbildung 58: Strömungsvorgänge im Grundablassstollen, [Sharma (1973) in Speerli J. (1999), S.36]

In Abbildung 58 sind die verschiedenen Strömungsvorgänge in einem Grundablassstollen dargestellt, die von SHARMA (1973) definiert wurden. Es soll hier lediglich angeführt werden, dass der versprühte und der schießende Freispiegelabfluss für Grundablässe von entscheidender Bedeutung sind (siehe Abbildung 58b) und c)). Die anderen in der Abbildung 58 dargestellten sind durch eine entsprechende Dimensionierung des Querschnittes zu vermeiden.¹⁹⁴

¹⁹⁴ Vgl. Speerli J. (1999), S.43

5.2.3.2 Die ebene turbulente Grenzschichtströmung

Wie zuvor dargelegt, liegen Querschnitte vor, bei denen die Strömungssituationen beschrieben werden können, die dann für experimentelle Untersuchungen oder für die Bemessung von Belüftern verwendet werden. Dies trifft auf die ersten Belüfter deren die Querschnitte meist ohne Oberflächenbelüfter auskommen und wo eine zweidimensionale Grenzschichtströmung mit einer turbulenzfreien bzw. –armen Außenströmung zugrunde liegt, vor. Aber auch bei beginnender Oberflächenbelüftung kann in Sohlennähe näherungsweise von einer Grenzschichtströmung ausgegangen werden.¹⁹⁵ Für weitere Informationen muss auf die einschlägige Literatur verwiesen werden.

5.2.3.3 Stoßwellen

Stoßwellen treten meist dort auf, wo die Strömung durch Seitenwände nicht gestützt ist, dabei ist der Abfluss nicht mehr als eindimensional zu betrachten. Das Auftreten des Stoßstrahles ist dabei abhängig vom Öffnungsgrad der Schützen, der Ausbildung der Sohlbelüftung sowie den geometrischen Verhältnissen zwischen Schussstrahl und Stollenwand. Außerdem hat die Querschnittsausbildung, eckig oder rund, einen wesentlichen Einfluss auf den Stoßstrahl. Bei runder Ausführung ist das Verhalten noch schwerer vorauszusagen. Das Ausbilden von Stoßwellen geht mit einer unebenen Wasseroberfläche und einer Verzögerung des Abflusses durch Vergrößerung der Energieverluste einher. Der verzögerte Abfluss macht einen größeren Querschnitt notwendig. Außerdem wird dadurch, auf welche Weise ist nicht klar, der Lufteintrag begünstigt, womit sich abermals der Abflussquerschnitt vergrößert. Durch einen zu klein dimensionierten Querschnitt können sich Wasser-Luft-Gemischzapfen bilden, die den Stollen mit Unterdruckstößen überbeanspruchen können. Außerdem kann es zu Sogerscheinungen kommen, die an den Schützen den Luftdruck gefährlich absenken.¹⁹⁶

Am Freispiegelstollen des Grundablasses der San Roque Sperre auf den Philippinen konnte sich eine große Stoßwelle ausbilden. Verursacht wurde diese durch die Kombination der Konvergenz des Schussstrahles mit den verschiedenen Betriebszuständen der Schützen. Da die nach den Schützen angeordnete Sohlische bei maximalem Stauspiegel die Gemischzapfenbildung förderte, wobei sich die Zapfen Übergang vom überhöhten zum kreisförmigen Profil ab und erzeugten dabei einen Füllgrad des Stollens von 85%. Eine Anordnung von Konsolen zur Glättung des Wasserspiegel wurde durchgeführt, allerdings hatte diese Maßnahme nur bei maximalem Stauspiegel und größtmöglicher Schützenöffnung einen positiven Effekt. Eine bessere Alternative hierzu wäre es gewesen, die Ausbildung des überhöhten Profils weiter zu führen und so die nötige Belüftungsfläche frei zu halten.¹⁹⁷

¹⁹⁵ Vgl. Skripalle J. (1994), S.35f

¹⁹⁶ Vgl. Anastasi G. (1983), S.504

¹⁹⁷ Vgl. Anastasi G. (1983), S.504f

5.2.3.4 Rückstau und Wechselsprung

Infolge eines schießenden Abflusses, der durch das Unterwasser eingestaut bzw. sogar rückgestaut wird, kann es zu beträchtlichen Problemen in der Freispiegelleitung kommen. Dadurch entsteht ein Wechselsprung im Stollen und führt zu einem unerwünschten Lufteintrag in die Anlage. Dadurch kommt es zu Druckänderungen und Druckstößen in der Leitung sowie zu Pulsationen und diskontinuierlichem Abfluss und weiters zu einer Schwingungsanregung. Dieses Problem kann durch die Linienführung entstehen, wenn der Unterwasserspiegel oberhalb des Auslaufbauwerkes situiert ist.¹⁹⁸ Deswegen sei als einfachste Lösung zur Lösung dieses Problems die Höherlegung des Auslassbauwerkes angeführt, soweit dies möglich ist.

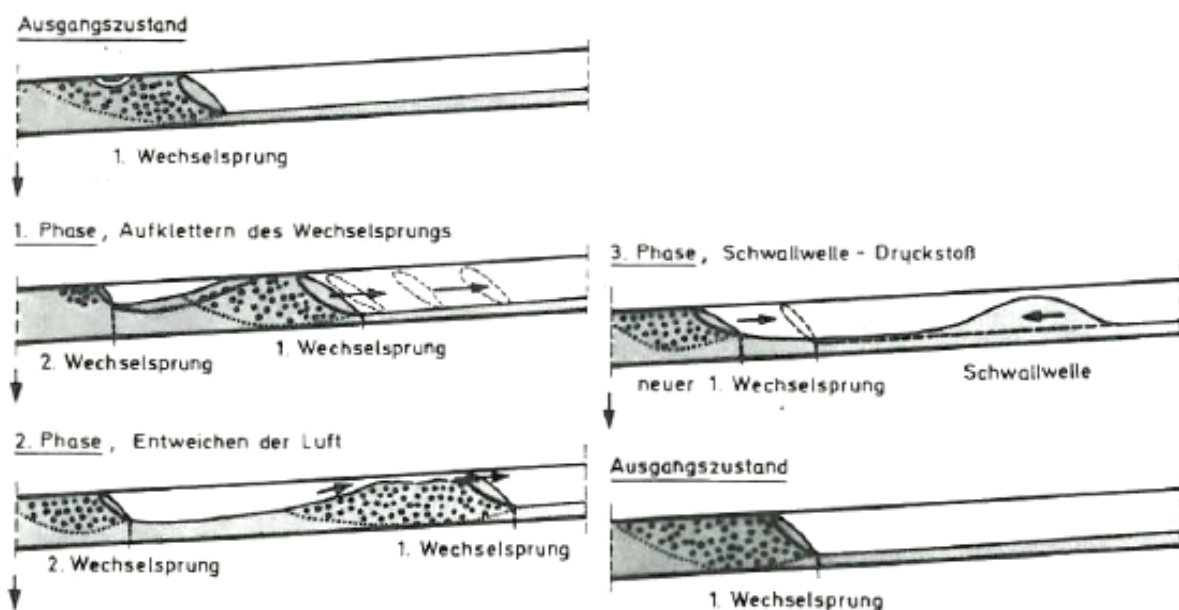


Abbildung 59: Phasen des schwallförmigen Abflusszustandes, [Knaus J. (1982), S.115]

In der ersten Phase (siehe Abbildung 59) des schwallförmigen Abflusszustandes steigen die Luftblasen zur Firste auf und bilden eine Lufttasche. Durch die fortsetzende Zufuhr von Luftblasen kommt es zur Ausdehnung der Lufttasche in das Oberwasser, wodurch die Deckwalze des Wechselsprungs nach oben gedrückt wird, außerdem bereits schon ein nächster Wechselsprung. Die Zeitdauer des Vorganges richtet sich nach der Geometrie des Stollens, der Wassermenge und der Fließtiefe.¹⁹⁹

Die zweite Phase wird durch das Entweichen der Luft charakterisiert. Dabei hat der Wechselsprung die größte Ausdehnung nach der Wasseroberseite. An der Firste entsteht eine Verbindung der Lufttasche mit der Atmosphäre, die Luft entweicht schlagartig und führt so zu einem „Blow-Back“, bei dem der Wasserberg auf dem schießenden Abfluss dahin gleitet. Als

¹⁹⁸ Vgl. Knauss J. (1982), S.115

¹⁹⁹ Vgl. Knauss J. (1982), S.116

„Blow-Back“ wird das in Abbildung 59 in der zweiten Phase dargestellte entweichen der Luft bezeichnet.²⁰⁰

In der dritten Phase läuft die Schwallwelle auf den neuen ersten Wechselsprung auf und verschließt so den Raum vor der Deckwalze, wodurch dem Abfluss ein Druckstoß induziert wird. Nach einiger Zeit kommt es wieder zur Ausbildung der ersten Phase und der Vorgang beginnt von neuem.²⁰¹

5.2.4 Belüftung

Das Kapitel Belüftung ist hier nur der Vollständigkeit halber angeführt. Nähere Informationen sind unter Kapitel 7.3 zu finden.

5.2.5 Erosion und Abrasion der Baustoffe

Im Fall einer Erosion wird ein Grundkörper, im Fall eines Druckstollens meist Beton durch den Kontakt mit fließendem Wasser beansprucht. Durch das fließende Wasser entsteht ein mehr oder weniger großer Materialverschleiß, der durch die verschiedenen Stoffe zusätzlich verstärkt werden kann. Je nach dem welche Stoffe daran beteiligt sind, können die verschiedenen Formen und Vorgänge des Verschleißes unterschieden werden. Unter Abrasion versteht man die Beanspruchung durch Wasser, welches verschiedene Feststoffe mitführt.²⁰²

Die Abrasionsgefährdung von Bauwerken und Bauteilen kann durch folgende Punkte beschrieben werden:²⁰³

- Der Verschleiß steigt bei zunehmendem Sohlgefälle und größerer Wassertiefe durch die gestiegene Transportkapazität. Außerdem ist der Winkel der Beanspruchung der Oberfläche maßgebend, so bedingt ein stumpfer Winkel einen größeren Verschleiß, als eine zur Sohle parallele Beanspruchung.
- Die Wahl des Werkstoffes muss nach den zu erwartenden Belastungen abgestimmt werden. Für hoch abrasive Beanspruchungen können neben nicht zementgebundenen Materialien, wie Stahl, Natursteine und Schmelzbasalt auch Hochleistungsbetone verwendet werden. Bei Hochleistungsbeton ist die Verdichtung und eine entsprechende Nachbehandlung für das Ergebnis sehr wichtig.
- Im Zuge von Versuchen konnte gezeigt werden, dass für den Verschleißwiderstand des Betons vor allem die Biegezugfestigkeit und die Bruchenergie maßgebend sind.

²⁰⁰ Vgl. Knauss J. (1982), S.116

²⁰¹ Vgl. Knauss J. (1982), S.117

²⁰² Vgl. Jacobs F. et al. (2001), S.4

²⁰³ Vgl. Jacobs F. et al. (2001), S.99

- Bei Geschieben mit einer Größe von mehr als zehn Zentimetern lassen sich die Versuche nicht mehr durch den Aufwand rechtfertigen, auch ist aus Normen oder anderen Regelwerken keine genauen Informationen zu entnehmen.

Die wesentlichsten Punkte des Freispiegelstollens sind die unterschiedlichen Fließzustände und in Folge einer Unterdimensionierung des Querschnittes Probleme hinsichtlich des Zuschlagen des Querschnittes auftreten. Deswegen ist bei der Ausbildung besonderes Augenmerk auf die Dimensionierung zu legen. Um die am Ende des Freispiegelstollens noch vorhandene Energie zu vernichten, ist es erforderlich Bauwerke zur Energieumwandlung anzufügen, auf welche im nächsten Kapitel näher eingegangen wird.

6. Energieumwandlung

Die Energieumwandlung beim Auslaufbauwerk des Grundablasses hat den Sinn, die im Wasser durch die Druckhöhe enthaltene Energie in eine andere Energieform umzuwandeln, wie beispielsweise in Wärme- oder Schallenergie. Dann kann es im Unterwasser nicht zu einer Eintiefung der Sohle durch übermäßigen Geschiebetransport und zur Kolkbildung nach dem Tosbecken kommen. Außerdem dient es dem unterwasserseitigen Uferschutz.

Es gibt verschiedene Methoden der Energievernichtung. Die Auswahl eines bestimmten Typs einer Energieumwandlung hängt vom Betrag der Energie ab, der umgebildet werden soll und der Erosionskontrolle, die unterhalb eines Bauwerks benötigt wird. Dies hängt von der Froude'sche Zahl beim Einlauf in das Tosbecken, der Fließtiefe nach dem Wechselsprung und dem Material des Flussbetts und der Uferböschung ab. Eine oder mehrere der folgenden Methoden führen zu einer Geschwindigkeitsreduktion:²⁰⁴

- Der Wurfstrahl wird so gelenkt, dass er die Felsoberfläche direkt trifft. Dabei wird die Energie durch turbulente Diffusion vernichtet.
- Die Richtung des Wurfstrahles wird umgedreht, so dass er in die Luft geht. Hier erfolgt die Energievernichtung durch den Lufteintrag und die Diffusion.
- Zwei Wurfstrahlen werden so gelenkt, dass sie in der Luft aufeinander treffen, dabei wird die Energie beim Aufprall vernichtet.
- Durch Schaffung eines Wechselsprunges durch Vergrößerung der Wassertiefe, entsteht eine reduzierte Fließgeschwindigkeit im Unterwasser.
- Die Strömung kann soweit beeinflusst werden, bis es zur Bildung von Walzen kommt, die dazu führen, dass die Fließgeschwindigkeit herabgesetzt wird.

In weiteren Verlauf soll auf das Tosbecken und die Sprungschanze näher eingegangen werden, da diese am häufigsten in der Energieumwandlung eingesetzt werden. Die anderen zuvor angeführten Punkte wurden nur der Vollständigkeit wegen aufgelistet.

6.1 Tosbecken

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Ausführungsvarianten von Tosbecken ihre hydraulische Funktionsweise und Maßnahmen zur besseren Energieumwandlung besprochen.

Grundsätzlich muss hier angeführt werden, dass im Tosbecken bei Betrieb mit sehr hohen Anströmungsgeschwindigkeiten und einer asymmetrischen Strömung die Effizienz der Ener-

²⁰⁴ Vgl. Mazumder S.K. (2011), S.2

gieumwandlung leidet. Außerdem kann dies dazu führen, dass die Belastungen zu groß werden und so das Tosbecken nicht dauerhaft betriebssicher ist.²⁰⁵

6.1.1 Ausführungsvarianten

In den weiteren Unterkapiteln werden die verschiedenen Möglichkeiten der Tosbeckenausbildung im Bezug auf die hydraulischen Vorgänge behandelt.

6.1.1.1 Tosbecken ohne Sohlprünge

Beim Tosbecken ohne Sohlprünge handelt es sich um die einfachste Ausführung. Dabei wird die Energievernichtung durch einen Wechselsprung erzeugt. Im Zuge dessen trifft das aus dem Stollen ankommende Wasser mit einer kritischen Geschwindigkeit auf das Wasser im Tosbecken auf und fließt aufgrund der konjugierten Wassertiefe mit einer reduzierten Geschwindigkeit ab. Es handelt sich dabei um eine der häufiger verwendeten Ausführungen (siehe Abbildung 63).²⁰⁶

6.1.1.2 Tosbecken mit positiver Sohlschwelle

Beim Tosbecken mit positiver Sohlschwelle, siehe Abbildung 66, weist das Tosbecken am Ende einen Sprung auf. Dieser Sprung beeinflusst die Berechnung der Abmessungen des Beckens, da die konjugierten Wassertiefen verändert werden. Die Form der Endschwelle hat keinen Einfluss auf die Abmessungen. Die einzige Forderung, die für die Berechnung gestellt wird, ist jene, dass die Wechselsprungausbildung in keiner Weise behindert wird.²⁰⁷

6.1.1.3 Tosbecken mit negativer Stufe

Das Tosbecken mit negativer Stufe wird verwendet, um eine Stabilisierung des Wechselsprungs zu erreichen. Für die Situierung des Wechselsprungs im Tosbecken ist die Form irrelevant. Als Beispiel dazu sei hier die Abbildung 60 angeführt. Durch die negative Sohlstufe erfolgt eine Anhebung des Wasserspiegels am Ende des Wechselsprungs, wodurch es dadurch möglich ist, den Einstau des Wechselsprungs zu vermeiden. Hauptsächlich wird diese Variante bei Turbinenauslässen, wenn mit stark unterschiedlichen Durchflüssen gerechnet werden muss, und bei Wehranlagen mit einer geringen Absturzhöhe angewandt.²⁰⁸



Abbildung 60: Tosbecken mit durchgehender negativer Stufe, [Kienmandl M. (1999), S.66]

²⁰⁵ Vgl. Kienmandl M. (1999), S.60

²⁰⁶ Vgl. Mazumder S.K. (2011), S.3

²⁰⁷ Vgl. Kienmandl M. (1999), S.61f

²⁰⁸ Vgl. Kienmandl M. (1999), S.66

6.1.1.4 Tosbecken mit Endschwelle

Beim Tosbecken mit Endschwelle wird die Ausbildung des Wechselsprunges definiert, wodurch die Effizienz gesteigert werden und die Länge des Beckens verkleinert werden kann. Die Ausbildung der Endschwelle weist die unterschiedlichsten Geometrien und Ausbildungen auf. Unabhängig davon, wie die Schwelle ausgebildet ist, entsteht im Anschluss eine Grundwalze. Diese führt zu einer Kolkausbildung im Anschluss an das Tosbecken. Bei ungünstiger Schwellenausbildung, dies ist dann der Fall, wenn die Schwelle zu hoch ist, kann die Grundwalze das Sohlmaterial in das Tosbecken befördern, wodurch sich der Kolk immer weiter eintiefen würde. Außerdem muss bei dem Höhengsprung darauf geachtet werden, dass es nicht zu einem neuerlichen Fließwechsel kommt.²⁰⁹

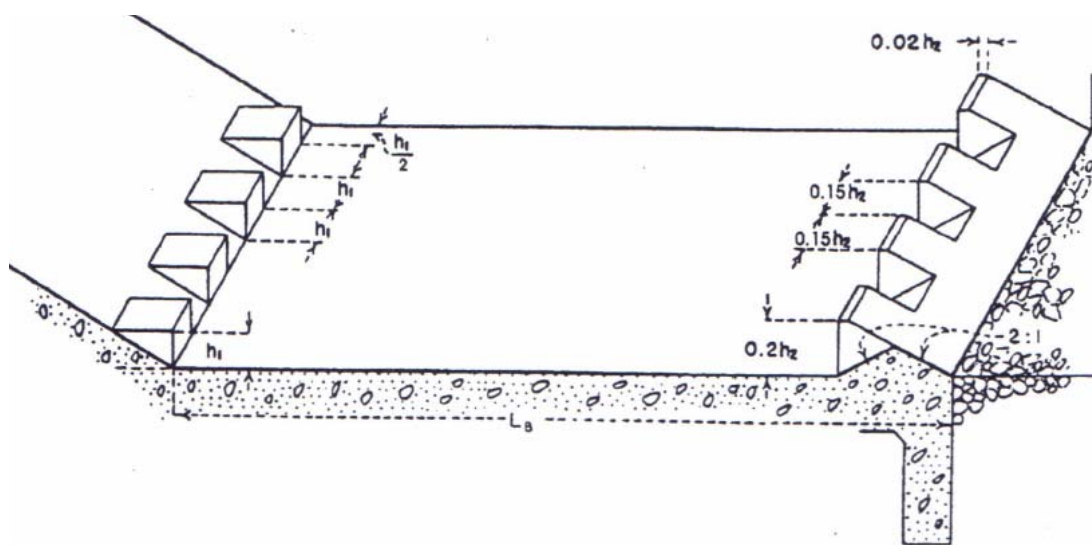


Abbildung 61: Geometrie eines Tosbeckens mit Zahnschwelle, [Kienmandl M. (1999), S.73]

Je nach Ausbildung der Sohlschwelle entstehen unterschiedliche Wechselsprungausbildungen. So führt eine durchgehende Sohlschwelle dazu, dass der Wechselsprung sowohl vor als auch hinter der Höhenordnung liegen kann. Von Zahnschwellen wird gesprochen, wenn sich der Wechselsprung vor der Schwelle befindet. Findet der Fließwechsel hinter der Zahnschwelle statt, wird von einem Störkörper gesprochen.²¹⁰

6.1.1.5 Tosbecken mit Störkörper

Tosbecken werden zur besseren Stabilisierung des Wechselsprunges und höheren Effektivität des Tosbeckens mit Störkörpern ausgeführt. Situieren werden die Störkörper im Bereich des Wechselsprunges, deshalb treten an ihnen große Kräfte und Beanspruchungen auf. Außerdem ist mit Kavitationserscheinungen zu rechnen, wenn im Tosbecken große Fließgeschwindigkeiten auftreten. Aufgrund der Kavitation ist es wirtschaftlich sinnvoller, ab einer Strömungsgeschwindigkeit von 15 [m/s] die Ausbildung von Störkörpern zu überdenken und

²⁰⁹ Vgl. Kienmandl M. (1999), S.72

²¹⁰ Vgl. Kienmandl M. (1999), S.72

eine andere Ausführung zu wählen. Eine, vor Kavitation sichere Ausführung der Störkörper wäre die Abrundung der Kanten. Allerdings ist die hydraulische Wirksamkeit dadurch nicht mehr gegeben. Mit einer Abfasung der Kanten kann die hydraulische Wirksamkeit wieder hergestellt werden.²¹¹

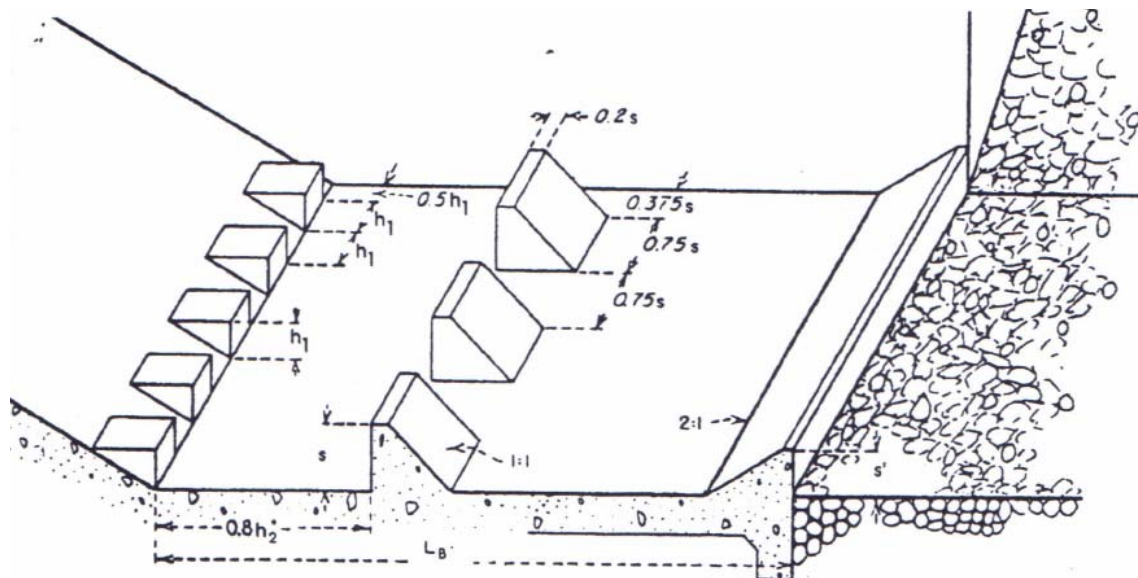


Abbildung 62: Geometrie eines Tosbeckens mit Störkörpern, [Kienmandl M. (1999), S.81]

Nachdem die unterschiedlichen Typen von Tosbecken besprochen wurden, muss nun auf ihre hydraulische Wirkungsweise und die Bemessung eingegangen werden.

6.1.2 Hydraulische Wirkungsweise und Bemessung

In weiterer Folge wird auf die hydraulische Wirkungsweise hinsichtlich der Formen der Energieumwandlung eingegangen. Außerdem wird schrittweise die Bemessung des Tosbeckens für die verschiedenen unterwasserseitigen Wassertiefen erklärt.

6.1.2.1 Hydraulische Wirkungsweise

Im Tosbecken wird die Energie, die dem Wasser über die Höhe des Stauspiegels mitgegeben wird, zu Druckenergie und die verbleibende Energie erzeugt Turbulenzen die, die Energie des Wassers zu Wärme- und Schallenergie umgewandelt wird. Durch die Energieumwandlung steigt der Wasserspiegel und die Fließgeschwindigkeit am Tosbeckenende ist ident mit jener im Unterwasser.²¹²

²¹¹ Vgl. Kienmandl M. (1999), S.79

²¹² Vgl. Mazumder S.K. (2011), S.3

6.1.2.2 Bemessung

Um den Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht zu sprengen, wird nur der Fall des Tosbeckens ohne und mit positiver Stufe für die unterschiedlichen Einstauungsgrade behandelt.

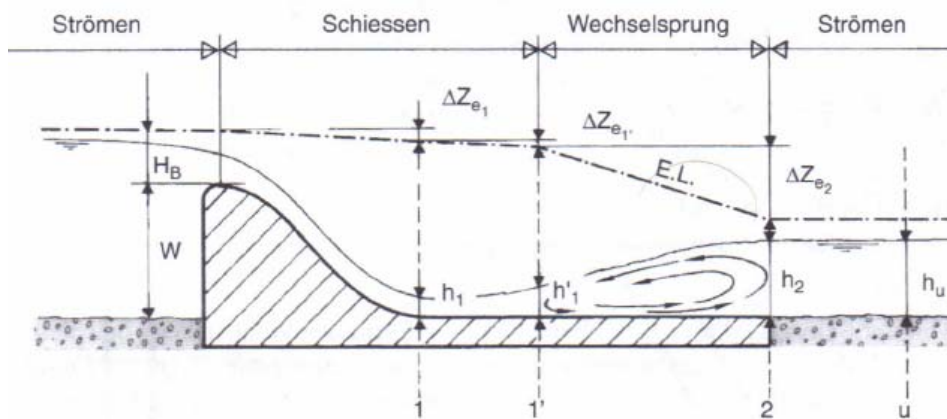


Abbildung 63: Festes Wehr; Lage des Wasserspiegels und der Energielinie, [Patt H., Gonsowski P. (2010), S.124]

Bei der hydraulischen Bemessung eines Tosbeckens wird vorausgesetzt, dass der Abfluss des Unterwassers strömend erfolgt. Dies bedeutet, dass sich am Wehrrücken am Auslass des Grundablasses meist schießender Abfluss einstellt. Unter der Bedingung kann ein Wechselsprung im Tosbecken ausgebildet und die Energie in eine andere Form umgewandelt werden. In Abbildung 63 ist ein Tosbecken mit einem Wehr dargestellt. Die Berechnung des Tosbeckens lässt sich dabei in drei Schritte unterteilen:²¹³

Der *erste Schritt* ergibt sich aus der Tatsache, dass die Energielinie am Beginn der Schwelle bekannt ist und weil schießender Abfluss herrscht, kann mit der Formel von Bernoulli die Wassertiefe h_1 berechnet werden:

$$H_B + w = h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \Delta z_{e1} \quad [\text{m}] \quad (6.1)$$

H_B ...Überfallhöhe [m]

w ...Wehrhöhe [m]

h_1 ...Wassertiefe beim Fließquerschnitt 1 [m]

v_1 ...Geschwindigkeit beim Fließquerschnitt 1 [m/s]

Δz_{e1} ...Verlusthöhe (etwa 0 bis $0,1 * v_1^2 / 2g$) [m]

Weiters wird hier die Stützkraft S_1 für einen Rechteckquerschnitt berechnet.

²¹³ Vgl. Patt H., Gonsowski P. (2010), S.124f

$$S_1 = \rho * g * \frac{b * h_1^2}{2} + \rho * Q * v_1 \quad [\text{N}] \quad (6.2)$$

ρ ...Dichte des Wassers [kg/m^3]

g ...Erdbeschleunigung [m/s^2]

b ...Wehrbreite [m]

Q ...Abfluss [kg/m^3]

Im *zweiten Schritt* wird ausgehend von einem bekannten Unterwasserspiegel h_u der Wasserspiegel am Tosbeckenende mit Hilfe der Bernoulli-Gleichung berechnet. Falls notwendig, kann die Berechnung auch abschnittsweise durchgeführt werden. Damit kann die Stützkraft S_2 ermittelt werden.²¹⁴

$$S_2 = \rho * g * \frac{b * h_2^2}{2} + \rho * Q * v_2 \quad [\text{N}] \quad (6.3)$$

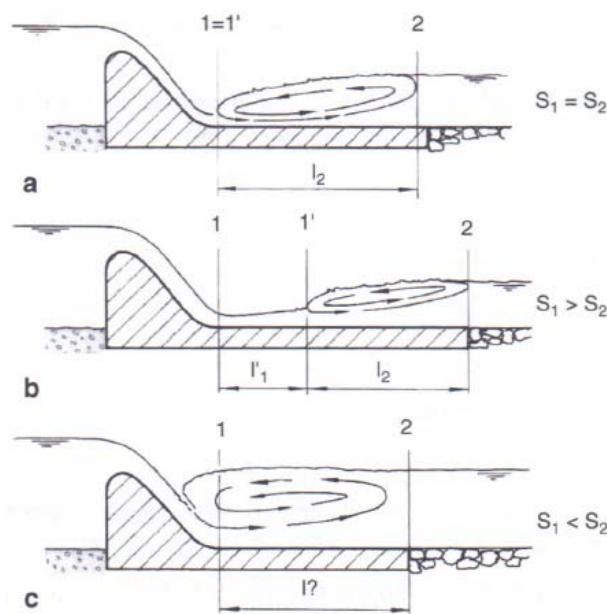


Abbildung 64: Orte des Wechselsprungs im Tosbecken, [Patt H., Gonsowski P. (2010), S.126]

Für den *dritten Schritt* werden die berechneten Stützkräfte in drei Fällen unterschieden, die in Abbildung 64 dargestellt werden. In den folgenden Punkten werden diese drei Fälle behandelt:²¹⁵

Im *Fall a)* sind die Stützkräfte bei den Querschnitten eins und zwei gleich groß, dabei konjugiert die Wassertiefe h_1 mit h_2 . Dabei kommt es zur Ausbildung des Wech-

²¹⁴ Vgl. Patt H., Gonsowski P. (2010), S.125f

²¹⁵ Vgl. Patt H., Gonsowski P. (2010), S.126f

selsprungs direkt beim Knick in die Horizontale. Die Länge des Wechselsprungs l_2 kann aus der Abbildung 66 ermittelt werden, die Tosbeckenlänge wird gleich der Länge l_2 errechnet.

$$Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{g * h_1}} \quad [\text{N}] \quad (6.4)$$

Im *Fall b)* ist die Stützkraft S_1 größer als die Stützkraft S_2 . Dies hat zur Folge, dass sich die Ausbildung des Wechselsprungs um die Länge l_1' verzögert. Das heißt die Stützkkräfte sind erst nach l_1' gleich groß. Die Länge l_1' errechnet sich dabei mit der Bernoulli-Gleichung der Wasserspiegel, bis h_1' aus der Formel (6.5) erreicht wird. Die Länge des Wechselsprungs ergibt sich analog der Formel (6.4) mit h_1' . Als Resultat der Tosbeckenlänge ergibt sich dann $l_1' + l_2$. Der *Fall b)* kann als gedrückter Wechselsprung bezeichnet werden.

$$h_1' = -\frac{h_2}{2} + \sqrt{\frac{h_2^2}{4} + \frac{2 * Q_B}{g * b^2 * h_2}} \quad [\text{m}] \quad (6.5)$$

Für den *Fall c)* zeigt sich, dass die Stützkraft S_2 größer als S_1 ist. Das führt dazu, dass der Wasserspiegel im Tosbecken ansteigt und es vom Unterwasser her eingestaut wird (siehe Abbildung 66). Da in dem Fall die Energievernichtung sehr schlecht ist und es keine Formel gibt, mit der die Tosbeckenlänge berechnet werden kann, muss ein anderer Ansatz herangezogen werden. Neben der Möglichkeit eines langen Tosbeckens kann mit Hilfe einer Gegenschwelle die notwendige Stützkraft sichergestellt werden. Dabei wird analog zu Schritt 2 die Wassertiefe h_2' am Ende des Tosbeckens bestimmt. Als nächstes wird der Tosbeckensprung geschätzt, um die Stützkkräfte S_2 und S_2' gleich setzen zu können. Anschließend wird S_1 bestimmt und mit S_2 verglichen. Für den Fall, dass die beiden Stützkkräfte nicht gleich sind, wird der Tosbeckensprung verändert und der ganze Prozess beginnt von neuem. Fall c) muss vor allem bei kleinen Höhenunterschieden beachtet werden.

$$S_2' = \rho * g * \frac{b * (h_2' + s)^2}{2} + \rho * Q * v_2' \quad [\text{N}] \quad (6.6)$$

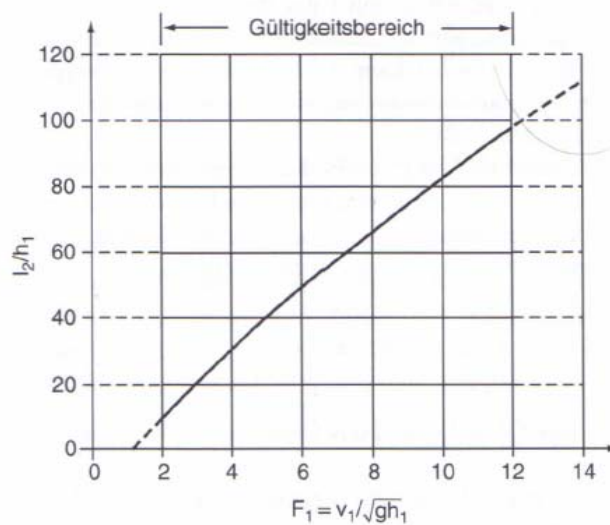


Abbildung 65: USBR-Diagramm zur Bestimmung der Wassersprunglänge l_2 in horizontalen Rechteckgerinnen, wobei für $4 < Fr_1 < 12$ näherungsweise $l_2 = 6 \cdot h_2$ gilt, [Patt H., Gonsowski P. (2010), S.127]

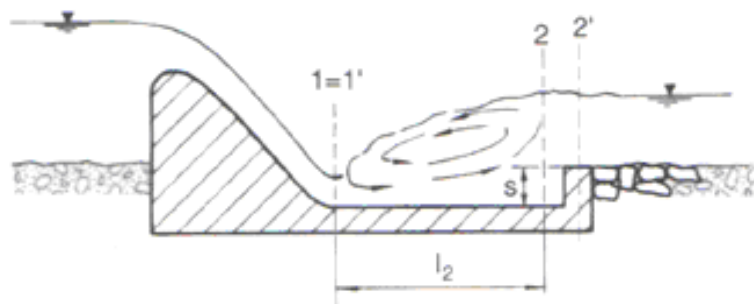


Abbildung 66: Tosbecken mit Gegenschwelle, [Patt H., Gonsowski P. (2010), S.127]

Nun sollen noch die Bedingungen für eine Endschwelle angeführt werden. Damit es nicht zu einem neuerlichen Fließwechsel der die ankommende Strömung die Sohlschwelle einfach überspringt, muss die Bedingung aus Formel (6.7) erfüllt werden. Dann kann die optimale Sohlprunghöhe mit Formel (6.8) berechnet werden.²¹⁶

$$\frac{s}{h_1} < \frac{1}{6} * Fr_1^{5/3} \quad (6.7)$$

$$s_{opt} = h_1 + \frac{h_1}{200} * Fr_1^{2,5} \quad [m] \quad (6.8)$$

6.1.3 Zusätzliche Maßnahmen für eine bessere Energieumwandlung

Für die Erreichung einer besseren Energieumwandlung existieren verschiedene Möglichkeiten, wie beispielsweise die Aufweitung des Tosbeckens, die Ausbildung einer Gegenstromschwelle zur Umlenkung der Strömung oder den Einbau von Störkörpern in das Tosbecken.

²¹⁶ Vgl. Kienmandl M. (1999), S. 72

6.1.3.1 Aufweitung des Tosbeckens

Bei der Aufweitung des Tosbeckens wird dem Ausfluss mehr Platz gegeben, wodurch sich die Strömung aufweitert, an den Seiten reflektiert wird und in der Mitte zusammenprallt. Abbildung 67 zeigt mögliche Formen der Aufweitung, dabei ist der Bereich eins der Zuleitungskanal. Der zweite Bereich ist der Aufweitungsbereich zwischen dem runden und dem rechteckigen Kanal. Der dritte Bereich ist der Abflusskanal. Die Aufweitung wird durch die Division der unterwasserseitigen durch die oberwasserseitige Breite erreicht.²¹⁷

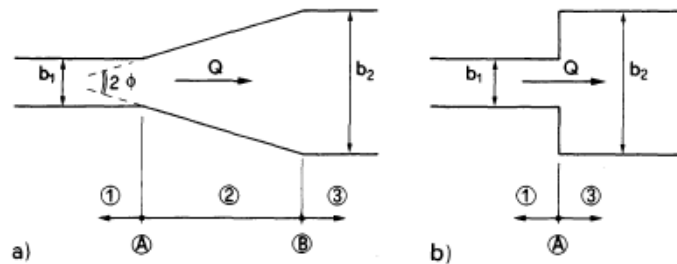


Abbildung 67: Verschiedene Aufweitungsmöglichkeiten, [Bremen R. (1990), S. 8]

Es kann zwischen drei verschiedenen Typen des Wechselsprungs unterschieden werden:²¹⁸

- Der abwehrende Wechselsprung wird normalerweise durch die Expansion des Kanals nicht beeinflusst. Er hat eine symmetrische Ausbildung, auch die Geschwindigkeitsverteilung ist gleichmäßig.
- Der räumliche Wechselsprung wird durch einen ungleichförmigen Abfluss charakterisiert. Dabei entsteht ein wesentlich längerer Wechselsprung als bei üblichen Wechselsprungen. In Abbildung 68 werden die unterschiedlichen Wechselsprungausbildungen angeführt. Eine Reduzierung des Öffnungswinkels führt allerdings nicht zu einer Verbesserung der Wechselsprungsbedingungen.

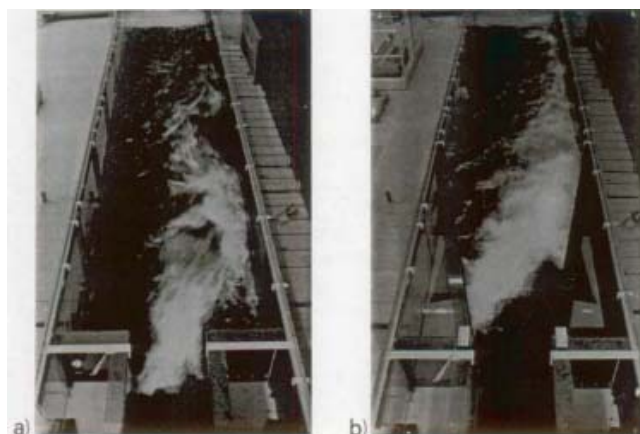


Abbildung 68: Räumlicher Wechselsprung in plötzlicher und allmählicher Ausbildung, [Bremen R. (1990), S.21]

²¹⁷ Vgl. Bremen R. (1990), S.7

²¹⁸ Vgl. Bremen R. (1990), S.25

- Der Übergangswechselsprung weist Eigenschaften des normalen und des räumlichen Wechselsprunges auf. Diese Form kennzeichnet sich durch eine relativ stabile Wechselsprungposition aus, die normal auf die Kanalachsen situiert ist und immer oberwasserseitig der Expansion zu finden ist (siehe Abbildung 69). Die kontinuierliche Aufweitung führt zu einer Verbesserung der Abflussbedingungen, wobei die Abflussgeschwindigkeit noch immer nicht gleichmäßig verteilt ist.

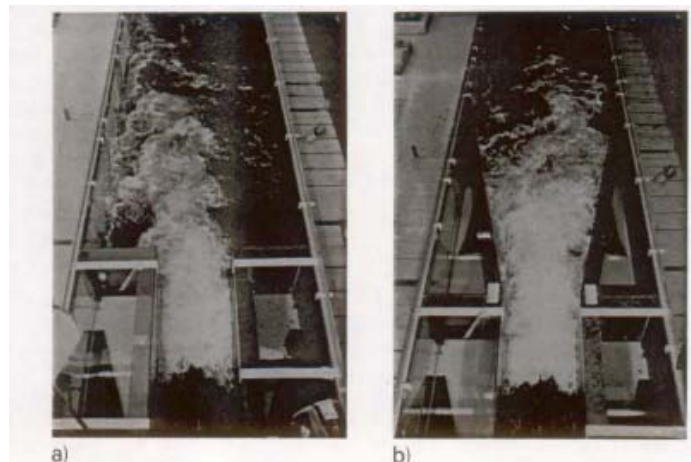


Abbildung 69: Übergangswchselsprung in plötzlicher und allmählicher Ausbildung, [Bremen R. (1990), S.23]

Für weitere Informationen muss auf die einschlägige Literatur verwiesen werden.

6.1.3.2 Gegenströmung

Die Ausbildung einer Gegenströmung führt zu der Reduzierung der Geschwindigkeit im Tosbecken. Dadurch steigt die Wasserhöhe an und es kann eine größere Stützkraft angesetzt werden wodurch die Energieumwandlung auf einer kürzeren Strecke möglich ist. In Abbildung 70 ist eine Ausbildung eines Tosbeckens mit einer Gegenstromschwelle dargestellt.²¹⁹

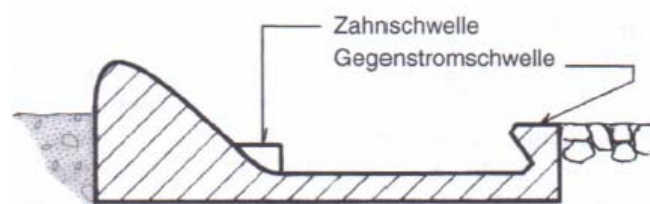


Abbildung 70: Tosbecken mit Gegenstromschwelle und Zahnschwelle, [Patt H., Gonsowski P. (2010), S.128]

²¹⁹ Vgl. Patt H, Gonsowski P. (2011), S.128

6.1.3.3 Störkörper

Für eine Verbesserung der Energievernichtung können in Tosbecken auch Störkörper eingebaut werden. An diesen prallt das anströmende Wasser ab und vernichtet dabei einen Teil der Energie. Es gibt die unterschiedlichsten Ausführungsvarianten, weswegen hier nicht weiter darauf eingegangen wird.

Neben den Tosbecken sind Sprungschanzen ein weit verbreitetes Instrument der Energieumwandlung, weshalb sich das nächste Unterkapitel 6.2 damit beschäftigt.

6.2 Sprungschanzen

Für den Fall, dass mit sehr großen Abflussmengen gerechnet werden muss, kann die Ausbildung eines Tosbeckens erhebliche Längenausdehnungen annehmen und ein hoher Unterwasserspiegel zur Stabilisierung des entstehenden Wechselsprungs erforderlich werden. In so einem Fall stellt die Ausbildung einer Sprungschanze eine praktische Alternative dar. Dabei zeigen sich im Betrieb zwei wesentliche Prinzipien. Das erste wäre die Zerstäubung des Wasserstrahles in der Luft, dabei kommt es zur Abbremsung des Wassers durch den Luftwiderstand. Der zweite Punkt betrifft das Auftreffen des Wasserstrahls auf das Wasser, dabei erfolgt die Energieumwandlung durch eben das Auftreffen des Wasserstrahles auf der Wasseroberfläche und der Gerinnesohle. Im Bereich des auftreffenden Wasserstrahles wird ein Kolk gebildet, der mit der Zeit eine große Tiefe erreichen kann. Deswegen muss die Sohle aus einem festen Felsboden bestehen, außerdem ist eine entsprechende Wurfweite erforderlich, um den notwendigen Abstand vom Auswurfbauwerk und der Talsperre zu erreichen.²²⁰ Für weitere Informationen über Kolke sei hier auf Kapitel 6.2.3 verwiesen.

In Abbildung 71 ist eine Sprungschanze mit den wesentlichen Zonen für einen Hochwasserüberfall angegeben. Die erste Zone wird nicht weiter behandelt, da im Fall eines Grundablasses keine Schussrinne verwendet wird. In weiterer Folge soll hier kurz auf die Zonen zwei bis fünf eingegangen werden.²²¹

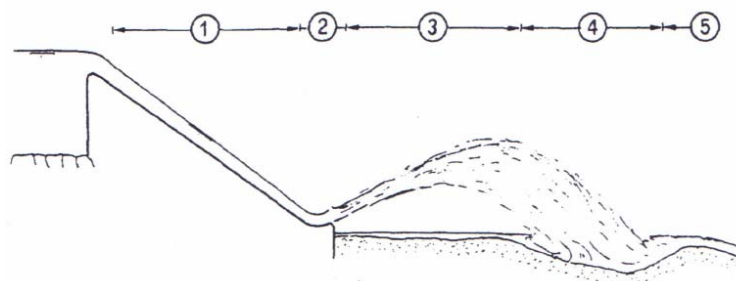


Abbildung 71: Klassische Sprungschanze mit Einteilung in Zonen, [Kienmandl M. (1999), S.86]

²²⁰ Vgl. Kienmandl M. (1999), S.86

²²¹ Vgl. Kienmandl M. (1999), S.86f

- *Zone 2 - Abwurf:* Für die Energieumwandlung ist dieser Bereich von entscheidender Bedeutung, denn hier wird dem Abfluss durch die Umlenkung die Wurfweite und die Zerstäubung eingeprägt. Allerdings entstehen durch einen Umlenkradius große Kräfte auf die Konstruktion, was für die Langlebigkeit des Abwurfbereiches problematisch ist.
- *Zone 3 - Wurfstrahl:* Hier erfolgt die Zerstreung des Wasserstrahls und somit die Abbremsung durch den Luftwiderstand. Diese Wirkungsweise ist von der Zerstreung abhängig, die Randbereiche können sehr stark durch den Luftwiderstand beeinflusst werden, während der Kern des Wurfstrahles abgeschirmt wird. Durch die Zerstreung können die Wassertropfen über weite Strecken abtransportiert werden. Dies ist vor allem bei der Stationierung zu beachten, da sich bei Straßen im Winter Glatteis bilden kann und elektrische Anlagen auf Feuchtigkeit empfindlich reagieren.
- *Zone 4 - Kolkbildung:* Beim Kontakt des Wasserstrahles mit der Wasseroberfläche wird hier der größte Teil der Energie vernichtet, nämlich um die Hälfte, wodurch es hier auch zur Kolkbildung kommt.
- *Zone 5 - Wechselsprung:* Im Anschluss an den Auftreffbereich bildet sich ein Wechselsprung aus, der aber nur mehr einen kleinen Einfluss auf den Energieabbau hat.

Im folgenden Unterkapitel werden der Abwurf, die Wurfweite, die Kolkbildung und der Wechselsprung diskutiert.

6.2.1 Abwurf

Bei der Sprungschanze wird der Abwurf in der Achse des Freispiegelstollens umgelenkt. Für den Ausrundungsradius wird ein Kreisbogen mit einem Radius von 20 bis 40 Metern verwendet. Kleinere Radien müssen durch die entstehende große Druckbelastung ausgeschlossen werden. Je größer der Radius gewählt wird, umso geringer werden die Umlenkkräfte, allerdings führt dies zu einer unwirtschaftlichen Konstruktion.²²²

Die folgenden Formeln geben eine Näherung für den Radius an. Mit Hilfe der Abbildung 72 ist es möglich die meisten Bestandteile der Formeln zu erklären. Dabei muss angeführt werden, dass diese Formeln lediglich einen Anhaltspunkt für die Größe des Radius liefern. Für genauere Erkenntnisse bedarf es der Durchführung eines Modellversuches.²²³

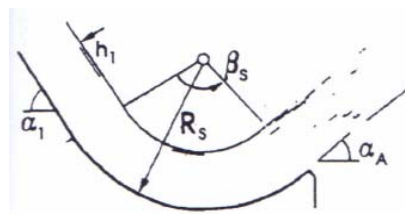


Abbildung 72: Bezeichnungen für den klassischen Abwurf, [Kienmandl M. (1999), S.88]

²²² Vgl. Kienmandl M. (1999), S.88

²²³ Vgl. Kienmandl M. (1999), S.89

$$R_s = 17 * (\sqrt{Fr_1 - 2}) * h_1 \quad [\text{m}] \quad (6.9)$$

$$R_s = 2 * \frac{q * V_1}{h_{p,zul}} \quad [\text{m}] \quad (6.10)$$

Fr_1 ...Froudezahl am Beginn der Umlenkung [-]

h_1 ...Wassertiefe am Beginn der Umlenkung [m]

q ...Durchfluss pro Meter Breite [$\text{m}^3/(\text{s m})$]

V_1 ...Gemittelte Geschwindigkeit im Zulaufquerschnitt [m/s]

$h_{p,zul}$...Zulässige Druckhöhe auf die Sohle der Umlenkung [m]

Der Abwurfwinkel α_a , wie in Abbildung 72 dargestellt, wird üblicherweise in einem Wertebereich von 20 bis 40 Grad ausgeführt. Eine steilere Ausführung würde zwar zu einer besseren Energievernichtung führen, würde aber mit übermäßigem Mehraufwand hinsichtlich der Konstruktionskosten den Vorteil der Effizienz zunichtemachen. Falls der Winkel zu klein gewählt wird, ist die Flugbahn zu kurz, wodurch es zur Gefährdung durch einen Kolk kommen könnte. Für den Fall, dass in der Achse des Stollens der Platz für den Wurfstrahl nicht ausreicht, kann dieser durch eine Umlenkung im Bereich der Schanze so weit abgelenkt werden, dass die Flugbahn nicht gestört wird.²²⁴ In Abbildung 73 ist ein Modellversuch für eine Ablenkung der Sprungschanze dargestellt.²²⁵



Abbildung 73: Schanze mit Ablenkung, [Schneider et al. (2006), Seite 13]

Wichtig beim Abwurf nach Freispiegelstollen ist eine genaue Herstellung der Oberfläche, denn durch die großen Abflussgeschwindigkeiten können sehr leicht Kavitationserscheinungen auftreten. Nachfolgend werden zwei Beispiele angeführt, wie die Ausbildung einer Ab-

²²⁴ Vgl. Kienmandl M. (1999), S.89

²²⁵ Vgl. Schneider J. et al. (2006), Seite 13

wurfschanze an zwei verschiedenen Sperren ausgeführt wurde. In Abbildung 74 sieht man die Ausführung am Glen Canyon Dam und in der Abbildung 75 jene am Yellowtail Dam.²²⁶

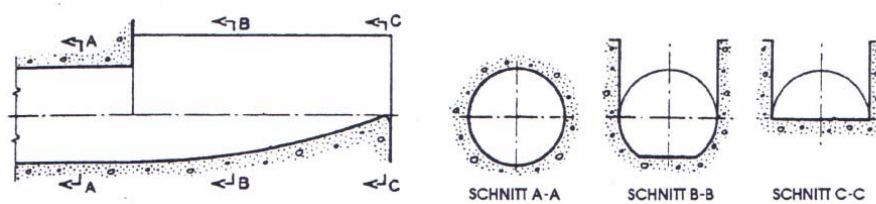


Abbildung 74: Übergang vom Stollen zur Sprungschanze mittels Verschneidung zweier Zylinder, [Kienmandl M. (1999), S.90]

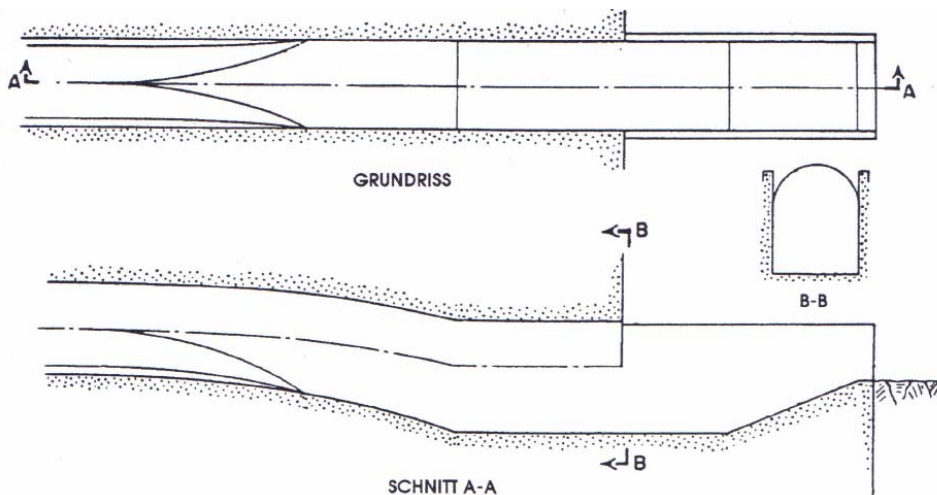


Abbildung 75: Übergang vom Stollen zur Sprungschanze über ein Hufeisenprofil, [Kienmandl M. (1999), S.90]

6.2.2 Näherungsweise Berechnung der Wurfweite

Um die Kolkausbildung, die durch einen Wurfstrahl erzeugt wird, zu berechnen, ist es zuerst notwendig, die durch den Wurfstrahl bestrichene Bahn zu berechnen. Damit kann auf den Bereich des entstehenden Kolkes geschlossen werden. Für die, in Abbildung 76 dargestellte Wurfparabel kann durch die Theorie der Kinematik die Formel (7.11) für den Wurfstrahl angegeben werden.²²⁷

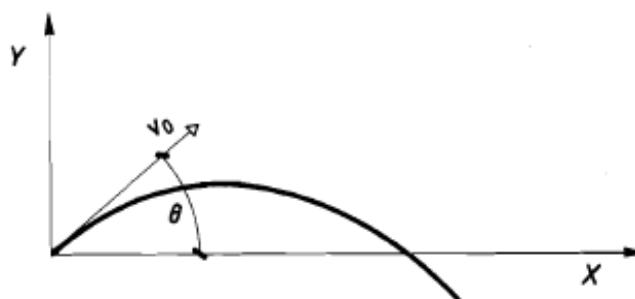


Abbildung 76: Wurfparabel, [Whittaker J.G., Schleiss A. (1984), S.10]

²²⁶ Vgl. Kienmandl M. (1999), S.90

²²⁷ Vgl. Whittaker J.G., Schleiss A. (1984), S.10

$$y = x \tan \theta - \frac{g * x^2}{2 * v_0^2 * \cos^2 \theta} \quad [\text{m}] \quad (6.11)$$

Ausgehend von der Formel (6.11) kann die Wurfweite L_T eines Wurfstrahls durch die in Abbildung 77 dargestellte Situation umgeformt werden. Unter der Annahme, dass keine Energievernichtung in der Leitung auftritt, errechnet sich die Austrittsgeschwindigkeit v_0 mit Formel (6.13).

$$L_T = z_0 \sin(2\theta) + 2 * \cos(\theta) * \sqrt{z_0 (z_0 * \sin^2(\theta) + z_1)} \quad [\text{m}] \quad (6.12)$$

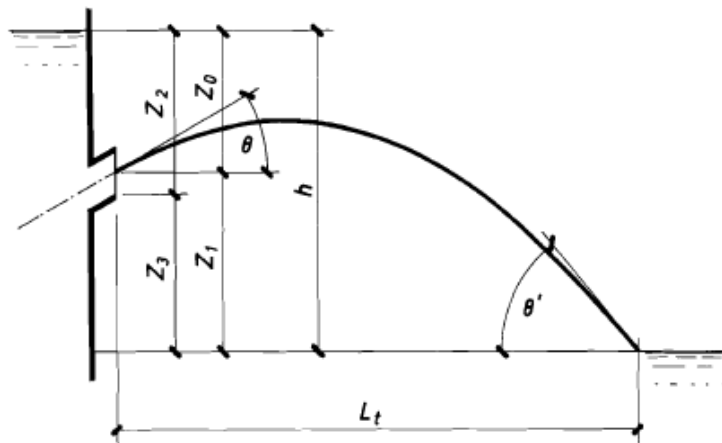


Abbildung 77: Parameter für den Wurfstrahl, [Whittaker J.G., Schleiss A. (1984), S.10]

$$v_0 = \sqrt{2 * g * z_0} \quad [\text{m/s}] \quad (6.13)$$

Die Formel (6.12) lässt sich zu Formel (6.14) umformen:

$$\frac{L_T}{h} = \frac{z_0}{h} \sin(2\theta) + 2 * \cos(\theta) * \sqrt{\frac{z_0}{h} - \left(\frac{z_0}{h}\right)^2 * \cos^2(\theta)} \quad [-] \quad (6.14)$$

Der Eintrittswinkel θ' des Wurfstrahles in das Unterwasser lässt sich durch die Gleichungen (6.11) und (6.12) berechnen.

$$\tan(\theta') = \frac{1}{\cos(\theta)} \sqrt{\sin^2(\theta) + \frac{z_1}{z_2}} \quad [-] \quad (6.15)$$

Die hier dargestellte Berechnung gilt für einen idealen Zustand. Effekte, wie der Luftwiderstand, die Zerstäubung des Wurfstrahls sowie die Belüftung werden vernachlässigt. Mittlerer weile sind durch Versuche und Forschungsaktivitäten Berechnungsmethoden gefunden worden, bei denen diese Einflüsse Berücksichtigung finden.²²⁸

²²⁸ Vgl. Whittaker J.G., Schleiss A. (1984), S.11

6.2.3 Kolkbildung

Die Kolkbildung ist abhängig von der Energie, die dem Abwurfstrahl noch zur Verfügung steht und den geologischen Bedingungen des Unterwassers. Am Beispiel der Kariba-Sperre, sie liegt an der Grenze zwischen Simbabwe und Sambia, kann daraus abgeleitet werden, dass auch bei einem guten bis sehr guten Untergrund die Dauerbelastung durch einen Wurfstrahl zu immensen Abmessungen des Kolks führen kann. Der Kolk weist derzeit bereits, nach wenigen Jahren des Betriebes eine Tiefe von 70 Metern auf.²²⁹

Die Abbildung 78 zeigt den, im Zuge eines Versuchs entstehenden Kolk. Bei zunächst flachem Auftreffen des Wurfstrahles nach rechts vergrößert sich der Einfallswinkel bis auf 60 Grad. Es ist zu erkennen, dass sich bei der linken Abbildung der Kolk in der Länge ausdehnt, wohingegen es auf der rechten Seite zu einer Energieumwandlung auf kurzem Weg kommt, wobei allerdings mit einer Eintiefung des Kolks gerechnet werden muss.²³⁰

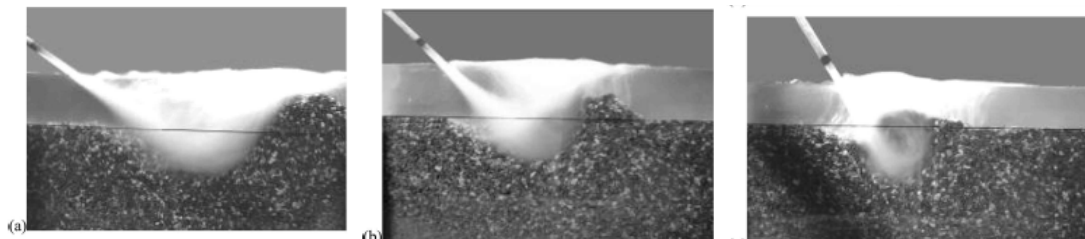


Abbildung 78: Kolkbildung bei verschiedenen Eintauchwinkel (30°, 45° und 60°) bei einem Wert von 10 für die Abflusstiefe durch den Strahldurchmesser, [Pagliara S. et al. (2008), S.1279]

Außerdem spielt wie Abbildung 79 zeigt, auch der Abwurfstrahl und das Verhältnis der Abflusstiefe zum Durchmesser des Wurfstrahls eine Rolle auf die Kolkbildung. Im Zuge eines durchgeführten Versuches konnte gezeigt werden, dass ein dynamischer Wurfstrahl weitaus größere Auswirkungen auf den Untergrund aufweist als ein statischer.²³¹

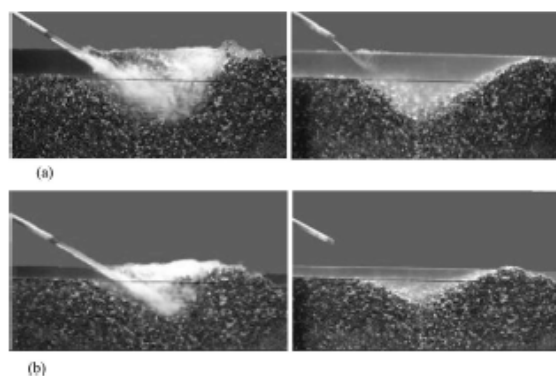


Abbildung 79: Vergleich zwischen dynamischen (links) und statischem (rechts) Wurfstrahl für unterschiedliche Verhältnisse der Abflusstiefe zum Strahldurchmesser, [Pagliara S. et al. (2008), S.1280]

229 Vgl. De Cesare G. et al. (2012), S.72

230 Vgl. Pagliara S. et al. (2008), S.1278f

231 Vgl. Pagliara S. et al. (2008), S.1279f

In diesem Kapitel wurde versucht auf zwei verschiedene Formen der Energieumwandlung einzugehen, wobei die wichtigsten Punkte des Tosbeckens die unterschiedlichen Ausführungsvarianten mit dem dazugehörigen Vorgehen bei der Bemessung sind. Bei der Sprungschanze sind die Kolkbildung und die Ermittlung der Wurfweite von entscheidender Bedeutung. Im inhaltlichen letzten Kapitel werden die beim Grundablass, im Bereich des Freispiegelstollens auftretenden hydraulischen Phänomene behandelt, um das Gesamtthema der Grundablässe abzurunden.

7. Hydraulische Phänomene

Folgende hydraulische Phänomene sollen im Kapitel sieben besprochen werden: Kavitation, Stoßwellen und Belüftung.

7.1. Kavitation

Im folgenden Kapitel wird das Phänomen der Kavitation behandelt. Außerdem wird in weiterer Folge auf die unterschiedlichen Methoden zur Kavitationsreduktion eingegangen und die Mitführung der Luft im Abfluss näher beleuchtet.

7.1.1 Das physikalische Phänomen

In den vorliegenden Unterkapiteln erfolgt zunächst die Definition von Kavitation. Danach wird der Gasdruck im Bezug auf die möglichen Phasenwechsel der Temperatur oder des Drucks behandelt. Im Anschluss wird die Bildung von Kavitation im Wasserbau erklärt, danach werden die unterschiedlichen Situationen, die Kavitation begünstigen sowie die Schäden, die durch Kavitation verursacht werden, diskutiert.

7.1.1.1 Definition

Kavitation bedeutet das Auftreten von Gasblasen und –einschlüssen innerhalb eines, zu nächst homogenem flüssigem Medium, wobei das Auftreten in sehr verschiedenen Situationen geschieht. In Abhängigkeit der Fließkonfiguration können verschiedene Erscheinungsformen auftreten. Um eine Abgrenzung der möglichen Fälle herbeizuführen, ist nachfolgende Definition von Michel J.M. heranzuziehen: „Kavitation ist das Zusammenbrechen eines flüssigen Mediums unter großem Druck.“²³²

Diese Beschreibung begründet die Relevanz der Kavitation für das Feld und die Methoden der Kontinuumsmechanik. Sie ist für Fälle geeignet, bei denen sich die Flüssigkeit in Ruhe oder im Fließen befindet.²³³

Im weiteren Verlauf soll lediglich auf die Flüssigkeit in Bewegung eingegangen werden.

7.1.1.2 Der Gasdruck

Das Wasser besteht aus zwei Molekülen Wasserstoff und einem Molekül Sauerstoff. Die Wassermoleküle orientieren sich untereinander anhand der Elektronenorbitale. Durch die Wasserstoffbrückenbindung entstehen Cluster, die für die physikalischen Eigenschaften des Wassers verantwortlich sind. Tritt ein starker Druckabfall auf, wird die Bindung der Wassermoleküle zueinander aufgebrochen und das Wasser geht von dem flüssigen in den gasförmigen

²³² Michel J.M.(2001), S.1

²³³ Vgl. Michel J.M.(2001), S.1

gen Zustand über. Im Zuge des Phasenüberganges entstehen die Kavitationsblasen. Als Dampfdruck wird der kritische Druck beim Übergang zwischen den Phasen bezeichnet. Die Verschmutzung des Wassers hat einen wesentlichen Einfluss auf die Kavitationsgefährdung. Je stärker die Verschmutzung ist, desto leichter gehen die Bindungen zwischen den Molekülen verloren und damit steigt die Kavitationsgefährdung.²³⁴

Der erste Grenzwert der für den Phasenwechsel zur Verfügung steht, ist durch das (siehe Abbildung 80) thermodynamische Diagramm des Phasenwechsels dargestellt. Interessant daran ist, dass die Kurve von T_r C, die die Punkte T_r und C verbindet, den flüssigen und den gasförmigen Bereich einer Flüssigkeit teilt. Bei Überschreitung dieser Linie entsteht eine reversible Transformation unter statischen oder Gleichgewichtsbedingungen. In Folge dessen kann die Flüssigkeit verdampfen oder kondensieren und zwar bei einem Wert p_v , welcher eine Funktion der Temperatur ist. Um Kavitation zu erzeugen, muss der Druck bei ungefähr gleichbleibender Temperatur reduziert werden. Dabei kommt es zu einem ersten Anzeichen von Kavitation, das ähnlich dem Kochen von Wasser ist, lediglich mit einem anderen Entstehungsprozess.²³⁵

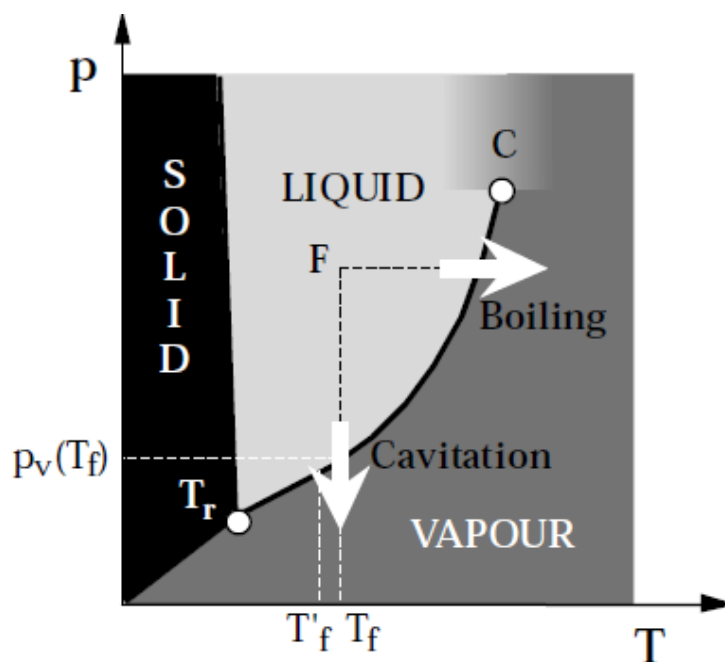


Abbildung 80: Diagramm des Phasenwechsels, [Michel (2001), S.2]

In der Tat ist der Weg im $T - p_v$ Diagramm praktischerweise für die meisten Fälle isotherm. Mit dem lokalen Druck, der durch die Fließdynamik beeinflusst wird, kann Kavitation erzeugt werden, wobei lediglich ein kleiner Beitrag von Wärme notwendig ist um ein signifikantes Volumen von Gas herzustellen. In manchen Fällen ist der Hitzetransfer jener, der für den Verdampfungprozess benötigt wird. Ist im Phasenwechsel die Temperatur T'_f niedriger als

²³⁴ Vgl. Pfister M. (2008), S.15

²³⁵ Vgl. Michel J.M. (2001), S.2

die umgebende Flüssigkeitstemperatur T_f , kann die Temperaturdifferenz ($T_f - T'_f$) als „thermische Verspätung“ zur Kavitation bezeichnet werden.²³⁶

Es gibt verschiedene Modelle der gasförmigen Kavitation, die in verschiedenen Formen in ihrer Entstehung und der weiteren Entwicklung nachstehend aufgelistet werden:²³⁷

- Kurzlebig isolierte Blasen: diese Blasen treten in Bereichen mit niedrigem Druck als ein Resultat des raschen Wachstums von sehr kleinen Luftblasen in der Flüssigkeit auf. Die Blasen werden konvertiert durch den Flüssigkeitsfluss und verschwinden anschließend, wenn die Druckgradienten zusammentreffen.
- Angefügte Kavitation oder Plattenkavitation: Diese Art der Kavitation ist oft an den Führungskanten von Körpern wie an Klingen oder an Folien an der Oberseite, das heißt auf der Niederdruckseite, anzutreffen.
- Kavitationswirbel: tritt vor allem bei den Ablösungen von Schiffsschrauben auf.

7.1.1.3 Kavitationsausbildung

Die Kavitationsblasen entwickeln sich durch die Präsenz von gelösten Gasen oder verdampfenden Flüssigkeiten. Dabei entsteht, wenn der vorliegende Druck kleiner als der Sättigungsdampfdruck des Gases ist, die gasförmige Kavitation, oder bei Unterschreitung des Dampfdruckes der Flüssigkeit die dampfförmige Kavitation.²³⁸ Der Kern aus Gas oder Luft muss in der Flüssigkeit gelöst sein. Am häufigsten tritt Kavitation dort auf, wo niedrige Drucke bei gleichzeitig hohen Geschwindigkeiten auftreten. Das ist typischerweise an den Rändern von hydraulischen Teilen, wie Sohlen, Schussrinnen und Grundablässen der Fall.²³⁹

Der Schaden durch Kavitation entsteht durch den Anstieg des Druckes im fließenden Wasser unterwasserseitig der Entstehungszone, wo es zu einem Zusammenfallen der Druckblasen und bei hohen Frequenzen zu Implosionen kommt. Es sind Implosionsdrücke in einer Höhe von 1500[MPa] nachgewiesen worden.²⁴⁰

Die, in Abbildung 81 dargestellte abgeflachte instabile Dampfblase tritt auf, wenn es zur Implosion in der Nähe eines festen Randes kommt. Die Blase verliert ihre runde Form, wenn der Abstand zum Rand kleiner als der vierfache Radius der Blase wird.²⁴¹ Infolge der Komprimierung der Blase entsteht eine Beschleunigung der Oberfläche nach innen, was einen zur Sohle hin gerichteten Flüssigkeitsstrahl zur Folge hat.²⁴² Die Entwicklung der Geschwindigkeit des Wasserstrahls ist abhängig vom Abstand zur Berandung und dem maximalen Radius der

²³⁶ Vgl. Michel J.M. (2001), S.3

²³⁷ Vgl. Michel J.M. (2001), S.4

²³⁸ Vgl. Totten G.E., et al. (2003) in Kramer K. (2004), S.5

²³⁹ Vgl. Kramer K. (2004), S.5

²⁴⁰ Vgl. Lesleighter E.J. (1988) in Kramer K. (2004), S.5

²⁴¹ Vgl. Isselin J.C., et al. (1998) in Pfister M. (2008), S.16

²⁴² Vgl. Plessner M.S., Chapman R.B. (1971) in Pfister M. (2008), S.16

Blase. Erreicht das Verhältnis zwischen Abstand zu dem Radius den Wert 0,75, kann eine maximale Geschwindigkeit des Flüssigkeitsstrahles von 140m/s auftreten. Dem Wasserstrahl werden ungefähr 80 bis 85% der Energie der Blase zuteil.²⁴³



Abbildung 81: Nichtsphärischer Kavitationsblasenkollaps unter Bildung des Flüssigkeitsstrahls, [Suslick (1989), in Pfister (2008)]

In Abbildung 82 ist zu erkennen, wie es zum Wegspritzen des Wassers beim Auftreffen des Wasserstrahles auf die Oberfläche kommt. Der Flüssigkeitsstrahl wird durch eine energiereiche Rotationsströmung gebildet, die durch den zurückbleibenden hohlzylindrischen Blasenkörper entsteht. Der zweite Zusammensturz des Dampfinges ist hauptverantwortlich für den, durch Kavitation erzeugten Schaden.²⁴⁴

Wenn die Implosionen an festen Rändern entstehen, beispielsweise an der Betonoberfläche einer Rinne, dann kann der enorme Druck zu Ermüdungsbrüchen und damit zu einem Austrag kleiner Mengen des Materials führen. Bei oftmaligen Wiederholungen kann dieser Vorgang zu einem beträchtlichen Schaden an der Rinne oder Stollen führen.²⁴⁵ Durch das Aufbrechen der Oberfläche, wird eine größere Rauigkeit erzeugt, die Schäden in einem noch größeren Umfang nach sich ziehen.

Der wichtigste Baustoff des Wasserbaus ist Beton. Eine Belastung durch Kavitation führt zur Zerstörung der Zementoberfläche. Nach Abplatzen der Oberfläche wird die Körnung des Betons freigelegt. Die rauhere Oberfläche führt zu einer vermehrten Ausbildung von Kavitation. Außerdem kann es zu einem Auswaschen der Zuschlagsstoffe durch das nun angreifende Wasser kommen. Bei fortschreitendem Verlust der Körnungen kann die Betonstruktur im Laufe der Zeit versagen.²⁴⁶

²⁴³ Vgl. Isselin J.C., et al. (1998) in Pfister M. (2008), S.16

²⁴⁴ Vgl. Brujan E.A., et al. (2002) in Pfister M. (2008), S.16

²⁴⁵ Vgl. Kells R.A. and Smith C.D. (1991) in Kramer K. (2004), S.5

²⁴⁶ Vgl. Pfister M. (2008), S.17

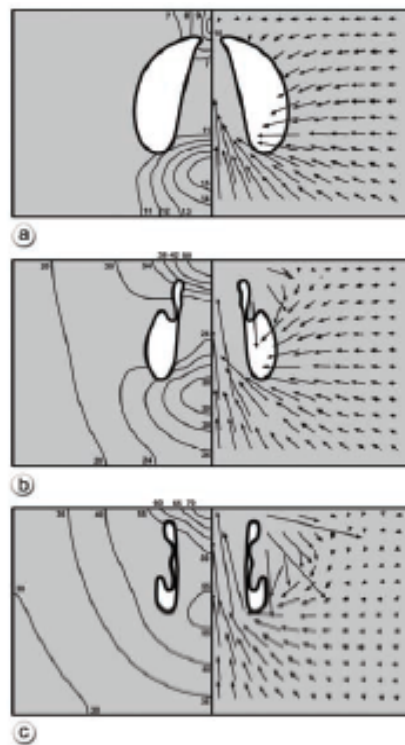


Abbildung 82: Querschnitt durch eine asymmetrisch zusammenstürzende Kavitationsblase an einer Berandung (Oberkante Bildausschnitt). Entwicklung des Geschwindigkeitsfelds rechts und des Druckfelds links. (a) bis (c) stehen für nichtdimensionale Zeitschritte [Burjan et al. (2002) in Pfister (2008), S.17]

Grundsätzlich können Blasenimplosionen mit zwei verschiedenen Versagensdynamiken unterschieden werden:²⁴⁷

- Die Schockwellentheorie besagt, dass die Kavitationsblasen in Regionen mit höherem Druck wandern, der Blasendurchmesser nimmt ab, erreicht einen minimalen Wert und wächst dann wieder oder schnell zurück.
- Ein oftmals verwendeter Zugang ist die Annäherung über sogenannte „Micro-Jets“. Diese werden durch den asymmetrischen Kollaps einer einzelnen Blase erzeugt. Die Geschwindigkeiten dieser „Micro-Jets“ sind groß genug, um das Material zu schädigen.

Es existieren unterschiedliche Theorien über das mögliche Auftreten der Kavitation. Meist werden, basierend auf der Observation der Fließgeschwindigkeit, Rückschlüsse über das Versagen getroffen. Ein vertrauenswürdiger Ansatz für die Ermittlung des Risikos der Kavitation ist der Bezug auf die Kavitationszahl σ . Diese Kavitationszahl wird von der Bernoulligleichung abgeleitet und ist ebenfalls als Thomazahl bekannt. Sie ist definiert durch:²⁴⁸

²⁴⁷ Vgl. Falvey H.T. (1990) in Kramer K. (2004), S.6

²⁴⁸ Vgl. Kramer K. (2004), S.6

$$\sigma = \frac{P_0 - P_v}{\rho \frac{\bar{u}^2}{2}} \quad (7.1)$$

\bar{u} ...mittlere Fließgeschwindigkeit

ρ ...Dichte des Wassers

p_v ...Dampfdruck

p_0 ...lokaler Druck

Bei einer kleinen Thomazahl ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass Schäden durch Kavitation auftreten. In Tabelle 5 sind die verschiedenen Grenzwerte für das Eintreten der Kavitation angegeben.

7.1.1.4 Typische Situationen, die Kavitation begünstigen

Hier sollen verschiedene Situationen aufgezeigt werden, die Kavitation begünstigen:²⁴⁹

- Die Wandgeometrie bringt lokale Oberwerte und lokale Unterdrücke in einem Fluss der größtenteils gleichmäßig ist mit sich. Dies ist vor allem der Fall bei Einschnürungen des Querschnitts oder bei Krümmungen, die der Stromlinie eingepreßt werden.
- Die Scherzone zwischen benachbarten Flüssen, die unterschiedliche Geschwindigkeiten aufweisen, führt zu großen turbulenten Druckschwankungen.
- Wände mit unsteter Rauigkeit, unabhängig davon ob es sich um Ränder von Schussrinnen oder um Wände von Grundablässen handelt, führen dazu, dass lokale Wirbel erzeugt werden in denen Kavitation auftreten kann.
- Besondere Vorsicht ist geboten, wenn Flüssigkeiten plötzlich durch einen Schock in einem ruhenden Bereich beschleunigt werden, besonders, wenn die Bereiche scharfkantige Ecken aufweisen. Die Flüssigkeit produziert, um Ecken zu überwinden, an der Rückseite niedrigen Drucke, auch wenn die Geschwindigkeiten nach dem Schock vergleichsweise gering sind.

Dabei sind lokale Unebenheiten der Entlastungsanlage an der Wandberandung der erste Ausgangspunkt für Kavitation. Dabei ist zu beachten, dass Fugen und andere Bereiche, bei denen es zu einem plötzlichen Richtungswechsel kommt, verantwortlich dafür sind, dass Kavitationsschäden früh auftreten. Wie Untersuchungen gezeigt haben, führen Vor- und Rücksprünge im Millimeterbereich in Schussrinnen und Grundablässen dazu, dass ein Kavitationsindex von nahezu eins vorliegt. In Abbildung 83 sind Unebenheiten auf Schussrinnen dargestellt, diese Beanspruchungen können auch auf Grundablässe umgelegt werden.²⁵⁰

²⁴⁹ Vgl. Michel J.M. (2001), S.5

²⁵⁰ Vgl. Pfister M. (2008), S.19

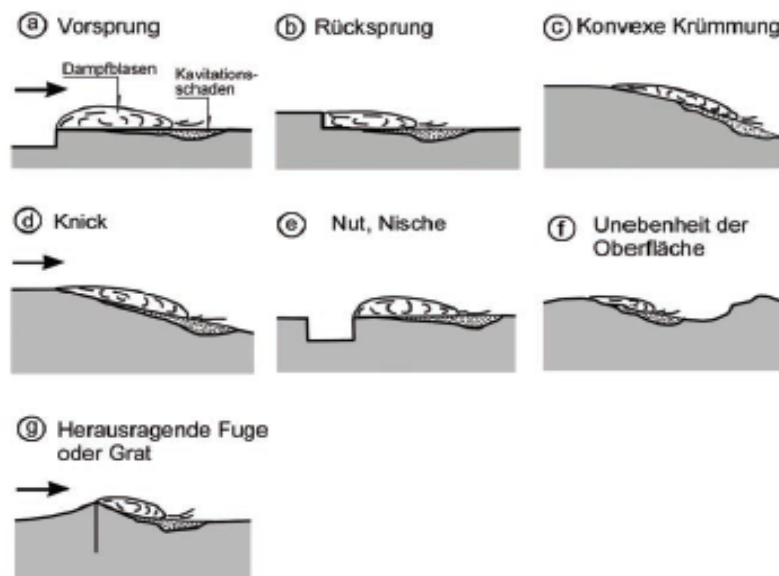


Abbildung 83: Typische Unebenheiten auf Schussrinnen mit großem Kavitationspotential im Unterwasser, [Ball (1976), in Pfister (2008), S.19]

7.1.1.5 Schäden durch Kavitation

Schon seit langer Zeit wird die Kavitationsproblematik von hydraulischen Strukturen untersucht. Der Schaden, wird zunächst meist durch die Kavitation einer hydraulischen Einrichtung verursacht. Aber letztlich werden daraus Folgeschäden wie Vibration der Bewehrung und Auswaschung der Feinteile und Körnungen verursacht. Diese Prozesse führen zu einer andauernden Schwächung der Konstruktion.²⁵¹

Der Verlust des Materials ist eine Funktion der Energie, die durch die implodierenden Blasen erzeugt wird. Außerdem hängt die induzierte Energie vom Material, der Scherfestigkeit sowie der Poisson'schen Zahl ab. Die totale Materialverlustzahl \dot{M} wird als das verlorene Volumen pro Zeit verstanden. Abhängig von der induzierten Energie und der Stabilität des Materials diese ist eine Funktion des Spannungs-Dehnungs-Diagramms.

$$\dot{M} = \frac{dV}{dt} = \frac{\dot{E}_{\text{int}}}{C_2 * \dot{E}_w} \quad (7.2)$$

Dabei stellt C_2 gleich 0,1 bis 0,3 einen Reduktionsfaktor für den Beton dar. Da in die Berechnung von \dot{E}_{int} viele Parameter einfließen, die schwer zu quantifizieren sind, ist diese Berechnung nur für eine akademisch-theoretische Betrachtung sinnvoll.²⁵² Der wesentlich vernünftigeren Ansatz für eine ingenieurmäßige Betrachtung führt über die Analyse der entstandenen Schäden.²⁵³ Der Großteil der auftretenden Schäden ist auf kleine Kavitationszahlen mit ho-

²⁵¹ Vgl. Peterka A.J. (1953) in Kramer K. (2004), S.6

²⁵² Vgl. Jahnke H. (1982) in Kramer K. (2004), S.7

²⁵³ Vgl. Rutschmann P. (1988) in Kramer K. (2004), S.7f

hen Geschwindigkeiten und kleinem Druck zurückzuführen. Sie können allerdings auch von einer schlechten Betonqualität herrühren.²⁵⁴

Im Zuge der Forschungsaktivitäten wurden verschiedene Zugänge für die Ermittlung der kritischen Kavitationszahl gemacht, wobei die Oberflächenrauheit in die Berechnung mit einbezogen wurde. Die folgende Formel gibt Aufschluss über die Berechnung der kritischen Kavitationszahl.²⁵⁵

$$\sigma_c = c \left(\frac{h_r}{\delta} \right)^m \left(\frac{\delta \bar{u}}{v'} \right)^n \quad (7.3)$$

δ ...Grenzschichtdicke

\bar{u} ...mittlere Fließgeschwindigkeit

v' ...turbulente Geschwindigkeitsschwankung

c, m, n ...veränderliche Faktoren

h_r ...Oberflächenrauigkeit

In Tabelle 5 werden grundsätzliche Designrichtlinien für Hochwasserentlastungen in Abhängigkeit der Kavitationszahl dargelegt.

Tabelle 5: Kriterium zur Kavitationsprävention²⁵⁶

Kavitationszahl σ	Planungsanforderungen
>1,80	Keine Maßnahmen erforderlich
0,25 – 1,80	Keine Kavitation, sofern Unstetigkeiten am Rand vermieden werden
0,12 – 0,25	Kavitation ist nur durch Belüfter und glatte Oberflächen vermeidbar
<0,12	Kavitation unvermeidbar

Ein wichtiger Punkt ist, dass bei maximalem Abfluss nicht jedenfalls ein minimaler Kavitationsindex gewährleistet sein muss. Für jeden Abflusszustand ist die kleinste Kavitationszahl zu berechnen.²⁵⁷

²⁵⁴ Vgl. Eisenhauer N. (1993) in Kramer K. (2004), S.7f

²⁵⁵ Vgl. Kramer K. (2004), S.9

²⁵⁶ Vgl. Falvey H.T. (1983) in Pfister M. (2008), S.18

²⁵⁷ Vgl. Falvey H.T. (1990) in Kramer K. (2004), S.10

Nachdem das physikalische Phänomen der Kavitation eingehend analysiert wurde, sind nun Maßnahmen zur Reduktion von Kavitationsschäden zu besprechen.

7.1.2 Methoden zur Reduktion von Kavitationsschäden

Es werden in diesem Rahmen Methoden zum Schutz vor Kavitation sowie die Gestaltung der Schutzmaßnahmen behandelt.

7.1.2.1 Methoden zum Schutz

Nachfolgend werden einige Methoden zum Schutz hydraulischer Strukturen vor Kavitationsschäden beschrieben:

- Das erste Auswahlkriterium eines Planers sollte es sein, kleinen lokalen Drucke und hohe Geschwindigkeiten zu vermeiden, dadurch wird der Kavitationsindex hoch gehalten. Dies geschieht normalerweise durch Abänderung der Geometrie in Abhängigkeit mit den Randbedingungen.²⁵⁸
- Eine weitere Möglichkeit, um eine kavitationssichere Umgebung zu schaffen, besteht in der Verlagerung der Kavitationszonen in das Innere der Strömung. Das Konzept zielt darauf ab, durch Strömungsablösungen die Zonen der Implosion der Blasen in das Innere zu leiten, wodurch die Blasen in Entfernung des Randes kollabieren. Dies kann durch Steigerung des Verlustbeiwertes erreicht werden. So kann eine plötzliche Stollenaufweitung innerhalb eines Grundablassstollens sehr gut zur Energievernichtung verwendet werden.²⁵⁹
- Ein wichtiger Punkt ist die Oberflächenrauheit. Es ist zu beachten, dass jede Unebenheit ein Ausgangspunkt für Kavitationsschäden sein wird, deshalb ist eine fugenlose Ausbildung der Oberflächen anzustreben.²⁶⁰
- Eine weitere Möglichkeit besteht darin, höhere Materialqualitäten einzusetzen, wobei eine Steigerung der Betonqualität vom fünf- bis zwanzigfache möglich ist. Allerdings kann absolute Sicherheit gegen Kavitation nicht garantiert werden. Kavitationswiderstehende Materialien werden aus Kostengründen nur in kleinen Bereichen, wie im Bereich der Apparatkammer des Grundablasses oder in Teilbereichen des Freispiegelstollens, eingesetzt.²⁶¹
- Eine Strategie zur Vermeidung von Kavitationsschäden besteht in dem Einbau von Luftschlitze in dem Boden, so dass die Kavitationsblasen durch die Luftblasen gedämpft werden. Die Belüftung ist meist die ökonomisch und technisch am einfachsten

²⁵⁸ Vgl. Hamilton W.S. (1983) in Kramer K. (2004), S.10

²⁵⁹ Vgl. Russel S.O., Ball J.W. (1967) in Naudascher E. (1982), S.104

²⁶⁰ Vgl. Kramer K. (2004), S.10

²⁶¹ Vgl. Kramer K. (2004), S.10

ten durchführbare Möglichkeit, bei niedrigem Drucke und hohen Geschwindigkeiten die Sicherheit gegen Kavitation zu gewährleisten.²⁶²

- Die letzte Möglichkeit ist die Inkaufnahme kleinerer Kavitationsschäden in Bereichen, die für die Stabilität des Bauwerks nicht gefährdend sind.²⁶³

7.1.2.2. Gestaltung von Schutzmaßnahmen

Zu Beginn der Planung von wasserbaulichen Anlagen sollten für die kavitationsgefährdeten Strömungen der absolute Druck und die Geschwindigkeit für die jeweiligen Lastfälle an den verschiedenen maßgebenden Punkten bekannt sein. Ein geringer Druck bei gleichzeitiger hoher Geschwindigkeit führt zur Unterschreitung der Kavitationszahl und zu einem Auftreten von Kavitationsschäden kommt, ist mit Schäden zu rechnen. Um diese Schäden vermeiden zu können, bietet es sich an, den Entwurf strömungsgünstiger auszuführen. Beispielsweise kann die Kavitationszahl eines Pfeilers um die Hälfte gesenkt werden, wenn er statt einer Kante mit 90° mit einem Radius der halben Pfeilerbreite ausgerundet wird. Das gleiche gilt für Abschrägungen, hier sind Schrägen mit einem Winkel von 30° einer stumpfen oder rechtwinkligen Kante vorzuziehen. Zu beachten ist allerdings, dass nach jeder Kante Probleme mit der Kavitation auftreten können.²⁶⁴

7.1.2.2.1 Selbsttätige und Zwangsbelüftung

Eine weitere Maßnahme um Stollen und Rinnen vor Kavitation zu schützen, ist jene, die gefährdeten Bereiche zu belüften. Der erzielbare Schutz richtet sich vor allem gegen die Kavitationsblase selbst bzw. den aufprallenden Wasserstrahl. Die Implodierende Blase soll damit gedämpft werden. Mit Ansteigen des Gasgehaltes steigt auch die Kavitationszahl, dadurch tritt die Kavitation früher ein, wobei sie allerdings durch Blasen aus Dampf und Gas gekennzeichnet ist. Sollten die Blasen implodieren, kommt es lediglich zu weit kleineren Erosionerscheinungen.²⁶⁵

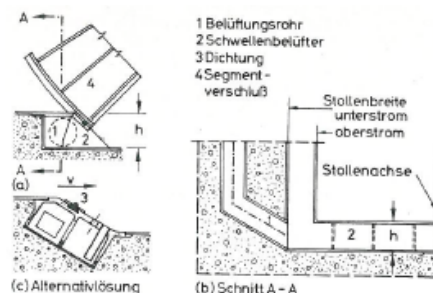


Abbildung 84: Kavitationsschutz für einen Segmentverschluss durch Schwellenbelüfter; [Naudascher (1982), S. 108]

²⁶² Vgl. Kramer K. (2004), S.11

²⁶³ Vgl. Kramer K. (2004), S.11

²⁶⁴ Vgl. Naudascher E. (1982), S.107f

²⁶⁵ Vgl. Naudascher E. (1982), S.108

Oftmals kommt es zu einem Lufteintrag in das Wasser bei strömendem Abfluss ohne besondere Einrichtungen. Die infolge der Selbstbelüftung erzielbare Reduktion im Fall des Einstaus der Kavitationszahl richtet sich vor allem nach der Dämpfung der Blase beim Zerfall. Voraussetzung dafür ist ein ausreichendes Vorhandensein von Luft in den gefährdeten Bereichen für die verschiedenen Lastfälle. In Abbildung 84 ist die Ausbildung einer Belüftungseinrichtung für einen Segmentverschluss in einem Stollen dargestellt. Wichtig dabei ist, dass die Auslegung des Belüftungsrohres nicht zu klein dimensioniert wird. Außerdem müssen die Belüftungselemente für alle Lastfälle sowohl frei von Wasser als auch von Eis gehalten werden. Der Rohrstützen in Abbildung 84c dient der Entfernung von eingedrungenem Wasser. Ein wesentlicher Faktor in der Auslegung einer Belüftung ist die Menge der angesaugten Luft. Die angesaugte Luft lässt sich mit Formel (7.4) berechnen.²⁶⁶

$$Q_L = C_L * h * l * v \quad (7.4)$$

C_L ... Faktor, der von der Randgeometrie abhängt

h ... Schwellenhöhe,

l ... Länge der Kontaktfläche zur Luft und

v ... Geschwindigkeit.

Da es bei übermäßigem Lufteintrag zu einer Verminderung der Abflussqualität bei Verschlussorganen bzw. einer übermäßigen Zerstäubung kommt, ist die Luftmenge in dem Maße zu begrenzen, als keine Kavitationsschäden auftreten können.²⁶⁷

7.1.2.2.2 Besondere Schutzmaßnahmen

Eine weitere Möglichkeit die Nachteile der Belüftung zu vermeiden, ist das Einleiten von Wasser aus Bereichen mit hohem Druck in die gefährdeten Bereiche, in denen Unterdruck herrscht. Diese Wirkung ist allerdings durch das Fehlen der Dämpfungseigenschaften der Luftblasen begrenzt. Für den Fall, dass Kavitation nicht häufig auftritt, können gewisse Bereiche gepanzert oder mit verstärktem Beton ausgeführt werden, allerdings gibt es für diesen Fall keine absolute Sicherheit gegen Zerstörung. Kavitationsresistenter Beton kann zwar zu Beginn Schutz bieten, allerdings nach Aufrauung durch Kiesabrieb ist der Vorteil nicht mehr gegeben.²⁶⁸

²⁶⁶ Vgl. Naudascher E. (1982), S.108

²⁶⁷ Vgl. Naudascher E. (1982), S.108

²⁶⁸ Vgl. Naudascher E. (1982), S.109

7.1.2.2.3 Einfluss des Gasgehaltes auf den Kavitationsschutz

Im Zuge der Untersuchungen des Kavitationsschutzes wurde der Luftgehalt von verschiedenen Seiten beleuchtet. Im Zuge früher Laboruntersuchungen wurde Luftkonzentrationen zwischen 5% bis 8% empfohlen, um Kavitationen des Betons zu vermeiden. Bis heute haben diese Zahlen Gültigkeit. Für den Erhalt der Ergebnisse wurde ein Venturikanal mit den entsprechenden Eingangsparametern gebaut, wobei die Luftkonzentration dabei über die zugeführte Luft berechnet wurde.²⁶⁹

In weiterer Folge führte Rasmussen im Jahr 1956 Untersuchungen zu Kavitationsschäden unter Verwendung unterschiedlicher Luft-Wassergemische und Teststücke mit verschiedenen Formen und Materialien durch. Dabei verwendete er zwei verschiedene Experimentaufbauten, womit gezeigt werden konnte, dass der Kavitationsprozess durch ein Luft-Wassergemisch von 0,8% bis 1% des Volumens als fein verteilte Blasen verhindert werden kann.²⁷⁰

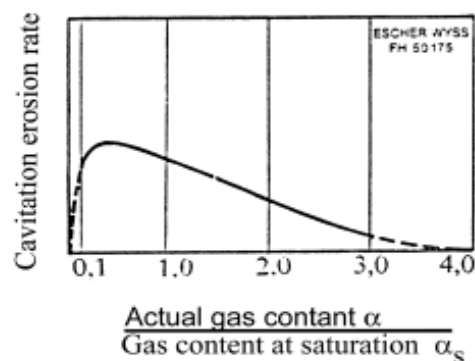


Abbildung 85: Kavitationsschaden gegen relative Luftkonzentration; [Hammit F.G. (1972) in Kramer K. (2004), S.13]

Die Abbildung 85 basiert auf experimentellen und theoretischen Ergebnissen und soll ein Verhältnis zwischen dem Gasgehalt α bzw. dem gesättigten Gasgehalt α_s und dem Kavitationsschaden her. Es wurde daraus geschlossen, dass es aufgrund unzureichender Blasenkonzentrationen zu keinem Auftreten von Kavitationsschäden bei sehr niedrigen Gasgehalten kommen würde. Für eine geringfügig höhere Blasenkonzentration würde es zu einem Optimum zwischen Auftreten und dem ersten Schaden durch Kavitation kommen. Für große Gasgehalte würde der Dämpfungseffekt tonangebend über den Kavitationsbeginn werden und der Schaden würde zurückgehen.²⁷¹

Im Zuge der, über die Jahrzehnte durchgeführten Untersuchungen konnte zwar keine präzise Aussage darüber getroffen werden, welcher Luftgehalt des Wassers vor Kavitationsschäden

²⁶⁹ Vgl. Peterka A.J. (1953), in Kramer K. (2004), S.11

²⁷⁰ Vgl. Rasmussen R.E.H. (1956), in Kramer K. (2004), S.12

²⁷¹ Vgl. Hammit F.G. (1972), in Kramer K. (2004), S.12

schützt, allerdings konnte gezeigt werden, dass bereits ein kleiner Betrag des Luftgehaltes die Kavitationsschäden in Abflüssen mit hohen Geschwindigkeiten wesentlich reduzieren kann. Der physikalische Prozess, der hinter dem Mechanismus steht, konnte noch nicht eindeutig geklärt werden, wobei es verschiedene Ansätze dafür gibt, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiter behandelt werden sollen.²⁷²

Abhängig vom Gasgehalt des Wassers erfolgt die Wahl der bereits besprochenen Schutzmaßnahme. Deshalb ist es wichtig zu wissen wie weit die Luftmitführung im Abfluss erfolgt.

7.1.3 Luftmitführung im Abfluss

Luft wird auf unterschiedliche Weise in fließendes Wasser eingetragen, wie z.B. über die Oberfläche bei Hochgeschwindigkeitsabflüssen oder über Auftreffen auf die Wasseroberfläche von Wurfstrahlen. Bei einer Sohlbelüftung erfolgt der Lufteintrag über die Oberfläche sowie die eingebauten Belüfter, dabei treten ebenfalls limitierende Faktoren, wie die vorherrschenden Anfangsbedingung, die zur Verfügung stehende Luft und das Transportvermögen auf.²⁷³

7.1.3.1 Oberflächenbelüftung

Die Oberflächenbelüftung an Rinnen wird seit mehr als 70 Jahren betrieben. Die zurzeit vorherrschende Diskussion konzentriert sich auf drei Besonderheiten, die das Luft-Wassergemisch spezifizieren. Dies sind der Lufteinzugsmechanismus, die Lokalisierung des Beginns der Vermischung sowie die Luftkonzentration in der gleichförmigen Strömung.²⁷⁴

7.1.3.1.1 Lufteinzugsmechanismus

Die Turbulenznummer $Tu = v' / \bar{u}$ wird beschrieben als die Standardabweichung der Quadratwurzel der Geschwindigkeit über einen Zeitschritt v' sowie durch die Durchschnittsgeschwindigkeit während des gleichen Zeitschrittes \bar{u} . Die Intensität der Turbulenz ist der wichtigste Faktor für den Luftmitführungsmechanismus. Die freie Oberfläche diffundiert seitlich mit einer Rate proportional der Turbulenzintensität. Wenn sich Wasserteilchen normal zur Hauptfließrichtung bewegen, müssen sie eine entsprechende kinetische Energie aufweisen, um die dämpfende Oberflächenspannung zu überwinden und derart in den Fluss hinauskatapultiert zu werden.²⁷⁵ Generell kann der Vorgang mit Tropfen, die sich oberhalb der Wasseroberfläche befinden und anschließend zurückfallen, beschrieben werden. Durch dieses Eintauchen werden die Luftblasen in die fließende Flüssigkeit eingetragen.²⁷⁶

²⁷² Vgl. Kramer K. (2004), S.14

²⁷³ Vgl. Kramer K. (2004), S.15

²⁷⁴ Vgl. Kramer K. (2004), S.16

²⁷⁵ Vgl. Kramer K. (2004), S.16f

²⁷⁶ Vgl. Volkart P. (1980) in Kramer K. (2004), S.17

7.1.3.1.2 Lokalisierung des Beginns der Vermischung

Ein Fließen wird als turbulent bezeichnet, wenn die Dicke der turbulenten Schicht gleich der Fließtiefe ist. Die Gleichung für die Entwicklung der Randbedingungen in Strömungsrichtung kann wie folgt hergeleitet werden:²⁷⁷

$$\frac{\delta}{x_s} = 0,0447 * \left(\frac{x_s}{k_s} \right)^{-0,154} \quad (7.5)$$

δ ...Grenzschichtdicke

x_s ... Koordinate in Längsrichtung

k_s ...Äquivalente Rauigkeit nach NIKURADSE

Außerdem kann die Herleitung auch in folgender Weise erfolgen:²⁷⁸

$$\frac{\delta}{x_s} = 0,0212 \left(\frac{x_s}{H_s} \right)^{0,11} \left(\frac{k_s}{x_s} \right)^{0,10} \quad (7.6)$$

H_s ...Differenz der Höhe zwischen der Einlaufkante und dem Tosbecken

Durch die Tatsache, dass die obigen beiden Formeln empirisch ermittelt wurden, hat die Neigung keinen Einfluss auf die Berechnung. Dies wurde mit nachfolgender Formel geändert, die in Abhängigkeit zur Neigung gebracht wurde:²⁷⁹

$$\frac{x_i}{h_c} = 16(\sin \alpha)^{-0,60} \left(\frac{k_s}{h_c} \right)^{-0,08} \quad (7.7)$$

x_i ...Koordinate in Längsrichtung bei der die lokale Fließtiefe gleich der Grenzschichttiefe ist

h_c ...kritische Fließtiefe

Im Zuge von Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Belüftung nicht an jenem Punkt, an dem die Grenzschichttiefe gleich der Fließtiefe ist, sondern erst nach einer Distanz x_σ von x_i auftritt. Dieser Punkt ist dort lokalisiert wo die turbulente Energie in der Oberflächenströmung die Oberflächenspannung des Wassers überwindet. Jedenfalls kann aufgrund von Experimenten und praktischen Erfahrungen die Vermischungszone sehr genau berechnet werden.²⁸⁰

²⁷⁷ Vgl. Bauer W.J. (1954) in Kramer K. (2004), S.17

²⁷⁸ Vgl. Wood I.R. (1983) in Kramer K. (2004), S.17

²⁷⁹ Vgl. Hager W.H., Basel F. (1997) in Kramer K. (2004), S.17

²⁸⁰ Vgl. Kramer K. (2004), S.17

7.1.3.2 Sohlbelüftung

Ein wesentliches Problem von Hochgeschwindigkeitsabflüssen in Gerinnen ist die Möglichkeit von Kavitationsschäden am Grund des Abflusses sowie an den Wänden. Die Zuführung von Luft zu sehr schnell fließenden Wasserabflüssen führt zur Reduktion des Risikos von Kavitationsschäden. So sind Gerinnesohlen und Schussrinnen normalerweise durch Sohlbelüfter geschützt. Sie werden normalerweise dort angeordnet, wo die Kavitationszahl gering und die natürliche freie Oberfläche nicht den Grund des Abflussquerschnittes erreicht haben. Die Distanz zwischen den Sohlbelüftern für einen optimalen Schutz gegen Kavitation wurde bisher nicht ermittelt, da der Lufteintragsprozess noch nicht vollständig erforscht wurde.²⁸¹

Hier sei auf das Kapitel 7.3 verwiesen, da dort auf die Sohlbelüftung näher eingegangen wird. Im nächsten Kapitel geht es um ein weiteres hydraulisches Phänomen, den Stosswellen.

7.2 Stosswellen

Stosswellen stellen eine Besonderheit dar. Da ihnen kein Fließzustand eindeutig zugeordnet werden kann, besteht auch keine Möglichkeit, die verschiedenen Wellenfronten zu unterscheiden. Diese Unterscheidung ist vor allem bei Verengungen bei denen die seitlichen Wände kontinuierlich gekrümmt sind schwierig. Stosswellen sind aufgrund der sich schnell ändernden Wassertiefen sehr leicht zu erkennen.²⁸²

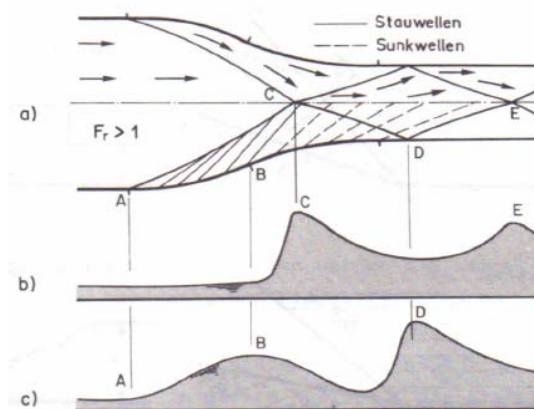


Abbildung 86: Schematisches Abflussbild in einer Schussrinnenverengung, a) Draufsicht, b) Wasserspiegel auf der Achse, und c) Wasserspiegel längs der Wand, [Anastasi G. (1982), S.36]

In Abbildung 86 ist ein Abflussbild einer Schussrinnenverengung dargestellt. Die Wand der Schussrinne kann mit einem Polygonzug angenähert werden. Je nach dem Vorzeichen des Ablenkungswinkels des Polygonzuges treten für die, in der Abbildung dargestellten Punkte entweder Stau- oder Sunkwellen auf. Die Stauwellen summieren sich solange auf bis es durch die Sunkwellen zu einer Reduzierung der Wassertiefe kommt. Deswegen treten in den Punkten B und C Stosswellen auf. Um die Abbildung 86a) zu vereinfachen wurde die Reflexionen

²⁸¹ Vgl. Kramer K. (2002) in Kramer K. (2004), S.5

²⁸² Vgl. Anastasi G. (1982), S.36

der Stau- und Sunkwellen, die auf der Achse auftreten, nicht mehr abgebildet. Trotzdem kann aus der Abbildung entnommen werden, wie sich die Wellen weiter bewegen. Stoßwellen können aus den Stau- und Sunkwellen abgeleitet werden.²⁸³

Das Auftreten von Stosswellen hat zur Folge, dass sich im Abfluss sehr unterschiedliche Abflusstiefen einstellen, die zur Folge haben, dass die Strömung an den Rändern hinauf klettert. Dadurch sind höhere Wandflächen erforderlich und bei Stollen kann dies zum Zuschlagen des Querschnittes führen. Der wichtigste Punkt dabei ist, dass sich diese Stosswellen bis in die Energieumwandlung fortsetzen können und dort die Umwandlung in andere Energieformen negativ beeinflussen. Es besteht die Möglichkeit, dass sich durch die Stosswellen im Tosbecken Wirbel ausbilden, die zu einer weiteren Reduktion der Effizienz führen. Die Notwendigkeit, diese Wellen aufzuheben kann dadurch erklärt werden.²⁸⁴

7.2.1 Aufhebung von Stosswellen

Hier sollen kurz die verschiedenen Maßnahmen angeführt werden, mit denen sich ein gestörter schießender Abfluss beeinflussen lässt. Dabei lassen sich die Maßnahmen unabhängig, von Form und Art des Stollenquerschnittes und der Schussrinnenverengung, in die nachfolgenden Bereiche einteilen:²⁸⁵

1. Herbeiführung eines Fließwechsels vom Schießen zum Strömen.
2. Erzeugung von Phasen verschobenen Wellen zur Abminderung bzw. Aufhebung einer stehenden Welle. Dies kann auf zwei unterschiedliche Weisen erfolgen:
 - a. durch besondere Gestaltung der Wände des Abflussgerinnes;
 - b. durch schräg eingebaute Sohlswellen.
3. Beeinflussung der Stromlinien, so dass sie parallel verlaufen. Dabei können zwei verschiedene Maßnahmen unterschieden werden:
 - a. Aufteilung des Querschnittes mittels paralleler Wände;
 - b. Induzierung von Querkräften auf den Abfluss, durch Schrägstellung der Sohle, wodurch sich die Wasserteilchen auf einer bestmöglichen Bahn befinden. Mit dieser Maßnahme lassen sich Stosswellen aufheben.

Im Rahmen des vorliegenden Unterkapitels wurde versucht, die wesentlichen Aspekte zur Beeinflussung der Stosswelle, wie beispielsweise durch das Herbeiführen eines Fließwechsels oder die eine Beeinflussung der Stromlinien, darzubringen. Ein weiteres wichtiges hydraulisches Phänomen eines Grundablasses stellt die Belüftung dar, auf die im nächsten Kapitel näher eingegangen wird.

²⁸³ Vgl. Anastasi G. (1982), S.36f

²⁸⁴ Vgl. Anastasi G. (1982), S.37

²⁸⁵ Vgl. Anastasi G. (1982), S.119ff

7.3 Belüftung

Neben dem Belüftungsprozess gilt es, die weiteren Themen wie Teilströme, Luftbedarf, Luftaufnahme und Luftkonzentration zu behandeln.

7.3.1 Belüftungsprozess

Der Eintrag der Luft ist gekennzeichnet durch die Charakteristika der Luftaufnahme des Wasserstrahls und der Belüftungsleitung. Jede dieser unterschiedlichen Charakteristika wird in Abbildung 87 dargestellt. Die Arbeitspunkte der Belüftung ergeben sich aus den Schnittpunkten der Verlustkurven der Belüftungseinrichtungen (B_i) und einer vorhandenen Luftaufnahmekurve des Wasserstrahls (A). Die Verlustkurven der Belüftungseinrichtung werden durch die Abmessungen der Leitung und die Wandrauhigkeit festgelegt und ergeben dadurch den Luftunterdruck am Übergang zum Freispiegelstollen. Die Menge der angesaugten Luft ist dabei vor allem von der Abflussgeschwindigkeit und der Strömungsausbildung abhängig. Für die Beurteilung der Luftmenge muss der gesamte Bereich vor und nach der Apparatekammer herangezogen werden.²⁸⁶

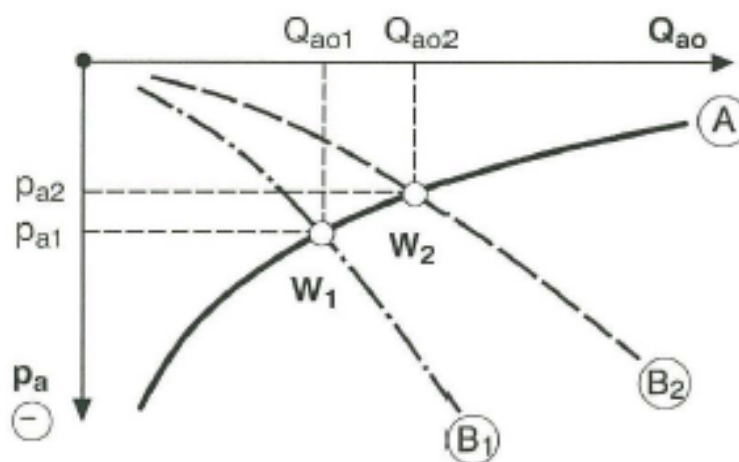


Abbildung 87: Charakteristika der Luftaufnahme eines Wasserstrahls (A) und der Belüftungsleitung (B_i) bei Luftunterdruck p_a und Luftzufluss Q_{ao} durch die Belüftungsleitung, [Speerli J. (1999), S.30]

7.3.2 Teilströme, Luftbedarf, Luftaufnahme und Luftkonzentration

In den weiteren Unterkapiteln gilt es zunächst, die unterschiedlichen Teilströme der Luft und damit zusammenhängend den auftretenden Luftbedarf zu bestimmen, um in einem weiteren Schritt, die näherungsweise Ermittlung der Luftaufnahme zu erklären. Der Abschluss des vorliegenden Unterkapitels bildet die Diskussion über die, im Abfluss auftretende Luftkonzentration.

²⁸⁶ Vgl. Speerli J. (1999), S.30f

7.3.2.1 Teilströme

Die Teilströme der Luftzuflüsse sind in der Abbildung 88 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Wasser unter dem Schütz in den Freispiegelstollen einströmt. Im Anschluss an die Schützen bewegen sich die Luftströme Q_{ao} aus der Belüftungseinrichtung und Q_{au} vom Stolleneinde zu. Diese Luftströme werden, wie zuvor schon behandelt, durch den herrschenden Unterdruck nach dem Schütz induziert. Die beiden abströmenden Teile ergeben sich aus der Summe der, mit dem Wasser über die Belüftungseinrichtungen vermengten Luft sowie der Summe der, mit der oberflächlichen Gemischströmung verursachten Rückströmung der Luft.²⁸⁷

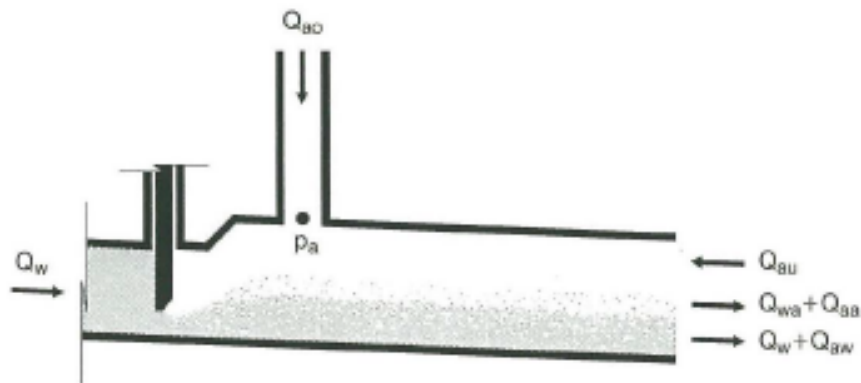


Abbildung 88: Definition der Teilströme der Luftzuflüsse eines Grundablasses, [Speerli J. (1999), S.34]

7.3.2.2 Luftbedarf

Wird auf eine Belüftung nach den Schützen verzichtet, muss der Luftbedarf über die gesamte Länge des Grundablasses an der Firste fließen. Eine derartige Anlagenauslegung ist für einen Grundablass durch eine Staumauer aufgrund der kurzen Stollenlänge auf jeden Fall praktikabel, für einen Grundablassstollen ist diese Ausführung aufgrund der geringen Betriebssicherheit allerdings nicht vorgesehen, da es durch die zurückfließende Luft vermehrte Gemischzapfenbildung kommt und der Unterdruck an der Schützenrückwand sehr hohe Werte aufweisen kann. Deshalb ist eine entsprechende Auslegung der Belüftung unbedingt erforderlich, wobei sich insbesondere die Frage der Dimensionierung stellt.²⁸⁸

In Kapitel 4.3.5.2 sind verschiedene Berechnungsansätze für das Verhältnis β der Luftmenge zum Abfluss angegeben. Dieses wird durch die Froude'sche Zahl am Austritt und durch das Verhältnis zwischen Abfluss- und Stollenquerschnitt beeinflusst. Allerdings liefern diese Formeln mitunter stark abweichende Ergebnisse für den Luftbedarf. Der Grund hierfür liegt in der Tatsache, dass der Luftbedarf von zahlreichen Faktoren beeinflusst wird, sei es von der Rauigkeit der Wasseroberfläche, der Rezirkulation der über die Wasseroberfläche aufge-

²⁸⁷ Vgl. Speerli J. (1999), S.34

²⁸⁸ Vgl. Anastasi G. (1983), S.506

nommenen Luft, der Lufteintritt aus dem unterwasserseitigen Portal oder dem Verhältnis der Abmessungen des Schussstrahles zum Stollen. Nicht zu vergessen ist, dass jede Projektierung einer Belüftungseinrichtung einen Prototypen darstellt.²⁸⁹

Im Zuge der Versuche an der San Roque Sperre auf den Philippinen konnte gezeigt werden, dass der Luftbedarf überproportional zur Druckhöhe ansteigt und dabei auch vom Öffnungsgrad des Schützes abhängt. Aufgrund des Vergleiches der Modellergebnisse mit den verschiedenen Berechnungsformeln lässt sich klarstellen, dass die Vergleichbarkeit der beiden Berechnungen nicht gegeben ist. Diese Unvergleichbarkeit kann mit der Steigerung der Oberflächenturbulenz durch die Schützunterkante erklärt werden. Diese Vergrößerung der Turbulenz führt zu einem größeren Schub der Luft. Außerdem kommt es zum Herausschleudern von Wasserteilchen aus der Oberfläche, die beim Wiedereintritt in das Wasser Luft mitreißen und damit den Abflussquerschnitt nochmals vergrößern. Dadurch steigt der Luftbedarf, wodurch die vermehrte Gemischzapfenbildung erklärt werden kann. Um eine Gemischzapfenbildung zu vermeiden, ist ein größeres Zufuhrsystem unbedingt erforderlich. Die verschiedenen Luftströmungen können, wie aus Abbildung 89 ersichtlich ist, beschrieben werden. Für die Vorbemessung kann die Luftgeschwindigkeit mit 50m/s angenommen werden.²⁹⁰

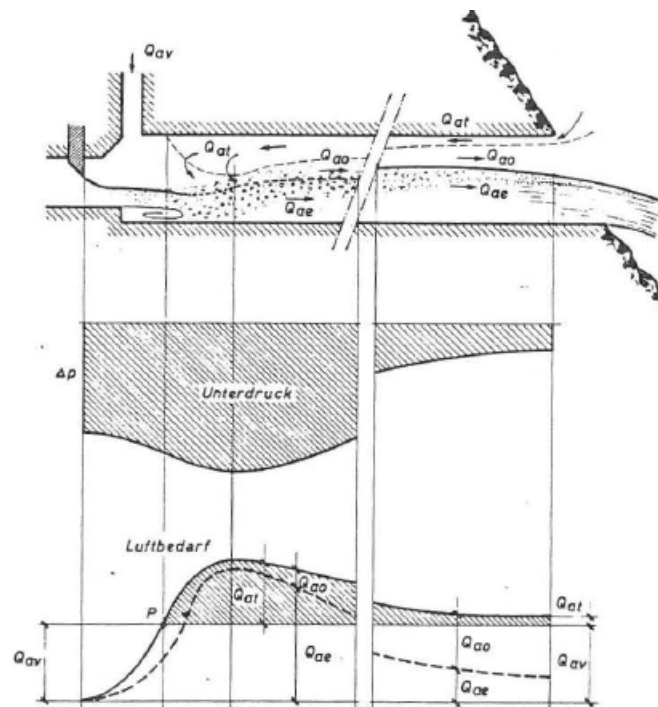


Abbildung 89: Vermeintlicher Verlauf der Luftströmungen in einem Grundablassstollen, [Anastasi G. (1983), S.506]

²⁸⁹ Vgl. Anastasi G. (1983), S.506f

²⁹⁰ Vgl. Anastasi G. (1983), S.506f

7.3.2.3 Luftaufnahme

Die, durch die Strömung mitgerissene Luftmenge Q_{ae} kann als Teil des Luftbedarfs der Strömung bezeichnet werden. Die Luftaufnahme ist zum Schutz des Querschnitts vor Kavitationserosion erwünscht, allerdings führt die Luftaufnahme zur Vergrößerung des Abflussquerschnittes und der notwendige Stollenquerschnitt wird vergrößert. Zum Schutz vor Kavitation kommen Sohlbelüfter zur Anwendung, deren Aufgabe es ist, die Belüftung auf einer gewissen Strecke sicherzustellen. Es kann zur Vergrößerung des Abflussquerschnittes und zur Erhöhung des Luftbedarfs kommen.²⁹¹

Die Ermittlung der natürlichen Luftaufnahme wird hier kurz näher anhand von folgenden Formeln behandelt:²⁹²

$$C = \frac{Q_{ae}}{(Q_{ae} + Q_w)} \quad (7.8)$$

$$v_g = v_w * (1 - C^2) \quad (7.9)$$

v_g ...Fließgeschwindigkeit des Wasser-Luft-Gemischs

v_w ...Fließgeschwindigkeit des Reinwasserabflusses

Unter Annahme, dass die Formel auch bei einer Belüftungseinrichtung ihre Gültigkeit behält, kann Formel (7.10) für die Abflussquerschnittsvergrößerung herangezogen werden.

$$A_g = A_w / ((1 - C^2) * (1 - C)) \quad (7.10)$$

Bei Einsetzen einer Luftkonzentration C zeigt sich, dass eine übermäßige Belüftung zu einer signifikanten Erhöhung des Gemischabflusses führt. Für die Kenntnis der Leistung der Belüftungseinrichtung an der Sohle müsste das Verhältnis $\beta = Q_{ae} / Q_w$ bekannt sein, dann wäre es möglich, die Luftkonzentration aus diesem Verhältnis herzuleiten.²⁹³

$$C = \frac{\beta}{(\beta + 1)} \quad (7.11)$$

Für den Fall, dass die Luftkonzentration bekannt wäre, könnte die aufgenommene Luftmenge ermittelt werden:²⁹⁴

$$Q_{ae} = Q_w \frac{C}{(1 - C)} \quad (7.12)$$

²⁹¹ Vgl. Anastasi G. (1983), S.507

²⁹² Vgl. Anastasi G. (1983), S.507

²⁹³ Vgl. Anastasi G. (1983), S.507

²⁹⁴ Vgl. Anastasi G. (1983), S.507

Mit dem Ergebnis aus (7.12) kann festgestellt werden, ob eine Rezirkulation von Luft im Stollen auftritt, also ob $Q_{at} > 0$ ist. Damit besteht die Möglichkeit einer genauen Querschnittsbemessung unter Berücksichtigung der verschiedenen Luftströmungen.²⁹⁵

7.3.2.4 Luftkonzentration

Die in einem Gemischabfluss örtliche Luftkonzentration C ist eine Funktion der Luftmenge Q_{aw} im Gemischabfluss, gebrochen durch die Summe aus der Luftmenge Q_{aw} im Gemischabfluss und der Durchflussmenge Q_w an einem bestimmten Ort (x, y, z) und zu einer bestimmten Zeit (t) .²⁹⁶

$$C(x, y, z, t) = \frac{dQ_{aw}(x, y, z, t)}{dQ_{aw}(x, y, z, t) + dQ_w(x, y, z, t)} \quad (7.13)$$

Die mittlere Luftkonzentration \bar{C} lässt sich durch Integration über die örtliche Luftkonzentration C über einen Querschnitt, bei dem durch Vernachlässigung der gelösten Luft die örtliche Luftkonzentration C im blasenfreien Wasser gleich null und oberhalb des Gemischspiegels gleich 100% ist, ermitteln.²⁹⁷

$$\bar{C}(x, t) = \frac{dQ_{aw}(x, t)}{dQ_{aw}(x, t) + dQ_w(x, t)} \quad (7.14)$$

Die vom Grundablass durch den Gemischabfluss abgeführte Luftmenge lässt sich aus der Messung der örtlichen Luftmenge C und über Rückrechnung der mittleren Luftkonzentration \bar{C} berechnen. Die Luftkonzentration ist also für die Ermittlung der Massenbilanz der Luftzuflüsse unbedingt erforderlich.²⁹⁸

²⁹⁵ Vgl. Anastasi G. (1983), S.507

²⁹⁶ Vgl. Volkart P. (1978) in Speerli J. (1999), S.36

²⁹⁷ Vgl. Speerli J. (1999), S.36

²⁹⁸ Vgl. Speerli J. (1999), S.35

7.3.3 Beginn des Lufteintrags bei Sohlischen

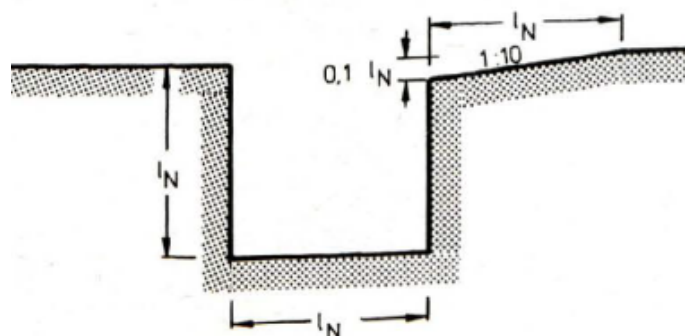


Abbildung 90: Abmessung einer Sohlische, [Brettschneider H. (1986), S.203]

Der Beginn des Lufteintrags bei Sohlischen erfolgt durch die Injektorwirkung des Wassers beim Vorbeifließen, dabei wird hier von einer Selbstbelüftung gesprochen. Es kann zwischen der natürlichen und der künstlichen Belüftung unterschieden werden, wobei im Rahmen der künstlichen Belüftung der Eintrag der Luft durch Einblasen erfolgt. Die Selbstbelüftung tritt durch die Turbulenz in der Trennfläche zwischen Wasser und Luft in der Nische auf. In Abbildung 90 ist ein Sohlbelüfter zur Erläuterung abgebildet. Durch die, beim Überströmen entstehende Schubspannung kommt es zu Zirkulationen in der Nische. Trotz des Luftabschlusses treten es in weiterer Folge ein Luftblaseneintrag bei einer kritischen Fließgeschwindigkeit v_{krit} auf. Als Beginn des Lufteintrages ist jener Zeitpunkt definiert, bei dem in der Nische rotierende Luftblasen von Zeit zu Zeit mit der Strömung abtransportiert werden. Die gerade beschriebene kritische Fließgeschwindigkeit ist von folgenden Stoffkennwerten abhängig:²⁹⁹

- Dichte der Luft ρ_L und des Wassers ρ_W ,
- Dynamische Viskosität der Luft η_L und des Wassers η_W ,
- Kapillarität in der Trennschicht $\kappa_{L,W}$,
- Wassertiefe h ,
- Nischenabmessung l_N .

Unter der Annahme, dass die Luftströmung im Vergleich zur Flüssigkeitsströmung keinen Einfluss hat sowie der Grad der Turbulenz als konstant angenommen werden kann und die Schwerkraft als zweidimensional betrachtet werden kann, ist es möglich folgende Funktion aufzustellen, nämlich $f(h, l_N, v_{krit}, \rho_W, \eta_W, \kappa_{L,W}) = 0$. Durch eine Dimensionsanalyse kann die Gleichung der Kenngrößen erfolgen,³⁰⁰

²⁹⁹ Vgl. Brettschneider H. (1986), S.203f

³⁰⁰ Vgl. Brettschneider H. (1986), S.204

$$\phi\left(\frac{h}{l_N}, \frac{v_{krit}}{\sqrt{g \cdot h}}, \frac{v_{krit} \cdot h}{\eta/\rho}, \frac{v_{krit}^2 \cdot h}{\kappa/\rho}\right) = 0 \quad (7.15)$$

Wobei die Terme der Formel (7.15) folgendes der Reihe nach bedeuten, das Verhältnis der Abflusshöhe zur Nischenabmessung, die Froude'sche Zahl, die Reynoldszahl und die Weberzahl der Strömung. Wenn das Verhältnis der Abmessungen als konstant angenommen wird kann die Formel (7.15) umgewandelt werden zu³⁰¹

$$v_{krit} = \sqrt{g \cdot h} \cdot \phi_1(\text{Re}, \text{We}) \quad (7.16)$$

Durch (7.16) zeigt sich, dass die kritische Fließgeschwindigkeit lediglich von der Wassertiefe und der Funktion der Reynoldszahl und der Weberzahl abhängt, wodurch sich für Experimente die Forderung der Untersuchung des Zusammenhangs $Fr = f(\text{Re}, \text{We})$ ergibt.³⁰²

Im Zuge dieses Kapitels wurde versucht die Phänomene die bei einem Grundablass auftreten können zu behandeln. Sei es die Kavitation in ihrer unterschiedlichen Ausprägungen und dem Einfluss des Luftgehaltes auf das Auftreten. Außerdem wurde bei der Belüftung versucht, den Vorgang des Lufteintrages zu beschreiben, der wiederum den Schutz vor Kavitation liefern soll.

³⁰¹ Vgl. Bretschneider H. (1986), S.204

³⁰² Vgl. Bretschneider H. (1986), S.204

8. Conclusio

Die vorliegende Diplomarbeit setzt sich zum Ziel, die vorhandene Literatur im Bereich der Grundablässe aufzuarbeiten und zu systematisieren. Dabei liegt der Fokus auf den Stollenausführungen. Diese werden im Laufe der Arbeit vom Einlaufbauwerk bis hin zur Energieumwandlung sowie den verschiedenen hydraulischen Phänomenen behandelt. Dabei wird versucht auf die, für die Konstruktion sowie die Dauerhaftigkeit der verschiedenen Bauteile wesentlichen Einflussfaktoren näher einzugehen.

Grundsätzlich dient ein Grundablass in jeder Ausführungsvariante zunächst der Sicherheit einer Talsperre. Dafür werden die Verschlüsse geöffnet und das Wasser an das Unterwasser abgegeben. Dabei muss beachtet werden, dass es unzulässig gegenüber den Anrainern ist, am Unterwasser ein Hochwasser, welches eine Jährlichkeit von einem Jahr überschreitet, durch die Öffnung der Verschlüsse zu erzeugen. Weitere Anwendungsfelder von Grundablässen liegen in der Möglichkeit von Spülungen des Stauraumes, aber auch von Staulevelabsenkungen im Rahmen von Revisionen und Reparaturen.

Jede vorhandene Sperre, sei es eine Betonsperre oder ein Damm, weist in Abhängigkeit des verwendeten Baustoffes eine wirtschaftliche und technisch sinnvolle Linienführung des Grundablasses auf. So kann bei Betonsperren die Führung durch das Bauwerk erfolgen. Im Gegensatz dazu stellt bei Dämmen die Adaptierung der vorhandenen Bauumleitung die technisch sinnvollste Lösung dar. Diese Bauumleitung wird auf den erforderlichen Querschnitt rückgebaut, da diese mit einer Jährlichkeit von bis zu dreißig Jahren zum Schutz der Baustelle ausgelegt ist. Etwaige überflüssige Umleitungen werden in der Achse der Dichtungsebene verschlossen.

Bei der Einlaufkonstruktion muss darauf geachtet werden, dass die Anströmung gleichmäßig erfolgt. Dadurch kann die Bildung von Wirbeln, welche die Abflusskapazität verringern würden, bei einer geringen Überdeckungshöhe verhindert werden. Da sich die Betriebsentnahme, unabhängig vom Zweck, meist in der Nähe des Grundablasses befindet, führt die Anströmung zu einer Geschiebe- und Schwebstoffanlandung im Bereich des Grundablasses. Um diese Verlandung zu beseitigen, stehen verschiedene Maßnahmen zur Verfügung, wie beispielsweise die Spülung des gesamten Stauraumes. Diese Methode wird allerdings durch den Verlust des Stauvolumens nur in entsprechend großen Zeiträumen durchgeführt, oder im Zuge von groß angelegten Instandhaltungsmaßnahmen. Eine weitere Möglichkeit zur Freihaltung des Abflusses stellt die mechanische Räumung dar. Je nach verwendeten Verfahren können unterschiedliche Tiefen erreicht werden, beispielsweise findet die Saugbaggerung bis in eine Tiefe von 200 Metern Anwendung.

Der nächste Bauteil, der an das Einlaufbauwerk anschließt, ist der Druckstollen, der eine Leitung im Felsen, die bis zur Firste mit Wasser gefüllt ist, darstellt. Die Bemessung der Innenauskleidung erfolgt in der Regel auf den maximalen Staudruck und der Berücksichtigung eines dynamischen Druckanteils beim Schließen.

Der Druckstollen wird meist, da der Ausbruch vorwiegend mit einer Tunnelbohrmaschine erfolgt, kreisförmig ausgebrochen. Deshalb ist ein Verzug auf den rechteckigen Querschnitt der Apparatekammer erforderlich. Bei diesem Übergang muss darauf geachtet werden, dass keine Querschnittsaufweitung auftritt, da dieser zu Strömungsablösung führt und der dabei entstehende Unterdruck Kavitation begünstigt. Aus diesem Grund muss der Querschnitt bei dem Schütz kleiner als der oberwasserseitige Stollenquerschnitt sein. Je nach der abzuführenden Wassermenge gilt es, ein oder mehrere Verschlüsse parallel anzuordnen. Dabei ist im Vorhof auf eine strömungsgünstige Ausbildung der Gesamtkonstruktion aber auch der verschiedenen Teilbereiche zu achten. Damit kann die Wirbelbildung verhindert werden, die ansonsten die Abfuhrleistung beeinträchtigen würde.

Die am häufigsten verwendeten Verschlüsse eines Grundablasses sind Schützen und Segmentverschlüsse. Schütze können anhand der Lagerungsbedingung in Gleit- und Rollschütze eingeteilt werden. Segmentverschlüssen werden in Form von Drucksegmenten bevorzugt eingesetzt, da die Stauwand genau definiert ist und die, auf die Lagerung wirkenden Kräfte auf das Bauwerk leicht übertragen werden können. Der große Vorteil der Segmentverschlüsse ist, dass keine Nischen für die Führung des Verschlusses erforderlich sind und dass das Lager nicht das abfließende Wasser beeinflusst. Der Betrieb der angeführten Verschlüsse erfolgt meist durch hydraulische Stempel.

Die wesentlichen Unterschiede der Gleit- und Rollschütze liegen in der unterschiedlichen Ausbildung der Abdichtung und der Art der Lagerung sowie die, für den Betrieb wichtigen Reibungskräfte. Bei beiden Arten muss abhängig von der Situierung der Stauebene die Tragkonstruktion im Bereich der Ablösekannte, sprich der Unterkante des Schützes, so ausgebildet sein, dass das abfließende Wasser möglichst wenig gestört wird. Deswegen dürfen in Abhängigkeit der Situierung der Tragkonstruktion ober- oder unterwasserseitig im Bereich der Unterkante keine Tragelemente situiert werden.

Rollschütze können durch die Lagerung auf Rollen einfacher bewegt werden, als Gleitschütze, daher weisen sie größere Dimensionen auf. Weiters kommt ihnen durch die bessere Beweglichkeit der Ausbildung der Ablösekannte eine größere Bedeutung zu. Denn eine ungleichförmige Ablösung der Strömung kann neben einer Überbelastung auch ungewünschte Schwingungen, die auch durch Fehlstellen in der Dichtung auftreten, hervorrufen. Je nach Anforderungsprofil kommen unterschiedliche Dichtungsformen und Materialien zur Anwendung. So werden für die seitlichen Dichtungen meist Notenprofile verwendet, während für die Sohldichtung wegen der Ablösekannte stets Rechteckquerschnitte zur Anwendung kommen.

Im Anschluss an die Verschlüsse tritt das erste hydraulische Phänomen im Rahmen eines Grundablasses auf, die Belüftung. Sie ist abhängig von den abzuführenden Wassermengen und den dabei auftretenden Geschwindigkeiten. Eine ausreichend dimensionierte Belüftung hat wesentlichen Einfluss auf die Lebensdauer der Auskleidung im Freispiegelstollen. Die Luftmenge wird durch den, im Anschluss an die Verschlüsse auftretenden Unterdruck selbst-

ständig angesaugt, wobei sich die Effizienz der Belüftungseinrichtung nach dem auftretenden Leitungswiderstand und dem Füllgrad des Freilaufbereiches richtet.

Beim Abfluss durch den Freispiegelstollen kann es strömungsbedingt zur Entstehung von Stoßwellen kommen. Diese können zum Auftreten einer Wechselsprungausbildung führen, womit eine plötzliche Vergrößerung der Abflusshöhe einhergeht. Weiters begünstigen Stoßwellen den Abfluss an beiden Wänden entlang bis zur Firste und damit das Zuschlagen des Stollenquerschnittes. Dies wiederum verhindert die Luftzuleitung an der Firste, wodurch die Gefahr der Kavitation steigt.

Das Auftreten von Kavitation kann lediglich mit einer entsprechenden Belüftung des Abflusses verhindert werden. Kavitation entsteht nämlich sobald Zustände vorliegen, bei denen der Atmosphärendruck (ca. -10m WS) unterschritten wird. Deshalb ist im Rahmen des Verzugs des Druckstollens auf die Apparatekammer darauf zu achten, dass die Strömung gebündelt wird, da die Erhöhung des vorliegenden Drucks steigt, wodurch Kavitation vermieden wird. Da jede noch so kleine Unebenheit der Berandung zu Kavitation führen kann, ist eine glatte Ausführung des Grundablasses unerlässlich.

Nach dem Freispiegelstollen bildet die Energieumwandlung den Abschluss eines Grundablasses. Im Laufe der Arbeit wird auf zwei Verfahren näher eingegangen, dem Tosbecken und der Sprungschanze. Die Wirksamkeit des Tosbeckens richtet sich nach dem Grad der Energieumwandlung. Dafür gibt es je nach der Ausbildung des Beckens unterschiedliche Ansätze, bei denen stets die Ermittlung der Längenausdehnung im Mittelpunkt steht. Weiters werden in der Arbeit die unterschiedlichen Methoden und Konstruktionen zur Verbesserung der Wirksamkeit behandelt, sei es der Einbau von Störkörpern oder die Aufweitung des Querschnittes. Der Grad der Energieumwandlung einer Sprungschanze ist neben der Wurfweite und der Zersträubung des Wurfstrahles abhängig von der Bildung eines Kolkes unterhalb des Punktes des Auftreffens des Wasserstrahles auf die Wasseroberfläche. Abschließend kann festgestellt werden, dass die Ausbildung des Kolkes neben dem anstehenden Untergrund, vor allem vom Auftreffwinkel und dem Verhältnis der Strahldicke zur Wassertiefe abhängig ist.

Zusammenfassend wird darauf hingewiesen, dass im Rahmen eines Grundablasses insbesondere auf die strömungsgünstige Ausbildung der Linienführung des Stollens geachtet werden muss, da dies für die Langlebigkeit der Konstruktion und Dauerhaftigkeit von großer Bedeutung ist.

Literaturverzeichnis

Anastasi, G. (1982): Die Aufhebung von Stosswellen in Schussrinnen Verengungen. Dissertation an der ETH Zürich, Zürich.

Anastasi, G. (1983): Besondere Aspekte der Gestaltung von Grundablässen in Stollen. In: Wasserwirtschaft 73/12, S. 501-509.

Akademischer Verein Hütte (1970): Taschenbuch der Bautechnik, Band 2. 2. Auflage, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin.

Bauer, W.J. (1954): Turbulent boundary layer on steep slopes. In: Trans. ASCE 119, S. 1212-1242.

Blind, H. (1985): Design criteria for reservoir bottom outlets. In: Water Power & Dam Construction 7, S. 30-32.

Boes, R. (2012): Wasserbau 2 – Nebenanlagen von Talsperren: Grundablass. Online im Internet:

http://www.vaw.ethz.ch/education/lecture/hydraulic_engineering_2/vu/19_20_Talsperren_Grundablass_HS2012-12-03. Abgerufen am 1.8.2013.

Bremen, R. (1990): Expanding stilling basin. Online im Internet: http://infoscience.epfl.ch/record/116150/files/Comm_LCH_3_1.pdf. Abgerufen am 13.6.2013.

Bretschneider, H. (1987): Zur Belüftung der Strömung hinter Tiefschützen. In: Wasserwirtschaft 77/5, S. 224-229.

Brujan, E.A.; Keen, G.S.; Vogel, A.; Blake, J.R. (2002): The final stage of the collapse of a cavitation bubble close to a rigid boundary. In: Physics of Fluids 14/1, S.85-92.

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (1994): Ökologische Folgen von Strauraumpflungen. In: Schriftenreihe Umwelt 219, S. 1-47.

De Cesare, G.; Pfister, M.; Daneshvari, M.; Bieri, M. (2012): Herausforderungen des heutigen wasserbaulichen Versuchswesens mit drei Beispielen. In: Wasserwirtschaft 7-8, S. 71-75.

Eisenhauer, N. (1993): Der Einfluss der Belüftung auf die Kavitationserosion. Institut für Wasserbau und Kulturtechnik der Universität Fridericina, Karlsruhe.

Falvey, H.T. (1983): Prevention of cavitation on chutes and spillways. In: Frontiers in Hydraulic Engineering – Conference Proceedings, S. 432-437.

Falvey, H.T. (1990): Cavitation in chutes and spillways. Online im Internet: http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics_lab/pubs/EM/EM42.pdf. Abgerufen am 5.7.2013.

Geisler, T.; Hammer, A.; Pichler, O.; Heigerth, G. (2004): Zusammenführung des Grundablass und Hochwasserentlastung am Beispiel des Gosaudammes. In: 13. Deutsches Talsperrensymposium, S.1-19.

Hager, W.H.; Blaser, F. (1997): Drawdown curve and incipient aeration for chute flow. In: Canadian Journal of Civil Engineering 25, S. 467-473.

Hamilton, W.S. (1983): Preventing cavitation damage to hydraulic structures. In: Water Power & Dam Construction 35/11, S. 40-43 sowie 35/12, S. 48-53.

Hammit, F.G. (1972): Effects of gas content upon cavitation inception, performance, and damage. In: Journal of Hydraulic Research 10/3, S.259-290.

Hassing, R. (1988): Hydraulische Entwurfsgrundlagen für Grundablässe mit Mönchbauwerk. In: Wasserwirtschaft 78/1, o.S.

Isselin, J.C.; Alloncle, A.P.; Autric, M. (1998): On laser induced single bubble near a solid boundary: Contribution to the understanding of erosion phenomena. In: Journal of Applied Physics 84/10, S. 5766-5771.

Jacobs, F.; Winkler, K.; Hunkeler, F.; Volkart, P. (2001): Betonabrasion im Wasserbau. In: Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie Mitteilung 168, Zürich.

Jahnke, H. (1982): Die Kavitationserosion des Betons. In: Wasserwirtschaft-Wassertechnik, 32/7, S. 242-245.

Kells, R.A.; Smith, C.D (1991): Reduction of cavitation on spillways by induced air entrainment. In: Canadian Journal of Civil Engineering 18, S. 358-377.

Kienmandl, M. (1999): Wasserbauliche Konstruktionen zur Energieumwandlung. Diplomarbeit am Institut für konstruktiven Wasserbau TU Wien, Wien.

Knauss, J. (1982): Wechselsprung, Lufteintrag und schwallförmiger Abfluss in Grundablässen. In: Wasserwirtschaft 72/3, S. 115-119

Knauss, J. (1983): Wirbelbildung an Einlaufbauwerken (Luft- und Dralleintrag). In: Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V. (DVWK) Nr. 63, S. 1-91.

Knoblauch, H.; Hartmann, S.; De Cesare, G. (2007): Maßnahmen gegen die Verlandung von Stauräumen im Alpenraum. In: 14. Deutsches Talsperrensymposium, S. 234 – 238.

Kollbrunner, C.; Milosavljevic, S. (1967): Verschlussarten beim Stahlwasserbau - Einteilung nach kennzeichnenden Merkmalen und Übersichten. In: Mitteilungen über Forschung und Konstruktion im Stahlbau 35/2, S. 1-128.

- Kramer, K. (2002): Entlüftung von Hochgeschwindigkeitsabflüssen. Moderne Methoden und Konzepte im Wasserbau. In: Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie Mitteilung 174, Zürich, S. 365-372.
- Kramer, K. (2004): Development of Aerated Chute Flow. In: Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie Mitteilung 183, Zürich.
- Krause-Klein, T. (1984): Schwimmstoffrückhalt an festen Tauchwänden unter Berücksichtigung der Wirbelbildung. In: Mitteilungen Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Rheinisch - Westfälische Technische Hochschule Aachen 51, S. 1-179.
- Kühne, A. (1977): Die rasche Absenkung von Stauseen - Optimale Programme für Stauseesysteme. In: Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie Mitteilung 23, Zürich.
- Lattermann, E. (2005): Wasserbau-Praxis Band 1. 2. Auflage, Bauwerk Verlag, Berlin.
- Lesleighter, E.J. (1988): Cavitation in hydraulic structures. In: Conference Proceeding Paper of the International Symposium in Colorado Springs, S. 74-94.
- Lewin, K. (1995): Hydraulic gates and valves in free surface flow and submerged outlets; Thomas Telford Publications, London
- Mazumder, S.K. (2011): Energy Dissipation Devices. Online im Internet: http://www.profskmazumder.com/IT%20PDF/Ref_03.pdf. Abgerufen am 7.8.2013.
- Michel, J.M. (2001): Introduction to Cavitation and Supercavitation. Online im Internet: <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADP012072>. Abgerufen am 5.7.2013.
- Möller, G.; Pinotti, M.; Boes, R. (2010): Einlaufwirbeluntersuchung am Kraftwerk Handeck 2 – Kritische Überdeckungshöhe und Wirbelunterdrückungsmaßnahmen. Online im Internet: http://people.ee.ethz.ch/~vawweb/publications/hydraulic_structures_division_vaw/2010_2_937.pdf. Abgerufen am 5.6.2013.
- Naudascher, E. (1982): Kavitationsprobleme in Grundablässen. In: Wasserwirtschaft 72, S.104-110.
- Patt, H., Gonsowski, P. (2011): Wasserbau - Grundlagen, Gestaltung von wasserbaulichen Bauwerken und Anlagen. 7. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg.
- Pagliara, S.; Amidei, M.; Hager, W.H. (2008): Hydraulics of 3D Plunge Pool Scour. In: Journal of Hydraulic Engineering 134/9, S.1275-1284.
- Peterka, A.J. (1953): The effect of entrained air on cavitation pitting. In: IAHR - ASCE Joint Conference Proceedings, S. 507-518.

Pfister, M. (2008): Schussrinnenbelüfter - Lufttransport ausgelöst durch interne Abflussstruktur. In: Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie Mitteilung 203, Zürich.

Plesser, M.S.; Chapman, R.B. (1971): Collapse of an initially spherical vapor cavity in the neighborhood of a solid boundary. In: Journal of Fluid Mechanics 47/2, S. 283-290.

Rasmussen, R.E.H. (1956): Some experiments on cavitation erosion in water mixed with air. In: Symposium on Cavitation in Hydrodynamics 20, S. 1-25.

Röllli, P. (1982): Galeries forces precontraintes et chambres d'equilibre postcontrainte active de revetement en beton. In: ISRM Symposium Aachen 2, S. 693-704.

Rössert, R. (1984): Hydraulik im Wasserbau. 6. Auflage, R. Oldenbourg Verlag, München.

Russel, S.O.; Ball, J.W. (1967): Sudden Enlargement Energy Dissipator for Mica Dam. In: Hydraulics Division 93/HY4, S.41.

Rutschmann, P. (1988): Belüftungseinbauten in Schussrinnen. In: Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie Mitteilung 97, Zürich.

Schleiss, A. (1985): Bemessung von Druckstollen. In: Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie Mitteilung 78, Zürich.

Schneider, J.; Mayr, D.; Heigerth, G.; Klasnic, R. (2006): Der Modellversuch für den Grundablass des Kárahnjúkar Dammes in Island. In: Stauhaltungen und Speicher - Von der Tradition zur Moderne 49/1, S. 376-390.

Schöberl, F.; Reindl, R. (1994): Spülinsuffizienzprobleme bei Grundablässen. Sonderdruck aus Symposium Betrieb, Erhaltung und Erneuerung von Talsperren und Hochdruckanlagen. TU Graz, Graz.

Schriftenreihe des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes (2000): Feststoffmanagement in Kraftwerksketten, Heft 137, Wien.

Sebatware, J.P. (1997): Grundablässe österreichischer Talsperren. TU Graz, Graz.

Seyerl, J. (2001): Hydrodynamische Kräfte an Tiefschützen in Abhängigkeit vom Einstaugrad. Diplomarbeit am Institut für Konstruktiven Wasserbau der TU Wien, Wien.

Sharma, H.R. (1973): Air demand for high head conduits. In: Journal of the Hydraulics Division 102/11, S. 1629-1646.

Skripalle, J. (1994): Zwangsbelüftung von Hochgeschwindigkeitsströmungen an zurückspringenden Stufen im Wasserbau. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft Berlin, Berlin.

Speerli, J. (1999): Strömungsprozesse in Grundablassstollen. In: Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie Mitteilung 163, Zürich.

Suslick, K.S. (1989): Die chemischen Wirkungen von Ultraschall. In: Spektrum der Wissenschaft 4, S.60-66.

Totten, G.E.; Sun, Y.H.; Bishop, R.J. (2003): Hydraulic system cavitation: A review. Online im Internet:

http://www.getottenassociates.com/pdf_files/hydraulic_system_wear_by_cavitation.pdf.

Abgerufen am 30.6.2013.

Vischer, D. (1981): Verlandung von Stauhaltungen und Speicherseen im Alpenraum. In: Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie Mitteilung 53, Zürich.

Vischer, D.; Huber, A. (2002): Wasserbau – Hydrologische Grundlagen, Elemente des Wasserbaus, Nutz- und Schutzbauten an Binnengewässern. 6. Auflage, Springer-Verlag, Berlin.

Volkart, P. (1978): Hydraulische Bemessung steiler Kanalisationsleitungen unter Berücksichtigung der Luftaufnahme. In: Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie Mitteilung 30, Zürich.

Volkart, P. (1980): The mechanism of air bubble entrainment in self-aerated flow. In: International Journal of Multiphase Flow 6, S. 411-423.

Whittaker, J.G.; Schleiss, A. (1984): Scour Related to Energy Dissipators for High Head Structures. In: Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie Mitteilung 73, Zürich.

Wickert, G.; Schmausser, G. (1971): Stahlwasserbau. Springer-Verlag, Heidelberg.

Wood, I.R. (1983): Uniform region of self-aerated flow. In: Journal of Hydraulic Engineering 109/3, S.447-461.