

# **DIPLOMARBEIT**

Master's Thesis

## **Das hydraulische Verhalten eines HW-Schachtüberfalls**

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

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

am

**Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie**

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Silviya V. Velkova**

Matrikel-Nr. 0327323

Bulgaria, 3400 Montana

„Mladost“-1, bl. 25-E, ap. 29

Wien im Dezember 2008

---

## DANKSAGUNG

Ohne die Unterstützung der folgenden Personen wäre die Realisierung dieser Diplomarbeit nicht möglich gewesen.

Im besonderem bedanke ich mich bei Herrn Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Reinhard Prenner für seine umfangreiche Unterstützung während der Arbeit ,der mir die Erstellung der Diplomarbeit ermöglichte, und bei Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Tschernutter Vorstand des Instituts für Wasserbau und Ingenieurhydrologie der Technischen Universität Wien für die Möglichkeit der Benutzung des Institutslabors.

Weiters möchte ich ganz besonders Herrn Amtsdirektor Ing. Karl Fuchs für seine wertvollen Denkanstöße guten Ideen für den Modellaufbau und Anregungen danken, die den Fortgang der Arbeit maßgeblich förderten.

Bei den Mitarbeitern des Labors bedanke ich mich herzlich für die Unterstützung und den Bau der Modelle. Die Herren Andreas Kothmayer und Amtsdirektor Ing. Karl Fuchs haben das Modell aufgebaut was ich an dieser Stelle noch gesondert erwähnen möchte.

Ebenso bedanke ich mich bei den Universitäten UACG und TU-Wien die durch die Vereinbarung zwischen der Fakultät für Bauingenieurwesen der Technischen Universität Wien und der Fakultät für Hydrotechnik der Universität für Architektur, Bauwesen und Geodäsie (UACG) Sofia eine Kooperation zur Durchführung eines Studienganges Wasserbau in Deutsch an der UACG Sofia eingerichtet haben, in Zuge dessen diese Diplomarbeit entstand.

Besondere Anerkennung und Dank spreche ich meinen Eltern, Violina und Vezhen Velkovi aus, die mir dieses Studium ermöglichten und mir immer mit großer Unterstützung zur Seite gestanden sind.

Nicht zu letzt gilt mein Dank Univ.Ass. Dipl.-Ing. Edmund Spitzenberger, dessen Hilfe und Ratschläge mich sowohl in wissenschaftlicher als auch in persönlicher Hinsicht bereichert haben.

---

“remember when discoursing on the flow of water to adduce first  
experience and then reason”

Leonardo da Vinci

## **KURZFASSUNG**

Die vorliegende Diplomarbeit umfasst eine Grundstudie über das hydraulische Verhalten (Luftaufnahme) eines Schachtüberfalls mit senkrechtem Fallschacht, welche im Wasserbaulabor der TU Wien erstellt wurde. Die Ergebnisse dieser sollen zukünftig für einen weiteren Modellversuch zur Bestimmung der HW-Abfuhrfähigkeit der Hochwasserentlastungsanlage des Ausgleichsspeichers Gößkar an der Malta Hauptstufe als Grundlage dienen. Im wesentlichen waren die Größe des Lufteinzuges und die im Betrieb auftretenden Druckverhältnisse im Fallschacht waren zu bestimmen und gegenüberzustellen gewesen. Es sollten vor allem Maßstabeffekte, die bei belüfteten Abflusszustände immer auftreten, anhand einer Modellfamilie von geraden Fallrohren untersucht werden. Diese hatten einen Durchmesser von DN 200, DN 150 und DN 100 mit 3 unterschiedliche Längen und 2 Rohrrauigkeiten (sehr glatt, sehr rauh).

## **ABSTRACT**

The following master's thesis consists of a basic study about the hydraulic behavior (air entrainment) of a vertical shaft structure (simplified morning-glory spillway) by means of a hydraulic model test, which was investigated at the Hydraulic Laboratory of the Institute of Hydraulic Engineering and Water Resources, TU Vienna. The results should serve as decision basis for a future additional hydraulic model test determining the flood water capacity of the existing spillway of the compensating reservoir Gößkar at the Malta HHPP. The main purpose of the experiments was the determination and evaluation of the air entrainment and pressure distribution in the shaft during definite operating conditions. The test should reveal scale effects, which normally occur under aerated flow conditions, by means of a model family of a straight drop pipes. The investigated pipes have a diameter of DN 200, DN 150 and DN 100, with 3 different lengths and 2 roughnesses (very smooth, very rough).

---

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Bezeichnung	Benennung	Einheit
A	Querschnittsfläche	m <sup>2</sup>
$\beta$	Luftetragsrate	-
C <sub>0</sub> , C <sub>R</sub>	Überfallbeiwert für einen Kreisüberfall	m <sup>1/2</sup> /s
D	Kronendurchmesser des kreisförmigen Überfalls	m
H <sub>0</sub>	Überfallhöhe	m, cm
h <sub>s</sub>	Ortshöhe	m, cm
H <sub>Ü</sub>	Energiehöhe über die Krone	m, cm
$\mu$	Überfallbeiwert	-
n, k <sub>st</sub>	Manning Koeffizient	m <sup>1/3</sup> /s
P	Standhöhe	m, cm
$Q_{Luft}$	eingesaugte Luftmenge	l/s
$Q_{Wasser}$	Abfluss	l/s
R	Radius des Fallrohrs	m
v	Fliessgeschwindigkeit	m/s
W	Wasservolumen	m <sup>3</sup>
$\sum \xi$	Summe der Verluste	-

---

## INHALTSVERZEICHNIS

DANKSAGUNG	SEITE 2
KURZFASSUNG	SEITE 3
ABSTRACT	SEITE 3
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	SEITE 4
1 EINLEITUNG	SEITE 7
1.1 ALLGEMEINES	SEITE 7
1.2 PROBLEMSTELLUNG	SEITE 10
1.3 RELEVANTE FORSCHUNGSARBEITEN	SEITE 10
2 KONSTRUKTIVE AUSBILDUNG VON SCHACHTÜBERFÄLLEN	SEITE 13
2.1 GESCHICHTLICHES	SEITE 13
2.2 EINLAUFBAUWERK	SEITE 15
2.3 TRANSPORTBAUWERK	SEITE 16
2.4 ENERGIEUMWANDLUNGSBAUWERK	SEITE 17
3 HYDRAULISCHE GRUNDLAGEN	SEITE 18
3.1 ABFLUSSVORGÄNGE	SEITE 18
3.2 HYDRAULISCHE BEMESSUNG	SEITE 20
3.3 LUFTEINTRAG	SEITE 25
3.4 WIRBELBILDUNG	SEITE 27
4 HYDRAULISCHER MODELLVERSUCH	SEITE 30
4.1 ALLGEMEINES	SEITE 30
4.2 MODELLÄHNLICHKEIT	SEITE 30
4.3 HYDRAULISCHE VORBEMESSUNG	SEITE 32
4.4 MODELLAUFBAU	SEITE 33
4.5 MESSTECHNIK	SEITE 42
4.6 VERSUCHSPROGRAMM	SEITE 45
4.7 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	SEITE 48
5 ERGEBNISSE DES MODELLVERSUCHES	SEITE 50

---

5.1	ALLGEMEINES	SEITE 50
5.2	VORVERSUCHE	SEITE 51
5.3	HAUPTVERSUCHE	SEITE 58
5.4	STRÖMUNGSPHÄNOMENE	SEITE 84
6	VERGLEICH DER VERSUCHSERGEBNISSE	SEITE 86
7	ZUSAMMENFASSUNG	SEITE 94
	LITERATURVERZEICHNIS	SEITE 96

# 1 EINLEITUNG

Im Rahmen dieser Arbeit wurden anhand eines hydraulischen Modellversuches Grundlagen für die Luftaufnahme in einem vertikalen Fallrohr erarbeitet. Die erhaltenen Erkenntnisse dienen als Basis für einen Modellversuch, der zum Nachweis der Hochwasserabfuhrfähigkeit des Schachtüberfalls des Ausgleichspeichers Gösskar der Malta Kraftwerk Hauptstufe (Abb 1.2), der später am Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie durchgeführt werden soll.

## 1.1 ALLGEMEINES

Eine HW-Entlastungsanlage ist ein Sicherheitsüberlauf, der bei HW-Ereignissen den nicht speicherbaren Teil der Hochwasserwelle schadlos über diese abführen muss, ansonsten eine massive Gefährdung des Absperrbauwerkes (Talsperre) besteht. Kriterien zur Planung und Auswahl der Hochwasserentlastungsanlagen sind in [20, Schultz] zusammengefaßt. Nach diesen können Einlauf-, Transport- und Auslaufbauwerke unterschiedlich kombiniert werden (Abb.1.1).

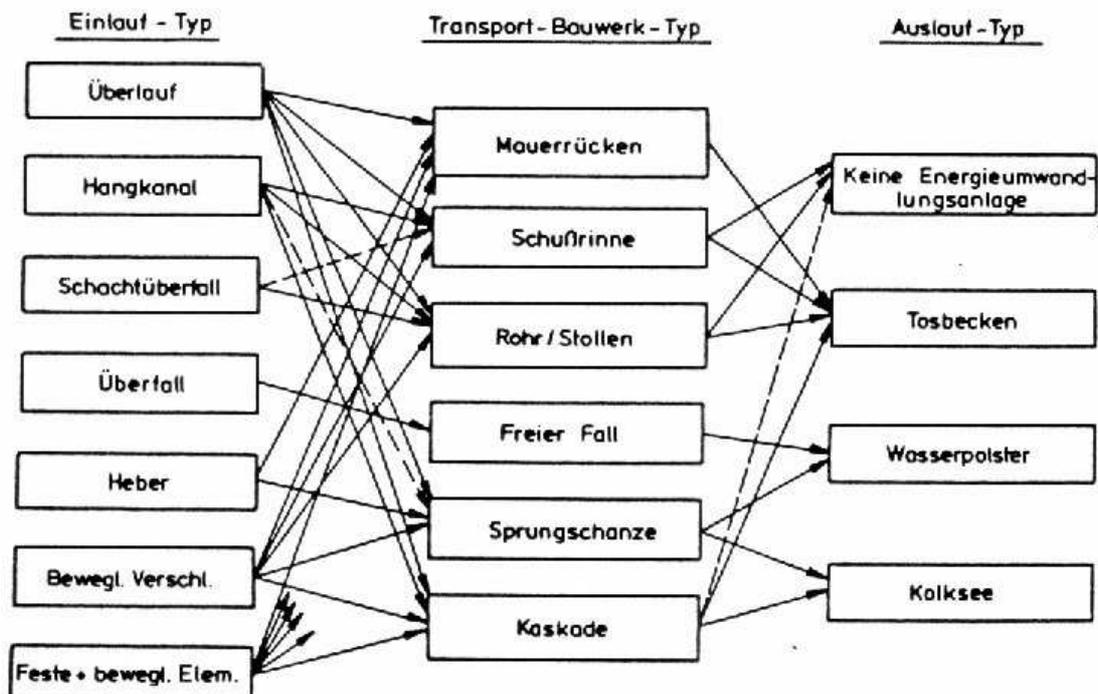


Abb. 1.1 Kombinationsmöglichkeiten der Einzelbauwerke einer HW-Entlastungsanlage [20]

---

Hochwasserentlastungsanlagen können mit der Sperre kombiniert bzw. getrennt angeordnet werden. Ob eine Trennung der Anlagen (Sperre und Hochwasserentlastung) erfolgt, hängt vom Sperrtyp und damit auch von den geologisch topographischen Verhältnissen ab. Voneinander getrennte Anlagen werden häufig bei Staudämmen errichtet, da diese keinesfalls überströmt werden dürfen. In diesem Fall kommt der Schachtüberfall für kleinere Bemessungshochwässer, wie sie zum Beispiel im alpinen Raum auftreten, zur Anwendung. Man nennt ihn auch Kreis-, Trichter- oder Tulpenüberfall. Der Schacht mit üblicherweise kreisförmigen Querschnitt kann schräg gestellt oder vertikal geführt sein. Er wird über einen Krümmer mit dem Stollen verbunden. Der Schachtüberfall kann mit dem Grundablaß, der Triebwasserleitung sowie auch dem Bauumleitungsstollen kombiniert werden.

Folgende Vorteile sprechen für den Einsatz einer auf solcher Art kombinierten Schachtüberfallbauweise:

- ästhetische Erscheinung
- Mehrzweckfunktion
- kürzere Längen, geringer Platzbedarf
- weniger Materialaufwand, weniger Schalungsarbeiten, weniger Investitionskosten
- leichte Wartung
- one-place work durch multifunktionelles Bauwerk

Letztendlich ist aber die Kombination der Entlastungsanlage mit anderen Betriebseinrichtungen in Beziehung zum Bemessungshochwasserabfluss, der Betriebssicherheit und den Kosten zu sehen.

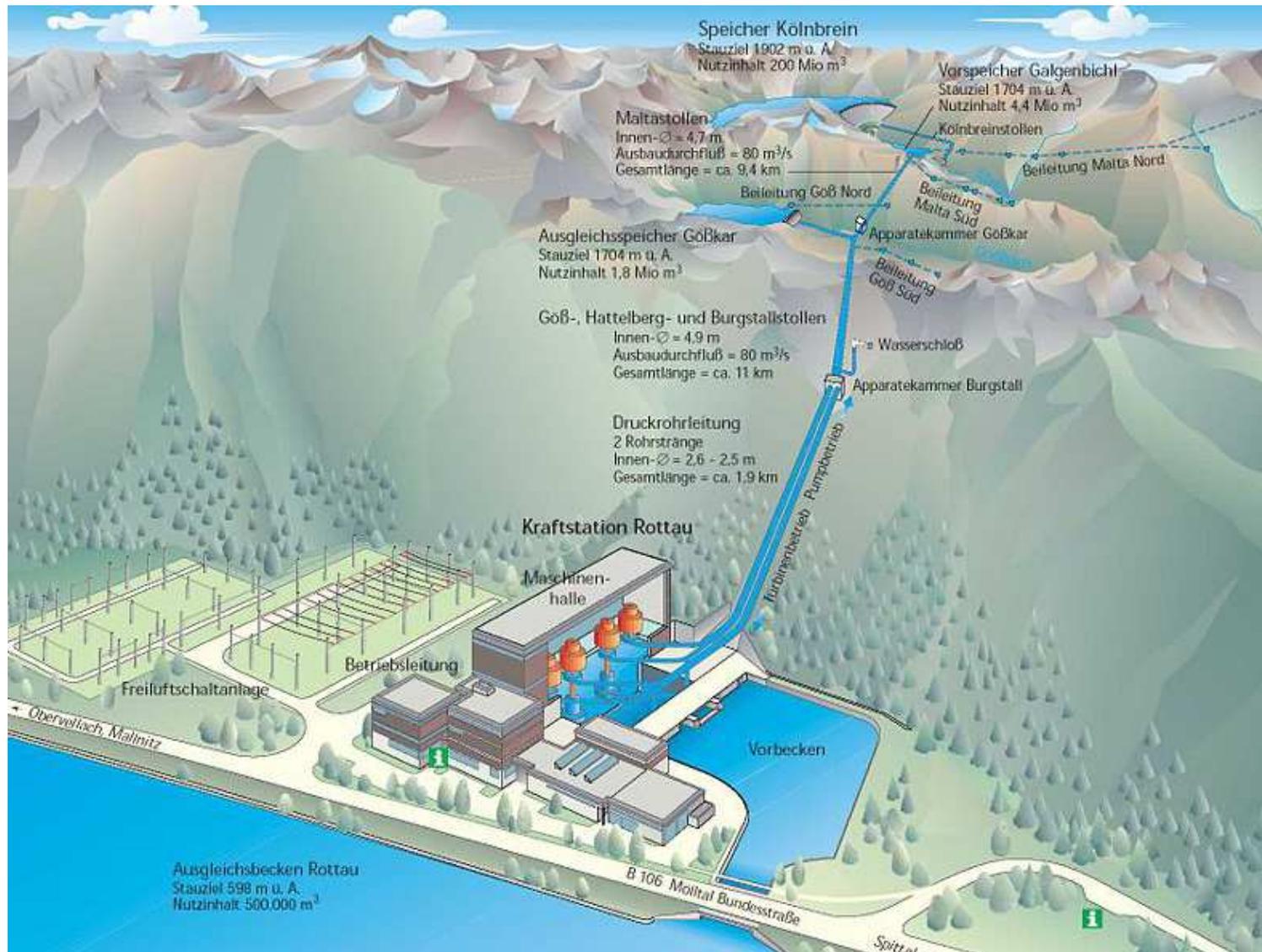


Abb. 1.2 Speicher- und Triebwassersystem der Malta Hauptstufe

---

## 1.2 PROBLEMSTELLUNG

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es die Abhängigkeit der Luftaufnahme von der abgeführten Wassermenge in einem Schachtüberfall experimentell im Rahmen einer Modellfamilie zu untersuchen.

Die Untersuchung von mehreren Modellen im verschiedenem Maßstab, soll diesen Zusammenhang ermöglichen. Folgende Parameter wurden im Versuchsprogramm variiert:

- Durchmesser des Rohres
- Rohrlänge
- Rauigkeit
- Wassermenge

## 1.3 RELEVANTE FORSCHUNGSARBEITEN

Aus der Vielzahl von Veröffentlichungen werden nachfolgend nur solche [17, Hack] ausgewählt, wo die Experimente zum Vergleich zu den Ergebnissen mit dieser Diplomarbeit herangezogen werden können.

- Laushey und Mavis (IAHR 1953) – Untersucht wurde ein eingestauter Fallschacht mit 2 verschiedenen Durchmessern und einer maximalen Wassermenge von 28 l/s. Die eingezogene Luftmenge war von der Wassermenge, dem Schachtdurchmesser, der Fallhöhe und den Einlaufbedingungen abhängig.
- Marquet (IAHR 1953) – Bestimmung des Lufteintrages im radial angeströmten Fallschacht mit konstantem Durchmesser und variierender Länge. Der Auslauf war rückgestaut oder frei. Mittels einer Meßblende wurde die Luftzufuhr gemessen. Das Verhältnis der eingesaugten Luftmenge zur abfließenden Wassermenge wird in Abhängigkeit der verschiedenen Fallrohrängen dargestellt.
- Viparelli (1954) – untersuchte ebenfalls einen Wirbelschacht mit freiem und rückgestautem Auslauf mit konstantem Durchmesser und variierenden Fallhöhen. Ein Flügelradanemometer wurde zur Messung des Lufteintrags benutzt. Abhängig vom Abflusszustand wurden

---

verschiedene analytische Formel zur Definition der Luftmenge angewandt.

- Kalinske (1940) – verwendete eine Beziehung zwischen dem maximal möglichen Lufteintrag, der Grenzluftmenge und der Wassermenge
- Sastry (1962) – untersuchte 2 geometrisch ähnliche Modellen mit unterschiedlichem Schachtdurchmesser bei rückgestautem Austritt.
- Kraus (1973) – Der Lufteintrag wird nach seinem Modell nur durch die Reibung in der Kontaktfläche zwischen Wasser und Luft verursacht.
- Whillock und Thorn (1973) – untersuchten einen ebenen Wandstrahl, der in einen Wasserpolster stürzt, mit dem Ergebnis, dass die Oberflächenrauigkeit des Wandstrahles einen direkte Einfluß auf den Lufteintrag hat.

Nach diesen Arbeiten hat die Fallhöhe sowie auch die Anströmung eine außerordentlicher Bedeutung auf dem Lufteintrag. Der Lufteintrag hängt von der Größe der Wassermenge, die je nach dem Abflusszustand verschiedene Werte annehmen kann, ab. Bei kleineren Wassermengen erfolgt die Luftzufuhr nur durch Reibung zwischen der Strahloberfläche und der Luft. Der kritische Punkt, bei dem der Einmischungsvorgang durch turbulente Diffusion beginnt, wird nur bei größeren Wassermengen erreicht.

Aufbau und Anströmungsbedingungen waren in den Modellversuchen von Hack, Viparelli und den im Zuge dieser Diplomarbeit durchgeführten Versuche gering unterschiedlich.

Viparelli untersuchte gerade Fallrohre mit freiem und rückgestautem Auslauf. „Der Lufteinzug wurde mittels eines am Einlauf über einen eingetauchten Zylinder angeschlossenen Flügelradanemometer bestimmt. Für verschiedene Abflusszustände im Fallschacht werden unterschiedliche Formeln zur Berechnung der Lufteinzugs vorgeschlagen“ [17, Hack]

Nach Hack [17] lautet die Formel für freien Abfluss:

$$\frac{(Q_w + Q_L)}{Q_{ii}} = \sqrt{\frac{Q_w}{Q_{ii}}},$$

wobei  $Q_{ii}$  den Überdeckungsabfluss bezeichnet,  $Q_w$  - Wassermenge in l/s und  $Q_L$  - Luftmenge in l/s.

Hack modellierte einen Schachtüberfall ohne Ausrundung des Trichters. Der Fallrohrauslauf war frei ausfließend ausgebildet. „Der Überlauftrichter wird durch eine ringförmige Düse ersetzt, dem sogenannten Ringstrahlformer, der den senkrechten ringförmigen Abfluss im Fallschacht erzeugt“ [17, Hack]. Im Modell „wurde am unterwasserseitigen Ende des Fallrohres ein dachförmiger Keil mit einer in der Rohrachse gelegenen Öffnung, welche die Verbindung zum atmosphärischen Aussendruck durch seine offenen Stirnflächen herstellt, eingebaut.“ [17, Hack]. Die Messergebnisse sind in Abb. 1.3 dargestellt.

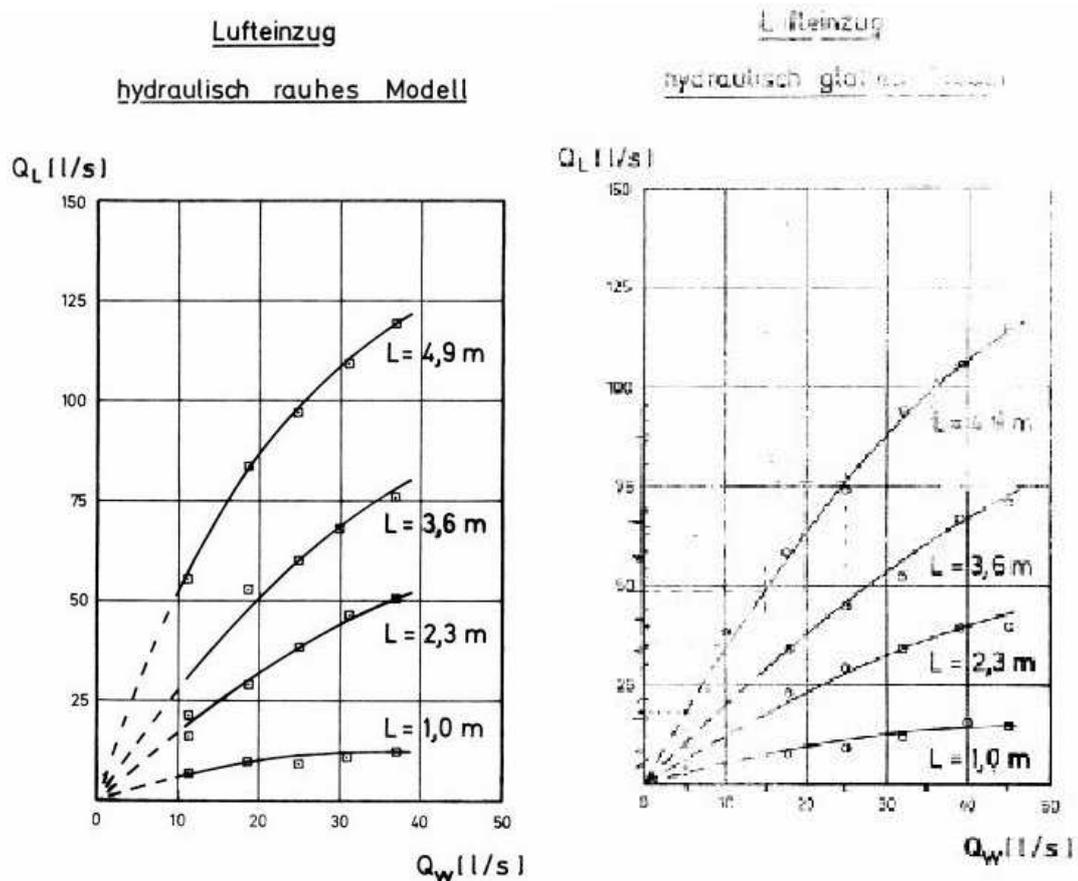


Abb. 1.3 Lufteinzug bei hydraulisch rauhen und glatten Rohren [17]

Weitere von diesen Verfassern veröffentlichte Versuchsergebnisse werden im Kapitel 6 dieser Arbeit direkt mit den eigenen Ergebnissen verglichen.

## 2 KONSTRUKTIVE AUSBILDUNG VON SCHACHTÜBERFÄLLEN

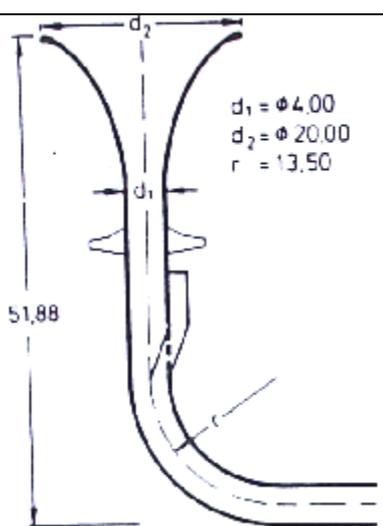
Wie bereits erwähnt werden Hochwasser in HW-Anlagen je nach den örtlichen Verhältnissen und nach der Bauart der Sperre, der abzuführenden Wassermenge und der zu überwindenden Höhe in Verbindung mit dem Sperrenbauwerk oder getrennt davon, jeweils für sich allein oder in Verbindung mit anderen Betriebseinrichtungen, angeordnet [6, Press].

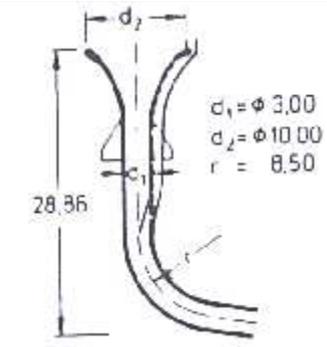
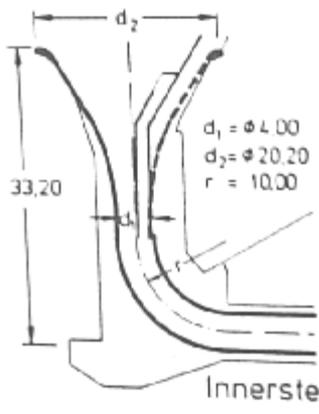
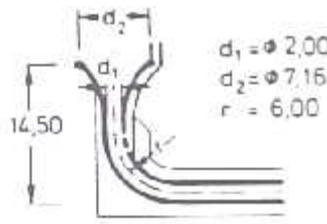
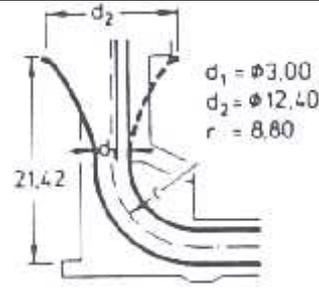
### 2.1 GESCHICHTLICHES

Die erste Konstruktion eines Schachtüberfalls zur Ableitung von Hochwässern wurde im 1896 in England für den Blackton- Staudamm von James Mansergh geplant.

Eine kurze Übersicht über existierende Talsperren mit Schachtüberfall gibt Tab.2.1.

Tab. 2.1 Talsperren mit Schachtüberfall [21]

Talsperre	Ort	Parameter
Hugry Horse Dam	USA, Flathead	Abflussvermögen 53,000 cfs
Owyhee Dam	USA, Oregon	Abflussvermögen 41,790 cfs
Ohra	DE, Thüringen	Abflussvermögen 75 m <sup>3</sup> /s
Front Reservoir	England	
San Dal mazzo di Tenda	Italien	
Große Dhünn	DE, Nordrhein-Westfalen	

<p>Frauenau</p>	<p>DE, Bayern</p>	 <p> <math>d_1 = \phi 3,00</math>  <math>d_2 = \phi 10,00</math>  <math>r = 8,50</math> </p>
<p>Innerste</p>	<p>DE, Niedersachsensachsen</p>	 <p> <math>d_1 = \phi 4,00</math>  <math>d_2 = \phi 20,20</math>  <math>r = 10,00</math> </p> <p>Innerste</p>
<p>Hillebach</p>	<p>Deutschland</p>	 <p> <math>d_1 = \phi 2,00</math>  <math>d_2 = \phi 7,16</math>  <math>r = 6,00</math> </p>
<p>Haigerbach</p>	<p>Deutschland</p>	 <p> <math>d_1 = \phi 3,00</math>  <math>d_2 = \phi 12,40</math>  <math>r = 8,80</math> </p>

## 2.2 EINLAUFBAUWERK

Das Überfallbauwerk kann in verschiedenen Formen ausgebildet werden (Abb. 2.1), bei Bedarf auch mit Leitwänden am Einlauf. Die Überfallkrone soll so geformt sein, dass kein Unterdruck am Überfallrücken auftritt, d.h. die Ausrundungsradien sollten so groß wie möglich sein. Eine gute Leistungsfähigkeit wird erreicht, wenn die Strömung radial zur Überfallkrone verläuft. Das ist aber bei den üblichen Praxisbedingungen (Stauseetopographie) nur schwer zu erfüllen, da durch eine meist gegebene asymmetrische Anströmung ein Drall induziert wird, der den Abfluss einschränkt. Daher sollte der Abstand zwischen Überfall und Ufer mindestens den Überfallkronendurchmesser entsprechen.

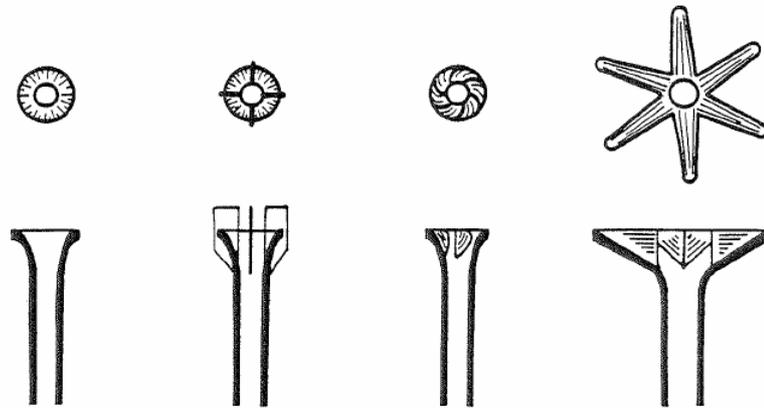


Abb. 2.1 Trichterüberfallformen [8]

Zur Unterdrückung des Einlaufwirbels können Leitwände eingebaut werden, die die Strömung gleichrichten. Die Frontseite der Leitwand kann kreisbogen-, spitzbogen- oder ellipförmig ausgebildet sein (Abb. 2.2).

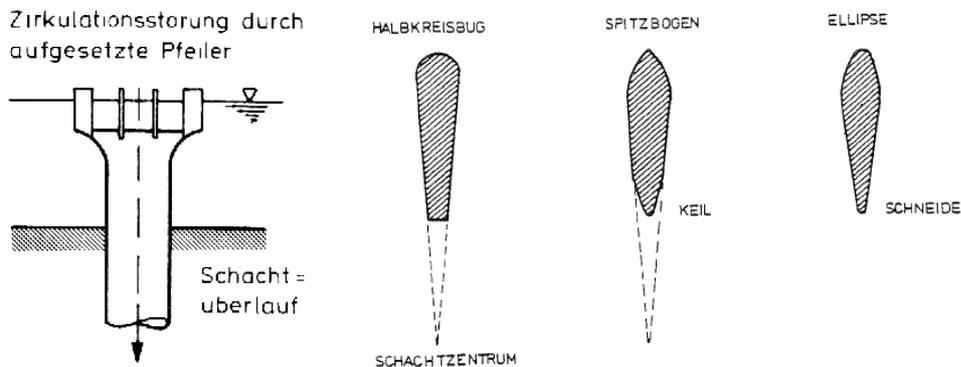


Abb. 2.2 Leitwände [3], Leitwandformen [8]

Falls Leitwände geplant sind, muss die Kontraktion durch diese in der hydraulischen Bemessung berücksichtigt werden.

---

## 2.3 TRANSPORTBAUWERK

Dieses wird in den Regel mit einem vertikalen, aber auch mit einem schräggestellten Fallrohr ausgeführt (Abb.2.3). Der Fallschacht wird meistens mit konstantem Durchmesser und einer Verengung zur Strahlablösung mit Belüftung im Übergangsknick zum horizontalen Stollen ausgebildet. Zur Vermeidung von Kavitation können auch Belüftungslöcher am Übergang zwischen Überfall und Fallrohr eingebaut werden.

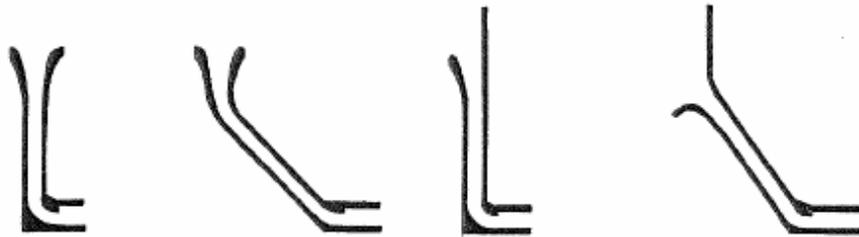


Abb. 2.3 Möglichkeiten der Schachtführung [8]

Infolge der Umlenkung der Strömung im Krümmer zum Stollen entstehen oft starke Schwingungen. Der Krümmungsradius sollte entweder so groß gewählt werden, dass hier keine Ablösung der Strömung auftritt, oder mit einer scharfen Ablöskante am Innenradius ausgebildet werden. Der Stollen wird üblicherweise als ein Freispiegelstollen ausgebildet, da es sonst wegen der über den Schacht eintransportierten Luft zu instabilen Strömungsverhältnissen kommt. Um diese unerwünschten Erscheinungen zu vermeiden, soll im Stollenquerschnitt immer eine ausreichende Luftmenge zugeführt werden. Um einen ungestörten Lufttransport und infolgedessen Freispiegelabfluss zu gewährleisten, sollte der Stollen nur etwa drei Viertel der Höhe mit Wasser gefüllt sein. Der Stollen ist in der Regel in Richtung Auslauf leicht geneigt. In Gebieten mit starkem Frost sollten die Entlastungsanlagen, mit Wasserabführung im Stollen, gegen Vereisung geschützt werden.

## 2.4 ENERGIEUMWANDLUNGSBAUWERK

Das Transportbauwerk kann in einem Tosbecken, in dem die restliche kinetische Energie des Wassers dissipiert wird, enden, aber es kann am Ende des Stollens auch eine Sprungschanze zum Abwurf und Versprühung des konzentrierten Abflusstrahles angeordnet werden.

Bei der Tosbeckenlösung kann die Energieumwandlung mit einem aufgeweiteten Becken und mit eingebauten kompakten Störkörpern verbessert werden. Ein Konstruktionstyp dazu wird in Abb. 2.4 dargestellt. Die hydraulischen Berechnungen und Modellversuche erfolgen analog zu den Tosbecken anderer Schussrinnen.

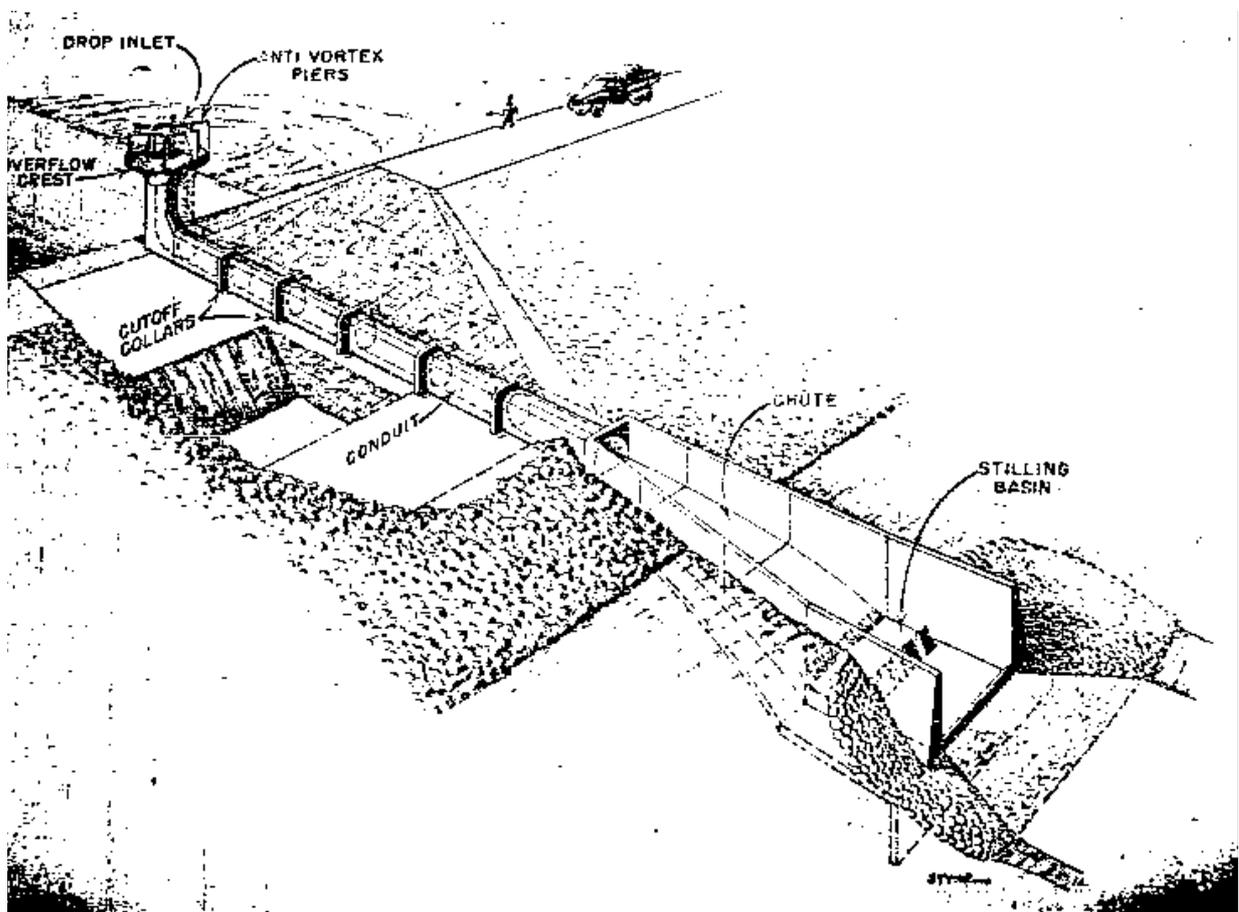


Abb. 2.4 Energieumwandlung eines HW-Turms [15]

Bei Verzicht auf ein Energieumwandlungsbauwerk muss im Flussbett mit starken Kolken gerechnet werden (ev. Gefährdung Stollenauslauf durch rückschreitende Erosion).

---

### 3 HYDRAULISCHE GRUNDLAGEN

Im folgenden Abschnitt wird die prinzipielle Wirkungsweise eines Trichterüberfalls, dessen hydraulische Berechnung, der Lufteinzug sowie die Wirbelbildung durch die Anströmung beschrieben.

#### 3.1 ABFLUSSVORGÄNGE

Hydraulisch gesehen können in Abhängigkeit des Durchflusses drei unterschiedliche Abflusszustände in einem Schachtüberfall beobachtet werden (Abb.3.1).

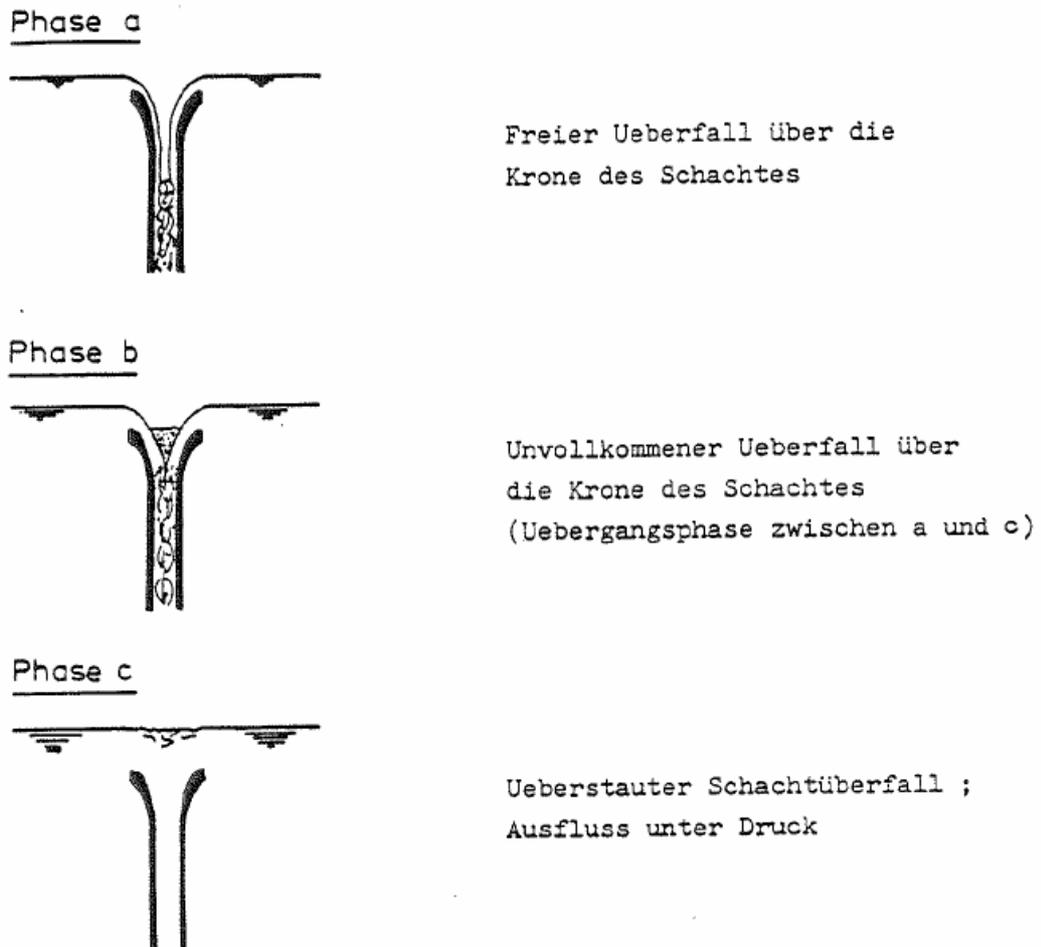


Abb. 3.1 Abflusszustände eines Trichterüberfalls [8]

Die Phase a beschreibt den freien Überfall über eine kreisförmige Wehrkrone. Bei der zweiten Phase b handelt es sich um eine Übergangsphase, wo der Abfluss mit freiem Spiegel zum Abfluss unter Druck wechselt. Diese wird auch oft vernachlässigt. Die letzte Phase c stellt einen Abfluss unter Druck dar.

Die drei genannten Phasen sind graphisch in Abb. 3.2 als Funktion zwischen der Energiehöhe und der Wassermenge dargestellt.

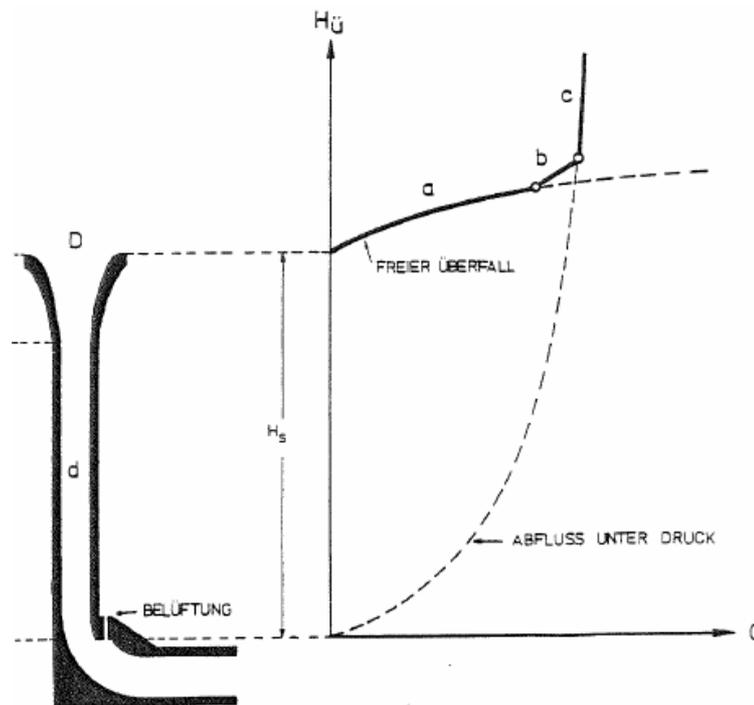


Abb. 3.2 Schlüsselkurve eines Trichterüberfalls [8]

#### DETAILBESCHREIBUNG DER ABFLUSSVORGÄNGE

Ein Wasser-Luft Gemisch benötigt selbstverständlich einen größeren Volumens als ein reiner Wasserabfluss. Bei kleineren Überfallhöhen wird neben Wasser auch eine größere Luftmenge eingeogen. Es herrscht Atmosphärendruck oberhalb des Überfallsstrahls und ein Luftkern bildet sich in der Schachtmittle aus. Die Strömung legt sich ringförmig an die Schachtwandung an. Danach vergrößert sich die Wassermenge und der Schacht ist teilweise mit Wasser gefüllt.

Der maximale Lufteinzug tritt dann auf, wenn sich der kreisförmige Überfallstrahl in Kelchmitte berührt. Mit steigendem Abfluss bildet sich ein Schaumpilz im Trichter aus. Luft wird geräuschvoll in den Fallschacht eingesaugt. Mit steigenden Abfluss reduziert sich der Lufteinzug bis der Grenzabfluss in der letzten Phase erreicht wird. Der Einlauf der Hochwasserentlastungsanlage wird nun vollkommen überstaut. In dieser Phase handelt es sich um einen reinen Druckabfluss. Die Leistungsfähigkeit des Überfalls ist im wesentlichen auf den Grenzabfluss beschränkt. Ab diesem

---

erhöht sich der Wasserspiegel schnell bei nahezu gleichbleibendem Abfluss. Es fließt nun kein Wasser-Luftgemisch mehr, sondern nur noch Wasser alleine ab, dabei tritt auch meistens bei entsprechenden Querschnittsverhältnissen Kavitation im Schacht auf.

Das Luft-Wassergemisch beeinflusst die Abflussvorgänge in Phase a und b sehr stark. Um Kavitationserscheinungen abzuwenden, baut man Belüftungsanlagen wie z.B. ringförmige oder auch einzelne Belüftungseinrichtungen ein. Eine künstliche Wirbelbildung durch spezielle geführte Leitwände (wie bei den Wirbelfallschächten) kann auch oft hilfreich sein.

Jedoch werden meistens zur Unterdrückung der Wirbelbildung infolge der Zuströmung, Leitwände eingebaut (Abb. 2.2).

### 3.2 HYDRAULISCHE BEMESSUNG

Die hydraulische Bemessung gliedert sich in folgende Untersuchungen:

- Freier, unvollkommener, oder überstauter Überfall über die kreisförmige Krone unter Berücksichtigung des Lufteinzugs
- Strömungsuntersuchung ausgewählter Bauwerksteile (z.B. Fallschachtkrümmen, Stollen etc.)
- Energieumwandlung am Ende des Stollens

Eine Vorbemessung des Überfallbauwerks kann nach der Formel von Poleni erfolgen.

$$Q_{ii} = \frac{2}{3} \mu \sqrt{2g} B H_{ii}^{3/2}, m^3 / s,$$

wobei

$$B = \pi D$$

D – Kronendurchmesser des kreisförmigen Überfalls

H<sub>ii</sub> – Energiehöhe über die Krone

μ – Überfallbeiwert, wird experimentell genau ermittelt.

Der Überfallbeiwert bei Schachtüberfällen ist 10 – 30% geringer als bei einem entsprechend geformten geradlinigen Wehrrücken [22, Schmidt], d.h. bei der selben Überfalllänge ist das Abfuhrvermögen des Trichterüberfalls auf Grund der Krümmung geringer.



Eine detailliertere Überfallbemessung kann mit Hilfe des Iterationsverfahrens nach USBR,1987 [7, Mays] durchgeführt werden. Dabei wird der Trichterüberfall als scharfkantiger Überfall betrachtet (Abb. 3.5).

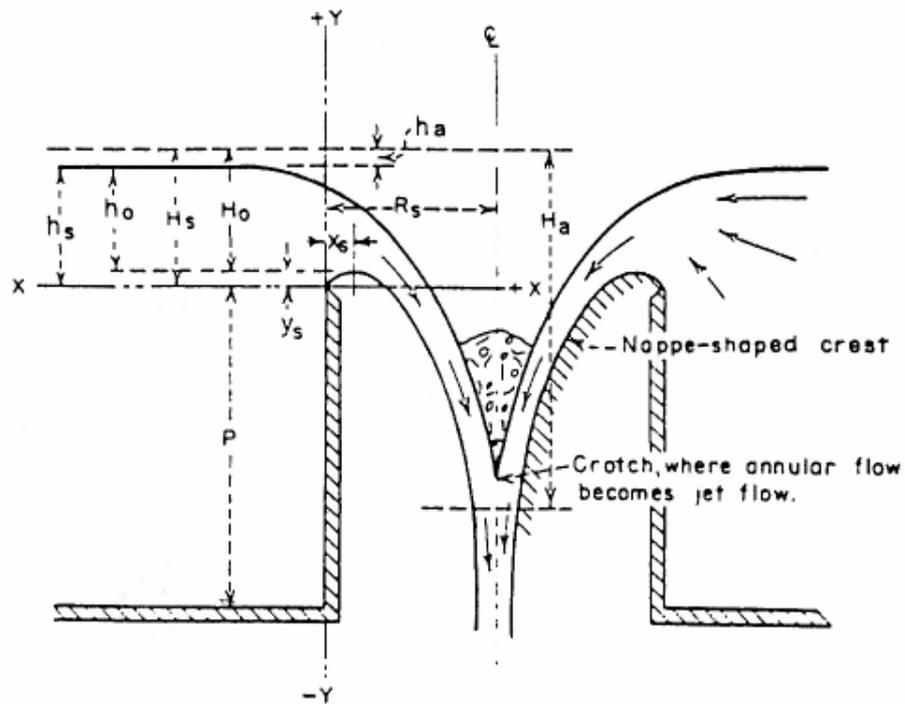


Abb. 3.5 Scharfkantiger Rohrüberfall [7]

Die Bemessung nach USBR erfolgt folgendermaßen:

- Festlegen der Bemessungshöhe  $H_0$  und des Kronenradiuses. Ein Verhältnis  $H_0 / R_s \leq 0.4$  [12, Маринов] wird empfohlen. Mit Abb. 3.6 erhält man den Wert von  $C_0$ , dieser wird mit 0.552 multipliziert, um auf die Dimension Meter zu erhalten. Die Überfallströmung ist auch von der Fallhöhe abhängig.

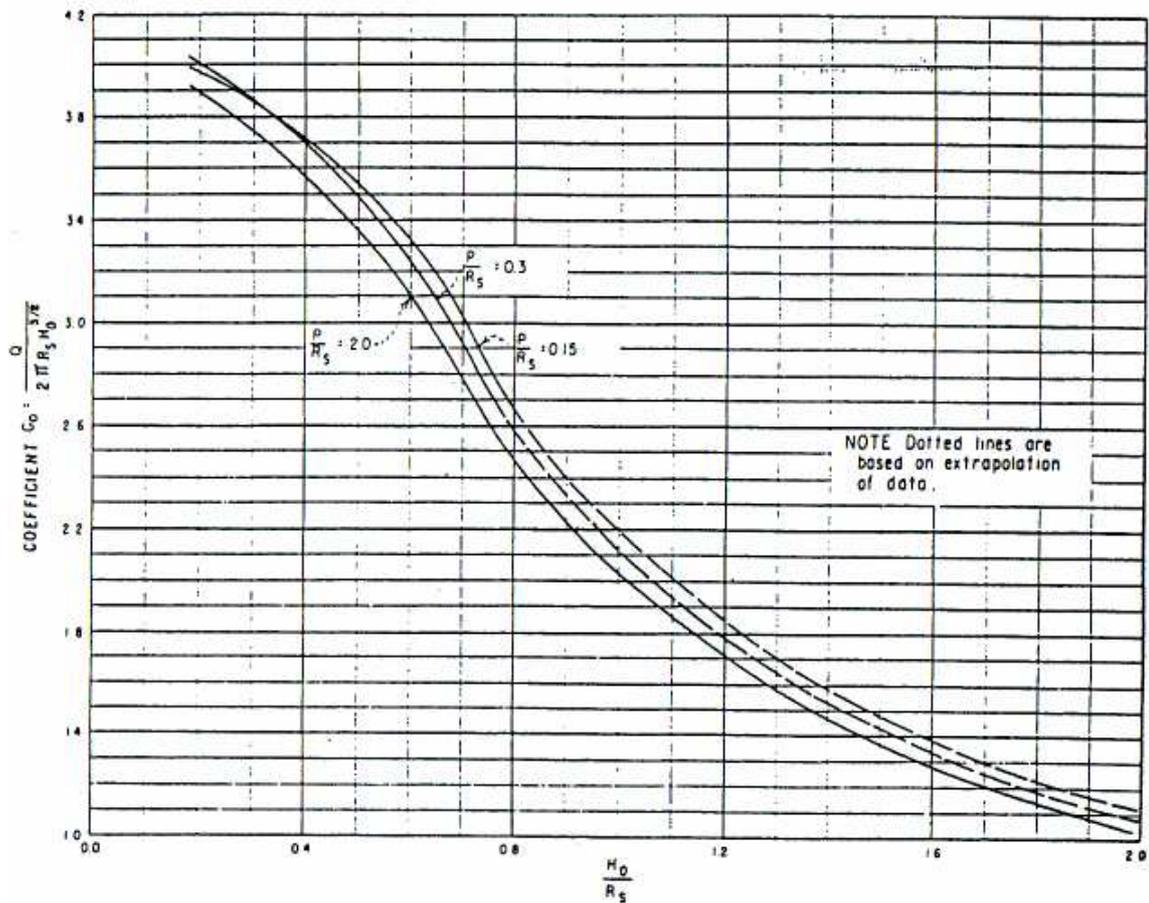


Abb. 3.6 Circular crest coefficient for a morning-glory spillway [7]

- Bestimmung der Strahlunterfläche nach Tab. 17.3, Tab.17.4, Tab.17.4 [7, Mays].
- Überprüfung des Grenzabflusses (Verschlucken) mittels der Formel

$$R = C_R \frac{Q^{1/2}}{H_0^{1/4}}, \text{ wobei } C_R = 0.275m,$$

R - ist der empfohlene Radius des Fallrohres im Fall des Verschluckens,  
 $H_0$  - ist der Abstand von der engsten Wasserquerschnittsstelle bis zum  
 Energielinie des Oberwassers,

Q – angenommene Wassermenge

Falls R größer als der wirkliche Radius des Fallrohres für eine bestimmten Wassermenge ist, kann ein Verschlucken ausgeschlossen werden.

- Andernfalls neue Berechnung. Die beste Konstruktion ergibt sich, wenn sich ein freier Überfall über die Krone des Schachtes ausbildet.

Eine weitere Überfallbemessung kann mit Hilfe des Verfahrens nach Bollrich [11] durchgeführt werden.

Wenn bei der untersuchten Überfallkonstruktion  $P > R_s$  (oder  $w > R$  /nach der Bezeichnungen von Bollrich/) ist, erhält man die Werte des Überfallbeiwertes für  $C = f(h/R)$  aus folgender Abb. 3.7.

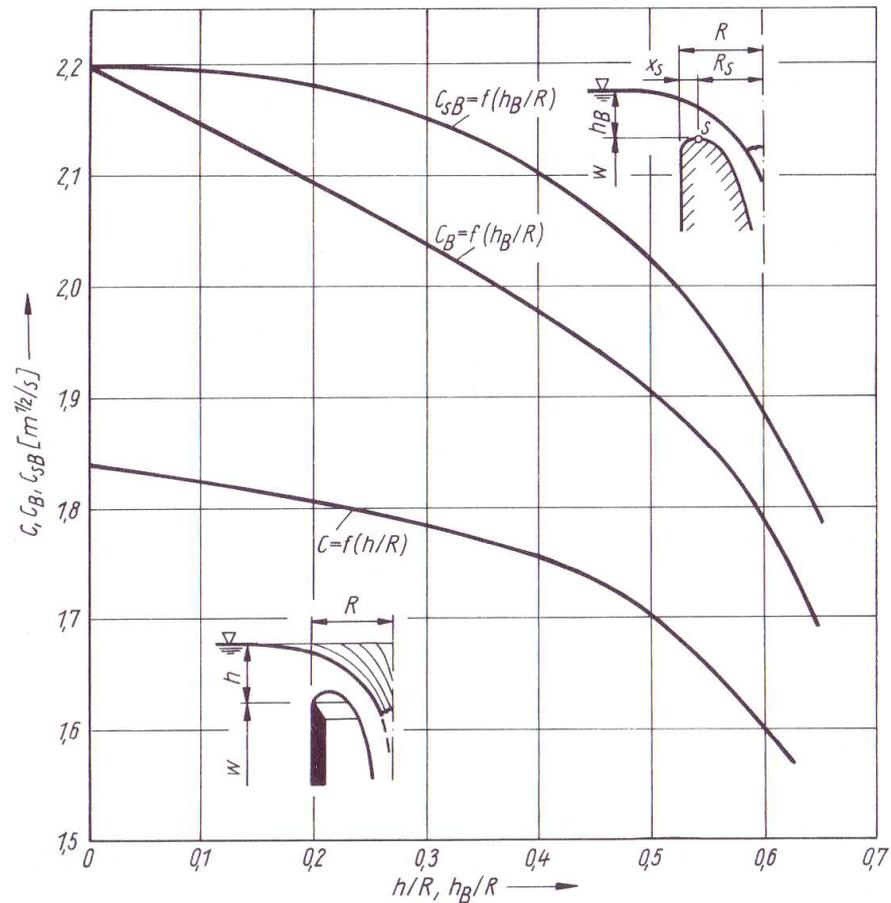


Abb. 3.7 Überfallsbeiwert nach Bollrich [11]

- Der Stollen wird üblicherweise mit dem höchsten Manning Koeffizient  $n = 0.016$  (sehr rauh) bemessen. Er wird als Freispiegelstollen dimensioniert, d.h. 25% der Höhe soll frei vom Wasser sein.

### 3.3 LUFTEINTRAG

In der Natur vermischen sich das Wasser und die Luft, sobald sie sich in turbulenten Fließzustand befinden. Eine intensive Luftaufnahme ist durch die Weißfärbung der Wasseroberfläche ersichtlich. Der Lufteintrag ist nur sehr schwer zu quantifizieren. Üblicherweise beschreibt man dies mittels der Lufteintragsrate.

$$\beta = \frac{Q_{Luft}}{Q_{Wasser}},$$

wobei

$\beta$  – Lufteintragsrate

$Q_{Luft}$  - eingesaugte Luftmenge

$Q_{Wasser}$  - durchgeführte Wassermenge

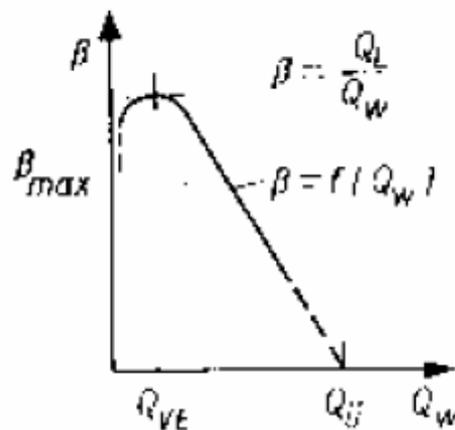


Abb. 3.8 Charakteristik der Luftmitnahme [16]

Die Übersichtsformel zur Ermittlung des Lufteintrages

$$\beta = \frac{Q_L}{Q_W} = \frac{\frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot v_F}{Q_W} - 1$$

nach Bollrich [16, Aigner] gilt unter folgenden Annahmen:

- Die Luft vermischt sich mit dem Wasser im Einlaufbereich (Überfall) des Trichters
- Die maximale Fallgeschwindigkeit bei freiem Überfall beträgt  $v_F = 10 \text{ m/s}$

Die Stelle, an der der Einmischungsvorgang zwischen Luft und Wasser beginnt, wird als kritischer Punkt bezeichnet. Der Anfang der Selbstbelüftung liegt dort, wo die turbulente Grenzschicht den Wasserspiegel erreicht. Ab dem kritischen Punkt gibt es einen intensiven Impulsaustausch über die Wasserstrahldicke.

Während des Überfalls in Phase a ist die Wassermenge entsprechend  $Q \approx H_u^{3/2}$  proportional der Wasserhöhe. Bei steigender Überfallhöhe, wenn der Ausfluss unter Druck erfolgt, ergibt sich folgende Beziehung  $Q \approx \sqrt{H_u + H_{schacht}}$  (Abb. 3.9). Die Größe der Geschwindigkeit im Fallschacht ist für den Übergang Freifall-Druck-Freispiegelströmung von großer Bedeutung.

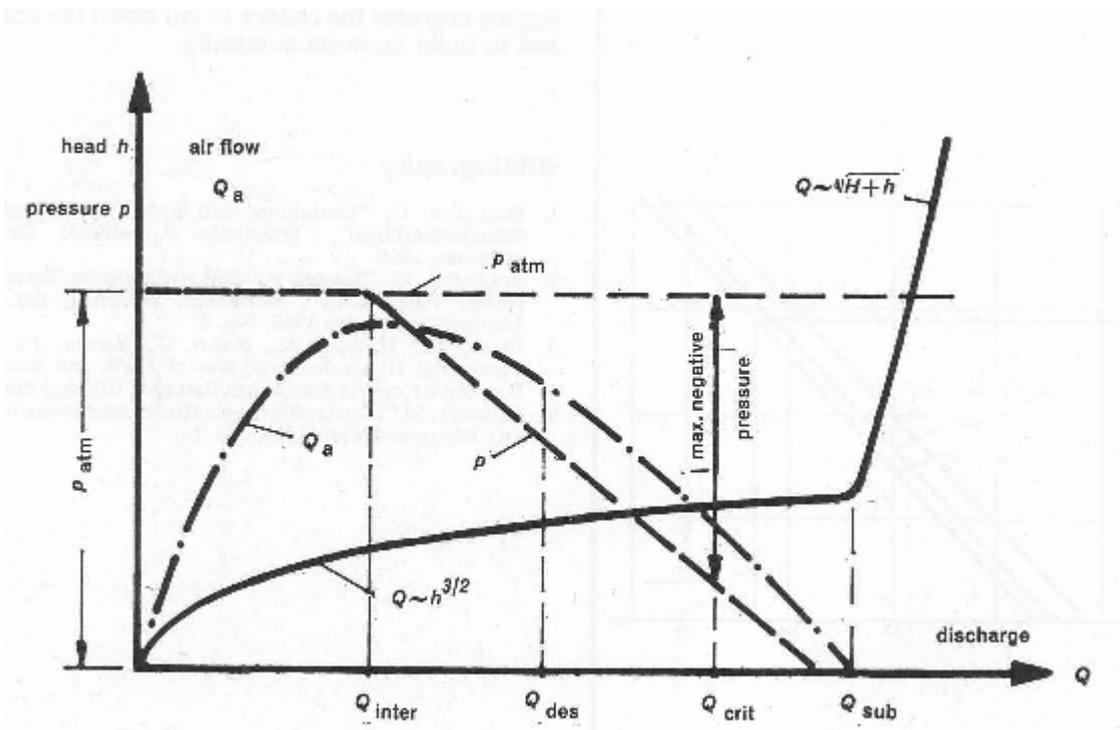


Abb. 3.9 Charakteristik des Lufteintrags bei einem Fallrohr [13]

---

### 3.4 WIRBELBILDUNG

Zur Erhöhung der Abflusskapazität eines Schachtüberfalls sollte üblicherweise der Dralleintrag vermieden werden. Eine Ausnahme besteht bei Wirbelfallschächten, wo zur Selbstbelüftung und Energieumwandlung eine Wirbelbildung erzwungen wird.

Häufige Ursachen der Wirbelbildung sind folgende [3, Knauss]:

- Ausmittigkeit des Einlaufs
- Asymmetrie in der Anströmung
- Asymmetrie in der ursprünglichen Geometrie des Einlaufs
- Coriolis-Effekt

Es gibt aber Fälle, in denen auch die Symmetrie zu ungünstige hydraulische Vorgänge führen kann. Symmetrischen Bedingungen sind oft aus hydraulischer Sicht instabil. Am Einlauf wird aufgrund einer kleinen Störung eine Zirkulationsbewegung induziert, die zu einen kräftigen Potentialwirbel führen kann.

Grundsätzlich unterteilt man die Wirbelarten (Abb. 3.10) nach [3,4 Knauss]:

- der Dauer des Auftretens
- dem Ort der Erscheinung
  - Vom Wasserspiegel ausgehende Wirbel (Drall- und Lufteintrag treten auf)
  - Von den Wandungen, bzw. Boden ausgehende Wirbel (nur Dralleintrag)
- der Form des Wirbels

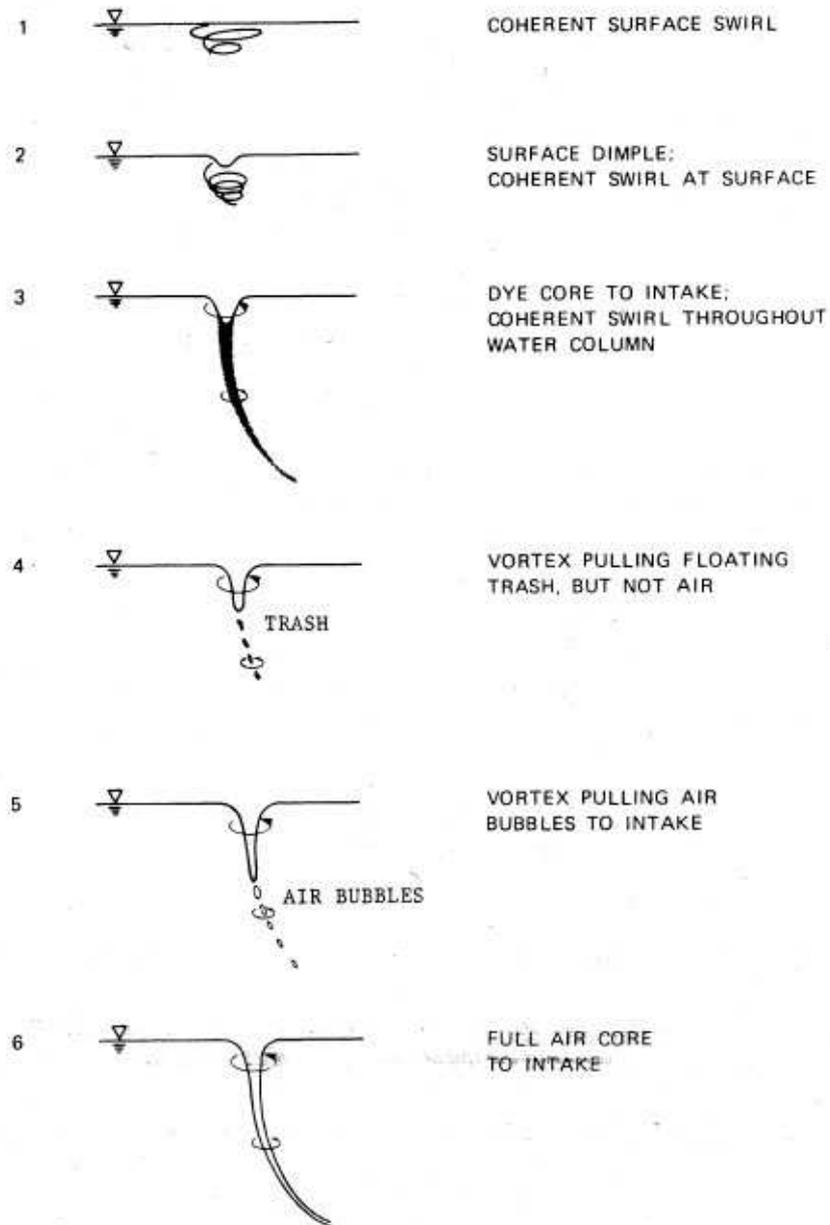


Abb. 3.10 Klassifikation von Wirbelbildungen aufgrund der Wirbelstärke [4]

Nach Knauss [3] gibt es einen Zusammenhang zwischen der Wirbelform und dem Drallparameter. Die Hypothese von Rankine [3, Knauss] zeigt, dass ein Wirbel durch einen rotierenden Kern und einer zirkulierenden Umgebung entsteht. Der enge innere Kern rotiert als „highly viscous solid body“ und die äussere Umgebung ist die „non-viscous ‚free‘ vortex region“ [4, Knauss]. Im Kern rotiert das Wasser so, dass die tangentielle Geschwindigkeit,  $v_t$ , gerade proportional zum Durchmesser  $r$  ist. Wo sich die „free vortex region“ befindet, ist sie umgekehrt proportional.

Die Geschwindigkeit verhält sich in den Bereichen (Zirkulations- und Rotationsbereich) unterschiedlich, wie in Abb. 3.11 ersichtlich ist.

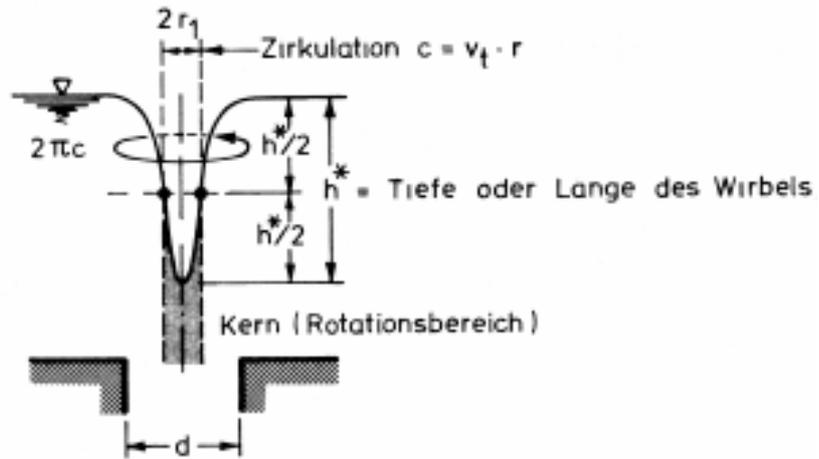


Abb. 3.11 Definitionsskizze zur Wirbelbildung [3]

Die Tiefe des Wirbels bezogen auf den Einlaufdurchmesser wird folgendermaßen beschrieben [3, Knauss] :

$$\frac{h}{d} = \frac{c^2}{g \cdot d \cdot r_1^2}$$

$$\Rightarrow \frac{r_1}{d} \cdot \sqrt{\frac{h}{d}} = \frac{c}{\sqrt{g \cdot d}^{3/2}}$$

Wobei

$$\frac{c}{\sqrt{g \cdot d}^{3/2}} \text{ - eingeführter Drallparameter}$$

$$\frac{r_1}{d} \text{ - relative Dicke des Wirbelschlauches}$$

$$\sqrt{\frac{h}{d}} \text{ - relative Länge des Wirbelschlauches}$$

---

## 4 HYDRAULISCHER MODELLVERSUCH

Als hydraulisches Modell bezeichnet man eine geometrisch verkleinerte Nachbildung eines Naturbauwerkes. Eine Ähnlichkeit zwischen hydraulischem Modell und dem Prototypen besteht dann, wenn die geometrischen und die kinematischen, d.h. die dynamischen Größen in einem bestimmten Verhältnis übertragbar sind [14, Martin].

### 4.1 ALLGEMEINES

Das Ziel dieses hydraulischen Modellversuchs war die Abhängigkeit der Luftaufnahme, eines Fallschachtes, in Abhängigkeit des Modellmaßstabes zu untersuchen. Dafür wurde eine sogenannte Modellfamilie mit verschiedenen Rohrdurchmessern, Rohrlängen und Rauigkeiten, errichtet. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen dienen als Grundlage für die Maßstabswahl eines geplanten hydraulischen Modellversuchs zum Nachweis der Hochwasserentlastungskapazität des HW-Turms des Ausgleichspeichers Gößkar an der Malta Hauptstufe.

### 4.2 MODELLÄHNLICHKEIT

„...zwei Strömungen verlaufen nur dann ähnlich, wenn die sie bewirkenden und beeinflussenden Kräfte verhältnismäßig sind.“ [14, Bollrich].

Die wichtigsten Probleme bei der hydraulischen Modellierung sind folgende:

- Identifikation der maßgebenden Kraftwirkungen (Modellgesetze)
- Maßstabsauswahl
- Auftretende Maßstabseffekte

Im vorliegenden Fall sind die Schwerkraft und Trägheitskräfte maßgebend, deshalb wird die Umrechnung der Parameter nach dem Froude'schen Modellähnlichkeitsgesetz vorgenommen. Dieses besagt, dass das Abflussverhalten (Strömung) in der Natur und im Modell dynamisch ähnlich sind, wenn die Froude Zahlen der beiden gleich sind.

Für die Umrechnung der verschiedenen Parameter gelten generell für die im hydraulischen Versuchswesen am häufigsten verwendeten Verhältniszahlen nach

Abb. 4.1. Für die vorliegende Studie werden die Verhältniszahlen für ein unverzerrtes Froude Modell verwendet.

Physikalische Größe		Maßstabsfaktor nach dem Ähnlichkeitsgesetz von:				
Bezeichnung	Einheit	Froude		Reynolds	Weber	Cauchy-Mach
		normal	überhöht <sup>1)</sup>	$M_\rho=M_v=1$	$M_\rho=M_\sigma=1$	$M_\rho=M_E=1$
Längen, Breiten	$m$	$M_l$	$M_l$	$M_l$	$M_l$	$M_l$
Höhen, Druckhöhen	$m$	$M_l$	$M_l/n$	$M_l$	$M_l$	$M_l$
horizontale Flächen	$m^2$	$M_l^2$	$M_l^2$	$M_l^2$	$M_l^2$	$M_l^2$
vertikale Flächen	$m^2$	$M_l^2$	$M_l^2/n$	$M_l^2$	$M_l^2$	$M_l^2$
Volumen	$m^3$	$M_l^3$	$M_l^3/n$	$M_l^3$	$M_l^3$	$M_l^3$
Kräfte (horizontal)	$N$	$M_l^3$	$M_l^3/n^2$	1	$M_l$	$M_l^2$
Fließ-, Versuchszeit	$s$	$M_l^{1/2}$	$(M_l/n)^{1/2}$	$M_l^2$	$M_l^{3/2}$	$M_l$
Fallzeit	$s$	$M_l^{1/2}$	$(M_l/n)^{1/2}$	$M_l^2$	$M_l^{3/2}$	$M_l$
Geschwindigkeit	$m/s$	$M_l^{1/2}$	$(M_l/n)^{1/2}$	$M_l^{-1}$	$M_l^{-1/2}$	1
Beschleunigung (horizontal)	$m/s^2$	1	$1/n$	$M_l^{-3}$	$M_l^{-2}$	$M_l^{-1}$
Abfluss	$m^3/s$	$M_l^{5/2}$	$(M_l^5/n^3)^{1/2}$	$M_l$	$M_l^{3/2}$	$M_l^2$
relatives Gefälle	$m/m$	1	$1/n$	1	1	1
Manningbeiwert	$m^{1/3}/s$	$M_l^{1/6}$	$M_l^{-1/6} n^{2/3}$	-	-	-

Abb. 4.1 Übertragungsregeln für verschiedene Modelgesetze [14]

### 4.3 HYDRAULISCHE VORBEMESSUNG

Die hydraulische Vorbemessung des Überfalls für das Rohr DN 200mm erfolgte zum späteren Vergleich mit dem Versuch zuerst nach Bollrich [11] mit

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot C \cdot H_{\ddot{u}}^{3/2}, m^3 / s$$

Die Abflussmengen Q wurden schrittweise angenommen und die jeweilige Überfallshöhe dazu geschätzt. Mittels der obigen Formel wurde für ein angenommenes Q iterativ die Überfallshöhe  $H_{\ddot{u},ber}$  berechnet und mit der geschätzten  $H_{\ddot{u},ang}$  verglichen. Der Iterationsvorgang erfolgte solange bis beide Werte für die Überfallshöhe  $H_{\ddot{u},ber}$  genügend genau übereinstimmten. Der, für die Berechnungen benötigte, Koeffizient C wurde aus der Abb. 3.7 nach Bollrich [11] abgelesen. In der nachfolgende Tab. 4.1 sind die Ergebnisse für das Rohr DN 200mm ersichtlich.

Tab. 4.1 Vorbemessung HW-Überfall nach Bollrich [11]

D	R	Q	$H_{\ddot{u},ang}$	$H_{\ddot{u}}/R$	C	$H_{\ddot{u},ber}$
m	m	$m^3/s$	m		$m^{1/2}/s$	m
0,200	0,1	0,005	0,027	0,27	1,79	0,027
0,200	0,1	0,010	0,041	0,41	1,75	0,044
0,200	0,1	0,015	0,059	0,59	1,60	0,061
0,200	0,1	0,020	0,070	0,70	1,00	0,100

Eine weitere hydraulische Vorbemessung wurde für dasselbe Rohr DN 200 mm auch nach dem Verfahren lt. USBR durchgeführt (Tab. 4.2). Der Koeffizient C wurde aus Abb. 3.6 Circular crest coefficient for a morning-glory spillway abgelesen.

Tab. 4.2 Vorbemessung HW-Überfall nach USBR [15]

D	R	Q	$H_{0,ang}$	P/R	$H_0/R$	$C_0$	$H_{0,ber}$
m	m	$m^3/s$	m			$m^{1/2}/s$	m
0,200	0,1	0,005	0,025	3	0,250	2,098	0,024
0,200	0,1	0,010	0,040	3	0,400	1,853	0,042
0,200	0,1	0,015	0,055	3	0,550	1,794	0,056
0,200	0,1	0,020	0,075	3	0,750	1,435	0,079
0,200	0,1	0,025	0,100	3	1,000	1,104	0,109
0,200	0,1	0,030	0,130	3	1,300	0,911	0,140

Die berechneten Überfallhöhen zeigen keine gute Übereinstimmung untereinander aber auch nicht mit den gemessenen Werten aus der Schlüsselkurve (Abb. 6.10) für das Rohr DN200.

#### 4.4 MODELLAUFBAU

Die Modellversuche wurden im Wasserbaulabor der Technischen Universität Wien durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten im Zeitraum von 11.09.2008 bis 31.10.2008. Der Modellaufbau besteht aus Oberbecken (Stausee), Überfallrohr (Überfallschacht) und Unterbecken (Auslauf). (Abb.4.2).

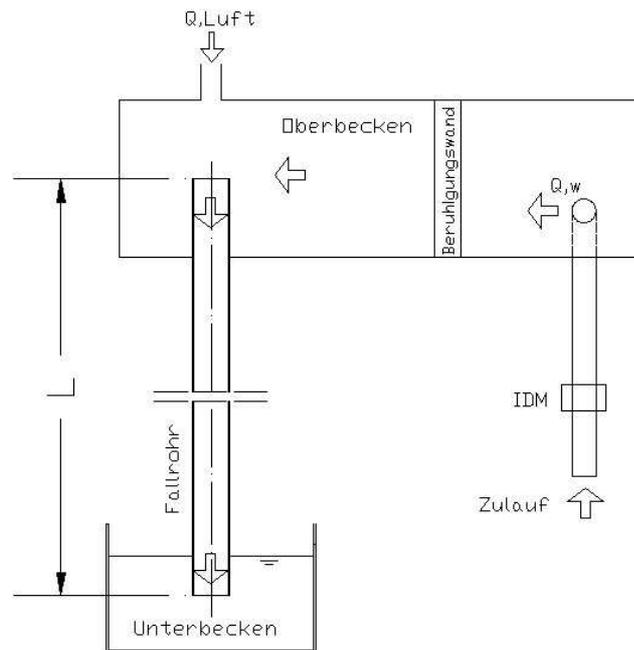


Abb.4.2 Skizze - Aufbau Modellstand

Die Wasserzufuhr in das Oberbecken erfolgte aus dem Wasserversorgungssystem des Labors, der maximale Zufluss ist für diesen Fall auf 45 l/s begrenzt gewesen, da aus Kostengründen auf bereits vorhandene Versuchseinrichtungen zurückgegriffen wurde. Das Oberbecken wurde durch einen abgeschlossenen prismatischen Kasten aus Plexiglas mit den Abmessungen 60/70/200 cm gebildet. Um die, während der Versuchsdurchführung, eingesaugte Luftmenge bestimmen zu können, wurde an der Decke des Oberbeckens ein offenes kurzes Rohr mit einem Messflügel angeordnet. Das vertikale Fallrohr war zentrisch am Oberbecken befestigt und mündete in ein eingestautes Unterbecken um definierte Randbedingungen bezüglich der Luftzufuhr zu erhalten. Der Lufteintrag erfolgte damit also über das abgeschlossene Oberbecken. Einen Überblick über den Modellstand gibt nachfolgende Abb. 4.3.

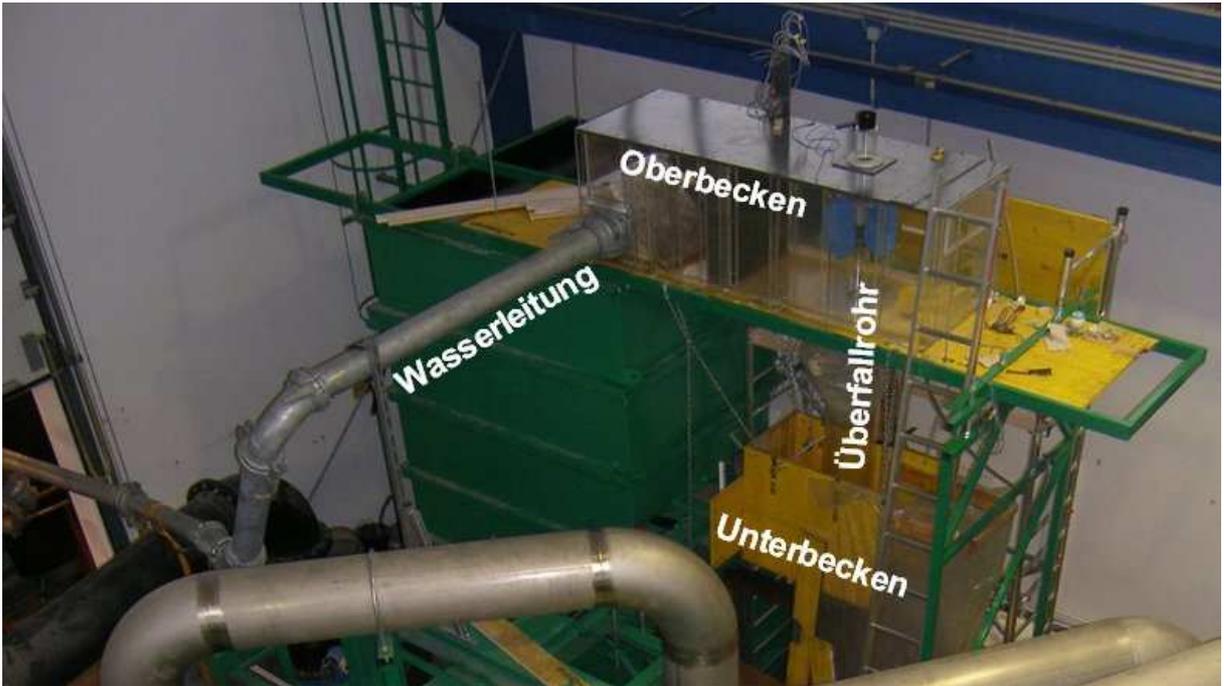


Abb. 4.3 Versuchsstand

Der Wasserzulauf ins Oberbecken war seitlich angeordnet. Über zwei Beruhigungsmaßnahmen (Honeycombs und Vlies) und einem Beruhigungsbecken strömte das Wasser ins Überfallbecken (Speicher) von dem weiter über die Rohrüberfallkante ins Fallrohr (Abb.4.4).

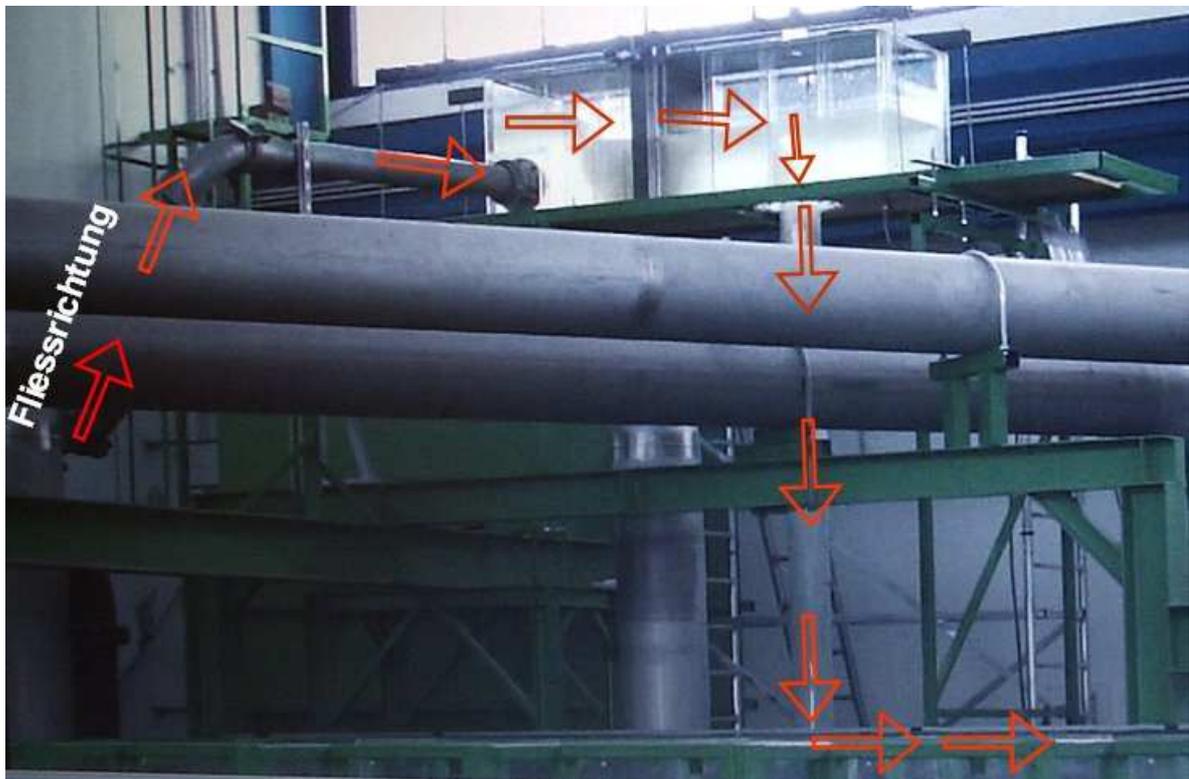


Abb. 4.4 Fließschema des Wasserführungssystems

Die Beruhigung des zulaufenden Wassers erfolgte in einer Vorkammer, wo der zufließende Wasserstrahl auf eine Prallwand auftraf (Abb. 4.5).

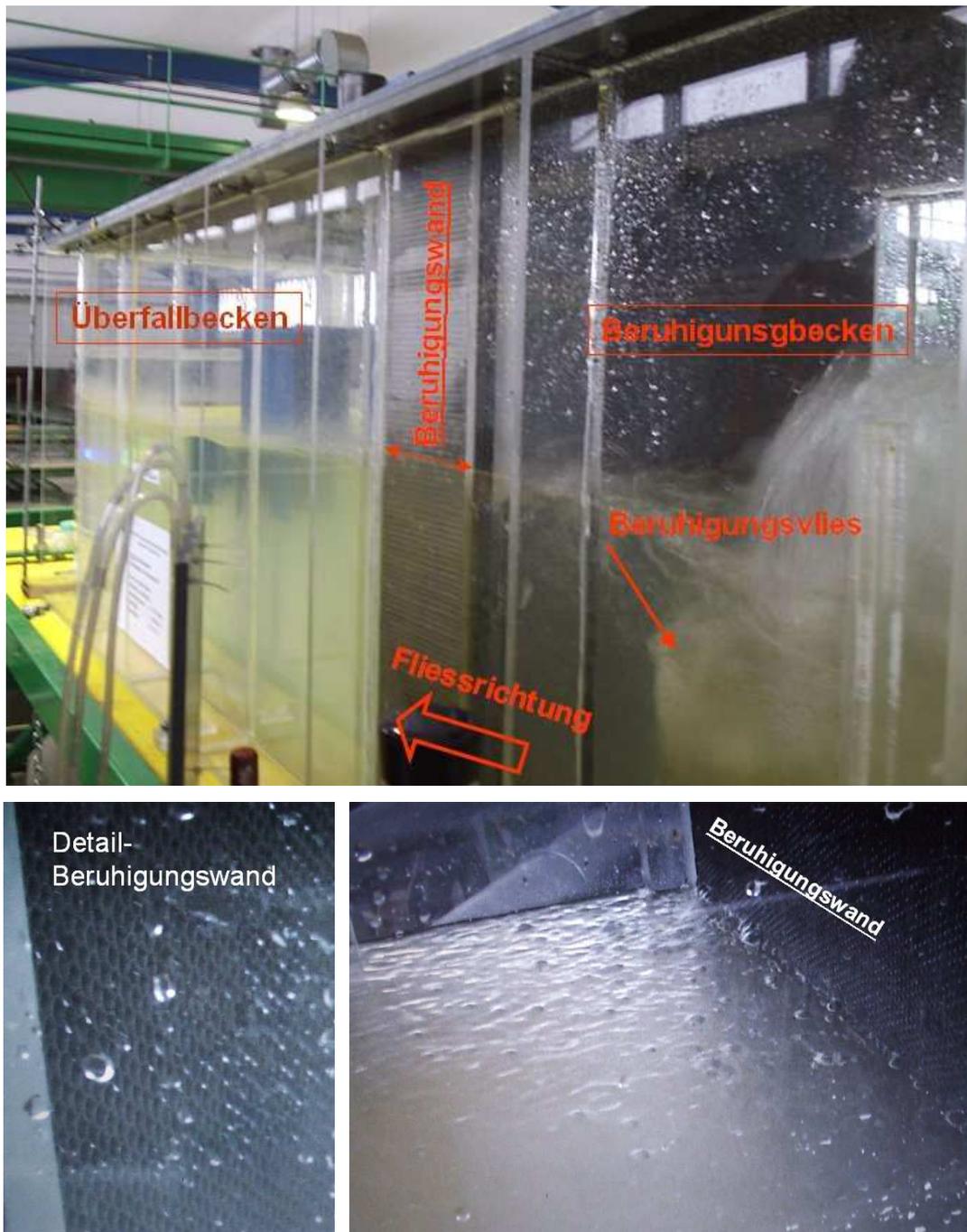


Abb. 4.5 Zulaufbecken mit Beruhigungswand

Die erste untersuchte Variante zur Beruhigung des zufließenden Wassers bestand aus einer Kombination einer Überfallwand (Abb. 4.6) und einer Beruhigungswand (Abb. 4.5) aus einer sechseckigen Wabenstrukturplatte (Honeycombs). Diese Variante erfüllte aber leider seine Aufgabe nicht ausreichend gut.

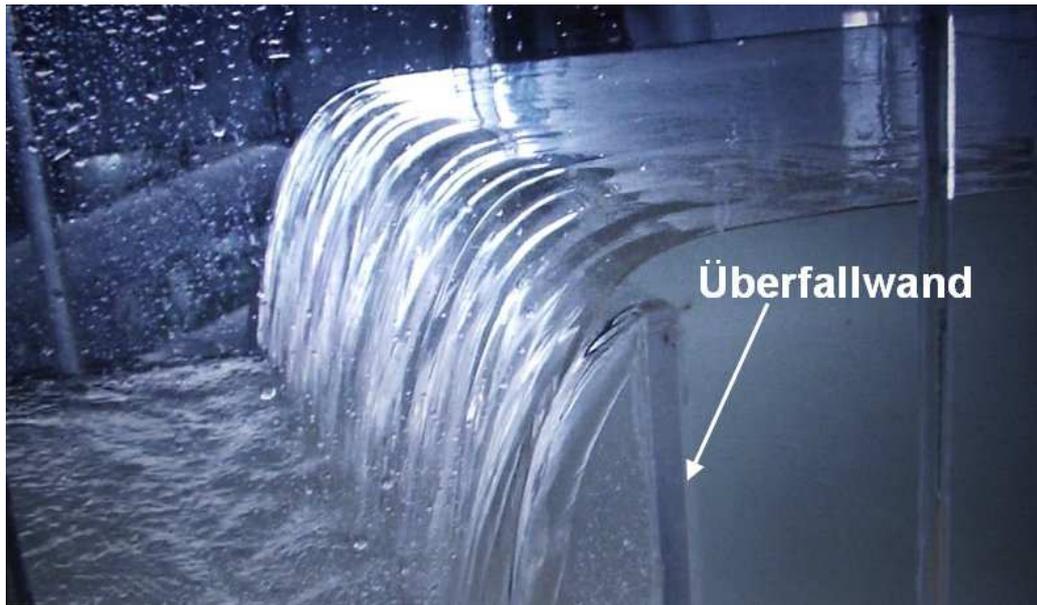


Abb. 4.6 Überfallwand im Beruhigungsraum

Deshalb wurde die Überfallwand entfernt und an derselben Stelle ein weiches Vlies als Beruhigungsmaßnahme eingesetzt (Abb. 4.7).



Abb. 4.7 Eingebautes Vlies zur Strömungsberuhigung

---

Im realen Projekt „Ausgleichsspeicher Gößkar“ (Abb. 4.8) wurde die Überfallskrone als Trichter ausgebildet. Der Schacht ist durch einen Fallschachtkrümmter mit dem Auslaufstollen verbunden, in welchem auch der Grundablass einmündet.



Ausgleichsspeicher Gößkar

Abb. 4.8 HW-Turm - Ausgleichsspeicher Gößkar

Im Modell hat man den Überfall mit anschließendem Fallschacht und Stollen, einerseits zur Reduktion des Bauaufwands für die Modelfamilie und andererseits für eine bessere Vergleichbarkeit mit Versuchsergebnissen aus der Literatur, vereinfacht als Fallrohr mit konstantem Durchmesser ausgebildet, wobei die Überfallkante scharfkantig mit  $45^\circ$  abgeschrägt war. (Abb. 4.9).



Abb. 4.9 Scharfkantiger Fallrohrüberfall

Zur Gewährleistung einer gleichmassigen radialen Anströmung des Überfallrohres wird in der Literatur eine minimale Distanz des Rohres zu der Wandung von der Größe des Durchmessers empfohlen. Beim größten Durchmesser DN 200 mm

beträgt der Abstand zwischen der Überfallkante und der Wandung 200 mm (Abb.4.10).

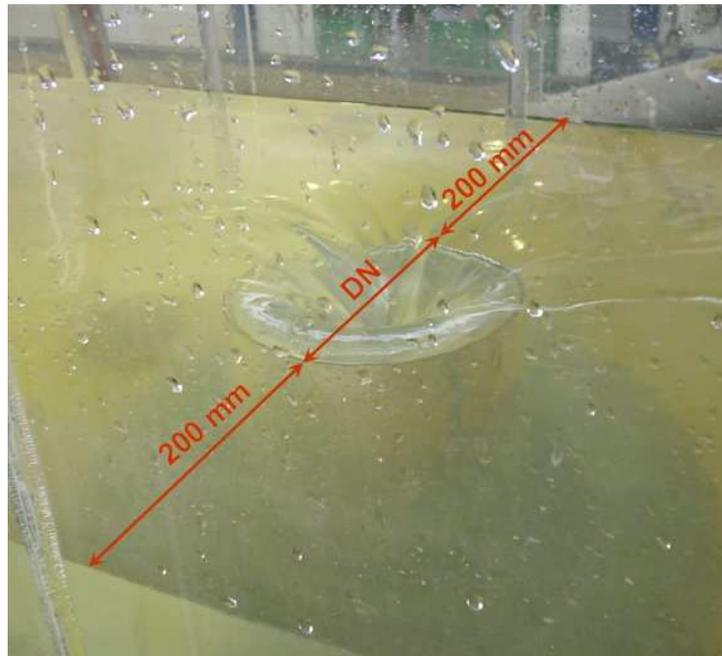


Abb. 4.10 Anströmungsverhältnisse

Trotz Einhaltung der empfohlenen Distanz kam es zur Wirbelbildung in der Anströmung. Um diese Rotationsentwicklung im Einlauf zu vermeiden und um klare Randbedingungen vorzugeben (Ausschluss des Drallparameters), wurden radiale Leitbläche über der Überfallkante angeordnet (Abb. 4.11). Die Einbindehöhe des Rohres im Oberbecken betrug 30 cm. Diese entspricht der Höhe  $w$  in der Formel zur hydraulischen Vorbemessung eines Schachtüberfalls nach Bollrich [11], bzw.  $P$  nach USBR [15].

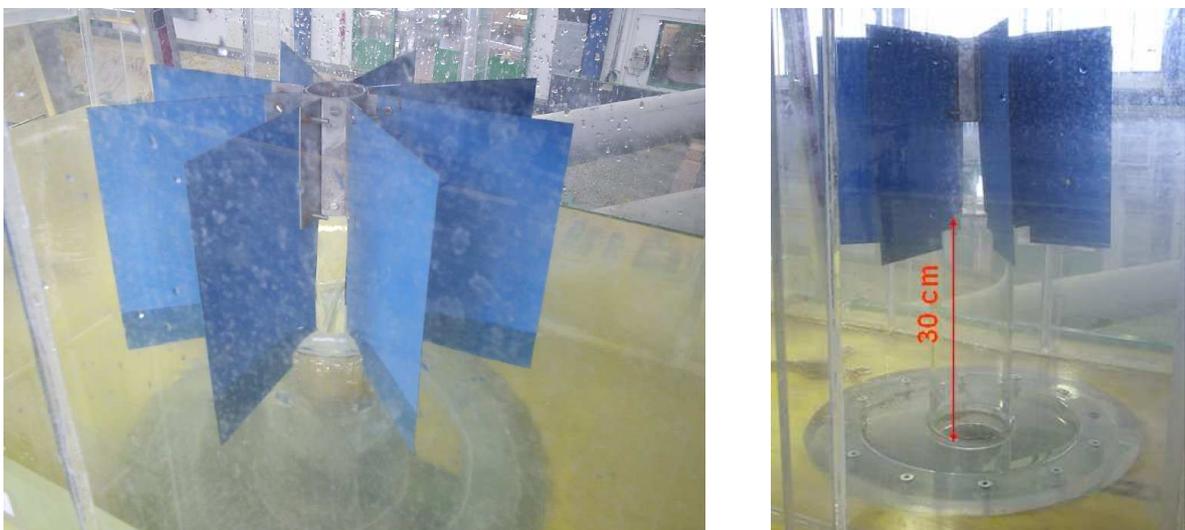


Abb. 4.11 Leitapparat, Einbindehöhe des Fallrohres

---

Um die während der Versuche auftretenden starken Schwingungen des Fallrohres im Bereich des Wasserauslaufes zu unterbinden, wurde das Rohrende mit Hilfe eines Gummiringes (Abb. 4.12) mit der stabilen, das Modell tragenden, Stahlkonstruktion verbunden.



Abb. 4.12 Befestigung des Fallrohres

Der Auslauf des Rohres ist im Wasser des aus Schalungsplatten ausgeführten prismatischen Unterbeckens eingetaucht. Die Vorderseite des Unterbeckens wurde als Überfallwand, zum Abströmen des Wassers, ausgebildet. Das Modellrohrende lag ca. 20 cm tiefer als die Überfallkante der Vorderseite des Unterbeckens, damit ein Luftzutritt über den Auslauf des Rohres verhindert wurde (Abb. 4.13).



Abb. 4.13 Unterbecken - Auslauf

In den Modellversuchen wurde eine Modellfamilie bestehend aus 3 geraden Fallrohren aus Plexiglas mit Durchmessern der Größen DN 100, DN150 und DN 200 mit unterschiedlichen Rauigkeiten und Rohrlängen untersucht (Tab. 4.3).

Tab. 4.3 Modellfamilie – untersuchte Fallrohre

Modellrohr-nummer	Durchmesser, mm	max Länge $L_1$ , cm	mittlere Länge $L_2$ , cm	min Länge $L_3$ , cm
MR 1	DN 200	480	320	160
MR 2	DN 150	360	240	120
MR 3	DN 100	240	160	80

Die einzelnen Rohre wurden in drei gleich langen Rohrschüssen angefertigt, und der jeweiligen Versuchslänge entsprechend zusammengeschaubt.

In Anschluss an die Untersuchungen mit vollkommen glatten Plexiglasrohren wurden auch solche mit grosser Rauigkeit getestet, um den Einfluss auf den Lufteintrag beurteilen zu können. Dazu wurden in Fließrichtung abgerundete prismatische Rauigkeitskörper direkt auf die Innenseite des Rohres mit Silikon geklebt. Pro Rohrteil wurden in 4 Sectionen 6 Störkörper pro Querschnitt angeordnet (Abb. 4.14, Abb.4.15).

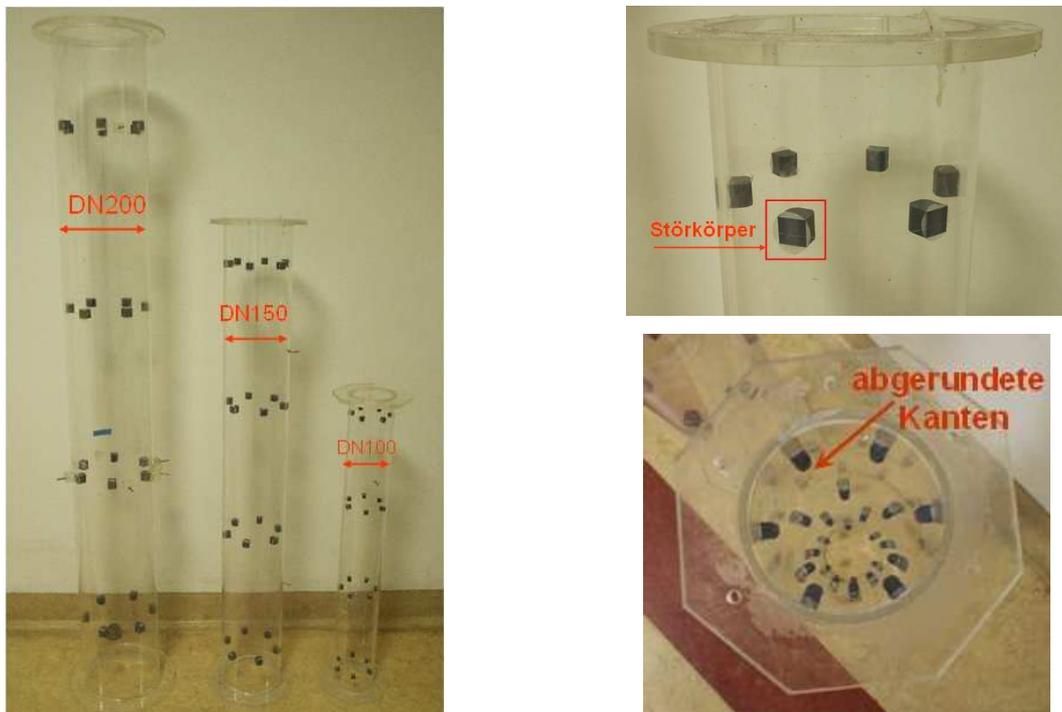


Abb. 4.14 Modellfamilie – jeweils 1 Rohrschuss, Anordnung der Störkörper

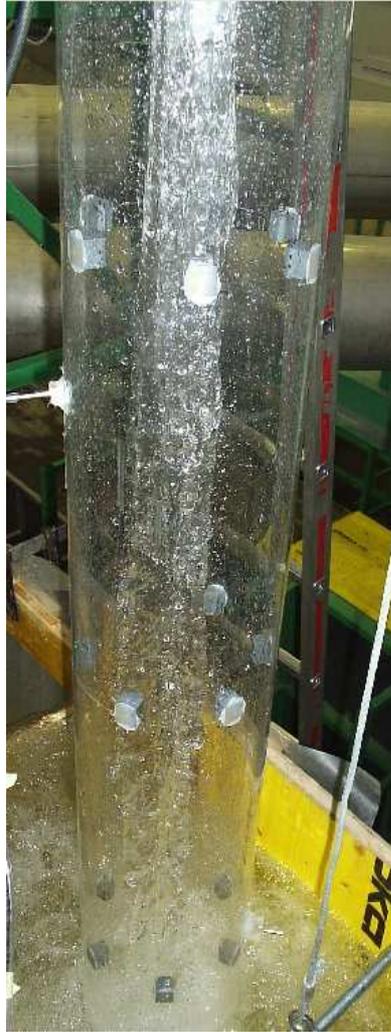


Abb. 4.15 Versuchsrohr mit eingeklebten Störkörper im Betrieb

Die Größe der Störkörper wurde wie folgt maßstäblich umgerechnet (Tab. 4.4):

Tab. 4.4 Störkörpergröße

<b>Modellrohr- numer</b>	<b>Durchmesser, mm</b>	<b>Störkörpergröße, cm</b>
MR 1	DN 200	20/20/20
MR 2	DN 150	15/15/15
MR 3	DN 100	10/10/10

Das erste untersuchte Modellrohr hatte einen Durchmesser von 200 mm, dieses wurde auch als Basismodell für die Maßstabswahl  $M = 1:1$  der Modellfamilie herangezogen. Alle weiteren Modellrohre wurden danach maßstäblich nach dem Froude'schen Modellgesetz umgerechnet (Tab. 4.5).

Tab. 4.5 Modellmaßstäbe der einzelnen Fallrohre

Modellrohrnummer	Maßstab
MR 1	1:1
MR 2	1:1.33
MR 3	1:2

#### 4.5 MESSTECHNIK

Im Modellversuch wurden folgende Parameter gemessen:

- Wassermenge
- Luftgeschwindigkeit
- Überfallhöhe
- Druck im Überfallrohr

##### Durchflussmessung

Die Wassertemperatur betrug ca. 18°C. Die Messung des Durchflusses (in l/s) erfolgte mittels eines magnetisch-induktiven Durchflussmessers (Abb. 4.16).



Abb. 4.16 IDM, Typ Promag 33

##### Luftgeschwindigkeit

Die Luftzufuhr wurde durch ein in der Abdeckplatte des Zulaufsbeckens eingebautes Plexiglasrohr mit einem Durchmesser von 80 mm realisiert (Abb. 4.17).

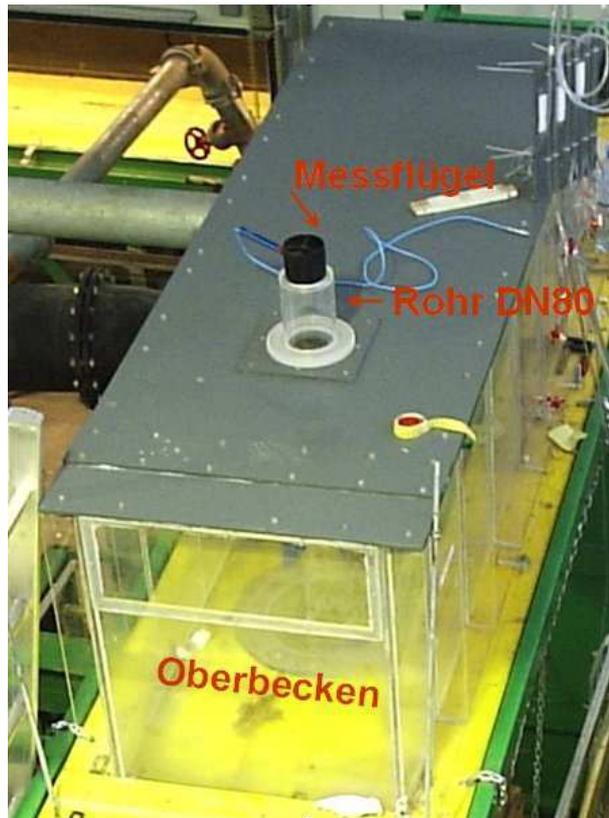


Abb. 4.17 Zulaufbecken

In diesem Rohr erfolgte die Messung der Luftgeschwindigkeit mit Hilfe eines Meßflügels (Kopfgröße 85x80 mm) der Firma Schiltknecht Messtechnik AG (Abb. 4.18). Der Messflügel war mit einem Anzeigergerät (A/D-Wandler, MiniAir 20) verbunden, an dem der max., mittel und min. Wert der über eine bestimmte Zeitperiode erfolgten Messung abgelesen wurde.

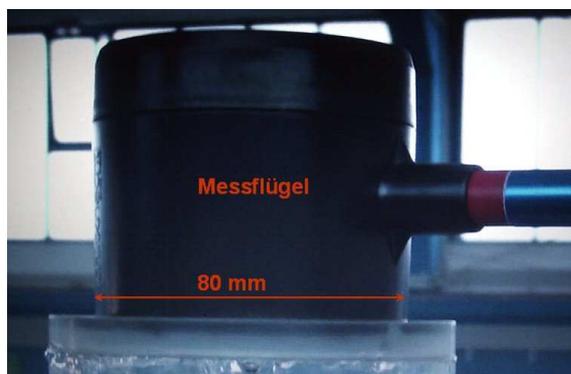


Abb. 4.18 Luft-Messflügel (Luft-Fühler)

## Überfallhöhe

Das Ablesen der Überfallhöhe erfolgte visuell (in cm) mit der Kote der Überfallkante als Bezugshorizont (Abb. 4.19).



Abb. 4.19 Überfallhöhe

## Drücke

Für die Druckmessung wurden kleine Bohrungen an jeweils 2 Querschnitten pro Rohrteil angeordnet und mittels Plastikschläuchen zu den Standrohren verbunden (Abb.4.20).

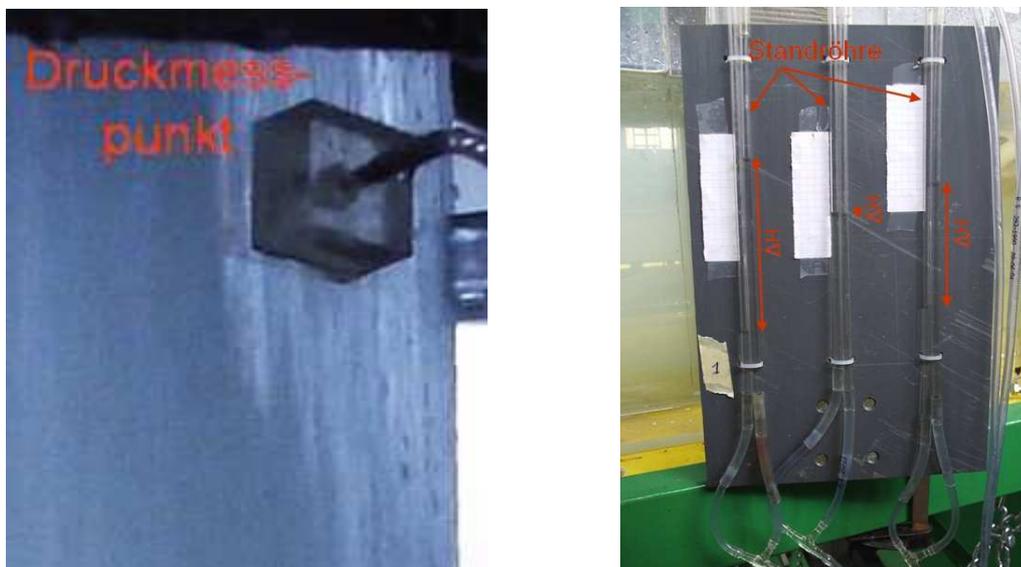


Abb. 4.20 Druckmesspunkt, Standrohrharfe

Der Druck wurde als mittlere Druckhöhendifferenz  $\Delta H$  des Anfangsdruckes und des jeweiligen Betriebsdruckes abgelesen. Es gab während des Messzeitraum von 600 sec relativ starke Schwankungen.

---

## 4.6 VERSUCHSPROGRAMM

Prinzipielle Aufgaben der Versuche waren:

- **die Abhängigkeit der Luftzufuhr im Verhältnis zur abgeführten Wassermenge**
- **Einfluss des Durchmessers, der Länge und der Rauigkeit des Fallrohres auf die eingetragene Luftmenge**
- **Einfluß des Maßstabs des Modells auf die Luftzufuhr**
- die Druckverhältnisse entlang eines Überfallrohres
- Überfallhöhe bei zunehmender Wasserzufuhr
- eine Überprüfung der Vorbemessung – Bestimmung des Ansteigens der Allgemeine Aussage der Abflussverhältnisse eines scharfkantig geformten Schachtüberfalls
- Bestimmung des Überdeckungsabflusses – die Durchführung dieser Beobachtung war, aus technischen Gründen im Labor, nur beim Rohr mit dem Aussendurchmesser 100 mm möglich. Die entsprechenden Wassermengen für DN 200 sind in Tab. 4.7 angeführt.
- Beobachtung charakteristischer Erscheinungen bei unterschiedlichem Durchflüssen

Das Versuchsprogramm beinhaltet daher die Variaton folgender Parameter der geraden Plexiglasfallrohre:

- Durchmesser
- Rohrlänge
- Rauigkeiten und
- Durchflüsse

Das erste Modell (Modellmaßstab 1:1) wurde mit variierenden Wassermengen von 5 l/s bis 45 l/s beaufschlagt und die erforderlichen Wassermengen für die folgenden Modelle nach dem Froude'schen Modellgesetz umgerechnet. Die Anströmungsbedingungen am Einlauf wurden durch verschiedene konstruktive Maßnahmen, wie Leitbleche u.a., am ersten Versuchsrohr optimiert und für die folgenden Versuche gleich mit Vlies, Honeycombs und Leitapparat (Leitbleche) am Rohreinlauf beibehalten (Abb. 4.5).

Die durchgeführten Versuche sind in der nachfolgenden Tab. 5.7 aufgelistet.

Tab. 5.7 Versuchsverlauf

Nr	Datum	Leitwände	Beruhigung	DN <sup>1</sup> , mm	Länge, cm	Glatt/ Rauh	Q <sub>wasser</sub> , l/s
0/1	11.09.08	keine	Überfallwand	200	480	glattes	5-27
V1	18.09.08	mit	Überfallwand	200	480	glattes	5-45
V2	23.09.08	mit	Vlies	200	480	glattes	5-45
V3	24.09.08	keine	Vlies	200	480	glattes	5-35
V4	25.09.08	keine	Vlies	200	480	glattes	5-45
V5	26.09.08	mit	Vlies	200	480	glattes	5-45
V6	30.09.08	mit	Vlies	200	320	glattes	5-45
V7	06.10.08	mit	Vlies	200	160	glattes	5-45
V8	08.10.08	mit	Vlies	200	160	rauhes	5-45
V9	10.10.08	mit	Vlies	200	320	rauhes	5-45
V10	13.10.08	mit	Vlies	200	480	rauhes	5-45
V11	15.10.08	mit	Vlies	150	360	glattes	2.4-21.5
V12	15.10.08	mit	Vlies	150	240	glattes	2.4-21.5
V13	16.10.08	mit	Vlies	150	120	glattes	2.4-21.5
V14	20.10.08	mit	Vlies	150	360	rauhes	2.4-21.5
V15	20.10.08	mit	Vlies	150	240	rauhes	2.4-21.5
V16	20.10.08	mit	Vlies	150	120	rauhes	2.4-21.5
V17	22.10.08	mit	Vlies	100	240	glattes	0.9-39.8
V18	23.10.08	mit	Vlies	100	160	glattes	0.9-35.4
V19	24.10.08	mit	Vlies	100	80	glattes	0.9-26.5
V20	27.10.08	mit	Vlies	100	240	rauhes	2.7-39.5
V21	28.10.08	mit	Vlies	100	160	rauhes	4.4-30.9
V22	28.10.08	mit	Vlies	100	80	rauhes	4.4-22.1
V23	29.10.08	mit	Vlies	200	160	rauhes	5-45
V24	30.10.08	mit	Vlies	200	320	rauhes	5-45
V25	31.10.08	mit	Vlies	200	480	rauhes	5-45

<sup>1</sup> Aussendurchmesser des Rohres, mm

Die nach Froude berechneten Durchflüsse für die einzelnen Versuche waren:

Tab. 4.7 Entsprechend nach Abb. 4.1 umgerechnete Wassermengen

<b>Wassermenge, l/s DN 200</b>	<b>Wassermenge, l/s DN 150</b>	<b>Wassermenge, l/s DN 100</b>
5	2,4	0,9
10	4,8	1,8
15	7,2	2,7
20	9,6	3,5
25	12,0	4,4
30	14,3	5,3
35	16,7	6,2
40	19,1	7,1
45	21,5	8,0
<b>Überdeckungsabfluss, l/s</b>		<b>Überdeckungsabfluss, l/s</b>
125,0	←entsprechend in M 1:1←	22,1
174,8	←entsprechend in M 1:1←	30,9
223,4	←entsprechend in M 1:1←	39,5
149,9	←entsprechend in M 1:1←	26,5
200,3	←entsprechend in M 1:1←	35,4
225,1	←entsprechend in M 1:1←	39,8

---

## 4.7 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

- Regulierung der für diesen Versuch maßgeblichen Zuflusswassermenge mittels händisch regulierbarem Schieber (Abb. 4.21). Die Reguliergenauigkeit betrug dabei ca. 0,4 l/s.



Abb. 4.21 Zulaufschieber

- Messung der Luftgeschwindigkeit mittels MiniAir 20, kombiniert mit einem Messflügel, wie unter Punkt 4.5 beschrieben. Um den maßgeblichen Messzeitraum festzustellen, wurden Mittelwertmessungen für die Dauer von 60 sec, 360 sec und 600 sec durchgeführt. Nach einem Vergleich der Messergebnisse wurde die Dauer von 600 sec als am genauesten festgelegt, wobei nur geringfügige Abweichungen zur Messdauer von 360 sec bestanden.
- Festlegung eines Trendbandes der Messergebnisse durch die Ablesung der Extremalwerte der Luftgeschwindigkeit mit dem Gerät MiniAir 20, welches neben der Anzeige der Mittelwerte auch die Extremwerte anzeigen kann. Die Auswertung der Extremalwerte zur Bestimmung des Trendbandes erfolgte mit Hilfe eines Tabellenkalkulationsprogrammes (Auswertungsprotokoll siehe Tab. 5.1 bis 5.18). Durch den Vergleich des Trendbandes mit den gemessenen Mittelwerten konnte auch eine Abschätzung eventuell vorhandener Mess- oder Ablesefehler erfolgen. Da sich alle Werte innerhalb des Bandes befanden, war ein Fehlfunktion des Gerätes, als auch ein Ablesefehler auszuschliessen.
- Bestimmung der Überfallhöhe im beruhigten Zuflussbereich mittels befestigtem Massband, siehe Abb. 4.19. Damit sich die Überfallhöhe auf einen

konstanten Wert einstellen konnte, erfolgte die Ablesung erst ca. 5 min nach der manuellen Zuflussregulierung.

- Druckmessung durch Ablesen der Druckhöhe  $\Delta H$  in den Standrohren für jede Messstelle entlang des Überfallrohres, siehe Abb. 4.20.
- Die charakteristischen Zuflüsse und Aufbauart für jeden Versuch wurden zur Dokumentation fotografiert (Abb. 4.22 und Abb. 4.23).



Abb. 4.22 Hydraulisch glattes und rauhes Rohr, drei Längen



Abb. 4.23 Modellaufbau, Ausbildung des Rohrüberfalls

---

## 5 ERGEBNISSE DES MODELLVERSUCHES

Alle Ergebnisse, die im Zuge dieser Diplomarbeit durchgeführten Versuche sind im Kapitel 5 zusammengefasst.

### 5.1 ALLGEMEINES

In der Literatur werden verschiedene Formeln zur Berechnung der Luftzufuhr angewendet. In den meisten wird der Überdeckungsabfluss berücksichtigt. Dieser Abfluss wurde in dieser Arbeit nur beim Rohr mit DN 100 erreicht. Deswegen erfolgte die Auswertung der Messdaten nicht nach diesen Formeln. Zur Ermittlung der eingesaugten Luftmenge wurde für alle Versuche die Kontinuitätsgleichung

$$Q_{\text{Luft}} = A \cdot v_{\text{Luft}}$$

verwendet, wobei  $v_{\text{Luft}}$  die gemessene Luftgeschwindigkeit in m/s ist und

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,08 \text{m}^2}{4} = 0,00502 \text{m}^2 \quad \text{ist die Querschnittsfläche des Messflügels}$$

( $D = 80 \text{mm}$ )

Die Steigerung des Wasserzuflusses wurde in einem bestimmten Intervall (für DN 200 in 5 l/s Schritten) vorgenommen. In der Tabelle wurden auch die gemessenen Extremalwerte der Luftgeschwindigkeit (Min Wert, Max Wert) eingefügt. Maßgeblich war der Mittelwert der Geschwindigkeit, dieser wurde daher für die Auswertung der Ergebnisse weiter verwendet.

Wegen technischer Gründe konnten während des Versuches 5 im Labor, Überfallrohr mit Durchmesser 200 mm, die Druckmessungen nicht durchgeführt werden. Der komplizierte Einbau der Druckmesspunkte und die sich oft lösenden Schlauchverbindungen zwischen den Messstellen und Standrohren störten die Messungen, wodurch es teilweise zu nicht plausiblen Ergebnissen kam. Die Nummerierung der Messstellen (MS) erfolgte in Fließrichtung. Da der Schwerpunkt dieser Diplomarbeit nicht bei der Druckmessung lag, sollten diese Messungen in weiteren Modellversuchen wiederholt werden. Die Anordnung der Druckmessstellen entlang des Rohres ist in den Versuchsauswertungstabellen Tab. 5.1 bis 5.18 eingetragen.

## 5.2 VORVERSUCHE

Die Vorversuche (V1 bis V4) dienen zum Testen des Versuchsaufbaues unter verschiedenen Zulaufbedingungen und der Festlegung der Messzeiten. Das Abflussvermögen des scharfkantigen Schachtüberfalls wurde ohne Leitbleche an der Überfallkante, als auch mit Leitblechen, untersucht. Die Auswertung der Messergebnisse zeigte für das Fallrohr mit Leitblechen (radiale Zuströmung) eine höhere Abflusskapazität als jenes ohne.

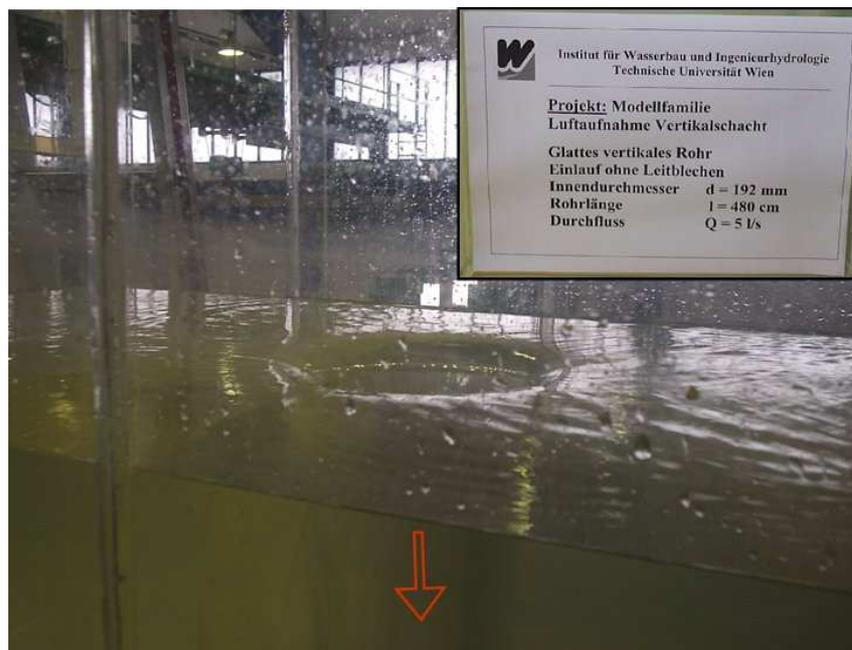


Abb. 5.1 Abflussbild,  $Q = 5 \text{ l/s}$

Um eine Abhängigkeit der eingesaugten Luftmenge von den Zuströmbedingungen festzustellen, wurde das Überfallrohr DN 200 mit Länge 480 cm für die beiden Fälle

- mit Leitwänden und
- ohne Leitwände

untersucht. Eine graphische Auswertung der Versuchsergebnisse ist in Abb. 5.2 ersichtlich. Im Fall mit Leitwänden beobachtete man:

- keine lineare Abhängigkeit zwischen der Wasserzufuhr und der eingesaugten Luftmenge (kurviger Verlauf)
- etwa doppelt so hohe Luft- wie Wassermenge
- fast gleichbleibender Lufteinzug bei einem Durchfluss von 25 l/s bis 35 l/s

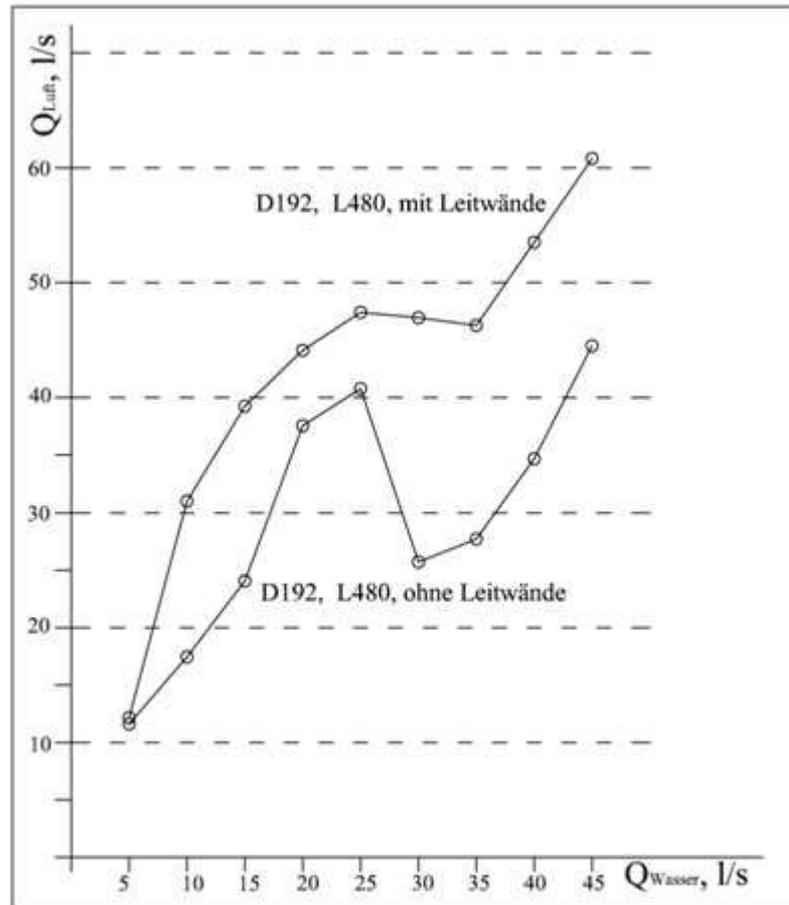


Abb. 5.2 Vergleich, Abfluss mit und ohne Leitwände

Im Fall ohne Leitwände beobachtete man:

- nicht lineare Abhängigkeit zwischen zugeführter Wasser- und der Luftmenge
- geringerer Lufteinzug als mit Leitwänden
- starkes Abnehmen der Luftmenge bei 30 l/s, wegen der Druckzunahme durch Wirbelbildung im Einlauf

Im Vergleich:

- Der durch Leitwände radialgeformte Zufluss beeinflusst den Lufteinzug
- Die eingesaugte Luftmenge ist im Fall mit Leitwänden größer
- Die tangentiale Anströmung wurde mittels der Leitbleche verhindert, dies führte zum Absinken des Luftbedarfes

Abbildungen 5.3 bis 5.6 zeigen den Unterschied bei verschiedenen Anströmungsbedingungen im Zuge der Vorversuche.

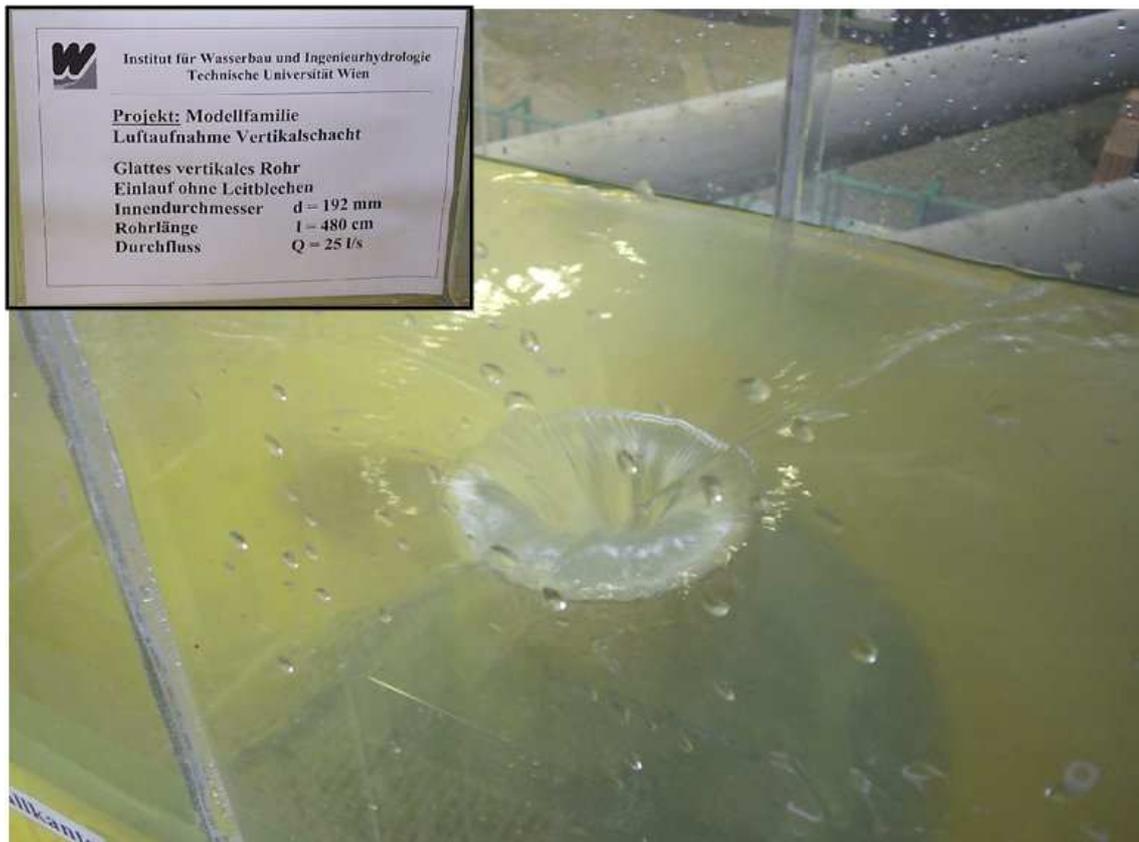


Abb. 5.3 Abflussbild bei 25 l/s, ohne Leitwände (Versuch V4)

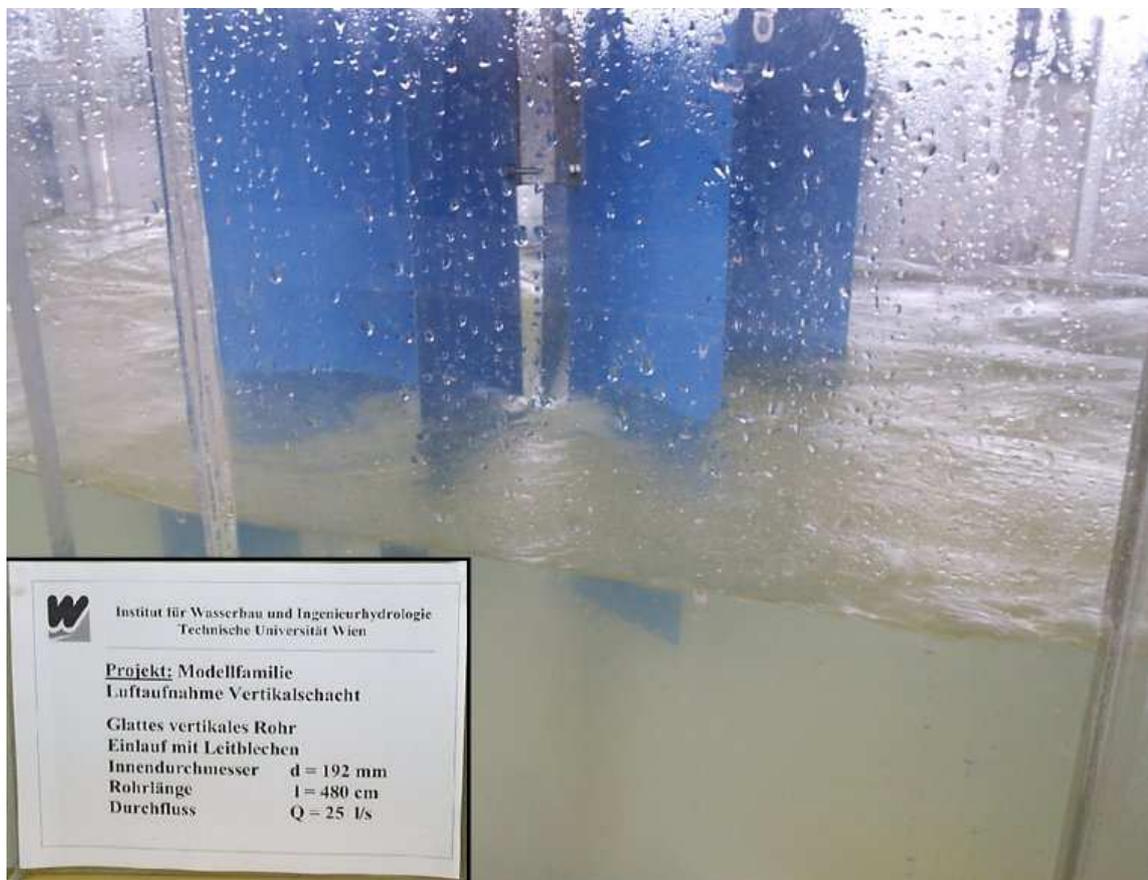


Abb. 5.4 Abflussbild bei 25 l/s, mit Leitwände (Versuch V2)

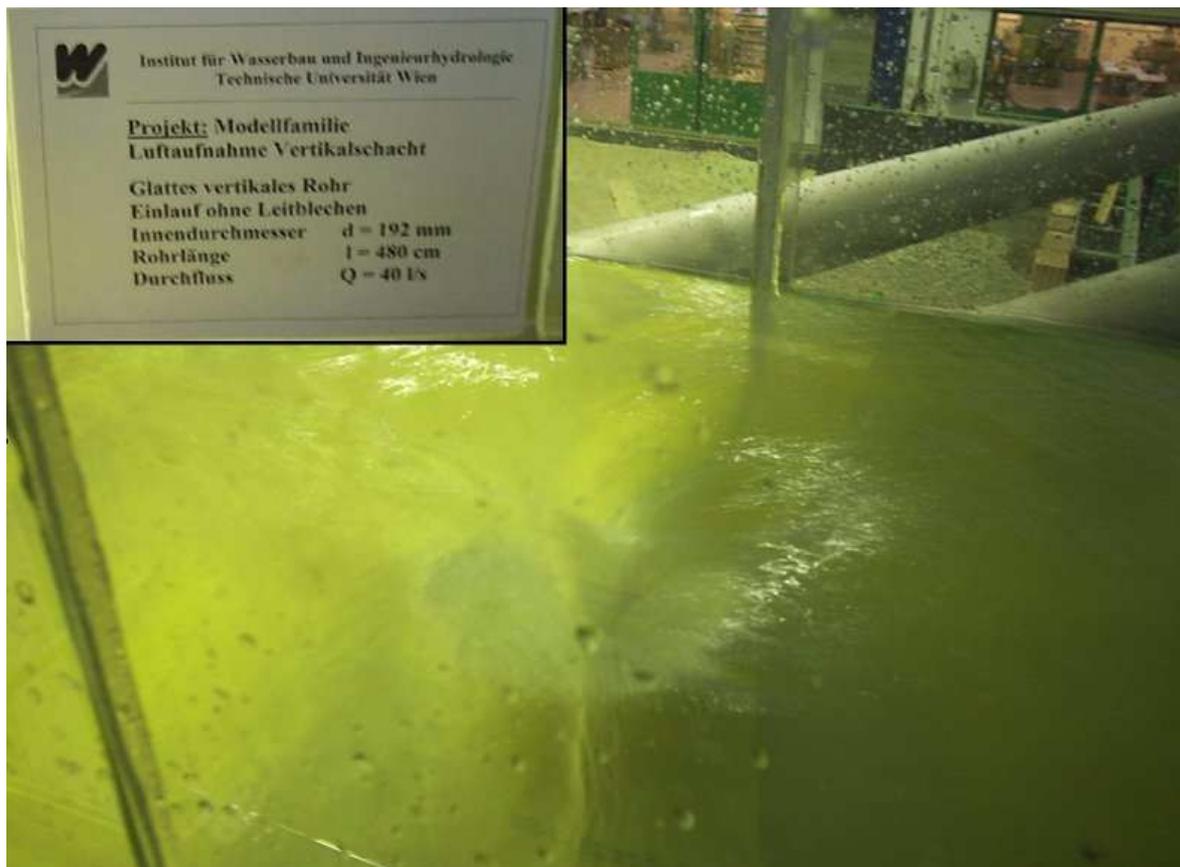


Abb. 5.5 Abflussbild bei 40 l/s, ohne Leitwände (Versuch V4)



Abb. 5.6 Abflussbild bei 40 l/s, mit Leitwände (Versuch V2)

Mit dem Modellrohr 1 (DN 200, Länge 480 cm) wurde weiters der Einfluss der Wasserzuströmungsverhältnisse im Beruhigungsbecken, als auch die Messzeitdauer auf die Versuchsergebnisse untersucht.

Zur Ermittlung der optimalen Einlaufbedingungen wurden folgende strömungsberuhigende Maßnahmen getestet: (Abb. 5.7):

- V1: Aufbau mit Leitblechen und mit einer Überfallwand nach dem Wasserzuleitungsrohr
- V2: Aufbau mit Leitblechen ohne Überfallwand
- V3,V4: Aufbau ohne Leitbleche und ohne Überfallwand, mit Honeycombs

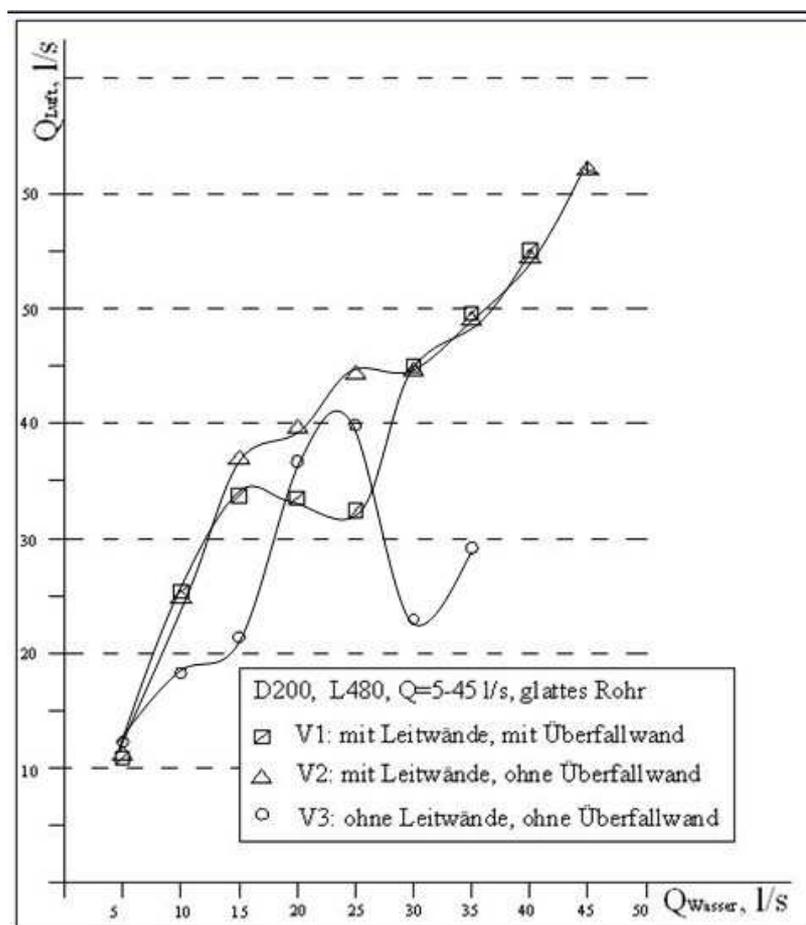


Abb. 5.7 Vergleich der Versuche mit unterschiedlicher Wasserberuhigung und Zuströmverhältnissen in das Fallrohr

Daraus lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Der Lufteinzug im Fall ohne Leitwände und ohne Überfallwand waren niedriger
- Bei V3 bzw. V4 war ein Absinken des Luftbedarfes beim Wasserzufluss 30 l/s zu beobachten

- Bei V2 lagen die Messwerte für den Luftertrag am höchsten
- V1 und V2 zeigten relativ gleiche Ergebnisse

Die nächsten Vorversuche erfolgten nach der Aufbauart V1. Es wurden wie bereits unter Pkt. 4.5 und Pkt. 4.7 erwähnt, auch die min. und max. Werte der eingesaugten Luftmenge gemessen (Abb. 5.8). Dies soll auch die Bandbreite des tatsächlichen physikalisch nicht konstanten Lufterzugvorganges veranschaulichen.

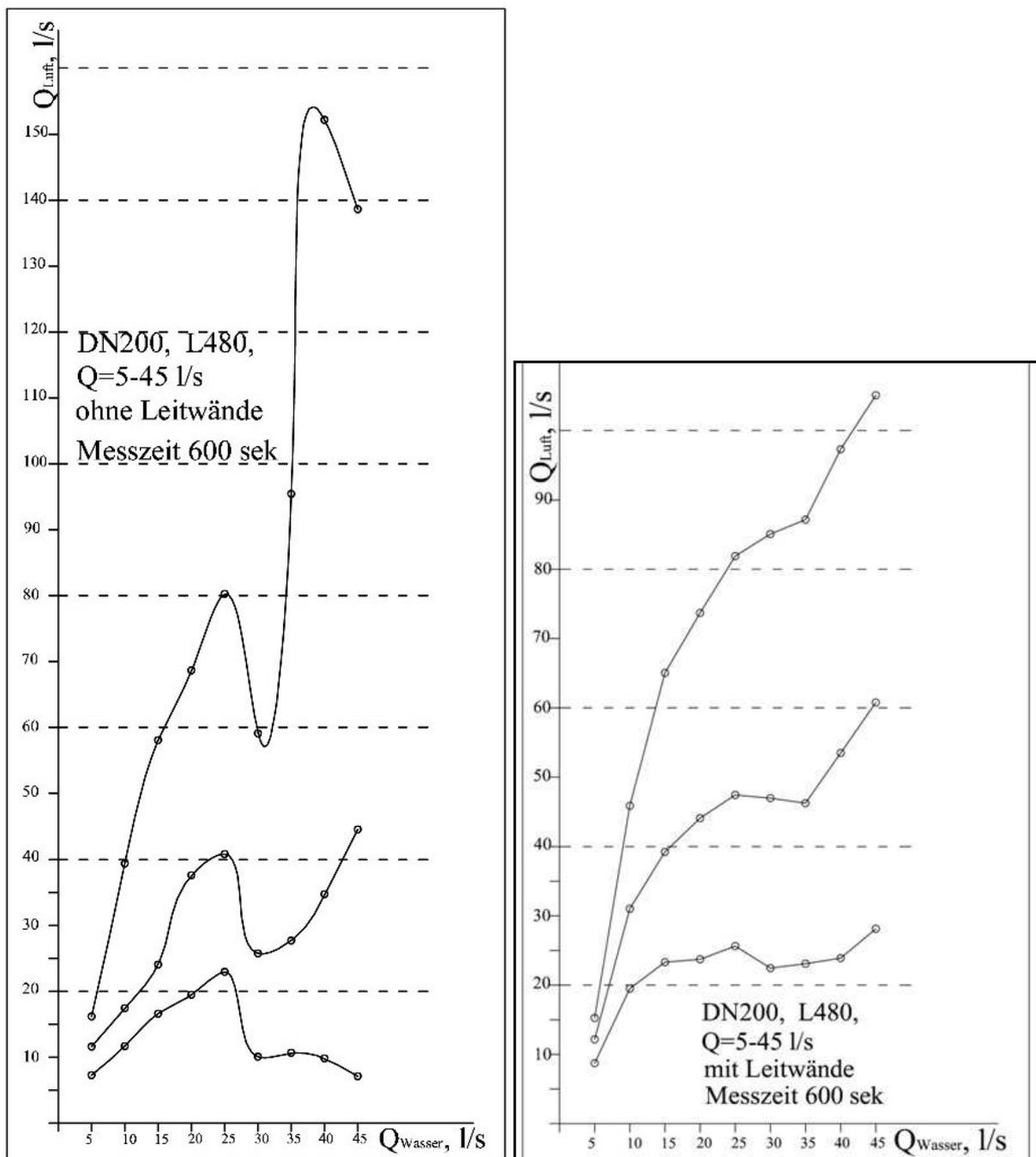


Abb. 5. 8 Extremalwerte der Luftmenge im Fall ohne und mit Leitwände

Durch die ähnlichen Kurvenverläufe der Extremal- und Mittelwerte sind auch die Messergebnisse in ihrer Konsistenz besser vergleichbar. Die Luftgeschwindigkeiten im Fall ohne Leitwände hatte durch den wirbelbedingten instationären Abflussverhältnisse wesentlich höhere Spitzwerte, als im Fall mit Leitblechen. Der Mittelwert der eingesaugten Luftmenge ist aber mit eingebauten Leitblechen höher. Dies zeigt die Schwierigkeit den tatsächlichen Einfluss der Zuströmbedingung zu quantifizieren.

Im Wesentlichen werden in den nachfolgenden Hauptversuchen trotzdem nur die Mittelwerte des Lufteinzuges über eine Messdauer von 600 sec graphisch dargestellt und zur Beurteilung des Abflussvehaltens herangezogen. In den Tabellen sind aber auch die gemessenen min. und max. Werte angeführt.

Wie erwähnt basierte diese Festlegung auf Vergleichsuntersuchungen mit verschiedenen Messdauern von 60 sec, 360 sec und 600 sec (Abb. 5.9).

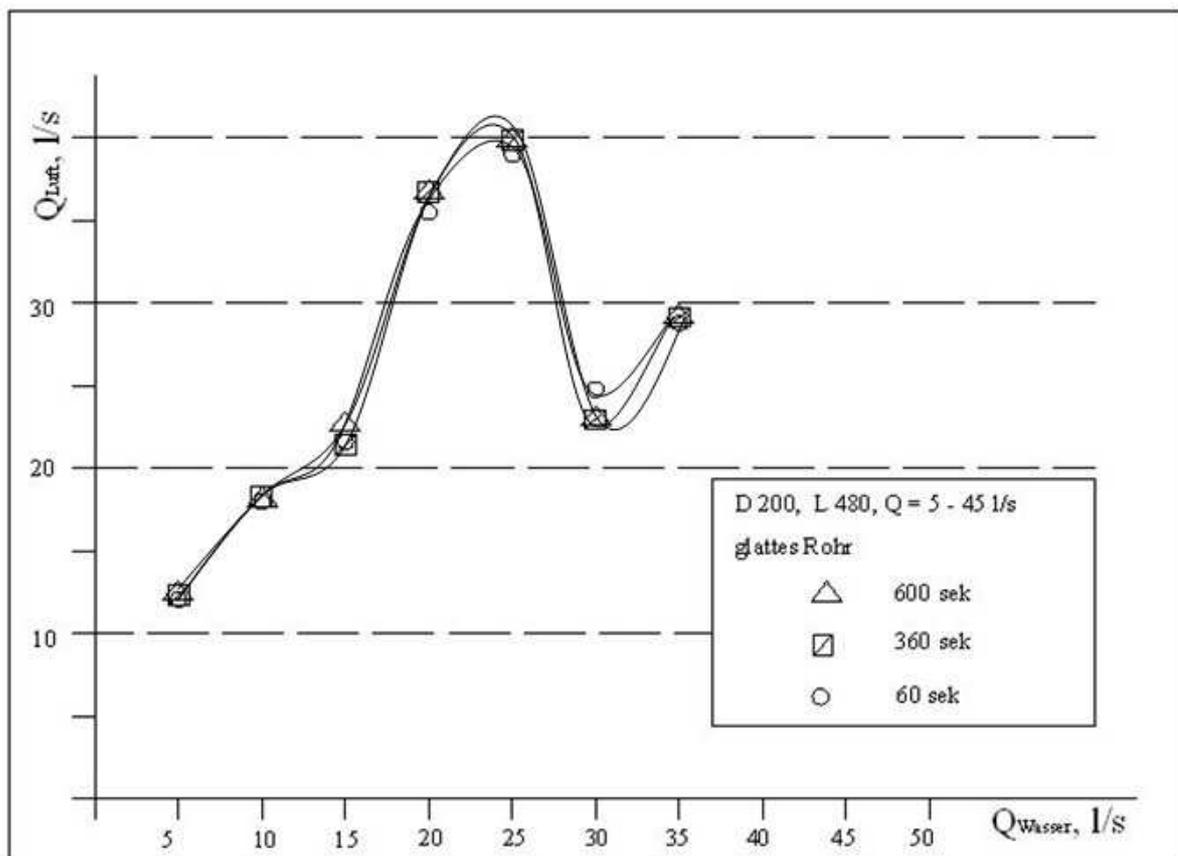


Abb. 5.9 Mittelwert des Lufteinzuges bei verschiedenen Messdauern

### 5.3 HAUPTVERSUCHE

Für die Hauptversuche V5 bis V25 wurden einheitlich Honeycombs und Vlies im Vorbecken angeordnet, sowie der Leitapparates (Leitbleche) am Fallrohrreinlauf eingebaut. Alle Hauptversuche wurden mit diesen einheitlichen Versuchsaufbau durchgeführt. Die Schlüsselkurven für den Rohüberfall sind für jeden untersuchten Durchmesser in Abb. 5.10 dargestellt.

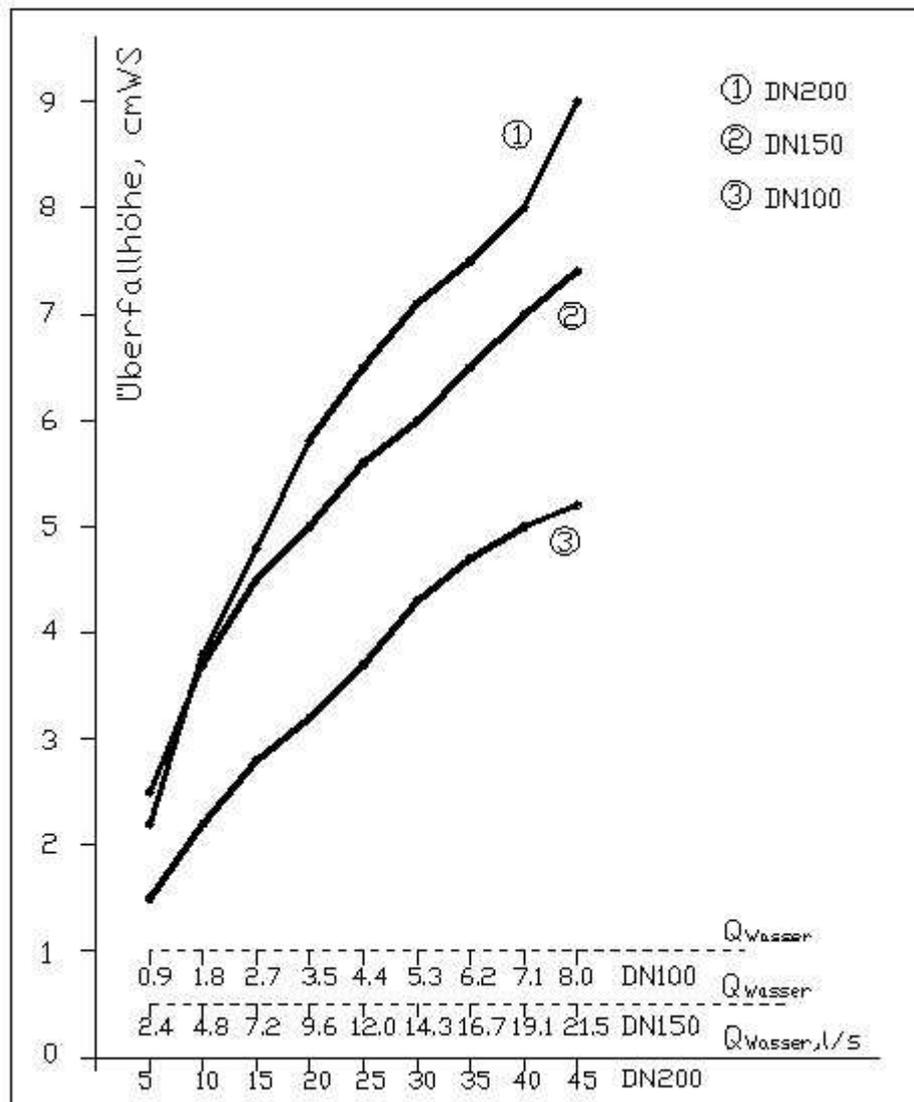
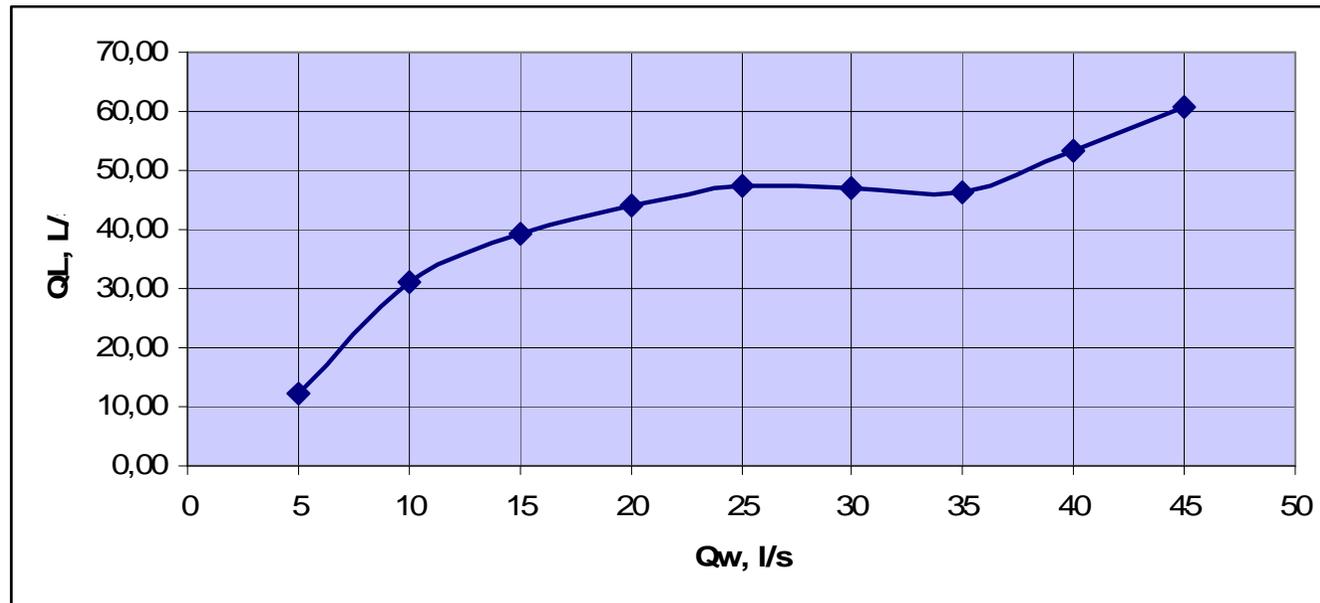


Abb. 5.10. Schlüsselkurven der Rohrüberfälle

Die weiteren Versuchsergebnisse (Lufteintrag und z.T. Druckverläufe) für die Rohre DN 200, DN 150 und DN 100 sind in den nachfolgenden Tab. 5.1 bis 5.18 zusammengefasst, graphisch ausgewertet und für jeden Rohrdurchmesser diskutiert.

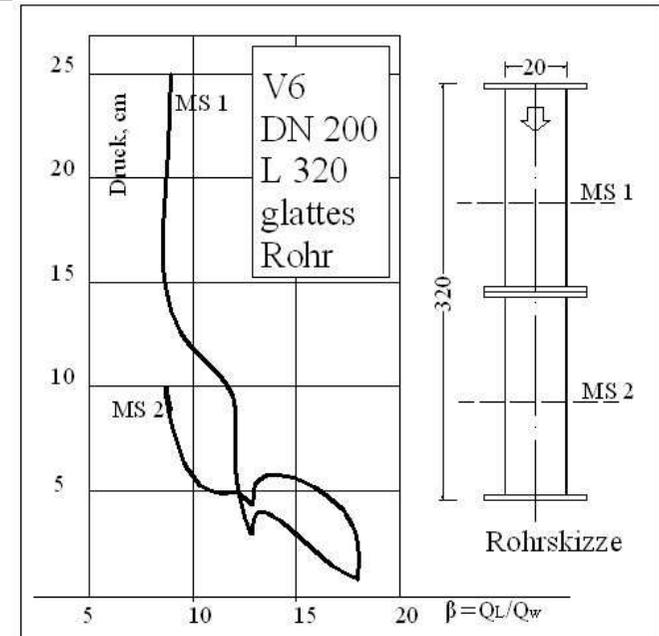
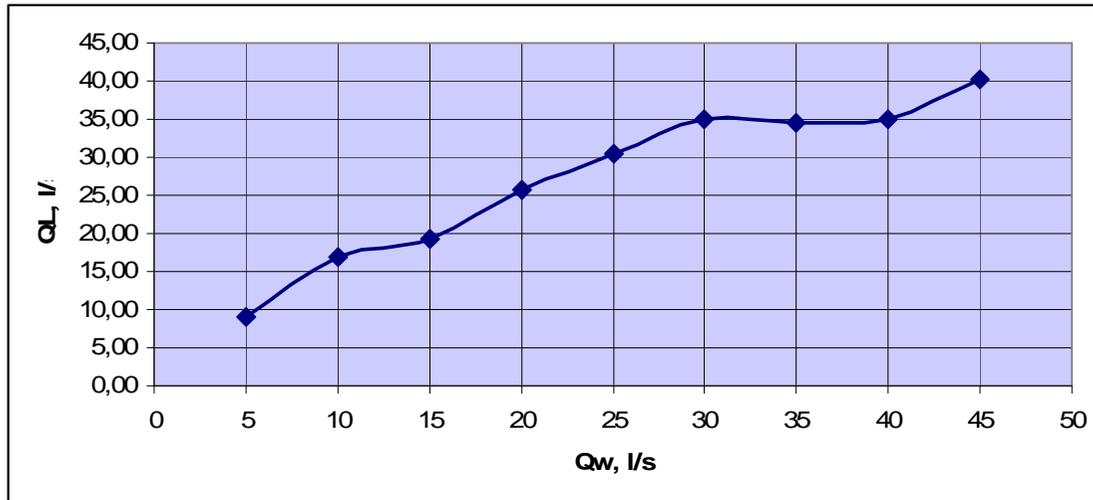
Tab. 5.1 Ergebnisse des Versuches 5, DN200, L 480 cm, galttes Rohr

Versuch 5, DN200, L 480 cm, galttes Rohr								26.9.2008			
Wasser- menge	Luftgeschwindigkeit, m/s			Luftmenge, l/s			Überfallhöhe	Druckmessung, cm			
	l/s	Min Wert	Mittelwert	Max Wert	Min Wert	Mittelwert		Max Wert	Meßstelle 1		MS 2
Max							Min		Max	Min	
5	1,74	2,42	3,04	8,74	12,16	15,27	2,4	Keine vorhanden			
10	3,88	6,17	9,13	19,49	31,00	45,87	3,8				
15	4,64	7,81	12,95	23,31	39,24	65,06	4,8				
20	4,72	8,78	14,67	23,71	44,11	73,70	5,9				
25	5,10	9,44	16,30	25,62	47,43	81,89	6,6				
30	4,47	9,35	16,93	22,46	46,97	85,06	7,4				
35	4,60	9,21	17,35	23,11	46,27	87,17	8,0				
40	4,76	10,65	19,37	23,91	53,51	97,31	8,7				
45	5,60	12,10	20,92	28,13	60,79	105,10	9,2				



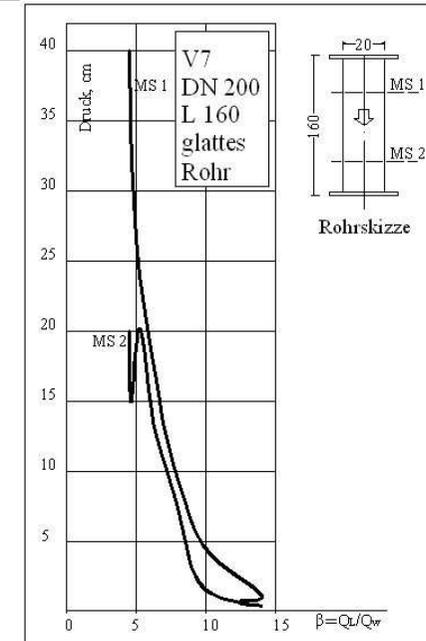
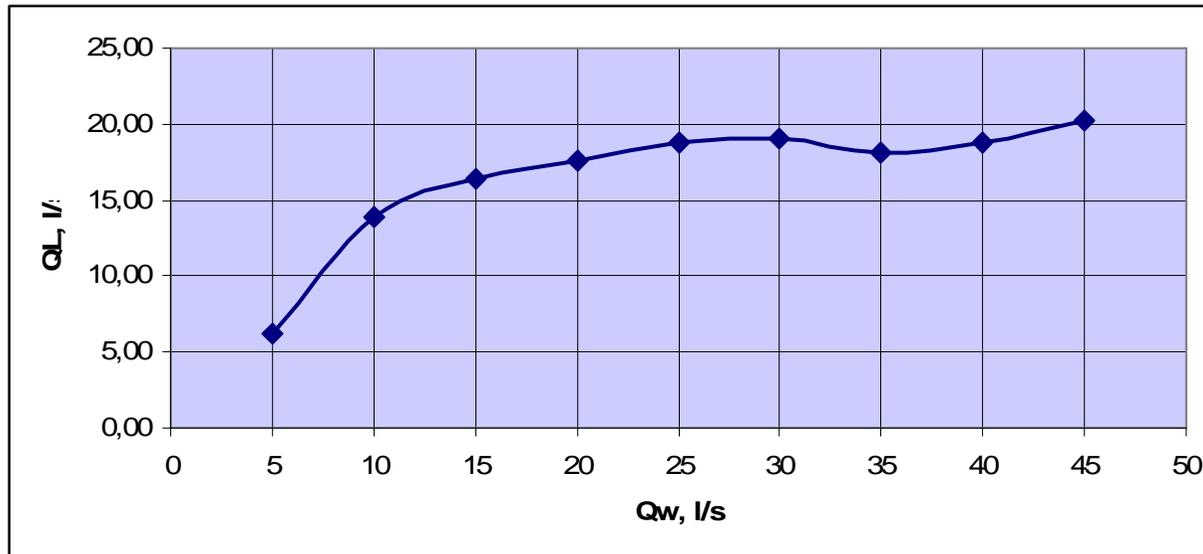
Tab. 5.2 Ergebnisse des Versuches 6, DN200, L 320 cm, glattes Rohr

Versuch 6, DN200, L 320 cm, glattes Rohr								30.9.2008			
Wassermenge l/s	Luftgeschwindigkeit, m/s			Luftmenge, l/s			Überfallhöhe cm	Druckmessung, cm			
	Min Wert	Mittelwert	Max Wert	Min Wert	Mittelwert	Max Wert		Meßstelle 1		MS 2	
l/s	Min Wert	Mittelwert	Max Wert	Min Wert	Mittelwert	Max Wert	cm	Max	Min	Max	Min
5	1,41	1,79	2,37	7,08	8,99	11,91	2,1	0,75		0,85	
10	2,54	3,38	4,47	12,76	16,98	22,46	4,0	1,25	0,50	4,50	3,50
15	3,09	3,86	5,39	15,52	19,39	27,08	5,0	3,50	2,50	5,00	4,50
20	3,76	5,13	8,08	18,89	25,77	40,59	5,9	3,00	1,50	4,50	
25	3,97	6,08	10,93	19,95	30,55	54,91	6,7	5,00	4,50	5,00	4,00
30	4,01	6,98	12,11	20,15	35,07	60,84	7,3	10,00	3,00	5,00	0,50
35	4,14	6,86	13,37	20,80	34,46	67,17	8,0	12,00	5,00	6,00	1,00
40	3,88	6,95	13,58	19,49	34,92	68,23	9,0	20,00	5,00	10,00	3,00
45	4,01	8,01	14,33	20,15	40,24	71,99	9,5	25,00	10,00	9,00	3,00



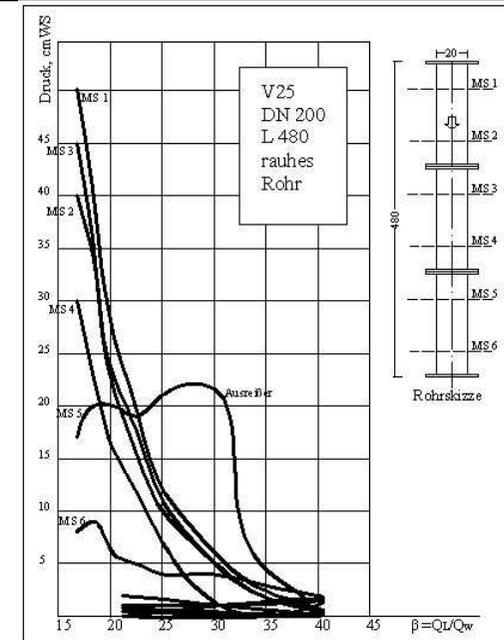
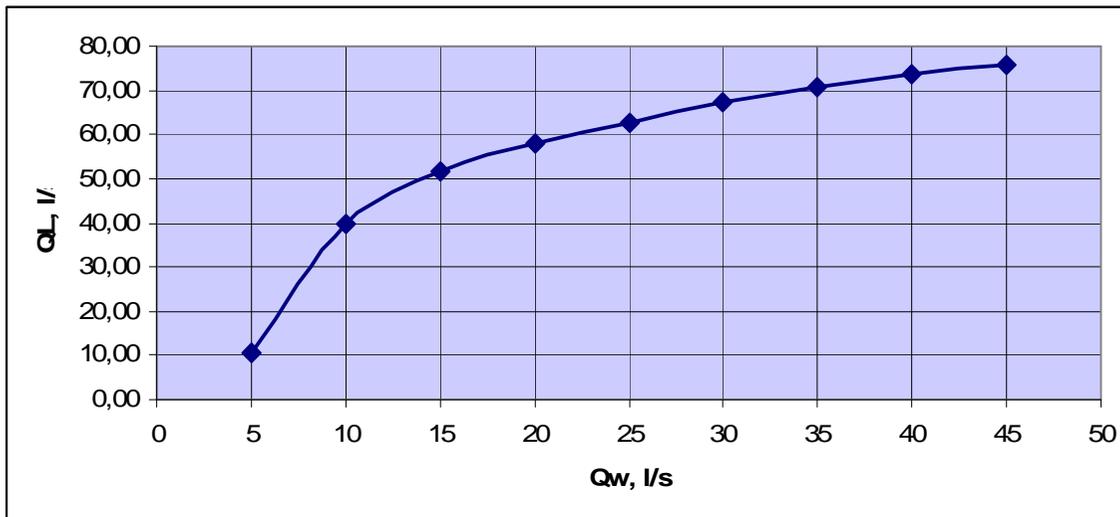
Tab. 5.3 Ergebnisse des Versuches 7, DN200, L 160 cm, glattes Rohr

Versuch 7, DN200, L 160 cm, glattes Rohr								06.10.2008			
Wasser- menge  l/s	Luftgeschwindigkeit, m/s			Luftmenge, l/s			Überfallhöhe  cm	Druckmessung, cm			
	Min Wert	Mittelwert	Max Wert	Min Wert	Mittelwert	Max Wert		Meßstelle 1		MS 2	
								Max	Min	Max	Min
5	0,78	1,25	1,74	3,92	6,28	8,74	2,3	0,75		0,50	
10	1,74	2,77	3,76	8,74	13,92	18,89	4,0	0,85		0,40	
15	2,25	3,27	4,76	11,30	16,43	23,91	5,0	3,50	2,50	1,00	0,30
20	2,63	3,49	4,51	13,21	17,53	22,66	5,9	7,00		4,00	2,00
25	2,67	3,75	5,48	13,41	18,84	27,53	6,8	11,00	7,00	9,00	6,00
30	2,71	3,8	5,48	13,62	19,09	27,53	7,3	17,00	15,00	13,00	10,00
35	2,63	3,61	5,35	13,21	18,14	26,88	7,8	25,00	22,00	20,00	16,00
40	2,25	3,73	6,49	11,30	18,74	32,61	8,5	33,00	30,00	15,00	5,00
45	2,42	4,03	6,74	12,16	20,25	33,86	9,0	40,00	35,00	20,00	10,00



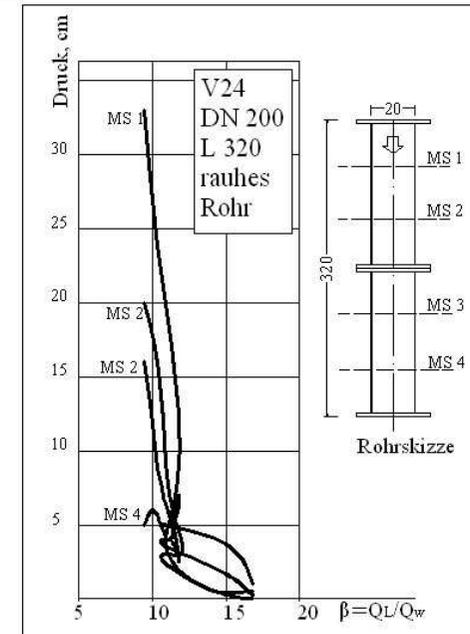
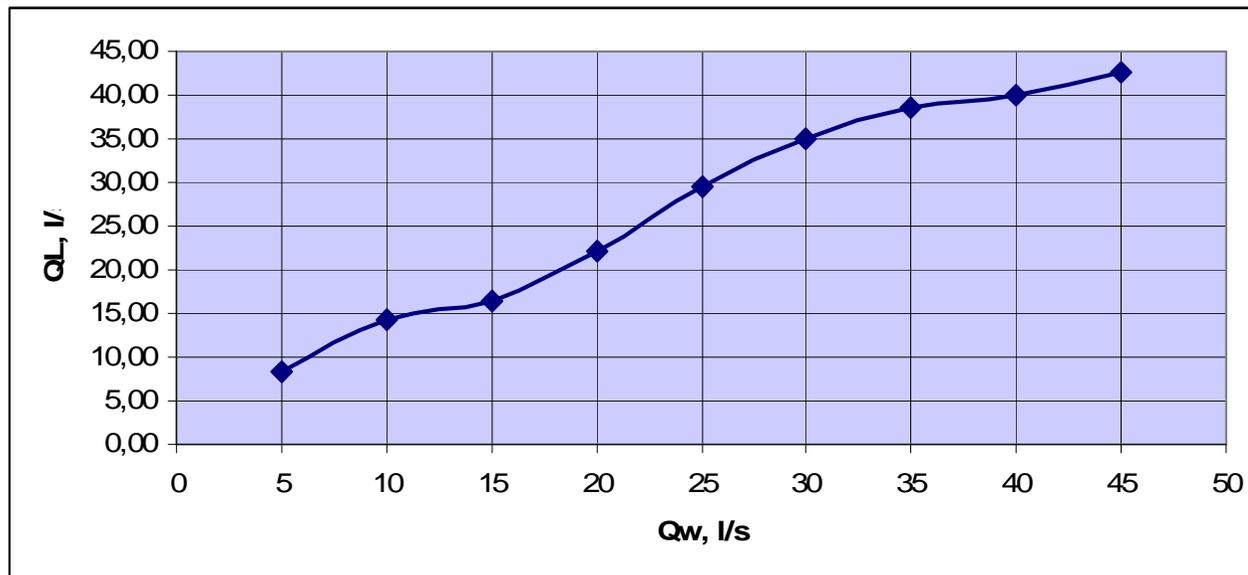
Tab. 5.4 Ergebnisse des Versuches 25, DN 200, L 480 cm, rauhes Rohr

Versuch 25, DN 200, L 480 cm, rauhes Rohr																		31.10.2008	
Wasser- menge	Luftgeschwindigkeit, m/s			Luftmenge, l/s			Überfallhöhe	Druckmessung, cm											
	l/s	Min Wert	Mittelwert	Max Wert	Min Wert	Mittelwert		Max Wert	Meßstelle 1		MS 2		MS 3		MS 4		MS 5		MS 6
Max							Min		Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
5	1,45	2,11	2,83	7,28	10,60	14,22	2,2	0,70		0,50		2,00		0,00		0,00		1,00	
10	6,40	7,93	9,59	32,15	39,84	48,18	3,7	0,70		0,50		0,50		1,00		1,00		2,00	
15	8,96	10,29	11,52	45,02	51,70	57,88	4,8	2,50		2,00		2,00		0,00		5,00		3,00	
20	10,09	11,58	13,49	50,69	58,18	67,77	5,8	7,00		6,00		6,00		2,00		22,00		4,00	
25	10,76	12,47	14,04	54,06	62,65	70,54	6,5	12,00		11,00		10,00		7,00	5,00	21,00		4,00	
30	11,44	13,37	15,00	57,47	67,17	75,36	7,0	20,00		18,00		16,00		12,00		19,00		5,00	
35	12,11	14,11	16,05	60,84	70,89	80,64	7,5	27,00		23,00		22,00		16,00		20,00		6,00	
40	11,98	14,64	16,93	60,19	73,55	85,06	8,0	40,00		34,00		35,00		23,00	20,00	20,00	16,00	9,00	5,00
45	12,36	15,07	17,56	62,10	75,71	88,22	9,0	50,00		40,00		45,00	39,00	30,00	26,00	17,00	15,00	8,00	



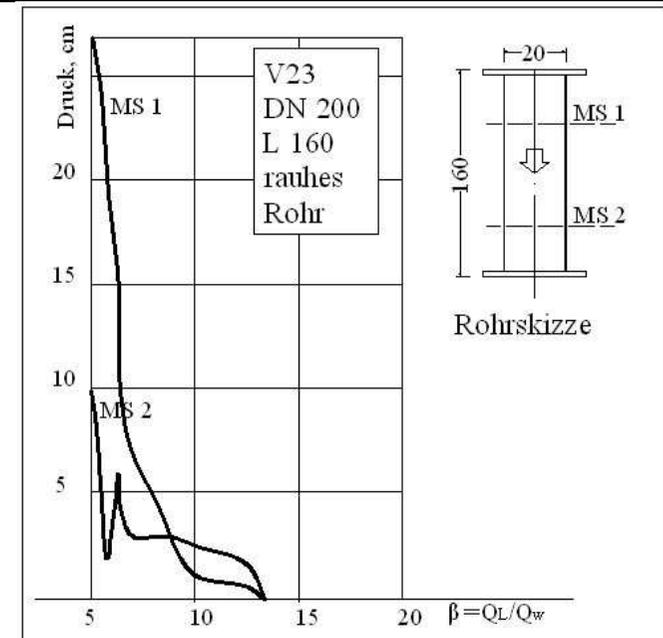
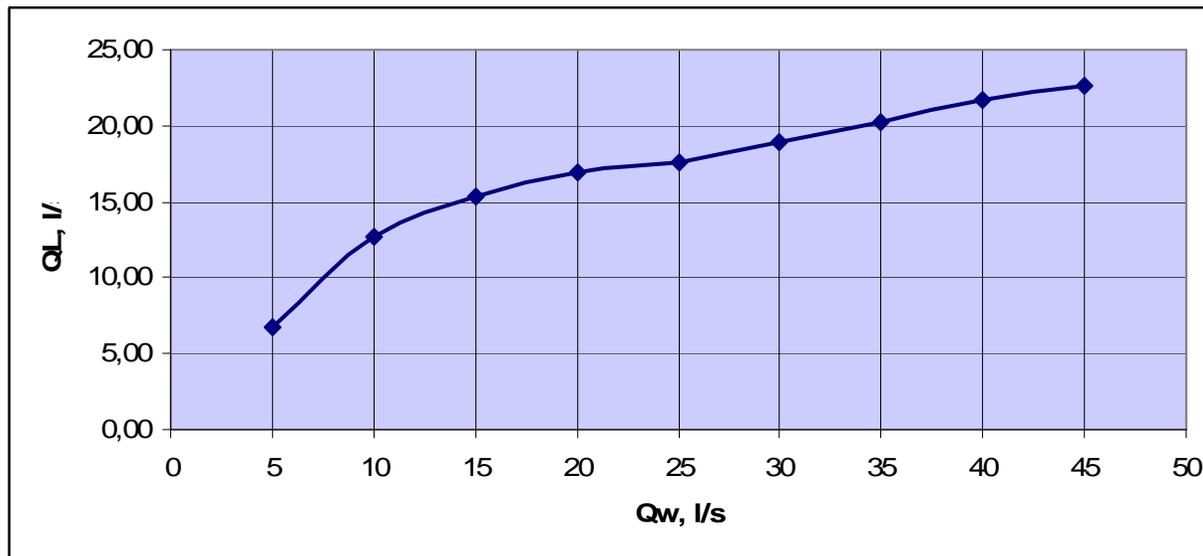
Tab. 5.5 Ergebnisse des Versuches 24, DN 200, L 320 cm, rauhes Rohr

Versuch 24, DN 200, L 320 cm, rauhes Rohr													30.10.2008		
Wasser- menge  l/s	Luftgeschwindigkeit, m/s			Luftmenge, l/s			Überfallhöhe  cm	Druckmessung, cm							
	Min Wert	Mittelwert	Max Wert	Min Wert	Mittelwert	Max Wert		Meßstelle 1		MS 2		MS 3		MS 4	
								Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
5	1,28	1,67	2,00	6,43	8,39	10,05	2,3	0,50		0,00		0,30		1,00	
10	1,11	2,86	4,14	5,58	14,37	20,80	3,7	0,50		0,50		2,00		4,00	
15	2,58	3,25	4,30	12,96	16,33	21,60	5,0	4,00		3,00	2,00	4,00	2,00	5,00	3,00
20	3,00	4,42	8,00	15,07	22,21	40,19	5,8	5,00		3,00		4,00		5,00	
25	3,97	5,87	8,63	19,95	29,49	43,36	6,5	9,00		3,00		2,50		7,00	
30	5,31	6,95	8,79	26,68	34,92	44,16	7,0	14,00		5,00	3,00	4,00	3,00	6,00	3,00
35	5,73	7,69	9,97	28,79	38,63	50,09	7,5	19,00		8,00	5,00	6,00		4,00	
40	5,52	7,96	10,56	27,73	39,99	53,05	8,0	27,00		18,00	14,00	12,00	8,00	6,00	3,00
45	5,44	8,49	11,73	27,33	42,65	58,93	9,0	33,00		20,00		16,00	10,00	5,00	4,00



Tab. 5.6 Ergebnisse des Versuches 23, DN 200, L 160 cm, rauhes Rohr

Versuch 23, DN 200, L 160 cm, rauhes Rohr									29.10.2008		
Wassermenge l/s	Luftgeschwindigkeit, m/s			Luftmenge, l/s			Überfallhöhe cm	Druckmessung, cm			
	Min Wert	Mittelwert	Max Wert	Min Wert	Mittelwert	Max Wert		Meßstelle 1		MS 2	
l/s	Min Wert	Mittelwert	Max Wert	Min Wert	Mittelwert	Max Wert	cm	Max	Min	Max	Min
5	1,03	1,33	1,58	5,17	6,68	7,94	2,2	0,00		0,00	
10	1,87	2,52	3,55	9,39	12,66	17,84	3,8	0,50		1,50	
15	2,46	3,06	4,01	12,36	15,37	20,15	4,8	1,00		2,50	
20	2,67	3,36	4,47	13,41	16,88	22,46	5,8	4,00		3,00	2,00
25	2,88	3,49	4,64	14,47	17,53	23,31	6,5	7,00		3,00	
30	3,13	3,77	4,93	15,73	18,94	24,77	7,1	15,00	10,00	6,00	2,00
35	3,17	4,04	5,02	15,93	20,30	25,22	7,5	20,00		2,00	
40	3,30	4,32	5,65	16,58	21,70	28,39	8,0	25,00		6,00	
45	3,34	4,51	6,32	16,78	22,66	31,75	9,0	27,00	26,00	10,00	4,00



Folgende Erkenntnisse für die Luftaufnahme können aus den Versuchsergebnissen für das Rohr DN 200 gewonnen werden:

- der Zusammenhang zwischen Wasser- und Luftmenge ist nicht linear
- beim hydraulisch glatten Rohr wird weniger Luft eingesaugt
- die Kurven bei den rauhen Rohr sind stetig ansteigend
- konstanter Verlauf des Lufteintrages im Fall glattes Rohr zwischen 25 – 35 l/s, Länge 480 cm und zwischen 30 – 40 l/s, Länge 320 cm. Die Ursache dieses Verhaltens ist derzeit noch unklar und sollte durch weitere Untersuchungen erforscht werden.
- Luftaufnahme steigt mit zunehmender Rohrlänge und Rohrauhigkeit (Abb. 5.11)

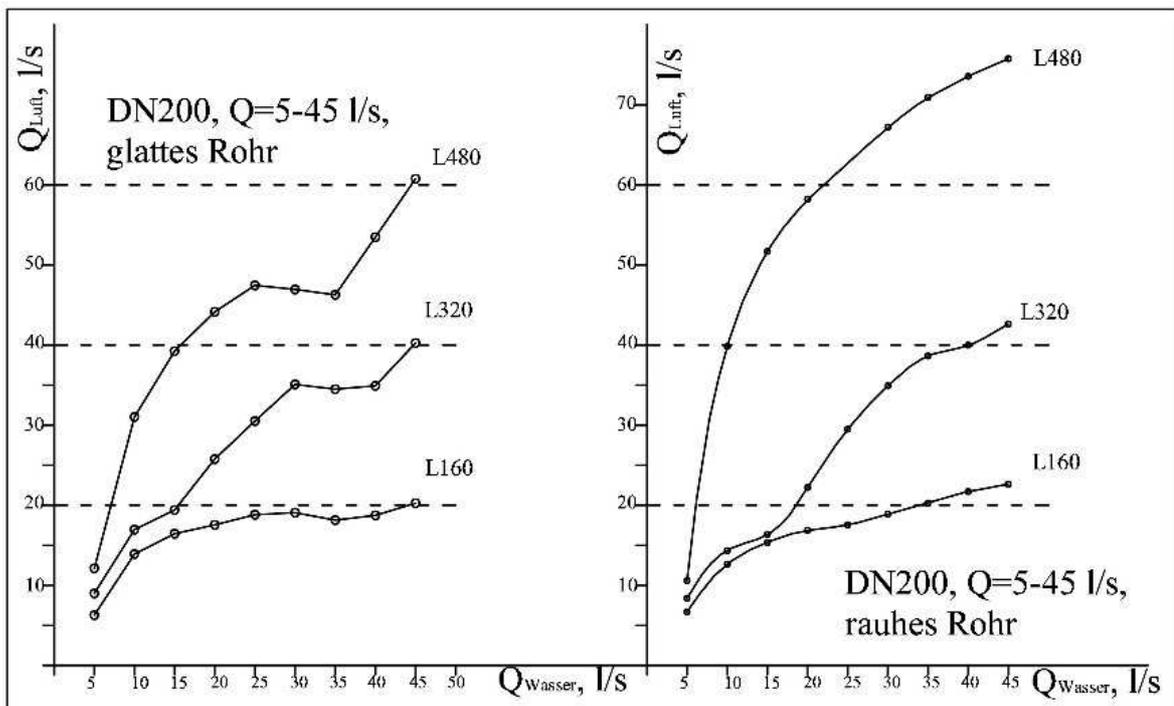
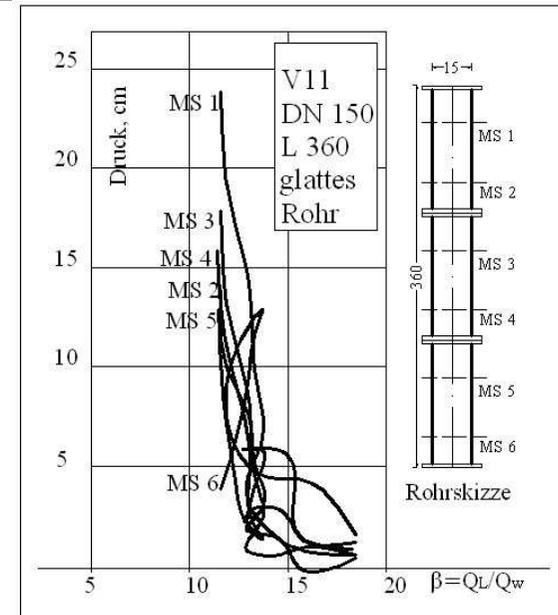
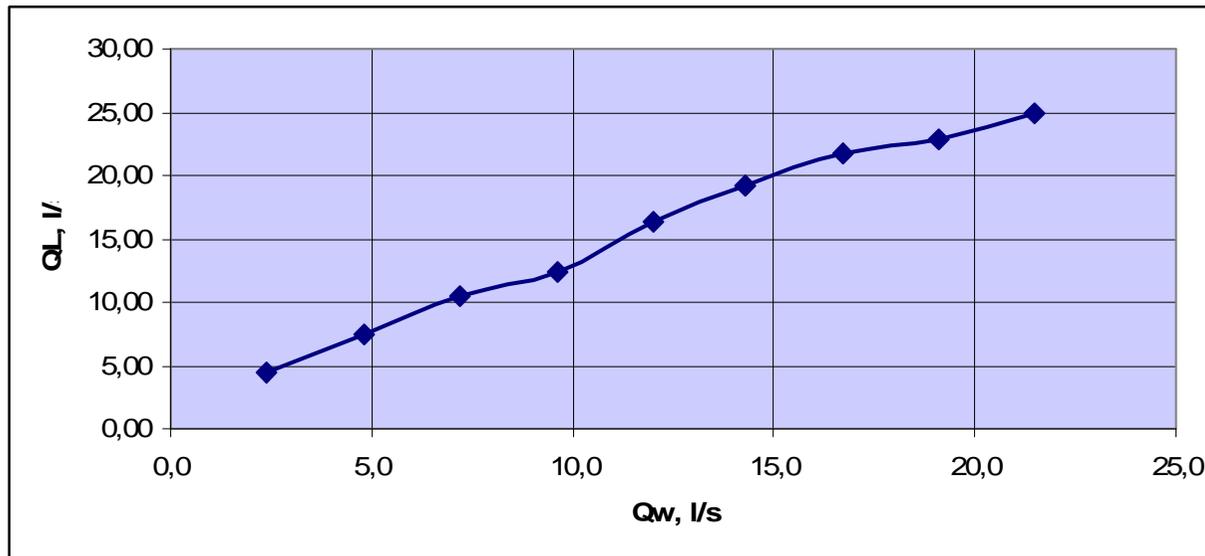


Abb. 5.11 Vergleich des Lufteintrages in Abhängigkeit der Rohrlänge und der Rohrauhigkeit für DN 200

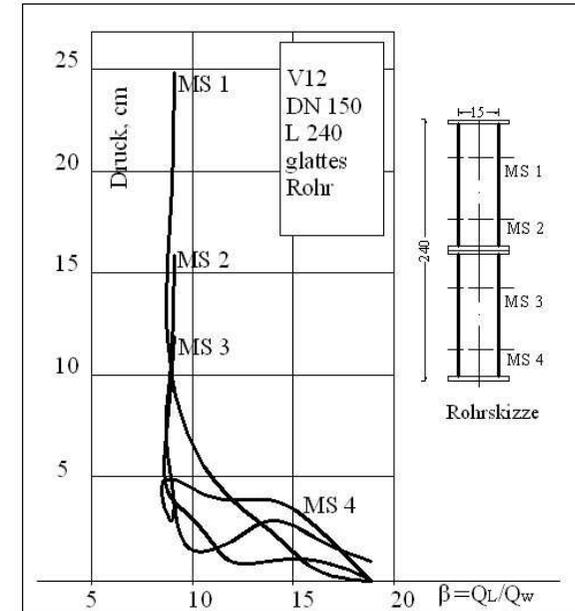
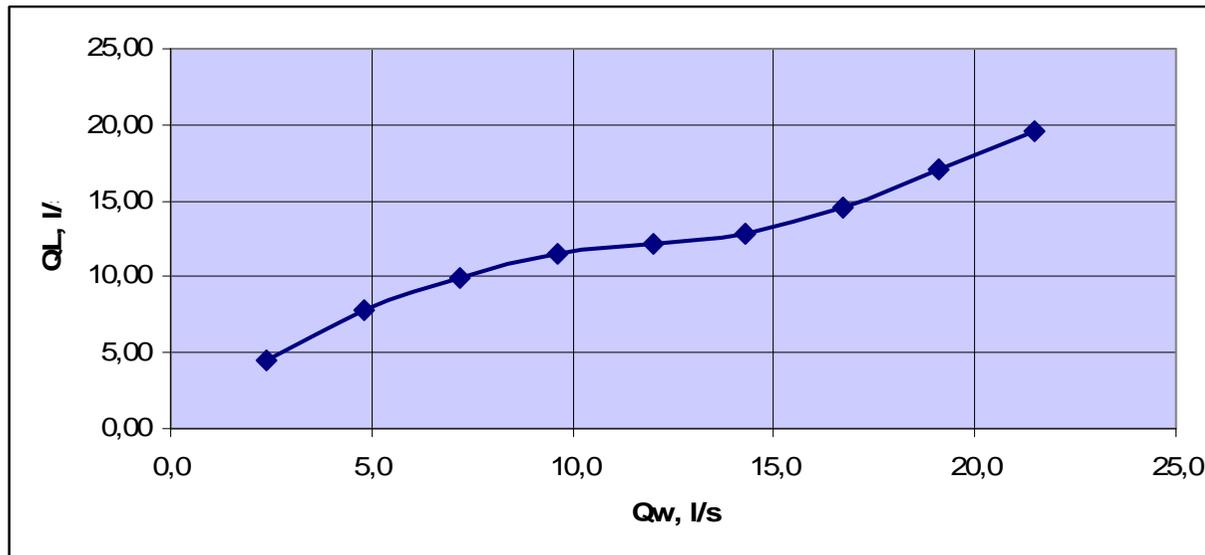
Tab. 5.7 Ergebnisse des Versuches 11, DN150, L 360 cm, glattes Rohr

Versuch 11, DN150, L 360 cm, glattes Rohr																			15.10.2008	
Wassermenge	Luftgeschwindigkeit, m/s			Luftmenge, l/s			Überfallhöhe	Druckmessung, cm												
								Meßstelle 1		MS 2		MS 3		MS 4		MS 5		MS 6		
l/s	Min Wert	Mittelwert	Max Wert	Min Wert	Mittelwert	Max Wert	cm	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	
2,4	0,70	0,88	1,11	3,52	4,42	5,58	2,5	0,70		0,70		0,50		1,30		1,00		1,70		
4,8	0,82	1,48	2,12	4,12	7,44	10,65	3,7	1,00		1,00		0,10		1,70		2,00		4,50		
7,2	1,32	2,08	3,09	6,63	10,45	15,52	4,5	1,50		0,70		1,50		3,00		6,00		4,50		
9,6	1,92	2,46	3,34	9,65	12,36	16,78	5,0	4,00		1,00		2,00		2,50		6,00	3,50	12,00	7,00	
12,0	2,54	3,27	4,81	12,76	16,43	24,17	5,6	6,50	4,50	2,50		3,00	1,50	1,50	0,50	6,00	4,00	13,00	12,00	
14,3	3,00	3,81	5,44	15,07	19,14	27,33	6,0	9,50	9,00	4,30		5,00	4,50	2,00	0,50	4,00	2,00	12,00	10,00	
16,7	3,30	4,34	6,15	16,58	21,80	30,90	6,5	14,00	12,00	7,50		8,00	7,00	5,00		2,50	0,50	10,00	6,00	
19,1	2,83	4,54	7,24	14,22	22,81	36,37	7,0	19,00	17,00	10,00		13,00	5,00	11,00	9,00	8,00	0,50	5,00		
21,5	3,13	4,97	8,46	15,73	24,97	42,50	7,4	24,00	23,00	14,00	10,00	18,00	2,00	16,00	12,00	13,00	2,00	4,00	2,00	



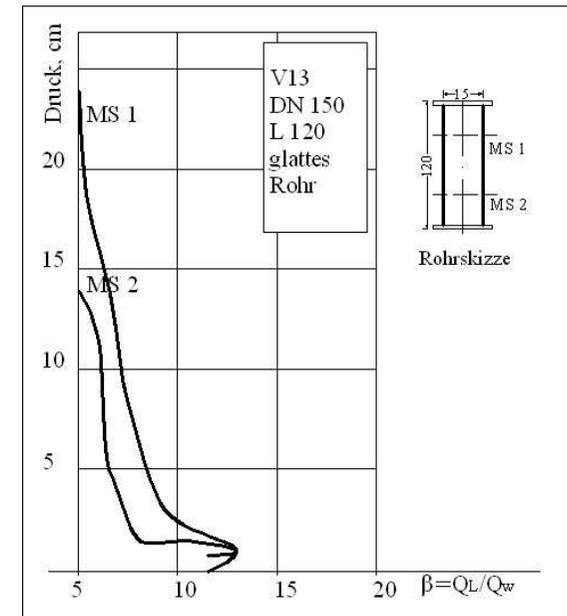
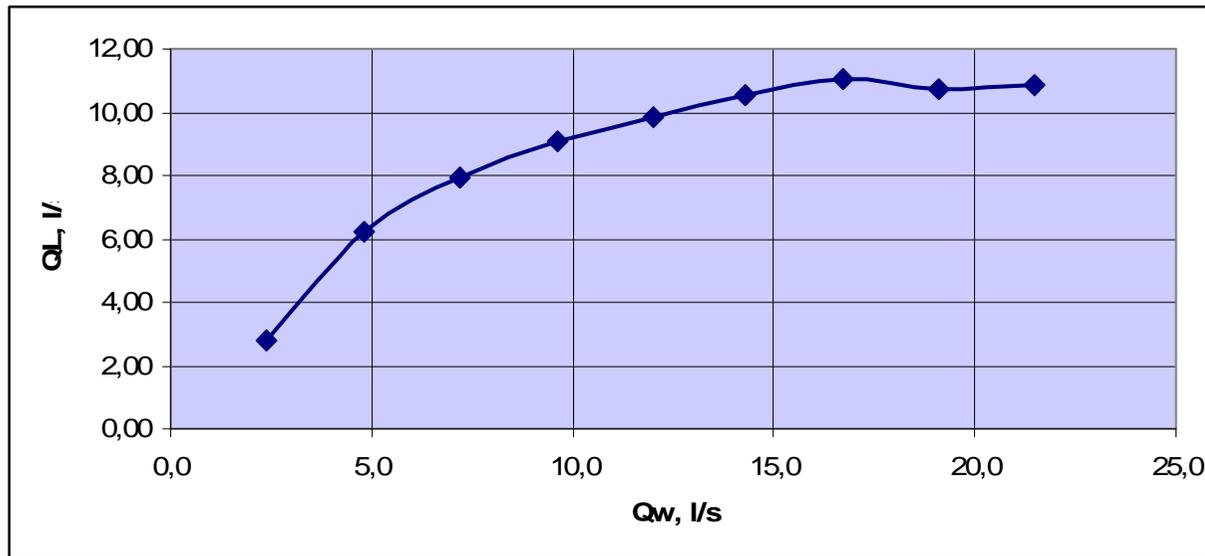
Tab. 5.8 Ergebnisse des Versuches 12, DN150, L 240cm, glattes Rohr

Versuch 12, DN150, L 240cm, glattes Rohr														15.10.2008	
Wassermenge m <sup>3</sup> /s	Luftgeschwindigkeit, m/s			Luftmenge, m <sup>3</sup> /s			Überfallhöhe cm	Druckmessung, cm							
	Min Wert	Mittelwert	Max Wert	Min Wert	Mittelwert	Max Wert		Meßstelle 1		MS 2		MS 3		MS 4	
m <sup>3</sup> /s	Min Wert	Mittelwert	Max Wert	Min Wert	Mittelwert	Max Wert	cm	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
2,4	0,70	0,90	1,16	3,52	4,52	5,83	2,5	0,00		1,00		0,10		0,00	
4,8	0,95	1,56	2,37	4,77	7,84	11,91	3,8	0,50		2,00		1,00		2,50	
7,2	1,41	1,98	2,96	7,08	9,95	14,87	4,5	2,50		3,00		1,00		4,00	
9,6	1,91	2,28	3,51	9,60	11,45	17,63	5,0	4,00	2,00	2,00		1,00		4,00	3,50
12,0	1,70	2,41	3,93	8,54	12,11	19,74	5,6	6,50	5,50	1,50		3,00	0,50	4,50	2,00
14,3	2,08	2,56	3,84	10,45	12,86	19,29	6,2	10,00	9,00	4,50	3,50	4,00	2,00	5,00	2,00
16,7	2,21	2,89	5,23	11,10	14,52	26,28	6,6	14,00	13,00	7,00	6,50	7,00	3,50	5,00	1,50
19,1	2,29	3,40	6,15	11,50	17,08	30,90	7,0	19,00	17,00	11,00	9,00	10,00	5,00	3,00	1,00
21,5	2,33	3,89	6,86	11,71	19,54	34,46	7,5	25,00	20,00	16,00	15,00	12,00	7,00	4,00	



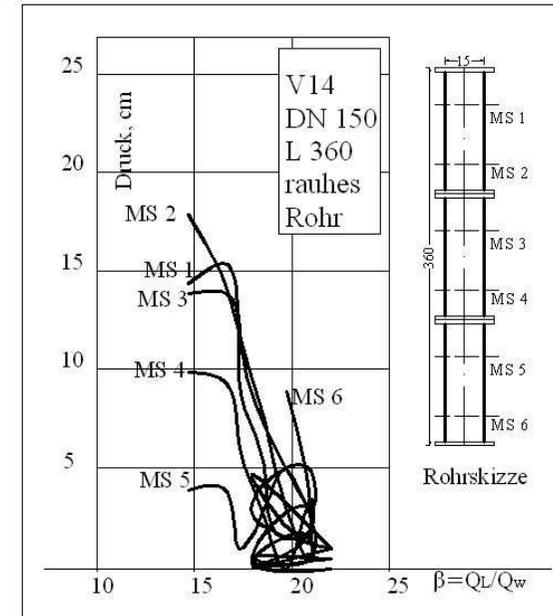
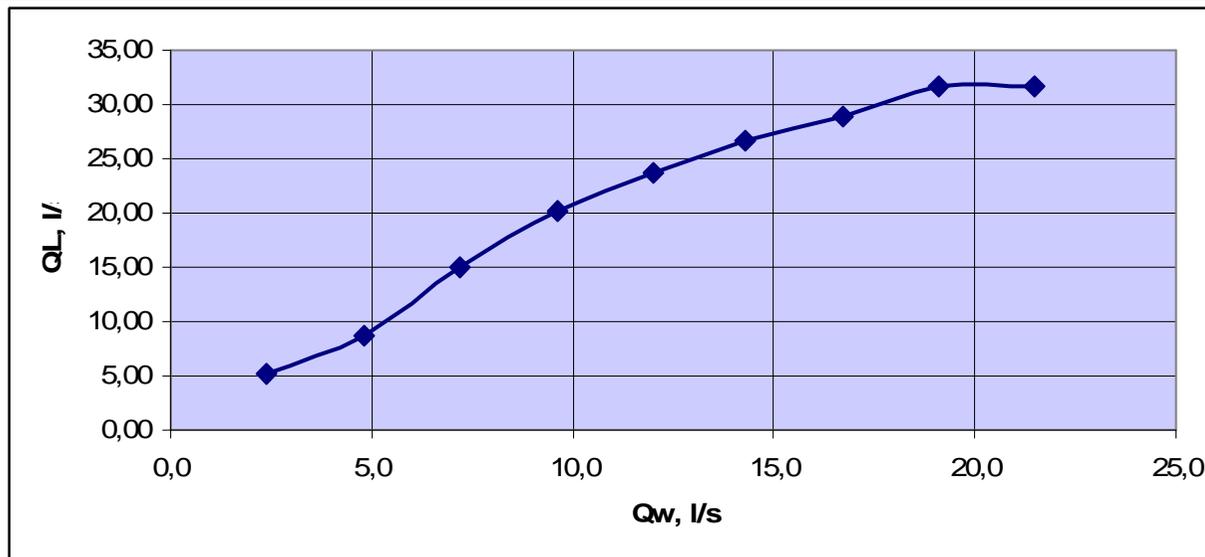
Tab. 5.9 Ergebnisse des Versuches 13, DN150, L 120cm, glattes Rohr

Versuch 13, DN150, L 120cm, glattes Rohr								16.10.2008			
Wasser- menge  l/s	Luftgeschwindigkeit, m/s			Luftmenge, l/s			Überfallhöhe  cm	Druckmessung, cm			
	Min Wert	Mittelwert	Max Wert	Min Wert	Mittelwert	Max Wert		Meßstelle 1		MS 2	
								Max	Min	Max	Min
2,4	0,48	0,55	0,66	2,41	2,76	3,32	2,6	0		0,8	
4,8	0,70	1,24	1,62	3,52	6,23	8,14	3,5	1		1	
7,2	0,82	1,58	2,46	4,12	7,94	12,36	4,5	2	1,5	1,5	
9,6	1,11	1,81	2,50	5,58	9,09	12,56	5,2	3	0,5	1,5	1
12,0	1,24	1,96	2,83	6,23	9,85	14,22	5,7	6	3	1,5	
14,3	1,70	2,10	3,00	8,54	10,55	15,07	6,2	9	3	3	0,5
16,7	1,70	2,20	3,00	8,54	11,05	15,07	6,7	14	5	5	1,5
19,1	1,49	2,13	2,96	7,49	10,70	14,87	7,1	18	15	13	3
21,5	1,49	2,16	3,38	7,49	10,85	16,98	7,5	24	21	14	11



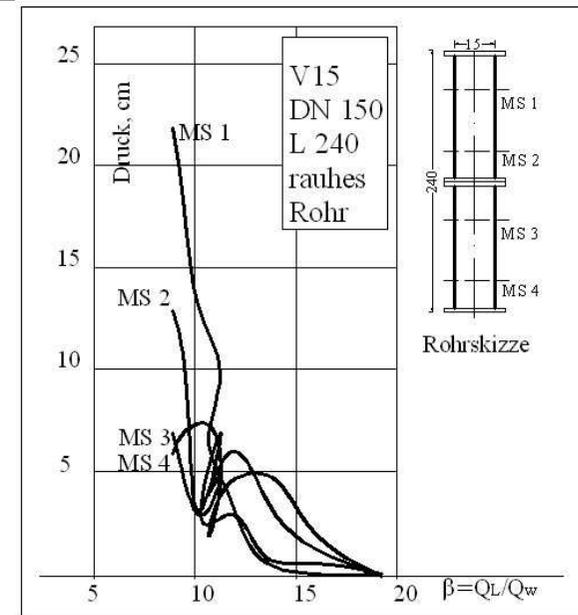
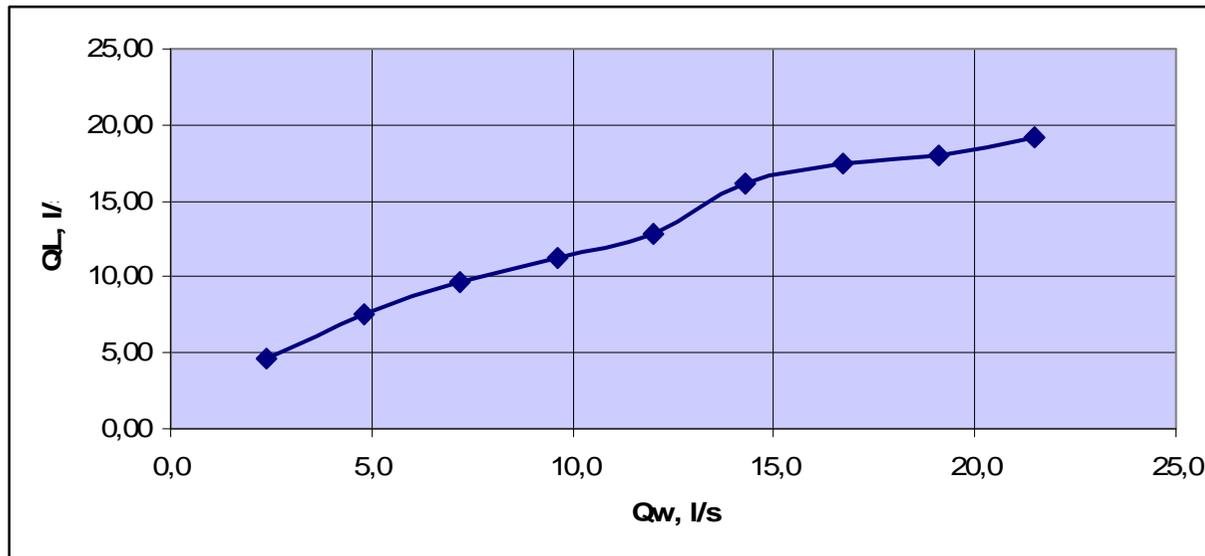
Tab. 5.10 Ergebnisse des Versuches 14, DN150, L 360cm, rauhes Rohr

Versuch 14, DN150, L 360cm, rauhes Rohr																		20.10.2008	
Wassermenge	Luftgeschwindigkeit, m/s			Luftmenge, l/s			Überfallhöhe	Druckmessung, cm											
								Meßstelle 1		MS 2		MS 3		MS 4		MS 5		MS 6	
l/s	Min Wert	Mittelwert	Max Wert	Min Wert	Mittelwert	Max Wert	cm	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
2,4	0,78	1,05	1,32	3,92	5,28	6,63	2,5	0,50		1,00		0,00		0,50		1,00		1,00	
4,8	1,28	1,72	2,16	6,43	8,64	10,85	3,6	0,50		0,50		0,70		0,10		3,50		4,50	
7,2	1,70	3,00	5,31	8,54	15,07	26,68	4,5	0,50		1,50		3,00		2,00		5,00		1,50	
9,6	3,25	4,01	6,15	16,33	20,15	30,90	5,0	2,50		0,50		2,00		3,50		3,00		2,50	
12,0	4,05	4,71	5,44	20,35	23,66	27,33	5,6	5,00		3,00		1,50		0,00		5,00		9,00	
14,3	4,51	5,29	6,07	22,66	26,58	30,50	6,0	7,20		7,50		5,00		2,50		3,00	2,50		
16,7	4,93	5,74	6,69	24,77	28,84	33,61	6,6	12,50		12,00		9,50	9,00	6,50		1,00	0,50		
19,1	5,48	6,29	7,24	27,53	31,60	36,37	7,0	15,50		14,50		14,00	12,00	9,50		4,00	3,00		
21,5	5,44	6,29	7,37	27,33	31,60	37,03	7,0	14,50		18,00	13,00	14,00	9,00	10,00	8,00	4,00	2,00		



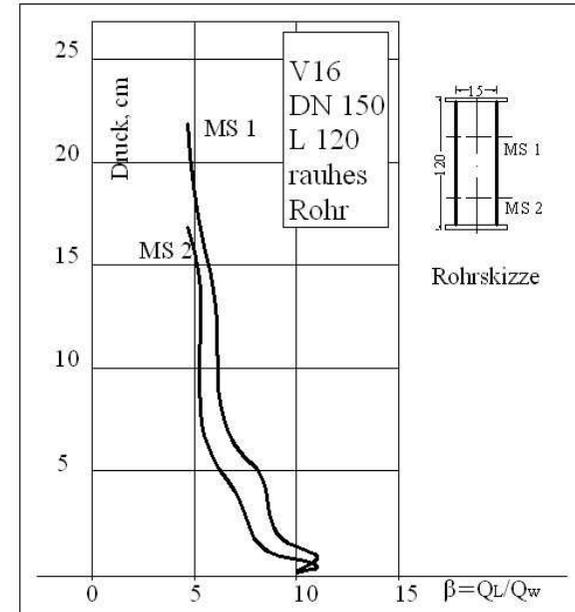
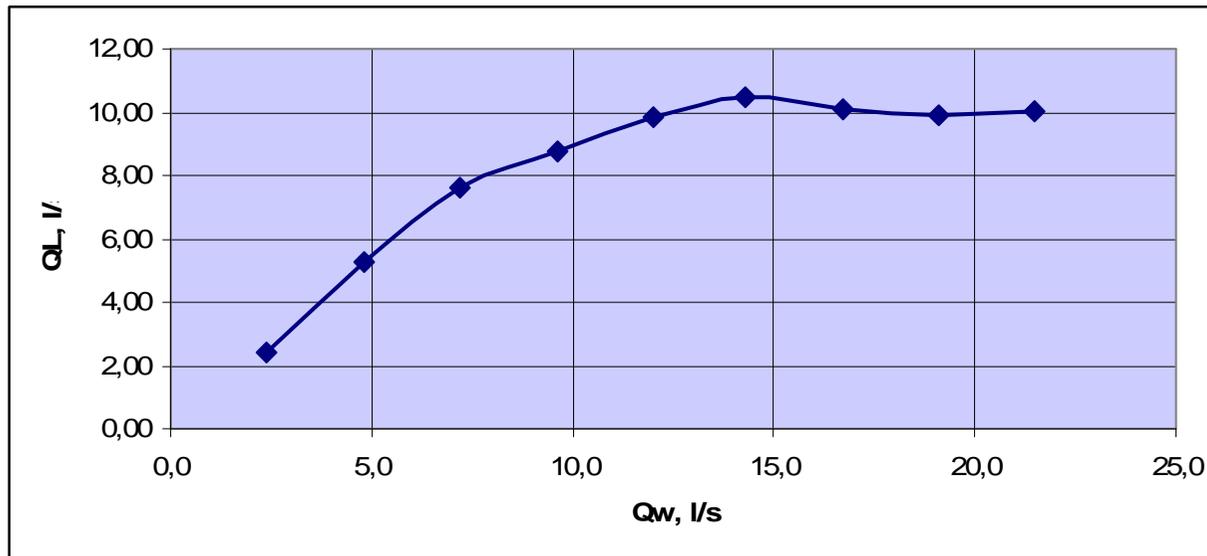
Tab. 5.11 Ergebnisse des Versuches 15, DN150, L 240cm, rahues Rohr

Versuch 15, DN150, L 240cm, rahues Rohr														20.10.2008	
Wasser- menge  l/s	Luftgeschwindigkeit, m/s			Luftmenge, l/s			Überfallhöhe  cm	Druckmessung, cm							
	Min Wert	Mittelwert	Max Wert	Min Wert	Mittelwert	Max Wert		Meßstelle 1		MS 2		MS 3		MS 4	
								Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
2,4	0,74	0,92	1,11	3,72	4,62	5,58	2,5	0,10		0,10		0,00		0,00	
4,8	1,11	1,49	2,00	5,58	7,49	10,05	3,5	0,10		0,60		1,50		2,50	
7,2	1,37	1,92	2,54	6,88	9,65	12,76	4,5	0,70		1,00		4,00		5,00	
9,6	1,74	2,23	3,13	8,74	11,20	15,73	5,0	4,00	3,00	3,00	0,50	6,00	1,50	4,50	1,00
12,0	2,04	2,55	4,01	10,25	12,81	20,15	5,5	6,50	5,50	2,50		4,00	1,50	2,00	0,50
14,3	2,37	3,20	4,56	11,91	16,08	22,91	6,0	10,00	9,00	7,00	4,00	5,00	1,50	6,00	3,00
16,7	2,67	3,47	4,76	13,41	17,43	23,91	6,5	12,50		3,50		3,00	1,50	7,50	4,00
19,1	2,79	3,57	4,47	14,02	17,94	22,46	7,0	18,50		11,00	10,00	5,00	2,00	7,00	4,50
21,5	3,04	3,81	4,93	15,27	19,14	24,77	7,1	22,00		13,00		7,00	1,00	6,00	0,50



Tab. 5.12 Ergebnisse des Versuches 16, DN150, L 120cm, rauhes Rohr

Versuch 16, DN150, L 120cm, rauhes Rohr									20.10.2008			
Wassermenge l/s	Luftgeschwindigkeit, m/s			Luftmenge, l/s			Überfallhöhe cm	Druckmessung, cm				
	Min Wert	Mittelwert	Max Wert	Min Wert	Mittelwert	Max Wert		Meßstelle 1		MS 2		
l/s	Min Wert	Mittelwert	Max Wert	Min Wert	Mittelwert	Max Wert	cm	Max	Min	Max	Min	
2,4	0,44	0,48	0,57	2,21	2,41	2,86	2,5	0,30		0,20		
4,8	0,70	1,05	1,41	3,52	5,28	7,08	3,5	1,00		0,50		
7,2	0,99	1,52	2,00	4,97	7,64	10,05	4,5	1,20		0,70		
9,6	1,32	1,74	2,12	6,63	8,74	10,65	5,0	2,00	1,50	1,00		
12,0	1,45	1,96	2,50	7,28	9,85	12,56	5,5	5,00	0,50	1,50	0,50	
14,3	1,74	2,08	1,67	8,74	10,45	8,39	6,0	6,00	8,00	3,50	1,50	
16,7	1,66	2,01	2,54	8,34	10,10	12,76	6,5	13,00		5,50		
19,1	1,66	1,97	2,37	8,34	9,90	11,91	7,0	17,50		15,00	11,00	
21,5	1,70	2,00	2,33	8,54	10,05	11,71	7,1	22,00		17,00	14,00	



Beim Rohr DN 150 wurde ein ähnliches Strömungsverhalten für den Lufteinzug beobachtet (Abb. 5.12):

- der Zusammenhang zwischen Wasser- und Luftmenge ist nichtlinear
- beim hydraulisch rauhen Rohr wird mehr Luft eingesaugt
- bei maximaler Länge des Rohres wird im Fall rauhes Rohr eine wesentlich größere Luftmenge im Vergleich zur Luftmenge im Fall glattes Rohr eingesaugt

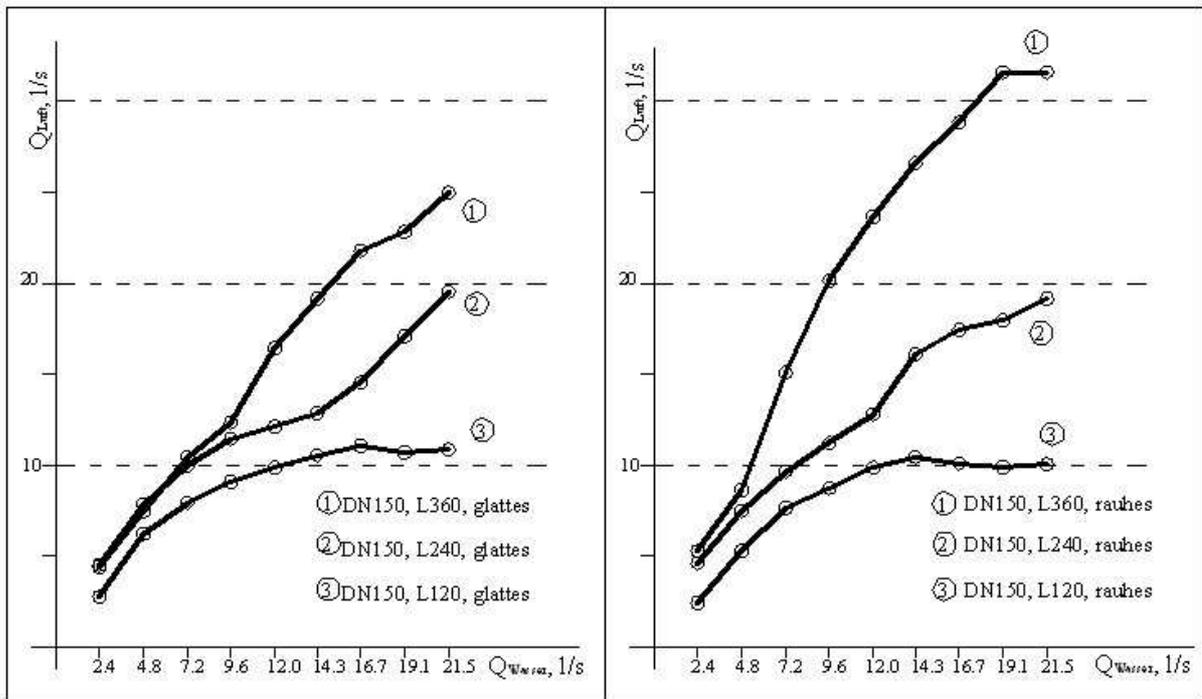
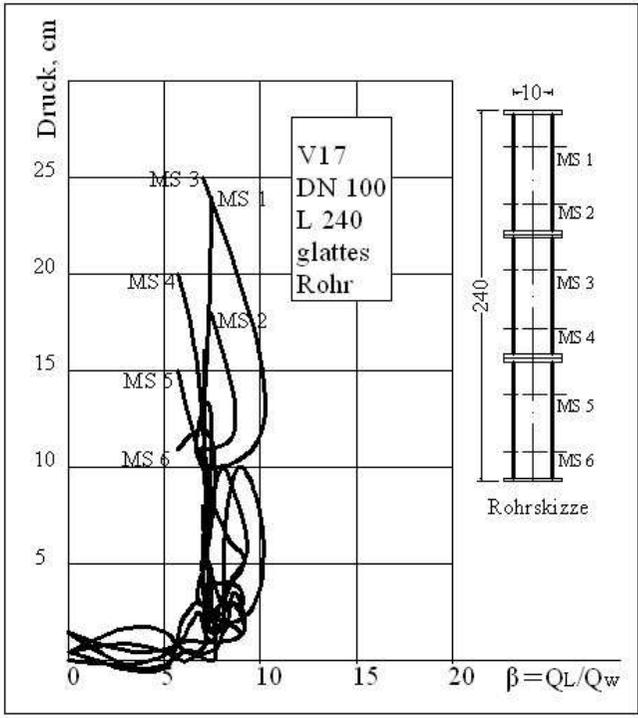
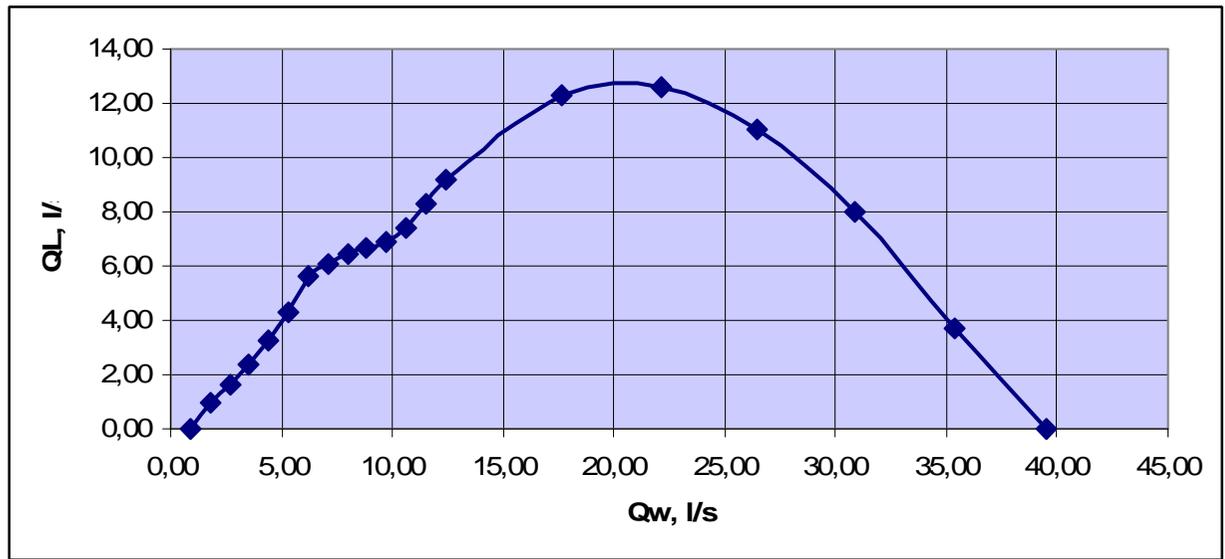


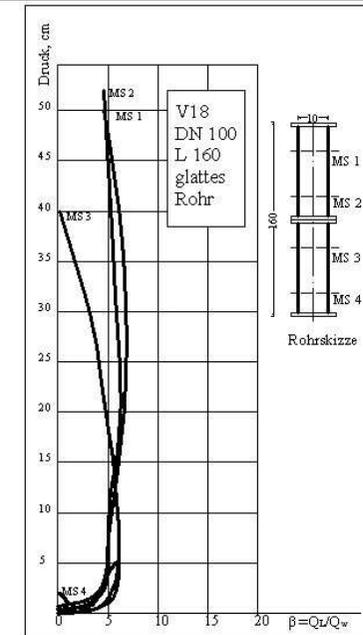
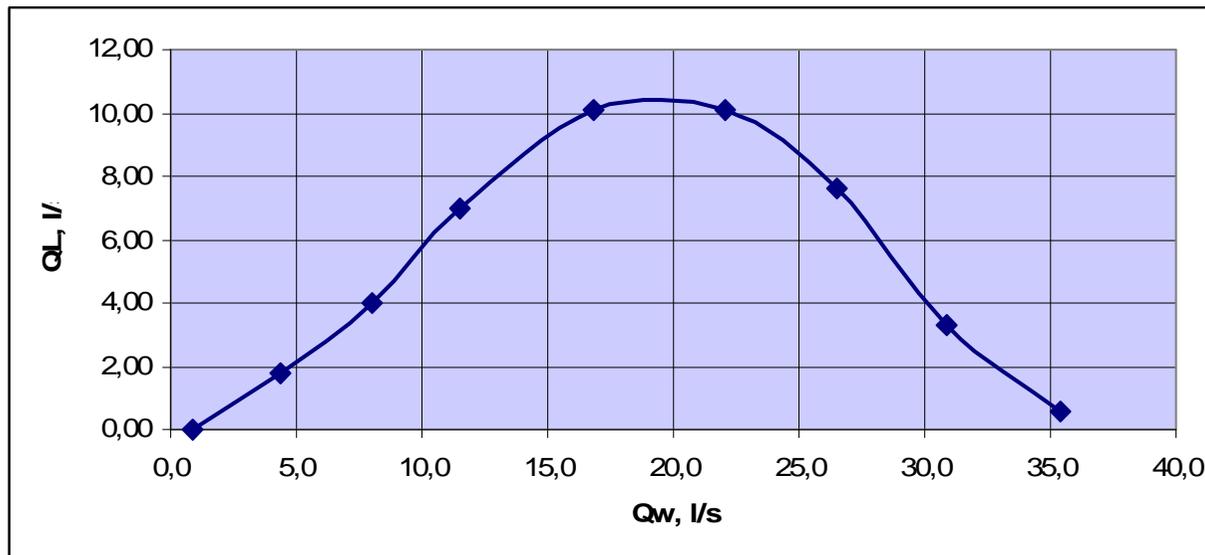
Abb. 5.12 Vergleich des Lufteintrages in Abhängigkeit der Rohrlänge und der Rohrauhigkeit für DN150





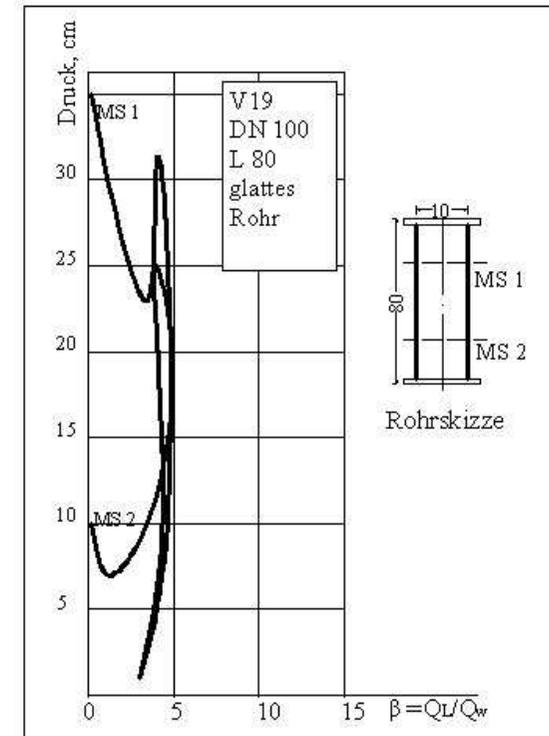
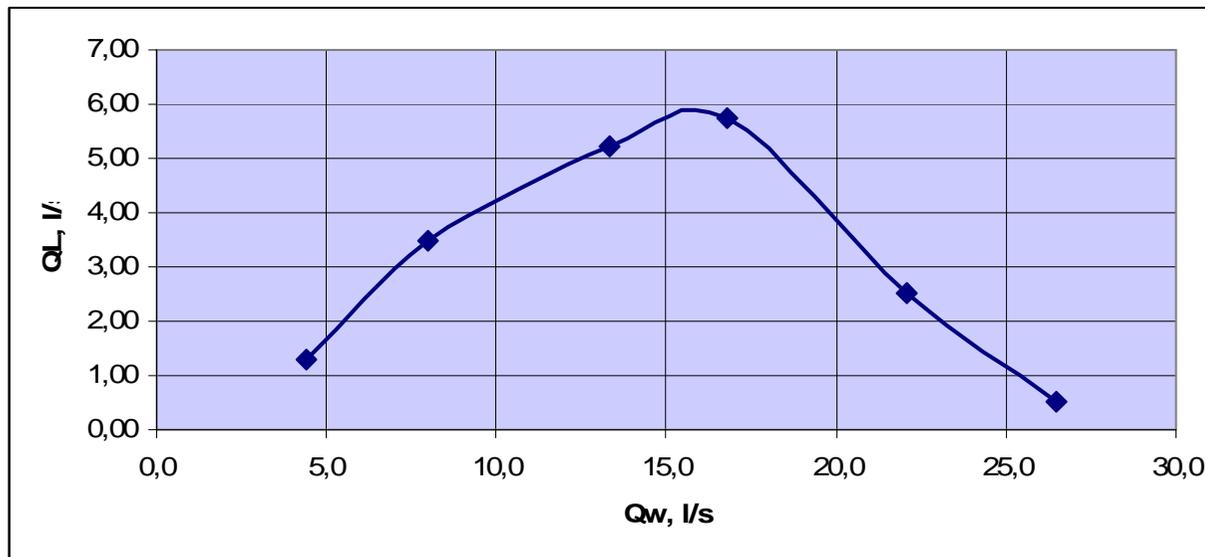
Tab. 5.14 Ergebnisse des Versuches 18, DN 100, L 160 cm, glattes Rohr

Versuch 18, DN 100, L 160 cm, glattes Rohr													23.10.2008		
Wassermenge l/s	Luftgeschwindigkeit, m/s			Luftmenge, l/s			Überfallhöhe cm	Druckmessung, cm							
	Min Wert	Mittelwert	Max Wert	Min Wert	Mittelwert	Max Wert		Meßstelle 1		MS 2		MS 3		MS 4	
l/s	Min Wert	Mittelwert	Max Wert	Min Wert	Mittelwert	Max Wert	cm	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
0,9	0,00	0,00	0,14	0,00	0,00	0,70	1,6	0,70		0,30		0,50		0,00	
4,4	0,22	0,35	0,53	1,11	1,76	2,66	3,7	2,00		1,50		0,50		0,50	
8,0	0,66	0,80	1,49	3,32	4,02	7,49	5,0	6,50		8,00		1,50		1,00	
11,5	0,90	1,39	2,33	4,52	6,98	11,71	6,0	15,00	10,00	17,00	12,00	5,00	2,00	3,50	0,50
16,8	1,66	2,01	2,33	8,34	10,10	11,71	7,0	41,00	35,00	28,00	23,00	10,00	1,50	5,00	
22,1	1,83	2,01	2,25	9,19	10,10	11,30	8,0	50,00		52,00	50,00	22,00	19,00	3,00	1,00
26,5	1,37	1,52	1,66	6,88	7,64	8,34	8,5					31,00		0,50	
30,9	0,57	0,66	0,74	2,86	3,32	3,72	9,0					37,00		1,00	
35,4	0,00	0,11	0,40	0,00	0,55	2,01	24,0					40,00		2,00	



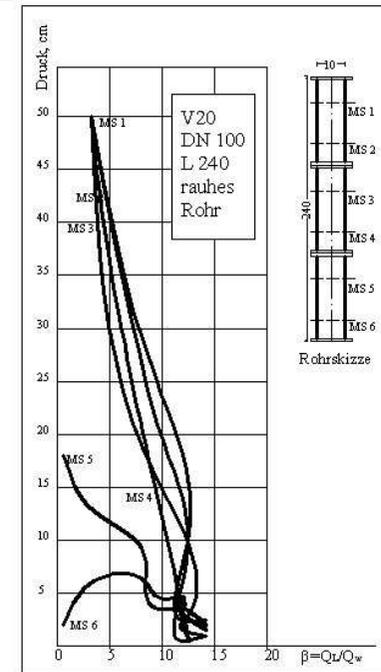
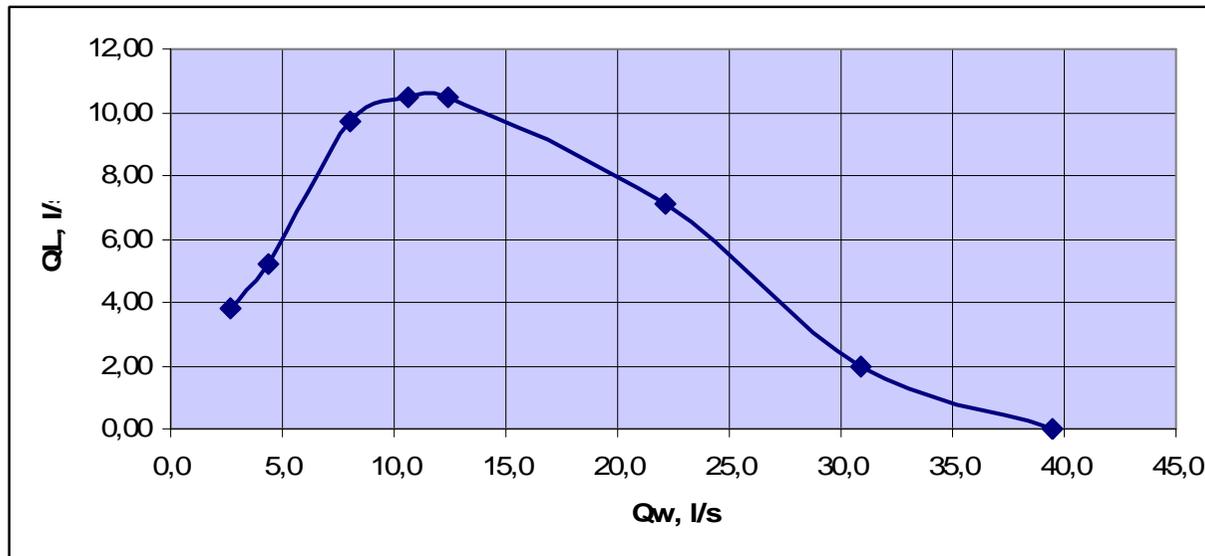
Tab. 5.15 Ergebnisse des Versuches 19, DN 100, L 80 cm, glattes Rohr

Versuch 19, DN 100, L 80 cm, glattes Rohr										24.10.2008	
Wassermenge l/s	Luftgeschwindigkeit, m/s			Luftmenge, l/s			Überfallhöhe cm	Druckmessung, cm			
	Min Wert	Mittelwert	Max Wert	Min Wert	Mittelwert	Max Wert		Meßstelle 1		MS 2	
								Max	Min	Max	Min
4,4	0,18	0,26	0,31	0,90	1,31	1,56	3,8	1,00		1,00	
8,0	0,44	0,69	1,07	2,21	3,47	5,38	5,3	7,00	4,00	10,00	5,00
13,3	0,74	1,04	1,41	3,72	5,22	7,08	6,5	30,00	10,00	25,00	14,00
16,8	0,99	1,14	1,24	4,97	5,73	6,23	7,0	23,00	15,00	10,00	6,00
22,1	0,44	0,50	0,57	2,21	2,51	2,86	8,0	30,00		7,00	
26,5	0,00	0,10	0,35	0,00	0,50	1,76	24,0	35,00		10,00	



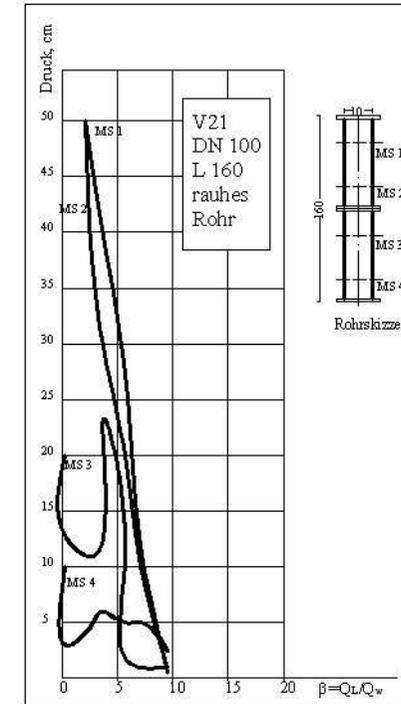
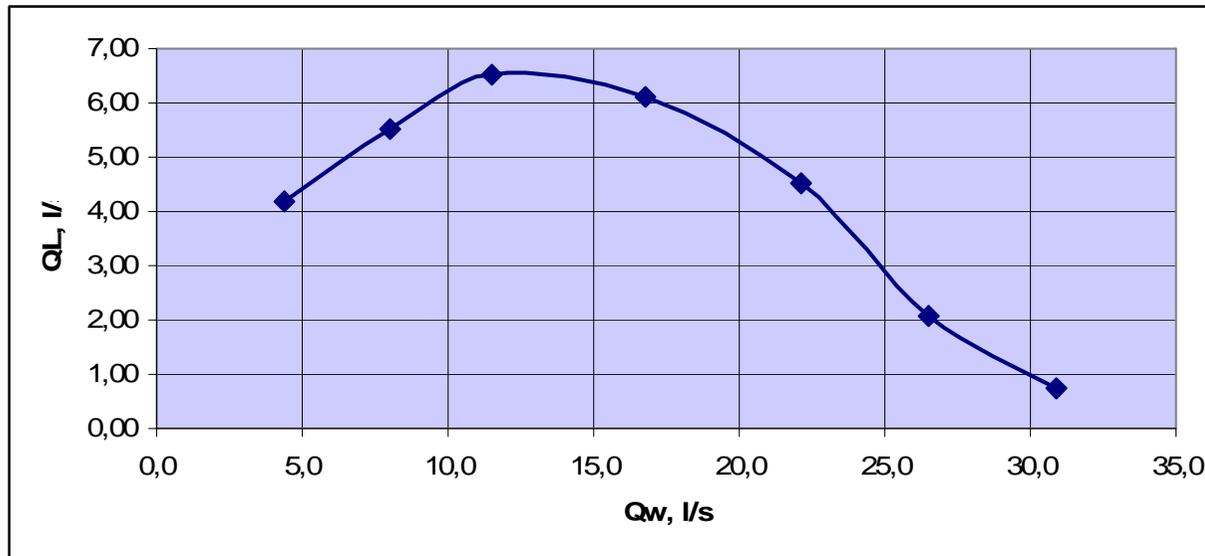
Tab. 5.16 Ergebnisse des Versuches 20, DN 100, L 240 cm, rauhes Rohr

V 20, DN 100, L 240 cm, rauhes Rohr																		27.10.2008	
Wasser- menge	Luftgeschwindigkeit, m/s			Luftmenge, l/s			Überfallhöhe	Druckmessung, cm											
	l/s	Min Wert	Mittelwert	Max Wert	Min Wert	Mittelwert		Max Wert	Meßstelle 1		MS 2		MS 3		MS 4		MS 5		MS 6
Max							Min		Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
2,7	0,61	0,76	0,95	3,06	3,82	4,77	3,0	2,50		1,00		1,00		2,00		1,50	1,00	2,00	1,50
4,4	0,95	1,03	1,16	4,77	5,17	5,83	3,8	2,50		0,50		2,00		3,50		4,00		3,50	
8,0	1,66	1,93	2,25	8,34	9,70	11,30	5,0	8,50		7,00		2,50		1,50		4,00		4,50	
10,6	1,41	2,08	2,50	7,08	10,45	12,56	5,8	24,00		20,00		15,00		12,50		3,50		4,50	
12,4	1,66	2,08	2,54	8,34	10,45	12,76	6,1	28,00	27,00	25,00	23,50	18,00	16,00	12,00	10,00	8,00	3,00	6,00	3,00
22,1	0,95	1,42	1,58	4,77	7,13	7,94	8,0	50,00		50,00		50,00		50,00		13,00	10,00	6,00	2,00
30,9	0,35	0,39	0,44	1,76	1,96	2,21	9,1									18,00	17,00	2,00	1,50
39,5	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,50	33,0												



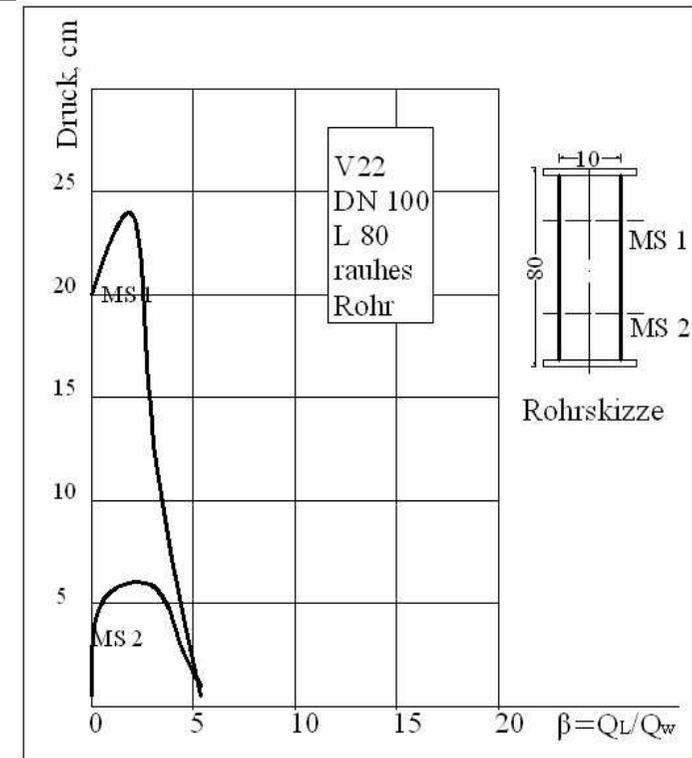
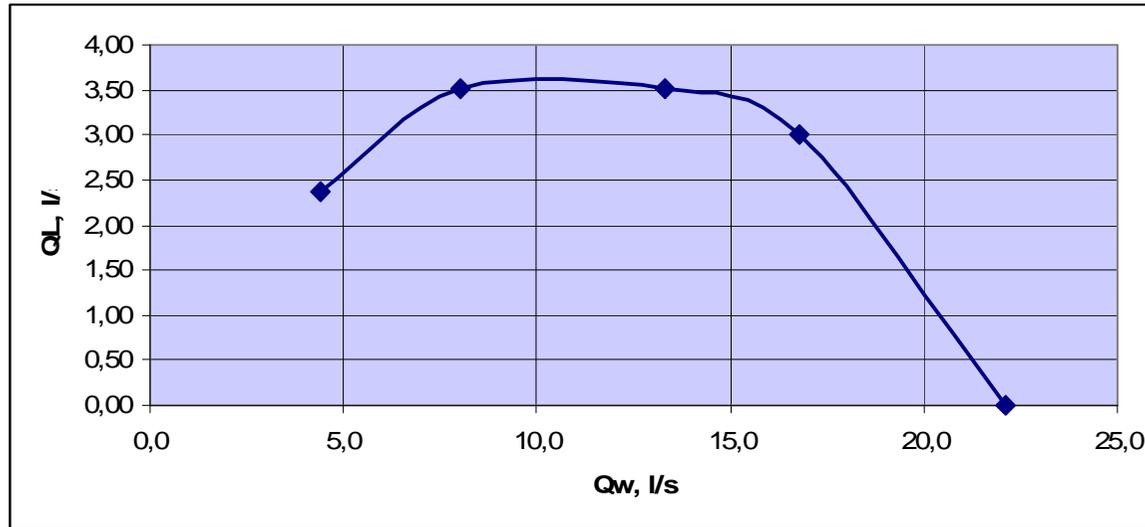
Tab. 5.17 Ergebnisse des Versuches 21, DN 100, L 160 cm, rauhes Rohr

Versuch 21, DN 100, L 160 cm, rauhes Rohr														28.10.2008	
Wassermenge l/s	Luftgeschwindigkeit, m/s			Luftmenge, l/s			Überfallhöhe cm	Druckmessung, cm							
	Min Wert	Mittelwert	Max Wert	Min Wert	Mittelwert	Max Wert		Meßstelle 1		MS 2		MS 3		MS 4	
								Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
4,4	0,74	0,83	0,90	3,72	4,17	4,52	3,8	0,50		1,00	0,50	1,00		2,50	
8,0	1,03	1,10	1,24	5,17	5,53	6,23	5,1	13,00		11,00		1,00		5,00	
11,5	1,07	1,30	1,58	5,38	6,53	7,94	6,0	27,00		20,00		12,00	9,00	5,00	0,50
16,8	1,07	1,22	1,45	5,38	6,13	7,28	7,1	40,00		30,00		23,00		6,00	2,00
22,1	0,82	0,90	0,99	4,12	4,52	4,97	8,0	50,00		50,00		11,00		4,00	
26,5	0,35	0,41	0,48	1,76	2,06	2,41	8,8					12,00		3,00	
30,9	0,00	0,15	0,34	0,00	0,75	1,71	29,0					20,00		10,00	



Tab. 5.18 Ergebnisse des Versuches 22, DN 100, L 80 cm, rauhes Rohr

Versuch 22, DN 100, L 80 cm, rauhes Rohr								28.10.2008			
Wasser- menge  l/s	Luftgeschwindigkeit, m/s			Luftmenge, l/s			Überfallhöhe  cm	Druckmessung, cm			
	Min Wert	Mittelwert	Max Wert	Min Wert	Mittelwert	Max Wert		Meßstelle 1		MS 2	
								Max	Min	Max	Min
4,4	0,40	0,47	0,53	2,01	2,36	2,66	3,8	0,50		1,00	
8,0	0,61	0,70	0,82	3,06	3,52	4,12	5,0	5,00		3,00	
13,3	0,61	0,70	0,82	3,06	3,52	4,12	6,5	18,00	13,00	6,00	0,50
16,8	0,48	0,60	0,70	2,41	3,01	3,52	7,1	24,00		6,00	1,00
22,1	0,00	0,00	0,14	0,00	0,00	0,70	14,0	20,00		0,50	



Beim Rohr DN 100 konnte wie erwähnt der Überdeckungsabfluss erreicht werden (Abb. 5.13). Bei diesem Überdeckungsabfluss (bei Überdeckungsüberfallhöhe) wird keine Luft mehr eingesaugt, es entsteht damit Druckabfluss.

Folgende Erkenntnisse für den Lufteinzug können aus den Versuchsergebnissen für das Rohr DN 100 abgeleitet werden:

- mit größerer Länge des Fallrohres steigt der Lufteinzug
- die maximal eingesaugte Luftmenge tritt beim kürzeren Rohr früher auf
- die Überdeckungshöhe wird beim längeren Rohr später als beim Kürzeren erreicht
- der Lufteintrag ist beim hydraulisch glatten Rohr höher als beim Rauhen
- beim rauhen Rohr wird der Maximalwert der eingesaugten Luft wesentlich früher erreicht, als beim glatten Rohr

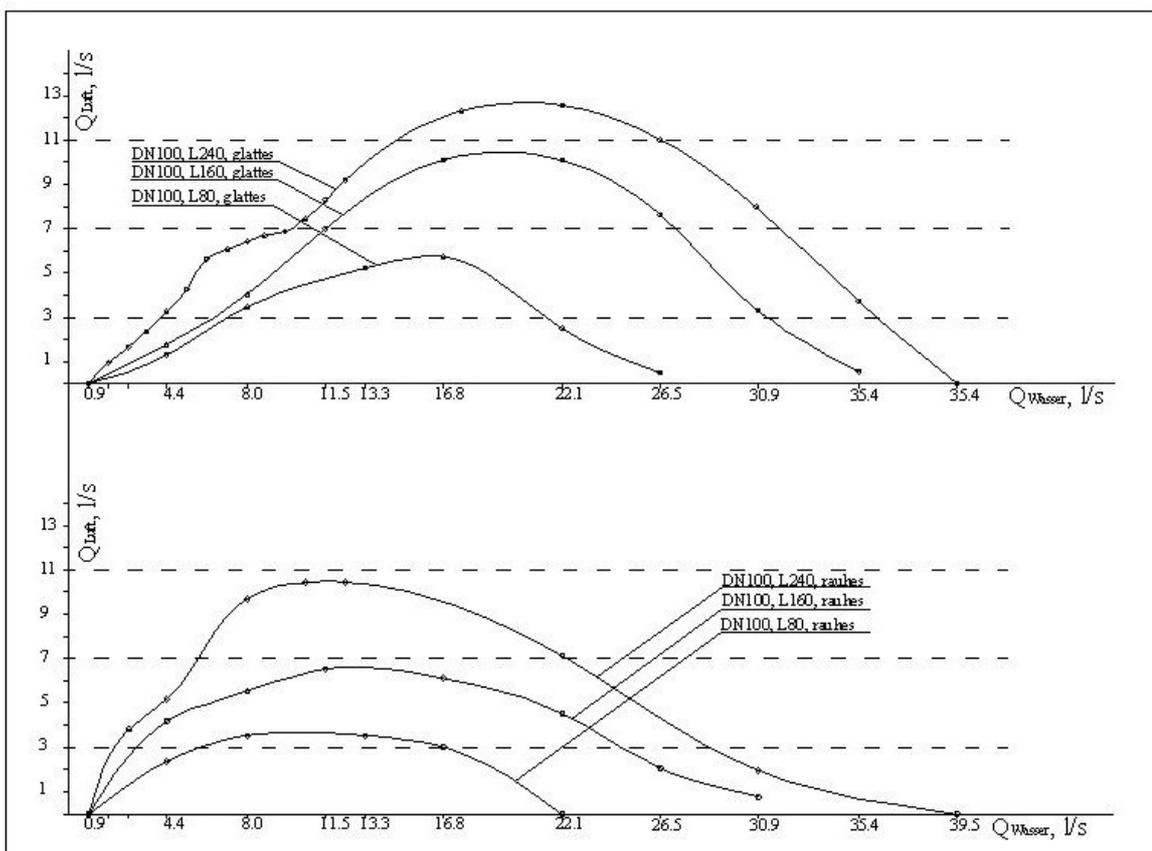


Abb. 5.13 Vergleich des Lufteintrages in Abhängigkeit der Rohrlänge und der Rohrauhigkeit für DN 100

Nachfolgend erfolgt in Abb. 5.14 eine Gegenüberstellung der Ergebnisse von V1 und V2 mit den Ergebnissen von Hack [17] und Viparelli [17]. Die Ergebnisse sind die einzigen, die in der Literatur gefunden werden konnten, die aufgrund der ähnlichen Modellparameter einen Vergleich mit den hier durchgeführten Untersuchungen zulassen.

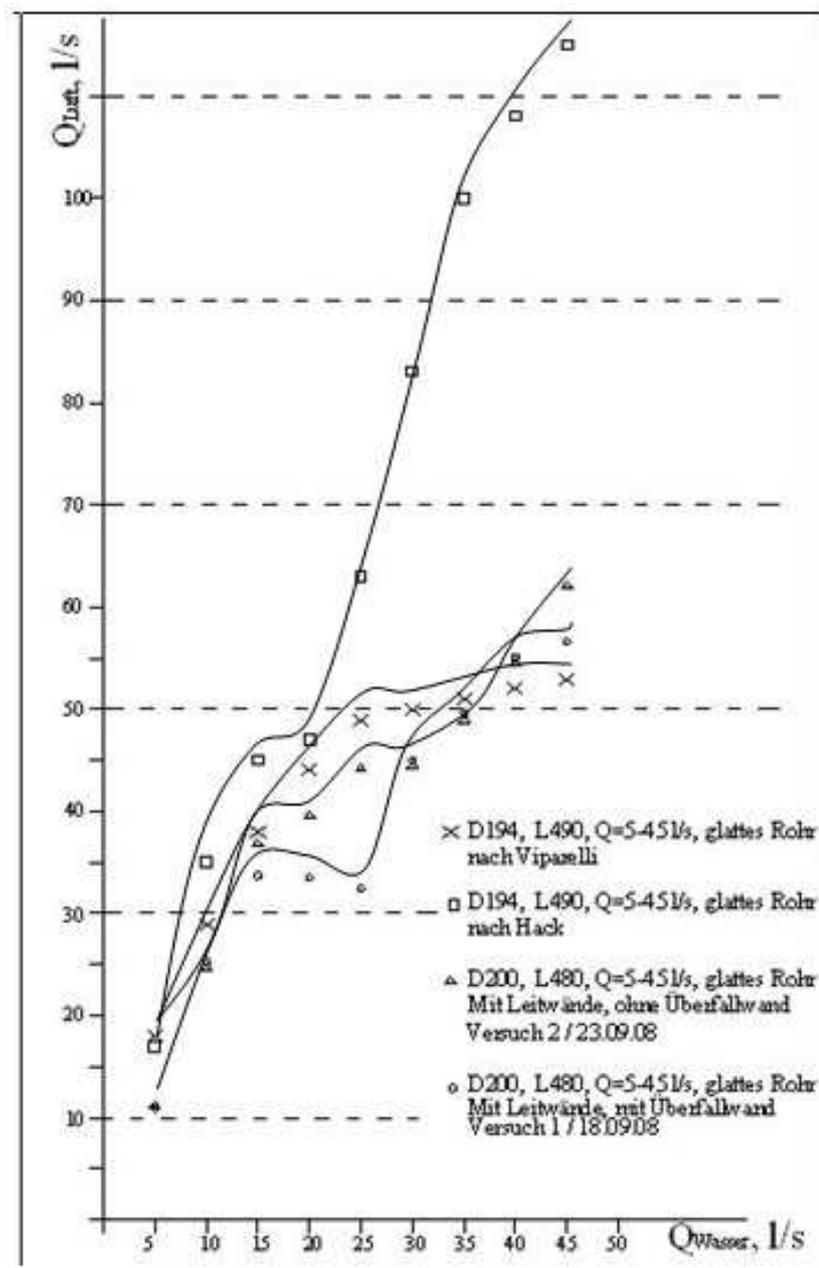


Abb. 5.14 Vergleich – Viparelli / Hack / Versuche V1 und V2

Der Vergleich der Versuchsergebnisse zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Viparelli. Jedoch bei höheren Abflüssen weisen die Versuche von Hack einen nicht erklärbaren wesentlich höheren Lufteinzug auf.

Die Daten für die Abb.5.15 wurden aus Abb. 5.16 übernommen, man sieht bereits hier große Abweichungen zwischen den Versuchen der einzelnen Autoren.

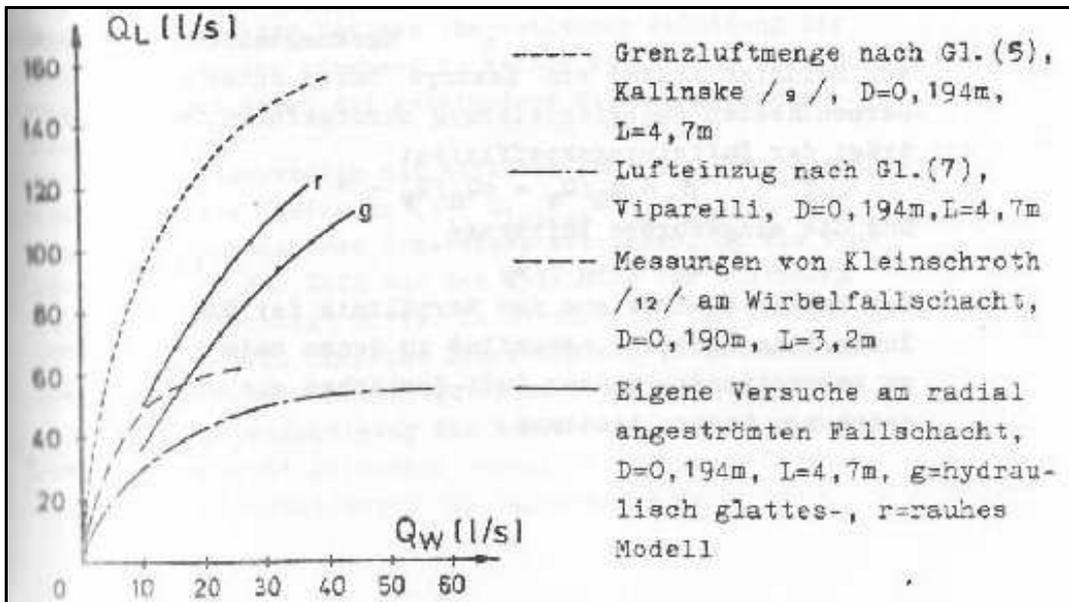


Abb. 5.15. Lufteintrag nach Versuchen von verschiedenen Autoren [17]

Für das Rohr DN150 zeigt der Vergleich im Untersuchungsbereich (Tab. 5.7) eine ebenfalls gute Übereinstimmung mit denen von Hack [17] erzielten Versuchsergebnisse.

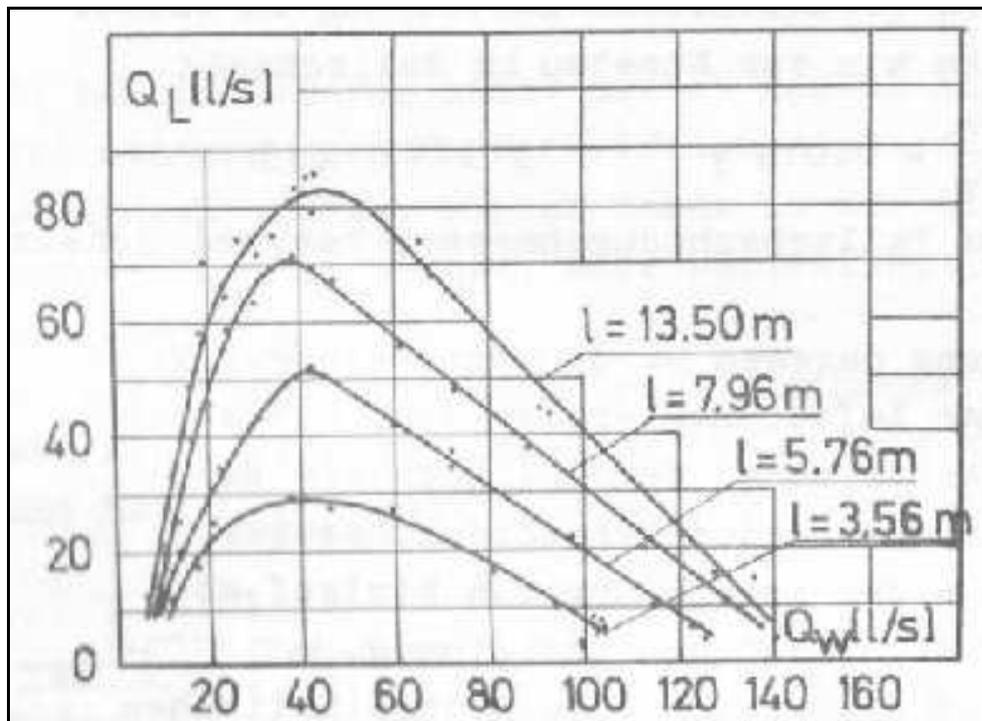


Abb. 5.16. Lufteinzug mit Überdeckungsabfluss nach Hack mit DN 150 [17]

Die Auswertung der Druckmessungen erlaubt die folgenden generellen Aussagen:

- obwohl die Druckmessdaten teilweise nicht plausibel sind, kann die allgemeine Aussage, dass der Druck von oben nach unten abnimmt, gemacht werden
- der Druckverlauf ist nichtlinear
- bei kleineren Wassermengen (ca. bis 15 l/s) existiert kein Unterschied zwischen den maximalen und minimalen Werten der Druckhöhe
- mit steigendem Wasserabfluss gibt es starke Druckschwankungen
- die Druckhöhe steigt mit zunehmendem Durchfluss

Wie die Drucklinie verlaufen soll, ist in Abb. 5.17 ersichtlich.

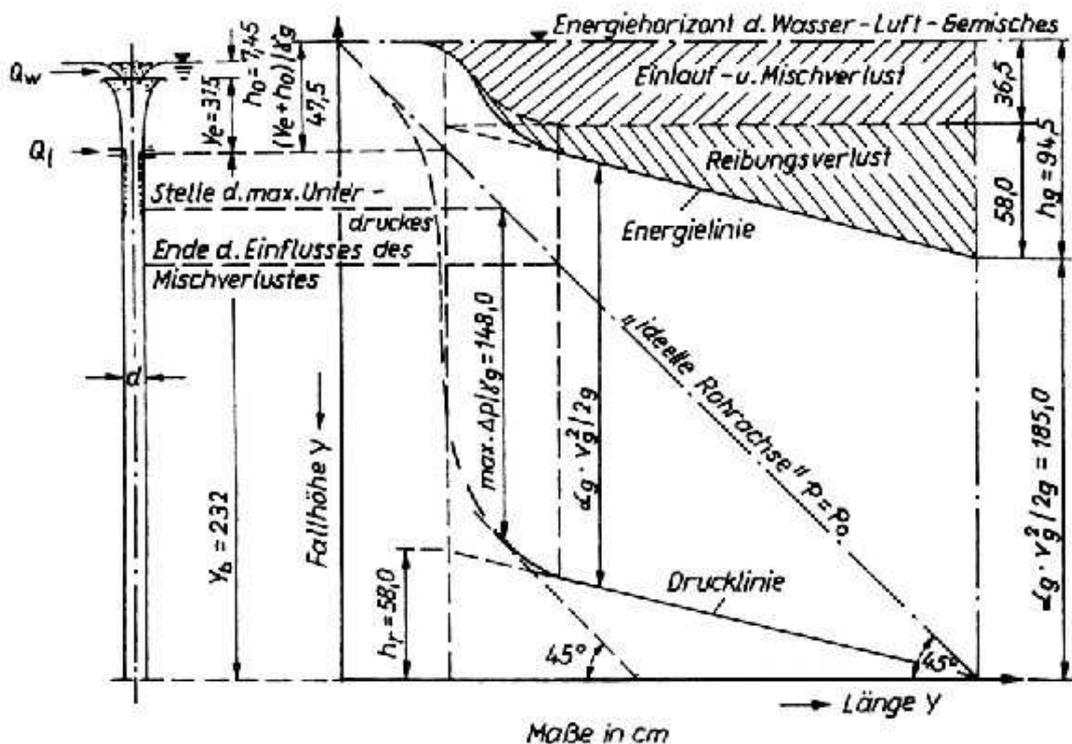


Abb.5.17 Drucklinienverlauf [24]

Wie erwähnt stand die Untersuchung der Druckverhältnisse nicht im Fokus dieser Arbeit, sie sollten jedoch bei weiteren Forschungen mittels elektronischer Druckaufnehmer genauer registriert werden, um eine bessere Beurteilung der instationären Strömungszustände im Fallrohr machen zu können. Jedenfalls ist beim Überschreiten der Überdeckungsabflusses bei Fallhöhen über max. 10 m (Luftdruck) mit dem Auftreten von Kavitation zu rechnen.

---

## 5.4 STRÖMUNGSPHÄNOMENE

Im folgenden werden kurz die während der Versuchsdurchführungen auftretenden Besonderheiten im Abflussgeschehen beschrieben.

- bei kleineren Abflüssen (bei DN 200 von 5 bis 15 l/s) waren Strömungspulsationen aufgrund der symmetrischen Überfallstrahlkontraktion zu beobachten (Abb. 5.18 und Abb.5.19), wo in bestimmten Zeitabständen eingesaugte Luft durch den strömungmäßigen Abschluss des Rohrquerschnittes (Zusammenfließen des Überfallstrahles) im Fallrohr komprimiert wurde und sich dann wieder zyklisch nach oben entlastete („Atmen“ des Fallrohrabflusses). Dieses Verhalten trat verstärkt beim Überfall ohne Leitbleche auf, konnte jedoch auch beim Überfall mit Leitapparat abgeschwächt beobachtet werden.

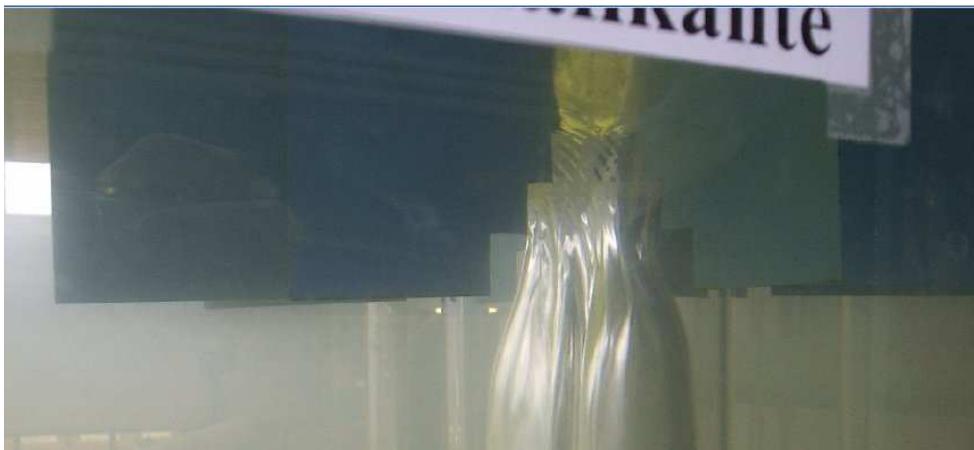


Abb. 5.18 Strahlverengung bei DN100 (Abfluss 2,4 l/s)

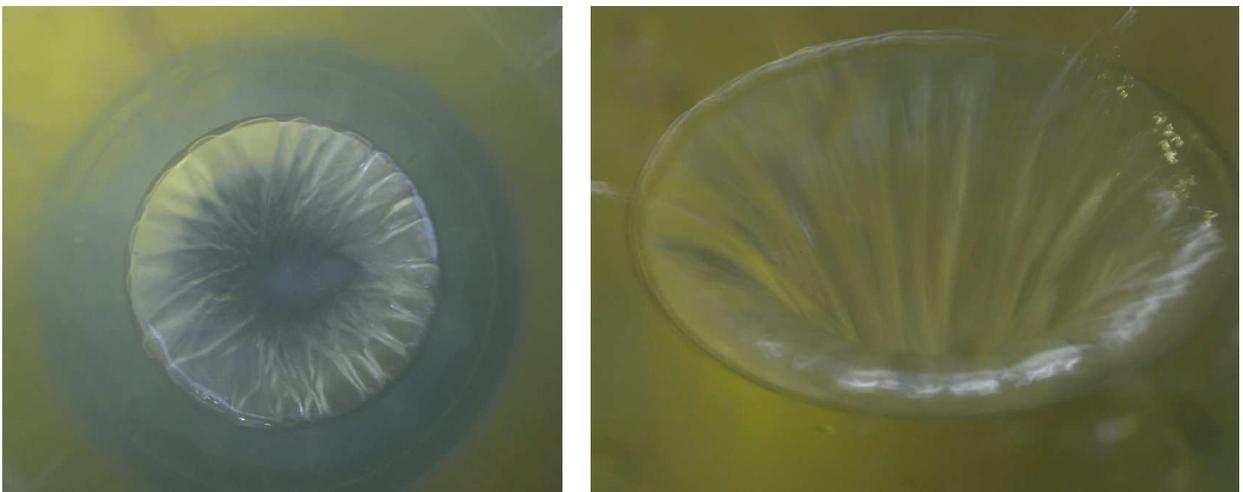


Abb. 5.19 Strahlverengung bei DN200 (Abfluss 10 l/s)

- 
- bei höheren Abflüssen von 30 bis 45 l/s kam es zum Einzug einer Luftschnur besonders beim Rohr DN200 (Abb. 5.20). In unregelmäßigen Zeiträumen wurde die Luftschnur auch beim Rohr mit DN 150 mm beobachtet. Die Entstehung der Luftschnur war im Fall mit Leitwände aber auch ohne zu beobachten
  - die Luftschnur bildete sich in der Rohrmitte und reichte bis zur Überfallkante bzw. verlängerte sich bis zur Oberbeckenwandung. Sie ist offensichtlich ein Indiz für eine Drallbildung im Überfallbereich trotz Einbau des Leitapparates



Abb. 5.20 Auftreten einer Luftschnur im Überfallbereich

## 6 VERGLEICH DER VERSUCHSERGEBNISSE

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der bisher durchgeführten Modellversuche zusammengefaßt und nach verschiedenen Kriterien verglichen. In Abb.6.1 (glattes Rohr) und Abb.6.2 (rauhes Rohr) wird vorerst ein Vergleich bezüglich Rohrdurchmesser und Rohrlänge dargestellt. Die entsprechende Wassermengen wurden nach Froude auf das Modellrohr 1 (DN 200) bezogen.

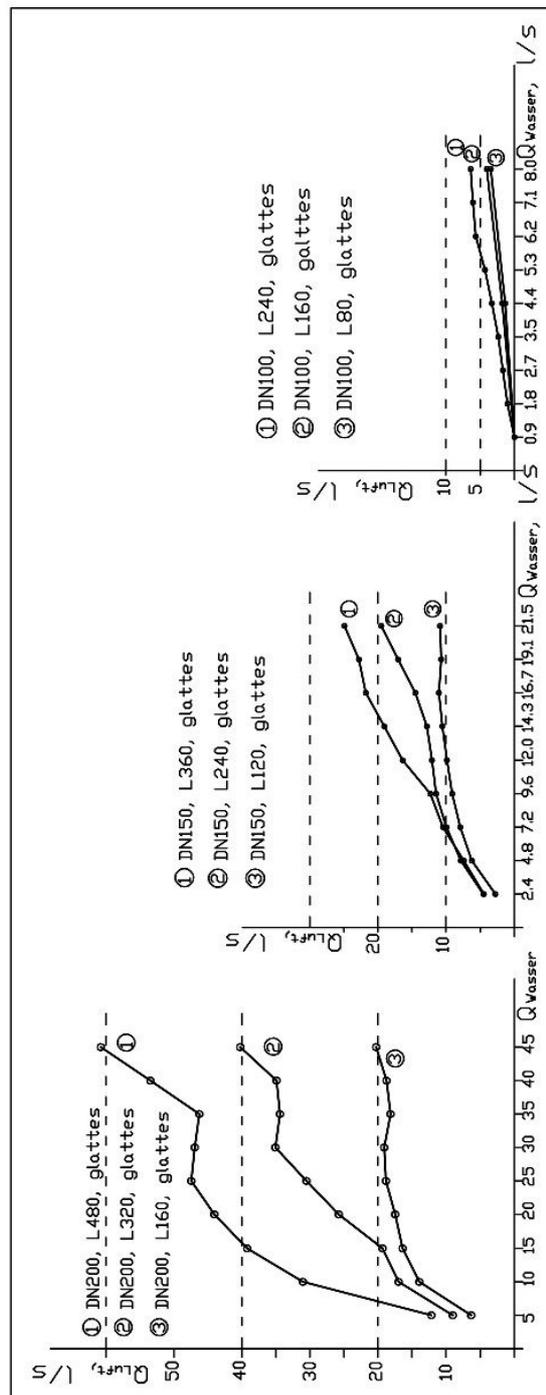


Abb. 6.1 Lufteinzug in Abhängigkeit vom Durchmesser und Länge für glattes Rohr

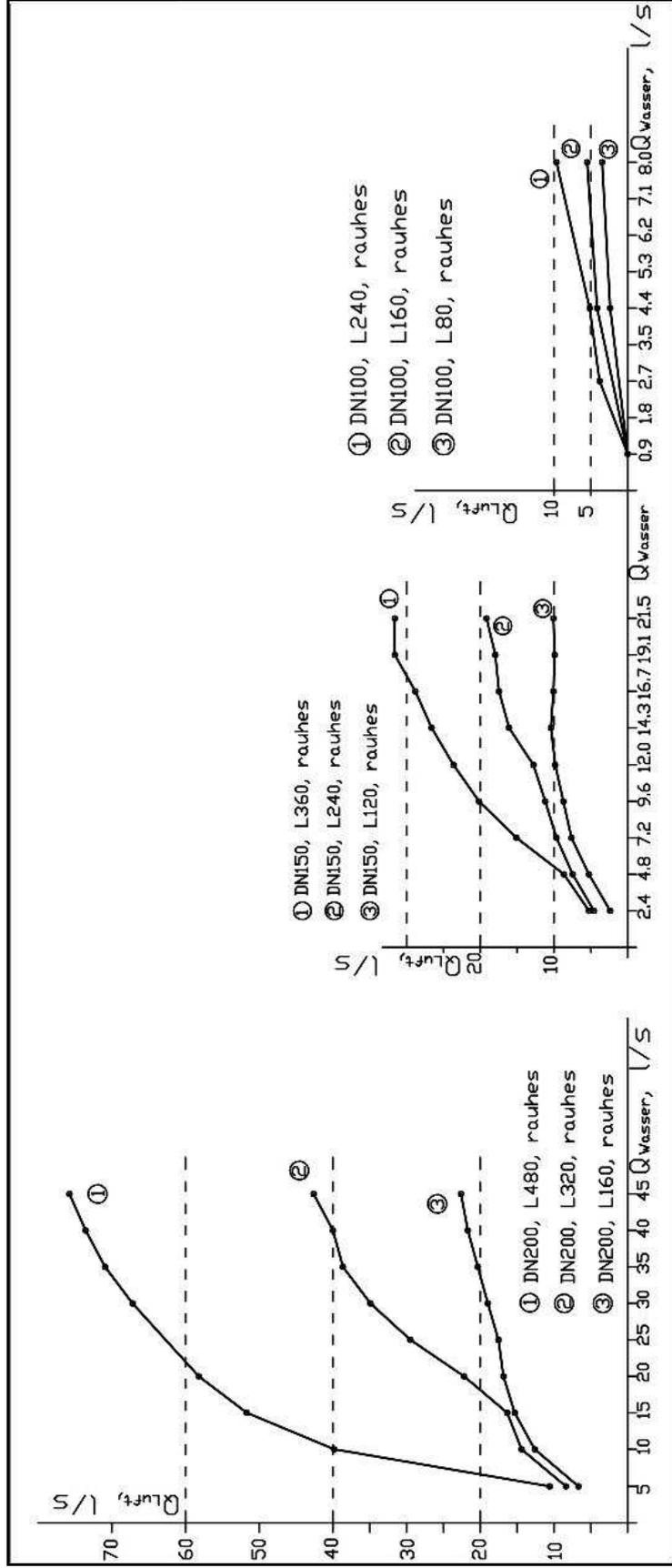


Abb. 6.2 Lufteinzug in Abhängigkeit vom Durchmesser und Länge für rauches Rohr

Damit die Ergebnisse besser vergleichbar sind, erfolgt die weitere Auswertung mittels

des Koeffizienten  $\beta = \frac{Q_{Luft}}{Q_{wasser}}$ . Der Zusammenhang zwischen der Länge des Rohres,

des Koeffizienten  $\beta$  und des Abflusses ist in Abb.6.3, Abb. 6.4 und Abb. 6.5 für das glatte bzw. raue Rohr DN 200, DN 150 und DN100 dargestellt.

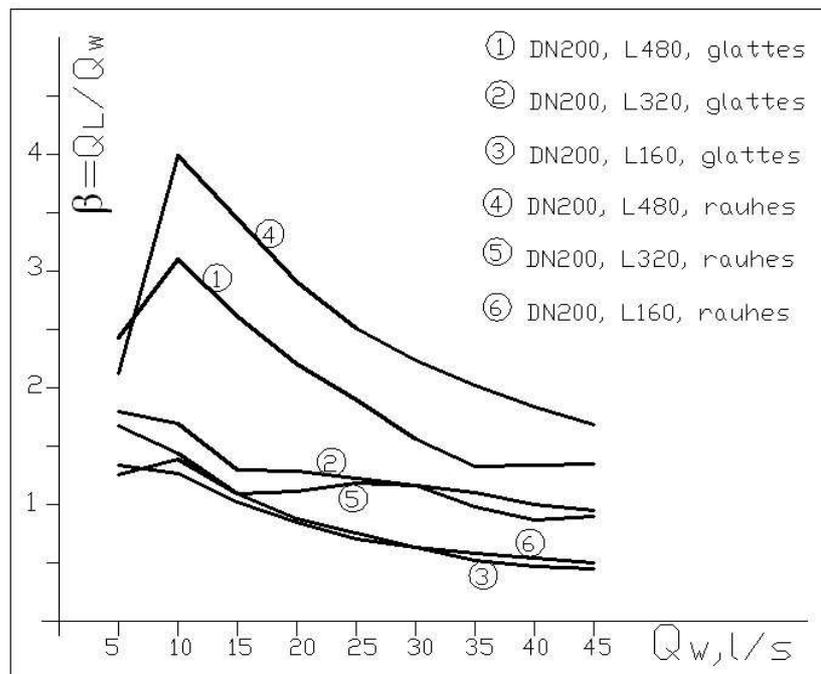


Abb. 6.3 Abhängigkeit des Lufteintragverhältnisses von der Rohrlänge für das glatte und raue Rohr DN200

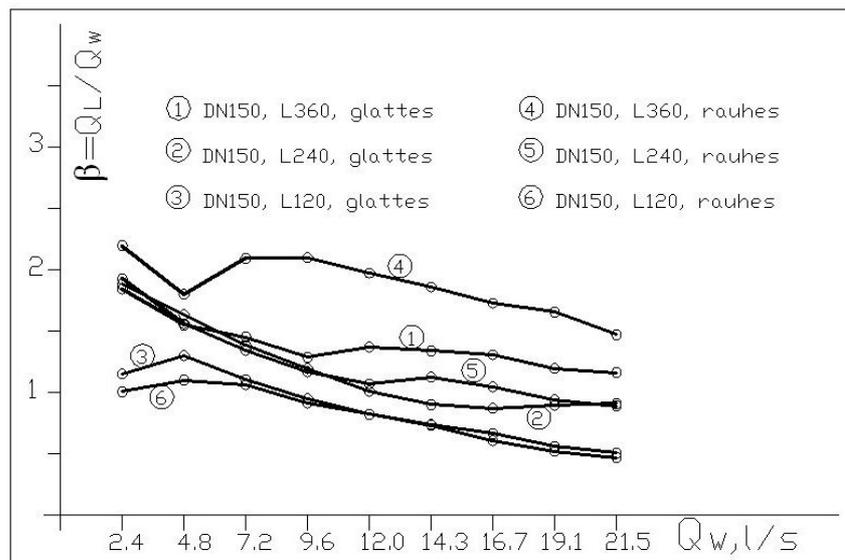


Abb. 6.4 Abhängigkeit des Lufteintragverhältnisses von der Rohrlänge für das glatte und raue Rohr DN150

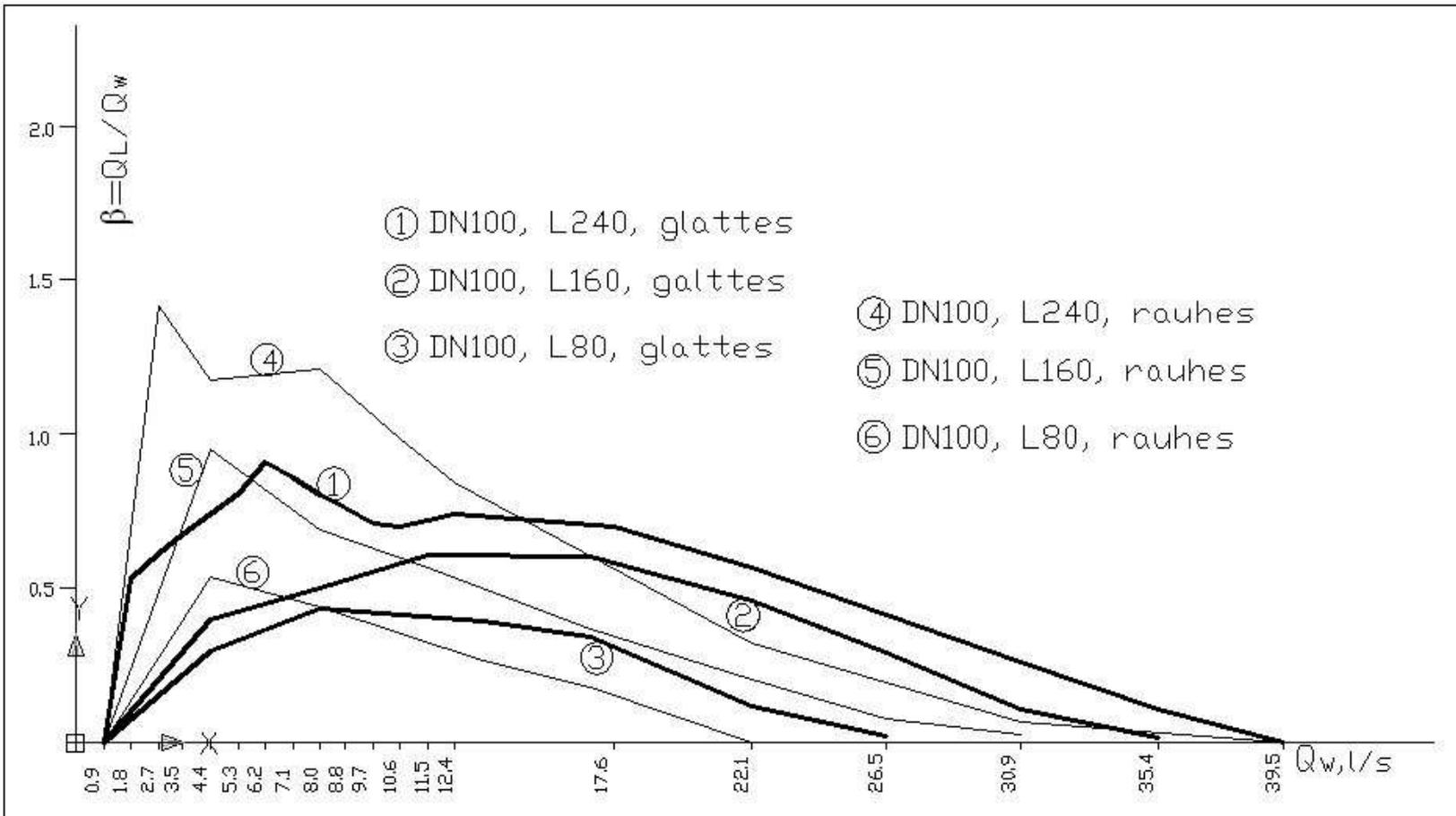


Abb. 6.5 Abhängigkeit des Luftenstragverhältnisses von der Rohrlänge für das glatte und rauhe Rohr DN100

In den Abb. 6.6 und Abb. 6.7 wird die Abhängigkeit des Lufteintragsverhältnisses  $\beta$  von den verschiedenen Rohrdurchmessern, Rohrlängen und Rauigkeiten beim Abfluss 25 l/s bzw. 45 l/s (jeweils bezogen auf das Rohr DN200) gezeigt.

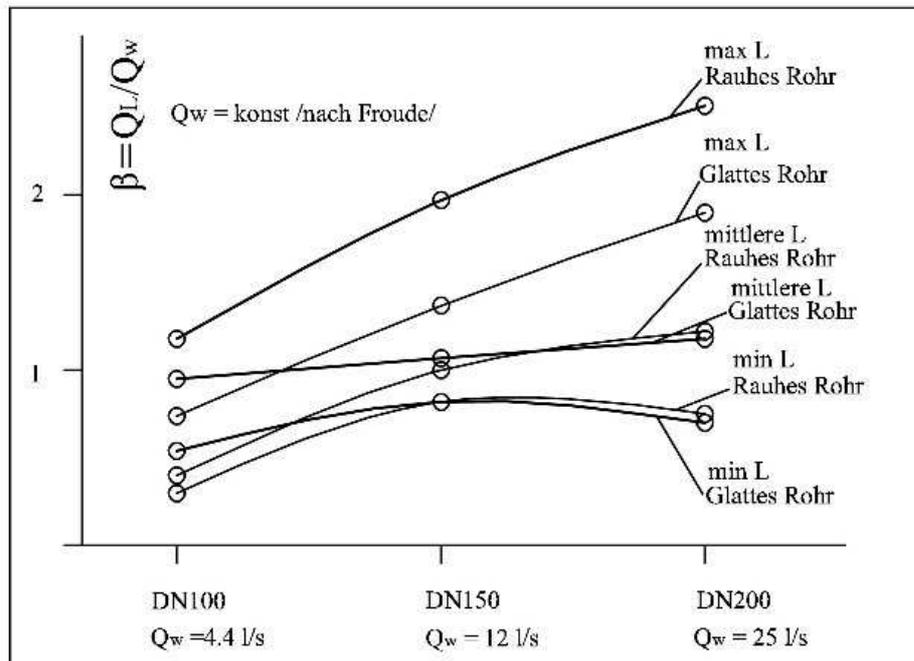


Abb. 6.6 Abhängigkeit des Lufteintragsverhältnisses vom Durchmesser und Rohrlänge (Abfluss 25 l/s bei DN200)

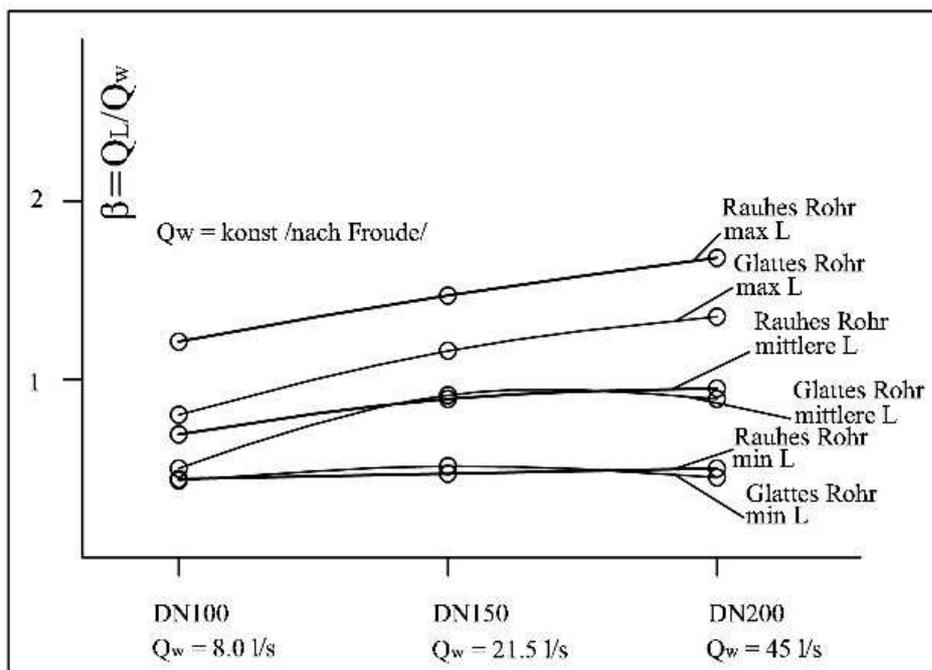


Abb. 6.7 Abhängigkeit des Lufteintragsverhältnisses vom Durchmesser, Rohrlänge und Rauigkeit (Abfluss 45 l/s bei DN200)

Abb. 6.8 und Abb. 6.9 zeigen die Abhängigkeit des Lufteintragsverhältnisses  $\beta$  von den verschiedenen Rohrdurchmessern und Abflüssen bei der maximalen bzw. minimalen Rohrlänge (480 cm und 160 cm, jeweils auf das Rohr DN200 bezogen) für das glatte bzw. für das raue Rohr.

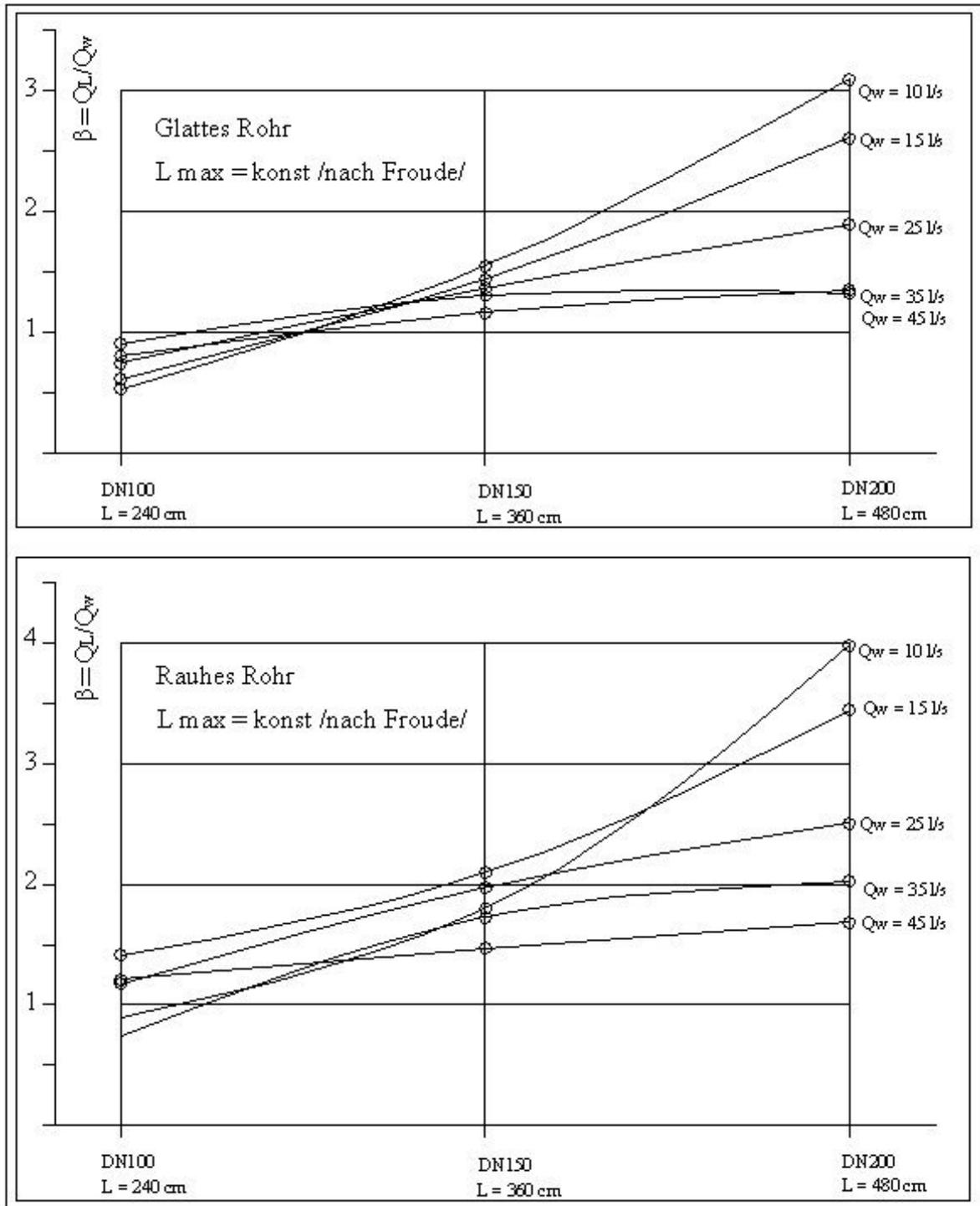


Abb. 6.8 Abhängigkeit des  $\beta$  Koeffizienten vom Rohrdurchmesser und Abfluss bei den max. Rohrlängen, glattes und rauhes Rohr

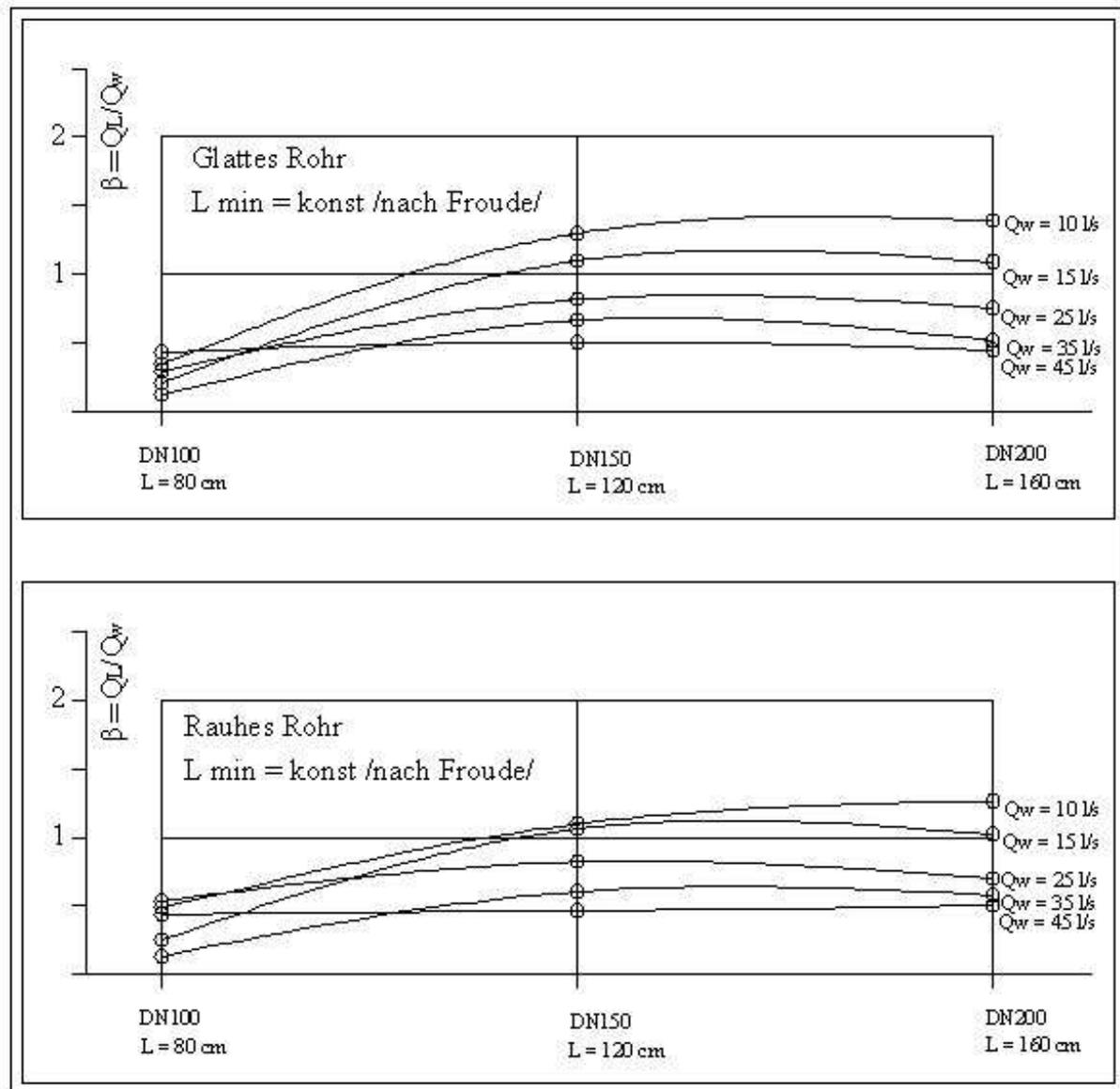


Abb. 6.9 Abhängigkeit des  $\beta$  Koeffizienten vom Rohrdurchmesser und Abfluss bei den min. Rohrlängen, glattes und rauhes Rohr

Die Gegenüberstellungen in den Abb. 6.1 bis 6.9 zeigen auch anhand der unterschiedlichen Auswahl von Darstellungsparameter klar, dass mit zunehmenden Rohrdurchmesser, Rohrlänge und Rohrrauigkeit der Luftanzug steigt. Der Anstieg des Luftanzuges in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers und der Rohrlänge ist für die Extrapolation auf ein größeres Modell (Prototype) aufgrund des hier beschränkten Versuchsumfanges (3 Rohrdurchmesser) nur sehr ungenau möglich. Dennoch sollte diese Untersuchung zumindest einen Hinweis auf die Größenordnung des möglichen Luftanzuges bei größeren Modellabmessungen bieten.

Bezüglich der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Natur wurde am Institut für Wasserbau und THM an der Technische Universität Dresden eine Untersuchung des

Luftinzugs für die Ohra Talsperre (DE) durchgeführt. Der Luftbedarf konnte dabei nur für eine geringe Abflussmenge in der Natur gemessen werden. Der Luftbedarf im Modell entsprach natürlich nicht den realen Naturwerten, da er wesentlich gering war.

Der naturgemessene Wert betrug  $\beta = \frac{Q_L}{Q_w} = 40$  (Abb. 6.10) bei einem kleinen Abfluss von ca.  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ . Der entsprechende Belüftungsgrad im Modell lag ca. bei 8 auf die Natur umgerechnet, dies bedeutet einen Maßstabseffekt mit einem Faktor von ca. 5.

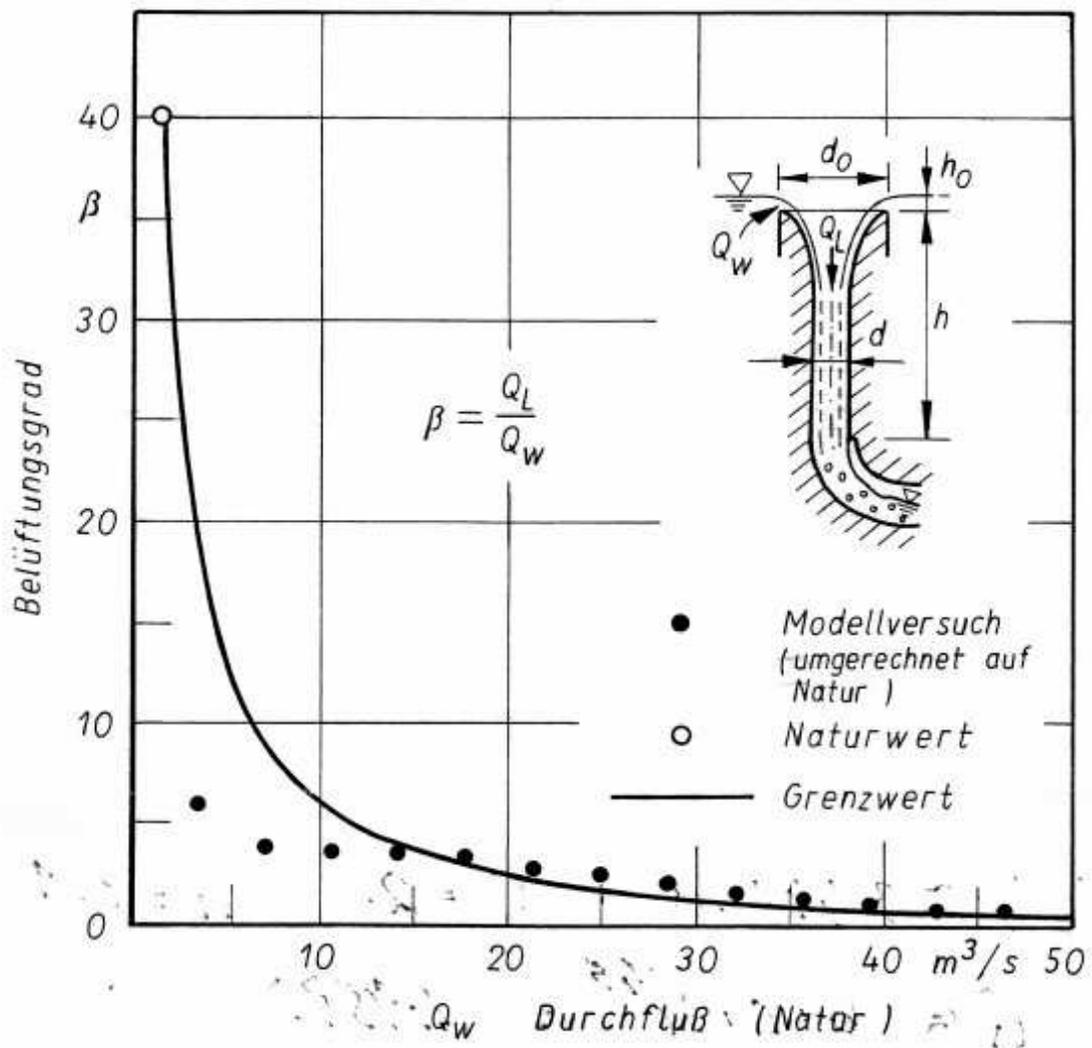


Abb. 6.10 Verhältnis des Luftinzuges im Modell bzw. Natur (Veröffentlichung mit freundlicher Genehmigung von apl.Prof.Dr.-Ing.habil. Detlef Aigner)

---

## 7 ZUSAMMENFASSUNG

Die Ermittlung des Lufteinzugs bei schachtförmigen Hochwasserentlastungsanlagen ist wegen der auftretenden Maßstabeffekte ein großes Problem. Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher eine Modellfamilie eines Fallrohres (vereinfachter Schachtüberfall) nach dem Froude'schen Modellgesetz im Wasserbaulabor des Instituts für Wasserbau und Ingenieurhydrologie der TU Wien errichtet, um die Abhängigkeit des Lufteintrages von der Modellgröße herauszufinden. Gegenständliche Arbeit soll auch als Entscheidungshilfe für die Maßstabswahl eines geplanten Modellversuches für einen HW-Entlastungsturm dienen, wo ebenfalls der Lufteinzug eine bedeutende Rolle spielt.

Es wurde der Lufteinzug an 3 unterschiedlichen Fallrohrdurchmessern (DN 100, DN 150 und DN 200), mit verschiedenen Längen und verschiedenen Rauigkeiten (glatt und sehr rau) bei steigenden Abflüssen gemessen. Aufgrund der beschränkten Modellgröße konnte der Überdeckungsabfluss nur für das Rohr DN 100 erreicht werden. Für die andere Rohrdurchmesser blieb die Untersuchung auf einen maximalen Abfluss von 45 l/s beschränkt.

Die gewonnenen Ergebnisse wurden mit vergleichbaren bereits in der Literatur veröffentlichte Ergebnisse verglichen. Teilweise konnten diese bestätigt werden.

Es ergaben sich die nachfolgenden wesentlichen Erkenntnisse aus den durchgeführten Modellversuchen:

- der Gesamtlufteinzug wird stark von der Wandrauigkeit beeinflusst – beim hydraulisch rauhen Modell steigt der Lufteinzug
- mit zunehmender Länge des Überfallrohres wird ebenfalls mehr Luft eingesaugt, die Zunahme ist nichtlinear
- ebenfalls steigt der Lufteintrag mit zunehmenden Rohrdurchmesser

Die Übertragbarkeit der Luftzufuhrdaten aus dem Modell auf die Natur nach Froude, ist nicht zweifelsfrei durchführbar, da Maßstabeffekte auftreten, d.h. die Luftaufnahme in der Natur ist wesentlich höher als im Modell beobachtet wird.

Die vorliegende Untersuchung soll daher nur eine wahrscheinlich sehr spekulative Größenordnung des Lufteinzuges für ein größeres Modell (Prototyp) geben, daher werden weitere Untersuchungen vor allem bei Großanlagen notwendig sein, um entsprechend genauere Übertragungsfaktoren für den Lufteinzug zu erhalten.

---

## LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Kobus, H. (ed). 1980. Hydraulic Modeling, Bulletin 7. German Association for Water Resources and Land Development
- [2] Young, Ronald F. Cavitation, 1999. Watford College, Hertfordshire, Imperial College Press
- [3] Knauss, Jost Wirbelbildung an Einlaufbauwerken – Luft- und Dralleintrag. 1983, DVWK, Schriften 63, Kommissionsvertrieb, Verlag Paul Parey Hamburg und Berlin
- [4] Knauss, Jost Swirling flow problems at intakes. 1987. A.A. Balkema, Rotterdam
- [5] Narayanan, R., Novak, P. Hydraulic structures. 2001., Third edition. Spon Press London and New York
- [6] Press, H. Talsperren. 1958. zweite, erweiterte Auflage. Verlag von Wilhelm Ernst und Sohn. Berlin
- [7] Mays, Larry W. Hydraulic design handbook. 1999. McGraw-Hill
- [8] Vischer Skriptfiles
- [9] Daugherty, R.L. Hydraulics. A text on practical fluid mechanics. 1937. fourth edition, 12<sup>th</sup> impression. McGraw-Hill Book Company, New York
- [10] Prandl, Ludwig Führer durch die Strömungslehre. 1949, dritte durchgesehene und ergänzte Auflage. Friedr. Vieweg und Sohn, Braunschweig
- [11] Bollrich, Gerhard Technische Hydromechanik. Band 1. Grundlagen. 2007. 6., durchgesehene und korrigierte Auflage, HUSS-MEDIEN GmbH, 10400 Berlin
- [12] (Marinov, Em.) Хидравлика. 2003. УАСГ, София (auf bulgarisch)  
Маринов, Em.,  
Казаков, Б.
- [13] Bollrich, G. Combined function of hydraulic structures with shaft spillways. Water Power, 1971, p. 362-367
- [14] Martin, H., Pohl, R., Bollrich, G., u.a. Technische Hydromechanik. Band 4. Hydraulische und numerische Modelle. HUSS-MEDIEN GmbH, Berlin 2000
- [15] USBR Design of Small Dams, U.S. Bureau of reclamation, Denver, CO, 1987
- [16] Aigner, D.; Bollrich, G.; Loll, J.; Rakowski, M. Flutung der Schachtanlage Niederröblingen durch senkrechten Versturz. Erzmetall 49(1996) Nr.:10 S.597-605

- 
- [17] Hack, Hans Peter    Lufteinzug in Fallschächten mit ringförmiger Strömung durch turbulente Diffusion / Obernach. - (Bericht / Versuchsanstalt für Wasserbau der Technischen Universität München, Oskar v. Miller-Institut ; 36). - 1977
- [18] Bormann, Klaus    Der Abfluss in Schussrinnen unter Berücksichtigung der Luftaufnahme, Diss., TU München, 1968
- [19] Grzywiński, A.    Hochwässer und deren Speicherung oder Ableitung bei Talsperren. Österreichische Bauzeitschrift. Sonderabdruck aus 8. Jahrgang, Heft 8,9,10. Springer-Verlag in Wien 1953.
- [20] Schultz, Gert A.    Einige Aspekte zur Wahl des Konstruktionstyps von Hochwasserentlastungsanlagen bei Talsperren. Wasserwirtschaft 67 (1977) 5. S. 134-142
- [21] Bretschneider, Hans    Kreisförmige Fallschächte für die Hochwasserentlastung bei Talsperren. Wasserwirtschaft 70 (1980) 3. S.88-93
- [22] Schmidt, Martin    Überlaufurme als Hochwasserentlastungsanlagen. Die Wasserwirtschaft 1 (1969). S.8-12
- [23] Sastry, P.G.    Hochwasserentlastung durch Schachtüberfälle. Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden. 11Jg. 1962. Heft 4
- [24] Bollrich, Gerhard    Gestaltung und hydraulische Berechnung senkrechter Fallschächten. Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden. 1968. Heft 4.