



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
**Bundesamt für Energie BFE**

**Jahresbericht** 11. November 2011

---

# **Lufteintragsrate in Drucksysteme von Wasserkraftanlagen infolge Einlaufwirbel**

---

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
Forschungsprogramm Wasserkraft  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Kofinanzierung:**

«swisselectric research»  
Seilerstrasse 3  
CH-3001 Bern  
[research@swisselectric.ch](mailto:research@swisselectric.ch)

**Auftragnehmer:**

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)  
ETH Zurich  
Gloriastrasse 37/39  
8092 Zürich  
[www.vaw.ethz.ch](http://www.vaw.ethz.ch)

**Autoren:**

Georg Möller, Dr. Martin Detert, Prof. Dr. Robert Boes  
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)  
ETH Zurich  
[moeller@vaw.baug.ethz.ch](mailto:moeller@vaw.baug.ethz.ch)

**BFE-Bereichsleiter:** Dr. Michael Moser

**BFE-Programmleiter:** Dr. Klaus Jorde

**BFE-Vertrags- und Projektnummer:** 154207 / 103191

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

# Zusammenfassung

Drucksysteme von Wasserkraftanlagen sollen frei von Luft sein. Andernfalls führt das zu Wirkungsgradminderung, Pulsationen, Druckstössen und Durchflussreduktionen. Einlaufwirbel werden als eine massgebende Quelle des Lufteintrags angesehen. Zum Mechanismus und zur Quantifizierung des Lufteintrags fehlt bis heute ein fundiertes Wissen. Aufgrund dessen müssen auf der sicheren Seite liegend entsprechend grosse Reserven bei Planung und Betrieb eingehalten werden. Ist die Vorhersage des Lufteintrags möglich, eröffnet sich eine Alternative zur heutigen Bemessung. Eine Quantifizierung von Schadenpotentialen respektive von Gegenmassnahmen macht ökonomische Abwägungen zwischen Verhinderung und Zulassen von Lufteintrag möglich. Wasserkraftanlagen und insbesondere deren Speicherbewirtschaftung können wirtschaftlich optimiert bemessen und betrieben werden.

Die VAW untersucht mittels physikalischer Modellversuche den Lufteintrag durch Einlaufwirbel. Die hierzu notwendigen grossmassstäblichen Bedingungen werden mit einem Tank von ca. 50 m<sup>3</sup> Volumen und einem Durchfluss bis 500 l/s erreicht. Das Modell ermöglicht die Einhaltung der heute bekannten Grenzwerte bzgl. der Modellähnlichkeit von Einlaufwirbeluntersuchungen um ein Mehrfaches.

Die durch den Wirbel am Einlauf ins Drucksystem des Modells eingetragene Lufteintragsrate wird stromab mittels Entlüftung bestimmt. Die den Lufteintrag beeinflussenden Parameter werden variiert und gemessen. Die Zirkulation, einer der wichtigsten Parameter zur Charakterisierung des Wirbels, wird aus dem horizontalen Geschwindigkeitsfeld um den Wirbel ermittelt. Die Vermessung des Geschwindigkeitsfeldes erfolgt mittels einer 2D-*Particle Image Velocimetry* (PIV) auf einer Gesamtfläche von bis zu 1 m<sup>2</sup>. Bis November 2011 wurden Geschwindigkeitsfelder um den Wirbel in einer Auflösung von 1x1 bis 6x6 cm<sup>2</sup> erfolgreich gemessen und analysiert. Die Zirkulation um den Kern des Wirbels wirkt sich nahezu auf der Gesamtfläche des PIV aus. Die durch den Wirbel verursachte Lufteintragsrate von maximal 0.2 % erscheint visuell wesentlich grösser. In diesem Zustand ist die Strömung im Rohr aufgrund der Luftphase weiss. Grössere Lufteintragsraten als 0.2 %, welche durchaus auftreten, sind nur unter bestimmten Voraussetzungen messbar.

2012 werden das Geschwindigkeitsfeld des Wirbels mit den antreibenden Kräften bzw. Parametern im Zusammenhang mit den resultierenden Lufteintragsraten analysiert. U. a. werden die wesentlichen Einflussfaktoren auf den durch Einlaufwirbel erzeugten Lufteintrag systematisch variiert und untersucht. Ziel ist es, mit den im Modell erfassten Messdaten die Lücke im Grundlagenwissen und in der praktischen Bemessung von Einlaufbauwerken bzw. dem Betrieb von Wasserkraftanlagen zu schliessen.

## Projektziele

Stromproduktion durch Wasserkraftanlagen bedingt die Fassung und Weiterleitung von Triebwasser. In den Druckstollen und -leitungen verändert eingetragene Luft die Abflusseigenschaften von einem einphasigen Fluid (Reinwasser) zu einer Zweiphasenströmung (Wasser-Luft-Gemisch). Dies wirkt sich markant auf den Betrieb, die Sicherheit und die Wirtschaftlichkeit aus. Wirkungsgradminderung, Pulsationen, Druckstösse und Durchflussreduktionen können die Folge sein. Eine massgebende Quelle des Lufteintrags sind Einlaufwirbel. Es ist daher ein Anliegen, die Lufteintragsrate zu bestimmen. Ein fundiertes Verständnis zum Mechanismus und damit zur Quantifizierung des Lufteintrags ist bis dato nicht gegeben, so dass bisher auf der sicheren Seite liegend entsprechende Reserven bei Planung und Betrieb einzuhalten sind. Bei Kenntnis der Lufteintragsrate können jedoch deren negative Auswirkungen quantifiziert werden bzw. die Wirtschaftlichkeit einer Wasserkraftanlage und insbesondere die Speicherbewirtschaftung optimiert werden.

Daraus lassen sich folgende Ziele des vorliegenden Forschungsprojekts formulieren:

- Ermittlung der Lufteintragsrate von Einlaufwirbeln anhand grossmassstäblicher physikalischer Modellversuche; Herstellen eines Zusammenhanges zwischen massgebenden Parametern des Wirbels, wie beispielsweise der Zirkulation, und der Lufteintragsrate
- Entwicklung eines Ansatzes zur Beschreibung des Phänomens mit Hilfe der Projektdaten
- Erstellung von Bemessungsgleichungen zur praxistauglichen Bestimmung der eingetragenen Luft, basierend auf den experimentellen Untersuchungen gängiger Einlaufgeometrien

Optional wird darüber hinaus eine Prototyp-Fallstudie angestrebt. Die Messung der Lufteintragsrate ist dabei in der Praxis jedoch nicht realisierbar. Die vereinfachte Messung der Zirkulation von Wirbeln und deren direkter Vergleich zu den im Modell ermittelten Daten soll die Übertragbarkeit beschreiben. Mindestens ein Prototyp soll als Fallbeispiel in die Arbeit aufgenommen werden.

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Mit Hilfe des bestehenden grossmassstäblichen physikalischen Modells wurde eine Vielzahl an Versuchen durchgeführt. Abbildung 1 zeigt einen Schnitt durch das Modell und gibt einen Überblick über die im Folgenden beschriebenen Ergebnisse der betreffenden Bestandteile. Die Optimierungen und die erreichten Ergebnisse lassen sich im Wesentlichen in drei Gruppen unterteilen: **A)** Beruhigung der Zuströmung, **B)** Geschwindigkeitsmessung mit 2D-Particle Image Velocimetry (PIV), **C)** Entlüftung. Sie werden in Folgenden detailliert erläutert.

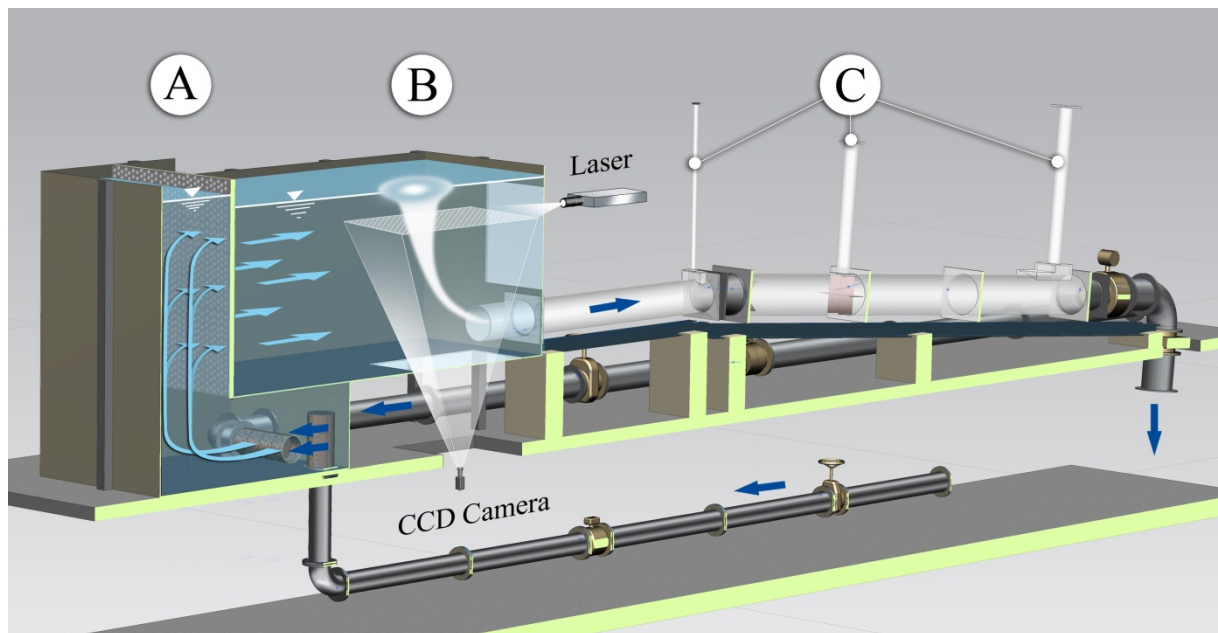


Abb. 1: Schnitt durch das bestehende physikalische Modell: **A)** Beruhigung der Zuströmung aus den Pumpen mit Einlaufbecken und Filter am Übergang zum Tank, **B)** Tank mit Geschwindigkeitsmessung (2D-Particle Image Velocimetry (PIV), horizontale Gesamtfläche schraffiert) um den Einlaufwirbel, **C)** Entlüftung des Drucksystems mittels dreier Steigrohre.

**A:** Das Wasser wird in einem geschlossenen Kreislauf gepumpt und damit der Wasserspiegel im Tank und der Durchfluss konstant gehalten. Damit kann die Strömung im Tank am Einlauf zum Drucksystem und der Lufteintrag systematisch vermessen werden. Die Einlaufwirbelbildung wird von der Zuströmung zum Einlauf beeinflusst. Eine Reduzierung der Beeinflussung auf ein Minimum ist im Hinblick auf allgemeingültige Ergebnisse eine Grundvoraussetzung. Die Geschwindigkeitsverteilung in der Zuströmung sollte gleichmässig

über den Querschnitt verteilt sein. Von den Zulaufrohren DN300 und DN250 muss der Wasserstrahl gleichmässig auf den Tankquerschnitt verteilt werden. Daher wurde ein Einlaufbecken angeordnet. Durch eine Filtermatte und ein Lochblech wird der entsprechende Strömungswiderstand erzeugt, um die Strömung im Tank zu vergleichmässigen. Diese Massnahme wurde unter Berücksichtigung der Durchgängigkeit von Partikeln der Grösse  $< 100 \mu\text{m}$ , notwendig für die PIV-Aufnahmen, optimiert. Die Anströmung konnte mit dieser Massnahme in hohem Grad optimiert und vergleichmässigt werden. Zudem sorgt an der Oberfläche ein Wellendämpfer (nicht abgebildet) für einen ruhigen Wasserspiegel.

**B:** Das Geschwindigkeitsfeld eines Einlaufwirbels weist eine grosse Bandbreite und zudem hohe Gradienten auf. Für die Messung der Strömungsgeschwindigkeit mittels des installierten *2D-Particle Image Velocimetry* (PIV) ist eine Adaptierung der Aufnahme erforderlich. Die Analyse des Bildabstands (*time between pulses*), der Partikeldichte in Kombination mit der Grösse der Auswertefelder (*interrogation areas*) und vieler Detailaspekte konnte erfolgreich abgeschlossen werden. Auf einer Fläche von ca.  $1 \text{ m}^2$  kann mit dem PIV-System die Strömungsgeschwindigkeit gemessen werden. Die Abbildung 2 zeigt ein hieraus entnommenes 1D-Geschwindigkeitsprofil in y-Richtung durch den Wirbelkern. Es ist die tangential Geschwindigkeitskomponente  $v_t$  des in der Laserschnitt-ebene vertikalachsigen Wirbels dargestellt.

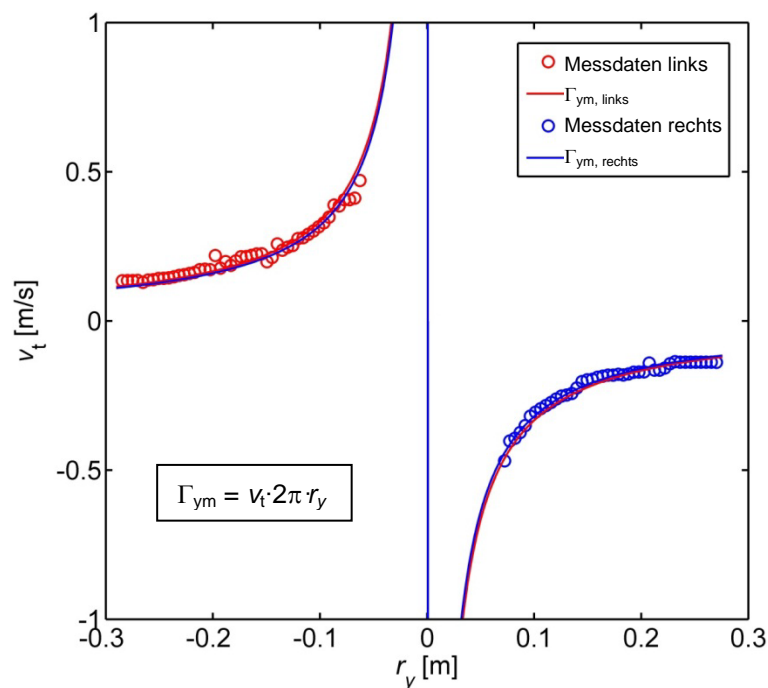


Abb. 2: 1D-Geschwindigkeitsprofil in y-Richtung durch den Wirbelkern. Lage rot markiert in Abbildung 3, Tangentialgeschwindigkeit  $v_t$  in Abhängigkeit vom Radius  $r_y$ , Kurven der berechneten mittlere Zirkulation  $\Gamma_{ym}$

Die Messdaten sind im Wirbelfeld (Bereich um den Wirbelkern) aufgenommen. Es ist davon auszugehen, dass ein Potentialwirbel vorliegt. Der Verlauf der Tangentialgeschwindigkeit  $v_t$  kann in Abhängigkeit des Radius  $r$  bei bekannter Zirkulation durch die in der Abbildung 2 angegebene Gleichung exakt bestimmt werden. Aus den Messdaten lässt sich für jeden Punkt der Abbildung 2 eine Zirkulation berechnen. Die durchgezogenen Linien geben die mittleren Zirkulationen  $\Gamma_{ym}$  je für die linke (rot) und rechte Seite (blau) an. Die Abweichungen der einzelnen Messpunkte von der Kurve sind sehr gering und über  $r_y$  konstant. Auch die Zirkulationen links und rechts sind nahezu gleich.

Abbildung 3 zeigt das Endergebnis der Auswertung des Geschwindigkeitsfeldes mit den wichtigsten ermittelten Grössen. Hierzu zählen die für die Berechnung von  $r$  und damit  $\Gamma$  notwendigen Koordinaten des Mittelpunktes  $x$  und  $y$ , die Drehrichtung (CW-clockwise), der Durchfluss  $Q$ , die Überdeckung  $h$  und der Durchmesser des Einlaufrohrs  $D$ . Aus einem

Geschwindigkeitsfeld wird wie oben beschrieben die Zirkulation in  $x$ -,  $y$ - und  $xy$ -Richtung (diagonal) bestimmt und daraus eine mittlere Zirkulation  $\Gamma_m$  für den Wirbel berechnet. Dieser Wert wird als Mass für jedes aufgenommene Geschwindigkeitsfeld des Wirbels verwendet und kann mit einer Frequenz von bis zu 6 Hz bestimmt werden.

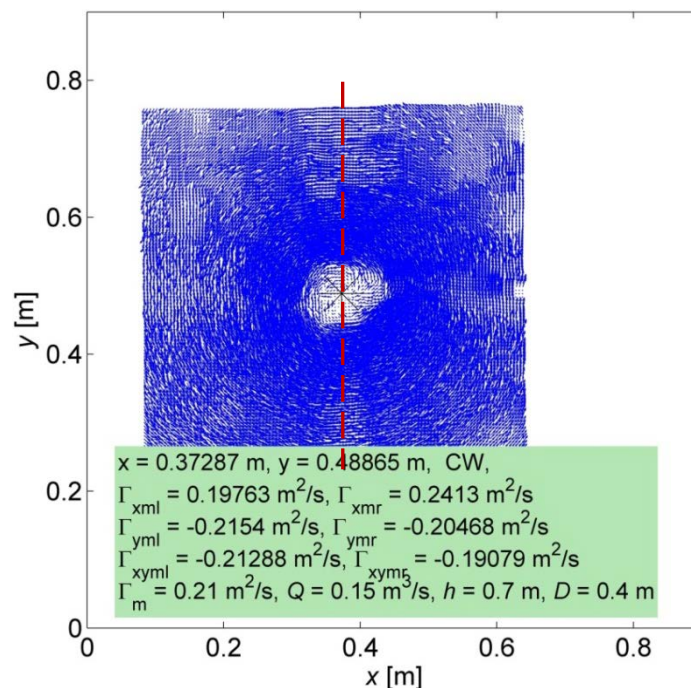


Abb. 3: Endergebnis der Auswertung mit Wirbelzentrum ( $x$ ,  $y$ ) und mittlerer Zirkulation  $\Gamma_m$ , Lage des 1D-Geschwindigkeitsprofils der Abbildung 2 rot gestrichelt markiert

**C:** Die durch den Einlaufwirbel im Tank eingetragene Luft muss aufgefangen werden, um deren Volumen messen zu können. Die Entlüftung der Luftblasen und -taschen kann nur an der Firste des Rohres erfolgen. Die Luft muss demzufolge bis zum Erreichen der Entlüftungseinrichtung aufgestiegen sein. Abbildung 4 zeigt einen Überblick der Entlüftung mittels Dom (g) und Steigrohr (b). Bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten ist eine Entlüftung im horizontalen Rohr (a) möglich. Steigt die Geschwindigkeit, so werden die Luftblasen im horizontalen Rohr im gesamten Querschnitt transportiert und gelangen durch die Aufweitung in das grössere Rohr (f). Die Geschwindigkeit respektive die Turbulenz sinkt, so dass die Blasen im Querschnitt aufsteigen. Die Entlüftungseinrichtungen 2 und 3 fangen diese Luftblasen auf. Im Abschnitt zwischen 2 und 3 bilden sich aus dem Zusammenschluss einzelner Blasen grössere Luftblasen bzw. -taschen. Unter Berücksichtigung von Auftrieb und Strömungswiderstand im geneigten Rohr können diese gegen die Strömung aufsteigen. Grösstenteils werden sie durch die Entlüftung 2 aufgefangen. Steigen diese weiter gegen die Strömung auf oder bilden sich diese oberhalb von Entlüftung 2, sammelt sich am Knick Luft zu einer stationären Luftblase an. Ein weiterer Aufstieg durch das horizontale Rohr ist nicht möglich. Dies tritt vor allem bei mittleren Geschwindigkeiten auf. Dieser Geschwindigkeitsbereich ist klein und konnte durch die Optimierung der Entlüftung minimiert, jedoch nicht völlig verhindert werden. Die Entlüftung ist in einem kleinen Bereich weiterhin nur begrenzt möglich. Bei Froudezahlen  $F_D > 1.5$  (Messbereich  $F_D = 0 \div 2$  bei  $D = 0.4 \text{ m}$ ) wird die Luft nicht mehr vollständig durch die Entlüftungseinrichtungen aufgefangen. Es konnte durch eine Kalibrierung eine Korrekturfunktion der aufgefangenen Luftmengen bestimmt werden. Geringe Überdeckungshöhen im Tank respektive grosse Geschwindigkeiten im Rohr haben geringe Wasserspiegel in den Steigrohren zur Folge, die ebenfalls die Entlüftbarkeit des Luft-Wasser-Gemisches einschränken. Die Blasen im Steigrohr verursachen bei geschlossenem Deckel eine Druckerhöhung bzw. eine Wasserspiegelabsenkung. Diese muss einige Zentimeter betragen, um geeignete Daten bzgl. der Lufteintragsrate erheben zu können. Grosse Luftmengen mit starker Druckzunahme bilden ebenso eine Grenze der Messbarkeit.



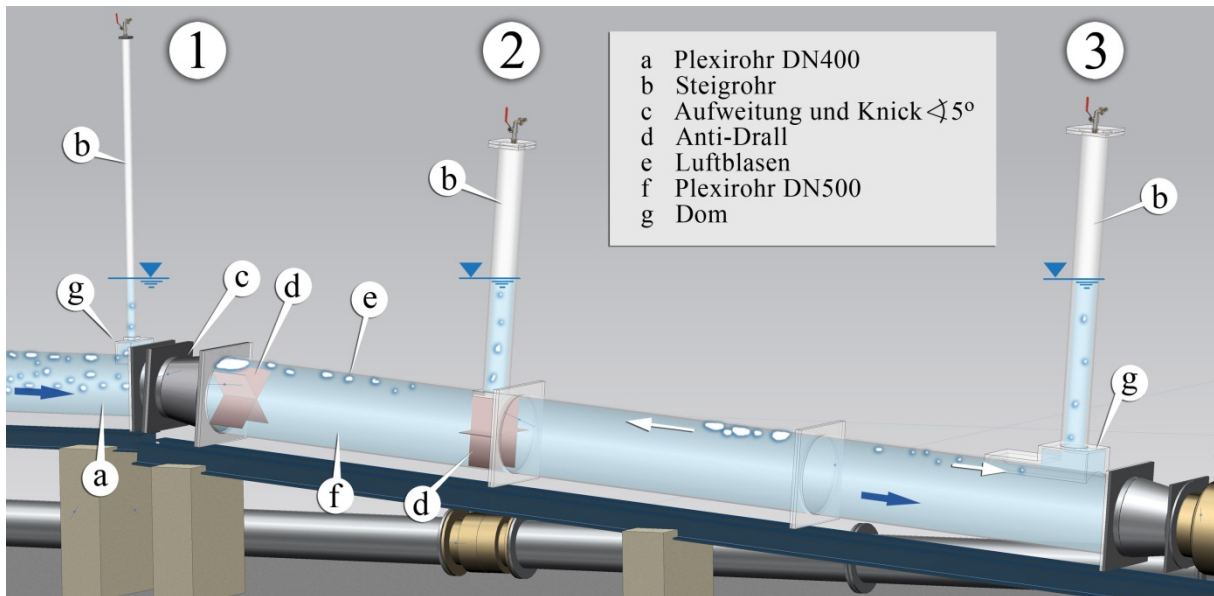


Abb. 4: Entlüftungsvorrichtung zur Bestimmung der Lufteintragsrate  $\beta$ . Anpassung auf 3 Entlüftungen für entsprechende Strömungszustände bzgl. Geschwindigkeit und Blasengrösse.

In Abbildung 5 sind erste Ergebnisse der Lufteintragsrate  $\beta$  in Abhängigkeit der Einlaufparameter aufgetragen. Die gemessenen Werte erreichen bis zu 0.2 %. Bei dieser Grösse ist die Strömung im Rohr visuell stark mit Luft durchmischt (*white water*). Die Lufteintragsrate  $\beta$  wird aus Mittelwerten über Messdauern von 2 bis 600 s bestimmt. Die Dauer ist abhängig von der Lufteintragsrate und der zur Verfügung stehenden Wasserspiegelabsenkung im Steigrohr. Mit steigender Froudezahl nehmen die Eintragsraten exponentiell zu. Grössere Lufteintragsraten als dargestellt treten auf, sind aber wie oben beschrieben nicht messbar. Bei kleineren Überdeckungen nehmen die Lufteintragsraten auffallenderweise nicht zu. Tatsächlich treten hier jedoch sehr grosse Lufteintragsraten auf, die Problematik besteht ebenfalls in der Messung dieser Zustände. Auch wird die Wirbelbildung dann zunehmend instationär, was die Entstehung von mehreren Wirbeln mit gleicher Drehrichtung zur Folge hat. Diese verlöschen sich gegenseitig und führen so zu keinem kontinuierlichen Lufteintrag über die Messdauer. Das kurzzeitige Potential zum Lufteintrag ist jedoch entsprechend hoch.

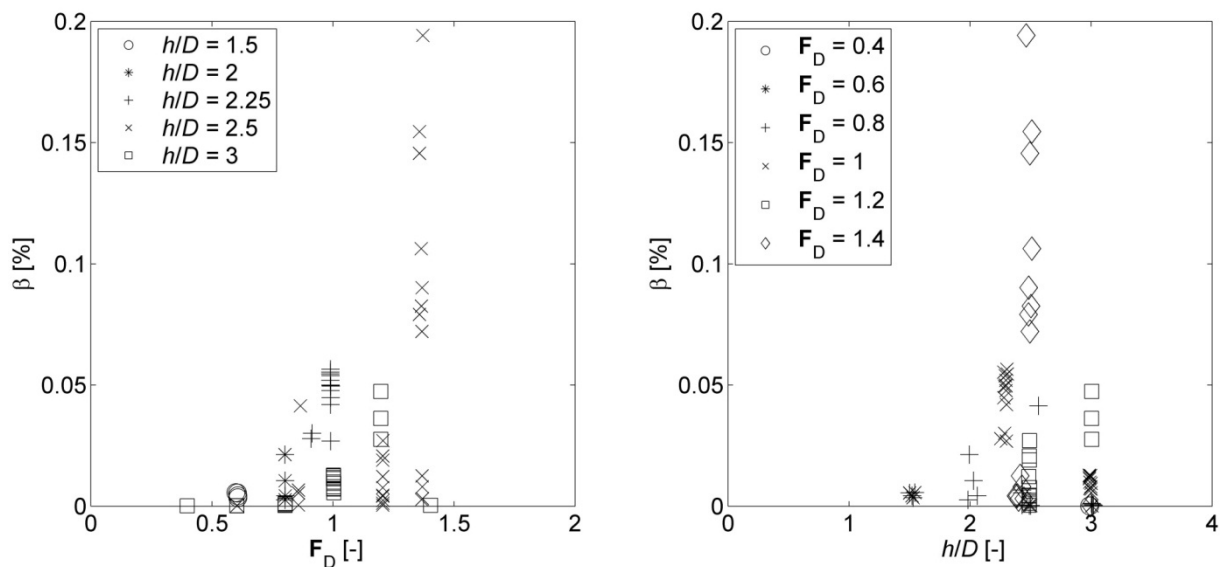


Abb. 5: Lufteintragsrate  $\beta$  in Abhängigkeit der Einlauf-Froudezahl  $F_D$  (links) und der relativen Überdeckung  $h/D$  (rechts)

## Bewertung 2011 und Ausblick 2012

Alle Bestandteile des hydraulischen Modells und der Messtechnik konnten in Betrieb genommen werden und funktionieren nach der Optimierung wunschgemäß; lediglich die Entlüftungseinrichtung bedarf noch weiterer Anpassungen. Das Projektende ist weiterhin auf Ende 2012 erreichbar.

Anfang 2012 wird eine im September 2011 gestartete Masterarbeit abgeschlossen, welche durch eine Modellfamilie nach dem Modellgesetz nach Froude Aufschlüsse über etwaige Massstabseinflüsse geben soll. Die Messungen des Geschwindigkeitsfeldes zur Bestimmung der Zirkulation und die Entlüftung mit resultierender Lufteintragsrate werden in einem weiteren Schritt kombiniert. Mit Hilfe dieser Ergebnisse wird eine Funktion zur Abschätzung möglicher Lufteinträge erarbeitet. Schlussendlich soll mit einer detaillierten Vermessung des Geschwindigkeitsfeldes des Wirbels, evtl. auch in vertikaler Richtung, der physikalische Prozess der Wirbelbildung, mit einem Fokus auf lufteinziehende Wirbel, analysiert werden.