

Forschungsbericht BWPLUS

**Die Schwingklappe  
Ökohydraulisches Durchlassbauwerk  
für regulierbare Hochwasserrückhalteräume  
- Planung, Bauweise, Betrieb -**

von

H. H. Bernhart, F. Seidel  
Karlsruher Institut für Technologie  
Campus Süd  
Institut für Wasser- und Gewässerentwicklung

W. Konold, O. Kaiser, S. Röck  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Institut für Landespflege

Förderkennzeichen: BWR 24020

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden mit  
Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert

Oktober 2009

# INHALT

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 Vorgang</b> .....   | <b>6</b>  |
| <b>2 Einführung</b> .....  | <b>7</b>  |
| <b>3 Grundlagen</b> .....  | <b>9</b>  |
| 3.1 Begriffsdefinitionen.....  | 9         |
| 3.1.1 Hochwasserrückhaltebecken (HRB) .....                              | 9         |
| 3.1.2 Klassifizierung.....   | 10        |
| 3.1.3 Lage des HRB zum Gewässer.....                                     | 11        |
| 3.1.4 Gesteuertes / ungesteuertes HRB .....                              | 13        |
| 3.2 Steuerung – Regelung .....   | 15        |
| 3.3 Aspekte der Durchgängigkeit .....                                    | 17        |
| 3.4 Durchlasstypen und Durchgängigkeit.....                              | 18        |
| 3.5 Die Schwingklappe, Stand des Wissens .....                           | 20        |
| 3.6 Anwendungsbereich der Schwingklappe.....                             | 21        |
| 3.7 Funktionsprinzip Schwingklappe .....                                 | 22        |
| <b>4 Hydraulische Untersuchungen an großmaßstäblichen Modellen</b> ..... | <b>25</b> |
| 4.1 Untersuchungsmethodik.....   | 25        |
| 4.2 Wasserbauliche Modelle .....   | 25        |
| 4.2.1 Eingesetzte Modelle.....   | 28        |
| 4.2.2 Modell Maßstab 1:10 .....  | 28        |
| 4.2.3 Modell Maßstab 1:2 .....   | 29        |
| 4.2.3.1 Modellaufbau .....   | 29        |
| 4.2.3.2 Steuerung und Regelung des Versuchsstandes.....                  | 31        |
| 4.2.3.3 Messtechnik.....   | 31        |
| 4.2.4 Modell Maßstab 1:6 .....   | 34        |
| 4.3 Konstruktive Gestaltung .....  | 35        |
| 4.3.1 Klappenkörper.....   | 35        |
| 4.3.2 Lagerung.....  | 40        |
| 4.3.3 Dichtung.....  | 43        |
| 4.4 Hydraulik .....  | 43        |
| 4.4.1 Abflussbeiwert.....  | 43        |
| 4.4.2 Unterwasser-Randbedingung .....                                    | 53        |
| 4.4.3 Beginnendes Eingreifen in das Abflussgeschehen .....               | 57        |
| 4.4.4 Einfluss der Achslage.....   | 60        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 4.4.5    | Betrachtung der angreifenden Kräfte .....   | 60         |
| 4.4.6    | Vergleich mit den Ergebnissen bisheriger Studien.....   | 63         |
| 4.4.7    | Überarbeitung Funktionsprinzip .....  | 66         |
| 4.4.8    | Selbstregelung .....  | 67         |
| 4.5      | Druckverlauf / Lagerkräfte .....  | 67         |
| 4.6      | Schwingungsverhalten des Klappenkörpers.....  | 71         |
| 4.6.1    | Grundlagen .....  | 71         |
| 4.6.2    | Bestimmung der Eigenfrequenz.....   | 74         |
| 4.6.3    | Dämpfungsverhalten .....  | 77         |
| 4.6.4    | Druckschwankungen entlang der Stauhaut.....   | 84         |
| 4.6.5    | Fazit Schwingungsverhalten .....  | 89         |
| 4.7      | Stauraumbewirtschaftung am Beispiel HRB Rittersbach.....  | 90         |
| 4.8      | Verhalten bei Geschwemmsel- und Geschiebetrieb.....   | 96         |
| 4.9      | Sohlgestaltung.....   | 103        |
| 4.9.1    | Tosbeckenuntersuchung im Modell .....   | 104        |
| 4.9.1.1  | Variante 1 .....  | 105        |
| 4.9.1.2  | Variante 2 .....  | 106        |
| 4.9.1.3  | Variante 3 .....  | 106        |
| 4.9.2    | Fazit Sohlgestaltung.....   | 107        |
| 4.10     | Zusammenfassung der hydraulischen Untersuchungen .....  | 108        |
| <b>5</b> | <b>Ökologische Untersuchungen am großmaßstäblichen Modell.....</b>                              | <b>110</b> |
| 5.1      | Durchgängigkeit des Luftraums.....  | 110        |
| 5.2      | Terrestrische und amphibische Durchgängigkeit.....  | 111        |
| 5.3      | Aquatische Durchgängigkeit.....   | 113        |
| 5.4      | Laboruntersuchungen in einer Versuchsrinne .....  | 114        |
| 5.4.1    | Vorversuch: Driftverhalten in Abhängigkeit von Fließgeschwindigkeiten<br>und Sohlsubstrat ..... | 114        |
| 5.4.2    | Sedimenttransport bei erhöhtem Abfluss (kein Einstau) .....                                     | 116        |
| 5.4.3    | Einstauversuche .....   | 118        |
| 5.5      | Fazit Ökologische Untersuchungen.....   | 120        |
| <b>6</b> | <b>Bemessungskonzept .....</b>  | <b>121</b> |
| 6.1      | Klappengeometrie .....  | 122        |
| 6.2      | Entwicklung der Spaltweite .....  | 123        |
| 6.3      | Bemessung der Spaltweite $s_{90}$ und der Breite der Schwingklappe .....                        | 124        |
| 6.4      | Bemessung der Achslage .....  | 125        |
| 6.5      | Herausforderungen bei der Bemessung.....  | 127        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>7 Konzept Gesamtanlage</b> .....                           | <b>128</b> |
| 7.1 Einlaufbereich.....                                       | 129        |
| 7.2 Rechenkonzept .....                                       | 130        |
| 7.3 Durchlassbereich.....                                     | 138        |
| 7.4 Auslaufbereich.....                                       | 141        |
| 7.5 Hochwasserentlastung .....                                | 141        |
| 7.6 Sonstiges .....   | 143        |
| <b>8 Forschungstransfer .....</b>                             | <b>145</b> |
| 8.1 Landesweite Arbeitsgruppe / Leitfaden .....               | 145        |
| 8.2 Fachtagung Ökologische Durchgängigkeit .....              | 146        |
| 8.3 Pilotanlage Voranalyse.....                               | 146        |
| 8.3.1 HRB Bollschweil am Eckbach .....                        | 146        |
| 8.3.2 Flutmulde Weisweil West .....                           | 148        |
| 8.3.3 HRB Aglasterhausen – Rittersbach (A26).....             | 151        |
| 8.3.4 HRB Forellenbach II.....                                | 153        |
| 8.4 Pilotanlage: Fischaufstiegsanlage Obermühle / Pfinz ..... | 154        |
| 8.4.1 Bemessung / Planung .....                               | 156        |
| 8.4.2 Bau .....   | 158        |
| 8.5 Bauweisenkatalog .....                                    | 159        |
| 8.6 Sonstiges .....   | 160        |
| <b>9 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>                   | <b>162</b> |
| <b>10 Literaturverzeichnis .....</b>                          | <b>167</b> |
| <b>11 Abbildungsverzeichnis .....</b>                         | <b>173</b> |
| <b>12 Tabellenverzeichnis .....</b>                           | <b>178</b> |
| <b>Anlagen .....</b>  | <b>179</b> |

## SYMBOLVERZEICHNIS

| Symbol               | Einheit              | Bedeutung                             |
|----------------------|----------------------|---------------------------------------|
| 1. Arabische Zeichen |                      |                                       |
| B                    | [m]                  | Breite                                |
| $c_Q$                | [-]                  | Abflussbeiwert                        |
| $C_Q$                | [-]                  | Abflussbeiwert                        |
| D                    | [-]                  | Dämpfungsmaß                          |
| D                    | [-]                  | Federkonstante                        |
| f                    | [Hz]                 | Eigenfrequenz                         |
| g                    | [m/s <sup>2</sup> ]  | Erdbeschleunigung                     |
| F                    | [N]                  | Federkraft                            |
| $F_A$                | [N]                  | Auftriebskraft                        |
| $F_L$                | [N]                  | Strömungskraft                        |
| Fr                   | [-]                  | Froudezahl                            |
| $Fr$                 | [N]                  | Reibungskraft                         |
| $F_{Res}$            | [N]                  | Resultierende Kraft                   |
| $F_G$                | [N]                  | Gewichtskraft                         |
| $F_L$                | [N]                  | Lagerkraft                            |
| H                    | [m]                  | Höhe                                  |
| $H_O$                | [m]                  | Stauhöhe, Oberwasserstand             |
| $H_{OW}$             | [m]                  | Oberwasserstand                       |
| $H_{max}$            | [m]                  | maximaler Beckenwasserstand           |
| $HQ_{20}$            | [m <sup>3</sup> /s]  | 20 jährlicher Hochwasserabfluss       |
| $HQ_{100}$           | [m <sup>3</sup> /s]  | 100 jährlicher Hochwasserabfluss      |
| $h_2$                | [m]                  | Unterwasserstand                      |
| L                    | [m]                  | Länge                                 |
| $L_P$                | [-]                  | Lagerpunkt                            |
| LS                   | [-]                  | relative Lage des Lagerpunktes        |
| $L_{SE}$             | [m]                  | Abstand Schwerpunkt / Klappenendkante |
| $L_{SL}$             | [m]                  | Abstand Schwerpunkt / Lagerpunkt      |
| M                    | [kg]                 | Masse                                 |
| $M_{FT}$             | [-]                  | Maßstabszahl der Trägheitskräfte      |
| $M_L$                | [-]                  | Maßstabszahl der Länge                |
| $M_t$                | [-]                  | Maßstabszahl der Zeit                 |
| q                    | [m <sup>3</sup> /sm] | spezifischer Abfluss                  |
| Q                    | [m <sup>3</sup> /s]  | Abfluss                               |
| $Q_{Bem}$            | [m <sup>3</sup> /s]  | Bemessungsabfluss                     |

|            |           |   |
|------------|-----------|---|
| $Q_R$      | $[m^3/s]$ | Regelabgabe   |
| $Q_{Zmax}$ | $[m^3/s]$ | maximaler Zufluss   |
| $Q_{Amax}$ | $[m^3/s]$ | maximaler Abfluss   |
| $S$        | $[m^3]$   | Speicherinhalt  |
| $s$        | $[m]$     | Spaltweite  |
| $s_{90}$   | $[m]$     | Spaltweite bei einer Klappenneigung von $90^\circ$        |
| $s_{zu}$   | $[m]$     | zusätzliche Spaltweite bei Veränderung der Klappenneigung |
| $t$        | $[s]$     | Zeit  |
| $v$        | $[m/s]$   | Fließgeschwindigkeit                                      |
| $v$        | $[m/s]$   | Geschwindigkeit   |
| $x$        | $[m]$     | Weg   |
| $y$        | $[m]$     | Wassertiefe   |
| $\gamma$   | $[-]$     | Dämpfungskonstante  |
| $y_0$      | $[m]$     | Oberwasserstand   |
| $y_2$      | $[m]$     | Unterwasserstand  |

## 2. Griechische Zeichen

|            |            |                    |
|------------|------------|--------------------|
| $\alpha$   | $[^\circ]$ | Neigungswinkel     |
| $\delta$   | $[^\circ]$ | Neigungswinkel     |
| $\phi$     | $[^\circ]$ | Neigungswinkel     |
| $\lambda$  | $[-]$      | Lösungsparameter   |
| $\omega_0$ | $[rad/s]$  | Eigenkreisfrequenz |
| $\Delta x$ | $[m]$      | Länge Störkörper   |
| $\Delta z$ | $[m]$      | Höhe Störkörper    |

## 3. Indizes

|     |       |        |
|-----|-------|--------|
| $M$ | $[-]$ | Modell |
| $N$ | $[-]$ | Natur  |

## 1 Vorgang

Das Institut für Wasser und Gewässerentwicklung der Universität Karlsruhe und das Institut für Landespflege der Albert-Ludwigs Universität Freiburg haben im Auftrag der Projektträgerschaft „Programm Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung“ am Forschungszentrum Karlsruhe das Forschungsvorhaben „Die Schwingklappe – Ökohydraulisches Durchlassbauwerk für regulierbare Hochwasserrückhalteräume – Planung, Bauweise, Betrieb“ (Zuwendungs-Nr. BWR 24020) bearbeitet.

Zusammen mit dem Parallelvorhaben der Universität Stuttgart in Kooperation mit dem Institut für Landespflege der Universität Freiburg „Kriterien für Gestaltung, Betrieb sowie Unterhaltung von Stau- und Retentionsanlagen zur Gewährleistung der ökologischen Durchgängigkeit“ (Zuwendungs-Nr. BWR 24005) bildet dieses Vorhaben ein Verbundprojekt. Beide Forschungsvorhaben wurden durch eine landesweite Arbeitsgruppe unter der Leitung der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg fachlich begleitet. Im vorliegenden Abschlussbericht werden die an der Universität Karlsruhe und Universität Freiburg erzielten Ergebnisse dargestellt und erläutert.

### - Projektleitung

Universität Karlsruhe  
Institut für Wasser und  
Gewässerentwicklung  
Prof. Dr.-Ing. habil. H. H. Bernhart

### - Kooperation

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Institut für Landespflege  
Prof. Dr. habil. W. Konold

### - Sachbearbeitung

Dipl.-Ing. F. Seidel (Universität Karlsruhe)  
Dr. O. Kaiser (Universität Freiburg)  
Dr. S. Röck (Universität Freiburg)

Karlsruhe, im April 2009



---

(Prof. H. H. Bernhart)

## 2 Einführung

In Baden-Württemberg wird im Rahmen des technischen Hochwasserschutzes ein dezentrales Hochwasserschutzkonzept verfolgt, das eine Vielzahl von kleinen Retentionsräumen in den Nebengewässern vorsieht. Derzeit sind in Baden-Württemberg 663 Hochwasserrückhaltebecken (HRB) im Einsatz, wovon 479 als Trockenbecken im Hauptschluss konzipiert sind (Stand Okt. 2007). Gemäß DIN 19700-12 kann der größte Teil dieser Hochwasserrückhaltebecken in Baden-Württemberg den sehr kleinen bis kleinen Becken zugeordnet werden.

Bezogen auf den Talraum und die am und im Gewässer lebende Fauna können Hochwasserrückhaltebecken eine Wanderbarriere darstellen und die ökologische Durchgängigkeit im Sinne der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) beeinträchtigen bzw. verhindern. Eine wesentliche Zielstellung der Wasserrahmenrichtlinie beinhaltet die Erreichung eines guten Gewässerzustandes in allen Gewässern der EU. Bei den Oberflächengewässern ist dafür insbesondere die Funktion der Gewässer als Lebensraum zu beachten.

Hieraus ergibt sich die Forderung, dass die Funktion des Gewässers als Wanderkorridor und Leitstruktur zu erhalten, bzw. wieder herzustellen ist. Neben der aquatischen Durchgängigkeit muss dabei auch die amphibische und terrestrische Durchgängigkeit sichergestellt werden.

Aus hydraulischen und hydrologischen Gesichtspunkten bietet ein gesteuertes Becken die größte Flexibilität bezogen auf den Hochwasserschutz. Vor allem bei einer Serienschaltung von mehreren Hochwasserrückhaltebecken kann ausgehend von der Vorhersage eine Regelungsstrategie erarbeitet werden und die vorhandenen Stauvolumina können optimal eingesetzt werden.

Viele der Hochwasserrückhaltebecken in Baden-Württemberg liegen jedoch fernab der Ortslagen, so dass aus Kostengründen auf einen Stromanschluss und die Steuerungs- und Regelungselektronik verzichtet wird. Die zusätzlichen Investitionen für eine Steuerung liegen je nach Ausführung einschließlich des Betriebsgebäudes im Bereich von 50.000 € bis 80.000 €, was einen Anteil von 5-15 % der Gesamtinvestitionen bedeutet. Bei den ungesteuerten Becken sind die Durchlassbauwerke mit Blenden ausgestattet, die bei dem maximalen Beckenwasserstand die Regelabgabe  $Q_R$  an die unterwasserseitige Gewässerstrecke abgeben.



Bezogen auf die Ganglinie der Hochwasserwelle drosselt ein ungesteuertes Hochwasserrückhaltebecken zu einem frühen Zeitpunkt den Abfluss und Wasser wird im Becken zwischengespeichert. Hierdurch wird zum einen das vorhandene Speichervolumen nicht optimal bewirtschaftet, zum anderen wird sehr früh in das Abflussgeschehen und die natürliche Dynamik des Gewässers eingegriffen. Dies kann zu einer Verarmung der Strömungs- und Strukturdiversität im Gewässer führen.

Ziel des Forschungsvorhabens war es, ein ökologisch optimiertes Durchlassbauwerk mit einem selbstgesteuerten Regulierorgan für ein Hochwasserrückhaltebecken im Hauptschluss zu entwerfen und in die Praxis zu transferieren. Mit dem Forschungsvorhaben wurde an die bisherigen Untersuchungen und Studien zur Schwingklappe angeknüpft und die Ergebnisse des Verbund-Projektes der Universitäten Stuttgart und Freiburg (BWR 24005) flossen direkt in das Projekt ein.

Neben der Bearbeitung von hydraulischen und ökologischen Fragestellungen lag ein weiterer Schwerpunkt der Untersuchungen beim Nachweis der Betriebssicherheit bei Geschwemmsel- und Geschiebetrieb. Das Konzept der Schwingklappe war schon Gegenstand früherer Studien und Versuchsreihen. Die folgende Auflistung gibt einen Überblick der geleisteten Vorarbeiten.

- Machbarkeitsstudie – Schwingklappe – im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz (IWK, Dezember 1997).
- Studie über ökohydraulische Durchlassbauwerke für regulierbare Hochwasserrückhalteräume, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Handbuch Wasser 2, 1998, ISSN 0946-0675
- Zweidimensionale hydraulische Modellversuche zum Thema: „Ökohydraulische Durchlassbauwerke – Die Schwingklappe –, im Auftrag des Regierungspräsidiums Stuttgart (IWK, Dezember 1998).

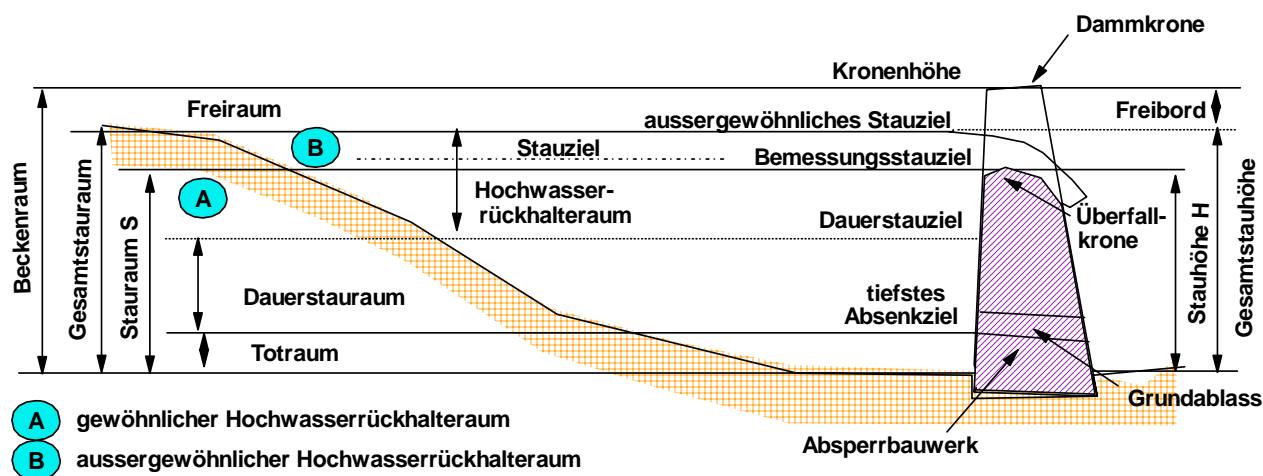
## 3 Grundlagen

### 3.1 Begriffsdefinitionen

Der vorliegende Untersuchungsbericht beschäftigt sich mit einem neuartigen Regulierorgan, welches in Hochwasserrückhaltebecken zum Einsatz kommen soll. In den Ausführungen zur Schwingklappe wird oft Bezug auf heutige Bauweisen und Anordnungen genommen. In diesem Zusammenhang gängige Begrifflichkeiten werden im Folgenden definiert.

#### 3.1.1 Hochwasserrückhaltebecken (HRB)

Hochwasserrückhaltebecken sind besonders einfache Arten von Talsperren. Die Bemessungsgrundlagen für Hochwasserrückhaltebecken sind durch die Stauanlagennormen DIN 19700 Teile 10, 11 und 12. Unterschieden werden die verschiedenen Teilräume, die nach DIN 19700 Teil 12 bei der Bemessung eines Hochwasserrückhaltebeckens vorzusehen sind. Sie sind in Abbildung 3.1 dargestellt.



**Abbildung 3.1:** Begriffsdefinitionen beim Hochwasserrückhaltebecken [IWG2006].

Der in Abbildung 3.1 dargestellte Totraum entfällt meist bei den heute gebauten Trockenbecken, da unter normalen Abflussbedingungen ein Gewässer nicht eingestaut werden soll. Er ist vorzusehen, wenn ein Dauerstau (Dauerstaubecken) eingeplant wird. Erst über dem Dauerstauziel beginnt dann der eigentliche Hochwasserrückhalteraum, der nach den Erfordernissen des Hochwasserschutzes für die Unterlieger bemessen werden muss. Dem Hochwasserschutz des Unterliegers dient somit der gewöhnliche Hochwasserrückhalteraum. Dieser Schutzraum wird durch den Grundablass oder den Betriebsauslass des Beckens entleert. Bei Trockenbecken sind diese beiden Auslässe meist identisch.

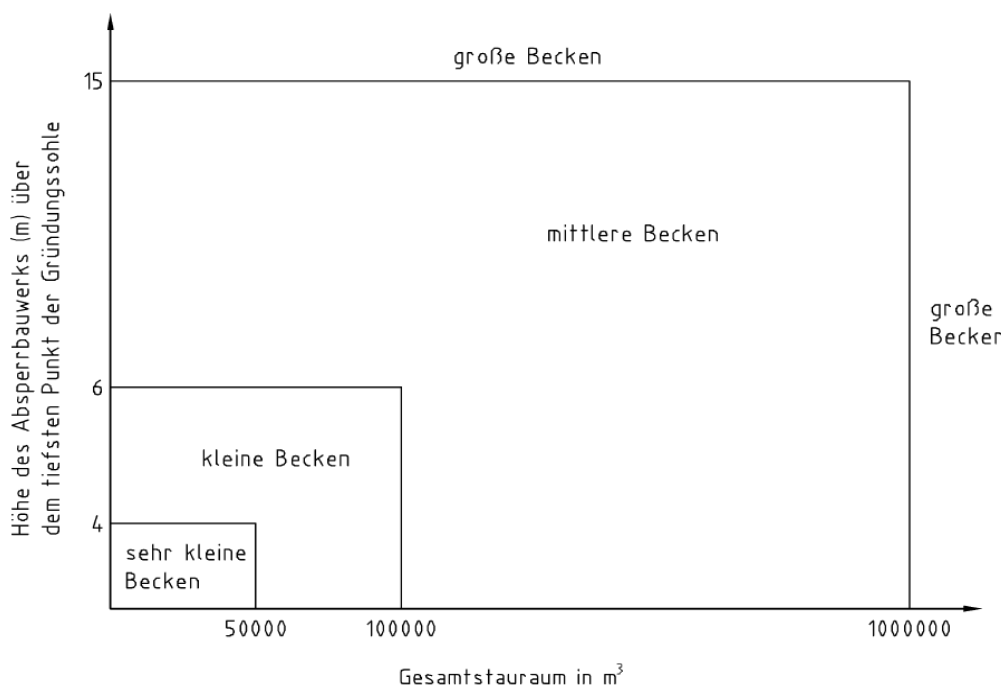
Bei Dauerstaubecken dagegen dient der Betriebsauslass der Entleerung des gewöhnlichen Hochwasserrückhalteriums und der Grundablass ist für die Bewirtschaftung des Dauerstaus vorzusehen.

Die Bemessungsgrößen für den gewöhnlichen Hochwasserrückhalteraum sind Hochwasserereignisse vorgegebener Jährlichkeit. Dabei wird es angestrebt, den Hochwasserschutz von Unterliegern für eine Jährlichkeit von ca. 20 - 100 Jahren auszulegen. Maßgebend für diese Bemessungsjährlichkeit ist grundsätzlich das Hochwasserschutzbedürfnis der Unterlieger entsprechend der Wertigkeit der von Hochwasser betroffenen Flächen [IWG 2006].

### 3.1.2 Klassifizierung

Die Klassifizierung von Hochwasserrückhaltebecken dient der differenzierten Festlegung von Bemessungsanforderungen und ist in der DIN 19700 geregelt. Für die Zuordnung in eine bestimmte Klasse wird das Stauvolumen und die Höhe des Absperrbauwerkes über den tiefsten Punkt der Gründungssohle betrachtet. Die Bemessungsanforderungen beziehen sich folglich auf das Gefährdungspotential, welches von dem Hochwasserrückhaltebecken ausgeht.

Abweichend von den Klassifizierungsmerkmalen nach Abbildung 3.2 kann auf der Grundlage von Sicherheitsbetrachtungen das Hochwasserrückhaltebecken einer höheren oder niedrigeren Klasse zugeordnet werden [DIN 19700].



**Abbildung 3.2:** Klassifizierung von Hochwasserrückhaltebecken [DIN 19700].

Neben der Klassifizierung nach DIN 19700 können die Hochwasserrückhaltebecken auch bezüglich der konstruktiven Ausgestaltung der in Baden-Württemberg eingesetzten Durchlassbauwerke anhand folgender Kriterien klassifiziert werden:

**Durchlassbauwerk:**

- Rohrdurchlass
- geschlossenes Kastenprofil
- offenes Kastenprofil

**Sohle:**

- naturähnliche Sohle mit Substrat
- glatte Betonsohle

**Betrieb:**

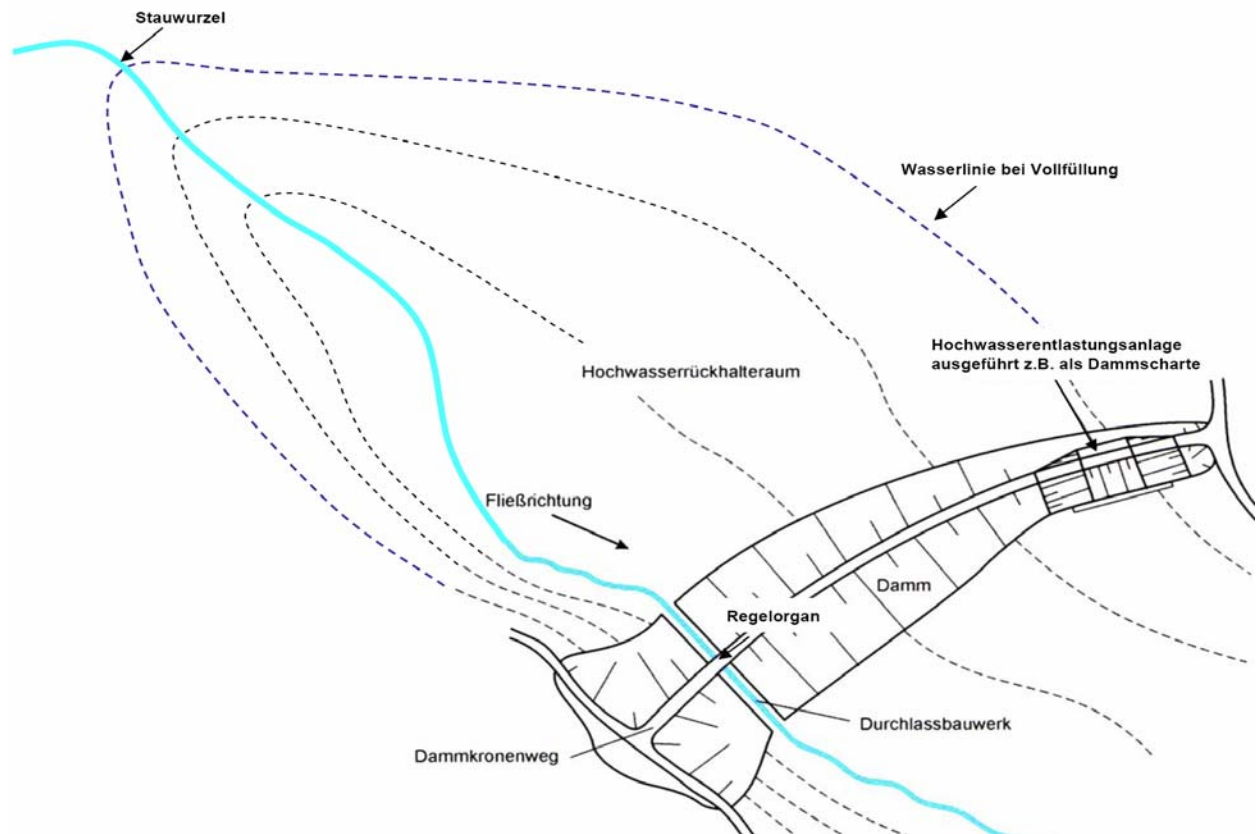
- gesteuert
- ungesteuert

**Hochwasserentlastung:**

- im Durchlassbauwerk
- über den Damm in Form einer Dammscharte/ eines überströmbaren Dammes

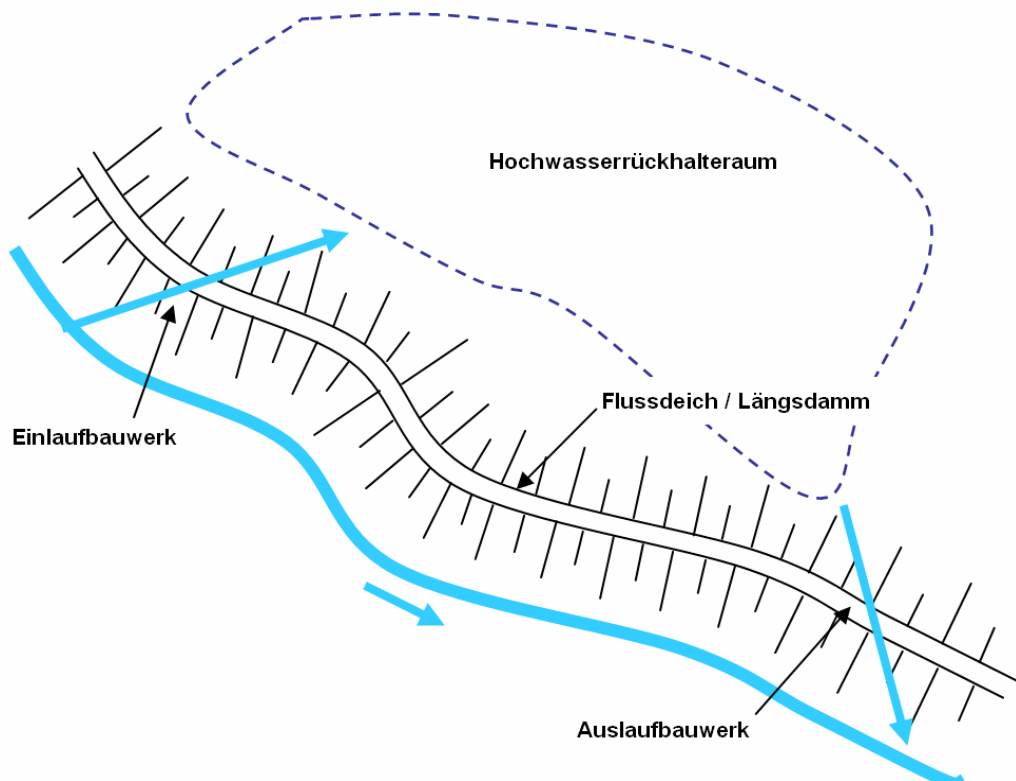
**3.1.3 Lage des HRB zum Gewässer**

Ein Hochwasserrückhaltebecken besteht aus dem Absperrbauwerk und dem zugehörigen Staubecken. Je nach Lage der Becken zum Gewässer unterscheidet man Becken im Hauptschluss und Becken im Nebenschluss. Staubecken im Hauptschluss werden vom Gewässer unmittelbar durchflossen. Das Absperrbauwerk ist quer zum Tal angeordnet.



**Abbildung 3.3:** Systemskizze eines HRB im Hauptschluss, verändert nach [LFU 2004]

Staubecken im Nebenschluss sind seitlich neben dem Gewässer angeordnet und werden über Zuleitungskanäle, Streichwehre oder andere Einlaufbauwerke gefüllt und über Auslassbauwerke entleert. Für die Rückhaltung sind Längs- und ggf. zusätzliche Seitendämme erforderlich. Hochwasserrückhaltebecken im Nebenschluss werden zumeist an Gewässern gebaut, welche bereits eingedeicht sind. Dort kann der bestehende Flussschleppweg modifiziert werden und als Längsdamm dienen.



**Abbildung 3.4:** Systemskizze eines HRB im Nebenschluss

### 3.1.4 Gesteuertes / ungesteuertes HRB

Hochwasserrückhaltebecken sollen den Zufluss des Beckens, der bei Hochwasserereignissen bis zum Bemessungsereignis auftritt, so weit reduzieren, dass im Unterlauf keine größeren Abflüsse auftreten, als an den Engstellen des Gewässers schadlos abgeführt werden können. Hierzu müssen die Abgaben aus dem Grundablass bzw. Betriebsauslass auf einen festgelegten Abgabewert, den so genannten Regelabfluss, gedrosselt werden. Für diese Abflussdrosselung stehen verschiedene Steuerungsarten zur Verfügung. Auf die zwei Wichtigsten wird im Folgenden kurz eingegangen.

#### **Ungesteuerte Abgabe:**

Bei einer ungesteuerten Abgabe (vgl. Abbildung 3.5) des Beckens erfolgt der Abfluss über einen Grundablass, der einen konstanten Durchflussquerschnitt aufweist. Die Abflusskurve des Grundablass stellt die hydraulische Leistungsfähigkeit des Durchlasses als Funktion des Wasserstands im Becken dar. Der Durchlass muss dabei so bemessen sein, dass beim maximalen Wasserstand (gewöhnliches Stauziel), der beim Bemessungsereignis auftritt, gerade der maximal zulässige Abfluss (Regelabfluss) aus dem Becken abgegeben wird. Dies wird in der Regel der bordvolle Abfluss im zu schützenden Bereich des Gewässers sein.

Der Regelabfluss tritt somit im Verlauf des Bemessungsereignisses nur zu dem Zeitpunkt auf, bei dem das Becken vollständig gefüllt ist. Der Durchlassquerschnitt muss somit recht klein sein. Dies hat zur Folge, dass der Beckeneinstau bereits bei kleinen Hochwasserereignissen, bei denen noch keine Hochwassergefahr vorhanden ist, beginnt [IWG 2006].

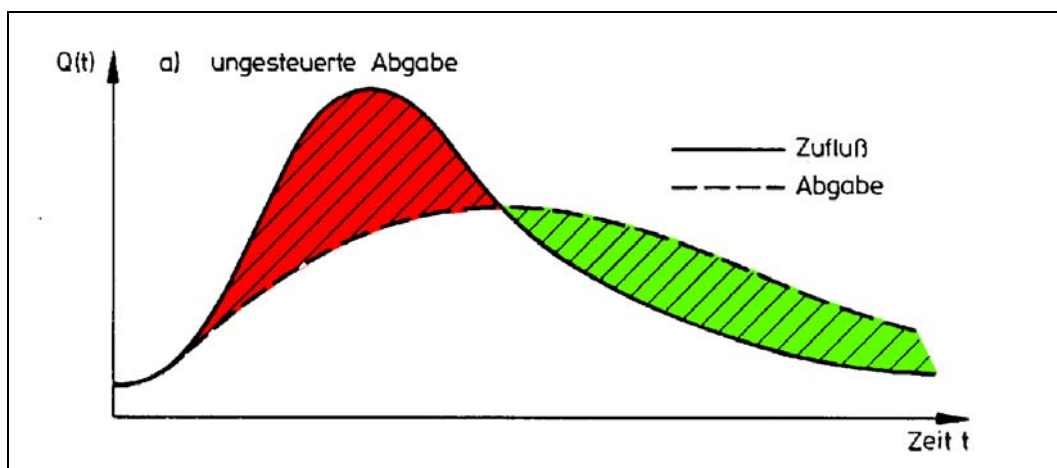


Abbildung 3.5: Ungesteuerte Abgabe [IWG 2006].

#### Gesteuerte Beckenabgabe:

Bei der gesteuerten Abgabe (vgl. Abbildung 3.6) wird versucht, das vorhandene Beckenvolumen optimal für die Abflussdrosselung einzusetzen, oder bei vorgegebenem Regelabfluss das kleinste erforderliche Beckenvolumen einzusetzen. Dieses Ziel kann dadurch erreicht werden, indem in den Ablauf eines Hochwasserereignisses nicht eingegriffen wird, solange die Zuflüsse zum Becken kleiner oder gleich dem Regelabfluss sind. Erst wenn die Zuflüsse den Regelabfluss überschreiten, setzt die Abflussdrosselung ein und die Beckenabgaben werden möglichst konstant auf der Größe des Regelabflusses gehalten.

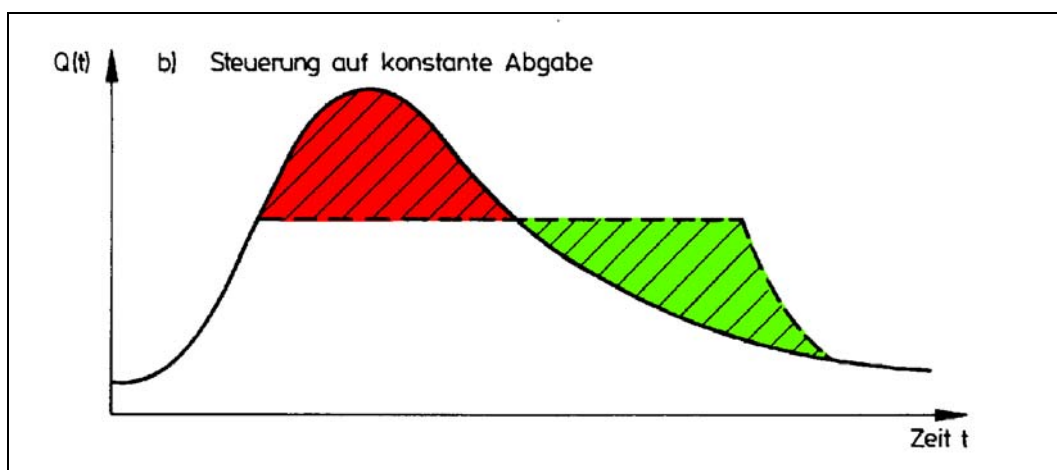


Abbildung 3.6: Gesteuerte Abgabe [IWG 2006].

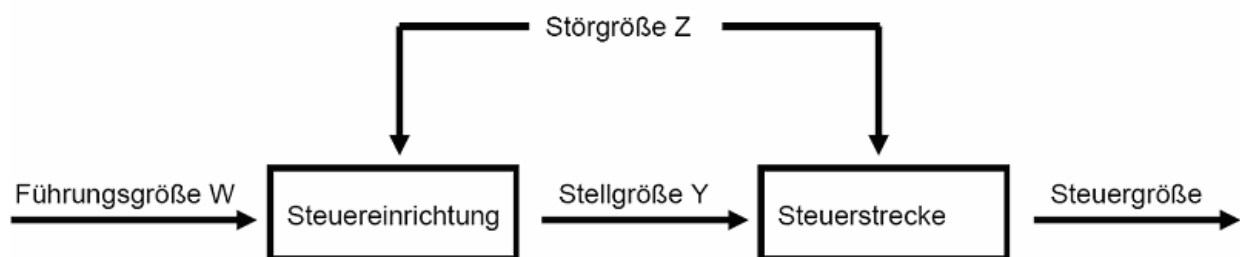
Eine gesteuerte Abgabe erfordert zusätzliche technische Einrichtungen. In der Phase des Beckeneinstaus nehmen der Speicherinhalt und damit auch der Beckenwasserstand mit der Zeit ständig zu. Auf Grund der steigenden Druckhöhe würde der Abfluss aus dem Becken bei konstanter Schieberstellung analog zur ungesteuerten Abgabe ansteigen. Um nun die Zunahme des Abflusses zu kompensieren, ist es notwendig den Durchflussquerschnitt als Funktion des Beckenwasserstands zu verändern. Dies bedeutet, dass der Grundablass für den aktuell vorhandenen Beckenwasserstand gesteuert werden muss [IWG 2006].

### 3.2 Steuerung – Regelung

Im Zusammenhang mit dem Funktionsprinzip der Schwingklappe ist es wichtig, die Begriffe Steuerung und Regelung klar voneinander abzugrenzen. Nachfolgend werden die Begrifflichkeiten daher näher definiert und erläutert.

Die DIN 19226 definiert den Begriff der Steuerung wie folgt:

*Das Steuern – die Steuerung – ist ein Vorgang in einem System, bei dem eine oder mehrere Größen als Eingangsgrößen andere als Ausgangsgrößen auf Grund der dem System eigentümlichen Gesetzmäßigkeit beeinflussen. Kennzeichen für die Steuerung ist der offene Wirkungsablauf über das einzelne Übertragungsglied oder die Steuerkette.*



**Abbildung 3.7:** Struktur einer Steuerung

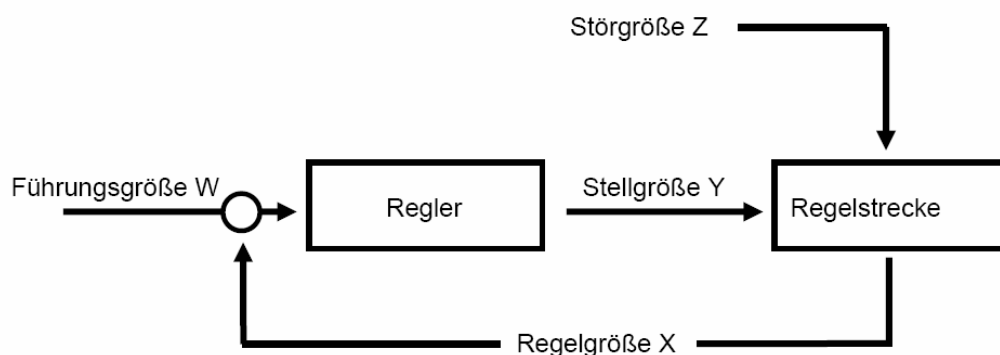
Beispiel für eine Steuerung ist eine Heizung, die nur die Außentemperatur (Führungsgröße  $W$ ) misst und auf Grund deren Wert den Raum beheizt (Steuergröße). Das Heizen hat auf die Außentemperatur keinen Einfluss. Kommt es im Raum zu einer Störung z.B. durch Öffnen eines Fenster (Störgröße  $Z$ ), so wird dies nicht vom System erkannt oder ausgeglichen. Es werden folglich keine Informationen rückgeführt.



Im Gegensatz dazu definiert die DIN 19226 den Begriff der Regelung wie folgt:

*Das Regeln, die Regelung, ist ein Vorgang, bei dem fortlaufend eine Größe, die Regelgröße (zu regelnde Größe), erfasst, mit einer anderen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird. Kennzeichen für das Regeln ist der geschlossene Wirkungsablauf, bei dem die Regelgröße im Wirkungsweg des Regelkreises fortlaufend sich selbst beeinflusst.*

Bei der Regelung wird die zu regelnde Größe (Regelgröße  $X$ ) fortlaufend „gemessen“ und mit der vorgegebenen Führungsgröße  $W$  verglichen. Besteht zwischen diesen beiden Größen eine Differenz, so wird abhängig von der Größe der Differenz ein Verstellvorgang eingeleitet. Bei der Regelung wird also der tatsächliche Wert des Ausgangs auf den Regler zurückgeführt, so dass Störungen automatisch ausgeglichen werden. Kennzeichen der Regelung ist somit ein geschlossener Wirkungsablauf (vgl. Abbildung 3.8).



**Abbildung 3.8:** Struktur einer Regelung

Im oben genannten Beispiel der Heizung eines Raumes kann anstelle der Steuerung auch eine Regelung implementiert werden. Die Raumtemperatur (Führungsgröße  $W$ ) wird am Thermostatventil eingestellt. Das Ventil verändert den Warmwasserstrom durch den Heizkörper und damit die Raumtemperatur. Der Sensor des Thermostatventiles misst die aktuelle Temperatur (Regelgröße  $X$ ) und vergleicht diese mit der Führungsgröße  $W$ . Stimmen die beiden Temperaturen nicht überein, wird die Ventilöffnung (Stellgröße  $Y$ ) verändert. Wenn äußere Störungen mit der Störgröße  $Z$  auftreten (z.B. offenes Fenster) so wird dies vom Regler erkannt und die Stellgröße entsprechend angepasst.

### 3.3 Aspekte der Durchgängigkeit

Ein natürliches Fließgewässer stellt sich als ein longitudinales Kontinuum von der Quelle bis zur Mündung dar, bei dem jedoch auch die laterale Komponente (also der Austausch zwischen Gewässer und Aue) und die vertikale Komponente (die Verbindung zum Kieslückensystem, also dem Interstitial) eine entscheidende Rolle spielen [VANNOTE], [STANFORD], [JUNK]. Innerhalb dieses Kontinuums existiert ein Ressourcengradient, entlang dessen Fauna und Flora strukturiert sind und sich entwickeln. Vor allem bei der Gewässerfauna erfolgt einerseits eine Verhaltensanpassung und andererseits eine evolutive Anpassung an die Verhältnisse innerhalb des Kontinuums.

Wird das Kontinuum unterbrochen, greifen diese Anpassungen nicht mehr. So wird beispielsweise das natürliche Ausbreitungsverhalten der Organismen gestört, was wiederum zur Isolation, zur genetischen Verarmung und im Extremfall zur Auslöschung von Populationen führen kann. Somit ist die Möglichkeit zur Wanderung in und entlang der Fließgewässer für viele Arten überlebenswichtig. Das gilt für aquatische Organismen wie Fischen und Benthosorganismen ebenso wie für Landtiere und Tiere der Wasserwechselzone.

Im Gewässer selbst wandern sämtliche aquatische Organismen mehr oder weniger weit. Fische unternehmen entsprechend ihrer Lebenszyklen zielgerichtete Wanderungen gewässerauf- oder gewässerabwärts. Sie legen dabei oft größere Strecken zurück (bis zu vielen hundert Kilometern). Im Gegensatz dazu bewegen sich die wirbellosen Kleintiere (Makrozoobenthos) eher kleinräumig. Neben diesen aktiven Wanderbewegungen finden auch passive Ortsverlagerungen statt. Viele Tiere und Pflanzen driften mit der fließenden Welle ab und breiten sich dadurch passiv aus oder besiedeln auf diese Weise gezielt neue Lebensräume. Solche passive Verdriftungen müssen andererseits aber häufig durch aktive Aufwärtsbewegungen kompensiert werden.

Bei diesem Themenkomplex dürfen die Wanderungen von zahlreichen landgebundenen Tieren entlang der Gewässer nicht vernachlässigt werden. Gleiches gilt für flugfähige Insekten und Säugetiere. Die durchgehenden, meist bewachsenen Ufer dienen als Wanderwege oder zumindest als Orientierungshilfe.

Die Durchgängigkeit von Gewässern ist somit für die Erhaltung der betreffenden Arten eine grundlegende Voraussetzung. Wanderungen oder Bewegungsmöglichkeiten im Wasser, am Ufer, in Seitengewässern und in Auen hinein müssen möglich sein. Damit wird deutlich, dass die Längsdurchgängigkeit eine entscheidende Voraussetzung für ein intaktes Fließgewässer ist. Auch die EU-Wasserrahmenrichtlinie berücksichtigt dies, indem sie die Durchgängigkeit als eine zentrale Zielvorgabe verankert. Einen Überblick zu den Grundlagen der Durchgängigkeit für Tiere gibt der Leitfaden „Durchgängigkeit für Tiere in Fließgewässern, Leitfaden Teil 1 – Grundlagen“ (LFU2005).

Querbauwerke in Fließgewässern, wie beispielsweise die Absperrdämme an Hochwasserrückhaltebecken, stellen einen massiven Eingriff in das Längskontinuum eines Fließgewässers dar. Durch diese Anlagen mit Damm und Durchlassbauwerk werden sowohl die aquatische, als auch die amphibische und terrestrische Längsdurchgängigkeit der Fließgewässer beeinträchtigt, indem sie oftmals ein Wanderungshindernis bilden (z.B. LWA 1992, DVWK 1993, KAPPUS et al. 1999). Detaillierte Angaben zu wichtigen Tierarten und Hinweise zum Einfluss von Hochwasserrückhaltebecken auf diese Arten können im Lebensraumkatalog nachgelesen werden [LRKAT].

Neben einer direkten Beeinflussung der Organismen kommt der Einfluss auf die morphologischen, hydraulischen und stofflichen Prozesse hinzu, welche sich auf die Ausprägung des Lebensraums Fließgewässer auswirken (beispielsweise auf die Substratzusammensetzung der Gewässersohle). Details zum Einfluss von Hochwasserrückhaltebecken auf das Gewässer werden im Bericht zum BWPLUS-Projekt „Kriterien für Gestaltung, Betrieb sowie Unterhaltung von Stau- und Retentionsanlagen zur Gewährleistung der ökologischen Durchgängigkeit“ (BWR 24005) beschrieben.

### **3.4 Durchlasstypen und Durchgängigkeit**

Alle Hochwasserrückhaltebecken im Hauptschluss sind mit einem Durchlassbauwerk ausgestattet, durch welches das Wasser bei Niedrig- und Mittelwasserabflüssen weitestgehend ungestört aus dem Speicherraum in das Unterwasser fließen kann. Dabei gibt es eine Reihe verschiedener Konstruktionstypen für diese Durchlassbauwerke.

Noch vor weniger als zwanzig Jahren wurden Durchlässe an Absperrdämmen an Hochwasserrückhaltebecken meistens als einfach gesteuerte oder ungesteuerte Rohrdurchlässe ausgeführt. Diese bilden ein Wanderhindernis für aquatische Organismen auf Grund der hohen Fließgeschwindigkeiten und des fehlenden Substrats und Lichts innerhalb des Rohrs.

Aufgrund der aufkommenden Diskussionen über ökologische Aspekte beim Bau von Hochwasserrückhaltebecken wurden verstärkt Alternativlösungen gesucht. Dabei hat sich vor allem die Stauwandvariante mit Betriebsauslass und steuerbarem Schütz durchgesetzt. In einem weiteren Entwicklungsschritt wurde der Durchlass in zwei Teile unterteilt mit dem Ziel, das für viele aquatische Lebensformen lebensnotwendige Sohlsubstrat vor Erosion zu schützen. So entstanden der Betriebsauslass und der in einem Gerinne parallel dazu verlaufende „Ökodurchlass“, über den das Wasser bei Niedrig- und Mittelwasserabflüssen in den Unterwasserbereich geleitet wird. Im Betriebsfall wird das Wasser über den befestigten Betriebsauslass abgelassen, um ein Ausspülen des Sohlsubstrats im Durchlassbereich zu verhindern.

Eine ausführliche Bewertung verschiedener Durchlasstypen erfolgte im BWPLUS-Projekt „Kriterien für Gestaltung, Betrieb sowie Unterhaltung von Stau- und Retentionsanlagen zur Gewährleistung der ökologischen Durchgängigkeit“ (BWR 24005), deren Ergebnisse im entsprechenden Bericht nachgelesen werden können.

### 3.5 Die Schwingklappe, Stand des Wissens

Das Konzept der Schwingklappe wurde Mitte der 90er Jahre erarbeitet. Im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg wurde eine Studie über alternative Durchlassbauwerke für die Abflussregelung und die Bewirtschaftung von Rückhalteräumen von der Ingenieursgesellschaft Breinlinger und Partner aus Tuttlingen bearbeitet. Dieses neuartige Bauwerk sollte folgende Bedingungen erfüllen:

- Optimale Bewirtschaftung der Retentionsräume
- Große Landschaftsverträglichkeit
- Geringe Auswirkungen auf die Flusssdynamik bei kleinen Hochwasserereignissen
- Große Betriebssicherheit
- Geringe Störungen der Durchgängigkeit des Gewässers
- Möglichkeit der ökologischen Flutungen
- Anordnung des Bauwerkes im Hauptschluss
- Geringe Bau- und Betriebskosten (insbesondere Verzicht auf kostenintensive Antriebe)
- Justierbarkeit des Regulierorganes

Die Studie wurde 1998 in der Reihe Handbuch Wasser 2 in Heft 43 von der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg veröffentlicht [LFU 1998]. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass die Schwingklappe im Vergleich zu den näher untersuchten Bauarten mit festen Staubalken eine echte Alternative in Hinblick auf das Abflussverhalten und die Bau- und Betriebskosten darstellt. Auf Grund der Vorteile wird auf weiterführende Untersuchungen verwiesen.

1997 wurde das Institut für Wasserbau und Kulturtechnik (Heute: Institut für Wasser und Gewässerentwicklung) von der Landesanstalt für Umweltschutz Stuttgart beauftragt, eine vertiefende Machbarkeitsstudie zur Schwingklappe zu bearbeiten [IWK 1997]. Anknüpfend an die Studie 1998 wurde das Konzept der Schwingklappe hier weitergehend untersucht. Theoretische Abhandlungen hinsichtlich Konstruktion, Statik und Hydraulik weisen auf Problempunkte hin und geben mögliche Lösungsansätze. Zusätzlich wird der konkrete Einsatz einer Schwingklappe an der Rems diskutiert.

Die Machbarkeitsstudie kommt zu dem Ergebnis, dass die bisherigen Untersuchungen und Studie die Konsistenz der bisherigen Überlegungen zum Konzept der Schwingklappe aufzeigen und dass für die Planung und den Einsatz der Schwingklappe Modelluntersuchungen an einem wasserbaulichen Modell erforderlich sind.

Im Auftrag des Regierungspräsidiums Stuttgart wurden 1998 am Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (Heute: Institut für Wasser und Gewässerentwicklung) wasserbauliche Modellversuche zur Schwingklappe im Maßstab 1:7 durchgeführt [IWK 1998]. Es konnte nachgewiesen werden, dass bei Einhaltung bestimmter Parameter ein selbstständiges Aufrichten der Schwingklappe realisiert werden kann. Für zwei Varianten des Klappenkörpers wurde der Arbeitsbereich in Form eines Wasserstands-Abfluss-Diagrammes aufbereitet. In der Zusammenfassung wird auf die Notwendigkeit von weiterführenden Modellversuchen verwiesen.

### **3.6 Anwendungsbereich der Schwingklappe**

Die ersten Ideen zur Schwingklappe kamen bereits Mitte der 90er Jahre auf. Ein selbstregulierendes Kontrollorgan sollte unabhängig vom Oberwasserstand eine konstante Regelabgabe aus dem Hochwasserrückhaltebecken ableiten.

Mit der Studie der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg [LFU 1998]. wurde dieser Ansatz bestätigt und mit der Beauftragung der Machbarkeitsstudie [IWK 1997] anschließend weiterverfolgt. Bei dem möglichen Einsatzbereich zielte man damals vor allem auf große Becken an der Rems, z.B. ein HRB zwischen Winterbach und Schorndorf im Bereich des Remsknies. Das  $HQ_{100}$  liegt hier bei 266 m<sup>3</sup>/s.

Vorteile versprach man sich vor allem hinsichtlich der ökologischen Durchgängigkeit und auf Grund der fehlenden Antriebe und Steuerung durch entsprechend geringen Bau- und Betriebskosten. Obwohl die Ergebnisse des Modellversuches als viel versprechend bewertet wurden, kam es zu keiner weiteren Beauftragung der vorgeschlagenen, weiterführenden wasserbaulichen Modellversuche. An der damals vorgesehenen Stelle steht seit 2005 das HRB 6 Schorndorf/Winterbach mit drei motorgetriebenen Schützen.

Bei der Wiederaufnahme der Untersuchungen zur Schwingklappe in 2005 wurde der Einsatzbereich neu definiert. Die verbesserten Methoden bei der Flussgebietsmodellierung führen vor allem bei den großen Becken zu neuen Anforderungen bezüglich der Stauraumbewirtschaftung. Abhängig von der Prognose der HW-Welle und dem Füllstand Oberstrom liegender Hochwasserrückhaltebecken können verschiedene Szenarien vorgesehen sein. Diese Aufgabe kann nur mittels motorgetriebener Antriebe und einer zentralen Leitstelle gelöst werden.

Da in Bezug auf die Baukosten von großen Hochwasserrückhaltebecken die Investitionen für die Steuer- und Regelung nicht so stark ins Gewicht fallen, büßt in diesem Fall die Schwingklappe ihre wirtschaftlichen Vorteile ein.

In Baden-Württemberg werden aber immer noch eine Vielzahl von kleinen Hochwasserrückhaltebecken gebaut und betrieben. Aus Kostengründen wird hier häufig auf eine Steuerung verzichtet und das Durchlassbauwerk mit einer Blende ausgestattet. Dies wirkt sich negativ sowohl auf die ökologische Durchgängigkeit als auch auf die Stauraumbewirtschaftung aus.

Die Schwingklappe stellt für die kleinen Hochwasserrückhaltebecken eine kostenneutrale, ökologisch interessante Alternative zu den Durchlassbauwerken mit Blende dar. Auf Grund der einfachen und robusten Konstruktion ist auch die Kostenneutralität für den Betrieb gegeben [LFU1998]. Neben dem Einsatz der Schwingklappe bei einem Neubau ist auch die Nachrüstung einer bestehenden Anlage denkbar, da nur wenige Anlagenteile von einem Umbau betroffen wären.

Eine genaue Definition der möglichen Beckengröße ist nicht möglich, da sie von einer Vielzahl an Faktoren abhängt. Hauptkriterium ist dabei die Wirtschaftlichkeit, aus hydraulischer Sicht gibt es keine Größenbeschränkung. Nach derzeitigem Wissensstand erscheint bei HRB mit Dammhöhen kleiner als 4,0 m und Regelabgaben zwischen 0,1 m<sup>3</sup>/s und 3 m<sup>3</sup>/s ein ökonomischer Einsatz der Schwingklappe möglich.

### **3.7 Funktionsprinzip Schwingklappe**

Die hydrologische Auslegung von Hochwasserrückhaltebecken sieht vor, dass der Ausfluss aus dem Becken während des Hochwasserereignisses möglichst konstant auf die so genannte Regelabgabe begrenzt wird. Die Differenz zwischen dem Zulauf und der Regelabgabe wird dabei im Retentionsraum gespeichert. Dies führt dazu, dass das Regulierorgan einen konstanten Abfluss bei unterschiedlichen Beckenwasserständen sicherstellen sollte.

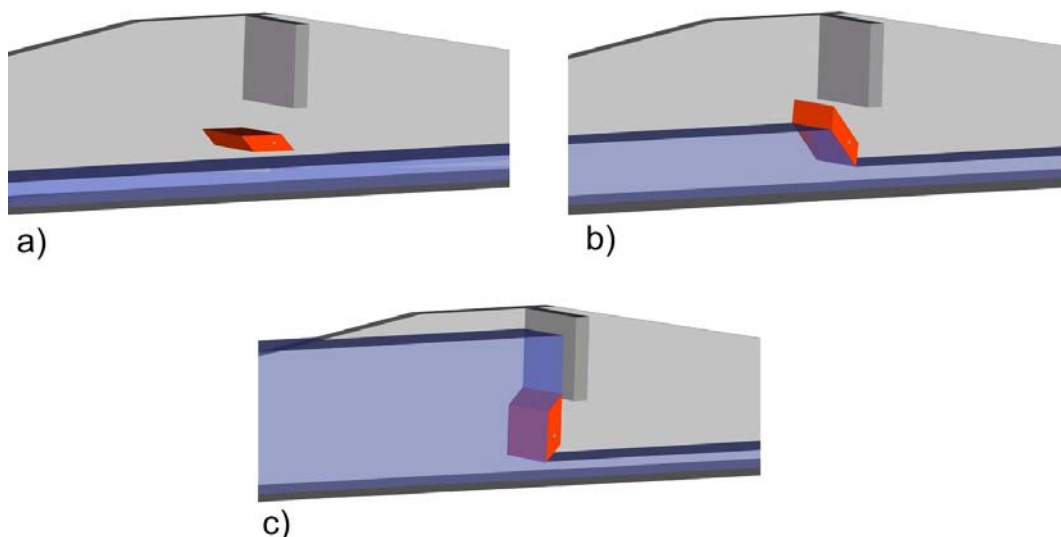
Aus hydraulischer Sicht ist diese Aufgabe nicht einfach zu realisieren. Mit dem Anstieg des Wasserstandes im Stauraum steigt auch das Energieniveau oberstrom des Regulierorganes. Um einen gleichmäßigen Abfluss sicherzustellen muss das Regulierorgan dem steigenden Energieniveau entgegenwirken. Dies geschieht bei motorgetriebenen Schützen z.B. durch eine Verkleinerung der Spaltweite.

Mit der Schwingklappe soll diese Anpassung an die steigenden Wasserstände im Stauraum ohne den Einsatz einer aufwändigen Steuer- und Regeltechnik und ohne den Einsatz von Fremdenergie erfolgen.

Das Funktionsprinzip der Schwingklappe wird in den bisherigen Studien wie folgt beschrieben. Die Schwingklappe ist eine Hohlkörperkonstruktion, die mit einem Freiheitsgrad auf einer Welle gelagert ist. Wenn das Becken nicht eingestaut ist, ruht die Klappe in einer horizontalen Position und gibt einen großen Querschnitt frei (vgl. Abbildung 3.9 a).

Die exzentrisch angeordnete Achse führt dazu, dass sich bei anlaufendem Hochwasser und damit bei Anstieg des Wasserstandes im Retentionsraum der Hohlkörper in Folge des Auftriebs aufrichtet und sich die Spaltweite unter der Klappe immer weiter reduziert. Über einen größeren Abflussbereich kann hierdurch eine nahezu konstante Regelabgabe durch das Bauwerk sichergestellt werden (vgl. Abbildung 3.9 b).

Steigt der Wasserstand im Becken weiter an, richtet sich die Klappe vollständig auf und lehnt sich an die Stauwand (vgl. Abbildung 3.9 c). Für den Fall, dass die Fülle der Hochwasserwelle größer als das Retentionsvolumen ist, muss eine Hochwasserentlastungsanlage vorgesehen werden. Die Hochwasserentlastung bei der Schwingklappe erfolgt nicht im Durchlassbauwerk sondern über eine Dammscharte bzw. einen überströmbaren Damm.



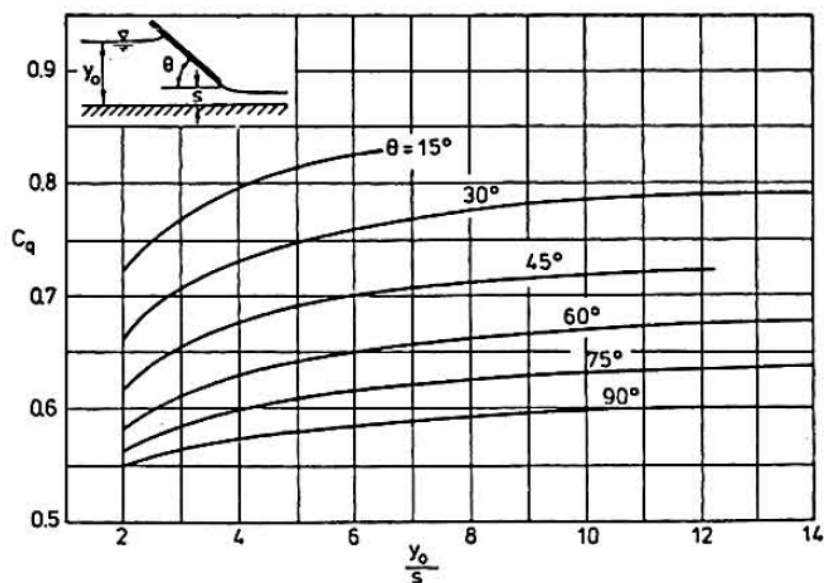
**Abbildung 3.9:** Abflussdrosselung mit der Schwingklappe.



Die Energie für den Aufrichtvorgang wird bei der Schwingklappe lediglich über die Auftriebskraft des Hohlkörpers bezogen. Bei jedem Oberwasserstand bildet sich ein stabiles Momentengleichgewicht um den Lagerpunkt aus der Gewichtskraft, der Auftriebskraft und der Kräfte in Folge der Strömung

Dem steigenden Oberwasserstand und der damit verbundenen Erhöhung des energetischen Potentials im Oberwasser wirkt die Schwingklappe mit einer Verkleinerung der Spaltöffnung entgegen. Mit steigendem Oberwasserstand wird zudem die Neigung der Klappe größer, was sich ebenfalls positiv auf die Abflussdrosselung auswirkt.

Vergleicht man das System der Schwingklappe mit einem scharfkantigen Schütz so kann folgender Zusammenhang abgeleitet werden. Der Abflussbeiwert  $C_q$  eines scharfkantigen Schützes ist Abhängig vom Winkel. Im für die Schwingklappe relevanten Bereich zwischen  $0^\circ < \Phi < 90^\circ$  erreicht der Abflussbeiwert bei  $90^\circ$  sein Minimum (vgl. Abbildung 3.10).



**Abbildung 3.10:** Abflussbeiwerte für Freispiegelschütze mit geneigter Stauwand und freiem Abfluss [NAUDASCHER].

Das Funktionsprinzip der Schwingklappe wurde in den bisherigen Studien bestätigt (vgl. Kapitel 3.5). Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnte jedoch nachgewiesen werden, dass die bisherige Beschreibung des Funktionsprinzipes nicht korrekt ist und ergänzt werden muss. Die Ausführungen hierzu finden sich in Kapitel 4.4.7.

## 4 Hydraulische Untersuchungen an großmaßstäblichen Modellen

### 4.1 Untersuchungsmethodik

Die Komplexität des Abflussverhaltens im Nahbereich eines Tiefschützes und im Durchlassbauwerk selbst schließt eine rein analytische Vorgehensweise zur Untersuchung der Schwingklappe aus. Zudem sind im Rahmen des Forschungsvorhabens auch Aussagen zur Betriebssicherheit bei z.B. Geschwemmselanfall zu treffen, so dass für die Untersuchungen wasserbauliche Modelle gewählt wurden. Am Institut liegen hierzu jahrzehntlange Erfahrungen vor und wasserbauliche Modelle haben sich bei der Lösung derartiger Fragestellungen in der Vergangenheit vielfach bewährt.

### 4.2 Wasserbauliche Modelle

Als Modell wird in der Wissenschaft ein vereinfachendes, aber die wesentlichen interessierenden Merkmale bewahrendes Abbild eines realen Systems und der in ihm ablaufenden Prozesse bezeichnet. Es kann sich dabei um ein rein geistiges (mentales) Modell (z.B. Gedankenexperiment, Vorstellung), um ein physikalisches Analogiemodell (z.B. hydraulisches Modell) oder um eine Beschreibung mit Hilfe mathematischer Gleichungen (z.B. numerisches Modell) handeln. Bei komplexen wasserbaulichen Fragestellungen verwendet man oftmals sog. wasserbauliche Modelle / hydraulische Modelle / physikalische Modelle, um experimentelle Untersuchungen der Fließvorgänge bei vom Wasser durch- oder umströmten Strukturen (z.B. Gewässer, Bauwerken und Anlagen) durchzuführen [IWG].

Der hydraulische Modellversuch wird in der Regel dann eingesetzt...

...wenn die theoretischen Lösungsmöglichkeiten für die Ausbildung von Bauwerken in oder am Wasser ganz oder teilweise fehlen. Dies ist insbesondere bei räumlich komplizierten Bauwerken mit schwer erfassbaren, 3-dimensionalen Strömungsvorgängen der Fall (z.B. Tosbecken hinter Stauanlagen oder Anströmung von Turbinen).

...wenn theoretische Berechnungsansätze zu bestätigen oder in ihnen enthaltene Korrekturbeiwerte zu ermitteln sind (z.B. Überfallbeiwerte bei unterschiedlichen Überfallformen).

Nach [DvWK 39] wird ein wasserbauliches Modell wie folgt definiert.

*„Jedes physikalische Modell zur Simulation von Zuständen, Strömungsvorgängen oder damit zusammenhängenden Erscheinungen, welche Aufgabenstellungen aus dem Wasserbau oder der technischen Hydromechanik betreffen.“*

Zwischen den im Modell und in der Natur ablaufenden Strömungsvorgängen und Erscheinungen muss mechanische Ähnlichkeit vorliegen, um die Modellergebnisse auf die Natur übertragen zu können. Die Forderungen nach der vollständigen mechanischen Ähnlichkeit zwischen Modell und Natur setzt die geometrische, kinematische und dynamische Ähnlichkeit voraus.

Die geometrische Ähnlichkeit liegt vor, wenn alle entsprechenden Strecken  $L$  in der Natur (Index  $N$ ) und im Modell (Index  $M$ ) in einem konstanten Verhältnis zueinander stehen. Dieses Verhältnis ist die Maßstabszahl  $M_L$ . Als Modellmaßstab wird der Kehrwert  $1/M_L$  bezeichnet.

Die kinematische Ähnlichkeit ist der geometrischen Ähnlichkeit übergeordnet und erfordert konstante Verhältnisse an korrespondierende Punkte im Strömungsfeld für Zeitintervalle, in denen geometrisch ähnliche Strecken zurückgelegt werden. Das bedeutet konstante Verhältnisse der Geschwindigkeiten und Beschleunigungen zwischen Natur und Modell.

Die dynamische Ähnlichkeit basiert auf der geometrischen und kinematischen Ähnlichkeit und besagt, dass in Natur und Modell einander entsprechende Kräfte stets im gleichen Verhältnis stehen und die Resultierende auf ein Teilchen in der Strömung und somit auch die Beschleunigung dieses Teilchen in Natur und Modell die gleiche Richtung haben.

Für die Modellbildung lassen sich hieraus folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Die volle dynamische Ähnlichkeit ist nur dann erfüllt, wenn bei Verwendung der gleichen Flüssigkeit in Natur und Modell die Maßstabszahlen für die Längen  $M_L = 1$  und für die Zeit  $M_t = 1$  sind. Dies entspricht einem Modell im Maßstab 1:1.
- Angenäherte dynamische Ähnlichkeit ist dann erreichbar, wenn nur die jeweils zwei dominierenden Kräftearten berücksichtigt werden und der Einfluss der übrigen Kräftearten vernachlässigt werden kann. Trägheitsreaktionen treten in jedem Strömungsvorgang auf und müssen daher immer berücksichtigt werden, so

dass die Maßstabszahl der Trägheitskraft ( $M_{FT}$ ) immer berücksichtigt werden muss. Durch Gleichsetzen von  $M_{FT}$  mit einer der übrigen Kräftemaßstabszahlen erhält man ein jeweils gültiges Modellgesetz und es lassen sich Ähnlichkeitskennzahlen ableiten.

Für die Modellbildung zur Schwingklappe wurden daher die einwirkenden Mechanismen und die dazugehörigen Ähnlichkeitszahlen näher betrachtet. Das System der Schwingklappe und die zu untersuchenden Fragestellungen sind hauptsächlich von Schwere- und Trägheitskräften geprägt, so dass die wasserbaulichen Modellversuche nach dem Froudeschen Modellgesetz durchgeführt werden. Das Froudesche Modellgesetz besagt, dass die dimensionslose Froudezahl sowohl in der Natur als auch im Modell gleich sein muss. Aus dieser Forderung ergibt sich folgende Bedingung:

$$Fr_{Natur} = \frac{v_{Natur}}{\sqrt{g \cdot y_{Natur}}} = Fr_{Modell} = \frac{v_{Modell}}{\sqrt{g \cdot y_{Modell}}} \quad (4.1)$$

In der Formel steht  $v$  für die Fließgeschwindigkeit,  $y$  für die Wassertiefe und  $g$  für die Fallbeschleunigung. Aus diesem Modellgesetz lassen sich die in Tabelle 4.1 aufgelisteten Umrechnungsfaktoren für alle relevanten Größen wie Geschwindigkeiten, Abflüsse und Gewichtskräfte ableiten.

**Tabelle 4.1:** Umrechnungsfaktoren nach dem Froudschen Modellgesetz

| Physikalische Größe | Einheit             | Maßstab 1: $M_L$ |
|---------------------|---------------------|------------------|
| Länge, Breite, Höhe | [m]                 | $(M_L)$          |
| Fläche              | [m <sup>2</sup> ]   | $(M_L)^2$        |
| Volumen             | [m <sup>3</sup> ]   | $(M_L)^3$        |
| Zeit                | [s]                 | $(M_L)^{1/2}$    |
| Geschwindigkeit     | [m/s]               | $(M_L)^{1/2}$    |
| Durchfluss          | [m <sup>3</sup> /s] | $(M_L)^{5/2}$    |
| Gewichte und Kräfte | [N]                 | $(M_L)^3$        |
| Arbeit und Energie  | [J]                 | $(M_L)^4$        |

Die Tatsache, dass man bei der Modellbildung immer nur eine Ähnlichkeitskennzahl exakt betrachtet, kann zu Problemen bei der Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse zurück auf den Prototyp führen. Vor allem bei wasserbaulichen Fragestellungen mit Lufteintrag und bei Schwingungsphänomenen können Maßstabeffekte nicht ausgeschlossen werden. Um einen möglichen Fehler bei der Übertragbarkeit minimal zu halten, wurde für die Hauptversuchsreihe zur Schwingklappe ein großer Maßstab

von 1:2 gewählt. Darüber hinaus wurde in einer Modellfamilie eine weitere Versuchsreihe mit einem Modell der Schwingklappe im Maßstab 1:6 untersucht. Eine detaillierte Beschreibung der eingesetzten Modelle findet sich in Kapitel 4.2.1.

#### **4.2.1 Eingesetzte Modelle**

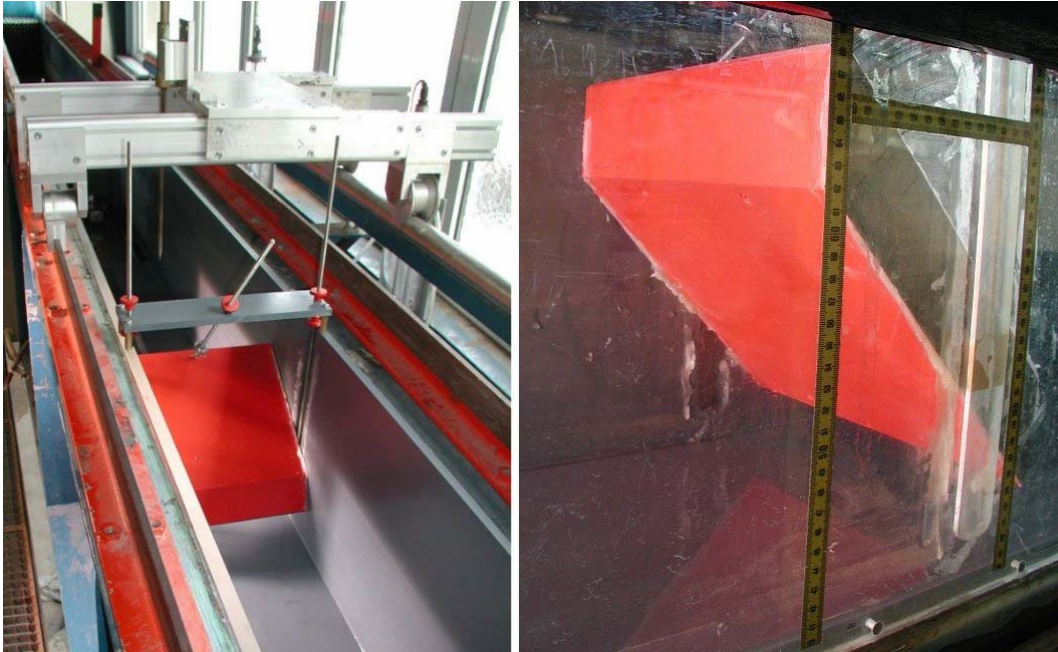
Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden im Theodor-Rehbock-Laboratorium des Instituts für Wasser und Gewässerentwicklung der Universität Karlsruhe mehrere wasserbauliche Versuchsreihen mit unterschiedlichen Maßstäben durchgeführt. Ausgehend von den Ergebnissen der Versuche von 1997 [lwk1997] wurden in einer ersten Versuchsreihe Untersuchungen zur Klappen geometrie und zum Abflussverhalten im Maßstab 1:10 durchgeführt.

Eine detaillierte Betrachtung der Hydraulik und Kinematik der Schwingklappe bei sämtlichen Betriebszuständen wurde im Maßstab 1:2 durchgeführt. Durch die Wahl des großen Maßstabes konnte der Klappenkörper mit Messtechnik bestückt werden und die Betriebszustände sowie die Systemantworten dokumentiert werden.

Um Maßstabeffekte bezüglich des Schwingungsverhaltens ausschließen zu können, wurde der Klappenkörper im Maßstab 1:6 in einer dritten Versuchsreihe weiterführend untersucht.

#### **4.2.2 Modell Maßstab 1:10**

Zur Bestimmung und Validierung des Abflussbeiwertes der Schwingklappe und zur hydraulischen Überprüfung des Vorentwurfes des Klappenkörpers wurde im ein Versuchsstand der Schwingklappe im Maßstab 1:10 eingerichtet. In eine fest installierte, horizontale Rinne mit einer Länge von 12 m und einem Querschnitt von 27 x 36 cm (B x H) wurde mit einem Abstand von 6 m vom Einlauf die Haltekonstruktion für die Schwingklappe eingesetzt. Die Achse der Klappe ist frei drehbar, mittels eines Haltegestänges kann die Neigung für die exakte Bestimmung des Abflussbeiwertes wahlweise fixiert werden. Abbildung 4.1 zeigt den Versuchsaufbau.



**Abbildung 4.1:** Modellversuche, Maßstab 1:10

Messtechnisch wurden der Abfluss mit einem induktiven Durchflussmesser und die Wasserstände ober- und unterstrom der Schwingklappe mit Stechpegeln erfasst. Ergänzt wurden die Messungen durch ausführliche Video- und Fotodokumentationen. Eine Seitenwand der Versuchsrinne ist aus Glas, so dass das Strömungsverhalten im Nahbereich des Klappenkörpers mittels Tracerzugabe visualisiert und dokumentiert werden konnte.

### 4.2.3 Modell Maßstab 1:2

#### 4.2.3.1 Modellaufbau

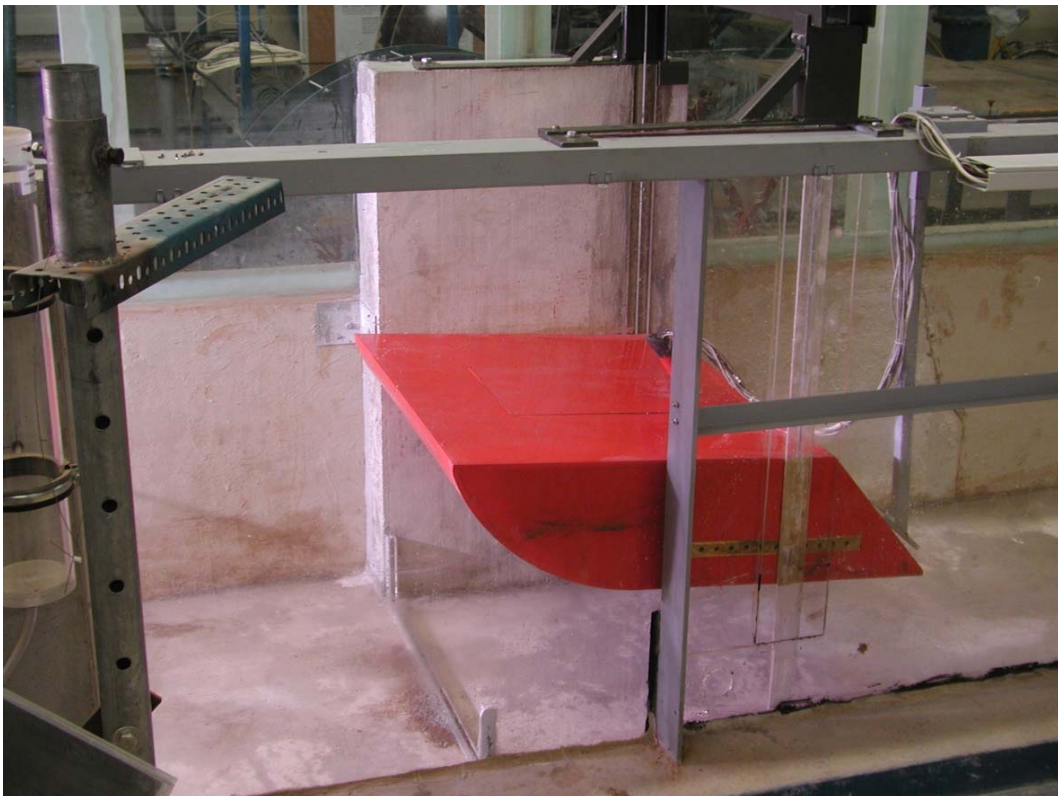
Im Theodor-Rehbock-Wasserbaulaboratorium wurde ein Versuchsstand mit der Schwingklappe im Maßstab 1:2 errichtet. Die Rinne hat eine Gesamtlänge von 11,2 m, ist 1,0 m breit und 1,25 m hoch. Am Übergang des Zulaufbeckens zur 4,9 m langen Anströmung auf die Schwingklappe ist eine Beruhigungswand aus Lochziegeln angeordnet. Im Bereich der Schwingklappe ist die Seitenwand aus Plexiglas ausgeführt, so dass das Strömungsgeschehen optisch beobachtet und dokumentiert werden kann.

Die 0,8 m breite Schwingklappe ist auf der einen Seite plan an der Gerinneberandung gelagert, auf der anderen Seite ist das Lager in einem Pfeiler integriert. Durch die gewählte Versuchsanordnung als 3D-Ausschnittsmodell können somit Aussagen zum Einfluss der Lagerung und der hydraulischen Kontur des Zulaufbereiches gemacht werden.

Unterstrom des Klappenkörpers folgt eine 6,3 m lange Gerinnestrecke mit anschließendem Rücklauf in das Kreislaufsystem. Der Wasserstand im System kann mittels Stellbleche am Auslauf des Versuchsstandes eingestellt werden.

Der Abfluss im Versuchsstand ist wegen der horizontalen Sohle leicht ungleichförmig. Zum einen ist die Sohle im Durchlassbereich bei vielen gebauten Hochwasserrückhaltebecken ebenfalls horizontal, so dass die Versuchsanordnung einen praxisrelevanten Bezug hat.

Darüber hinaus ist der Versuchsstand zur Schwingklappe als „hydraulisch kurzes“ Modell ausgelegt. Das bedeutet, dass das Strömungsverhalten im Bereich der Bauwerke überwiegend durch die Bauwerksgeometrie bestimmt (lokale Verluste auf Grund von Umlenkungen, Ablösungen, usw.) bestimmt wird und die kontinuierlichen Reibungsverlusten entlang der Gerinneberandung und der Sohle eine untergeordnete Rolle spielen. Die Wasserstands-Abfluss-Beziehung im Unterwasser der Schwingklappe wird also nicht über eine Kalibrierung der Wandrauheit erreicht sondern über die Unterstrom angeordneten Stellbleche eingestellt.



**Abbildung 4.2:** Ansicht Versuchsstand Maßstab 1:2

#### 4.2.3.2 Steuerung und Regelung des Versuchsstandes

Der Versuchsstand wird über zwei getrennte Pumpensysteme aus dem Kreislaufsystem des Theodor-Rehbock-Wasserbaulaboratoriums mit einem maximalen Gesamtabfluss von bis zu 450 l/s gespeist. Die DN-300 Zulaufleitungen sind beide mit einem induktiven Durchflussmesser (IDM) und einem Motor-Plattenschieber mit Wegaufnehmer und Stellgeber ausgestattet.

Die Wasserstände im System werden über ein magnetostriktives Messverfahren mittels zweier MTS-Sonden vom Typ Tempotronics-RB der Firma MTS-Sensors 1,95 m oberstrom und 3,70 m unterstrom des Klappenachse gemessen. Die Sonden sind über PVC-Leitungen mit einem Innendurchmesser von 1,0 cm plan an die Gerinneberandung angeschlossen und erfassen über das Prinzip der kommunizierenden Röhre die gedämpften Wasserstandsbewegungen in der Rinne.

Die Schieber können über einen Steuerkasten bedient oder direkt aus dem PC über das Softwarepaket LabView angesprochen werden. Ein softwareseitiger Regler ermöglicht das direkte Anwählen und Konstant-Halten des gewünschten Abflusses bzw. wahlweise des Wasserstandes. Über den Regler können auch definierte Ganglinien und instationäre Abflussszenarien gefahren werden. Der vollständige Regelkreislauf ist in Abbildung 4.3 zusammen mit der eingesetzten Messtechnik dargestellt.

#### 4.2.3.3 Messtechnik

In dem Hohlraum der Schwingklappe sind unterschiedliche Messsonden eingebaut, die kontinuierlich während der Versuchsdurchführung und zeitlich hoch aufgelöst mit einer Abtastfrequenz von 100 Hz sämtliche für die Hydraulik und Kinematik der Klappe wichtigen Parameter erfassen. Die analogen Messwerte werden verstärkt und gefiltert und über einen Analog-Digital-Wandler einem PC zur abschließenden Auswertung übermittelt (vgl. Abbildung 4.3).



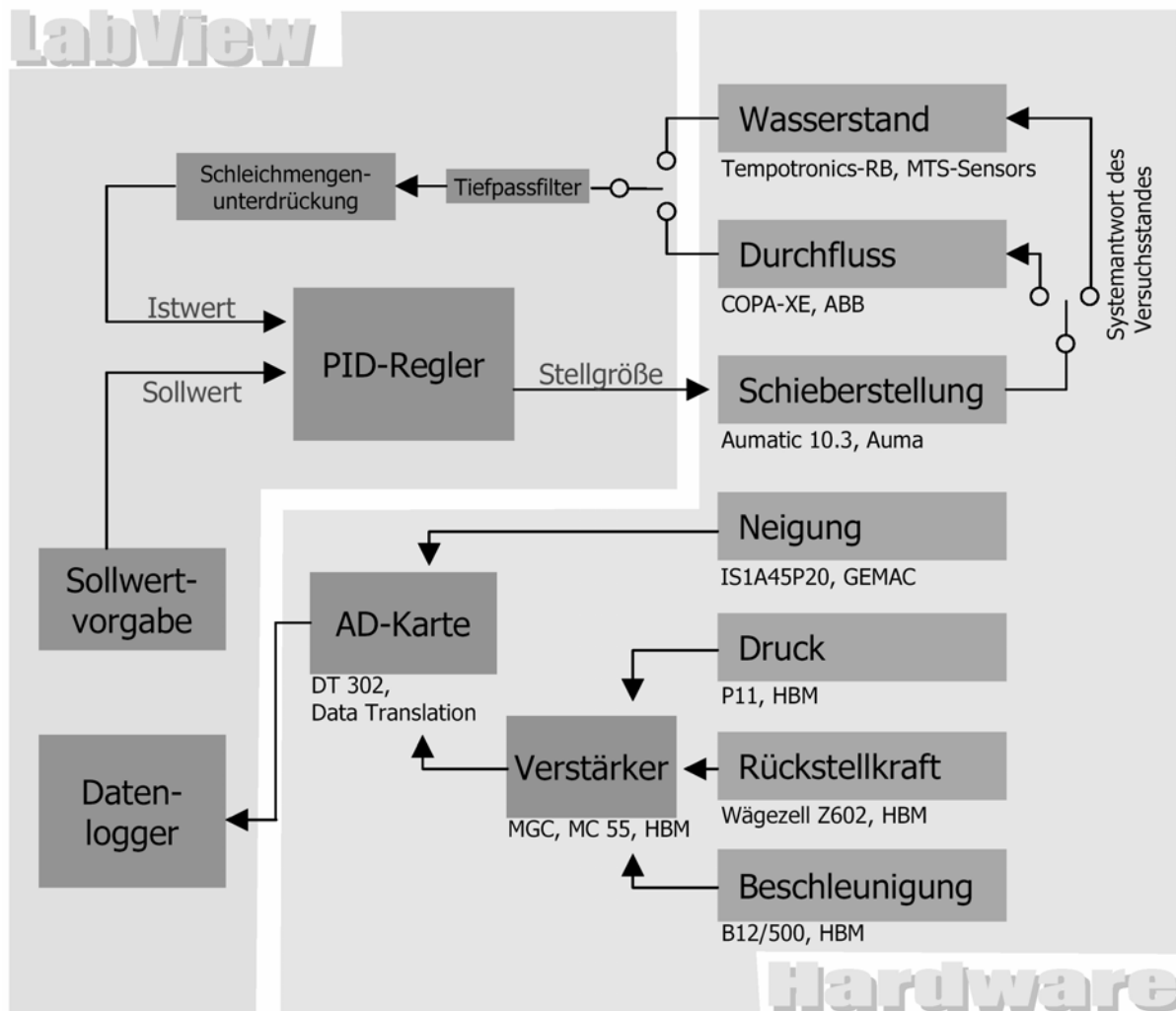


Abbildung 4.3: Schema der Mess- und Regelungstechnik

### - Neigung

Die Neigung der Klappe gegenüber der Ruhelage wird mit einem Neigungsmesser IS1A5P20 von GEMAC mit einem Messbereich von  $\pm 45^\circ$  aufgezeichnet. Der Sensor ist an einer vertikalen Rippe der Schwingklappe in einem Winkel von  $45^\circ$  montiert, Anstellwinkel zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$  können erfasst werden.

### - Druck

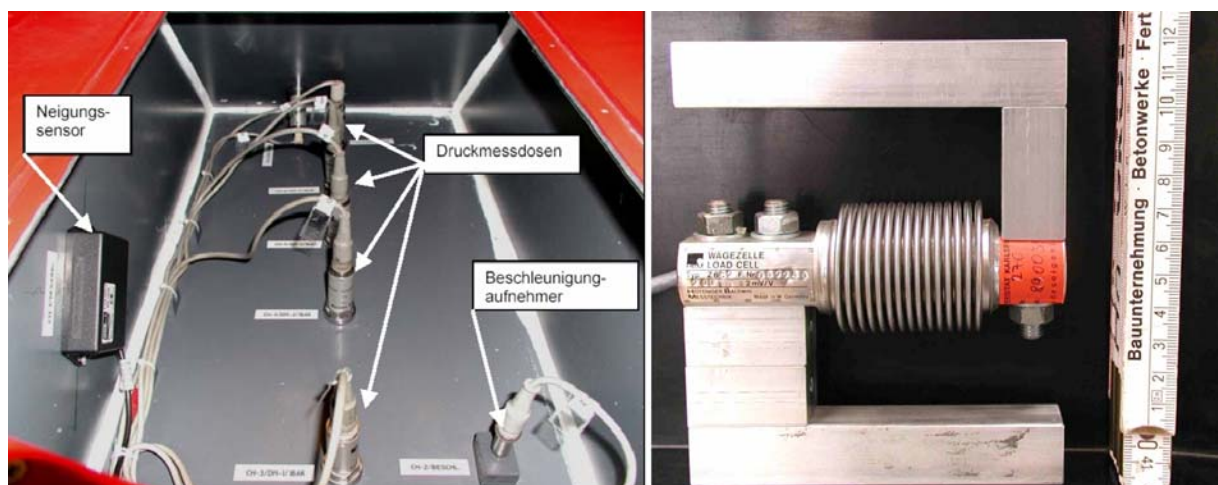
In der Mittellinie der Stauhaut sind 6 Druckmessdosen P11 von Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM) plan eingelassen, wovon eine den Druck auf der Abströmseite der Schwingklappe misst. Aufgrund der baulichen Länge der Messdosen konnten diese nicht bis an die Ablösekante herangeführt werden. Abbildung 4.9 zeigt die Lage der Messstellen.

### - Beschleunigung

Der Beschleunigungssensor B12 von HBM mit einem Messbereich bis zu  $500 \text{ m/s}^2$  ist normal zur Stauhaut montiert. Um für die im Modell typischerweise auftretenden Beschleunigungen eine gute Auflösung des Signals zu erhalten, ist eine Verstärkung um den Faktor 100 integriert.

### - Rückstellkraft

Die Schwingklappe befindet sich in allen Betriebszuständen in einer Gleichgewichtslage aus Strömungs-, Auftriebs- und Gewichtskraft. Die Klappe wird nun im laufenden Betrieb durch ein Herunterdrücken aus diesem Gleichgewicht gebracht und die benötigte Kraft in Abhängigkeit der Änderung des Anstellwinkels mit einer Wägezelle Z602 von HBM mitgeschrieben. Die Wägezelle wird bei allen Versuchen an einem definierten Punkt angesetzt, so dass auch Aussagen über das rückstellende Moment getroffen werden können.



**Abbildung 4.4:** links: Sonden im Klappeninneren; rechts: Kraftmesseinrichtung mit Wägezelle.

#### 4.2.4 Modell Maßstab 1:6

Im Nachgang zum BWPLUS Statuskolloquium 2007 wurde von den Gutachtern angeregt, die Aussagekraft der Modellversuche durch die Betrachtung einer Modellfamilie zu steigern. Diese Anregung wurde in das Untersuchungsprogramm im Rahmen einer kostenneutralen Verlängerung des Forschungsvorhabens um 4 Monate aufgenommen.

Um die Aussagekraft vor allem in Bezug auf die Kinematik und das Schwingungsverhalten zu verbessern, wurden weitergehende Versuche an einem Modell im Maßstab 1:6 durchgeführt. Die Klappengeometrie sowie die Lagerungspunkte wurden dabei gegenüber den Versuchen im Maßstab 1:2 nicht verändert.

Der Versuchsstand wurde in einer fest installierten, horizontalen Rinne mit einer Länge von 12 m und einem Querschnitt von 27 x 36 cm (B x H) installiert. Um eine gleichmäßige Anströmung zu gewährleisten, wurde die Haltekonstruktion für die Schwingklappe in einem Abstand von 6 m vom Rinneneinlauf eingesetzt. Abbildung 4.5 zeigt den Versuchsaufbau.



**Abbildung 4.5:** Versuchsstand Maßstab 1:6.

Messtechnisch wurden der Abfluss mit einem Induktiven Durchflussmesser und die Wasserstände ober- und unterstrom der Schwingklappe mit Stechpegeln erfasst. Ergänzt wurden die Messungen durch ausführliche Video- und Fotodokumentationen. Eine Seitenwand der Versuchsrinne ist aus Glas, so dass das Strömungsverhalten im Nahbereich des Klappenkörpers mittels Tracerzugabe visualisiert und dokumentiert werden konnte.

### 4.3 Konstruktive Gestaltung

#### 4.3.1 Klappenkörper

Zentrales Element der Schwingklappe ist der hohle Klappenkörper. In einer ersten Modelluntersuchung [IWK 2000] wurde ein tragflächenähnliches Profil für die Klappe gewählt. Der Auftrieb der Klappe wurde hauptsächlich über den statischen Auftrieb aufgrund der spezifischen Dichte von kleiner  $1000 \text{ kg/m}^3$  erreicht. Eine Ausnutzung des dynamischen Auftriebs resultierend aus dem Flügelprofil konnte im Rahmen der Untersuchungen nicht realisiert werden. Vielmehr führte die Form zu hydraulischen Problemen: Die abgerundete Stauhaut im unteren Teil der Klappe besaß keinen fixen Ablösepunkt, was zu ständigen Änderungen des Momentengleichgewichts (Gewichts-/Auftriebs- und Strömungskraft) und zu einem hydraulisch instabilen Abflussgeschehen führte. Eine Modifikation der Ablösekante in Form einer Verlängerung der Profilform führte zu keiner Verbesserung (vgl. Abbildung 4.7.)

Bei der Wiederaufnahme der Untersuchungen zur Schwingklappe im Rahmen des Forschungsprojektes „Die Schwingklappe – Ökohydraulisches Durchlassbauwerk für regulierbare Hochwasserrückhalteräume“ wurde ein Fokus der Vorarbeiten auf den Aspekt der Geometrie des Klappenkörpers und der damit zusammenhängenden hydraulischen und kinematischen Prozesse gelegt.

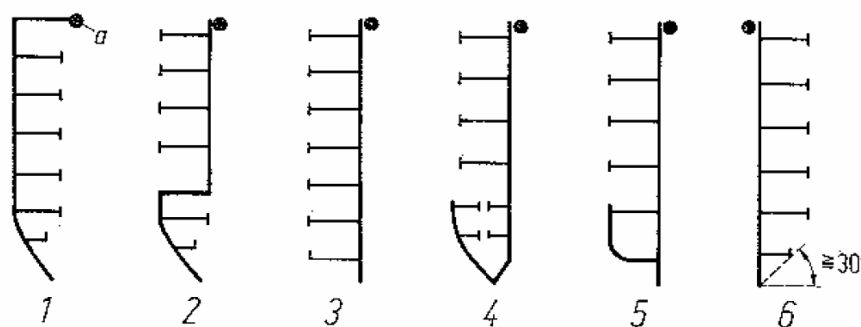
Die Schwingklappe ist aus dem Blickwinkel der Mechanik betrachtet ein System mit einem Freiheitsgrad. Die Gleichgewichtslage reagiert dabei sensibel auf Änderungen im Momentengleichgewicht. Die erste Eigenform ist eine Auslenkung um die Drehachse. Die Eigenform beschreibt die Erscheinungsform der Schwingung eines Körpers mit der Eigenfrequenz. Die Amplituden sind bei der Eigenform maximal. Auf Grund des umgebenden Wasserkörpers im Ober- und Unterwasser ist diese Bewegung stark gedämpft. Wirken äußere, periodische Kräfte in der Größenordnung der Eigenfrequenz der Schwingklappe auf das System ein, so besteht die Gefahr einer Resonanz.

Folglich muss die Konstruktion so gewählt werden, dass Druck- und Geschwindigkeitsoszillationen entlang der Stauwand und am unterwasserseitigen Ende der Schwingklappe minimiert werden. In den bisherigen Studien zum Schwingklappe wurden keinerlei Untersuchungen zum Schwingungsverhalten durchgeführt. Auch in der Literatur sind keine Angaben zur Schwingungsanfälligkeit von drehbar gelagerten Hohlkörpern vorhanden.

In der Literatur finden sich jedoch zahlreiche Beispiele für Schwingungs- und Resonanzphänomene bei unterströmten Schützen. Von der hydraulischen Funktion und der Gestalt des Strömungsfeldes her betrachtet ist eine Analogie zwischen der Schwingklappe und einem unterströmten Schütz sicherlich gegeben.

In Grundlagenuntersuchungen hat [WICKERT] die auslösenden Faktoren für solche Resonanzzustände analysiert und konstruktive Ausführungsvorschläge für resonanzhemmende Schützgeometrien erarbeitet. Im Rahmen einer Literaturrecherche wurden diese Unterlagen gesichtet und die Ergebnisse flossen zusammen mit den Erkenntnissen aus den eigenen Vorarbeiten und Untersuchungen in den Entwurf der Schwingklappengeometrie ein.

Die in Abbildung 4.6 dargestellten Anordnungen von Stauwand, Dichtung und Tragkonstruktion hat [WICKERT] bezüglich ihres Schwingungsverhaltens analysiert. Vor allem die Formen 3 und 5 wirken sich negativ auf das Schwingungsverhalten aus, da es am untersten Riegel zu periodischem Ablösen und Wiederanlegen der Strömung kommen kann. Die anderen Anordnungen von Stauwand, Dichtung und Tragkonstruktion besitzen einen stabilen Ablösepunkt und haben sich zur Verringerung der Schwingungsanfächerung bewährt.



**Abbildung 4.6:** Verschiedene Anordnungen von Stauwand, Dichtung und Tragkonstruktion bei unterströmten Schützen, nach [WICKERT]

Zusammenfassend lassen sich nach [WICKERT] folgende Erkenntnisse und Designkriterien für ein Tiefschütz ableiten:

- Periodische Kräfte erzeugen Schwingungen.
- Die Kräfte stellen sich ein, wenn ein Unterdruck vorhanden ist und die Fläche, auf der dieser Unterdruck wirkt, groß genug ist.
- Die Schützunterkante ist so auszubilden, dass sie wenig umströmte Fläche bietet und ein ortsfestes Ablösen des Strahles erzwingt.
- Die Stauwand sollte wenn möglich nach Oberwasser, die Tragkonstruktion nach Unterwasser gelegt werden.
- Die unterströmte Schneide sollte schmal gehalten werden.
- Eine ausreichend hohe Lage der Tragkonstruktion im UW sollte sichergestellt werden.
- Im unterwasserseitigen Teil der Sohle Störkörper einbringen. Sie bewirken eine Teilung des Strahles und damit eine Veränderung der Kraftangriffsrichtung auf das Schütz. Dieser Effekt kann nur bei schmalen Spaltweiten ausgenutzt werden.
- Bei Rückstau von UW keinen zu steilen Absturz des Wehrhöckers wählen ( $<30^\circ$ ).

Bezüglich des Systems der Schwingklappe ergibt sich zusätzlich die Anforderung, dass diese Kriterien für möglichst alle Betriebszustände erfüllt sein sollten. Vor allem die unterschiedlichen Neigungen engen die Auswahl der optimalen Geometrie weiter ein.

Der Forderung nach einem ortsfesten Ablösepunkt kann mit einer ebenen Stauhaut und einem scharfkantigen unterwasserseitigen Abschluss nachgekommen werden. Die für das Aufrichten benötigte Auftriebskraft kann durch eine Ausführung als Hohlkörper bereitgestellt werden. Ein  $45^\circ$ -Rücksprung der unterwasserseitigen Enden vermindert weitestgehend die Schwingungsanregung infolge der turbulenten Strömung im Tosbecken.

Im Modell im Maßstab 1:10 wurden Versuche zur hydraulischen Kontur des Klappenkörpers und zur Bestimmung des Abflussbeiwertes bei verschiedenen Anstellwinkeln und Spaltweiten durchgeführt.

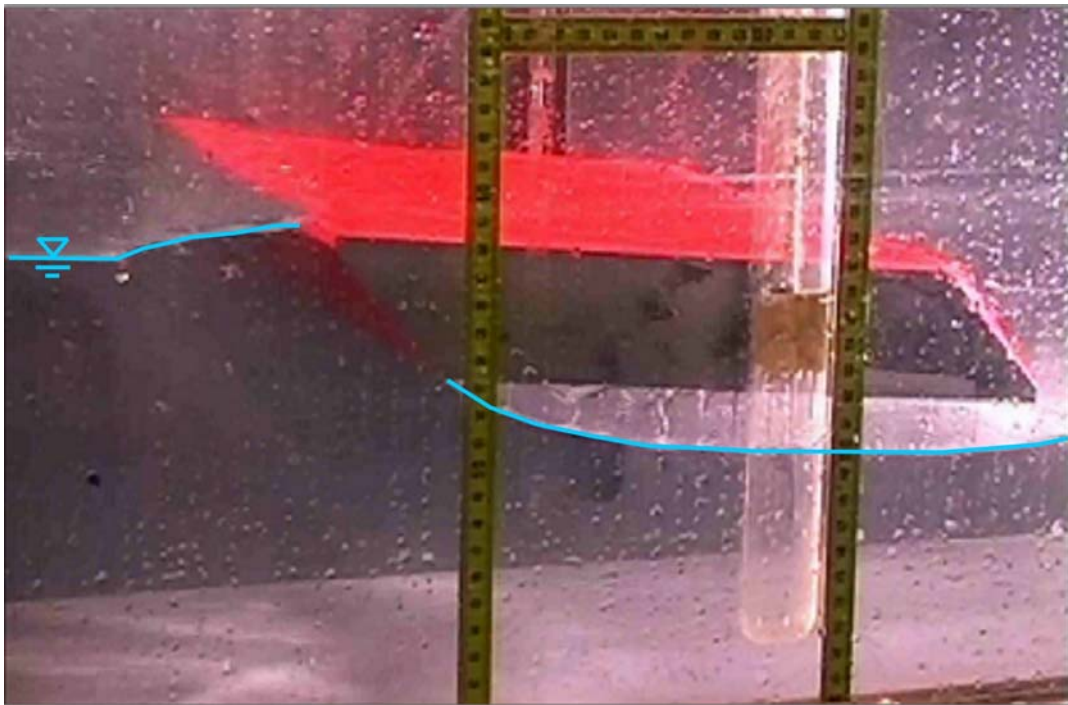
Der eingesetzte trapezförmige Klappenkörper wies folgende Natur-Dimensionen (Prototyp) auf:

|                     |                          |
|---------------------|--------------------------|
| Länge:              | 1,47 m                   |
| Breite:             | 1,62 m                   |
| Höhe:               | 0,30 m                   |
| Gewicht:            | 335,50 kg                |
| Spezifische Dichte: | 469,80 kg/m <sup>3</sup> |



**Abbildung 4.7:** Entwicklung der Klappengeometrie (links: Studie 1998, rechts: Versuche Maßstab 1:10, 2005).

Besonders bei höheren Anströmgeschwindigkeiten konnte das in Abbildung 4.8 dargestellte Abflussgeschehen beobachtet werden: Die Klappe liegt in Ruheposition und erzeugt einen Aufstau nach Oberwasser. Der Strahl löst an der vorderen Kante der Stauhaut ab und legt sich nicht mehr an die Klappe an. Die Strömung löst sich nun nicht mehr an der eigentlichen Ablösekante ab. Die Bestimmung des Abflusses über die Geometrie an der Endkante ist folglich fehlerbehaftet. Im Laufe eines Einstauvorgangs kommt es zu einer räumlichen Wanderung des Ablösepunktes was zu schnellen Änderungen im Momentengleichgewicht und damit verbundenen Schwingungsproblemen führen kann.



**Abbildung 4.8:** Strömungsablösungen an der Schwingklappe, Maßstab 1:10.

Abhilfe wurde über eine modifizierte Kontur im vorderen Bereich der Klappe geschaffen. Anstelle eines kantigen Übergangs wurde die Stauhaut ausgerundet ausgeführt (vgl. Abbildung 4.9). Die Strömung wird am oberwasserseitigen Ende der Schwingklappe gleichmäßig beschleunigt und löst gezielt und ohne räumliche Varianz bei allen Betriebszuständen an der unterwasserseitigen Kante ab.

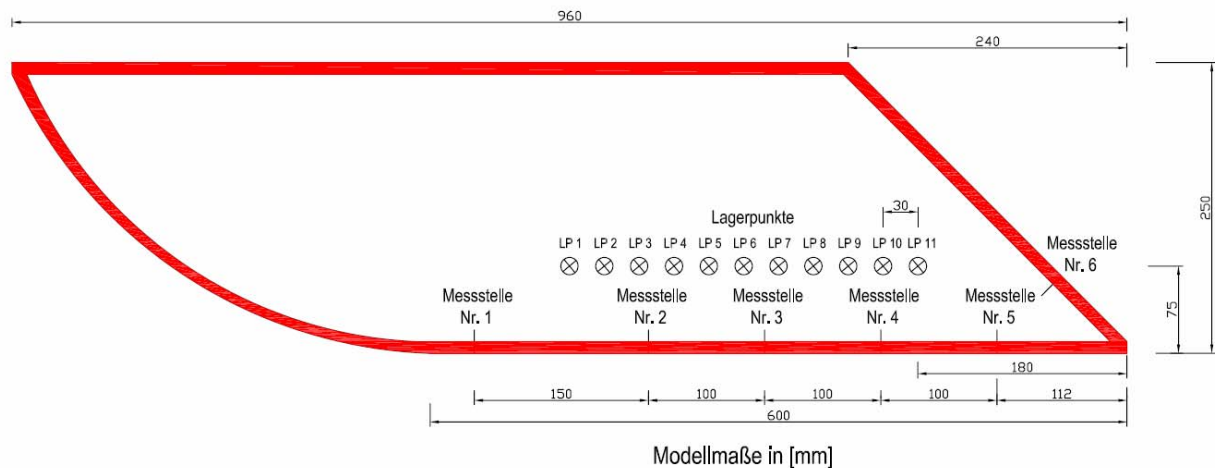
In Zusammenarbeit mit der Firma Hänßler Stahlwasserbau aus Steinen wurde ein Vorentwurf der Schwingklappe erarbeitet und statisch dimensioniert. Tragendes Element hierbei ist der Hohlkörper selbst. Die zwei Außenwangen mit der Aufnahme der Lagerung sowie zwei Stützrippen werden mit der Stauhaut und der luftseitigen Abdeckung beplankt und wasserdicht verschweißt. Bei einer Ausführung der Beplankung in Edelstahl ergeben sich folgende Daten für den Prototypen Maßstab 1:1:

#### Geschlossener Hohlkörper

|                     |  |
|---------------------|--|
| Bauweise:           | Rippenskelett; Beplankung: 3 mm Edelstahl Außenhülle |
| Länge:              | 1,92 m   |
| Breite:             | 1,60 m   |
| Höhe:               | 0,50 m   |
| Gewicht:            | 360,00 kg  |
| Spezifische Dichte: | 298,15 kg/m <sup>3</sup>                             |



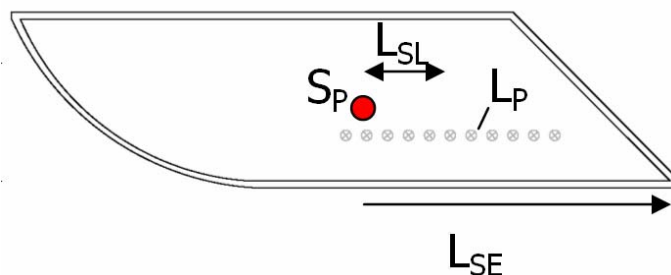
Aus fertigungstechnischen Gründen wurde die Schwingklappe für die Modellversuche Maßstab 1:2 aus PVC erstellt. Der Aufbau der Konstruktion mit Außenwangen und Stützrippen wurde beibehalten. Die Abmessungen der Modellklappe sowie die Lage der Druckmessstellen sind in Abbildung 4.9 aufgetragen.



**Abbildung 4.9:** Modellabmessungen der Schwingklappe, Maßstab 1:2

### 4.3.2 Lagerung

Das Funktionsprinzip der Schwingklappe beruht darauf, dass der Hohlkörper frei auf einer Achse gelagert ist. Die Lage der Drehachse hat dabei maßgeblichen Einfluss auf das Aufschwimmverhalten der Klappe und der damit verbundenen Drosselwirkung. Die Untersuchungen zur Lage der Drehachse wurden modelltechnisch mittels 11 verschiedener Lagerungspunkte realisiert. Tabelle 4.2 gibt einen Überblick über die untersuchten Lagerungspunkte.



- mit:
- $S_P$  = Lage des Schwerpunktes
  - $L_P$  = Lage des Lagerpunktes
  - $L_{SL}$  = horizontaler Abstand zwischen Schwer- und Lagerpunkt
  - $L_{SE}$  = horizontaler Abstand zwischen Schwerpunkt und Klappenendkante

**Abbildung 4.10:** Definition der Lagerungspunkte

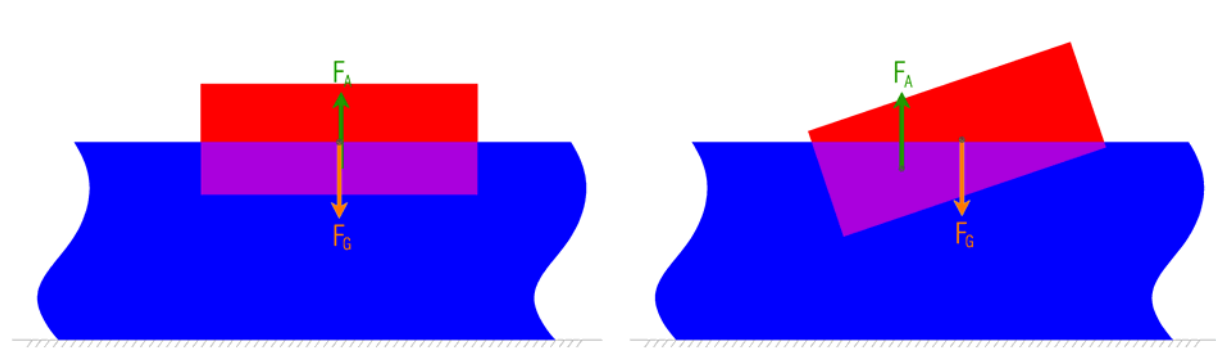
**Tabelle 4.2:** Geometrische Abhängigkeit Lagerungspunkt-Schwerpunkt

| <b>Aufbau:</b> Schwerpunkt bei 50.9 % der Klappenlänge (von Endkante aus) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Lagerungs-<br>punkt Nr.   | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    |
| LSL: [cm]   | 1,75  | 7,75  | 13,75 | 19,75 | 25,75 | 31,75 | 37,75 | 43,75 | 49,75 | 55,75 | 61,75 |
| LSE: [cm]   | 96    | 96    | 96    | 96    | 96    | 96    | 96    | 96    | 96    | 96    | 96    |
| LS =<br>LSL/LSE [-]   | 0,018 | 0,081 | 0,143 | 0,206 | 0,268 | 0,331 | 0,393 | 0,456 | 0,518 | 0,581 | 0,643 |

Die Ebene mit den Lagerungspunkten ist bei Betrachtung der Prototyp-Klappe in Ausgangslage (horizontal) um 20 cm von der Mittellinie nach unten verschoben. Hierdurch wird eine stabilere Gleichgewichtslage vor allem beim beginnenden Aufschwimmvorgang erwartet, was zu einer Verminderung der Gefahr von resonanten Schwingungsverhalten führt. Hintergrund dieser Überlegungen ist die Analogie der Schwingklappe zur Schwimmstabilität von eingetauchten Körpern.

#### Hintergrund:

Befindet sich ein schwimmender Körper in der Gleichgewichtslage, so liegen die Wirkungslinien der Gewichtskraft und Auftriebskraft übereinander (vgl. Abbildung 4.11 links). Wird der Körper aus der stabilen Gleichgewichtslage (GGW) gebracht, so verschiebt sich der Mittelpunkt des eingetauchten Volumens, wohingegen der Körpermittelpunkt unverändert bleibt. Die Wirkungslinien der beiden Kräfte sind nun nicht mehr identisch; es entsteht ein Drehmoment (vgl. Abbildung 4.11, rechts).

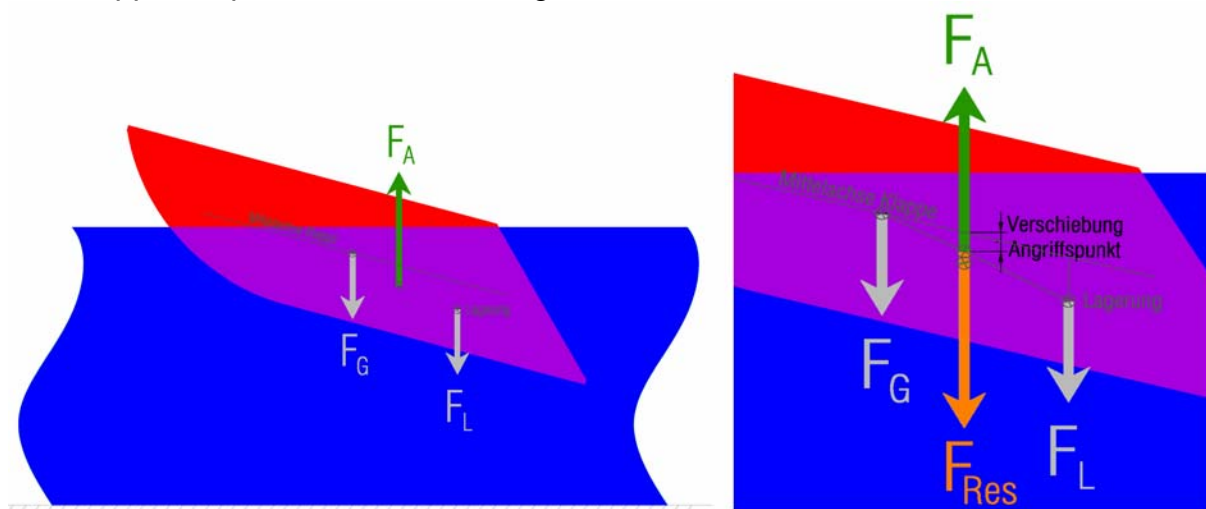


**Abbildung 4.11:** Schwimmstabilität eines frei schwimmenden Quaders (

Ob dieses Drehmoment zur Rückkehr in die ursprüngliche Lage (stabile Schwimmelage) oder in einen neuen Zustand führt (instabile Schwimmelage), hängt von der Lage der Kraftangriffspunkte ab. Je weiter der Angriffspunkt für die Gewichtskraft oberhalb des Angriffspunktes für die Auftriebskraft liegt, desto instabiler ist der Gleichgewichtszustand.

Übertragen auf die Schwingklappe stellt sich folgendes System ein. Neben den Angriffspunkten für die Gewichts- und Auftriebskräfte gibt es noch den Angriffspunkt der Lagerkraft. Diese wirkt in die gleiche Richtung wie die Gewichtskraft, so dass diese auch zusammengefasst werden können (vgl. Abbildung 4.12). Da jede Lage der Schwingklappe eine Gleichgewichtslage ist, liegt die Wirkungslinie dieser resultierenden Kraft auf der Wirkungslinie der Auftriebskraft.

Durch die Verschiebung der Lagerebe nach unten wird auch der Kraftangriffspunkt der resultierenden Kraft nach unten verschoben. Der Abstand zwischen dem Angriffspunkt der resultierenden Kraft und der Auftriebskraft wird verkleinert, was zu einer stabileren Schwimmelage führt. Diese Überlegungen sind beim Entwurf und der Dimensionierung des Klappenkörpers ebenfalls mit eingeflossen.



**Abbildung 4.12:** Kräfteverhältnisse an der Schwingklappe bei beginnendem Aufschwimmvorgang.

Die konstruktive Ausbildung der Lagerung für die Pilotanlage wurde im Rahmen des Forschungsprojektes nicht abschließend erarbeitet. In Zusammenarbeit mit der Firma Hänßler Stahlwasserbau wurde bei der Dimensionierung des Klappenkörpers ein Bronze-Gleitlager mit einem Lagerspiel von 1/10 bis 1/30 mm fixiert. Ziel war die Erarbeitung eines einfachen und robusten Konzeptes.

### 4.3.3 Dichtung

Der Übergangsbereich zwischen Hohlkörper und Seitenwand kann auf Grund der zugelassenen Bewegung nicht bündig hergestellt werden. In Absprache mit der Firma Hänßler Stahlwasserbau sollte im Bewegungsbereich die Seitenwand mit einer Edelstahlplatte versehen werden, um eine glatte Oberfläche und konstante Spaltweiten sicherzustellen.

Aus hydraulischer Sicht ist eine Abdichtung nicht notwendig, da das Durchlassbauwerk nicht komplett verschließbar ausgeführt wird. Die Spaltströmung hat keinen signifikanten Einfluss auf den Gesamtabfluss oder das Aufschwimmverhalten. Für das Untersuchungsprogramm wurde eine Prototyp-Spaltweite von 1,0 cm gewählt.

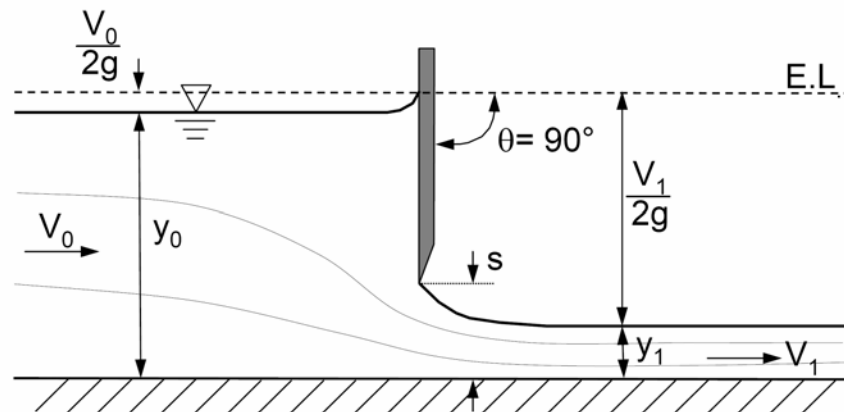
Im Zuge der Untersuchungen zur Betriebssicherheit der Anlage wurde die Gefahr einer Verklausung des Spaltes untersucht und konstruktive Lösungsvorschläge wurden erarbeitet. Weitere Informationen hierzu finden sich in Kapitel 4.8.

## 4.4 Hydraulik

Für die Bemessung der Schwingklappe ist eine genaue Kenntnis des hydraulischen Verhaltens bei sämtlichen Betriebszuständen nötig. Die nachfolgenden Ausführungen gehen dabei detailliert auf die wichtigsten Faktoren ein. Die Diagramme und Darstellungen sind, wenn möglich, normiert, ansonsten beziehen sie sich auf den Prototypen der Schwingklappe im Maßstab 1:1 (vgl. Kapitel 4.3.1)

### 4.4.1 Abflussbeiwert

In der Literatur gibt es eine Vielzahl von Untersuchungen zum Abflussverhalten von unterströmten Schützen. Dabei kann festgestellt werden, dass keine eindeutige Bezeichnung der Eingangsgrößen vorhanden ist. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Nomenklatur ist vor allem im englischsprachigen Raum weit verbreitet. Abbildung 4.13 zeigt den freien Abfluss unter einem Schütz.



**Abbildung 4.13:** Freier Abfluss unter einem Schütz

Im Falle eines freien Abflusses unter dem Schütz übernimmt das Schütz die Abflusskontrolle, es erzwingt einen Fließwechsel vom strömenden Abfluss im Oberwasser hin zum schießenden Abfluss im Unterwasser. Hier verlaufen die Stromlinien parallel, so dass eine hydrostatische Druckverteilung vorliegt.

Das Strömungsgeschehen im Schützbereich ist dagegen stark ungleichförmig. An der Schützunterkante löst sich die Strömung ab, um sich noch weiter einzuengen. Der Bereich der geringsten Wassertiefe des Schussstrahles wird als *Vena Contracta* bezeichnet und kann über die Beziehung

$$y_1 = C_c \cdot s \quad (4.2)$$

beschrieben werden, wobei  $C_c$  als Kontraktionsbeiwert bezeichnet wird.

Geht man von reibungsfreien Strömungsverhältnissen zwischen den Querschnitten 0 und 1 aus, so gilt:

$$y_0 + \frac{V_0^2}{2g} = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \quad (4.3)$$

umgeformt nach  $V_1$  und nach Gl. 4.2

$$V_1 = \sqrt{2g \cdot (y_0 - C_c \cdot s) + V_0^2} \quad (4.4)$$

Aus der Kontinuitätsbedingung

$$Q = V_1 \cdot C_c \cdot s \cdot B \quad (4.5)$$

folgt der Standardtyp der Abflussformel unter einem Schütz:

$$Q = C_c \sqrt{1 - \frac{C_s s}{y_0} + \frac{V_0^2}{2g \cdot y_0}} \cdot \sqrt{2g \cdot y_0} \cdot s \cdot B \quad (4.6)$$

Fasst man die ersten beiden Terme auf der rechten Seite als Abflussbeiwert  $C_q$  zusammen, so gilt:

$$Q = C_q \cdot \sqrt{2g \cdot y_0} \cdot s \cdot B \quad (4.7)$$

Der Abflussbeiwert  $C_q$  ist keine feste Größe sondern hängt von einer Vielzahl von Einflussfaktoren ab.

$$C_q = f \left( \frac{s}{y_0}, Fr_0, \theta, \text{Geometrie}, Re, We \right) \quad (4.8)$$

Eine direkte Bestimmung bzw. Berechnung des Abflussbeiwertes  $C_q$  mit geometrischen oder hydraulischen Parameter ist dabei nicht möglich. Für den planenden Ingenieur stehen daher in der Literatur Tabellenwerke für gebräuchliche Schützformen zur Verfügung, in denen der Abflussbeiwert  $C_q$  anhand der Schützform und geometrischer Randbedingungen ermittelt werden kann. Besondere Bauformen oder An- und Abströmsituationen sind hierbei meist nicht berücksichtigt.

Im Falle eines freien Ausflusses hat Werner (1963) nachgewiesen, dass unter Beachtung der kinematischen Zusammenhänge und der Stromlinientheorie eine Berechnung des Kontraktionsbeiwertes  $C_c$  anhand der geometrischen Verhältnisse bei Vernachlässigung der Reibung und der Gravitation möglich ist.

Aigner (1997) hat auf Grundlage der Herleitung von Werner einen Algorithmus entwickelt, mit dem der theoretische Kontraktionsbeiwert  $C_c$  unter Beachtung des Strömungszustandes berechnet werden kann [AIGNER].

Die praktische Anwendbarkeit dieses Berechnungsverfahrens ist gering. Vernachlässigt man jedoch die Erdbeschleunigung und die Energieverluste, so kann das Gleichungssystem maßgeblich vereinfacht werden. Geht man zusätzlich davon aus, dass die Geschwindigkeitshöhe der Anströmung sehr klein ist ( $s/y_0 = 0$ ), dann gilt:

$$C_{c0} = 1,3 - 0,8 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha - 205}{220}\right)^2} \quad (4.9)$$

Versuche von Franke (1956) haben aufgezeigt, dass der Einfluss der Gravitation auf den Schussstrahl bei relativen Spaltweiten von  $s < y_0/3$  gering ist. Gentilini (1941) konnte mit seinen Versuchen aufzeigen, dass die Ergebnisse seiner Laborversuche nur bei relativen Überdeckungen von  $y_0 < 3s$  größere Abweichungen von den berechneten Werten aufweisen.

Der Einfluss der Neigung der Stauhaut ist bei Gleichung 4.9 berücksichtigt. Die Annahme  $s/y_0 = 0$  stellt jedoch keinen praxisrelevanten Zustand dar, so dass Aigner der Frage nachgegangen ist, ob der Abflussbeiwert  $C_q$  auch bei Bedingungen von  $s/y_0 = 0$  dem Kontraktionsbeiwert  $C_c$  gleichgesetzt werden kann.

Der Kontraktionsbeiwert  $C_c$  kann demnach unter Berücksichtigung der Neigung der Stauhaut zu

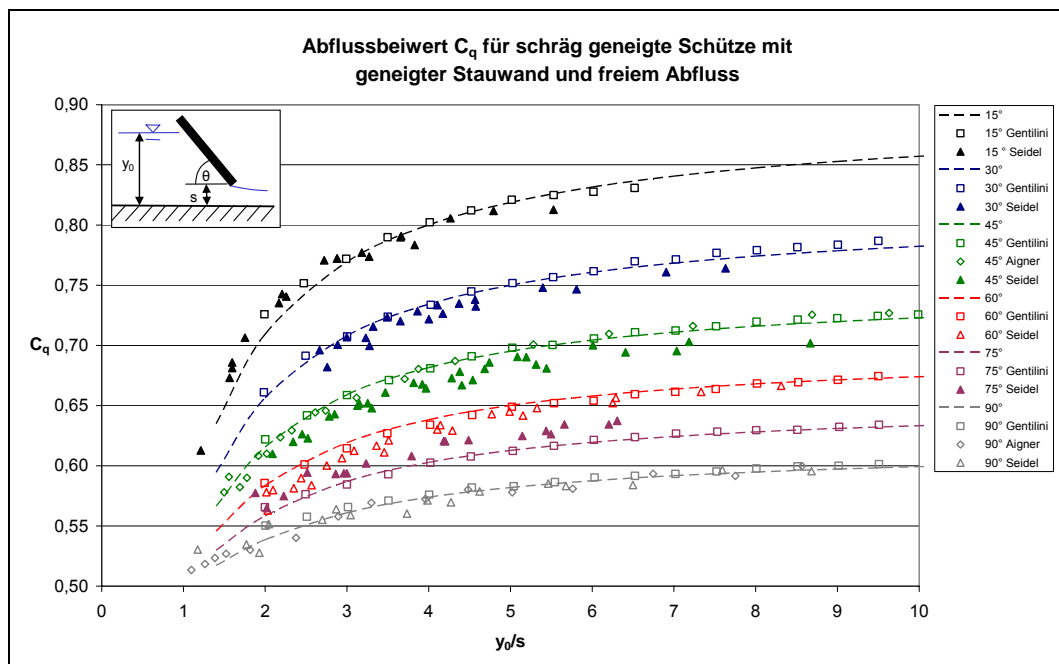
$$C_c = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{C_{c0}} - 1\right) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{s}{y_0}\right)^{\frac{210}{\theta}}}} \quad (4.10)$$

und der Abflussbeiwert  $C_q$

$$C_q = \frac{C_c}{\sqrt{1 + \frac{C_c}{\frac{y_0}{s} - 0,5}}} \quad (4.11)$$

bestimmt werden [AIGNER].

Abbildung 4.14 zeigt einen Vergleich der berechneten Werten nach Gleichung 4.10 und 4.11 mit Messreihen von Gentilini, Aigner und eigenen Untersuchungen an einer starr eingespannten Schwingklappe. Aufgetragen sind nur Abflussbeiwerte im Arbeitsbereich der Schwingklappe zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$ .



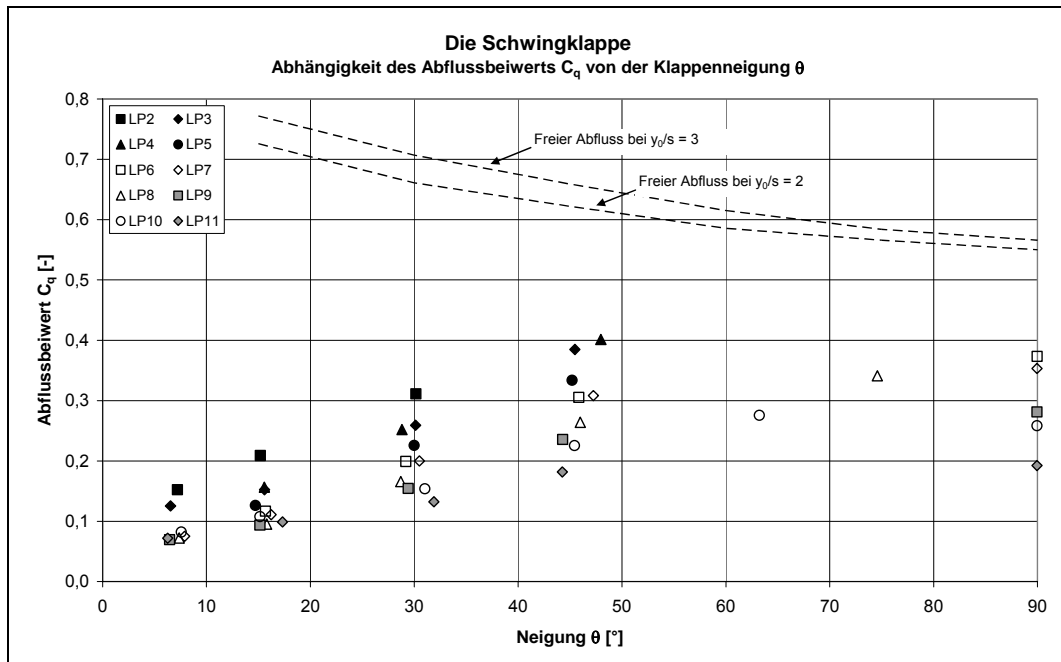
**Abbildung 4.14:** Vergleich der Berechnungsergebnisse nach Aigner mit experimentellen Ergebnissen.

Die Messergebnisse zur Schwingklappe zeigen eine gute Übereinstimmung sowohl mit der theoretischen Herleitung als auch mit Messergebnissen anderer Studien. Die dokumentierten Abweichungen liegen im Bereich der erwarteten Messgenauigkeit. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass das Verhalten der Schwingklappe bezüglich des Abflussbeiwertes sehr gut mit dem eines Planschützes korrespondiert.

Bei der Schwingklappe wurde aus konstruktiven Gründen eine verbreiterte unterstromigen Klappenendkante gewählt. Darüber hinaus war im Versuchsstand im Maßstab 1:2 einseitig die Einlaufgeometrie einer Stauwand eingebaut. Diese konstruktiven Abweichungen von den Grundlagenversuchen führen jedoch zu keinen signifikanten Veränderungen des Abflussbeiwertes und bestätigen damit die gewählte, praxisnahe Versuchsanordnung.

Die Versuche, die in Abbildung 4.14 aufgetragen sind, wurden mit einer fixierten Schwingklappe durchgeführt. Der Aufrichtvorgang wurde dabei bewusst unterdrückt, um den Abflussbeiwert des Klappenkörpers unabhängig von der Betriebsweise zu bestimmen. Um den Abflussbeiwert unter realen Bedingungen, also während des Aufschwimmvorganges zu bestimmen, wurden die Messdaten der Versuche mit einer frei beweglichen Schwingklappe diesbezüglich ausgewertet. Die Ergebnisse für verschiedene Konfigurationen der Lagerung sind in Abbildung 4.15 aufgetragen.





**Abbildung 4.15:** Verhalten des Abflussbeiwertes während des Aufschwimmvorganges

Der Abflussbeiwert  $C_q$  liegt bei allen Versuchen und über den kompletten Arbeitsbereich der Schwingklappe zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$  im Bereich zwischen 0,07 und 0,5. Auffallend ist die große Streubreite des Abflussbeiwertes, die sich aus den unterschiedlichen Lagerungsgeometrien ergibt. Die Ursache hierfür ist im Momentengleichgewicht verankert. In Folge der unterschiedlichen Wahl des Lagerungspunktes verändert sich der Abstand zwischen dem Schwerpunkt des Klappenkörpers und dem Lagerpunkt und damit auch das resultierende Moment aus der Gewichtskraft. Hieraus folgt, dass bei identischer Spaltweite und Anstellwinkel unterschiedliche Oberwasserstände auftreten können. Bei der Rückrechnung des Abflussbeiwertes führt dies zu der beobachteten, großen Streuung.

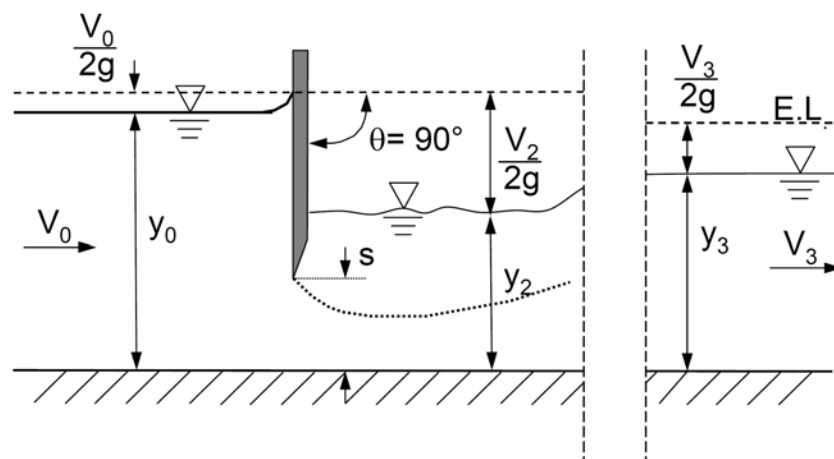
Anzumerken ist, dass die Rückrechnung des Abflussbeiwertes für kleine Neigungen der Schwingklappe physikalisch nicht korrekt ist. In Kapitel 4.4.3 wird ausführlich auf das Drosselverhalten in Abhängigkeit der Neigung eingegangen. Bei der Schwingklappe stellt es sich demnach so dar, dass in Abhängigkeit der Lagerungspunkte der Klappenkörper erst ab einer Neigung von ca.  $10^\circ$  bis  $20^\circ$  in das Abflussgeschehen eingreift. Diese Ergebnisse wurden trotzdem in Abbildung 4.15 aufgenommen, um darzulegen, dass die beginnende Drosselung zu keinen Unstetigkeiten oder Sprüngen im Abflussverhalten führt.

Anhand dieser Auswertung in Abbildung 4.15 kann ferner festgestellt werden, dass das Abflussgeschehen bei der Schwingklappe über den kompletten Aufschwimmvorgang rückgestaut ist. Bei einem freien Abfluss würde sich ein Abflussbeiwert  $C_q$  bei einer Klappenneigung von  $90^\circ$  wie in Abbildung 4.14 dargestellt im Bereich von 0,6 einstellen. Bei kleineren Neigungswinkeln der Schwingklappe müsste der Abflussbeiwert ohne Rückstau einfluss zunehmen, bei  $45^\circ$  würde man Abflussbeiwerte in der Größenordnung von 0,7 erwarten.

Diese Erkenntnis ist neu, die bisherigen Studien zur Schwingklappe haben diesen Aspekt nicht ausreichend beleuchtet bzw. herausarbeiten können. Auf Grund dieser Ergebnisse muss auch das als Stand des Wissens in Kapitel 3.7 beschriebene Funktionsprinzip neu interpretiert werden. Weitere Ausführungen hierzu finden sich in Kapitel 4.4.7.

Abbildung 4.16 zeigt die hydraulischen Verhältnisse an einem Schütz im Falle eines rückgestauten Ausflusses. Der Wasserstand im Querschnitt 3 ist dabei so hoch, dass es nicht mehr zu Ausbildung eines vollkommenen Schussstrahles unter dem Schütz kommt. Auf Grund des fehlenden Überganges vom Strömungszustand *Fließen* zum Strömungszustand *Schießen* übernimmt das Schütz nun auch nicht mehr die Abflusskontrolle. Der Wasserstand im Oberwasser ist demnach eine Funktion aus:

$$y_0 = f(s, \theta, C_q, y_3) \quad (4.12)$$



**Abbildung 4.16:** Rückgestauter Abfluss unter einem Schütz

Während des Aufschwimmvorganges ist der Abfluss unter der Schwingklappe stets rückgestaut. Die Versuchsergebnisse hierzu sind in den Abbildungen 4.17 bis 4.20 mit Grundlagendaten in Bezug gesetzt.

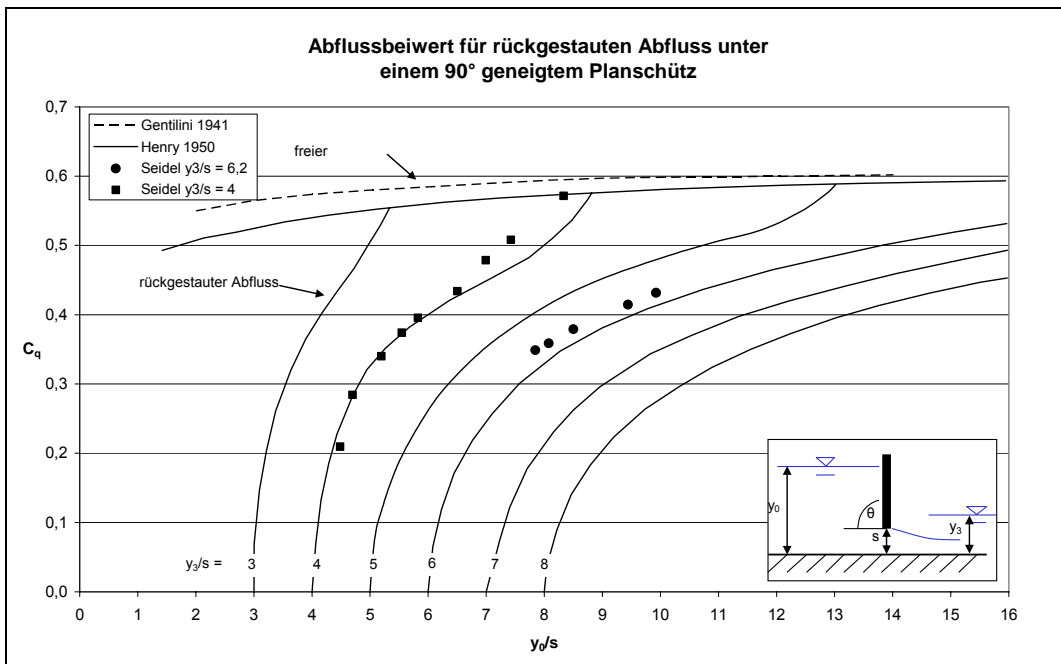


Abbildung 4.17: Rückgestauter Abfluss, Schwingklappe 90°

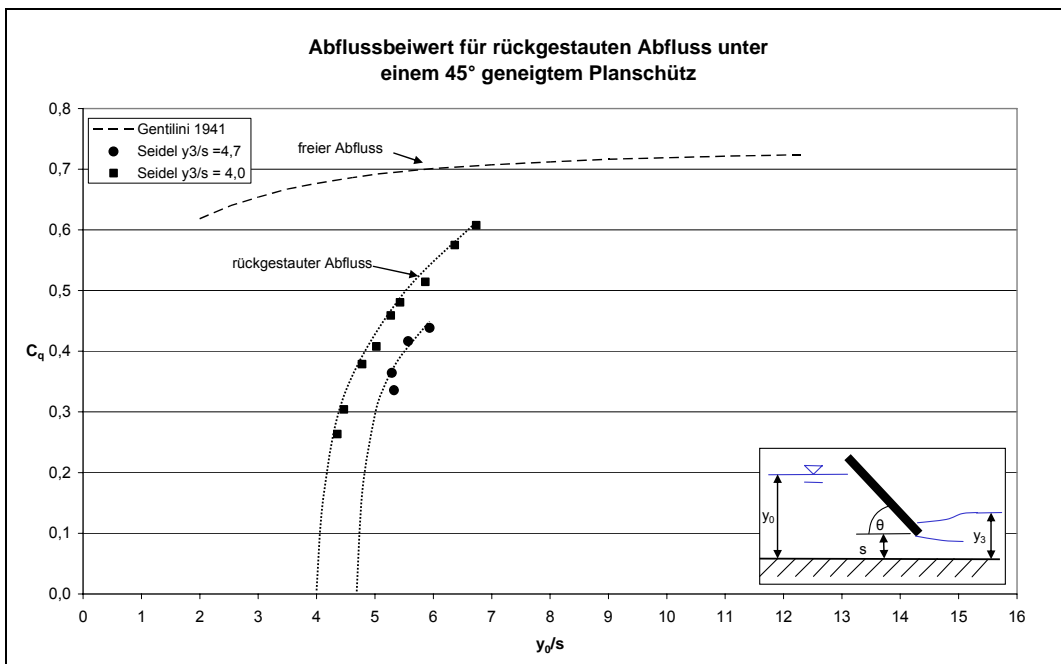


Abbildung 4.18: Rückgestauter Abfluss, Schwingklappe 45°

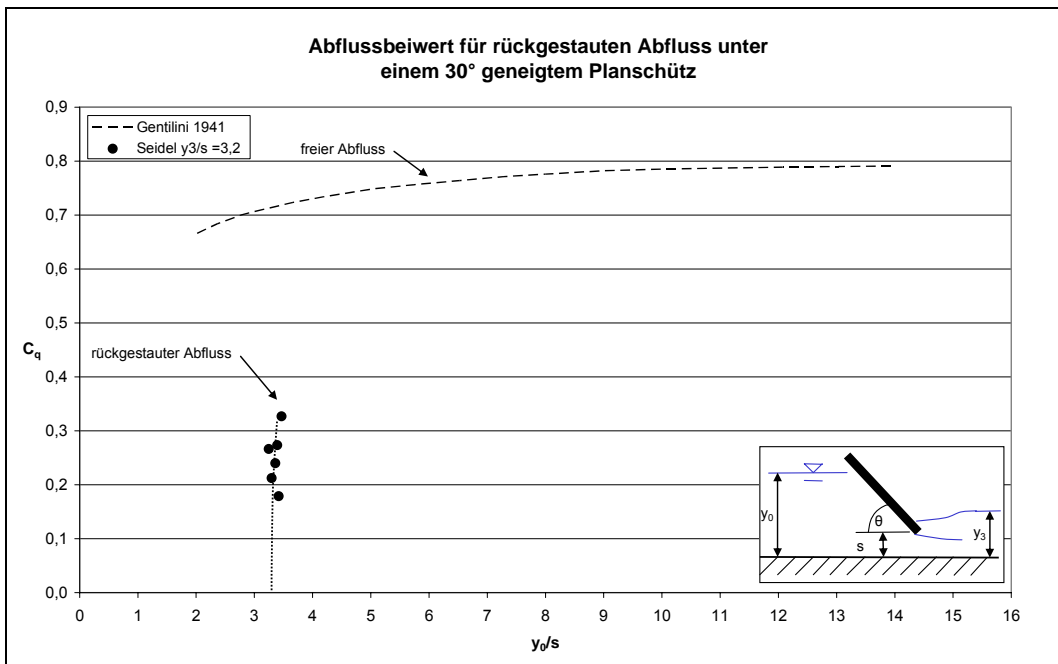


Abbildung 4.19: Rückgestauter Abfluss, Schwingklappe 30°

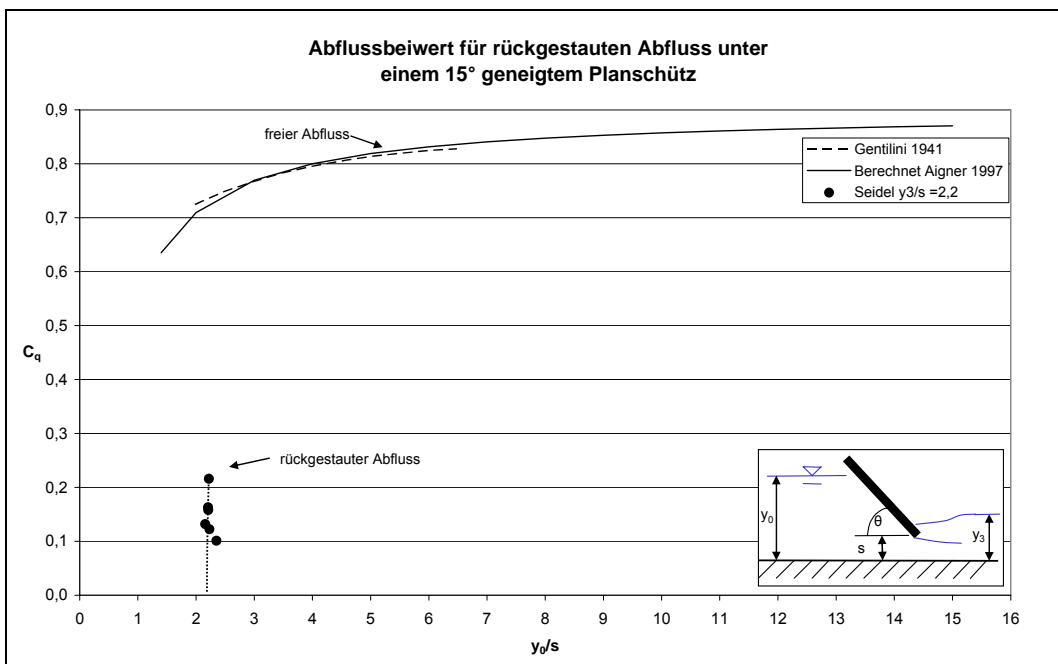


Abbildung 4.20: Rückgestauter Abfluss, Schwingklappe 15°

Die rückgerechneten Abflussbeiwerte der eigenen Versuche decken sich sehr gut mit den Ergebnissen andere Untersuchungen (vgl. Abbildung 4.17). Für geneigte Planschütze gibt es in der Literatur nur sehr wenige Untersuchungen unter Rückstaeinfluss. Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erfassten Daten tragen daher dazu bei, Datenlücken zu schließen.

Mit der Herleitung zum Abflussbeiwert (vgl. Gleichungen 4.2 bis 4.7) konnte aufgezeigt werden, dass der Abflussbeiwert  $C_q$  seinen Ursprung in der Energiebilanzierung hat und ein Verlustbeiwert ist, der im Falle eines freien Abflusses sämtliche energetischen Verluste auf dem Fließweg unter dem Schütz beinhaltet. Je größer dabei die durch das Schütz erzwungene Krümmung der Stromlinien ist, desto weniger potentielle Energie wird in Bewegungsenergie umgewandelt.

Im Falle eines rückgestauten Abflusses wird der Potentialunterschied zwischen Ober- und Unterwasser des Schützes verringert. Dieser Effekt wird jedoch nicht physikalisch korrekt in der Formelarchitektur berücksichtigt sondern über eine Abminderung des Abflussbeiwertes erfasst. Nähern sich Ober- und Unterwasserstand zunehmend an, so wird der Abflussbeiwert immer kleiner bis er bei ausagespiegelten Wasserständen den Wert Null annimmt. Auf Grund der Formelarchitektur ist dann auch der Abfluss im Falle einer horizontalen Sohle, physikalisch korrekt, Null.

Hierbei ist jedoch nicht berücksichtigt, dass im Falle von sehr kleinen Unterschieden in den energetischen Potentialen ober- und unterstrom die Spaltweite  $s$  an Bedeutung verliert und das Schütz gewissermaßen nur noch als Tauchwand wirkt und der Abfluss unter dem Schütz besser mit einer Fließformel und einer Betrachtung der lokalen Verluste bestimmt werden sollte.

Die Kurven und Messwerte für den rückgestauten Abfluss in den Abbildungen 4.17 bis 4.20 machen deutlich, dass eine korrekte Bemessung eines Schützes unter extremen Rückstaeinfluss für den planenden Ingenieur nahezu unmöglich ist. Für einen gegebenen Unterwasserstand reagiert der Abflussbeiwert sehr sensibel auf Änderungen des Oberwasserstandes, so dass eine Bestimmung des Abflussbeiwertes mit einer großen Ungenauigkeit verbunden ist. Abweichungen im Abflussbeiwert, und damit auch vom Abfluss, von mehr als 100 % sind kaum zu vermeiden.

Für die Bemessung der Schwingklappe fallen diese grundlegenden Probleme bei der Bemessung von rückgestauten Schützen jedoch nicht so stark ins Gewicht, da die Bemessung der Spaltweite für die aufgerichtete Klappe bei Beckenvolleinstau erfolgt. Für dieses Szenario ist die Kurve des Abflussbeiwertes recht flach (vgl. Abbildung 4.17) und somit eine korrekte Bemessung möglich. Lediglich die Bestimmung des Drosselverhaltens über den kompletten Arbeitsbereich ist von der grundlegenden Problematik betroffen.

Die umfangreichen Versuche haben gezeigt, dass für die Dimensionierung der Schwingklappe ohne Einschränkung auf die Angaben und Graphiken zum Abflussbeiwert aus der Literatur zurückgegriffen werden kann, so dass im Rahmen dieser Forschungsvorhabens auf weiterführende Versuche zum Abflussbeiwert verzichtet wurde. Für den planenden Ingenieur stellt dies jedoch eine wesentliche Vereinfachung dar, da auf das Wissen und die Erfahrungen bei der Dimensionierung von Tiefschützen zurückgegriffen werden kann und vorhandene Berechnungsmethoden und Berechnungstabellen zum Ansatz gebracht werden können.

#### 4.4.2 Unterwasser-Randbedingung

Das Funktionsprinzip der Schwingklappe wurde bereits ausführlich in Kapitel 3.7 diskutiert. Festzuhalten ist, dass die Kraft für das Aufrichten der Klappe über die Auftriebskraft des Hohlkörpers bereitgestellt wird. Die Schwingklappe in der Ausgangslage (horizontal) muss daher teilweise in das Wasser eintauchen. Auch bei anderen Betriebszuständen wird das Momentengleichgewicht aus Gewichts-, Auftriebs- und Strömungskräften maßgeblich vom unterwasserseitigen Wasserstand beeinflusst.

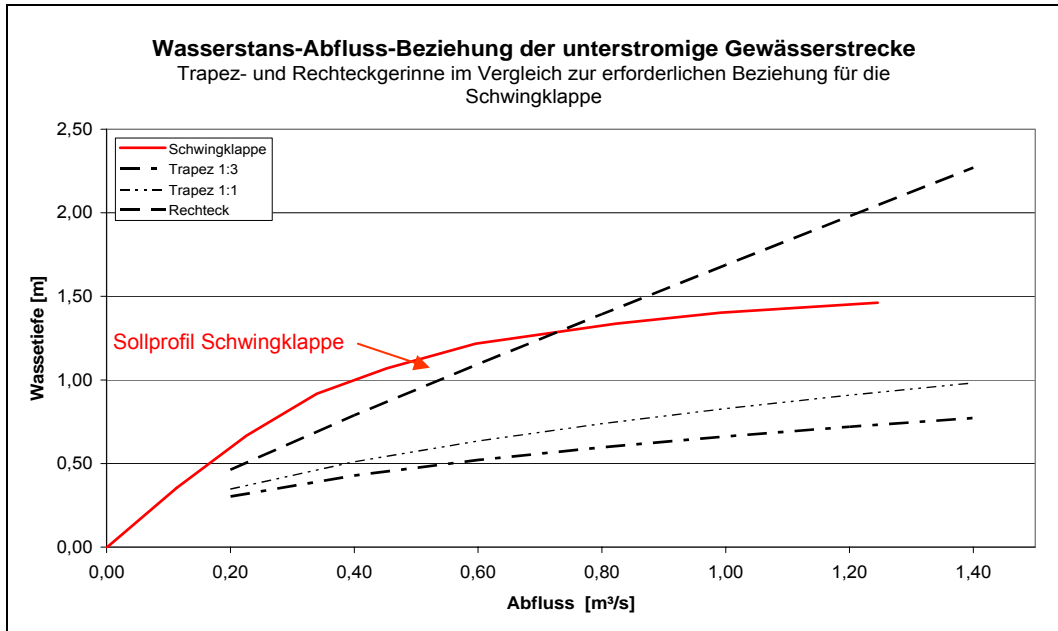
Die Versuchsreihe im Modell Maßstab 1:2 hat deutlich aufgezeigt, dass für ein selbständiges Aufrichten der Schwingklappe gewisse Anforderungen an die unterwasserseitige Wasserstands-Abfluss-Beziehung gestellt werden. Der benötigte Verlauf der Wasserstands-Abfluss-Beziehung für den Prototypen Maßstab 1:1 kann wie folgt charakterisiert werden:

- Steiler Anstieg der Kurve zur Bereitstellung der Auftriebskräfte bis ca.  $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$
- Übergangsbereich zwischen  $0,3$  und  $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$
- Flacher Verlauf der Kurve analog zu Trapezprofilen ab  $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$

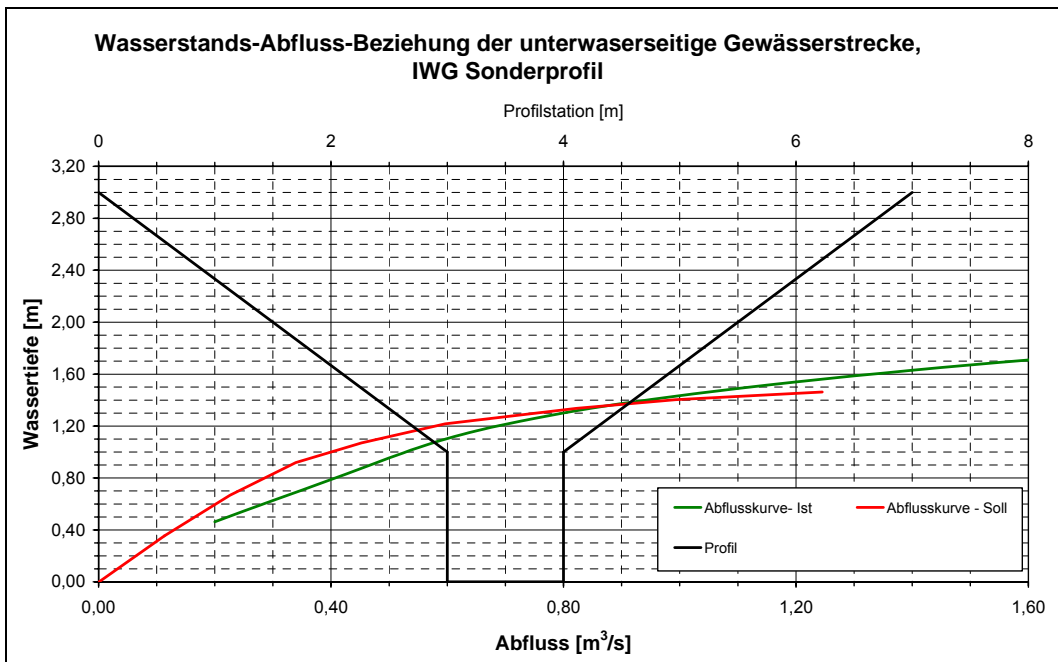
Die Schwingklappe ist für kleinere Hochwasserrückhaltebecken vorgesehen. Für gewöhnlich wird die Regelabgabe eines Hochwasserrückhaltebeckens so dimensioniert, dass Unterstrom im Hochwasserfall bordvoller Abfluss herrscht. Als typische Gerinneform ist meist ein Trapezquerschnitt mit einer Böschungsneigung von 1:2 bis 1:3 vorhanden.

Es erscheint offensichtlich, dass der benötigte Wasserstands-Abfluss-Verlauf nicht bei einem normalen Regelprofil wie z.B. Trapez- oder Rechteckgerinne vorliegt. In Abbildung 4.21 ist die Wasserstands-Abfluss-Beziehung für verschieden Gewässergeometrien dem erforderlichen Verlauf gegenübergestellt.

Die unterwasserseitige Gewässerstrecke muss folglich über eine gewisse Fließstrecke mit einem Sonderprofil ausgestattet werden. Eine mögliche Sonderprofil und die dazugehörige Wasserstands-Abfluss-Beziehung ist in Abbildung 4.22 dargestellt.



**Abbildung 4.21:** Vergleich unterschiedlicher Gewässergeometrien in Bezug auf die Wasserstands-Abfluss-Beziehung



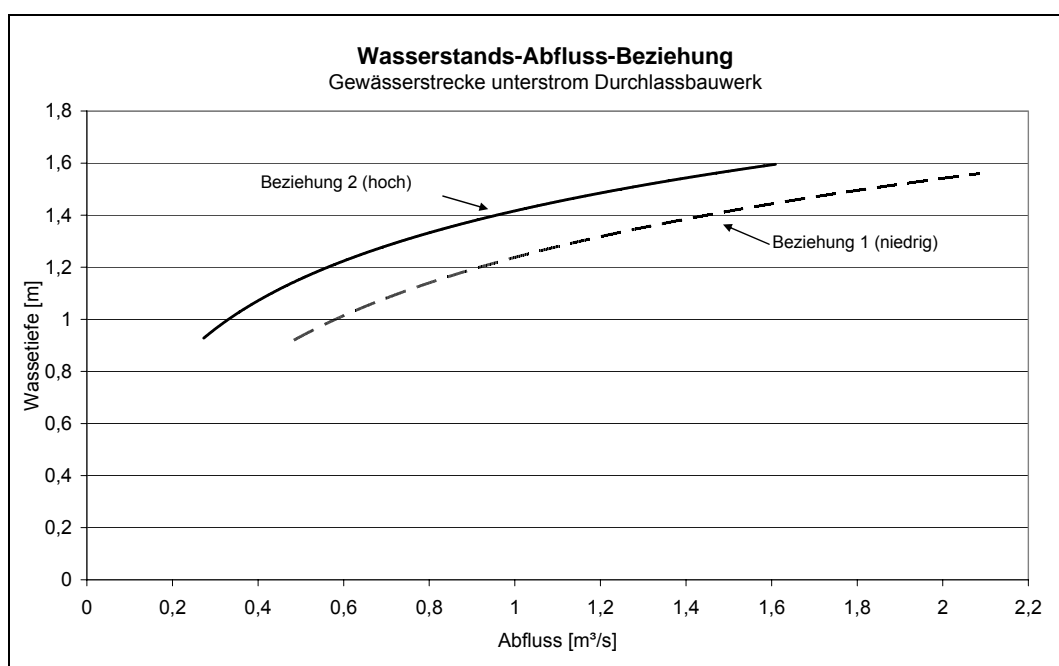
**Abbildung 4.22:** Mögliches Gewässerprofil zur Einhaltung der erforderlichen Wasserstands-Abfluss-Beziehung

Das Profil hat im unteren Bereich bis zu einer Höhe von 1,0 m über der Gewässersohle einen Rechteckquerschnitt mit einer Breite von 1,0 m. Darüber öffnet sich das Profil mit einer Böschungsneigung von 1:3.

Nimmt man den Strickler-Beiwert zu  $k_{ST} = 25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  und das mittlere Sohlgefälle 0,2% an, so ergibt sich die in Abbildung 4.22 dargestellt Wasserstands-Abfluss-Beziehung, die in ihrer Charakteristik mit dem steilen Anstieg und dem flacheren Verlauf bei höheren Abflüssen den genannten Anforderungen entspricht.

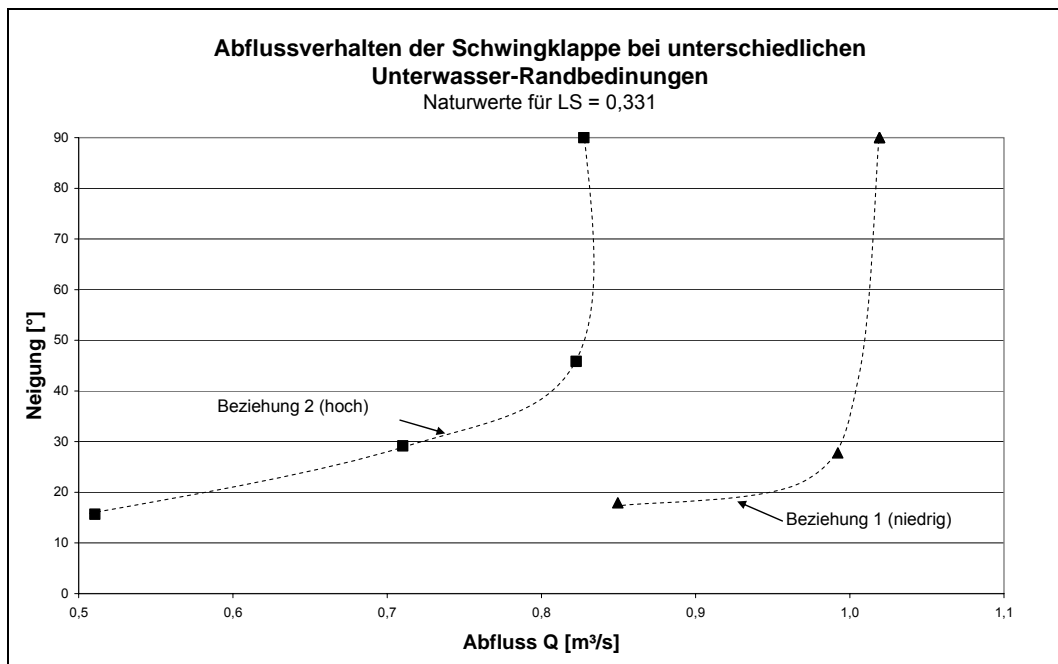
Das beschriebene Sonderprofil stellt nur eine Möglichkeit dar, den geforderten Verlauf der Wasserstand-Abfluss-Beziehung zu realisieren. Vom planenden Ingenieur können hier auch andere Maßnahmen, wie etwa der Einbau eines Steinriegels, zum Einsatz kommen.

Wie bereits dargestellt reagiert das Momentengleichgewicht sehr sensibel auf den Unterwasserstand. Im Rahmen der Modellversuche im Maßstab 1:2 wurde daher der Einfluss von zwei verschiedenen Wasserstands-Abfluss-Beziehungen auf die Abflussregelung der Schwingklappe untersucht. Bezogen auf den Prototypen variiert dabei der Wasserstand um ca. 20 cm. Abbildung 4.23 zeigt die untersuchten Unterwasserrandbedingungen. Abbildung 4.24 zeigt die Entwicklung des Abflusses über die Neigung bei den verschiedenen Wasserstands-Abfluss Beziehungen im Unterwasser.



**Abbildung 4.23:** untersuchte Wasserstands-Abfluss-Beziehungen der unterwasserseitigen Gewässerstrecke





**Abbildung 4.24:** Abflussverhalten der Schwingklappe bei den unterschiedlichen Unterwasser-Randbedingungen

Man erkennt deutlich das stark variierende Verhalten der Schwingklappe abhängig vom Unterwasserstand. Bei einer Klappenneigung von  $45^\circ$  stellt sich bei der um 20 cm abgesenkten Unterwasser-Randbedingung ein um ca. 25 % erhöhter Abfluss unter der Klappe ein. Bei kleineren Neigungen treten Abweichungen von bis zu 40 % auf. Eine gute Übereinstimmung kann beim Verlauf der beiden Kurven festgestellt werden. Die Änderung der Neigung bei Erhöhung des Abflusses verläuft nahezu identisch.

Die obigen Ausführungen zeigen zwei Punkte auf, die für die Dimensionierung und den Betrieb der Schwingklappe problematisch sein können. Auf Grund des Funktionsprinzips muss bei kleinen Abflüssen ein relativ hoher Unterwasserstand vorhanden sein und die Schwingklappe greift erst ab einer gewissen Neigung in das Abflussgeschehen ein. Dieser Aspekt wird in Kapitel 4.4.3 ausführlich diskutiert. Mit den üblicherweise vorhandenen trapezförmigen Gewässerquerschnitten kann dieser Anforderung nicht entsprochen werden.

Hydraulisch betrachtet stellt die Einengung des Gewässers unterstrom des Durchlassbauwerkes mit dem oben beschriebenen Sonderprofil einen Kontrollquerschnitt dar. Der Einbau des Kontrollquerschnittes und der damit verbundene Aufstau des Gewässers kann sich bei kleinen Abflüssen negativ auf die ökologische Durchgängigkeit auswirken. Durch den Aufstau kommt es lokal zu einer Absenkung der Fließgeschwindigkeit und damit einhergehend zu einer Sedimentation von Schweb- und Feststoffen. Dies kann zu einer Verschlammung der Sohle führen. Die betrieblichen Folgen und der Einfluss des benötigten Aufstaus auf die Stauraumbewirtschaftung werden in Kapitel 4.7 diskutiert.

Die Versuche zum Einfluss des Unterwassers auf das Abflussverhalten zeigen zudem auf, welche Schwierigkeiten sich bei der Bemessung der Schwingklappe ergeben können. Für die Regelabgabe muss der Wasserstand des Unterwassers exakt bekannt sein. Eine Abweichung von nur 20 cm wirkt sich signifikant auf die Abflussregelung der Schwingklappe aus (Abflussabweichung bis zu 40 %). Problematisch ist dies vor allem in Hinblick auf die verfügbare Datenlage zu den Gewässern. Gerade bei den kleineren Gewässern, an denen eine Schwingklappe zum Einsatz kommen könnte, ist die vorhandene Datenlage bezüglich der Pegelstände schlecht und eine Prognose des Wasserstandes bei Regelabgabe mit Ungenauigkeiten behaftet.

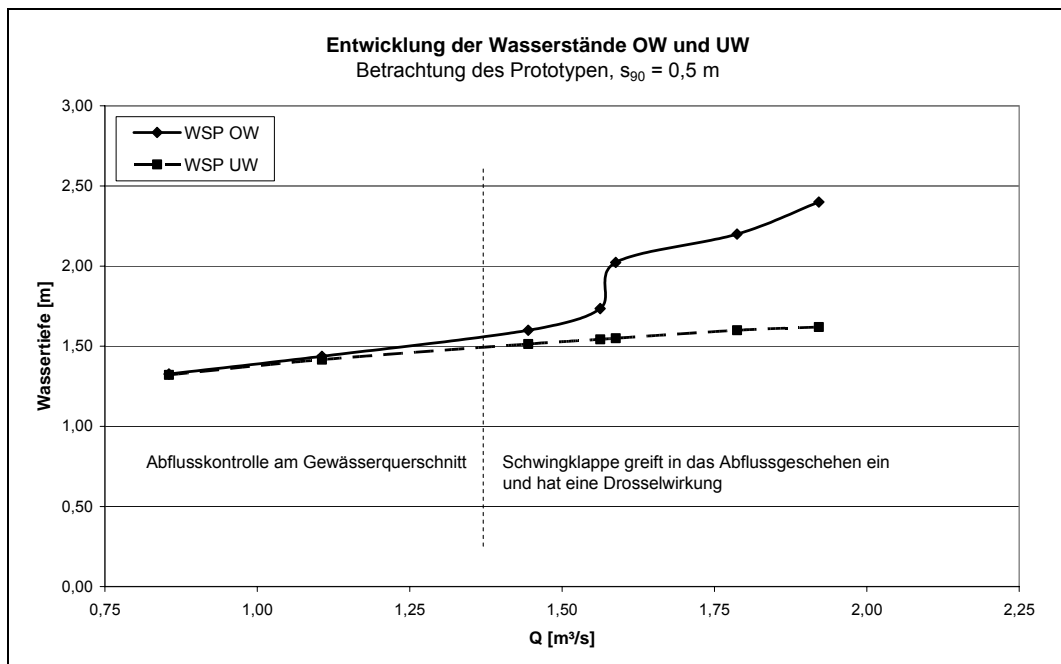
Darüber hinaus darf ein zweiter Aspekt nicht vernachlässigt werden. Wie kann man sicherstellen, dass sich der Einfluss der Morphologie im Hochwasserfall sich nicht auf den Wasserstand auswirkt? Welche Sicherungsmaßnahmen müssen getroffen werden, um die Wasserstands-Abfluss-Beziehung der unterwasserseitigen Gewässerstrecke auch im Hochwasserfall zu fixieren? Diese Aspekte werden in Kapitel 6 diskutiert.

#### **4.4.3 Beginnendes Eingreifen in das Abflussgeschehen**

Die Ausführungen in Kapitel 4.4.2 sind bereits darauf eingegangen, dass für die Funktionsweise der Schwingklappe eine unterstromige „Kontrolleinrichtung“ benötigt wird, da zur Erzeugung der Auftriebskraft ein höherer Wasserstand auch bei kleinen Abflüssen notwendig ist. Dies kann z.B. mit einem speziellen Gewässerquerschnitt realisiert werden (vgl. Abbildung 4.22).

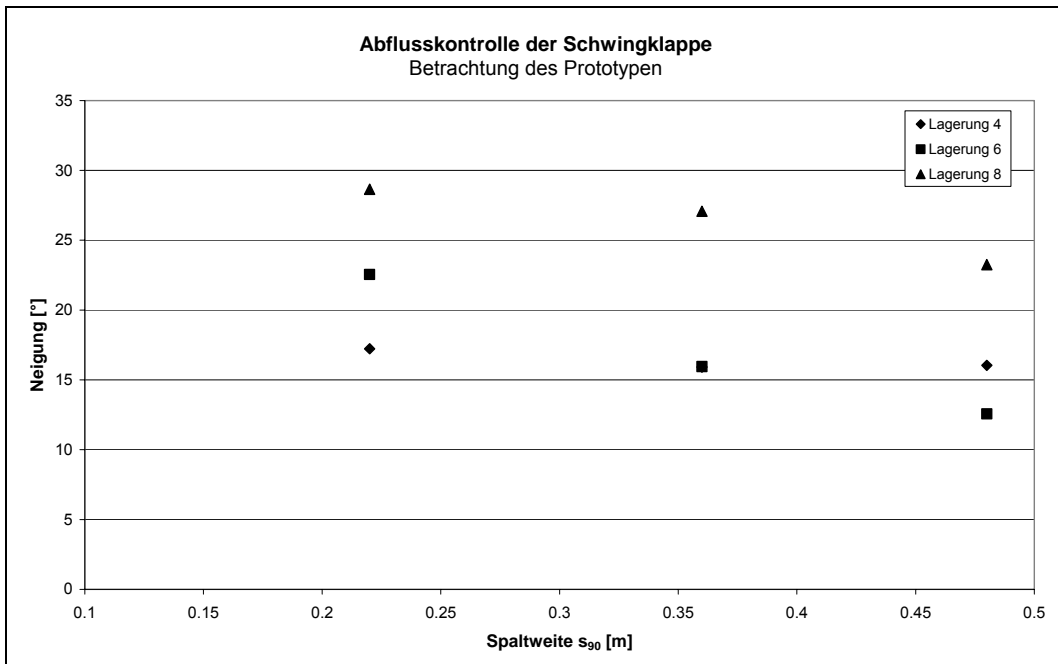
In Niedrigwasserphasen übernimmt das Gewässerprofil die Abflusskontrolle. Steigt der Abfluss im Gewässer und damit auch der Wasserstand weiter an kommt es zu einem Aufschwimmen der Schwingklappe. Die Abflusskontrolle liegt aber immer noch am Gewässerprofil. Die Schwingklappe greift jedoch in das Abflussgeschehen ein und drosselt den Abfluss. Auch bei höhern Beckenwasserständen übernimmt die Schwingklappe nicht die Abflusskontrolle.

Die Entwicklung der Wasserstände im Ober- und Unterwasser der Schwingklappe sind exemplarisch in Abbildung 4.25 für den Prototypen der Schwingklappe mit einer Spaltweite von bei einer Klappenneigung von  $90^\circ$   $s_{90} = 50$  cm aufgetragen. Man erkennt deutlich die das Eingreifen der Schwingklappe in das Abflussgeschehen und die Drosselwirkung während des Anlaufens des Hochwassers.



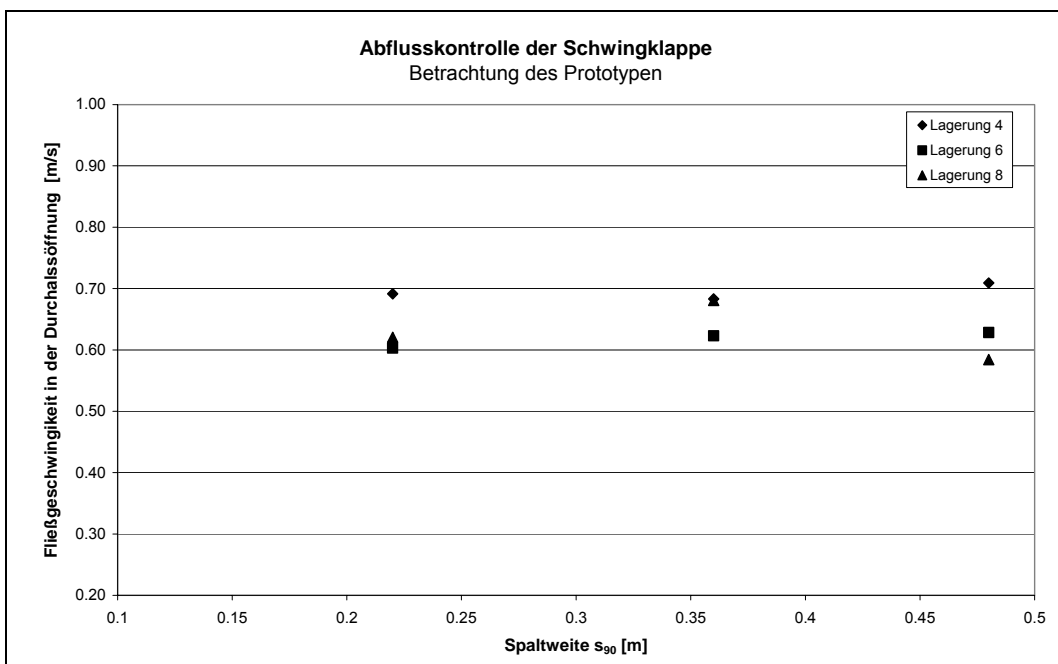
**Abbildung 4.25:** Entwicklung der Wasserstände im OW und UW bei Betrieb der Schwingklappe.

Wie lässt sich der Beginn der Drosselwirkung beschreiben? In Abbildung 4.26 sind charakteristische Parameter zum Zeitpunkt der Beeinflussung des Abflussgeschehens durch die Schwingklappe aufgetragen. Definiert wurde die Drosselwirkung durch einen Wasserstandsunterschied Ober- und Unterstrom der Schwingklappe von 1,0 cm. Aufgetragen sind verschiedene Konstellationen von Lagerungspunkt und Spaltweiten bei  $90^\circ$ . Deutlich zu erkennen ist, dass die Neigung zum Zeitpunkt des Drosselbeginns mit zunehmender Spaltweite  $s_{90}$  geringer wird, jedoch in einem Band zwischen  $10^\circ$  und  $30^\circ$  liegt.



**Abbildung 4.26:** Beginnender Eingriff in das Abflussgeschehen durch die Schwingklappe, Einfluss der Neigung.

Betrachtet man statt der Neigung die mittlere Fließgeschwindigkeit im Durchlassquerschnitt, so zeigt sich ein anderes Bild. Wie in Abbildung 4.27 zu erkennen, ist bei allen untersuchten Fällen die Fließgeschwindigkeit zum Zeitpunkt der beginnenden Drosselwirkung nahezu konstant. Für den Prototypen liegt sie im Bereich zwischen 0,6 m/s und 0,7 m/s.



**Abbildung 4.27:** Beginnender Eingriff in das Abflussgeschehen durch die Schwingklappe, Einfluss der Fließgeschwindigkeit.

#### 4.4.4 Einfluss der Achslage

Das Funktionsprinzip der Schwingklappe beruht auf einem Momentengleichgewicht zwischen Auftriebs-, Gewicht- und Strömungskräften. Die Lage der Drehachse beeinflusst dabei maßgeblich die Hebelarme und somit auch das Momentengleichgewicht. In Kapitel 4.3.2 wurden die untersuchten Anordnungen der Achslagen vorgestellt.

Damit eine einwandfreie Funktion der Schwingklappe gegeben ist, darf die Achslage einen gewissen Bereich des Klappenkörpers angeordnet sein. Wird die Achse zu nahe an den Schwerpunkt gelegt, richtet sich die Klappe nur teilweise auf und wird dann überspült. Abbildung 4.28 zeigt den Funktionsbereich in Abhängigkeit des Lagerungspunktes. Es kann festgehalten werden, dass ein vollständiges Aufrichten der Schwingklappe ab einem LS von 0,3 sichergestellt ist. Betrachtet man die Klappenlänge Unterstrom des Schwerpunktes, so muss das Lager in den letzten 70 % der Gesamtlänge angebracht sein.

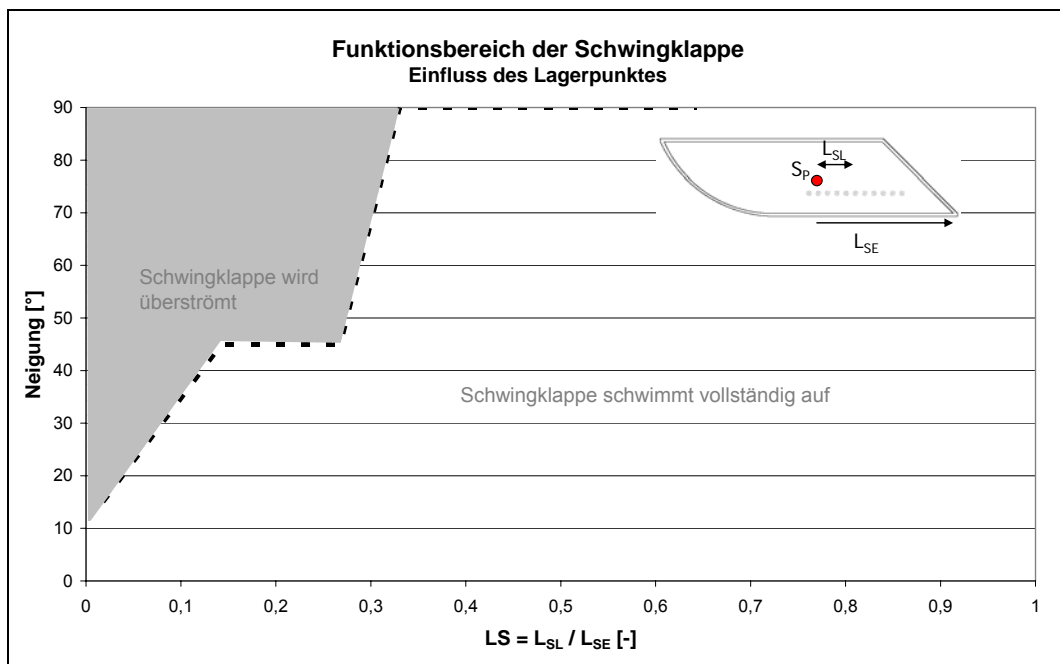


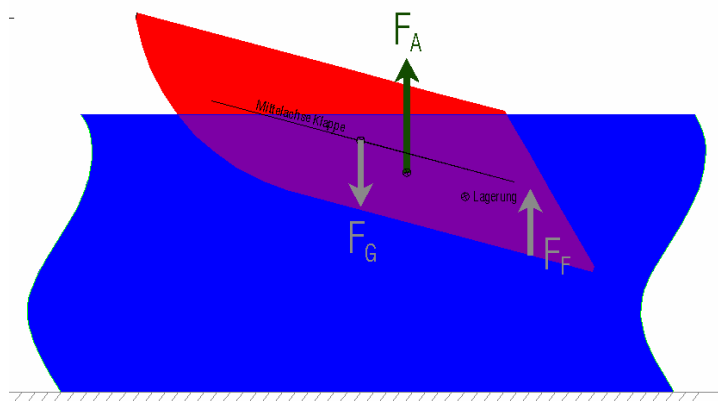
Abbildung 4.28: Funktionsbereich der Schwingklappe

#### 4.4.5 Betrachtung der angreifenden Kräfte

In Kapitel 4.3.2 wurden die an der Schwingklappe angreifenden Kräfte in Analogie zur Schwimmstabilität von Körpern diskutiert und konstruktive Maßnahmen abgeleitet. Betrachtet man die Schwingklappe bei Betrieb während des Aufschwimmvorganges, so

muss bei der Betrachtung der angreifenden Kräfte zusätzlich die Strömungskraft berücksichtigt werden. Auf Grund der Fließgeschwindigkeit kommt es an unterstromigen Ende der Schwingklappe zu einer Reduktion des lokalen Druckes.

Die Reduktion der hydrostatischen Druckverteilung kann so interpretiert werden, dass zusätzlich zur hydrostatischen Kraft eine Strömungskraft in entgegen gesetzter Richtung wirkt. Die folglich am System der Schwingklappe angreifenden Kräfte und ihre Wirkungslinien sind schematisch in Abbildung 4.29 dargestellt,

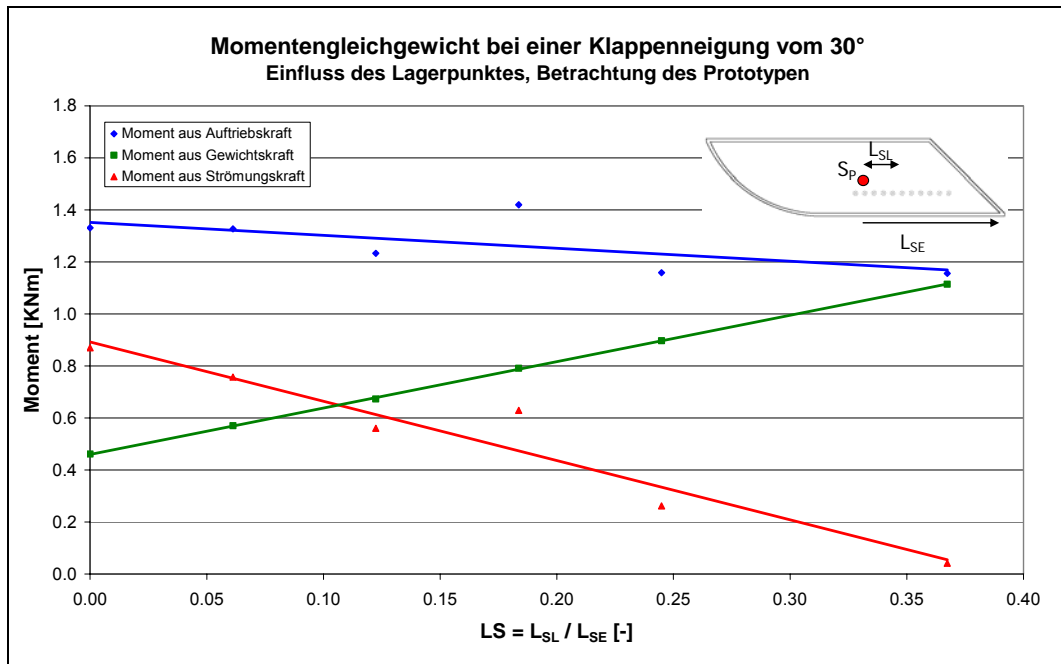


**Abbildung 4.29:** schematische Darstellung der angreifenden Kräfte

Für das System der Schwingklappe ist die Größe und die Lage der Strömungskraft  $F_F$  nicht bekannt. Zudem ist die Größe und die Lage abhängig von der Neigung und ändert sich demnach während des Aufschwimmvorganges.

Das Funktionsprinzip der Schwingklappe beruht darauf, dass bei jedem Betriebszustand das resultierende Moment um den Lagerpunkt null ist, dass also ein Gleichgewicht zwischen den Momenten aus Auftriebs-, Gewichtskraft und Strömungskraft herrscht. Aus den Wasserstandsaufzeichnungen und der Vermessung des Klappenkörpers lassen sich die Momente aus Auftriebs- und Gewichtskraft für die einzelnen Betriebszustände rekonstruieren. Trifft man die Annahme einer reibungsfreien Lagerung, so lässt sich das Moment infolge Strömung über die Gleichgewichtsbedingung ableiten.

Der Verlauf der Momente ist in Abhängigkeit des Abstandes zwischen Lagerpunkt und Schwerpunkt in Abbildung 4.30 aufgetragen.



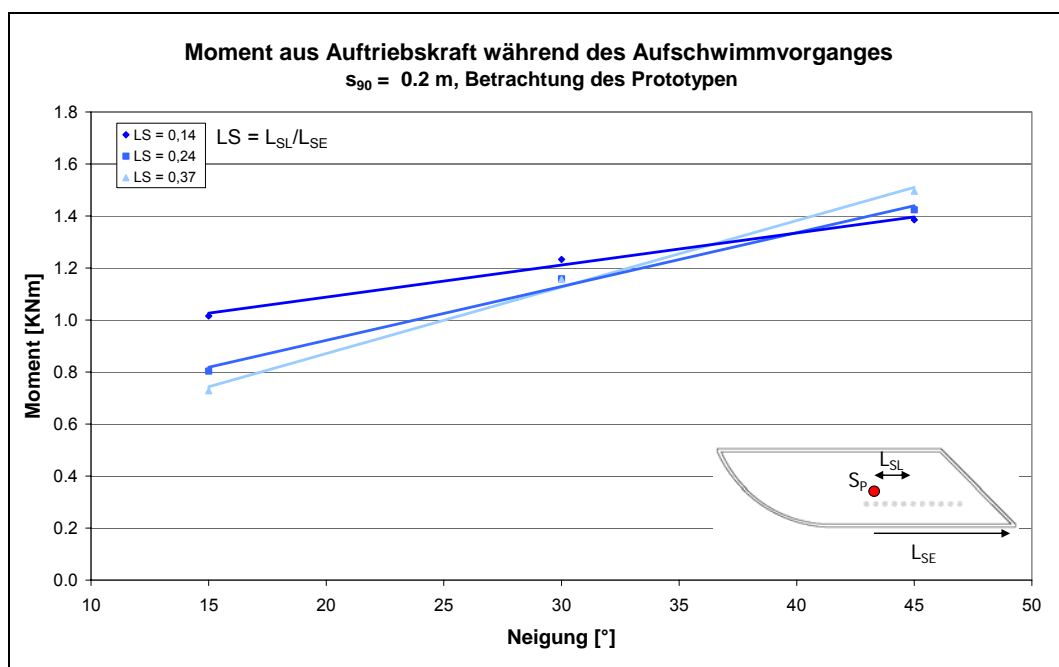
**Abbildung 4.30:** Betrachtung der Momente bei einer Klappenneigung von 30°.

Unter Berücksichtigung der Genauigkeit des Verfahrens kann festgehalten werden, dass das Moment infolge der Auftriebskraft über den untersuchten Bereich des Abstandes zwischen Lagerpunkt und Schwerpunkt als nahezu konstant bezeichnet werden kann.

Liegt der Lagerpunkt nahe beim Schwerpunkt (kleines  $LS$ ), so erzeugt die Reduzierung des hydrostatischen Druckes infolge der Strömung ein großes Moment. Bei einem  $LS$  von 0,1 ist das Moment in Folge Strömung äquivalent mit dem Moment in Folge der Gewichtskraft. Das Moment in Folge Strömung nimmt mit steigendem  $LS$  deutlich ab. Betrachtet man den dynamischen Druckverlauf entlang der Stauhaut (vgl. Abbildung 4.35), so erscheint dieses Verhalten plausibel; Der Angriffspunkt der Strömungskraft befindet sich nahe der Endkante, der Hebelarm und damit das Moment wird folglich kleiner.

Das Moment aus der Gewichtskraft nimmt mit zunehmenden  $LS$  zu und das Momentengleichgewicht bleibt erhalten. Auch dieses Verhalten ist plausibel; Die Gewichtskraft greift im Schwerpunkt an, mit zunehmendem Abstand des Lagerpunktes vom Schwerpunkt vergrößert sich der Hebelarm und als Folge das Moment.

Abbildung 4.31 zeigt das Verhalten der Momente während des Aufschwimmvorganges bei Betrachtung unterschiedlicher Lagerpunkte (LS). Bei Betrachtung der Momente in Folge Auftrieb kann festgehalten werden, dass das Moment mit zunehmender Neigung größer wird. Auffallend ist wieder das gleichartige Verhalten bei den verschiedenen Lagerungspunkten. Die Annahme eines nahezu konstanten Momentes in Folge der Auftriebskraft wird hierdurch bestätigt.



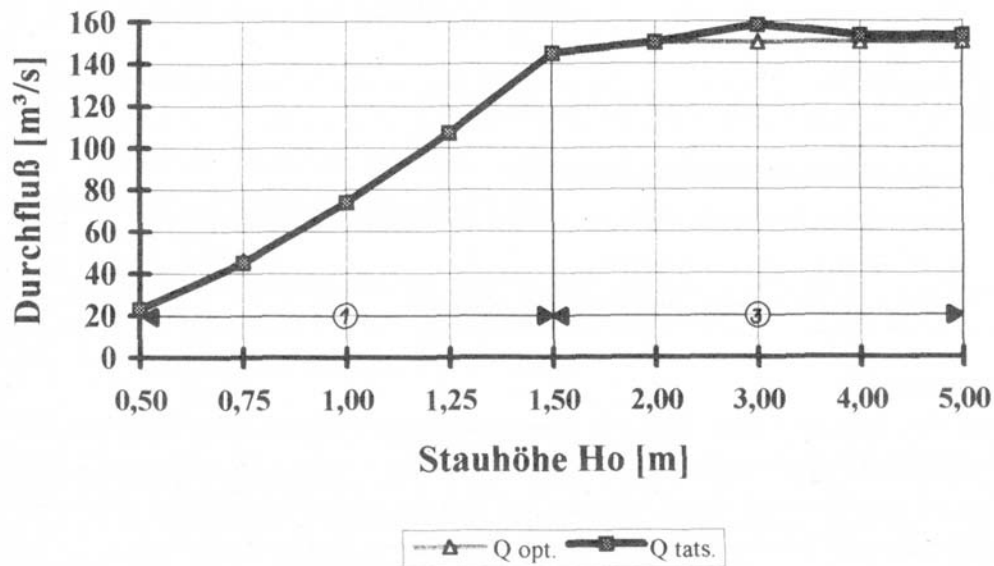
**Abbildung 4.31:** Moment in Folge Auftriebskraft.

#### 4.4.6 Vergleich mit den Ergebnissen bisheriger Studien

Im vorangegangenen Kapitel 4.4 wurde detailliert auf das hydraulische Verhalten der Schwingklappe eingegangen. Die Versuche zeigen, wie sich die Unterwasser-Randbedingung für einen Betrieb der Schwingklappe darstellen muss und wie sensibel das System auf eine Änderung reagiert. Dieser Aspekt ist bei den bisherigen Untersuchungen und Studien [LFU 1998, IWK 1997] nicht ausreichend berücksichtigt worden.

Abbildung 4.32 zeigt den im Rahmen der Studie LFU 1998 errechneten Abfluss unter der Schwingklappe ( $Q_{tats.}$ ) während des Einstauvorganges. Der mit 1 markierte Bereich stellt den Freispiegelabfluss im Gewässer dar, Bereich 2 markiert den Regelbereich der Schwingklappe. Auffallend ist die sehr konstante Regelabgabe in Bereich 2.



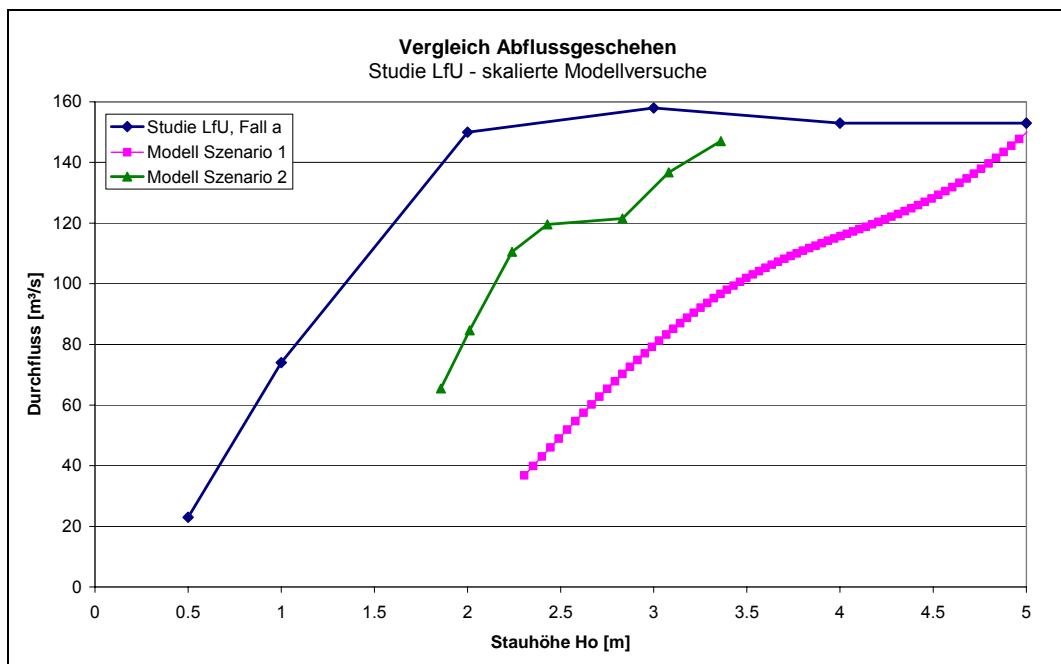


**Abbildung 4.32:** Durchfluss unter einer selbsttätigen Schwingklappe [LFU 1998]

In der Studie sind im Anhang die Datengrundlage und die Berechnungsschritte aufgetragen. Hieraus geht hervor, dass für die oben dargestellte Kurve kein Rückstau einfluss angesetzt wurde und auch die Veränderlichkeit des Abflussbeiwert  $C_q$  in Folge der veränderlichen Neigung der Stauwand nicht ausreichend berücksichtigt wurde.

Die jetzigen Versuche zur Schwingklappe zeigen jedoch ein anderes Bild. Bei allen untersuchten Szenarien und Lagerpunkten war der Abfluss rückgestaut. Dies ist eine zwingende Voraussetzung für das Aufschwimmen. Betrachtet man die Mechanismen des Aufschwimmvorganges, so erscheint dies auch plausibel. Bevor die Schwingklappe in das Abflussgeschehen eingreift muss sie zunächst über den Auftrieb in eine Lage von ca.  $15^\circ$  bis  $30^\circ$  gebracht werden. Die Auftriebskraft kann aber nur wirken, wenn sowohl der Ober- als auch der Unterwasserstand entsprechend hoch ist. Dieser hohe Unterwasserstand führt in der Folge zu einem rückgestauten Abfluss über das untersuchte Abflussspektrum (vgl. Kapitel 4.4.1).

Aufbauend auf diesen Überlegungen wurde der Versuchsstand der Schwingklappe auf die Geometrie der Studie von 1998 skaliert. Hierdurch lassen sich die im Rahmen der Modellversuche gewonnenen Daten zur Abflussregelung mit den rechnerischen Daten der Studie vergleichen. Abbildung 4.33 zeigt die Ergebnisse der „normierten“ Modellversuche im Vergleich zu den Ergebnissen der Studie. Aufgetragen sind dabei zwei verschiedene Szenarien, die sich in der Position des Lagerpunktes unterscheiden. Bei der Auswahl der Lagerungspunkte wurde darauf geachtet, das komplette Spektrum an möglichen Lagerungspunkten abzudecken.



**Abbildung 4.33:** Vergleich Durchfluss unter der Schwingklappe: Vergleich: Studie LfU - skalierte Modellversuche

Aus der Abbildung wird ersichtlich, wie sich die fehlende Berücksichtigung des Rückstaus auf das Abflussgeschehen auswirkt. Die beiden dargestellten Szenarien unterschieden sich durch unterschiedliche Lagerpunkte und Spaltweiten bei  $90^\circ$ . Beide Szenarien, die aus den Ergebnissen der Modellversuche abgeleitet wurden, zeigen ein signifikant verändertes Abflussverhalten gegenüber den Literaturangaben zur Schwingklappe auf.

Durch den benötigten Einstau vom Unterwasser zur Aktivierung der Auftriebskraft fällt der Durchfluss unter der Schwingklappe bei kleinen Stauhöhen kleiner aus als die berechneten Werte aus der Studie. Die Steigung dagegen ist bei kleinen Stauhöhen nahezu identisch, was gut zu den Ausführungen in Kapitel 4.4.2 und den da beschriebenen Anforderungen an die Unterwasser-Randbedingung passt.

Bei größeren Stauhöhen wirkt sich der Einfluss des Rückstaus entscheidend auf die Abflussregelung aus. Der in der Studie dargestellte Bereich mit konstanten Abflüssen unabhängig von der Stauhöhe konnte mit den Modellversuchen nicht bestätigt werden. Eine Abflachung der Kurve mit teilweise konstanten Abflüssen kann realisiert werden, jedoch nicht in dem Umfang, wie er in der Studie angenommen wurde.

#### 4.4.7 Überarbeitung Funktionsprinzip

Im Zuge der hydraulischen Analyse der Schwingklappe konnten neue Erkenntnisse gewonnen werden, die im Widerspruch zu den bisherigen Studien zur Schwingklappe stehen. Dabei konnte aufgezeigt werden, dass der Einfluss des Unterwasserstandes bisher nicht ausreichend beachtet worden ist und dass die in Kapitel 3.7 aufgeführten Erläuterungen zum Funktionsprinzip überarbeitet werden müssen.

Für niedrige Abflüsse muss das Funktionsprinzip nicht angepasst werden. Die Schwingklappe ist eine Hohlkörperkonstruktion, die mit einem Freiheitsgrad auf einer Welle gelagert ist. Wenn das Becken nicht eingestaut ist, ruht die Klappe in einer horizontalen Position mit einer Klappenneigung von  $0^\circ$  und gibt einen großen Querschnitt in der Stauwand frei.

Die Beschreibung des Aufschwimmvorganges bedarf jedoch einer Überarbeitung. Bei beginnendem Hochwasser steigt der Wasserstand im Gewässer in Folge des höheren Abflusses an. Das Aufrichten der Klappe erfolgt über die Mobilisierung der Auftriebskraft. Damit die Schwingklappe von der Ruheposition in eine Schwimmlage übergeht, bei der sie nur durch die Achse fixiert ist, muss die Auftriebskraft größer als die Gewichtskraft der Klappe sein. Die Untersuchungen haben gezeigt dass die Schwingklappe mit einer spezifischen Dichte von ca.  $300 \text{ kg/m}^3$  auszuführen ist. Die Klappe muss folglich zu etwa ein Drittel ihrer Stärke eintauchen, um in einen Schwimmzustand zu gelangen.

Steigt der Abfluss und damit einhergehend der Wasserstand im Gewässer weiter an, schwimmt die Klappe weiter auf und engt auf Grund der Exzentrizität des Lagerpunktes den Abflussquerschnitt ein. Die Versuche haben jedoch gezeigt, dass die Schwingklappe erst ab einer Klappenneigung von ca.  $15^\circ$  bis  $30^\circ$  beginnt, in das Abflussgeschehen einzugreifen. Der Wasserstand ober- und unterstrom der Schwingklappe ist also bis zu dieser Neigung nahezu identisch.

Im weiteren Verlauf des Hochwassers steigen der Abfluss und damit der Wasserstand im Gewässer weiter an und die Schwingklappe richtet sich weiter auf. Aus den Versuchen geht hervor, dass an der Schwingklappe bis zum Erreichen der senkrechten Position (Klappenneigung  $90^\circ$ ) jedoch immer rückgestauter Abfluss herrscht.

Der unterstromige Wasserstand hat folglich immer einen Einfluss auf die Abflussabgabe der Schwingklappe. Wie in Kapitel 4.4.8 erläutert wird, stellt sich zwischen dem Wasserstand im Unterwasser, dem Abgabe der Schwingklappe und der Neigung ein geschlossener Regelkreis ein. Dies führt dazu, dass sich jede Änderung des Unterwasserstandes auf die Neigung der Klappe auswirkt.

#### **4.4.8 Selbstregelung**

In Kapitel 3.2 wurde auf die Grundlagen der Steuerung und Regelung eingegangen. Übertragen auf das Funktionsprinzip der Schwingklappe kann festgehalten werden, dass eine Regelung des Abflusses durch die Schwingklappe vollzogen wird. Die Führungsgröße  $W$  und die Regelgröße  $X$  ist somit der Abfluss unter der Klappe. Die Stellgröße  $Y$  ist die Klappenneigung. Der Oberwasserstand ist die Störgröße  $Z$ .

Als Störung kann eine Erhöhung des Beckenwasserstandes im Oberwasser angesehen werden. Hierdurch steigt das Druckniveau und damit einhergehend, bei konstanter Spaltweite, auch der Abfluss unter der Schwingklappe. Die Änderung des Abflusses unter der Schwingklappe wirkt sich auf Grund der Wasserstands-Abfluss-Beziehung direkt auf den unterwasserseitige Wasserspiegel aus. Der veränderte Wasserspiegel bewirkt sowohl einen veränderten Rückstau einfluss des Abflusses unter der Schwingklappe aber auch ein veränderte Gleichgewicht der Momente um die Achse. Es kommt zu einer Änderung der Klappenneigung und damit auch der Spaltweite, wodurch wiederum der Abfluss beeinflusst wird. Die Schwingklappe regelt folglich in einem geschlossenen Wirkungsablauf den Abfluss und kann äußere Störungen, wie z.B. eine Veränderung des Oberwasserstandes selbständig ausgleichen.

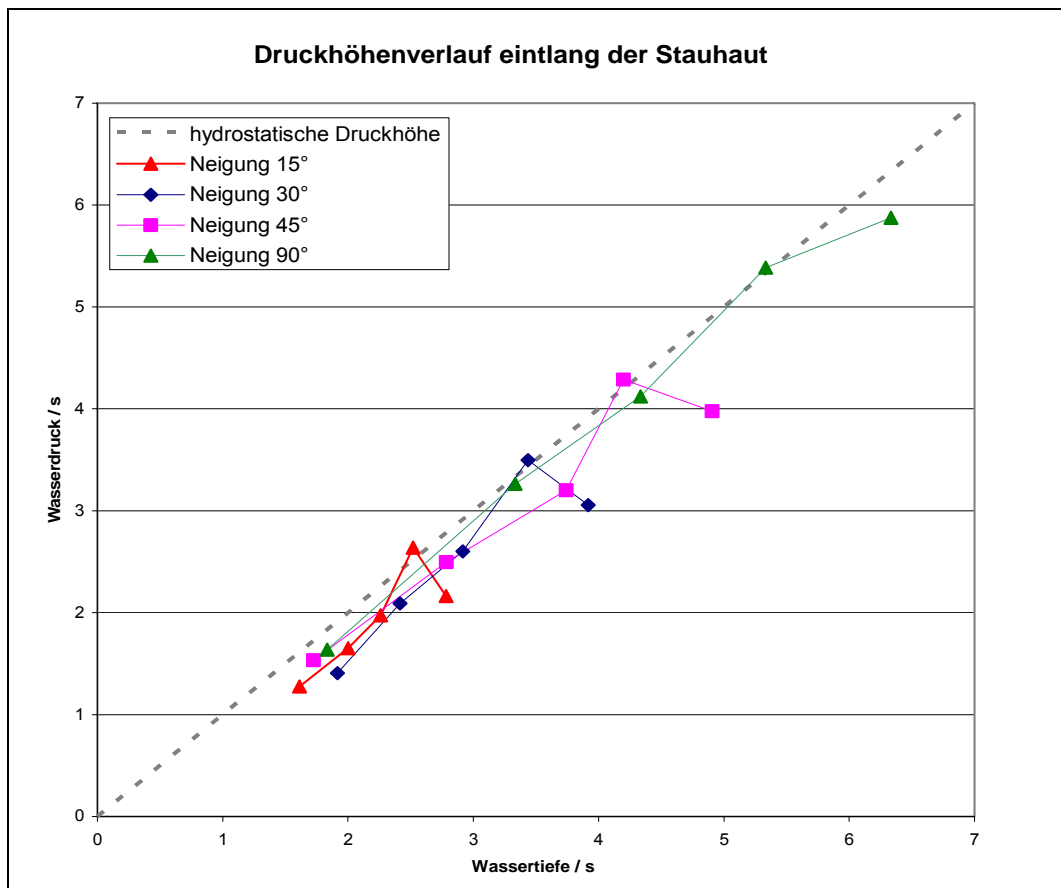
#### **4.5 Druckverlauf / Lagerkräfte**

Für die Dimensionierung des Klappenkörpers und der Lagerung müssen die auftretenden Kräfte bekannt sein. Da bei der Schwingklappe im Betrieb verschiedenste Szenarien (Klappenwinkel, Oberwasserstand, Unterwasserstand) durchlaufen werden, ist die maximale auftretende Belastung des Klappenkörpers und der Lagerung zu ermitteln und Vorgaben für die statische Bemessung sind bereit zu stellen.

Im wasserbaulichen Modell wurden hierzu Druckmessungen entlang der Stauhaut durchgeführt. Die eingesetzte Messtechnik ist in Kapitel 4.2.3.3 detailliert beschrieben. Wichtig für die Bemessung der Klappe sind neben den mittleren Kräften auch Aussagen zu den auftretenden Kraftspitzen und der Schwankungsbreite.

Die Druckmessungen im Versuchsstand wurden daher mit einer hohen zeitlichen Auflösung von 100 Hz durchgeführt, so dass auch diesbezüglich aussagekräftige Dimensionierungsregeln aufgestellt werden können.

In einem ersten Schritt wurden die durchschnittlichen Drücke entlang der Stauhaut bei verschiedenen Klappenneigungen analysiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.34 normiert über die Spaltweite  $s$  dargestellt.

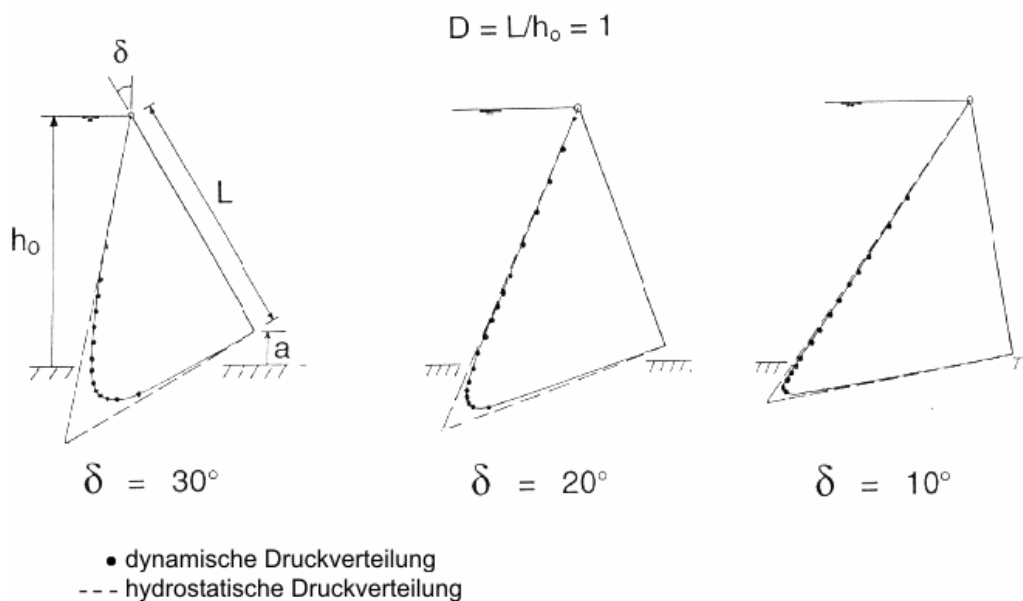


**Abbildung 4.34:** Druckverlauf entlang der Stauhaut.

Die gemessenen Werte im vorderen Bereich des Klappenkörpers stimmen sehr gut mit der hydrostatischen Druckverteilung überein. Der dokumentierte Abfall der Drücke zum Klappenende hin war auch zu erwarten; in diesen Bereich kommt es zu einer Beschleunigung der Strömung. Bei der energetischen Betrachtung steigt somit die kinetische Energie an diesem Punkt. Aus dem Energieerhaltungssatz lässt sich ableiten, dass es lokal zu einer Druckabnahme kommen muss. Auf Grund der Baugröße der Druckmessdosen konnten direkt an der Klappenendkante keine Messungen durchgeführt werden.

[RAEMY] hat sich bei seinen Untersuchungen zu einer selbstregulierenden Klappe auch intensiv mit den Druckverhältnissen entlang der Stauhaut einer geneigten Platte beschäftigt. Abbildung 4.35 zeigt seine Ergebnisse. Wie auch bei den Messungen an der Schwingklappe stimmt im oberen Bereich der Klappe die dynamische Druckverteilung sehr gut mit der hydrostatischen Druckverteilung überein.

Je näher man an die Klappenendkante wandert, desto mehr weichen die beiden Kurven voneinander ab. Die Reduktion der hydrostatischen Drücke nimmt dabei mit wachsendem  $D$  und wachsendem Winkel  $\delta$  zu.



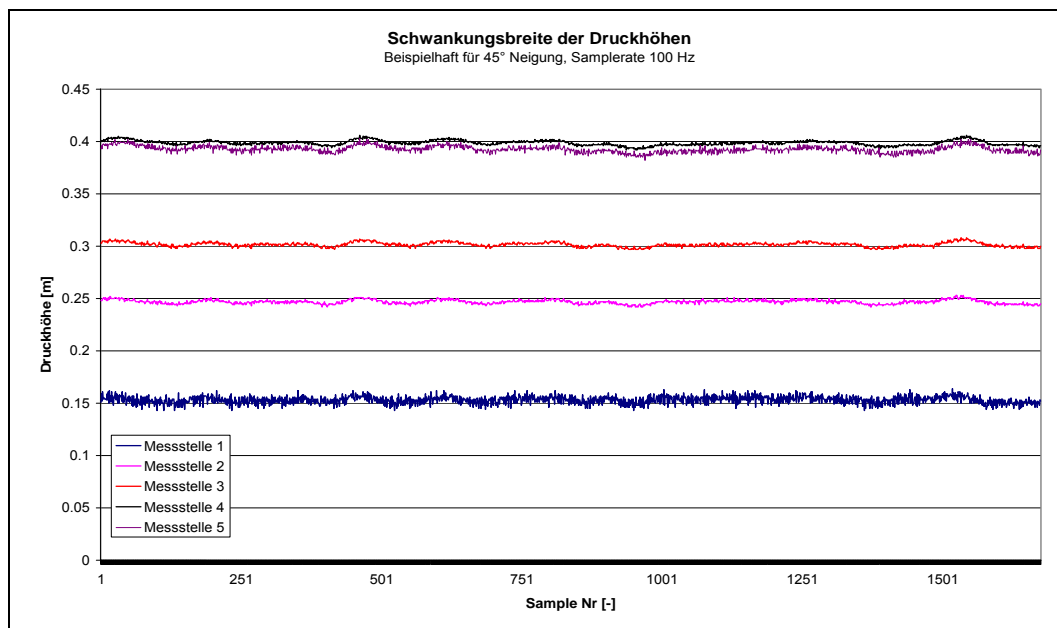
**Abbildung 4.35:** Verlauf der dynamische und hydrostatische Druckverteilung nach [RAEMY]

Für die statische Dimensionierung des Klappenkörpers und der Lagerung lassen sich aus den oben genannten Erkenntnissen folgende, praxisrelevante Aussagen ableiten:

- Die gemessenen mittleren Drücke entlang der Stauhaut entsprechen der hydrostatischen Druckverteilung. Dem Ansatz der sicheren Seite folgend sollte die Druckabnahme am Klappenendkante nicht in die Bemessung mit einfließen.
- Die Druckmessungen bei den unterschiedlichen Klappenneigungen zeigen keine Abweichungen oder Auffälligkeiten, so dass für die statische Bemessung der Schwingklappe der Lastfall  $90^\circ$  und Maximalstau herangezogen werden sollte. Der Unterwasserstand sollte nicht in die Betrachtung einfließen.
- Die maßgebliche horizontale Lagerkraft kann durch Integration der Druckkräfte entlang der Stauhaut bzw. der hydrostatischen Druckverteilung abgeleitet werden.

- Bei der konstruktiven Gestaltung des Lagers ist zu beachten, dass basierend auf dem Funktionsprinzip zusätzlich zu den horizontalen Kräften eine vertikale Auftriebskraft vorhanden ist. Vereinfacht kann davon ausgegangen werden, dass der Wirkungsbereich von Ober- und Unterwasserstand jeweils in der Lagerebene endet. Wir empfehlen jedoch, für die Lagerdimensionierung den vollen Auftrieb der Schwingklappe bezogen auf dem maximalen Oberwasserstand anzusetzen.

Neben der Betrachtung der Mittelwerte wurden im Rahmen der Druckuntersuchungen auch die zeitlich hoch aufgelösten Messungen analysiert. Dabei zeigte sich, dass die Schwankungsbreite der Druckkräfte bezogen auf den Mittelwert sehr gering sind (vgl. Abbildung 4.36). Auch künstlich herbeigeführte Betriebszustände wie etwa eine Pendelbewegung der Klappe hatten keine signifikanten Auswirkungen auf den Druckverlauf entlang der Stauhaut, so dass dieser Aspekt bei der Dimensionierung des Klappenkörpers nicht berücksichtigt werden muss.



**Abbildung 4.36:** Schwankungsbereich der Druckhöhen beim Prototypen an den fünf Druckmessstellen

Von besonderem Interesse ist die Auswertung der Druckmessung an der rückspringenden Klappenendkante (vgl. Abbildung 4.9; Messstelle 6). Aus hydrodynamischer Sicht kommt diesem Bereich eine entscheidende Rolle bei der Anfachung von Schwingungen zu. Wie in Kapitel 4.6.1 erläutert, können die in diesem Bereich auftretenden Rückströmungen zu Schwingungsproblemen am Schütz führen, wenn die Periodizität der Turbulenzstrukturen und der damit einhergehenden Druckschwankungen mit der Eigenfrequenz des Schützes zusammen fällt. Die Ausführungen zu dieser Thematik finden sich in Kapitel 4.6.4.

## 4.6 Schwingungsverhalten des Klappenkörpers

Die Schwingklappe ist ein kompakter, quasi steifer Hohlkörper, der auf einer Welle gelagert ist. Vernachlässigt man die Biegung und die Torsion des Klappenkörpers, so kann die Schwingklappe als System mit einem Freiheitsgrad angesehen werden. Diese Vereinfachung erscheint vor allem in Hinblick auf die Steifigkeit der verschiedenen Auslenkungsrichtungen (quer zur Klappenachse, um die Klappenachse) als zulässig. Im Rahmen der wasserbaulichen Versuche wurde untersucht, welche Eigenfrequenz das System Schwingklappe bei den unterschiedlichen Betriebszuständen besitzt und wie das Dämpfungsverhalten ausgeprägt ist. Aus diesen zwei Parametern lassen sich Aussagen über die Resonanzanfälligkeit und der damit verbundenen hydraulischen Betriebssicherheit ableiten.

### 4.6.1 Grundlagen

Strömungsinduzierte Schwingungen treten dann auf, wenn ein elastischer oder elastisch gelagerter Körper derart umströmt wird, dass Druckschwankungen in der Strömung oder entlang der Strömungsberandung anfachende Kräfte zwischen dem Fluid und dem Körper verursachen. Nach [BILLETTER] besteht im Falle der Schwingklappe das schwingungsfähige System aus einer kontinuierlich verteilten Masse, die elastisch gelagert ist, so dass die Auslenkung der Masse Rückstellkräfte in Form von Auftriebskräften induziert. Die Schwingklappe weist als schwingungsfähiges System mit einem Freiheitsgrad als erste Eigenform Drehung um die Achse mit einer entsprechenden Eigenfrequenz auf. Des Weiteren wird das physikalische Schwingungssystem durch Dämpfungskräfte beeinflusst. Bei der Schwingklappe sorgt der Wasserkörper ober- und unterstrom der Klappe und die damit verbundenen Masseschwingungen für eine Dämpfung.

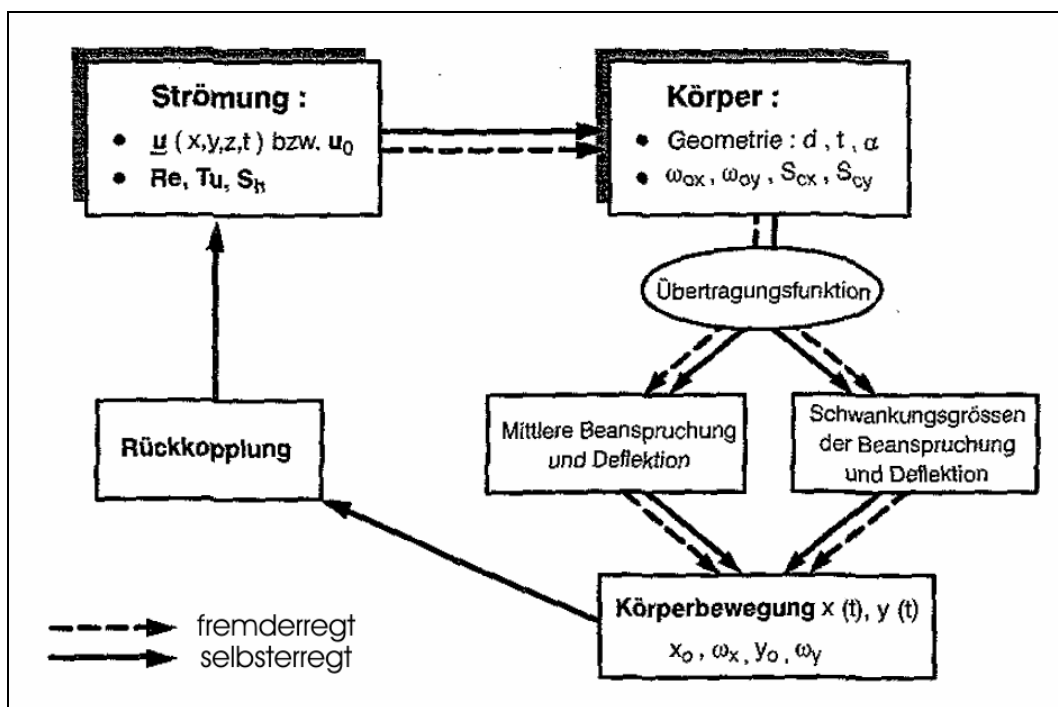
Um eine Schwingung anzuregen, muss Energie in das System eingebracht werden. Dies geschieht entweder in Folge turbulenter Druckschwankungen, die in der Strömung enthalten sind oder in Folge von Druckschwankungen, die am Körper erzeugt werden. Im Falle der Schwingklappe liegen beide Energieeintragsarten vor: Die Strömung ist turbulent und bei einer Drehung um die Achse ändern sich die Druck- und Geschwindigkeitsverhältnisse entlang der Stauhaut. Auf Grund des Funktionsprinzipes der Schwingklappe mit dem Momentengleichgewicht aus Strömungs-, Gewichts- und Auftriebskräften können zusätzlich auch Oberflächenwellen aus dem Oberwasser eine Schwingung mit Energie versorgen.



Liegt die Frequenz der periodischen Druckschwankungen nun weit außerhalb der Eigenfrequenz der Eigenform des schwingungsfähigen Systems, so entstehen bei der Wirbelablösung leichte, erzwungene Vibrationen. Diese beeinflussen jedoch nicht die Wirbelablösung selbst.

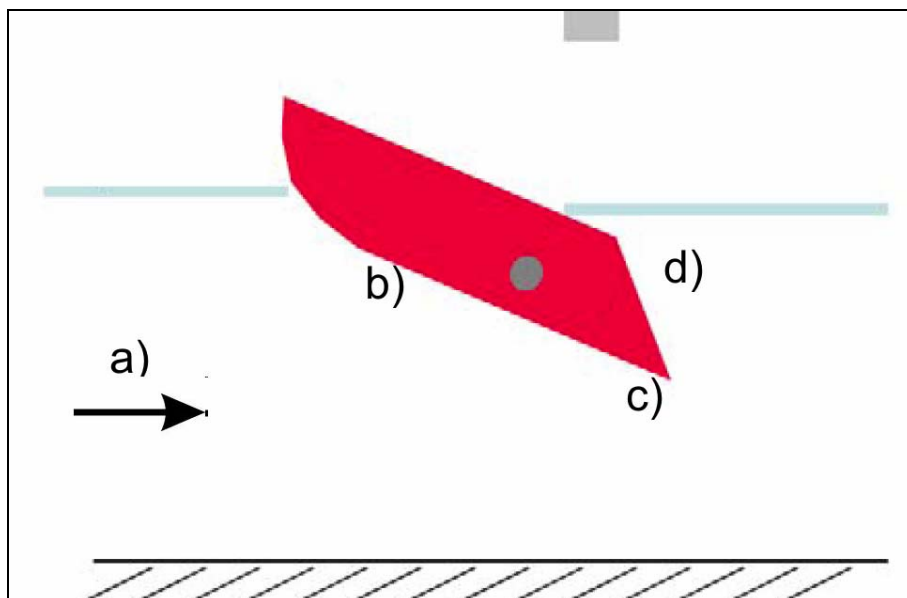
Liegt die Druckschwankungsfrequenz jedoch in der Nähe der Eigenfrequenz, so kann die Körperbewegung die strömungsbedingten Druckschwankungen beeinflussen. Man spricht dann von einer Rückkopplung. Bei einer positiven Rückkopplung wachsen die Schwingungsamplituden massiv an. Man spricht in diesem Fall von „lock-in“, was bedeutet, dass die Wirbelbildung am Körper mit der Körpereigenfrequenz synchronisiert wird. Das Verhalten des Schwingers wird nun nicht nur von der Anströmung und der Körpergeometrie sondern auch von den dynamischen Eigenschaften des Körpers selbst beeinflusst.

Besteht zwischen der Energie eintragenden Anfachung und der Körperbewegung keine Kopplung, so spricht man von einer fremderregten Schwingung. Systeme, bei denen die Anfachung vom Schwingungsverhalten beeinflusst ist, werden als Selbsterregt bezeichnet (vgl. Abbildung 4.37).



**Abbildung 4.37:** Prinzipskizze der strömungsinduzierten Schwingungen mit den wichtigsten Parametern und Variablen, modifiziert nach [BILLETTER].

In Bezug auf die Schwingklappe liegen unterschiedliche Mechanismen der Schwingungsanfängerung vor. Im Oberwasser kommt es zu einer erzwungenen Anfängerung in Folge der Strömungsturbulenz und Schwerewellen (vgl. Abbildung 4.38 a). An der Stauhaut kommt es ebenfalls zu einer erzwungenen Anfängerung in Folge der Turbulenz der Anströmung oder einer Strömungsinstabilität (vgl. Abbildung 4.38 b). An der Endkante der Schwingklappe kann es zu einer Anfängerung von z.T. sehr regelmäßigen Schwingungen in Folge von Wirbelbildungen und Ablösungen kommen. Die Bewegung der Klappenendkante hat auch einen Einfluss auf das nahe Strömungs- und Druckfeld und kann eine alternierende Fluidkraft hervorrufen. Dieser Mechanismus ist selbsterregt (vgl. Abbildung 4.38 c). An der unterwasserseitigen Tragstruktur kann die Strömungsturbulenz wiederum eine Anfängerung verursachen (vgl. Abbildung 4.38 c).



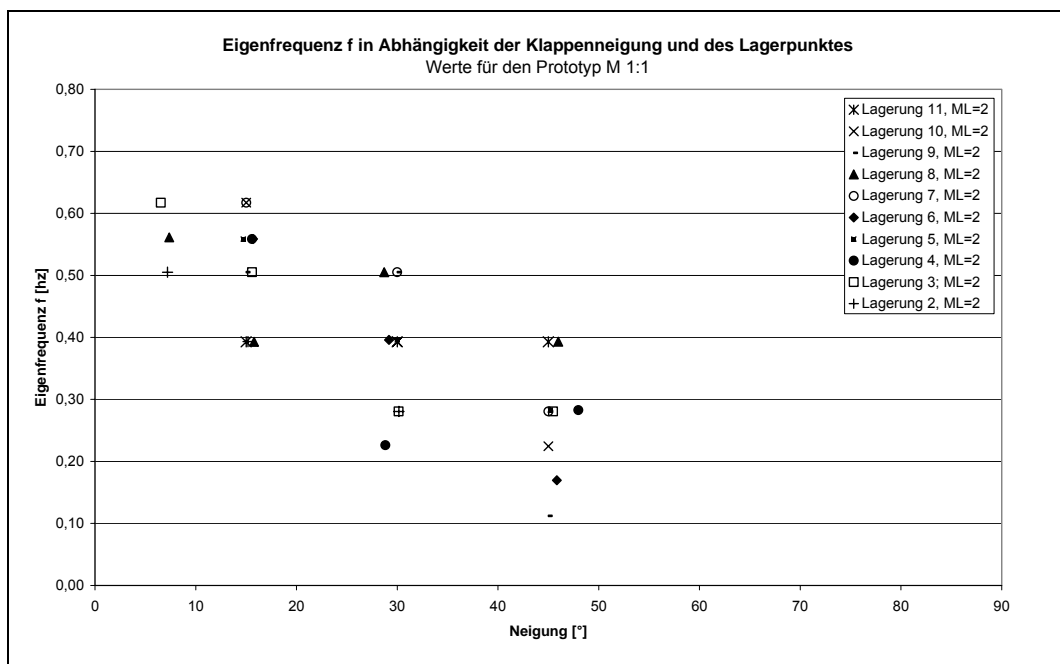
**Abbildung 4.38:** Zonen potentieller Schwingungsanfängerungsmechanismen bei der Schwingklappe

Die Modelluntersuchungen zum Schwingungsverhalten der Schwingklappe können die Differenzierung nach den verschiedenen Zonen nur bedingt abdecken. Aus den Druckmessungen lassen sich die energieeintragenden Mechanismen an der Stauhaut herausgelöst betrachten. Ansonsten wurde das Verhalten des Klappenkörpers unter verschiedenen natürlichen aber auch künstlich herbeigeführten Betriebszuständen untersucht und analysiert.

#### 4.6.2 Bestimmung der Eigenfrequenz

Um Aussagen über die Schwingungs- und Resonanzanfälligkeit eines Systems treffen zu können, muss dessen Eigenfrequenz bekannt sein. Im Falle der Schwingklappe besteht das schwingende System nicht nur aus dem Klappenkörper, sondern auch aus dem umgebenden Wasserkörper, in den die Klappe eintaucht. Als Eigenfrequenz wird diejenige Frequenz bezeichnet, mit der ein System nach einmaliger Anregung schwingt.

Die Eigenfrequenz der Schwingklappe wurde derart bestimmt, dass die eingetauchte Klappe aus der Ruhelage ausgelenkt und dann schlagartig sich selbst überlassen wurde. Die sich daran anschließende Pendelbewegung wurde mittels des Beschleunigungsaufnehmers aufgezeichnet und über eine Fouriertransformation (FFT) die Eigenfrequenz bestimmt. Die Versuche zur Eigenfrequenz wurden ausgehend von verschiedenen Neigungen und bei den unterschiedlichen Lagerungspunkten durchgeführt und entsprechend ausgewertet. In Abbildung 4.39 ist die Entwicklung der Eigenfrequenz über die Neigung für die verschiedenen Lagerungspunkten aufgetragen. Die Daten wurden im Modell Maßstab 1:2 gewonnen.



**Abbildung 4.39:** Eigenfrequenz in Abhängigkeit der Klappenneigung

Auffallend ist, dass die Eigenfrequenzen der verschiedenen Systeme trotz der unterschiedlichen Lagerungspunkte und der damit zusammenhängenden Geometrie über das untersuchte Neigungsspektrum in einer ähnlichen Größenordnung liegen. Betrachtet man die einzelnen Neigungen, so kann eine große Übereinstimmung der Eigenfrequenz bei den verschiedenen Lagerungspunkten festgestellt werden.

Aus Abbildung 4.39 kann ferner abgelesen werden, dass die Eigenfrequenz der eingetauchten Schwingklappe mit zunehmender Neigung abnimmt. Überträgt man diesen Sachverhalt auf die Schwingung einer Federpendels, so wird ersichtlich, dass das System der Schwingklappe mit zunehmender Neigung elastischer wird; ein „weiches“ Federpendel hat eine geringere Eigenfrequenz als ein „steifes“. Dieses Phänomen zeigt sich bei allen Lagerungspunkten entsprechend.

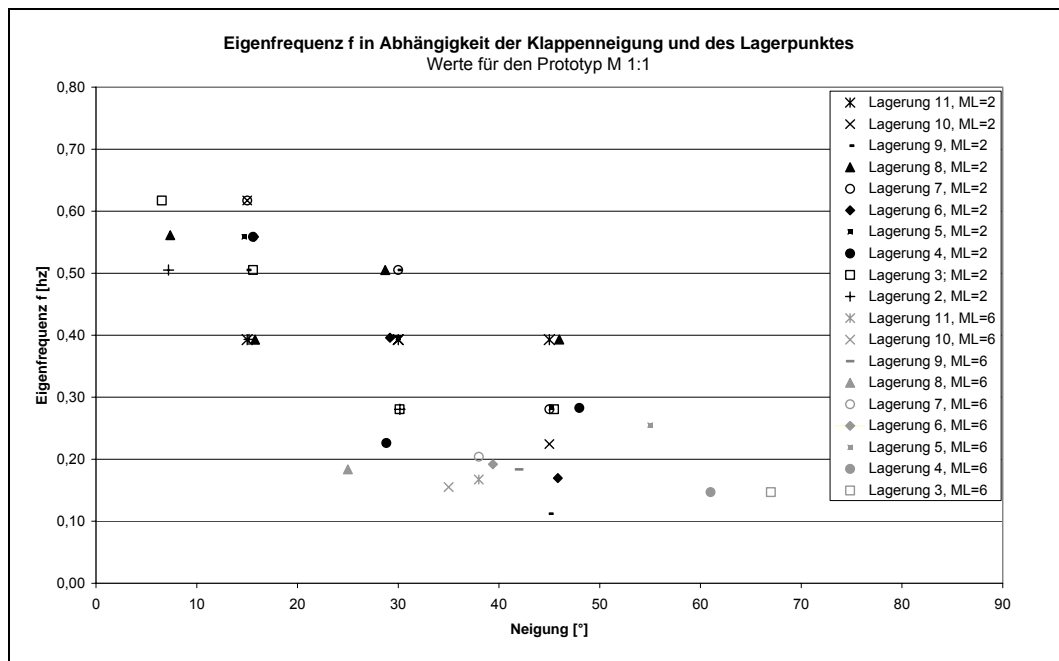
Die Auswertungen zeigen deutlich, dass das schwingende System aus dem Klappenkörper und dem umgebenden Wasser besteht. Es kann gefolgert werden, dass der Einfluss des Wasserkörpers wesentlich größer ist als der der Lagerungsgeometrie, da es ansonsten zu einer größeren Streuung der Eigenfrequenz kommen müsste.

Aus messtechnischen Gründen ist eine Bestimmung der Eigenfrequenz des Klappenkörpers in Trockenlage nicht möglich. Es ist jedoch davon auszugehen, dass auf Grund der veränderten Hebelverhältnisse erhebliche Unterschiede der Eigenfrequenz in Abhängigkeit der Lagerung vorhanden sein würden. Aus theoretischen Überlegungen lässt sich ableiten, dass bei Lagerungspunkten nahe dem Schwerpunkt (z.B. Lagerungspunkt 2) höhere Eigenfrequenzen auftreten als bei Lagerungspunkten, die weit vom Klappenschwerpunkt entfernt liegen (z.B. Lagerungspunkt 8).

Im Anschluss an die Projektpräsentation beim BWPLUS - Statuskolloquium 2007 wurde von den Gutachtern angeregt, die Aussagefähigkeit der Versuchsreihen durch die Betrachtung einer Modellfamilie zu steigern (vgl. 4.2.4). Die Eigenfrequenz der Schwingklappe bei unterschiedlicher Lagerungsgeometrie wurde daher auch im Versuchsstand Maßstab 1:6 bestimmt

Wie in der Modellbeschreibung in Kapitel 4.2.4 dargestellt, verfügt der Versuchsstand im Maßstab 1:6 nicht über die messtechnische Ausrüstung wie im Maßstab 1:2. Die Bestimmung der Eigenfrequenzen wurde daher mittels Videoauswertung realisiert. Analog zur Eigenfrequenzbestimmung im Maßstab 1:2 wurde die Klappe aus der Ruhelage ausgelenkt und die freie Schwingung dann mit einer Videokamera aufgezeichnet. Über eine Software wurden die Einzelbilder extrahiert. Somit standen 25

Einzelbilder pro Sekunde zur Verfügung, die die Schwingung dokumentieren. An der Scheibe der Versuchseinrichtung waren Messstreifen aufgebracht, so dass die Neigung des Klappenkörpers für jeden Zeitschritt ermittelt werden konnte. Abbildung 4.40 entspricht Abbildung 4.39 mit einer Ergänzung um die Ergebnisse zur Eigenfrequenz aus den Versuchen im Maßstab 1:6.



**Abbildung 4.40:** Eigenfrequenz in Abhängigkeit der Klappenneigung, Vergleich der Ergebnisse aus den Versuchen M 1:6 und M 1:2

Die Versuche zeigen eine gute Übereinstimmung der ermittelten Eigenfrequenzen bei den unterschiedlichen Maßstäben, so dass die Aussagekraft und die Übertragbarkeit der Versuchsreihen bezüglich der Eigenfrequenz eindeutig gegeben ist. Maßstabeffekte, die zu einer Verfälschung der Ergebnisse führen, können hierdurch ausgeschlossen werden. Generell sind die Eigenfrequenzen der Versuchsreihe M 1:6 niedriger als im Versuch M 1:2, die Ursache hierfür ist die Ausführung des Lagers. Die Lagerreibung im Versuche M 1:6 ist auf Grund der Fertigungstoleranzen größer, so dass die Drehung „gebremst“ wird, wodurch sich die Eigenfrequenz verringert. Dieser Effekt lässt sich gut mit Abbildung 4.44 dokumentieren, die den Schwingungsverlauf im Maßstab 1:6 zeigt.

Die Versuche zur Eigenfrequenz haben gezeigt, dass die Lagergeometrie einen untergeordneten Einfluss hat. Vielmehr wird das Schwingungsverhalten maßgeblich vom umgebenden Wasserkörper bestimmt. Hieraus kann abgeleitet werden, dass auch eine Abänderung der Geometrie (z.B. Klappenlänge) im Vergleich zu den untersuchten Abmessungen keinen signifikanten Einfluss auf das Schwingungsverhalten haben wird.

Vorraussetzung hierfür ist jedoch, dass der Klappenkörper ober- und unterwasserseitig eingetaucht ist und der Wasserkörper somit einen signifikanten Einfluss auf das schwingende System hat.

Das Modell der Schwingklappe wurde als 2D-Ausschnittsmodell untersucht. Das schwingende System hat als Freiheitsgrad die Drehung um die Achse, die rechtwinklig zum gewählten Modellausschnitt verläuft. Eine Ausweitung und Übertragung der Ergebnisse auf andere Klappenbreiten ist bedenkenlos möglich, da es hierdurch nicht zu einer Änderung der Hebel- oder Kraftverhältnisse oder der hydraulischen Belastung kommt.

### 4.6.3 Dämpfungsverhalten

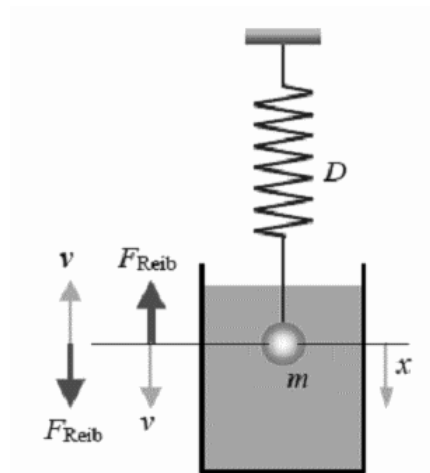
Wird ein System aus dem Ruhezustand ausgelenkt und durch eine Rückstellkraft wieder in den Ausgangszustand gebracht, so spricht man von einer Schwingung. Im Falle der Schwingklappe wird durch die Auslenkung der Klappenvorderkante nach unten die Auftriebskraft vergrößert, wodurch eine Rückstellkraft hervorgerufen wird.

Grundsätzlich basiert eine Schwingung auf der Umwandlung von Energieformen. Bei realen Systemen ist diese Umwandlung immer mit Reibungsverlusten behaftet, so dass die Amplituden kleiner werden und man von einer gedämpften Schwingung spricht. Anhand eines Beispiels aus der Physik soll dies näher erläutert werden:

Schwingt ein freier Oszillator in einer Flüssigkeit, so muss zusätzlich zur Federkraft  $F = -D \cdot x$  die Stokessche Reibungskraft  $F_r$  berücksichtigt werden. Diese ist wie folgt definiert:

$$F_r = -b \cdot v \quad (4.13)$$

Die Reibungskraft  $F_r$  ist dabei dem Geschwindigkeitsvektor entgegengerichtet und proportional zum Geschwindigkeitsbetrag  $|v|$ .



**Abbildung 4.41:** Viskos gedämpfte Schwingung einer Kugel in Flüssigkeit [MEIER]

Ganz allgemein können freie, gedämpfte Schwingungen durch folgende Differentialgleichung beschrieben werden:

$$m \cdot \ddot{x} = -D \cdot x - b \cdot \dot{x} \quad (4.14)$$

Mit den Abkürzungen:

$$\omega_0^2 = \frac{D}{m}, \quad 2\gamma = \frac{b}{m} \quad (4.15)$$

erhält man die allgemeine Bewegungsgleichung einer gedämpften Schwingung mit der Dämpfungskonstante  $\gamma$ :

$$\ddot{x} + 2\gamma\dot{x} + \omega_0^2 x = 0 \quad (4.16)$$

$$\text{Lösungsansatz:} \quad x(t) = c \cdot e^{\lambda t} \quad (4.17)$$

$$\text{Bestimmungsgleichung:} \quad \lambda^2 + 2\gamma\lambda + \omega_0^2 = 0 \quad (4.18)$$

$$\text{Lösungen:} \quad \lambda_{1,2} = -\gamma \pm \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2} \quad (4.19)$$

$$\text{Allgemeine Lösung:} \quad x(t) = e^{-\gamma t} \left[ c_1 e^{\sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2} \cdot t} + c_2 e^{-\sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2} \cdot t} \right] \quad (4.20)$$

Das zeitliche Verhältnis von  $x(t)$  hängt entscheidend vom Verhältnis:

$$\frac{\text{mittlere Rückstellkraft}}{\text{mittlere Reibungskraft}} = \frac{\langle D \cdot x \rangle}{\langle b \cdot \dot{x} \rangle} = \frac{m\omega_0^2 \sqrt{x^2}}{2\gamma m \sqrt{\dot{x}^2}} = \frac{\omega_0}{2\gamma} \quad (4.21)$$

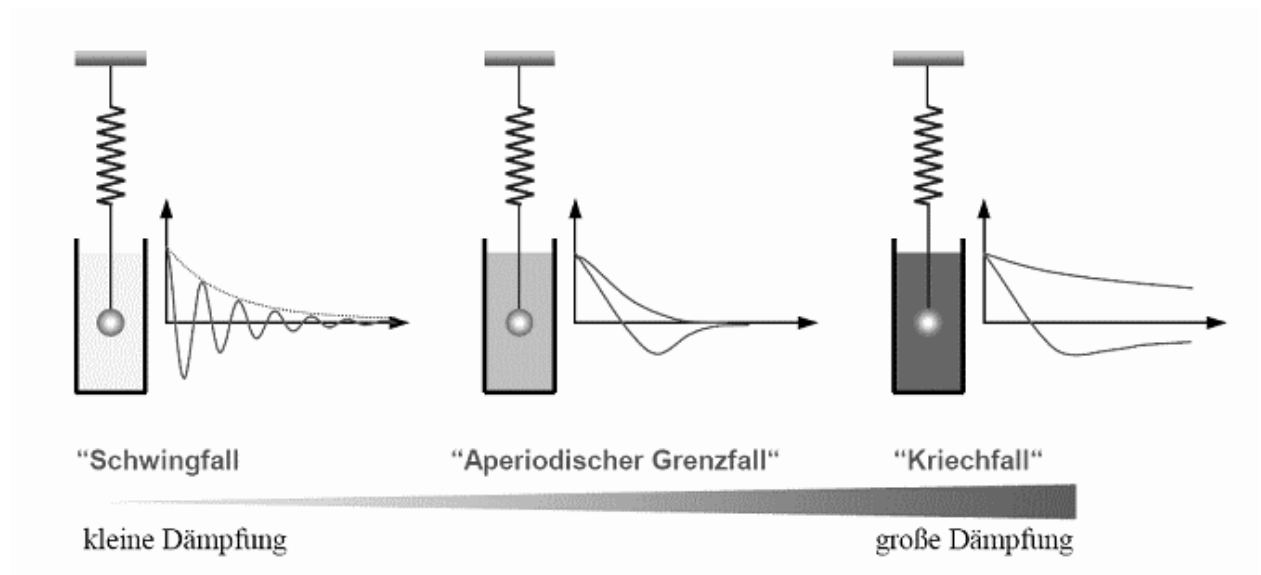
d.h. von der relativen Größe von  $\omega_0$  und  $\gamma$  ab.

Hieraus lassen sich drei verschiedene Dämpfungsfälle ableiten (vgl. Abbildung 4.42):

Fall 1:  $\gamma^2 - \omega_0^2 < 0$  oder  $\gamma < \omega_0$ , schwache Dämpfung, gedämpfte Schwingung

Fall 2:  $\gamma^2 - \omega_0^2 > 0$  oder  $\gamma > \omega_0$ , starke Dämpfung, Kriechfall

Fall 3:  $\gamma^2 - \omega_0^2 = 0$  oder  $\gamma = \omega_0$ , mittlere Dämpfung, aperiodischer Grenzfall



**Abbildung 4.42:** Dämpfungsarten bei viskoser Reibung [MEIER]

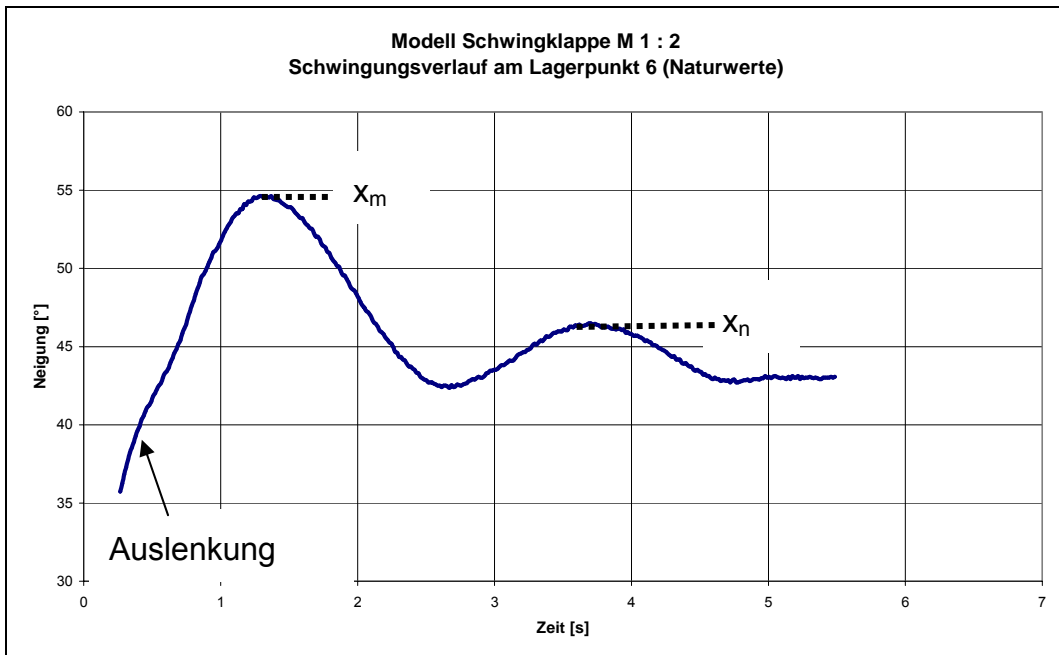
Die Dämpfung eines schwingenden Systems wird über den sog. Dämpfungsgrad, bzw. das Dämpfungsmaß  $D$  oder das Lehr'sches Dämpfungsmaß beschrieben und stellt die Energiegröße für die Dämpfung einer Schwingung dar. Für frei schwingende, abklingende Schwingsysteme kann der Dämpfungsgrad über das Verhältnis der Amplitude zweier aufeinander folgender Ausschläge gleicher Richtung über das logarithmische Dekrement ( $\Lambda$ ) wie folgt berechnet werden:

$$\Lambda = \ln \frac{x_m}{x_n} = \frac{2\pi\delta}{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}} = \delta T \quad (4.22)$$

$$D = \frac{\Lambda}{\sqrt{(2\pi)^2 + \Lambda^2}} \quad (4.23)$$

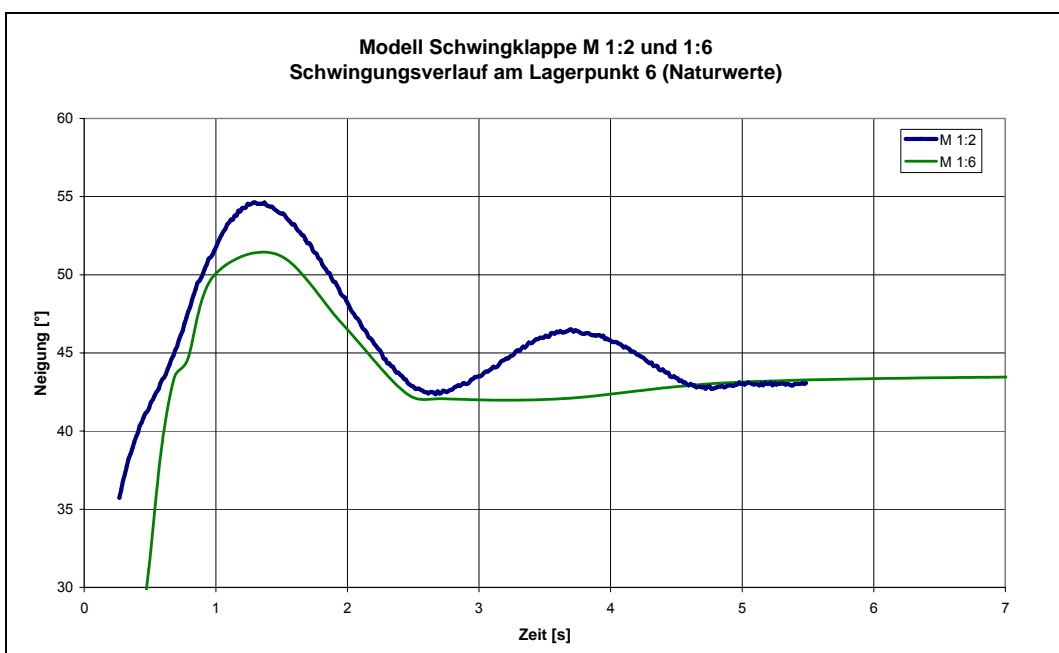
Im Rahmen der Modellversuche wurde das Dämpfungsmaß über eine Auswertung der Amplituden ermittelt. Hierzu wurden die Aufzeichnungen des Neigungssensors herangezogen. Abbildung 4.43 zeigt einen typischen Schwingungsverlauf und die dazugehörige Vorgehensweise zur Bestimmung des Dämpfungsmaßes  $D$ .





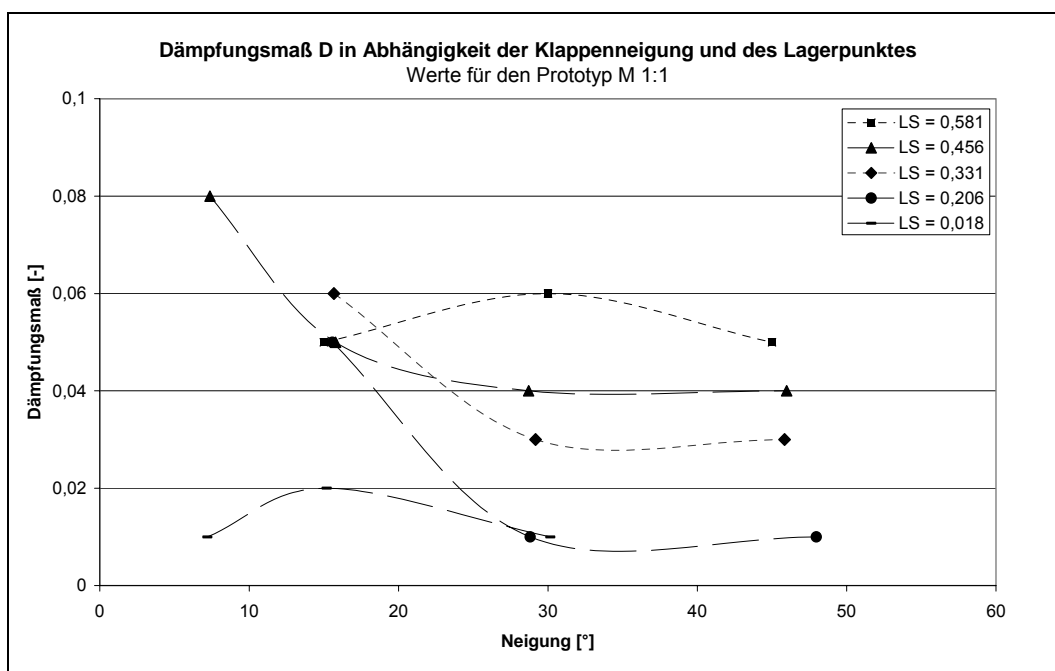
**Abbildung 4.43:** Schwingungsverlauf Lagerpunkt 6, Modell Maßstab 1:2.

Die Aussagekraft der Ergebnisse wurde wiederum durch die Betrachtung der Modellfamilie überprüft. Abbildung 4.44 zeigt exemplarisch den Verlauf der Schwingung für den Lagerungspunkt 6 im Maßstab 1:6. Die Dämpfung fällt im Vergleich zu den Versuchen im Maßstab 1:2 noch deutlicher aus und man kann keine ausgeprägte Schwingung mehr erkennen. Ursache hierfür ist die modelltechnische Ausbildung des Lagers. Die Reibungskräfte des PVC – Gleitlagers des Modells Maßstab 1:6 sind größer, so dass der Schwingung noch weniger Energie zur Verfügung steht. Die Größenordnung der Schwingung und Rückstellzeit bestätigen jedoch die Ergebnisse der Versuche im Maßstab 1:2.



**Abbildung 4.44:** Schwingungsverlauf Lagerpunkt 6, Modell Maßstab 1:2 und 1:6.

Das Dämpfungsmaß  $D$  wurde für sämtliche Lagerungspunkte und Anfangsneigungen vor der Auslenkung über Ausschwingversuche bestimmt. In Abbildung 4.45 ist die Entwicklung des Dämpfungsmaßes über die Klappenneigung exemplarisch für einige Lagerpunkte aufgetragen. Mit den Ausschwingversuchen konnte nur ein begrenztes Spektrum an Anfangsneigungen untersucht werden. Je nach Schreibweise kann das Dämpfungsmaß  $D$  ohne Einheit oder in Prozent angegeben werden.



**Abbildung 4.45:** Dämpfungsmaß  $D$  in Abhängigkeit der Klappenneigung und des Lagerpunktes

Aus den Auswertungen zum Dämpfungsgrad der Schwingklappe lassen sich zwei Rückschlüsse ableiten. Zum einen nimmt die Dämpfung während des Aufschwimmvorganges ab. Bei einer Klappenneigung von mehr als  $30^\circ$  kann die Dämpfung jedoch als konstant angesehen werden.

Beim Aufrichten wandert der Schwerpunkt näher an den Lagerungspunkt, wodurch sich die Trägheitsmomente und damit einhergehend auch das Dämpfungsverhalten ändern. Die Schwingklappe greift ab einer Klappenneigung von ca.  $15^\circ$  bis  $30^\circ$  in das Abflusgeschehen ein (vgl. Kapitel 4.4.3). Hierdurch stellt sich ein Wasserstandsunterschied zwischen Ober- und Unterwasser ein. Der Druckunterschied zwischen Ober- und Unterwasserstand wird durch die Strömungskräfte im Schlitzbereich kompensiert, so dass der Klappenkörper gewissermaßen von den angreifenden Kräften eingespannt wird und das Dämpfungsverhalten von der Neigung entkoppelt wird.

Als zweite Schlussfolgerung zeigen die Messergebnisse, dass mit zunehmendem Abstand des Lagerungspunktes vom Schwerpunkt (großes LS) der Dämpfungsgrad ebenfalls größer wird. Als Ursache hierfür wird die Gewichtsverteilung und das träge Verhalten der Schwingklappenmasse angesehen. Je weiter der Lagerungspunkt vom Schwerpunkt entfernt ist, umso größer ist der Unterschied zwischen den Massen des ober- und unterwasserseitigen Teils der Schwingklappe. Zudem ändert sich auch das Verhältnis der eingetauchten Volumina im Ober- und Unterwasser.

Die Messergebnisse zum Dämpfungsgrad wurden auch mit Literaturangaben von Baustoffen, realisierten Brückenprojekten und Aussichtstürmen verglichen. Die Tabellen 4.3, 4.4 und 4.5 geben einen Überblick.

**Tabelle 4.3:** Dämpfungsmaß für einige Baustoffe [MATHIAK]

| Baustoff              | D [%]     | D [-]         |
|-----------------------|-----------|---------------|
| Stahl                 | 0,3 – 1,6 | 0,003 – 0,016 |
| Stahlbeton gerissen   | 1,0 – 5,0 | 0,01 – 0,05   |
| Stahlbeton ungerissen | 0,6 – 3,2 | 0,006 – 0,032 |
| Mauerwerk             | 2,0       | 0,02          |
| Holzkonstruktionen    | 2,4       | 0,024         |

**Tabelle 4.4:** Messergebnisse zum Dämpfungsgrad von Brücken [HAMM]

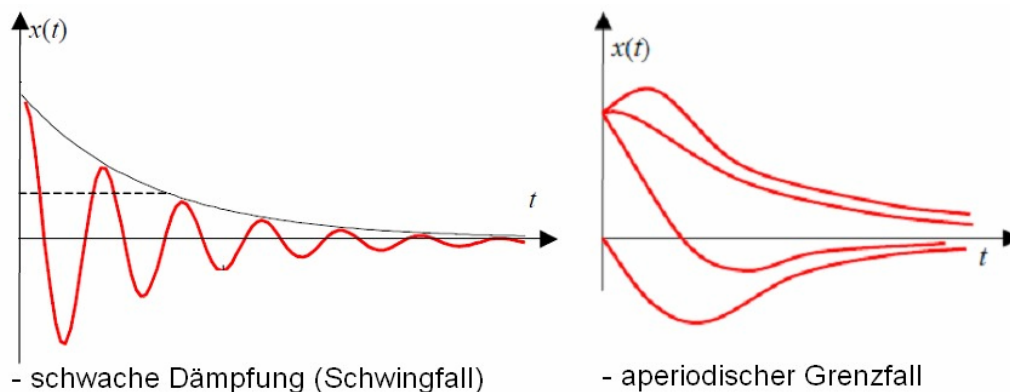
| Name               | Konstruktion           | max. Spannweite [m] | D [%] |
|--------------------|------------------------|---------------------|-------|
| Linkenheimer Allee | Beton, Durchlaufträger | ca. 15              | 0,5   |
| Rossmoyne          | Beton, Durchlaufträger | 33,5                | 1,9   |
| Zirndorf           | Stahl, Durchlaufträger | 13,8                | 0,9   |
| Wieden             | Stahl, Hängebrücke     | 80                  | 1,5   |
| Deutsches Museum   | Stahl, Hängebrücke     | 35                  | 4,0   |
| Millenium Bridge   | Stahl, Hängebrücke     | 144                 | 0,6   |
| Ploching           | Alu, Einfeldträger     | 14,3                | 1,0   |
| Hölzerner Steg     | Holz, Durchlaufträger  | 52                  | 0,7   |
| Ansbach            | Holz, Schrägseilbrücke | 40                  | 1,3   |

**Tabelle 4.5:** Messergebnisse zum Dämpfungsgrad vom Aussichtstürmen [MÜLLER]

| Name                    | Konstruktion  | Höhe [m] | D [%] |
|-------------------------|---------------|----------|-------|
| Eichberg, Emmendingen   | Stahl, Holz   | 50       | 1,5   |
| Windpark Ettenheim      | Stahlfachwerk | 29       | 0,7   |
| Büchenbronn             | Stahlfachwerk | 25       | 4,0   |
| Hohenwart, Pforzheim    | Brettschicht  | 40       | 2,4   |
| Jacobuskirche Karlsruhe | Stahl         | ca. 12   | 0,8   |

Es kann festgehalten werden, dass das Dämpfungsmaß der Schwingklappe mit Werten zwischen 3,0 % und 6,0 % eine deutlich größere Dämpfung darstellt als in der Baupraxis üblich. Abhängig von der Konstruktion liegen z.B. die Dämpfungsmaße von Brücke oder Türmen durchschnittlich im Bereich zwischen 1,0 – 2,0 %. Ein Vergleich des Dämpfungsverhaltens der Schwingklappe gerade mit diesen Bauwerken erscheint vor dem Hintergrund der Schwingungsanfälligkeit, des Resonanzverhaltens und dem Gefährdungspotential, welches von solchen Bauwerken ausgeht, als gerechtfertigt.

Das Schwingungsverhalten der Schwingklappe im Falle einer Auslenkung (vgl. Abbildung 4.43 und Abbildung 4.44) kann zusätzlich anhand des Schwingungsverhaltens des eingangs aufgezeigten physikalischen Experimentes (vgl. Abbildung 4.46) näher analysiert werden.

**Abbildung 4.46:** Klassifizierung des Schwingungsverhaltens [MEIER]

Es kann festgestellt werden, dass bei der Schwingklappe eine Dämpfung auftritt, die in Analogie zu dem physikalischen Grundlagenexperiment zwischen einer schwachen Dämpfung und dem aperiodischen Grenzfall liegt. Im Schwingfall (vgl. Abbildung 4.46, links) erhält man eine exponentiell gedämpfte Schwingung. Hierbei verringert sich die Frequenz der Schwingung mit zunehmender Dämpfung.

Beim aperiodischen Grenzfall besteht die Schwingung aus einer einzigen Auslenkung mit einem exponentiellen Abfall. Sie strebt jedoch sehr schnell gegen Null. Die aperiodische Dämpfung ermöglicht die schnellste Dämpfung von unerwünschten Schwingungen und wird daher in der Technik unter anderem bei Dämpfungssystemen für Fahrzeuge eingesetzt.

Aus den obigen Ausführungen und den Versuchen zum Dämpfungsverhalten der Schwingklappe lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

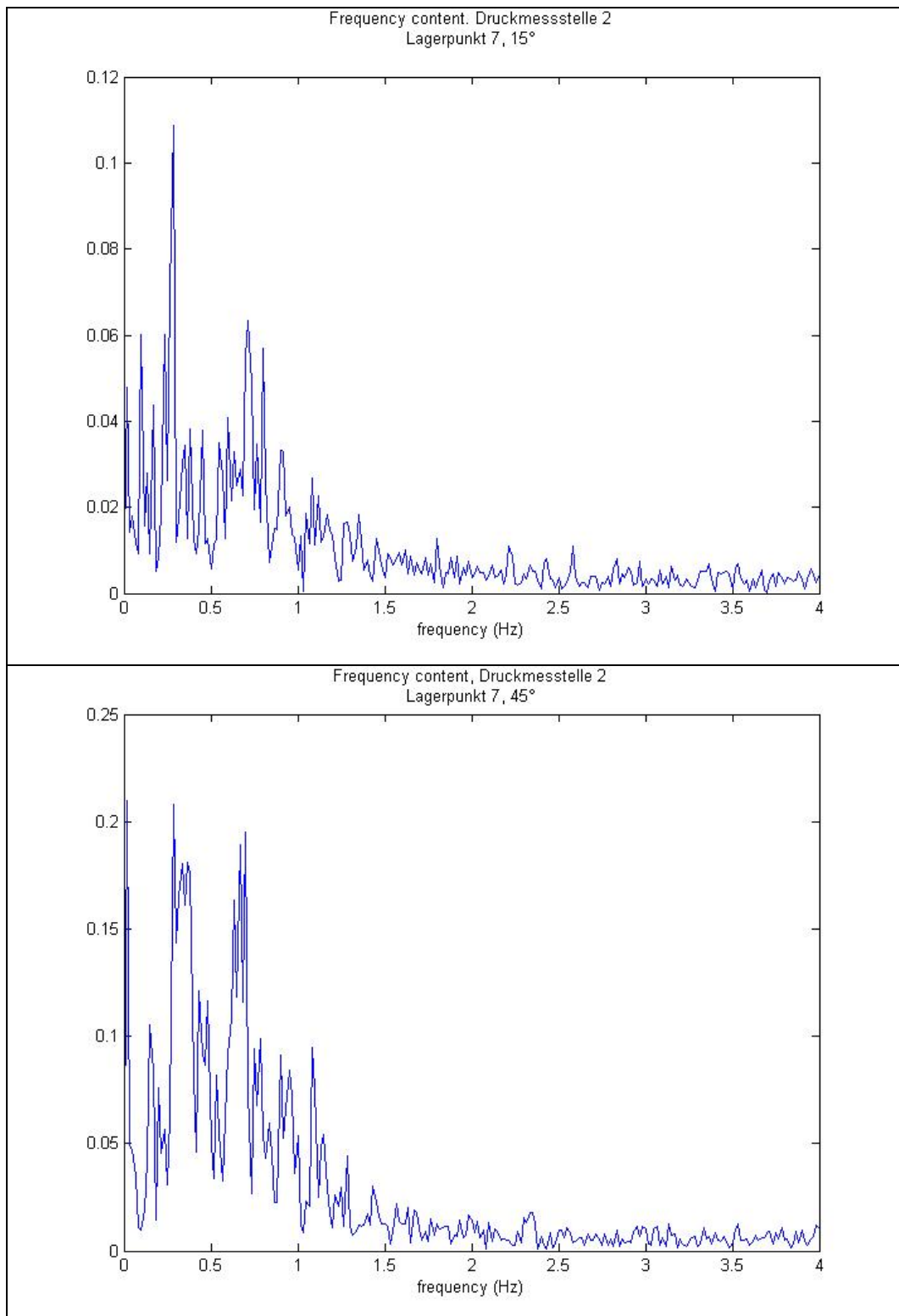
- Das System der Schwingklappe weist eine starke Dämpfung mit einem Dämpfungsgrad je nach Lagerungspunkt und Neigung zwischen 3,0% – 6,0% auf.
- Das grundsätzliche Dämpfungsverhalten ist unabhängig von der Wahl des Lagerungspunktes.
- Das beobachtete Dämpfungsverhalten stellt sich über den gesamten Verlauf des Aufschwimmvorganges der Schwingklappe ein.

#### **4.6.4 Druckschwankungen entlang der Stauhaut**

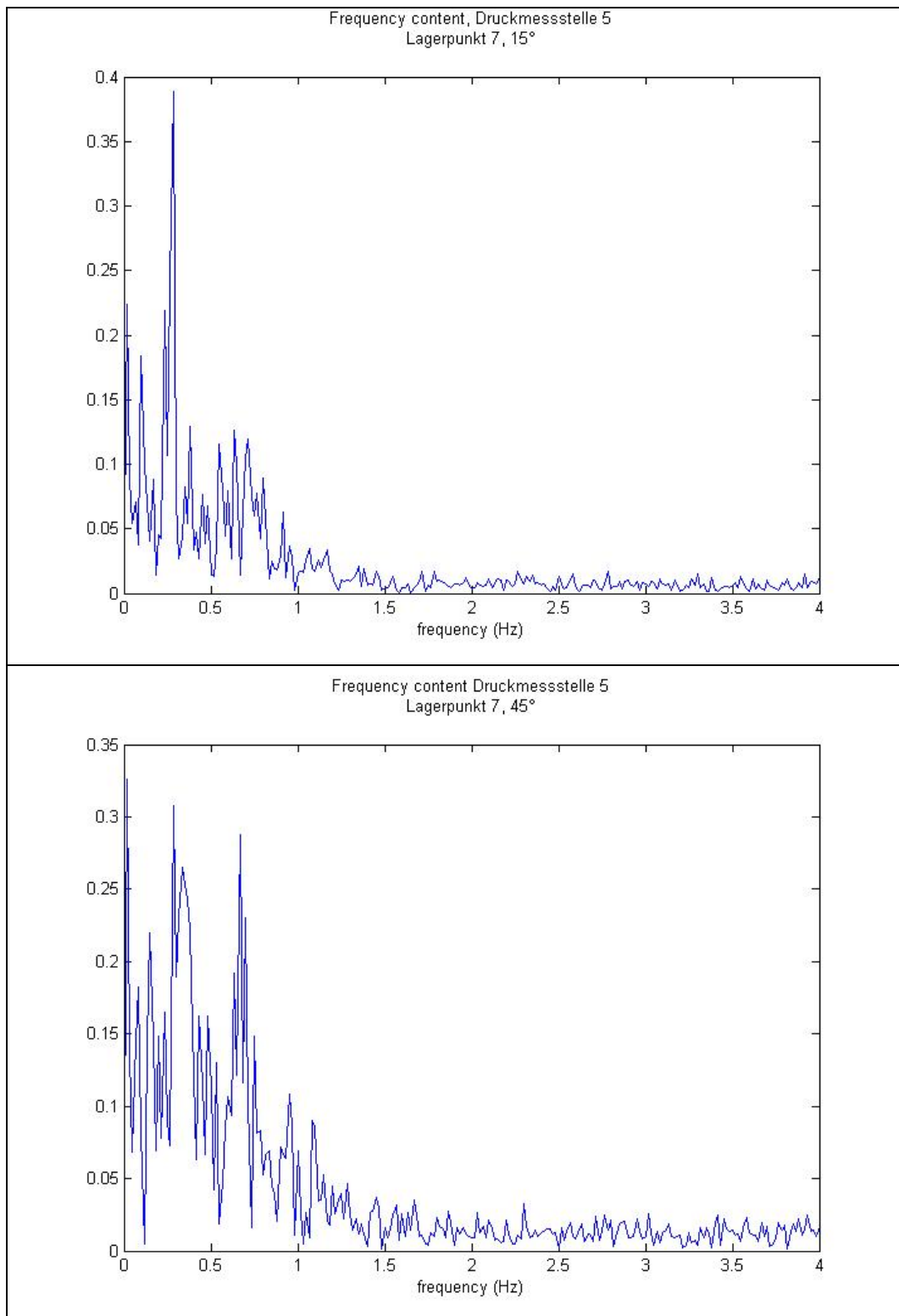
Die Zonen für eine potentielle Schwingungsanfachung bei der Schwingklappe wurden in Abbildung 4.38 markiert. Die messtechnische Ausstattung des Klappenkörpers mit Druckmessdosen lässt eine genauere Betrachtung der Zonen b) und c) zu. Entlang der Stauhaut kommt es auf Grund der Turbulenz der Strömung zu Druck- und Geschwindigkeitsschwankungen.

Die Signale der Druckmessdosen wurden wie die der anderen Sensoren hochfrequent mit 100 Hz aufgezeichnet, so dass sie analog zu den Daten des Beschleunigungsaufnehmers mittels einer Fouriertransformation (FFT) hinsichtlich der Frequenzspektren ausgewertet werden konnten. Die Auswertung wurde für die sechs Druckmessstellen bei einer Neigung von 15°, 30°, 45° durchgeführt.

In Abbildung 4.47 ist das ermittelte Frequenzspektrum bei einer Klappenneigung von 15° und 45° bei Lagerpunkt 7 exemplarisch für die Druckmessstelle 2 dargestellt. Abbildung 4.48 zeigt das Spektrum für die Druckmessstelle 5, ebenfalls für eine Neigung von 15 ° und 45°.



**Abbildung 4.47:** Spektralanalyse, Druckmessstelle 2, Betrachtung bei 15° und 45°, Modellwerte Maßstab 1:2



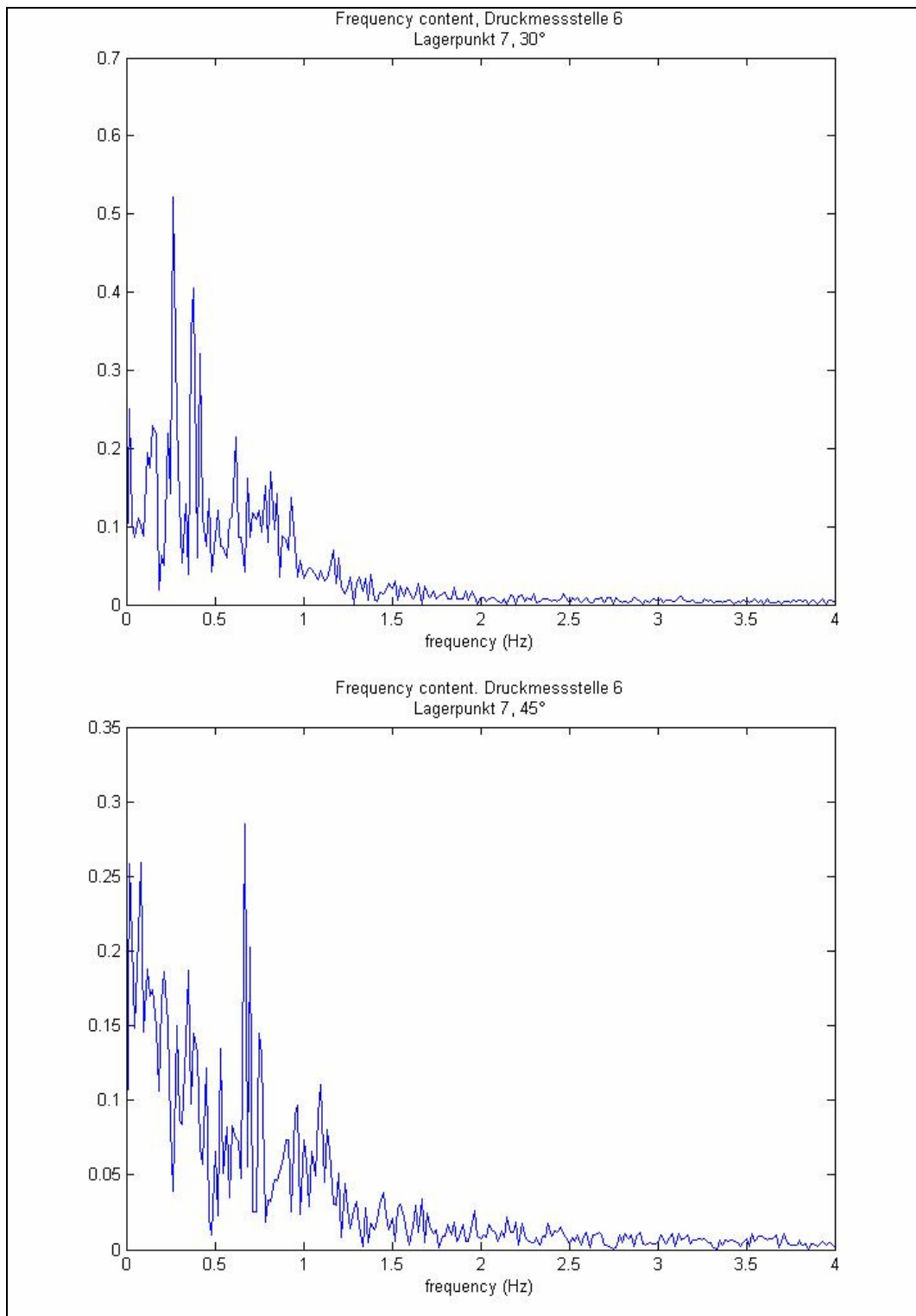
**Abbildung 4.48:** Spektralanalyse, Druckmessstelle 5, Betrachtung bei 15° und 45°. Modellwerte Maßstab 1:2

Die Spektralanalyse aller sechs Druckmessstellen zeigt keine Auffälligkeiten bezüglich der turbulenten Anströmung. Ein Wirbel kann seine Energie nur durch Dissipation infolge molekularer Reibung verlieren, wobei die kinetische Energie in einem Wirbel in Wärmeenergie umgewandelt wird. In der Literatur wird von einer Kaskadierung der Energie durch vortex-stretching bzw. dem Turbulenzmodell von Kolmogorov gesprochen. Die größten Wirbel entziehen der Strömung die Energie und verteilen diese auf kleinere, diese wiederum auf noch kleinere. Abschließend wird die Energie durch die kleinsten Wirbelsysteme infolge molekularer Reibung dissipiert [TENNEKES].

Dieses Phänomen spiegelt sich auch in den Darstellungen der Spektren wieder. Große Wirbel drehen langsamer als kleine, besitzen aber eine größere Energiedichte, so dass die turbulente Strömung über ein breites Frequenzband mit abfallenden Amplituden abgebildet wird. Einzelne, stark ausgeprägte Peaks treten nicht auf. Die zu erkennenden kleineren Peaks haben ihre Ursache in dem Messaufbau. Die Druckmessdosen wurden möglichst plan in die Stauhaut eingelassen. Teilweise ergaben sich dennoch kleinere Rücksprünge im Übergang der Stauhaut zur Membran der Druckmessdose. Hier entstehen kleine Ablösungen die als Druckschwankungen mit einer bestimmten Frequenz in der Spektralanalyse auftauchen können.

In Kapitel 4.6.1 wurde auf die besondere Bedeutung des unterwasserseitigen Rücksprungs des Klappenkörpers auf die Schwingungsanregung eingegangen. In Folge der stark turbulenten Rückströmung kann es hier zu einer periodischen Anregung der Stauhaut kommen. In der Versuchsreihe wird dieser Bereich durch die Druckmessstelle 6 repräsentiert. Die Auswertung der Spektren für diesen Bereich ist in Abbildung 4.49 aufgetragen. Es zeigt sich, dass der Verlauf des Spektrums gut mit den Ergebnissen der Druckmessstellen 2 und 5 übereinstimmt und dass die grundsätzlichen Überlegungen zur Geometrie des Klappenkörpers bestätigt werden können. Auch an der rückspringenden Klappenendkante konnten keine ausgeprägten Anregungsmechanismen dokumentiert werden.





**Abbildung 4.49:** Spektralanalyse, Druckmessstelle 6, Betrachtung bei 30° und 45°, Modellwerte Maßstab 1:2

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die durchgeführten Messungen und Auswertungen zur Anregung der Stauhaut gut mit den Angaben aus der Literatur übereinstimmen. Die Amplituden und damit der Energiegehalt nehmen mit zunehmender Frequenz bzw. abnehmender Wirbelgröße ab. Für das System der Schwingklappe kann aus den Versuchen abgeleitet werden, dass die größeren, energiereichsten Wirbel der turbulente Strömung die Stauhaut der Schwingklappe mit einer Frequenz von kleiner 1,0 Hz anregen.

In Kapitel 4.6 wurde die Eigenfrequenz des schwingenden Systems der Schwingklappe für unterschiedliche Betriebsszenarien untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Schwingung sehr stark gedämpft ist und die Eigenfrequenzen, abhängig von der Neigung, beim Prototypen im Bereich  $< 1,0$  Hz liegen. Die Stauhaut wird von der turbulenten Strömung angeregt, die Frequenzen liegen ebenfalls im Bereich  $< 1,0$  Hz. Die in das System eingetragene Energie im Resonanzfall wird jedoch durch das Dämpfungsverhalten kompensiert, so dass eine ausgeprägte, resonante Schwingung ausgeschlossen werden kann. Im gesamten Untersuchungsprogramm konnte kein Betriebszustand eingestellt werden, der Anzeichen einer resonanten Schwingung oder eines Aufschaukelns des Systems zeigte.

#### **4.6.5 Fazit Schwingungsverhalten**

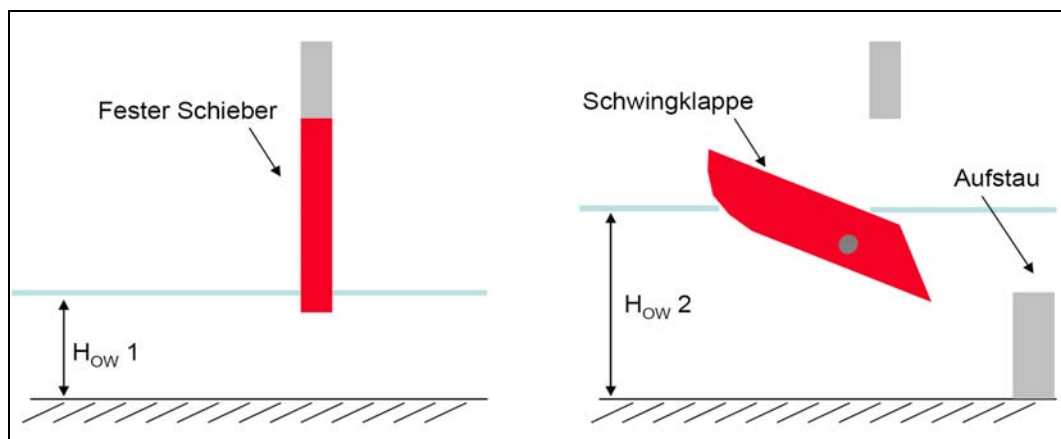
Sowohl die zuvor dargestellten Ergebnisse als auch die Beobachtungen und die Videodokumentation des breiten Spektrums an Betriebszuständen zeigen keine Anzeichen für eine Resonanzanfälligkeit des Systems Schwingklappe. Vor allem die Ausführungen zum Dämpfungsgrad zeigen deutlich, dass der Wasserkörper, der die Schwingklappe umgibt, das Schwingungsverhalten maßgeblich beeinflusst und stark zur Dämpfung beiträgt. Ein Vergleich des Dämpfungsmaßes mit Werten von Brücken und Türmen aus der Natur unterstreicht dies.

Für die Versuche zur Bestimmung der Eigenfrequenz wurde der Klappenkörper bis zu  $30^\circ$  aus der Ruhelage ausgelenkt. Auch hier folgte eine gedämpfte Bewegung mit einer leichten Überschwingung zurück in die Ruhelage. Bezogen auf die Schwingungsanfälligkeit kann aus den gewonnen Erkenntnissen ohne Einschränkungen die Praxistauglichkeit der Schwingklappe abgeleitet werden.

#### 4.7 Stauraumbewirtschaftung am Beispiel HRB Rittersbach

In den bisherigen Kapiteln wurde das hydraulische Verhalten der Schwingklappe ausführlich beleuchtet. Dabei hat sich gezeigt, dass die Wasserstands-Abfluss-Beziehung der unterwasserseitigen Gewässerstrecke gewisse Anforderungen erfüllen muss. Bei kleinen Abflüssen muss der Wasserstand angehoben werden, um ein Aufschwimmen der Schwingklappe zu ermöglichen (vgl. Kapitel 4.4.2).

Aus ökologischen Gründen darf die Sohle im Bereich des Durchlassbauwerkes nicht eingetieft werden, so dass eine tiefere Einbaulage der Schwingklappe ausscheidet. Um die notwendige Höhe des Unterwassers sicher zu stellen, muss durch die geeignete Wahl des unterwasserseitigen Gewässerquerschnittes ein Aufstau erreicht werden. Dieser Aufstau wirkt sich jedoch auch auf den Wasserstand im Becken aus. Bei anlaufender Hochwasserwelle ist der Wasserstand bei der Schwingklappe im Retentionsbereich im Vergleich zur Blende bereits erhöht (vgl. Abbildung 4.50 rechts).



**Abbildung 4.50:** Einfluss der Unterwasser-Kennlinie auf die Stauraumbewirtschaftung, schematische Betrachtung der Blende (links) und der Schwingklappe (rechts).

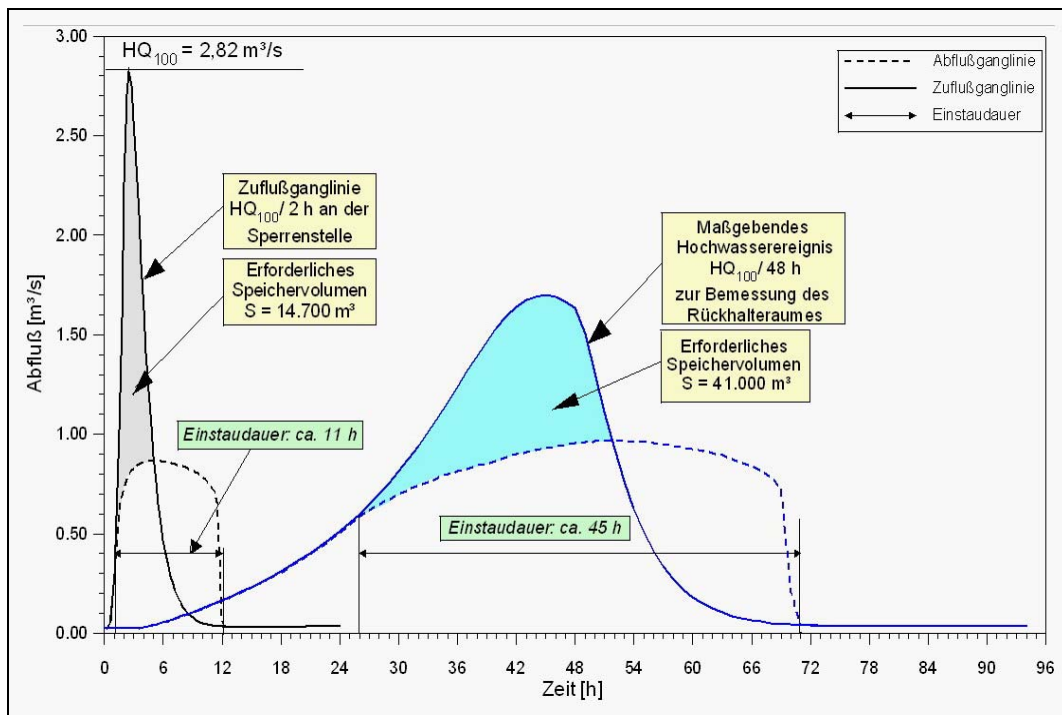
Um dem Einfluss dieses Effektes auf die Stauraumbewirtschaftung zu quantifizieren wurde eine numerische Simulation durchgeführt, die einen Vergleich zwischen einer ungesteuerten Blende und der Schwingklappe zulässt. Als Datengrundlage wurde das existierende HRB Aglasterhausen/Rittersbach im Einzugsgebiet Elsenz-Schwarzbach herangezogen, zu dem zahlreiche hydraulische und hydrologische Daten vorhanden sind (vgl. 8.3.3). Die Simulation wurde mit dem Softwarepaket Hochwasseranalyse und –berechnung durchgeführt, dass als Eigenentwicklung des Instituts für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG), Abteilung Hydrologie seit 1991 kontinuierlich weiterentwickelt wurde.

Im Modul Niederschlag-Abfluss-Modelle für kleine Einzugsgebiete ist im Softwarepaket das Programm SEERET enthalten, mit dem der Betrieb eines Hochwasserrückhaltebeckens simuliert werden kann. Seit 2002 ist das Softwarepaket auch als Windows-Version verfügbar, mit folgenden wesentlichen Vorteilen in Stichworten:

- Einfache Programmnavigation mit der Maus oder den gewohnten Funktionstasten
- Programmausgabe (Tabellen und Graphiken) auf vorinstallierte Drucker
- Abspeichern der Diagramme als Pixelgraphik (BMP) oder Vektorgraphik (HPGL)
- Zwischenablagefunktion, Einfügen mit "Copy & Paste" in Office-Programme
- Programmspezifische Hilfefunktion (PDF-Dateien)
- Projektdatensätze alter Versionen sind unter der neuen Version voll lauffähig

Dieses benutzerfreundliche, inzwischen voll dialoggesteuerte Softwarepaket besteht aus 28 einzelnen Programmen, mit denen praxisnah nahezu alle Aufgaben der hydrologischen Bemessung von wasserbaulichen Anlagen in einem Flusseinzugsgebiet bearbeiten werden können. Die bisherige und zukünftige Entwicklung des Softwarepakets orientierte sich dabei an Aufgabenstellungen, mit denen das IWG in zahlreichen hydrologischen Untersuchungen konfrontiert wird [IWG-HW].

Als Eingangsgröße für die Simulation wurden zwei Bemessungshochwasserereignisse herangezogen,  $HQ_{100}/2h$  und  $HQ_{100}/48h$  (vgl. Abbildung 4.51). Die Geometrie der Blende wurde entsprechend der Dimensionen des realen Hochwasserrückhaltebeckens übernommen. Die Abflussregelungseigenschaften der Schwingklappe wurde aus den Modellversuchen übernommen und in Form einer Oberwasserstand-Abfluss-Beziehung berücksichtigt.



**Abbildung 4.51:** Wirkungsweise des HRB A26 Aglasterhausen / Rittersbach [ZVHWS2003]

Die Ergebnisse der Simulation, jeweils der Vergleich zwischen Blende und Schwingklappe sind in den Abbildung 4.52, Abbildung 4.53 und Abbildung 4.54 auf den folgenden Seiten dargestellt.

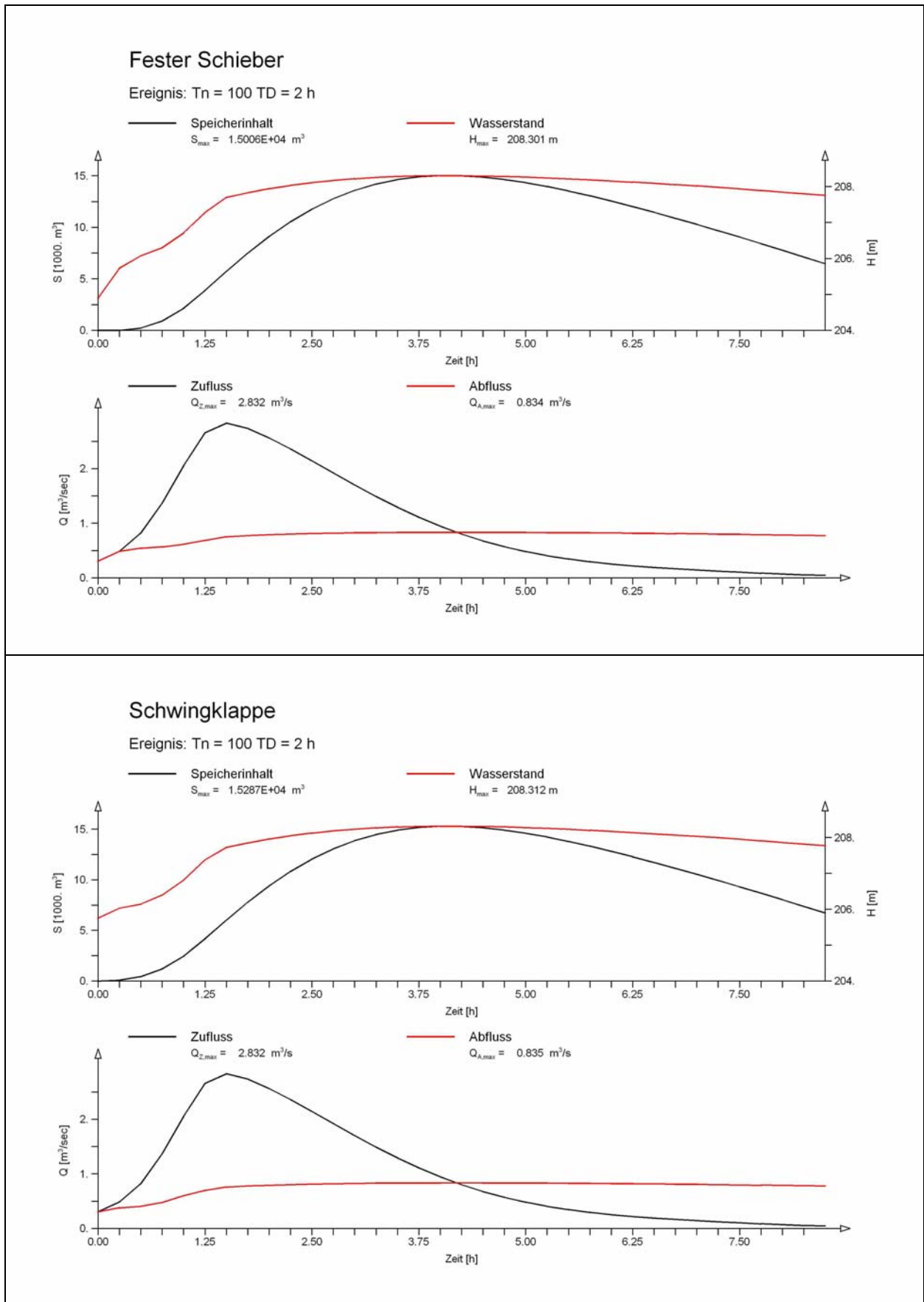
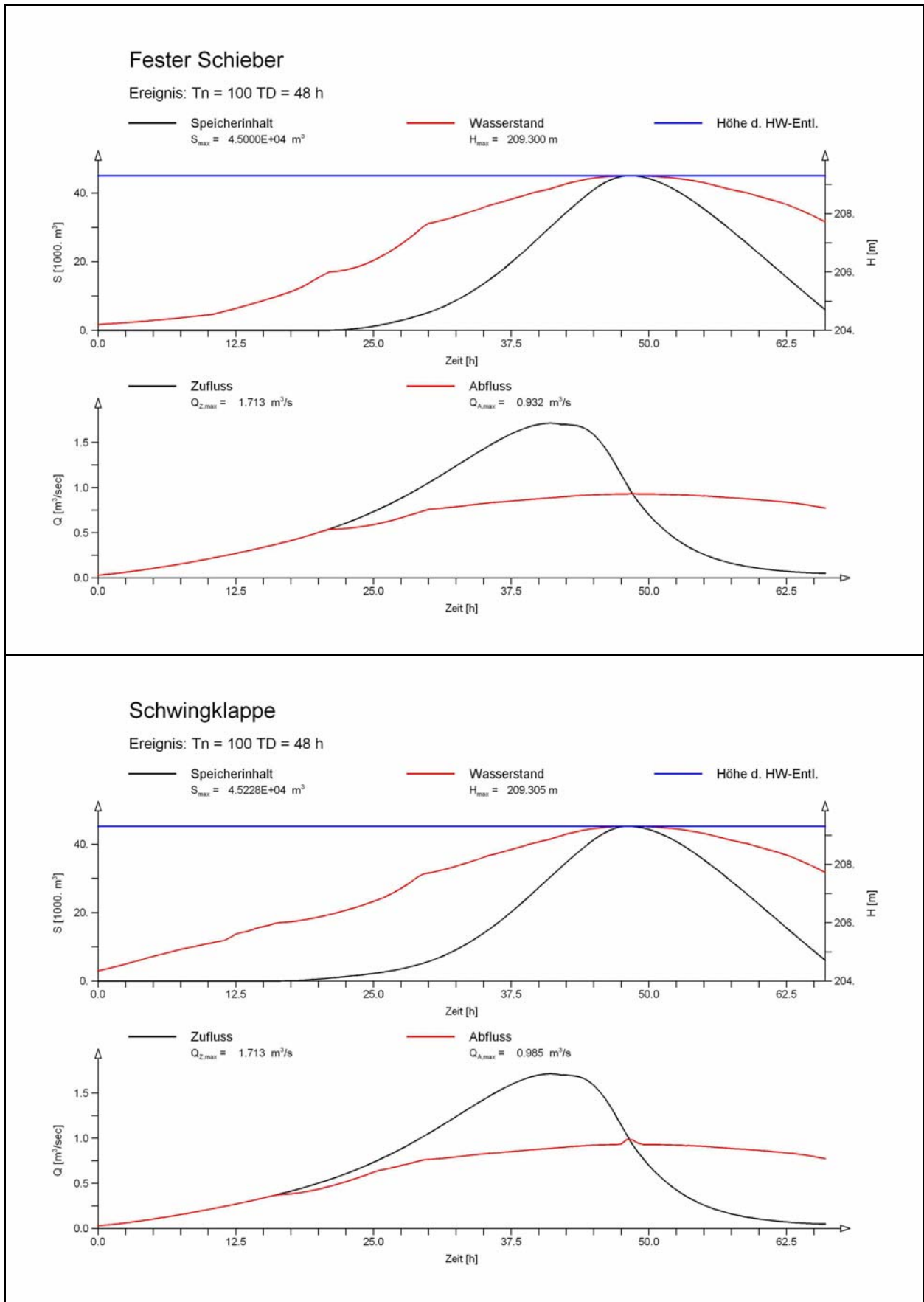
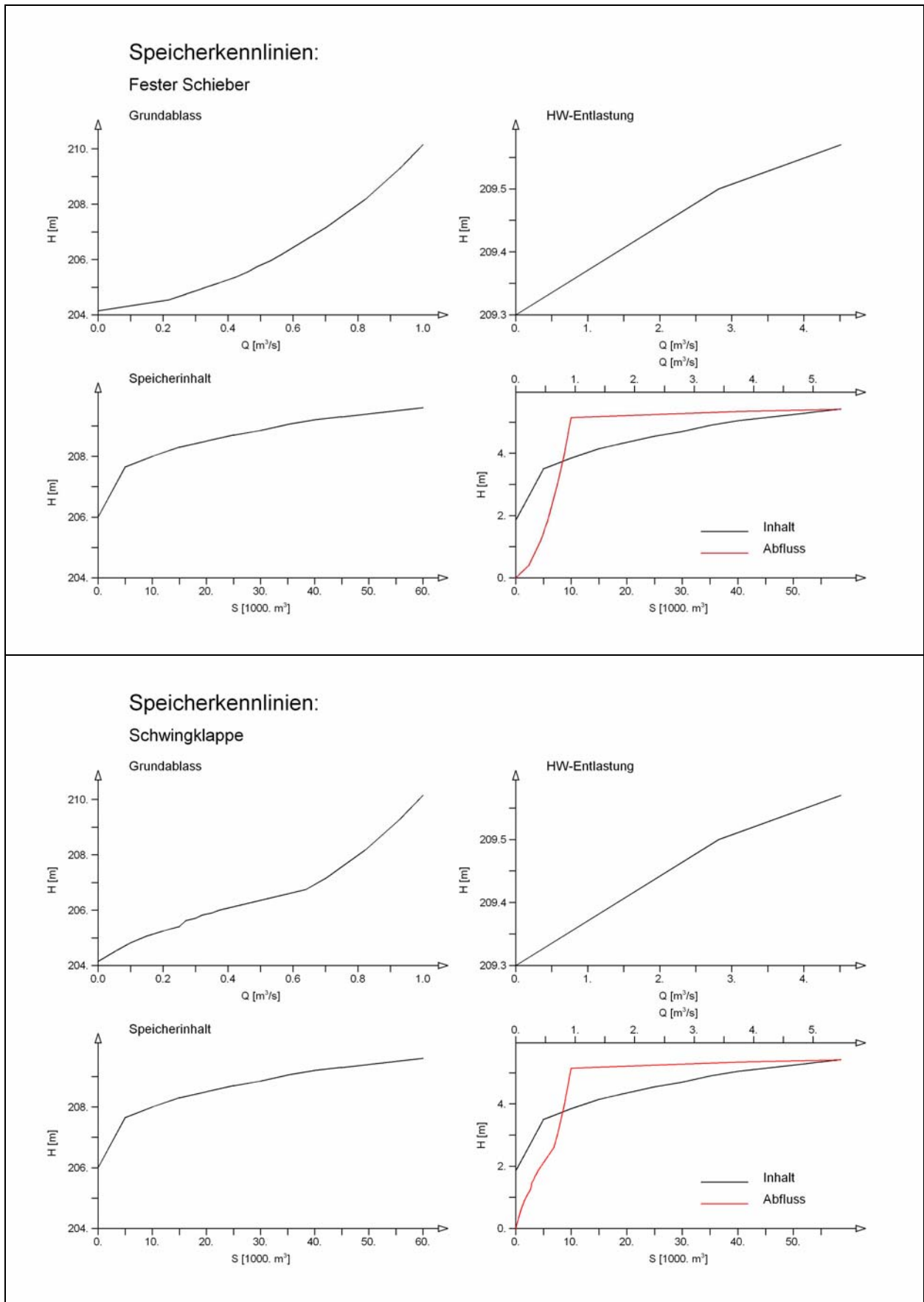


Abbildung 4.52: Speicherinhalt und Wasserstand, Vergleich Blende mit Schwingklappe,  $HQ_{100}/2h$



**Abbildung 4.53:** Speicherinhalt und Wasserstand, Vergleich Blende mit Schwingklappe,  $HQ_{100}/48\text{h}$



**Abbildung 4.54:** Speicherkennlinie, Vergleich Blende – Schwingklappe



Generell zeigt sich, dass die Ergebnisse zur Schwingklappe nur geringe Unterschiede zu den Ergebnissen der Blende aufweisen. Sowohl die Entwicklung des Wasserstandes über das Hochwasserereignis als auch der Verlauf der Speicherfüllung kann als identisch bezeichnet werden. Diese Aussage gilt für beide untersuchte Bemessungshochwässer. Auch bei den Daten zur Speicherkennlinie (vgl. Abbildung 4.54) können keine signifikanten Unterschiede beim Vergleich der beiden Regelorgane ausgemacht werden.

Auch für das HRB Forellenbach II im Einzugsgebiet Elsenz-Schwarzbach (vgl. Kapitel 8.3.4) wurde eine Simulation durchgeführt, um die Wirkungsweise der Schwingklappe im Vergleich zu einer Blende zu untersuchen. Die Ergebnisse weisen auch in diesem Fall nur geringe Abweichungen auf, so dass eine Übertragbarkeit der Aussagen auf andere Standorte gerechtfertigt erscheint.

Was heißt dies nun für das Bewirtschaftungsverhalten der Schwingklappe? Bei den bisherigen Studien ist man davon ausgegangen, dass die Schwingklappe erst bei Zuflüssen nahe der Regelabgabe aufschwimmt und in die Abflussregelung eingreift. Daher wurde Schlussgefolgert, dass die Schwingklappe zu einer optimierten Bewirtschaftung des Retentionsraumes beiträgt, da erst bei Abflüssen in der Größenordnung der Regelabgabe Wasser zurückgehalten wird.

Diese Überlegungen konnten mit der Simulation nicht bestätigt werden. Der erhöhte Unterwasserstand braucht den Vorteil des späten Eingreifens in die Abflussdrosselung vollständig auf. Es kann aber festgehalten werden, dass die Schwingklappe bezüglich der Bewirtschaftung nicht schlechter zu bewerten ist als eine Blende.

#### **4.8 Verhalten bei Geschwemmsel- und Geschiebetrieb**

Hochwasserrückhaltebecken dienen im Hochwasserfall der Sicherung von Menschenleben und materiellen Werten. Der Scheitel der Hochwasserwelle wird gedämpft und die unterliegenden Gewässerabschnitte vor den größten Abflüssen geschützt. Durch den Rückhalt des Wassers im Talraum und dem damit verbundenem Aufstau wird aber auch ein neues Gefahrenpotential geschaffen; Im Falle eines Versagens des Dammes oder des Regelorganes wird das zurückgehaltene Wasser schlagartig an die Unterlieger abgegeben. Beispiele in der Vergangenheit zeigen die damit einhergehenden katastrophalen Folgen auf.

Zu nennen ist hier z.B. das Hochwasserrückhaltebecken Rot an der Rot, bei dem es in Folge einer schlechten Auslegung der Schiebermechanik Ende der 70er Jahre zu einem Bruch der Antriebsspindel kam und das Schütz nicht mehr verstellt werden konnte. Die Hochwasserabfuhr durch die Schütze konnte nicht mehr gewährleistet werden und der Wasserstand im Becken überstieg die Dammoberkante. In der Folge kam es zu einem Dambruch.



**Abbildung 4.55:** Verklemmtes Schütz, HRB Rot an der Rot, [Foto BERNHART]

Im Rahmen der Planung eines Hochwasserrückhaltebeckens und der Konzeption von Regelorganen muss daher darauf geachtet werden, dass die Anlagen unter allen Umständen betriebsbereit bleiben und im HW-Fall vor Ort bedient werden können. In der Praxis realisierte Anlagen zeigen hier zum Teil Schwächen auf (vgl. Abbildung 4.56). Redundante Schieberbetätigungen kommen nur selten zum Einsatz.



**Abbildung 4.56:** Bei Einstau unzugängliche Schieberarmatur.

Bei der Konzeption muss vor allem aber beachtet werden, dass mit der Hochwasserwelle auch Feststoffe mit transportiert werden. Je nach Einzugsgebiet und Jahreszeit wird auch Sohlmaterial und erhebliche Mengen an Geschwemmsel in Richtung Durchlassbauwerk bewegt (vgl. Abbildung 4.57). Um eine Verklausung des Regulierorganes zu verhindern, muss ein dem Einzugsgebiet und dem Durchlassbauwerk angepasstes Rechenkonzept installiert sein. Detaillierte Ausführungen zum Rechenkonzept der Schwingklappe finden sich in Kapitel 7.2.



**Abbildung 4.57:** Gewschwemmseltrieb bei Hochwasser [ZVHWS]

Zum Nachweis der Betriebssicherheit der Schwingklappe und zur konstruktiven Optimierung wurde daher eine Untersuchungsreihe zum Geschwemmseltrieb ohne einen vorgeschalteten Rechen durchlaufen. Um die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf möglichst viele Einzugsgebiete zu ermöglichen wurde eine Bandbreite an verschiedenen Modellgeschwemmsel untersucht (vgl. Abbildung 4.58).

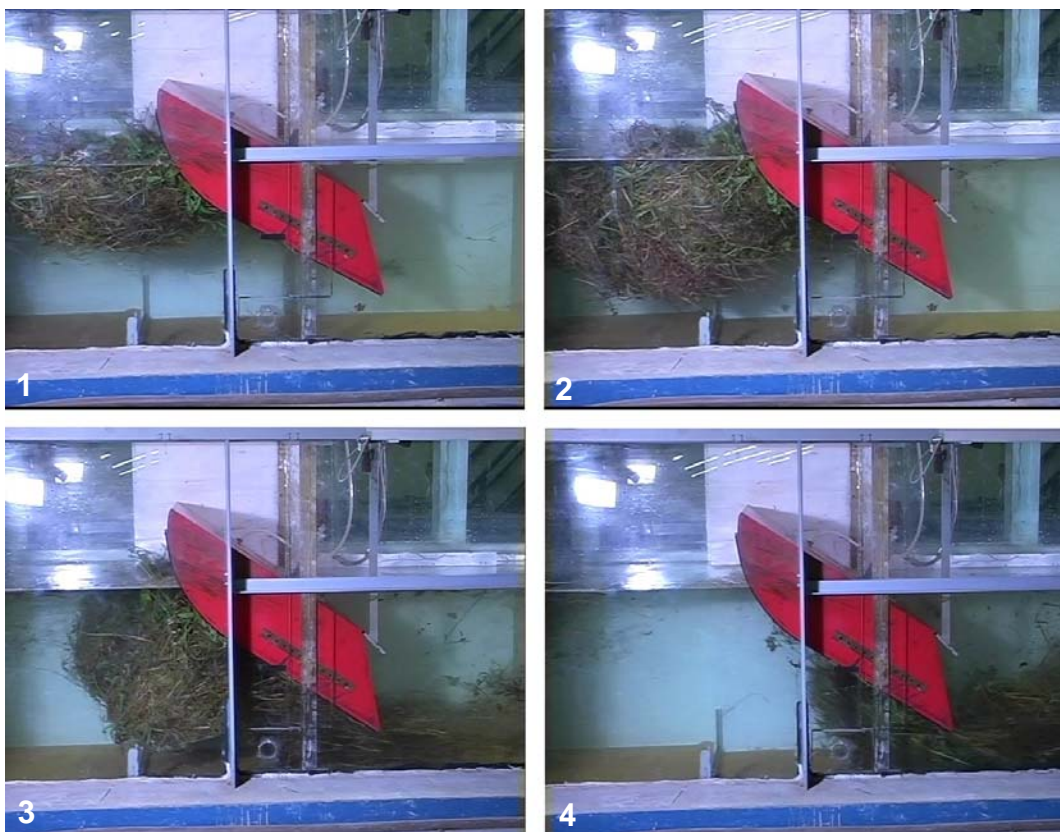


**Abbildung 4.58:** Übersicht über die Modellgeschwemmsel und -geschiebe

Aus der Analyse von abgelaufenen Hochwasserereignissen im Einzugsgebiet Elsenz-Schwarzbach wurde abgeleitet, dass von gemähten Wiesen das größte Verklausungspotential ausgeht. Im Modellversuch wurden daher größtenteils Gräser, Stauden und Blattwerk in Längen von 10 cm bis 50 cm untersucht. Da die Schwingklappe bei Niedrig- bis Mittelwasser nicht in den Wasserkörper eintaucht, wurde für die Versuchsreihe eine anlaufende Hochwasserwelle mit einer beginnenden Flutung des Retentionsraumes ausgewählt. Bei anlaufendem Hochwasser werden die Vorländer überströmt und eine große Mobilisierung von im Einzugsgebiet und Retentionsraum vorhandenen Geschwemmseldepots findet statt.

In den unterschiedlichen Untersuchungsreihen wurden jeweils verschieden Altersstufen (frisch gemäht bis getrocknet) der einzelnen Geschwemmselchargen eingebracht.

Über alle Versuchsreihen konnte ein ähnliches Verhalten bezüglich der Geschwemmseldrift festgestellt werden. Auffallend war hierbei, dass unabhängig von der Altersstufe das Material oberflächennah mit der Strömung auf die Schwingklappe geleitet wurde. Vor dem Klappenkörper akkumuliert sich das Material (vgl. Abbildung 4.59, Bild 1). Das Geflecht wurde immer mächtiger bis es schließlich von den tiefer liegenden Strömungsbereichen erfasst wurde (vgl. Abbildung 4.59, Bild 2). Ausgehend vom oberwasserseitigen Ende wurde das Geschwemmselgeflecht in einer rotierenden Bewegung in Richtung Klappenendkante und dann durch den Spalt ins Unterwasser abtransportiert (vgl. Abbildung 4.59, Bild 3 und 4). Über dem Austrittsstrahl kam es zu einer rückdrehenden Walze mit Drehrichtung zum unterwasserseitigen Ende der Schwingklappe hin. In diesem Bereich kam es zu Ansammlung von Geschwemmsel.



**Abbildung 4.59:** Sequenzen der Geschwemmseldrift.

Bei keinem Versuch kam es zu einer Verklausung oder zu einer Behinderung des Aufschwimmvorgangs. Die Klappe konnte sich ungehindert aufrichten und die Abflussregelung vollziehen. Die starke Beschleunigung der Strömung zur Klappenendkante hin führte zu einer Streckung des Geschwemmselgeflechts. Zum Teil wurden einzelne Gräser aus dem Geflecht heraus gelöst, was die Tendenz einer Verklausung weiter verringert.

Bei den Versuchen zeigte sich, dass es im Bereich des Spaltes zwischen dem Klappenkörper und der Flügelwand zu einer ungünstigen Ansammlung vom Geschwemmsel kommen kann (Abbildung 4.60). Im Extremfall könnte dies zu einem Festsitzen der Klappe führen.

Um die Drehbewegung der Schwingklappe nicht einzuschränken ist aus konstruktiven Gründen keine Dichtung angebracht. Aus hydraulischer Sicht stellt dies kein Problem dar, da die Klappe nicht vollständig schließen muss.

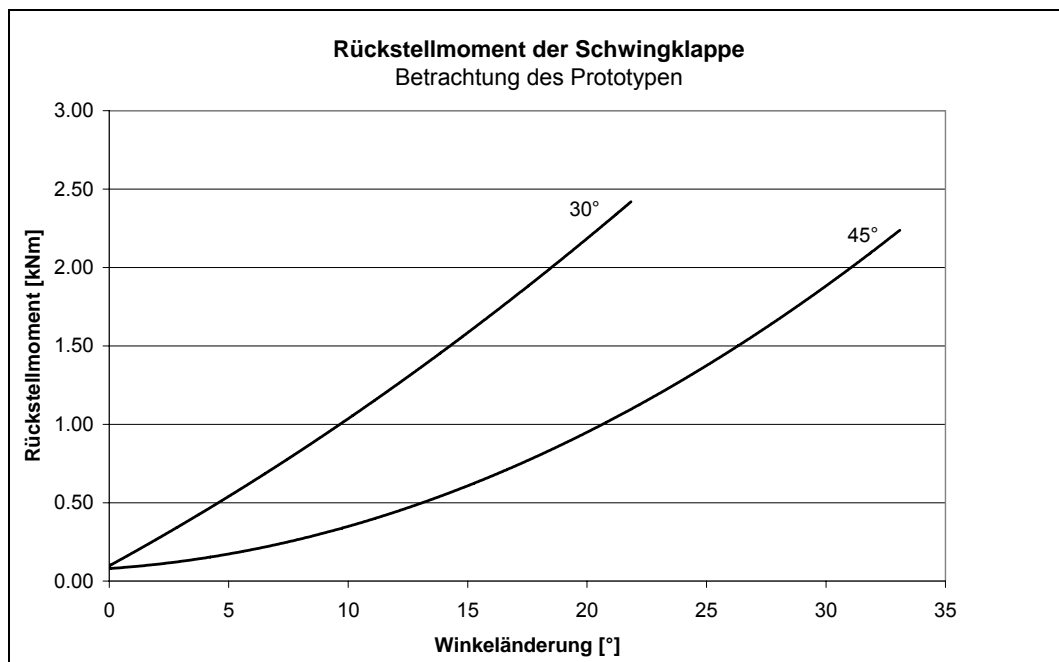


**Abbildung 4.60:** Gräser im Spalt (links), konstruktive Optimierung mittels Bürste (rechts).

Um zu verhindern, dass sich Gräser in den Spalt setzen wurde auf den Klappenkörper eine Bürste angebracht, die den Spaltbereich bis zur Wand abdeckt. Hierdurch kann das Eindringen von Geschwemmsel in den Spalt wirkungsvoll verhindert werden. Die Reibungsverluste dieser Maßnahme sind minimal.

Zur abschließenden Bewertung der Anfälligkeit gegenüber Geschwemmseltrieb wurde das Rückstellmoment bei gezwungener Auslenkung der Schwingklappe ermittelt. Wird die Drehbewegung verhindert und der Oberwasserstand steigt weiter an, so wird eine zusätzliche Auftriebskraft mobilisiert. Hierdurch entsteht ein Moment, welches die Klappe in die Gleichgewichtslage zurück zu stellen versucht.

Die im Rahmen der Modellversuche ermittelten Rückstellmomente sind in Abbildung 4.61 aufgetragen.



**Abbildung 4.61:** Rückstellverhalten der Schwingklappe, Vergleich der Ausgangslagen 30° und 45°

Für die Versuchsreihen zur ökologischen Analyse (vgl. Kapitel 5.4.2) der Schwingklappe wurde die Sohle des Gerinnes mit einer 20 cm starken, natürlichen Sohlaufgabe versehen. Aus der Alb in Karlsruhe (Stadtteil Weiherfeld) wurde eine Probe entnommen und die Kornverteilungskurve ausgewertet. Die Kornverteilungskurve wurde mit dem Modellmaßstab von 1:2 skaliert, angemischt und in die Versuchsrinne eingebaut.

Bei den durchgeführten Versuchen traten trotz massiver Geschiebeumlagerungen keine Probleme bezüglich der Betriebssicherheit auf. Während des gesamten Aufschwimmvorganges erfährt die Strömung zur Klappenendkante hin eine Beschleunigung, so dass Material, das einmal in Bewegung gekommen ist auch sicher durch das Durchlassbauwerk geleitet wird.

Die Versuche zur Betriebssicherheit der Schwingklappe bei Geschiebe- und Geschwemmseltrieb haben deutlich gezeigt, dass eine Beeinträchtigung der Funktionsweise nicht zu erwarten ist; das Funktionsprinzip der Schwingklappe und deren Konstruktion haben sich als robust erwiesen. Neben der hydraulischen Stabilität (vgl. Kapitel 4.6) ist auch eine Robustheit gegenüber in der Strömung mittransportierten Materialien gegeben.

Auf Grund der bei einem Hochwasser mitgeführten großen Mengen an Geschwemmsel muss dennoch bei der Schwingklappe ein angepasstes Rechenkonzept vorgeschaltet werden. Die Ausführungen hierzu finden sich in Kapitel 7.2.

#### 4.9 Sohlgestaltung

Die biotische Durchgängigkeit der Sohle stellt ein wichtiges Kriterium bei der Beurteilung der ökologischen Durchgängigkeit von Durchlassbauwerken dar. Um für Makrozoobenthos und andere Kleinstlebewesen einen Wanderkorridor in der Sohle zu gewährleisten sollte eine natürliche oder naturnahe Sohlauflage mit einer Mächtigkeit ca. 20 cm vorhanden sein [LFU2006].

Im Einstaufall kommt es auf Grund des hydraulischen Potentials zu großen Fließgeschwindigkeiten unterstrom des Regelorganes. Um die Standsicherheit der gesamten Anlage nicht zu gefährden muss die Sohle in diesem Fließabschnitt massiv gesichert werden. Bautechnisch wird dies meist mit einer Betonsohle realisiert, die an die Flügelwände angeschlossen wird.



**Abbildung 4.62:** Abflussgeschehen unterstrom des Durchlassbauwerkes bei Hochwasser, HRB A26 Rittersbach (links), HRB M18 Mönchzell (rechts), [ZVHWS]

Um der Forderung nach einer durchgängigen Sedimentauflage gerecht zu werden wird auf diese Betonunterlage in der Praxis eine naturähnliche Sohle aufgebracht. Im Einstaufall wird diese „Opferschicht“ auf Grund der hohen Fließgeschwindigkeiten ausgespült und muss nach dem Ereignis wieder eingebracht und ausgehend von den angrenzenden Sohlbereichen von den Kleinstlebewesen wiederbesiedelt werden. Je geringer dabei die Strecke zwischen der ausgeräumten Sohle und Bereichen mit intakter Sohle ist, desto schneller erfolgt die Wiederbesiedelung und desto kürzer kommt es zu einer Unterbrechung des Sohl-Wanderkorridors.



### 4.9.1 Tosbeckenuntersuchung im Modell

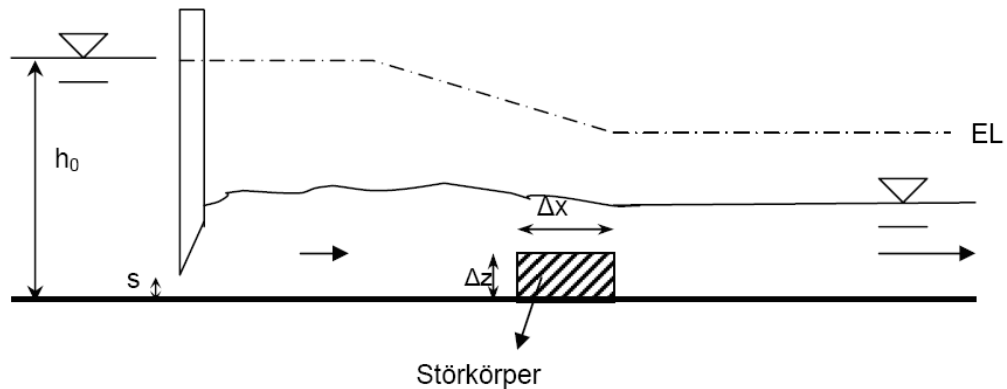
Der Prozess der Erosion wird maßgeblich vom Strömungsgeschehen beeinflusst. In einer Versuchsreihe wurde qualitativ der Einfluss verschiedener Tosbeckeneinbauten auf das Erosionsverhalten der Sohle untersucht. Ziel war es, strömungsberuhigte Zonen zu schaffen, in denen kein oder nur wenig Sohlmaterial im Einstaufall ausgetragen wird. Ausgehend von diesen „Geschiebeinseln“ könnte dann die Wiederbesiedelung der Sohle erfolgen. Neben den ökologischen Aspekten wurde auch der Einfluss der Tosbeckeneinbauten auf die Energieumwandlung untersucht.

Die hydraulischen Randbedingungen an verschiedenen Beckenstandorten variieren in einem großen Maß. Abhängig von der Einstauhöhe kann es bei gleicher Geometrie des Durchlassbauwerkes zu einer anderen Belastung der Sohle kommen. Des Weiteren hat der Unterwasserstand einen erheblichen Einfluss auf die Effizienz der Energieumwandlung und damit auch auf die Erosionsgefährdung der Sohle.

Im Rahmen dieser Untersuchungsreihe wurde daher in Anlehnung an die geometrischen und hydraulischen Kenngrößen der großmaßstäblichen Versuche zur Schwingklappe ein vereinfachtes, abstrahiertes Modell im Maßstab 1:5 errichtet. Die Schwingklappe wurde als festes Schütz mit einer Spaltweite in der Natur von 0,30 m und einer Breite von 1,75 m modelliert. Die Breite zwischen den parallelen Flügelwänden betrug 1,75 m. Belastet wurde das System mit bis zu 1,12 m<sup>3</sup>/s. Die Sohle wurde mit einem Modellgranulat mit der Dichte 1,3 t/m<sup>3</sup> und einem Korndurchmesser von 2,5 mm abgebildet. Auf Naturwerte skaliert entspricht dies bei den untersuchten hydraulischen Kenngrößen einem Sohlkies mit einem Durchmesser von ca. 1 – 2 cm.

Für die ökologischen Untersuchungen wurde Sohlmaterial aus der Alp bei Karlsruhe entnommen und die Kornverteilungskurve ermittelt (vgl. Abbildung 5.2). Das Modellgranulat bei den Geschiebeversuchen entspricht in etwa dem d<sub>50</sub> des Alpkieses. Die Alp ist von ihrem Geschiebehaushalt durchaus vergleichbar mit Gewässern, an denen Hochwasserrückhaltebecken gebaut oder projektiert sind, so dass der gewählte Modellansatz als belastbar und repräsentativ bezeichnet werden kann.

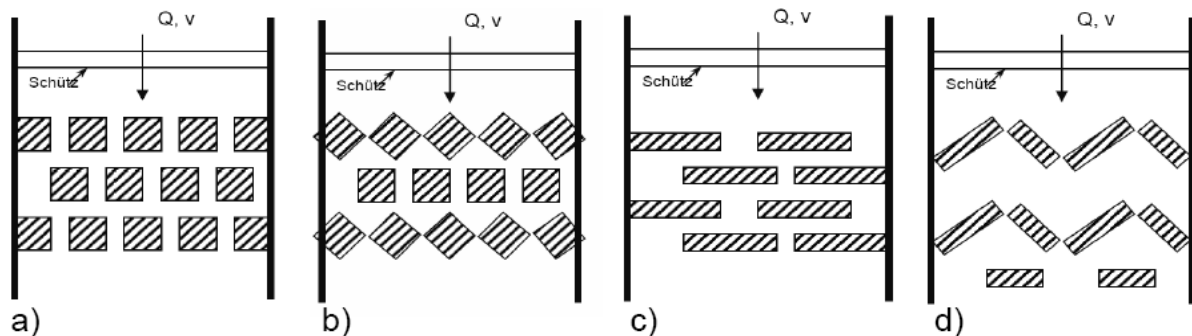
Die Versuche wurden so gefahren, dass zu Beginn die Sohle und die Einbauten komplett mit Granulat bedeckt waren. Der Abfluss wurde dann kontinuierlich gesteigert und das Erosionsverhalten dokumentiert. Abbildung 4.63 zeigt schematisch den Versuchsaufbau.



**Abbildung 4.63:** Versuchsaufbau zur Tosbeckenuntersuchung.

#### 4.9.1.1 Variante 1

In einer ersten Versuchsreihe wurde die Anordnung der Einbauten variiert. Abbildung 4.64 zeigt die untersuchten Varianten. Zu jeder Variante wurde zudem noch der Abstand zwischen den Reihen und der Abstand Schütz – erste Reihe verändert

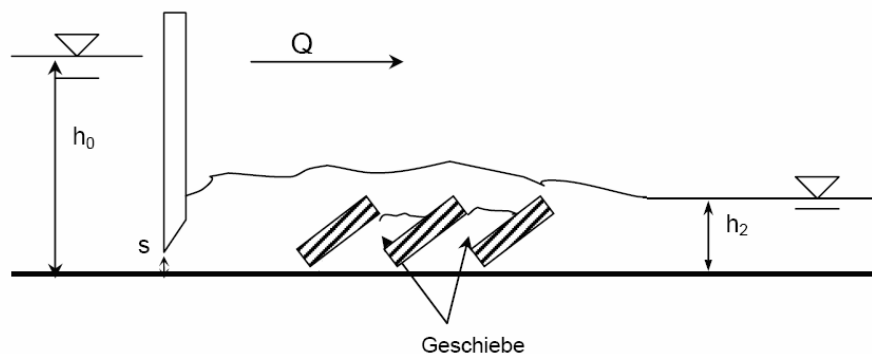


**Abbildung 4.64:** untersuchte Störkörperanordnungen

Das Ergebnis der Untersuchung war eindeutig: Bei keiner der eingebauten Variante konnte die Strömung in Teilbereichen so beruhigt werden, dass das Geschiebe nicht ausgetragen wurde. In Folge der Um- und Überströmung der Störkörper wurden starke Turbulenzen angefacht, die ihrerseits für Erosionserscheinungen auch zwischen den Einbauten sorgten. Auch eine Variation der Reihenabstände führte zu keiner Verbesserung.

#### 4.9.1.2 Variante 2

Die Geometrie der Einbauten wurde für die nächste Versuchsreihe dahingegen modifiziert, dass die Störkörper jetzt im 45° Winkel zur Sohle angebracht wurden. In Fließrichtung betrachtet wurden drei Reihen eingebaut, die jeweils die komplette Rinnenbreite überspannten (vgl. Abbildung 4.65).

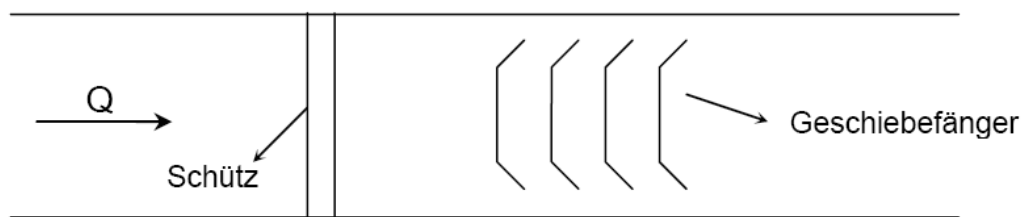


**Abbildung 4.65:** Versuchsanordnung mit geneigten Störkörpern

Bei dieser Anordnung der Störkörper konnte auch bei verschiedenen hydraulischen Belastungen ein Geschiebedepot zwischen den Reihen erhalten werden. Der Bereich unterstrom vom Schütz bis zur ersten Reihe sowie der Bereich unterstrom des letzten Riegels wurde jedoch vollständig freigespült. Da die Riegel die komplette Breite des Durchlassbauwerkes ausfüllen und keine Öffnungen aufweisen kann ausgehend von diesen Inseln die Wiederbesiedelung erst erfolgen, wenn die neu gebildete Sohlaufgabe die Störkörper überragt. In einer Untervariante wurden daher die Riegel mit jeweils zwei Öffnungen versehen. Wie auch in den Versuchen zur Variante 1 kam es in den Öffnungen zu hohen Fließgeschwindigkeiten und folglich zum Sedimentaustrag aus den Geschiebetaschen.

#### 4.9.1.3 Variante 3

In einer dritten Modifikationsstufe wurde die Geometrie der Störkörper weiterführend abgeändert. Die vier eingebauten Riegel schlossen nun nicht bündig mit der Flügelmauer des Durchlassbauwerkes ab. Um die Erosionskraft der Randströmung zu reduzieren wurden die Enden der Riegel mit 45° in Fließrichtung abgewinkelt (vgl. Abbildung 4.66). Bei dieser Anordnung der Störkörper konnte über das untersuchte Spektrum der hydraulischen Belastungen eine Geschiebeinsel von signifikanter Größe im Tosbecken erhalten werden. Der Bereich vom Schütz bis zum ersten Riegel und der unterstromige Bereich wurden jedoch vollständig ausgespült und die drei Zellen der Geschiebeinsel sind nicht miteinander verbunden, so dass keine durchgängige Sohlaufgabe erhalten werden konnte.



**Abbildung 4.66:** Draufsicht Variante 3

### 4.9.2 Fazit Sohlgestaltung

Die hydraulischen Verhältnisse im Tosbereich und die Interaktion von Strömung und Geschiebe sind hochkomplexe Prozesse, die bei der Dimensionierung einer Anlage nur schwer abgeschätzt werden können. Die Auslegung des Durchlassbauwerkes führt zudem zu einer Vielzahl an hydraulischen Randbedingungen, die nicht ohne weiteres auf andere Beckenstandorte übertragen werden können. Abhängig vom Einzugsgebiet des Gewässers und der Geologie ergibt sich auch kein einheitliches Bild für die sedimentologischen Aspekte.

Das Ziel, einen allgemeingültigen Ansatz zur Erhaltung von Geschiebeinseln im Todbereich zu finden, ist daher nur schwer erreichbar. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde dennoch ein Modellversuch entwickelt, der die Eignung von verschiedenen Störkörpereinbauten als Geschiebefänger dokumentiert. Die hydraulischen und sedimentologischen Randbedingungen orientierten sich dabei an den Versuchen zur Schwingklappe im Maßstab 1:2.

Für Hochwasserrückhaltebecken, bei denen der Abstand zwischen den Flügelwänden der Breite des Regelorgans entspricht, kann folgendes Ergebnis festgehalten werden:

- bautechnisch einfache Einbauten, wie sie bei Variante 1 Verwendung fanden, können nicht zum Erhalt von Geschiebeinseln im Einstaufall beitragen. Die hohen Fließgeschwindigkeiten und die hochgradig turbulente Strömung kann hierdurch nicht ausreichend beruhigt werden. Überträgt man das Ergebnis dieser Versuchsreihe auf eine Anordnung von in Beton vergossenen Wasserbausteinen so kann gefolgert werden, dass diese nicht zur Verhinderung der Austragung von Sohlematerial beitragen.

Im Rahmen der Versuche konnte eine Anordnung der Störkörper erarbeitet werden, die im Einstaufall ein Geschiebedepot erhält. Die Geometrie ist bautechnisch jedoch sehr aufwändig so dass diese für einen Praxistransfer ausscheidet.

Aus den Versuchen lassen sich dennoch Empfehlungen für den Fließabschnitt unterstrom des Regelorganes ableiten, die zu eine schnelleren Wiederbesiedelung der Sohle nach einem Hochwasserereignis beitragen können. In Kapitel 7.4 sind mehrere Vorschläge hierzu beschrieben.

#### **4.10 Zusammenfassung der hydraulischen Untersuchungen**

Mit diesem Forschungsvorhaben wurde das System der Schwingklappe in drei verschiedenen Maßstäben umfassend untersucht. Es wurde darauf geachtet, dass Maßstabeffekte und Fehler bei der Übertragung der Ergebnisse auf den Prototypen durch die Wahl der großen Modellmaßstäbe minimiert werden. Durch den Aufbau einer Modellfamilie konnte zudem die Unsicherheit bei der Übertragung verringert, und die Aussagekraft der Modellversuche erheblich gesteigert werden.

In einem ersten Versuchsaufbau im Maßstab 1:10 wurden die Abflussbeiwerte des Klappenkörpers ermittelt und mit Literaturangaben nach [NAUDASCHER] verglichen. Es konnte nachgewiesen werden, dass sich die Abflussbeiwerte der Schwingklappe entsprechend der Literatur verhalten und somit für eine praxisnahe Dimensionierung auf die heute vorhandenen Bemessungsansätze zurückgegriffen werden kann. Im Modell Maßstab 1:10 wurde zudem die Geometrie des Klappenkörpers hinsichtlich einer strömungsgünstigen Form optimiert.

Den Kern der Untersuchungsreihe zur Schwingklappe bildet der Versuchsaufbau im Maßstab 1:2. Mittels einer breit aufgestellten messtechnischen Ausstattung konnten neben dem hydraulischen Verhalten auch das kinematische Verhalten der Schwingklappe ausführlich dokumentiert und mit den Beobachtungen verglichen werden. Wichtige Parameter für die statische Dimensionierung wie z.B. die Lagerkräfte der Schwingklappe, wurden erarbeitet und abgeleitet.

Mit Bearbeitung des Forschungsvorhabens konnte nachgewiesen werden, dass die bisherigen Studien zur Schwingklappe bezüglich der Abflussregelung das Verhalten der Schwingklappe nicht vollständig abbilden. Es konnte aufgezeigt werden, dass für das Aufschwimmen der Klappe ein Einstau von Unterstrom erforderliche ist. Dieser wirkt sich jedoch auf das Abflussverhalten aus, da unter der Schwingklappe folglich rückgestauter Abfluss herrscht.

Das Schwingungsverhalten wurde detailliert beleuchtet und anhand der Grundlagen der Schwingungslehre diskutiert. Es zeigte sich, dass das schwingende System der Klappe auf Grund des umgebenden Wasserkörpers sehr stark gedämpft ist und daher keine resonante Schwingung zu befürchten ist.

Um Unsicherheiten bezüglich der Übertragbarkeit der Ergebnisse zum Schwingungsverhalten in Modell Maßstab 1:2 auszuschließen wurde ein weiterer Versuchsaufbau im Maßstab 1:6 aufgebaut und mit in das Untersuchungsprogramm aufgenommen. Die Ergebnisse aus den Versuchen Maßstab 1:2 konnten hierdurch bestätigt werden.

Neben den grundlegenden Untersuchungen zur Hydraulik und Kinematik, die letztendlich zu einem Bemessungskonzept führten (vgl. Kapitel 6) wurden auch praxisnahe Fragestellungen beleuchtet. Die Betriebssicherheit der Schwingklappe bei Geschwemmsel- und Geschiebetrieb wurde ebenso untersucht wie das Verhalten der Sohlaufklappe bei Retentionsbetrieb.

Der Einfluss der Schwingklappe auf die Stauraumbewirtschaftung wurde mit dem am Institut entwickelten Programm SEERET anhand zweier bestehender Becken analysiert und mit dem Verhalten eines ungesteuerten Durchlassbauwerkes verglichen. Es zeigte sich, dass sich die erwartete Optimierung der Speicherbewirtschaftung durch den für die Funktionsfähigkeit der Schwingklappe benötigten hohen Unterwasserstand nicht einstellt. Ein Vergleich mit den bisherigen Studien zur Schwingklappe zeigte zudem auf, dass darin dargestellten Abflusskurven fehlerbehaftet sind, da der Rückstau in Folge des hohen Unterwasserstandes nicht ausreichend berücksichtigt worden ist.

## 5 Ökologische Untersuchungen am großmaßstäblichen Modell

Die Schwingklappe soll weitgehend die ökologische Längsdurchgängigkeit eines Rückhaltebeckens gewährleisten, und zwar bezüglich des aquatischen, amphibischen und terrestrischen Bereichs sowie des Luftraums unmittelbar über dem Gewässer. Um mögliche Auswirkungen der Schwingklappe auf die Durchwanderbarkeit zu bewerten, wurden zunächst Erkenntnisse aus dem sog. Lebensraumkatalog herangezogen, der von Mitarbeitern des Instituts für Landespflege im Rahmen des BWPLUS Projekts Nr. BWR 24005 erarbeitet wurde und Lebensraumansprüche und Verlustursachen für an Gewässer gebundene Tiergruppen nennt.

Es konnten so Faktoren identifiziert werden, welche die Durchgängigkeit maßgeblich beeinflussen. Anhand dieser wurden konstruktive Hinweise für die Gestaltung des Durchlassbauwerks abgeleitet. In anschließenden Modellversuchen (vgl. Kapitel 5.4) wurden ausgesuchte Aspekte während des Betriebs der Schwingklappe getestet, insbesondere der Sedimenttransport während eines Einstaus und etwaige Auswirkungen auf die Gewässersohle und die Uferbermen.

### 5.1 Durchgängigkeit des Luftraums

Die Passierbarkeit des Luftraums ist insbesondere für die Wanderungsbewegungen von ans Wasser gebundenen Insekten von größter Bedeutung. Die geflügelten Stadien vieler Arten fliegen im Rahmen eines Kompensationsflugs gewässeraufwärts, um während des aquatischen Larvenstadiums auftretende Driftverluste auszugleichen. Dabei orientieren sie sich meist an der Wasseroberfläche oder an der Ufervegetation. Vertreter der Eintagsfliegen, der Steinfliegen und der Kleinlibellen entfernen sich dabei oft nur wenige Meter vom Gewässer. Sie sind daher besonders anfällig gegenüber der Barrierewirkung, die von Querbauwerken ausgehen kann. So wurde beobachtet, dass Kleinlibellen der Gattung *Calopteryx* sp. an Durchlässen von HRB mit zu kleiner Öffnung ihren Flug bachaufwärts abbrechen und umkehrten. Auch einige Fledermaus- und Vogelarten sind stark an Fließgewässer gebunden und orientieren sich an Uferstrukturen und der Wasserfläche, so z.B. die Wasseramsel.

Mit Hilfe des Lebensraumkatalogs lassen sich zwei Hauptfaktoren benennen, welche die Durchgängigkeit des Luftraums beeinflussen:

**Licht:** Der Durchlass sollte offen und möglichst groß und hell sein. Trichterförmig zulaufende Seitenwände beim offenen Durchlassbauwerk verbessern die Lichtverhältnisse und wirken zudem als Leitstruktur (vgl. DIERLAMM). Die Schwingklappe sollte in einer möglichst hellen Farbe gehalten sein, da eine dunkle Farbgebung den Durchlass optisch einengt und viele Tiere dunkle, große Strukturen meiden. Breitere Kontrollwege und Brücken, welche über den Durchlass führen, sollten wenn möglich mit Gitterrosten ausgestattet sein, so dass auch von oben Licht einfallen kann.

**Vegetation:** Gehölze und Stauden dienen vielen Fluginsekten, aber auch Fledermäusen als Leitstruktur, Ansitz und Rastplatz. Im Durchlass sollte daher Platz für einen mindestens 1-1,5 Meter breiten und durchgehenden Uferstreifen sein, um das Wachstum eines entsprechenden Uferbewuchses zu ermöglichen. Gehölze sollten nur entfernt werden, wenn die Betriebssicherheit beeinträchtigt wird.

Die Schwingklappe ist bezüglich der Durchgängigkeit des Luftraums sehr positiv zu bewerten, da sie in Ruhestellung einen vergleichsweise großen Durchlassquerschnitt bietet und den Luftraum kaum einengt. Beobachtungen im Freiland an herkömmlichen Durchlässen haben gezeigt, dass Durchlassöffnungen mit einer Größe von 50 auf 50 cm von vielen Fluginsekten passiert werden, z.B. auch von Libellen. Da die Öffnung bei der Schwingklappe deutlich größer ist, kann davon ausgegangen werden, dass bei einer entsprechenden Gestaltung des Einlaufbereichs das Bauwerk für fliegende Insekten durchgängig ist. Für Fledermäuse sollte die Öffnung mindestens eine Seitenlänge von 1,5 Metern und eine Höhe von 1 Meter haben. Die als Leitstruktur wichtigen Gehölze in unmittelbarer Nähe der Klappe dürfen jedoch kein Sicherheitsrisiko darstellen und müssen entsprechend unterhalten werden.

## 5.2 Terrestrische und amphibische Durchgängigkeit

Für die terrestrische und amphibische Durchgängigkeit ist in erster Linie das Vorhandensein eines durchgängigen Uferstreifens bzw. einer Berme von großer Bedeutung. Hiervon profitieren insbesondere Kleinsäuger, flugunfähige Laufkäfer sowie andere terrestrische Insekten, Reptilien und Amphibien, welche die Gewässerauen und Ufer als Lebensraum und Wanderkorridor nutzen. Amphibien können in der Regel schwimmen und tauchen, sie meiden jedoch fließendes Wasser.



Ein HRB ohne durchgehenden Uferstreifen kann somit auch für Unken, Frösche, Kröten und Molche ein Wanderungshindernis darstellen.

Der Uferstreifen im Durchlass sollte beidseitig angelegt sein, eine Breite von mindestens 1-1,5 Meter aufweisen und auch bei leicht erhöhter Wasserführung nicht überschwemmt werden. Uferstreifen mit Vegetation sind völlig vegetationsfreien Steinschüttungen oder gepflasterten Bermen vorzuziehen, da sie den Tieren Versteckmöglichkeiten bieten und eher angenommen werden. Der Einbau von herausragenden Stein- oder Betonschwellen sollte unterbleiben, auch sollte der Übergang vom Wasser zum Ufer flach gehalten und mit möglichst gewässertypischen Substrat (Steine, Kies, Sand) realisiert werden, um z.B. für Laufkäfer geeignete Korridore zu schaffen. Mit kleinen Steinbuhnen kann die Anlagerung von Feinmaterial am Ufer unterstützt werden. Die Ufer werden zudem stärker strukturiert.

Auch bei vorhandenen Bauwerken ist eine nachträgliche Anlage von Uferstreifen oft machbar, da Durchlässe und Tosbecken meist recht breit angelegt sind und in vielen Fällen eine Einengung des Gewässerlaufs sogar positive Effekte hat, da beispielsweise auf Grund höherer Strömungsgeschwindigkeiten eine flächige Verschlammung vermieden wird (siehe Punkt „aquatische Durchgängigkeit“).

Ein wichtiger Faktor für die terrestrische Durchgängigkeit sind die Lichtverhältnisse im Durchlass. Es gelten die bereits oben genannten Empfehlungen. Zusätzlich ist zu beachten, dass offene Schächte für viele terrestrische Tiere zu Todesfallen werden können. Schächte sollten daher wenn möglich mit Ausstiegshilfen versehen werden bzw. mit einem feinmaschigen Gitter abgedeckt werden.

Die Schwingklappe bietet bezüglich der terrestrischen und amphibischen Durchgängigkeit gegenüber anderen Verschluss- und Regelmechanismen deutliche Vorteile. Ein Schieber, der den Raum am Ufer einengt, fehlt. Auch kann in der Regel an der Durchlassöffnung auf eine Betonschwelle verzichtet werden, da für die Schwingklappe nur seitliche Führungsstrukturen bzw. Widerlager notwendig sind. Der Uferstreifen kann somit ohne Unterbrechung durch das Bauwerk geführt werden, auch unmittelbar unterhalb der Klappe, wenn auch möglicherweise mit reduzierter Höhe und Breite, um den Regelabfluss zu gewährleisten. Bei der Dimensionierung sollte eine Optimierung bezüglich Uferbreite, Uferhöhe und lichter Höhe zwischen Ufer und Schwingklappe angestrebt werden.

Die Uferstreifen und Bermen sind bei einem Einstau erhöhten hydraulischen Belastungen ausgesetzt. Die Uferstrukturen sollten daher soweit notwendig gesichert werden, z.B. durch in der Gewässersohle verankerte Flussbausteine oder Steinschüttungen (vgl. Kapitel 5.3). Der Bewuchs der Ufer verhindert in der Regel den großflächigen Abtrag von feinerem Ufermaterial. Sollte im Extremfall doch sämtliche Vegetation und das komplette Feinmaterial beim Einstau ausgespült werden, so regenerieren sich die Uferstreifen in der Regel innerhalb kurzer Zeit, da mit abklingendem Hochwasser wieder Material abgelagert wird.

### 5.3 Aquatische Durchgängigkeit

Die wichtigsten Faktoren für die Gewährleistung der aquatischen Durchgängigkeit sind die Fließgeschwindigkeit, das Vorhandensein einer naturnahen, rauen und durchgehenden Sohle. Sohlwellen oder gar Sohlabstürze stellen für die meisten aquatischen Organismen Wanderungshindernisse dar. Auch sind fast alle Wirbellose, aber auch schwimmschwache Fische, wie z.B. die Schmerle, auf das Vorhandensein von natürlichem Sohlmaterial angewiesen. Größere sedimentfreie Sohlbereiche stellen Barrieren dar, insbesondere, wenn die Fließgeschwindigkeit zu hoch ist (vgl. Kapitel 5.4). Da viele Tiere sich im Lückensystem, dem Interstitial der Gewässersohle fortbewegen, sollte die Sedimentauflage auch im Durchlass eines HRB mindestens 20 cm betragen, besser sind 50 cm.

Um eine optimale Längsdurchgängigkeit zu erreichen, sollten sowohl die Fließgeschwindigkeiten als auch die Verteilung der Korngrößen und die Sohlstrukturen denen eines naturnahen Gewässerabschnitts am selben Gewässer entsprechen. Im Uferbereich sollten eher feinere Sedimente und niedrige Fließgeschwindigkeiten zu finden sein, in der Gewässermittle eher größere Korngrößen und höhere Fließgeschwindigkeiten. Dies bedeutet, dass im Durchlass- und Tosbereich eine erhebliche, gewässeratypische Aufweitung bzw. Einengung des Mittelwasserbetts unbedingt zu vermeiden ist. Ersteres führt zu einer Verschlammung der Sohle, letzteres zu stark erhöhten Fließgeschwindigkeiten und zum Austrag von Sohlmaterial.

Die Schwingklappe bietet auch hier gute Voraussetzungen für den Erhalt der aquatischen Längsdurchgängigkeit. So sind wie bereits erwähnt keine Sohlwellen als Widerlager für Schieber notwendig. Es entstehen daher keine Geschiebefallen. Eine ausreichend mächtige Sohlauflage aus naturnahem Substrat kann somit ohne Unterbrechung durch das Bauwerk geführt werden. Auch muss das Profil des Mittelwasserbetts nicht symmetrisch ausgebildet sein.

Wie bei anderen Verschluss- und Regelmechanismen auch ergibt sich das Problem der erhöhten Sohlschubspannung und des Sedimentaustrags (vgl. Kapitel 5.4) Eine Sicherung der Sohle ist daher notwendig. Wie stark die Sohle im Durchlass gesichert werden muss und welche ökologisch verträgliche Möglichkeiten hierzu bestehen, wurde im Theodor-Rehbock Wasserbaulaboratorium der Universität Karlsruhe im wasserbaulichen Modell getestet.

## 5.4 Laboruntersuchungen in einer Versuchsrinne

### 5.4.1 Vorversuch: Driftverhalten in Abhängigkeit von Fließgeschwindigkeiten und Sohlsubstrat

In einem Vorversuch wurde die Mobilität bzw. die Driftanfälligkeit von ausgesuchten aquatischen Wirbellosen in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit und der Sohlbeschaffenheit exemplarisch untersucht. Hierzu wurden Eintagsfliegen der Gattung *Epeorus* sp. und Bachflohkrebse (*Gammarus* sp.) in Gruppen von 5 bzw. 30 Tieren in einer 10 m langen und etwa 30 cm breiten Versuchsrinne (vgl. Abbildung 5.1) einer niedrigen Fließgeschwindigkeit (0,1 m/s) ausgesetzt.



**Abbildung 5.1:** Versuchsrinne, z.Z. ohne Sedimentauflage

Der Boden wurde zuvor mit Kies bzw. Steinen verschiedener Korngrößen bedeckt (Schichtdicke ca. 5 cm) bzw. substratfrei belassen (vgl. Tabelle 5.1). Nachdem die Tiere ausgesetzt worden waren, wurde die Fließgeschwindigkeit schrittweise bis auf 1,2 m/s erhöht und nach einer Minute wieder schrittweise reduziert (höhere Geschwindigkeiten waren aus technischen Gründen nicht möglich). Die Fließgeschwindigkeit wurde mit einem kleinen Messflügel etwa 1,5 cm über der Substratoberfläche gemessen. Bei den Steinen war eine Messung im Lückensystem nicht möglich.

Das Verhalten der Tiere wurde beobachtet und Driftabgänge zusammen mit der jeweiligen Fließgeschwindigkeit protokolliert. Von besonderem Interesse war dabei die maximal tolerierte Fließgeschwindigkeit, also die Geschwindigkeit, bei der sich einzelne Tiere einer Art gerade noch festhalten können. Am Ende des Versuchs wurden die verbliebenen, nicht verdrifteten Tiere gezählt. Insgesamt wurden 120 Bachflohkrebse und 20 Eintagsfliegen in die Rinne gesetzt. Die wichtigsten Ergebnisse sind in Tabelle 2 vereinfacht dargestellt.

**Tabelle 5.1:** Ergebnisse der Driftversuche mit Bachflohkrebsen und rheophilen Eintagsfliegen

| Sohlsubstrat                      | erste Drift bei [m/s] |                | maximale tolerierte Fließgeschwindigkeit [m/s] |                | Nach Versuchsende noch vorhandene Tiere |                |
|-----------------------------------|-----------------------|----------------|--|----------------|---|----------------|
|                                   | Bachflohkrebse        | Eintagsfliegen | Bachflohkrebse                                 | Eintagsfliegen | Bachflohkrebse                          | Eintagsfliegen |
| ohne Substrat, glatter Betonboden | 0,20                  | 0,31           | 0,35   | 0,47           | 0 von 30                                | 0 von 5        |
| feiner Kies (0,5 cm)              | 0,25                  | 0,34           | 0,42   | 0,38           | 0 von 30                                | 0 von 5        |
| Kies (2 cm)                       | 0,27                  | 0,33           | 0,55   | 0,49           | 0 von 30                                | 0 von 5        |
| Steine (5-10 cm)                  | 0,31                  | 0,45           | > 1,20   | > 1,20         | 14 von 30                               | 4 von 5        |

Erkenntnisse aus der Fachliteratur und aus dem Lebensraumkatalog weisen darauf hin, dass Wirbellose bei fehlender Substratauflage und glatter Sohle nur geringe Fließgeschwindigkeiten ertragen und recht schnell gewässerabwärts verdriftet werden. Dies konnte im Versuch bestätigt werden. Selbst die ansonsten rheophilen Eintagsfliegen der Gattung *Epeorus* mit ihrer flachen, strömungsangepassten Körperform wurden auf der glatten Oberfläche bei relativ geringen Fließgeschwindigkeiten um die 0,3 m/s verdriftet. Auch auf feinem Substrat (0,5 - 2 cm) konnten weder die Bachflohkrebse noch die Eintagsfliegen höheren Geschwindigkeiten widerstehen, zumal die Steinchen bei höheren Geschwindigkeiten in Bewegung gerieten.

Erst bei den größeren Steinen waren genügend Lücken vorhanden und die Sohle ausreichend stabil, so dass sich die Tiere verstecken konnten und zumindest einzelne Tiere auch Strömungsgeschwindigkeiten von über 1,2 m/s ohne Drift überstanden.

Die Ergebnisse des Tests unterstreichen die Bedeutung des Sohlsubstrats als Rückzugsraum und Medium für die Aufwärtswanderung. In einem weiteren Versuch wurde daher untersucht, wie die Sohle beim Betrieb der Schwingklappe bewegt wird und welche Umlagerungsprozesse sich ergeben.

#### 5.4.2 Sedimenttransport bei erhöhtem Abfluss (kein Einstau)

In den Kanal mit der Schwingklappe (Maßstab 1:2) wurde Sediment entsprechend der Sieblinie einer Probe von der Alb in Karlsruhe eingebracht (Korngrößen von 1-100 mm, maßstäblich umgerechnet). Die Sedimentschicht war zwischen 20 und 35 cm dick (Abbildung 5.3, links).

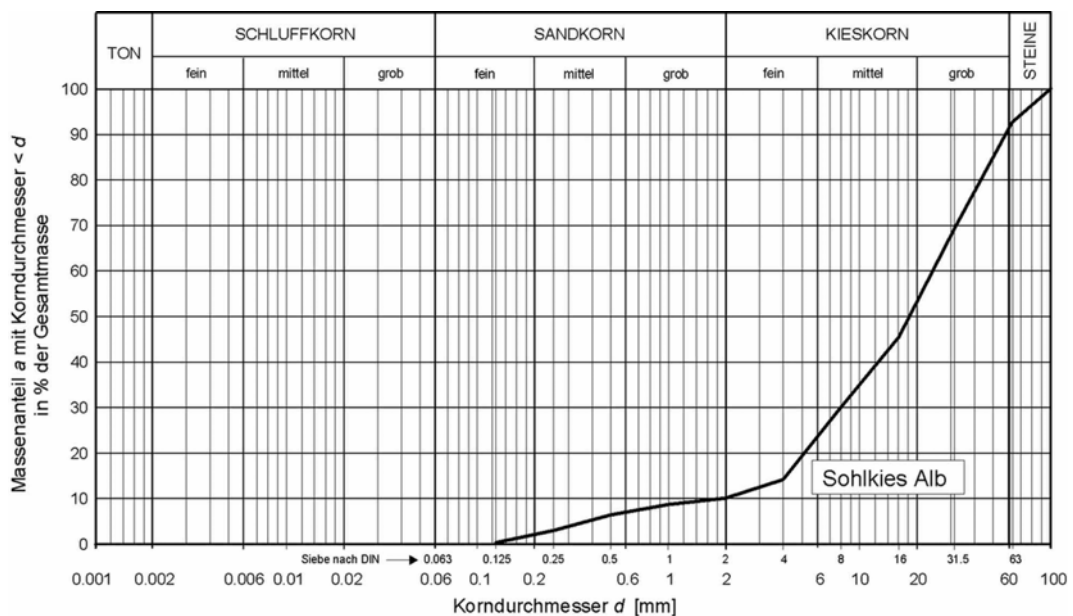


Abbildung 5.2: ermittelte Kornverteilungskurve - Sohlkies Alp



Abbildung 5.3: Versuchsrinne mit Schwingklappe (Maßstab 1:2)

Zudem wurden aus der Karlsruher Alp ca. 100 Gammariden sowie 10 köcherlose Trichopteren (Gattung Hydropsyche) und 10 Eintagsfliegen entnommen und in den Kanal eingesetzt (Fließgeschwindigkeit 10 cm über Grund ca. 25 cm/s).

Der Wasserstand an der Schwingklappe wurde auf eine Höhe von 20 cm eingestellt. Es wurden verschiedene Abflussmengen für jeweils ca. 15-20 Minuten eingestellt und die Auswirkungen auf die Sohle beobachtet (Tabelle 5.2 und Abbildung 5.3, rechts). Einzelne Phasen des Versuchs wurden per Video aufgezeichnet. Die Fließgeschwindigkeit wurde ca. 1 m oberhalb der Schwingklappe in einer Höhe von ca. 10 cm über der Sohle gemessen. Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse der Versuchsreihe.

**Tabelle 5.2:** Auswirkungen der Fließgeschwindigkeit und Abflussmenge auf die Sohle

| Nr. | Q (l/s) | v (m/s)  | Beobachtung   |
|-----|---------|----------|---|
| 1   | 45      | 0,28     | Tiere eingesetzt, Sohle stabil                            |
| 2   | 75      | 0,44     | Sohle stabil  |
| 3   | 105     | 0,55     | Sohle stabil  |
| 4   | 135     | 0,68     | Sohle stabil, erste Steinchen wackeln                     |
| 5   | 165     | 0,78 (*) | Sohle weitgehend stabil, einzelne Steinchen bewegen sich  |
| 6   | 195     | 0,90     | Sohle instabil, kleine Steine bis 20mm werden bewegt      |
| 7   | 225     | 0,99     | Sohle bewegt sich, Steine über 50 mm werden transportiert |

(\*) Wert interpoliert

Anschließend wurde die Rinne eine Stunde lang mit 70 l/s beschickt und dann trocken gelegt. Im Versuchsaufbau wurden zunächst keine Tiere wieder gefunden. Kies wurde nur in vergleichsweise geringen Mengen ausgespült (vgl. Abbildung 5.4). 14 Stunden nach dem ersten Einstauversuch wurden einzelne Bachflohkrebse im ausgespülten Bereich gesichtet und zwar sowohl kleine (8 mm) als auch große (20 mm) Tiere.



**Abbildung 5.4:** Durchlass nach einem Abfluss von 225 l/s und Fließgeschwindigkeiten von ca. 1 m/s

### 5.4.3 Einstauversuche

Wie im vorhergegangenen Versuch wird der Teststand mit einer 20-30 cm dicken Kiesschicht befüllt. Tiere werden keine eingesetzt, da sie nicht unmittelbar während des Einstaus beobachtet werden können und eine Abdrift daher nicht protokolliert werden kann.

#### **Einstau 1:**

Bei der Simulation eines Einstaus (ca. 200 l/s, Höhe Durchlass 15 cm) wird unmittelbar unterhalb der Schwingklappe das Sohl sediment auf einer Länge von ca. 1 Meter ausgewaschen und wenige Dezimeter unterhalb abgelagert (Abbildung 5.5). Unterhalb der Klappe und 10 cm über der Sohle werden Fließgeschwindigkeiten von ca. 1,6 m/s gemessen.



**Abbildung 5.5:** Ausgespülter Bereich unter der Schwingklappe

### **Einstau 2:**

In einem weiteren Versuch wird der zuvor ausgespülte Sohlbereich mit Steinen der Größe 15-30 cm befestigt. Zudem wird zur Gewährleistung der terrestrischen Durchgängigkeit am rechten Ufer mit Steinen eine Uferberme angelegt, welche ca. 15 cm breit ist und auch unter der Schwingklappe durchgeführt wird.

Beim Einstau (ca. 200 l/s, Höhe Durchlass 15 cm) wird der hintere Teil der Sohlbefestigung ausgespült. Auch die großen Steine werden bewegt. Der hintere Teil der Berme wird leicht beschädigt. Das ausgespülte Material wird wiederum einige Dezimeter unterhalb der Erosionsstelle abgelagert. Direkt unterhalb der Schwingklappe werden Fließgeschwindigkeiten von 1,4 bis 1,6 m pro Sekunde gemessen. Die Schwingklappe selbst scheint durch das asymmetrische Abflussprofil nicht beeinflusst zu werden. Etwa 1 Stunde nach dem Versuch wurden einzelne Bachflohkrebse im ausgespülten Bereich unterhalb der Schwingklappe beobachtet, welche noch aus dem ersten Versuch (Sedimenttransport) stammten und die Einstauversuche unbeschadet überstanden hatten.





**Abbildung 5.6:** Befestigter Sohlbereich vor und nach dem Einstau

### 5.5 Fazit Ökologische Untersuchungen

Die Versuchsergebnisse unterstreichen die Bedeutung des Lückensystems des Sediments als Rückzugsraum für Wirbellose. Selbst bei hohen Fließgeschwindigkeiten und erheblichen Sedimentbewegungen können Kleintiere dort Hochwasserereignisse unbeschadet überdauern. Die Versuche haben zudem gezeigt, dass eine Befestigung von der Sohle notwendig ist, um ein komplettes Ausspülen des Substrats unterhalb und kurz hinter der Schwingklappe zu verhindern. Wie diese Sohlbefestigung möglichst ökologisch verträglich realisiert werden kann, soll in weiteren Testreihen untersucht werden. Vermutlich sind locker gesetzte Riegel von größeren Steinen einer dichten Steinschüttung vorzuziehen, da auf diese Weise größere Zwischenräume bleiben, die bei normalen Abflussverhältnissen mit kleineren Korngrößen aufgefüllt sind. Eine asymmetrische Gestaltung des Profils soll getestet werden.

Für die Migration von Kleinstlebewesen sollten auch im Einstaufall „Geschiebeinseln“ unterstrom der Schwingklappe erhalten bleiben. Diese dienen dem Makrozoobenthos im Hochwasserfall als Schutzraum und beschleunigen die Wiederbesiedelung des Tosbeckens nach Abklingen der Hochwasserwelle. Hierzu wurden die in Kapitel 4.9 beschriebenen Versuche durchgeführt. Dabei hat es sich gezeigt, dass konstruktiv einfache Einbauten die Funktion einer Geschiebeinsel nicht erfüllen können. Ein alternativer Ansatz zur Erhaltung von Rückzugsräumen für Kleinstlebewesen ist in 7.4 dargestellt.

## 6 Bemessungskonzept

Das hydraulische und kinematische Verhalten der Schwingklappe wurde in Kapitel 4.4 ausführlich beschrieben. Darüber hinaus wurden einzelne Aspekte, die für das Verständnis des Systemverhaltens und der Betriebssicherheit wichtig sind, detailliert betrachtet.

Die Ausführungen zeigen deutlich auf, dass sich das Momentengleichgewicht und das damit zusammenhängende Aufrichtverhalten der Schwingklappe wesentlich komplexer darstellt als in den bisherigen Studien [z.B. LfU] erörtert. Vor allem der signifikante Einfluss des unterwasserseitigen Wasserstandes und dessen Sensitivität bezüglich des hydraulischen Verhaltens der Schwingklappe ist in allen bisherigen Studien und Modellversuchen behandelt worden. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde diese Thematik erstmals ausführlich und umfassend untersucht. Die Ergebnisse hierzu sind in Kapitel 4.4 dargestellt.

Für den Praxistransfer des Konzeptes der Schwingklappe ist es unumgänglich, dass die Ergebnisse der Versuche derart aufbereitet werden, dass der planende Ingenieur anhand eines Bemessungskonzeptes das System Schwingklappe sicher und fehlerfrei für unterschiedlichste Randbedingungen und Örtlichkeiten dimensionieren kann. Dabei sind vor allem die Grenzen der Anwendbarkeit exakt zu definieren.

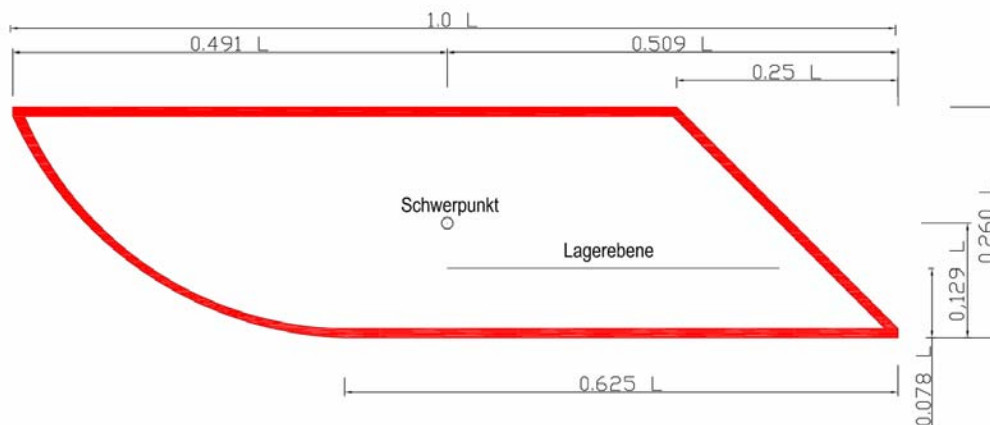
Die Fragestellungen und Probleme rund um den Einfluss des Unterwasserstandes spiegeln sich auch im erarbeiteten Bemessungsansatz wider. Bei einem Einsatz der Schwingklappe zur Abflussregelung von kleineren Hochwasserrückhaltebecken daher die damit verbundenen Randbedingungen eingehalten werden.

Die Praxistauglichkeit und die Funktionalität des erarbeiteten Bemessungsansatzes konnte mit der Realisierung der Pilotanlage an der Fischaufstiegsanlage Obermühle/Pfinz aufgezeigt werden. Eine detaillierte Beschreibung des Projektes findet sich in Kapitel 8.4. Auf Grund von zeitlichen Verzögerungen beim Bau der Anlage war die Anlage zum Zeitpunkt der Berichterstellung noch nicht in Betrieb. Von Seiten des IWG wird jedoch angestrebt, im Rahmen eines in Eigenleistung zu erbringenden Monitorings den Bemessungsansatz anhand der Pilotanlage weiter zu verifizieren und zu Ergänzen.

Im Folgenden wird das derzeitige Bemessungskonzept vorgestellt.

## 6.1 Klappengeometrie

Die den Versuchen zu Grunde liegende Klappengeometrie ist normiert auf die Klappenlänge in Abbildung 6.1 dargestellt. Die Lage des Schwerpunktes ergibt sich aus einer Gleichverteilung der Materialstärken innerhalb der Rippen und der Beplankung im Modellversuch. Die Lage des Schwerpunktes muss bei der Planung zur Bauausführung beachtet werden, jedoch können kleinere Abweichungen im cm-Bereich toleriert werden, da sich die Bemessungsdiagramme auf eine relative Lage des Lagerungspunktes zum Schwerpunkt beziehen.



**Abbildung 6.1:** Allgemeine Beschreibung der Klappengeometrie

Eine Anpassung der Klappengeometrie an die örtlichen geometrischen und hydraulischen Randbedingungen erfolgt derart, dass bei Beibehaltung der Längenverhältnisse die Klappe entsprechend vergrößert oder verkleinert wird. Die gewünschte Regelabgabe wird über die Breite des Klappenkörpers eingestellt. Eine Abänderung der Breite des Klappenkörpers ist ohne Einschränkungen möglich. Die Versuche wurden als 2D-Ausschnittsmodell gefahren und sämtliche Prozesse sind von der Breitenentwicklung der Klappe unabhängig.

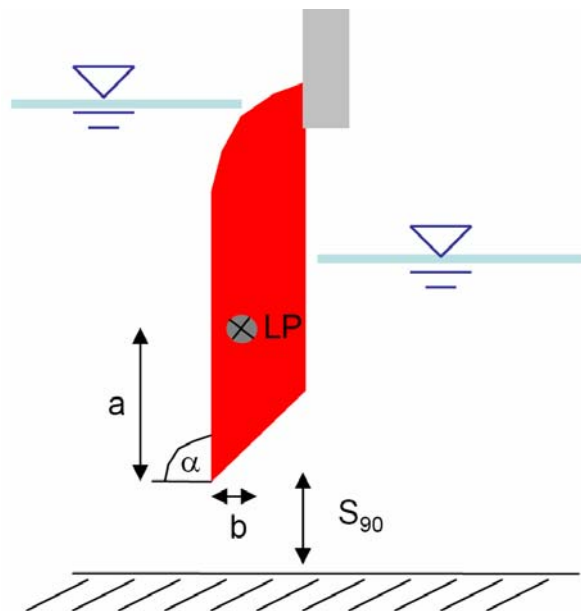
Das Funktionsprinzip der Schwingklappe basiert auf einem Gleichgewichtszustand zwischen den Momenten aus Gewichts-, Auftriebs-, und Strömungskraft. Bei der Bauausführung muss daher darauf geachtet werden, dass die spezifische Dichte des Klappenkörpers (Gewicht Klappe / Volumen Klappe) im Bereich zwischen  $275 \text{ kg/m}^3$  und  $350 \text{ kg/m}^3$  liegt.

## 6.2 Entwicklung der Spaltweite

Die geometrischen Verhältnisse der Schwingklappe lassen sich einfach über trigonometrische Betrachtungen ableiten. Die Spaltweite hängt von den in Abbildung 6.2 dargestellten Längen und der Neigung ab.

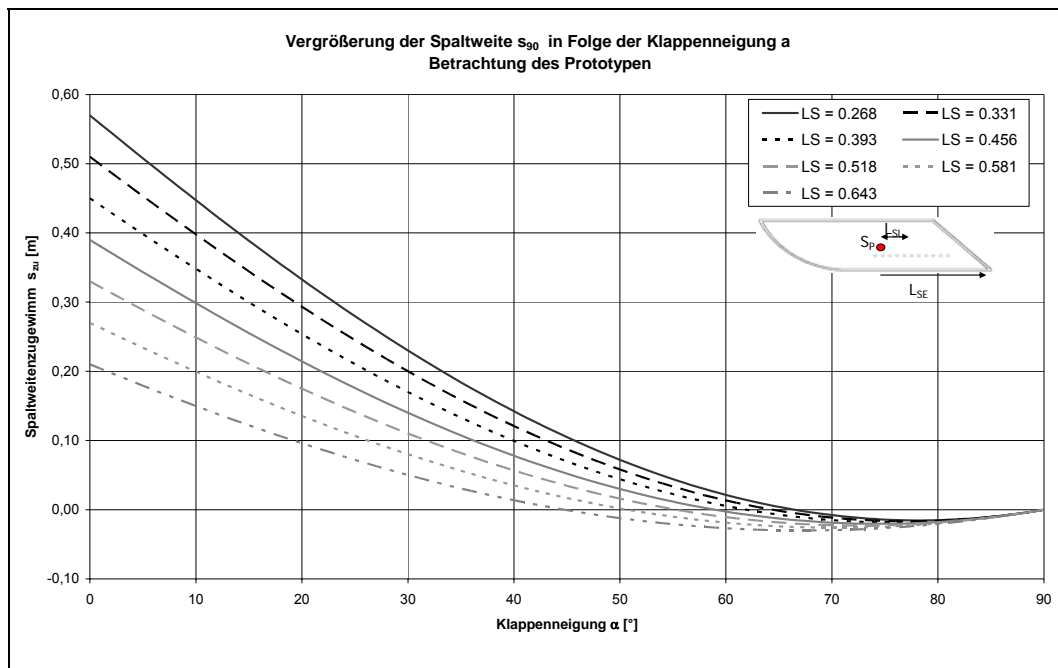
Die resultierende Spaltweite zu jeder Neigung kann dabei über folgende Formel ermittelt werden:

$$\left( \frac{b}{\cos \alpha} \cdot (\sin \alpha)^2 - 1 \right) - \sin \alpha \cdot a + (s_{90} + a) \quad (6.1)$$



**Abbildung 6.2:** Parameter zur Bestimmung der Spaltweite  $s$

Wendet man die trigonometrische Beziehung auf die Geometrie des untersuchten Prototypen an, so ergibt sich der in Abbildung 6.3 dargestellt Zugewinn an Spaltweite in Abhängigkeit des Neigungswinkels. Als Scharparameter wurde die relative Lage des Lagerpunktes aufgetragen.



**Abbildung 6.3:** Entwicklung der Spaltweite beim Aufrichten der Schwingklappe, Vergleich verschiedener Lagerungspunkte

Es kann festgestellt werden, dass der Zugewinn an Spaltweite umso größer ist, je näher der Lagerpunkt am Schwerpunkt liegt (kleine LS). Da der Lagerpunkt nicht in der Stauenebene liegt, ist auch das Verhalten der Spaltweite bei größeren Winkeln plausibel. Beim Aufrichten der Klappe ergeben sich so Spaltweiten, die kleiner als die Spaltweite bei einer Klappenneigung von  $90^\circ$  ( $s_{90}$ ) sind.

Um die Vorteile der Schwingklappe bezüglich der Öffnungsweite in Ruhestellung (Neigung  $0^\circ$ ) möglichst vollständig aus zu nutzen, sollte der Lagerungspunkt nahe am Schwerpunkt angeordnet sein. Die Ausführungen in Kapitel 4.4.4 zur Abhängigkeit der Funktionsfähigkeit vom Lagerpunkt müssen dabei beachtet werden. Im Rahmen der Modellversuche hat sich für die Lage des Lagerungspunktes ein  $LS = 0,331$  als praxistauglich herausgestellt, bei dem noch ein großer Zugewinn an freier Querschnittsfläche realisiert werden kann.

### 6.3 Bemessung der Spaltweite $s_{90}$ und der Breite der Schwingklappe

Bei einem Hochwasserrückhaltebecken wird die Öffnung in der Stauwand so dimensioniert, dass bei Beckenvollfüllung die Regelabgabe  $Q_R$  an den unterstromigen Gewässerabschnitt abgegeben wird. Die Dimensionierung der Spaltweite bei einer Klappenneigung von  $90^\circ$  und Breite der Öffnung bei der Schwingklappe erfolgt wie bei einem Tiefschütz. Über den maximalen Wasserstand im Becken und den

Abflussbeiwert bei einer Klappenneigung von  $90^\circ$  lässt sich unter Beachtung des rückgestauten Abflusses an der Schwingklappe die benötigte Querschnittsfläche ableiten.

Da sich das Verhalten der Schwingklappe bei einer Neigung von  $90^\circ$  nicht von einem Planschütz unterscheidet, können die zur Dimensionierung benötigten Bemessungstabellen aus der Literatur entnommen werden. Eigene Bemessungstabellen für die Schwingklappe sind nicht notwendig. Dies vereinfacht den Planungsablauf, da der planende Ingenieur auf die Erfahrung bei der Dimensionierung vom Schützen zurückgreifen kann.

#### 6.4 Bemessung der Achslage

Die Achslage des Klappenkörpers ist für den sicheren Betrieb der Schwingklappe von entscheidender Bedeutung. Das Zusammenspiel zwischen Auftriebs-, Gewicht- und Strömungskräften wird maßgeblich durch den Unterwasserstand und die Achslage der Schwingklappe geprägt. Diese können als Wirkungskette angesehen werden und müssen daher gemeinsam mit in die Dimensionierung einfließen. In Abbildung 6.4 ist das Verhalten der Schwingklappe dem Unterwasserstand gegenüber gestellt.

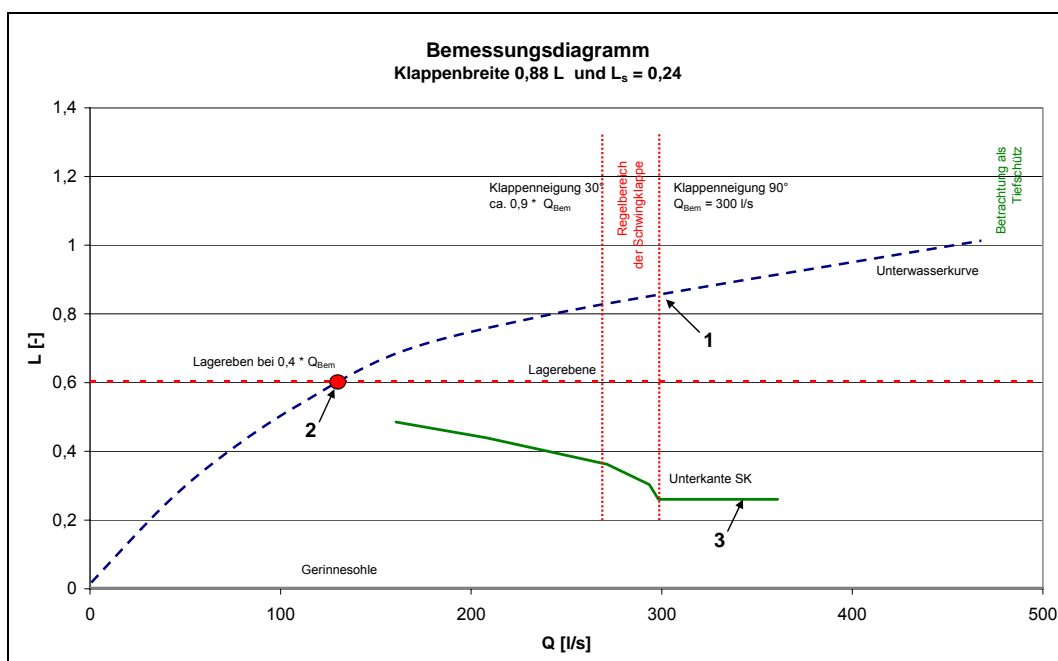
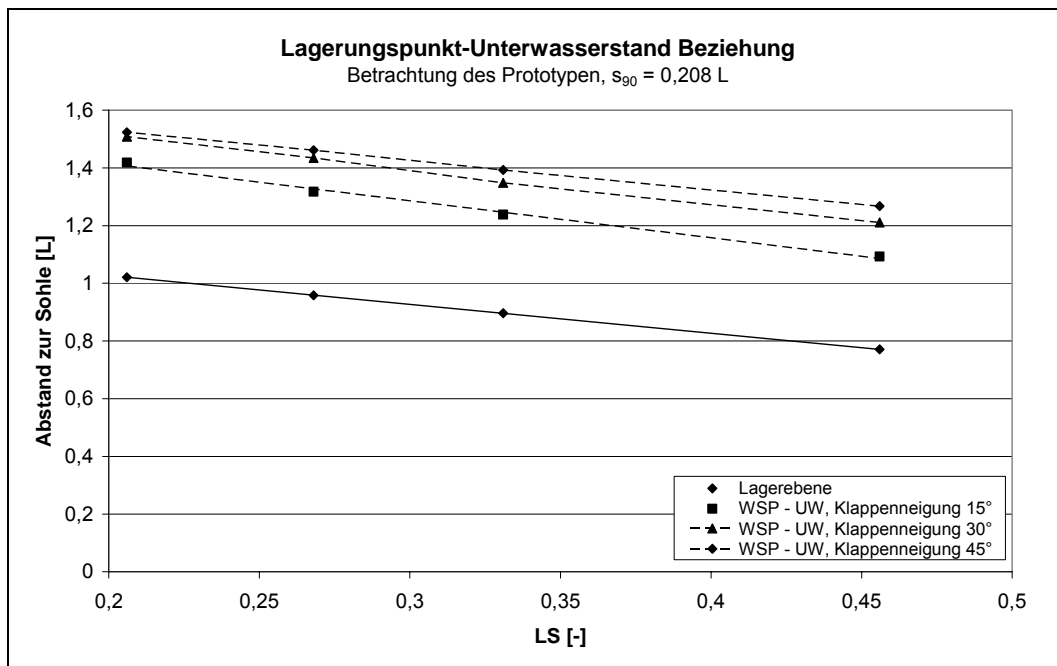


Abbildung 6.4: Bemessungsdiagramm, bezogen auf die Klappenlänge  $L$

Ausgangspunkt für die Festlegung der Achslage ist der Wasserstand im Unterwasser, bei dem die Schwingklappe gerade senkrecht steht (Klappenneigung  $90^\circ$ ). Der dazugehörige Abfluss wird im Folgenden als Bemessungsabfluss  $Q_{\text{Bem}}$  bezeichnet (vgl. Abbildung 6.4, Punkt 1). Beide Werte können aus der Wasserstands-Abfluss-Beziehung der Unterwasserstrecke abgeleitet werden.

Der Zusammenhang zwischen dem Lagerpunkt und der Klappenneigung bei einem bestimmten Unterwasserstand ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Als Scherparameter ist der Unterwasserstand aufgetragen, der eine bestimmte Klappenneigung erzeugt. Hieraus geht hervor, dass der Abstand zwischen dem Unterwasserstand und der Lagerungsebene abhängig vom Abstand zwischen dem Lagerungspunkt und dem Schwerpunkt ist. Mit größerem  $L_S$  (Abstand des Lagerpunktes vom Schwerpunkt) wandert der Unterwasserstand dabei näher an den Lagerpunkt.



**Abbildung 6.5:** Beziehung zwischen dem Unterwasserstand und dem Lagerungspunkt

In Kapitel 4.4.2 wurde bereits auf die Anforderungen an die Wasserstands-Abfluss-Beziehung des unterwasserseitigen Gewässerabschnittes hingewiesen. Im Rahmen der Modellversuche konnte erarbeitet werden, dass die Lagerebene bei dem Wasserstand einzurichten ist, der sich bei ca. 40% des Bemessungsabflusses  $Q_{\text{Bem}}$  im Unterwasser einstellt (vgl. Abbildung 6.4, Punkt 2).

Die Versuche zum Geschiebe- und Geschwemmseltrieb haben keine erhöhte Anfälligkeit der Schwingklappe gegenüber einem Tiefschütz erkennen lassen. Dennoch sollte die Spaltweite nicht zu klein ausgeführt werden. Wir empfehlen eine Mindestspaltweite von 0,25 m. Die Breite der Schwingklappe wird anschließend, analog zu der Dimensionierung eines Schützes über die maximale Druckhöhe, die Spaltweite und den Rückstau einfluss an der Schütztafel über die in der Literatur zur Verfügung stehenden Bemessungswerte errechnet.

### 6.5 Herausforderungen bei der Bemessung

Mit dem hier aufgeführten Bemessungskonzept können die Ergebnisse aus den Modellversuchen in die Praxis transferiert werden. Es konnte aufgezeigt werden, dass die Wasserstands-Abfluss-Beziehung des unterwasserseitigen Gewässers einen signifikanten Einfluss auf das hydraulische Verhalten der Schwingklappe hat und geringe Abweichungen im Wasserstand bereits einen großen Einfluss auf den Abfluss unter der Schwingklappe haben.

Dies stellt den Planer vor eine schwierige Aufgabe. Wie genau lässt sich der Wasserstand bei Regelabgabe in einem naturnahen Gewässer prognostizieren? Wie ändert sich dieser auf Grund des unterschiedlichen Widerstandsverhaltens der Pflanzen über die Jahreszeit und auch im weiteren Verlauf des Wachstums? Wie ändert sich der Wasserstand auf Grund der morphologischen Aktivität im Hochwasserfall?

Problematisch ist dies vor allem vor dem Hintergrund, dass die Regelabgabe  $Q_R$  für gewöhnlich ein Ereignis mit einem geringen Wiederkehrintervall ist und deshalb nur selten verlässliche Kalibrierungsdaten für die Eichung eines numerischen Modells vorliegen. Doch selbst wenn diese Daten vorliegen stellt sich die Frage, wie genau sich der Abfluss eines abgelaufenen Ereignisses bestimmen lässt. Bei kleineren Gewässern muss sicherlich mit Abweichungen im Abfluss von bis zu 15 % gerechnet werden.

Aus ingenieurtechnischer Sicht muss daher ein „Kontrollbauwerk“ unterstrom der Schwingklappe angeordnet sein, das unabhängig von der Jahreszeit oder sonstigen Einflüssen eine konsistente Wasserstands-Abfluss-Beziehung erzwingt. Dies könnte z.B. ein befestigter Gewässerabschnitt mit einer definierten Geometrie sein. Die negativen Aspekte eines solchen Bauwerkes auf die Ökologie (z.B. Durchgängigkeit der Sohle, Landschaftsbild) müssen beachtet und mit den ökologischen Vorteilen der Schwingklappe abgewogen werden.



## 7 Konzept Gesamtanlage

Die technische Ausstattung und der Aufbau eines HRB kann in mehrere Bereiche gruppiert werden, die alle einen Einfluss auf die ökologische Durchgängigkeit haben können. Von der projektbegleitenden Arbeitsgruppe unter der Leitung der LUBW wurde eine detaillierte Bewertung bestehender Bauwerke vorgenommen worden. Die Ergebnisse sind im Leitfaden Durchgängigkeit für Tiere in Fließgewässern, Teil 3 veröffentlicht [LFU2006]. Dabei zeigt sich deutlich, dass nicht allein die gewählte Konstruktion (z.B. Ökoschieber) maßgebend für die ökologische Bewertung der Gesamtanlage ist, sondern dass häufig Einzelelemente unnötigerweise die Durchgängigkeit verschlechtern.

Aus diesem Grund wurde im Rahmen diese Forschungsvorhabens der so genannte Bauweisenkatalog erstellt, der auf diese Problematik eingeht und die technische und ökologische Funktion verschiedener Bereiche eines HRB beleuchtet und Verbesserungsmöglichkeiten aufzeigt. Der Bauweisenkatalog ist in Anlage 2 beigefügt.

Die aus dem Bauweisenkatalog gewonnenen Erkenntnisse sind in die Konzeption einer Gesamtanlage mit einer Schwingklappe als Kontrollorgan eingeflossen. Im Folgenden werden die Bereiche näher beschrieben.



**Abbildung 7.1:** Anschauungsmodell einer Gesamtanlage mit Schwingklappe

## 7.1 Einlaufbereich

Der Einlaufbereich eines Hochwasserrückhaltebeckens ergibt sich letztlich durch die Verschneidung des Dammkörpers mit dem Gewässerkorridor. Aus hydraulischer Sicht sollte er so aufgebaut sein, dass eine möglichst parallele und gleichmäßige Anströmung des Regulierorganes ermöglicht wird. Dies kann durch eine kontinuierlichen Querschnittseinengung, gleichbedeutend mit einer gleichmäßige Beschleunigung der Strömung, erzielt werden.

Das Gewässer sollte in seiner natürlichen morphologischen Struktur bis an das Regulierorgan herangeführt werden. Gewässeraufweitungen oder der Einbau einer horizontalen Sohle kann die Qualität dieses Bereiches als Lebensraum verschlechtern, da mit Sedimentationsflächen und einer Verschlammung der Sohle gerechnet werden muss. Ebenso sollte darauf geachtet werden, dass die Vegetation des Gewässers in seiner natürlichen Ausprägung möglichst weit in den Einlaufbereich gezogen wird.

Durch die Flügelmauern wird die Durchgängigkeit des Ufers und des Luftraums eingeschränkt. Es kann zur Behinderung der Wanderbewegungen von fliegenden Insekten, Fledermäusen, Vögeln im Luftraum sowie Kleinsäugetern, Amphibien und Reptilien im terrestrischen Bereich kommen. Durch einen großen Öffnungswinkel der Wände kann dies zum Teil kompensiert werden, da die Tiere zur Öffnung hin geführt werden. Der breite Öffnungswinkel hat außerdem den Vorteil, dass gute Lichtverhältnisse herrschen und ausreichend Platz für begrünte Uferbermen vorhanden ist. Weit in den Einlaufbereich und den Uferbermen hineingezogene Gehölzstrukturen können vielen Tieren als Leitstrukturen, Versteck und Ansitz dienen.

Die Lebensraumqualität des Einlaufbereiches kann durch den Einsatz einer Natursteinmauer anstelle einer betonierte Flügelwand weiter verbessert werden. Die Natursteinmauer mit ihren Fugen bietet Kleinstlebensräume für Pflanzen und Tiere. Reptilien und Kleintiere finden beispielsweise in den Zwischenräumen Rückzugs- und Versteckmöglichkeiten, bei ausreichender Tiefe auch Überwinterungsquartiere. Die Natursteinblöcke erwärmen sich auch bei Besonnung sehr stark und bilden ein eigenes Mikrohabitat. Solche künstlich geschaffenen Lebensräume sind oft nicht für den Gewässerstandort typisch, sie können jedoch wertvolle Ersatzhabitate darstellen.

Abbildung 7.2 zeigt beispielhaft ein Hochwasserrückhaltebecken mit einem großen Öffnungswinkel der Flügelmauern in Natursteinbauweise.



**Abbildung 7.2:** HRB Apfelbach.

## 7.2 Rechenkonzept

Hochwasserereignisse haben auf Grund ihrer Dynamik und der daraus resultierenden Strömungskräfte einen großen Einfluss auf die Morphologie und die Vegetation entlang eines Gewässers. Die Betriebssicherheit von wasserbaulichen Anlagen, und dort vor allem der Kontroll- und Regulierorgane, muss auch bei Hochwasser sichergestellt sein.

Das in der Hochwasserwelle mitgeführte Geschwemmsel kann die Funktion eines Regulierorgans einschränken oder gar verhindern. Es ist daher dringend erforderlich ein geeignetes Rechenkonzept zu entwickeln und zu implementieren. Ein allgemein gültiges, einheitliches Rechenkonzept kann dabei auf Grund der unterschiedlichen Ausprägung der Anlagen nicht existieren. Abhängig von der Charakteristik des Einzugsgebietes, von der Hydrologie und des gewählten Regulierorgans lassen sich unterschiedliche Anforderungen ableiten, die zu unterschiedlichen Bauweisen führen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden eine Vielzahl von Hochwasserrückhaltebecken besichtigt und hinsichtlich des umgesetzten Rechenkonzeptes analysiert. In den weiteren Ausführungen werden dabei nur diejenigen Becken beachtet, für die die Schwingklappe als alternative Bauweise geeignet erscheint, also kleine und mittlere Becken, die meist mit festen Kontrollorganen versehen sind.

Bei der Analyse der Rechenkonzepte zeigte sich, dass in der Regel eine zweistufige Rechanlage vorhanden ist. Ein Grobrechen aus Palisaden (lichte Weiten 25 cm bis 50 cm) im Abstand von ca. 20 m bis 50 m soll im Bachbett mitgeführte große Äste vom Bauwerk fernhalten. Im Nahbereich des Durchlassbauwerkes ist ein Feinrechen (lichte Weite 12 cm – 25 cm) zur Abwehr von feinerem Geschwemmsel errichtet.

Die Analyse der in der Praxis in Baden-Württemberg umgesetzten Rechenkonzepte zeigte deutlich auf, dass selbst bei ähnlichen hydraulischen und hydrologischen Randbedingungen kein einheitlicher Ansatz gewählt wurde sondern dass abhängig von Planungsbüro und Genehmigungsbehörde große Unterschiede im Rechenkonzept vorhanden sind. Die zwei in Abbildung 7.3 aufgeführten Beispiele verdeutlichen diesen Sachverhalt.

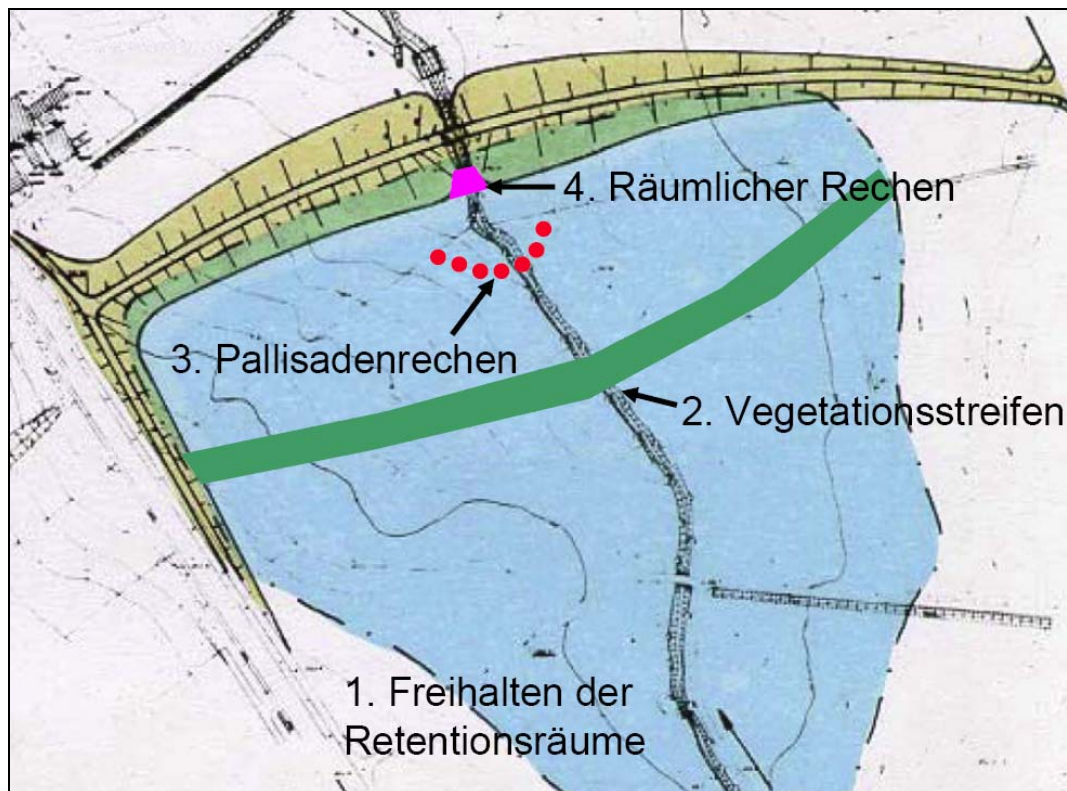


**Abbildung 7.3:** Unterschiedliche Rechenkonstruktionen in der Praxis, Stababstand 12 cm (links), Stababstand 30 cm (rechts).

Im Rahmen des Forschungstransfers wurde an einer Umsetzung der Technologie Schwingklappe in die Praxis mitgearbeitet. Für die Schwingklappe als Regulierorgan und damit zentralem Bauteil einer wasserbaulichen Anlage muss ein entsprechendes Rechenkonzept erarbeitet werden. In einer engen Kooperation mit dem Hochwasser Zweckverband Elsenz-Schwarzbach wurden dabei die betrieblichen Erfahrungen zum Rechenkonzept bei bestehenden HRB aufgearbeitet. Neben den betrieblichen und hydraulischen Aspekten sollen bei einem Praxistransfer aber auch die ökologischen Belange Beachtung finden.

Welchen ökologischen Nutzen hat eine große Öffnung in der Stauwand, wenn sie durch einen engmaschigen Rechen verbaut wird? Letztlich sind die Betriebssicherheit bei Geschwemmseltrieb und eine große, unverbaute Öffnung in der Stauwand zwei konkurrierende Anforderungen die bei der Planung eines ökologisch angepassten

Hochwasserrückhaltebeckens beachtet und abgewogen werden müssen. Für die Schwingklappe wurde daher ein erweitertes, vierstufiges Rechenkonzept erarbeitet (vgl. Abbildung 7.4). Eine Adaption des erarbeiteten Rechenkonzeptes auf andere Hochwasserrückhaltebecken mit ähnlichen hydraulischen und hydrologischen Randbedingungen ist möglich.



**Abbildung 7.4:** Systemskizze des Rechenkonzeptes.

### **Rechenkonzept Stufe 1: Pflege / Unterhaltung des Retentionsraums**

Im Hochwasserfall wird mit dem Wasser auch Geschwemmsel transportiert. Theoretisch kann das Material dabei aus dem gesamten Einzugsgebiet stammen. In der Praxis hat sich jedoch gezeigt, dass vor allem Material aus dem Retentionsraum und den direkt angrenzenden Bereichen mit der anlaufenden Hochwasserwelle mobilisiert und als Geschwemmsel in Richtung Durchlassbauwerk transportiert wird.

Die Unterhaltung der Retentionsräume in Bezug auf die „Geschwemmselproduktion“ sollte demnach verstärkt in das Rechenkonzept einfließen. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden eine Vielzahl von Hochwasserrückhaltebecken besichtigt. Dabei konnte immer wieder festgestellt werden, dass in den Retentionsräumen z.B. Holzlager vorhanden sind (vgl. Abbildung 7.5).

Da die Flächen des Retentionsraumes meist nicht im Besitz des HRB-Betreibers sind, ist dieser Punkt auch aus verwaltungstechnischer Sicht problematisch. Der Betreiber kann derzeit nur auf die Pächter einwirken, rechtliche Schritte bei Zuwiderhandlung sind kaum möglich.



**Abbildung 7.5:** Beispiele für nicht freigehaltene Retentionsräume; Holzlager (links) und landwirtschaftliches Gerät bei Hochwasser (rechts) [ZVHWS].

Die Wiesen im Retentionsraum unterliegen häufig einer extensiven landwirtschaftlichen Nutzung und werden dabei ein- bis viermal jährlich gemäht. Für die Futtererzeugung müssen die Gräser konserviert werden. Hierzu werden die frisch geschnittenen Gräser für mehrere Tage bis Wochen auf den Wiesen zur Trocknung gelagert. Ab einem maximalen Wassergehalt von 15 % kann das Heu eingelagert werden. Tritt in einer Trocknungsphase ein Hochwasser auf, so kann es zu einer Mobilisierung der Mahd kommen und sich ein massiver Geschwemmselteppich bilden. Hierdurch kann es am Rechen und an dem Hochwasserentlastungseinrichtungen zu betrieblichen Problemen kommen (vgl. Schadensfallbeschreibung auf Seite 134).

Bei der Konservierung über eine Silage können die Gräser dagegen schon bei einem maximalen Wassergehalt von 65 % eingelagert werden. Die Trocknungsphase auf der Wiese und damit das Risiko, welches von der Mahd ausgeht, könnte so auf ein zeitliches Minimum beschränkt werden. Im Rahmen der Pachtverträge und Bewirtschaftungspläne sollte überprüft werden, in wie weit eine Silage möglich ist und vertraglich fixiert werden kann. Es sollte auch geprüft werden, ob eine komplette Aufgabe der landwirtschaftlichen Nutzung im Retentionsraum möglich ist.

## Rechenkonzept Stufe 2: Anordnung von Vegetationsstreifen

Im März 2002 kam es bei einem Hochwasserereignis im Einzugsgebiet Elsenz-Schwarzbach am HRB Raußmühle in Eppingen zu einem Schaden an der Steinschüttung der Hochwasserentlastungsanlage, die als überströmbarer Damm links- und rechtsseitig des Durchlassbauwerkes ausgeführt ist. Aus diesem Ereignis lassen sich Rückschlüsse für eine erfolgreiche Geschwemmselabwehr ableiten. Was war passiert?

Bei dem Hochwasserereignis wurden große Mengen an Mähgut mobilisiert. Auf Grund der Fülle der HW-Welle kam es zu einer Vollfüllung des Beckens und zu einem Anspringen der Hochwasserentlastungsanlage. Auf der linksseitigen Dammscharte hatte sich ein großer Geschwemmselteppich angelagert und die Kote der Überfallkante erhöht (vgl. Abbildung 7.6 unten). Im Nahbereich des Durchlassbauwerkes hatte sich eine Schneise gebildet, über die nun ein hoher spezifischer Abfluss abgeführt wurde. Auf der luftseitigen Steinschüttung kam es auf Grund der lokalen hydraulischen Überlastung zu einem Erosionsschaden. Die rechtsseitige Dammscharte blieb vom Geschwemmseltrieb verschont.

Eine Analyse der örtlichen Situation ergab, dass auf der rechten Gewässerseite parallel zur Dammachse ein Vegetationsstreifen in einem Abstand von ca. 60 m angeordnet ist (vgl. Abbildung 7.6 oben). Dieser wirkte wie ein vorgeschalteter Rechen und hat einen Grossteil des Geschwemmsels des rechtsseitigen Beckenbereiches von der HW-Entlastungsanlage fern gehalten.



**Abbildung 7.6:** Geschwemmselanfall HRB Raußmühle beim Schadensfall im März 2002; [ZVHWS].

Aus diesem Ereignis und den besonderen örtlichen Gegebenheiten lassen sich folgende Rückschlüsse für eine effektive Geschemmselabwehr mittels Vegetation ableiten:

- Vegetationsstreifen im Retentionsraum können wie ein Rechen wirken und Geschwemmsel in großer Entfernung zum Durchlassbauwerk zurückhalten.
- Die Vegetationsstreifen sollten möglichst parallel zur Dammachse und talquerend angeordnet werden
- Der seitliche Eintrag von Geschwemmsel in den Retentionsraum kann durch uferparallele Vegetationsstreifen verringert werden.
- Die Vegetationsstreifen sollten eine heckenartige Struktur haben, Als Pflanzen eignen sich auetypische Gewächse wie z.B. Kreuzdorn, Rosengewächse sowie Weiß und Rotdorn. Der Unterhaltungsaufwand beschränkt sich hierbei auf ein Minimum. Von einem Riegel aus Weiden sollte auf Grund der benötigten Unterhaltung abstand genommen werden.

### Rechenkonzept Stufe 3: Pallisadenrechen

Als dritte Stufe zur Geschwemmselabwehr haben sich in der Praxis Pallisadenrechen bewährt. Diese werden im Zulaufquerschnitt des Durchlassbauwerkes angeordnet und bestehen meist aus geramnten Holzpfählen mit einer lichten Weite von 30 bis 50 cm (vgl. Abbildung 7.7). Die Höhe der Pallisaden sollte so dimensioniert werden, dass der Rechen bei einer beginnenden Vorlandüberflutung noch deutlich aus dem Wasser ragt. Hierdurch kann sichergestellt werden, dass das von den Vorländern mobilisierte Geschwemmsel weitestgehend vom Durchlassbauwerk fern gehalten wird. Abbildung 7.8 zeigt die Wirkungsweise während eines Hochwassereignisses.



**Abbildung 7.7:** Pallisadenrechen, HRB Raußmühle (links) und HRB Mönchzell (rechts).





**Abbildung 7.8:** Pallisaden während eines Hochwasserereignisses, HRB Insenbach (links), HRB Oberschwarzenbach (rechts); [ZVHWS].

In Niedrig- und Mittelwasserphasen kann es zu einer lokalen Verklausung des Pallisadenrechens kommen. Hydraulisch wirkt der Rechen dann wie ein Absturz, was bezogen auf die ökologische Durchgängigkeit unerwünscht ist (vgl. Abbildung 7.9, links). Von baulicher Seite muss eine Möglichkeit vorgesehen werden, den Pallisadenrechen maschinell zu reinigen. Dies kann z.B. mittels eines Zufahrtweges und dem Einsatz eines Traktors bewerkstelligt werden (vgl. Abbildung 7.9, rechts). Eine regelmäßige Überprüfung der Verlegung sollte in den Unterhaltungsplan aufgenommen werden.



**Abbildung 7.9:** Verklausung der Pallisaden bei Niedrigwasser (links), Ausräumen per Traktor (rechts) [ZVHWS].

#### Rechenkonzept Stufe 4: Räumlicher Feinrechen

Die letzte Stufe im Rechenkonzept ist ein Feinrechen direkt oberstrom der Schwingklappe. Der Rechen sollte als räumlicher Rechen ausgeführt werden, der an die Seitenwangen und an die Stauwand anschließt (vgl. Abbildung 7.10). Bei anlaufendem Hochwasser und damit verbundenem Anstieg des Wasserstandes kann

das Geschwemmsel so in Richtung Stauwand aufsteigen und hier maschinell entnommen werden. Eine gute Zugänglichkeit ist meist auf Grund des befestigten Kronenweges gegeben. Durch die schräge Stellung der Rechenebene steht eine große Fläche zur Verfügung, so dass die Abflussleistung des Regulierorganes bei einer Teilverklausung des Rechens nicht beeinträchtigt wird.

Die Rechenvorderkante sollte sich nicht auf der Gewässersohle abstützen sondern eine freie Passierbarkeit des Geschwemmsels im Niedrig- und Mittelwasserfall ermöglichen. Hierdurch können kleinere Rechenverlegungen und daraus resultierende Abstürze (vgl. Pallisadenrechen, Seite 136) vermieden und der Unterhaltungsaufwand verringert werden. Die lichte Höhe darf dabei nicht größer sein als die Höhe der Öffnung unter der Schwingklappe.



**Abbildung 7.10:** Räumlicher Feinrechen, HRB Raußmühle (links), HRB Möchzell (rechts).

Bezogen auf die ökologische Durchgängigkeit hat der räumliche Rechen den größten Einfluss. Durch ihn wird die Passierbarkeit des Luftraumes über der Schwingklappe maßgeblich beeinflusst. Darüber hinaus hat die Konstruktion dieses Rechens auch einen Einfluss auf den Lichteinfall im Durchlassbauwerk. Aus ökologischer Sicht sollte die Spaltweite des Rechens so groß wie möglich gewählt werden.

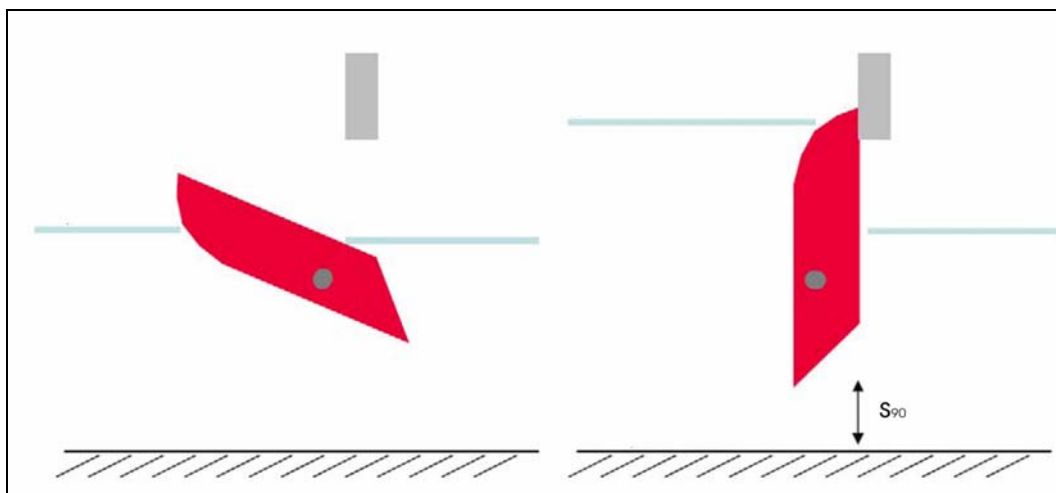
Aus hydraulischer und betrieblicher Sicht erscheint ein Stababstand von 25 cm als ausreichend. In der Praxis hat sich jedoch gezeigt, dass meist aus Gründen des Versicherungsschutzes ein Stababstand von kleiner 12 cm gewählt wird; Dies entspricht den nach DIN und den Unfallverhütungsvorschriften geforderten Stababständen bei Geländern.

In den wasserbaulichen Versuchen zur Betriebssicherheit (vgl. Kapitel 4.8) konnte nachgewiesen werden, dass das Funktionsprinzip der Schwingklappe und deren Mechanik unanfällig gegenüber Geschwemmseltrieb ist. Durch das vierstufige Rechenkonzept wird die Geschwemmselbelastung der Schwingklappe weitestgehend verhindert.

### 7.3 Durchlassbereich

Als Durchlassbereich wird die nähere Umgebung der Öffnung in der Stauwand bezeichnet. Hier findet die Abflussregulierung mittels der Schwingklappe statt. In Kapitel 4.4.1 wird auf die Abflussleistung in Abhängigkeit der Ober- und Unterwasserstände eingegangen. Wichtige Voraussetzung hierfür ist, dass es über den Aufschwimmvorgang zu keiner Änderung der Spaltweite  $s_{90^\circ}$  kommt (vgl. Abbildung 7.11). In Hinblick auf die Hydraulik muss daher die Sohle im Bereich der Schwingklappe fixiert werden.

Die Versuche zum Geschiebetrieb haben indes gezeigt, dass das Funktionsprinzip der Schwingklappe unempfindlich gegenüber Sohlumlagerungen ist.



**Abbildung 7.11:** schematische Seitenansicht der Schwingklappe am Anfang des Aufschwimmvorganges (links) und in der Endposition (rechts).

Die hydraulische Forderung nach einer fixierten Sohle im Durchlassbereich steht im Widerspruch zur ökologischen Forderung nach einer durchgehenden natürlichen Sohlauflage mit einer Mächtigkeit von mindestens 20 cm. Im Folgenden werden Konzepte für eine Lösung dieser konkurrierenden Anforderungen dargestellt.

**Konzept „Opferschicht“:**

Die Sohle im Durchlassbereich wird entsprechend den hydraulischen Anforderungen betoniert ausgeführt. Die Höhenlage ist so gewählt, dass die für die Leistungsfähigkeit nötige Spaltweite  $s_{90^\circ}$  eingestellt ist. Auf diese Sohle wird nun natürliches Sohlmaterial aufgebracht. Die Korngröße ist so zu wählen, dass es im Einstaufall lokal zu einem Austrag des Sohlmaterials kommt und die darunter liegende Betonsohle ihre hydraulische Funktion übernimmt. Nach einem Hochwasserereignis muss im Zuge der Unterhaltung die natürliche Sohlauflage wieder eingebracht und von den Mikroorganismen wieder besiedelt werden.

Die Eignung und die Realisierbarkeit dieses Konzeptes wurde im Rahmen der Versuchsreihe zur ökologischen Durchgängigkeit nachgewiesen (vgl. Kapitel 5.4.3).

**Konzept „Sohltunnel“:**

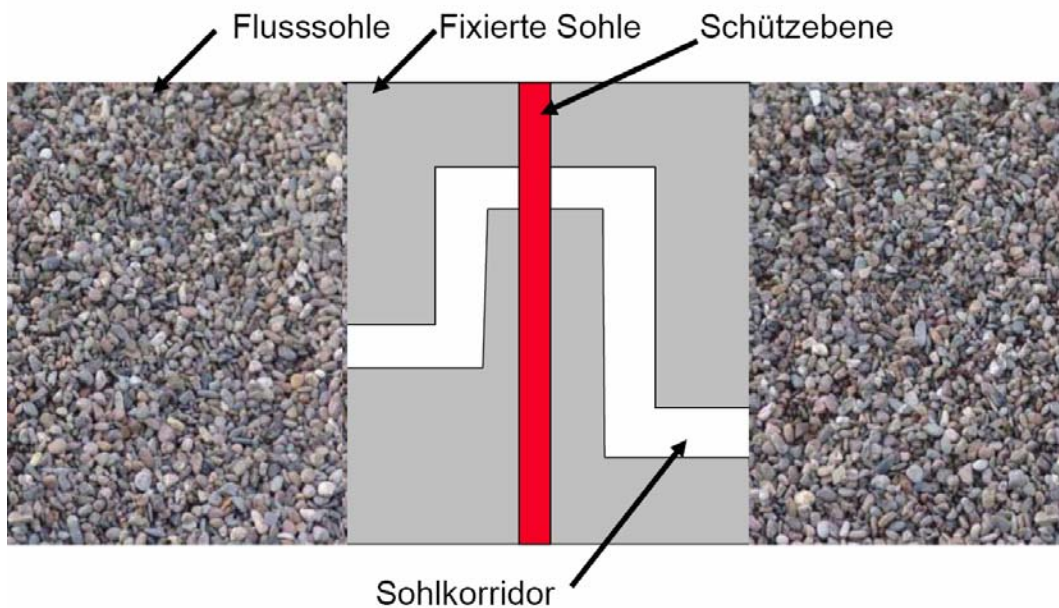
Die Sohle im Bereich der Schwingklappe wird bei diesem Konzept fixiert ausgeführt. Unter der Sohle werden Rohre verlegt, die an die ober- und unterwasserseitige Sohle anschließen. Die Rohre werden mit natürlichem Sohlmaterial gefüllt, so dass ein durchgehendes natürliches Lückensystem durch den Durchlassbereich entsteht.

Aus hydraulischer Sicht ist eine regelmäßige Räumung der fixierten Sohle nicht notwendig, so dass es auch hier zu Anlandungen und zu einer durchgehenden Sohlauflage, jedoch mit einer geringen Mächtigkeit kommen kann.

**Konzept „Geschiebekorridor“:**

Das Konzept Geschiebekorridor entspricht weitestgehend dem Sohltunnel. Das verbindende Element besteht jedoch aus einer mindestens 20 cm tiefen rechteckigen Rinne in der fixierten Sohle. In dieser befindet sich natürliches Sohlmaterial, das die Verbindung zwischen der ober- und unterwasserseitigen Sohle herstellt (vgl. Abbildung 7.12).

Der Korridor ist nicht geradlinig ausgebildet, damit es im Hochwasserfall bei den dann hohen Fließgeschwindigkeiten nicht zu einer Ausräumung des Sohlmaterials kommt. Denkbar wäre eine Anordnung von mehreren  $90^\circ$  Bögen. Der Einfluss des Korridors auf die Hydraulik der Schwingklappe kann als vernachlässigbar angenommen werden.



**Abbildung 7.12:** Draufsicht auf den Geschiebekorridor

#### **Konzept „Seitliche Sohlstreifen“:**

Eine weitere Möglichkeit zur Erhaltung von biologisch intaktem Sohlmaterial im Durchlassbereich auch im Einstaufall ist in Abbildung 7.13 dargestellt. In Verlängerung der Öffnung in der Stauwand werden Zwischenwände installiert, die unter der Sohloberfläche Verbindungsöffnungen zum Sohlmaterial im Durchlassbereich haben. Die Sohle in diesen Kammern ist weitestgehend vom Strömungsangriff geschützt und wird daher bei Hochwasser nicht erodiert. Ausgehend von diesen intakten Sohlbereichen kann die Wiederbesiedlung erfolgen.



**Abbildung 7.13:** Blick von Unterstrom auf die seitliche Sohlstreifen

## 7.4 Auslaufbereich

Die Konzeption des Auslaufbereiches kann analog zu den Überlegungen zum Einlaufbereich erfolgen, die ökologischen Anforderungen an diesen Bereich sind identisch. Die hydraulische Funktion unterscheidet sich jedoch.

Bei Einstau des Hochwasserrückhaltebeckens treten unterstrom des Regulierorganes hohe Fließgeschwindigkeiten auf. Um die Erosionsgefahr für die unterliegende Gewässerstrecke zu minimieren sollte im Auslaufbereich ein Großteil der kinetischen Energie umgewandelt werden. Eine Ausführung als klassisches Tosbecken mit Eintiefung scheidet wegen einer möglichen Verschlammung der Gewässersohle bei Niedrigwasser aus.

Ein großer Öffnungswinkel der Flügelwände wirkt sich im Auslaufbereich auch positiv auf die Hydraulik aus. In Folge der Querschnittsaufweitung können sich große Wirbelzonen bilden und zu einer gezielten Energieumwandlung beitragen. In Kapitel 4.9) wurden Versuche mit Störkörpern zur Erhaltung von Geschiebeinseln im Tosbereich durchgeführt. Als Ergebnis konnte herausgearbeitet werden, dass mit diesen Einbauten in einem Tosbecken mit parallelen, eng stehenden Flügelmauern kein Sohlmaterial flächig vor Erosion geschützt werden kann. Durch eine sprungartige Aufweitung kurz unterstrom der Schützebene können jedoch Totzonen erzwungen werden, in denen es auch beim Einstau des Beckens nicht zum großflächigen Austrag von Sohlmaterial kommt. Ausgehend von diesen Zonen können dann die Kleinstlebewesen nach einem Hochwasserereignis diesen Fließabschnitt wieder besiedeln.

## 7.5 Hochwasserentlastung

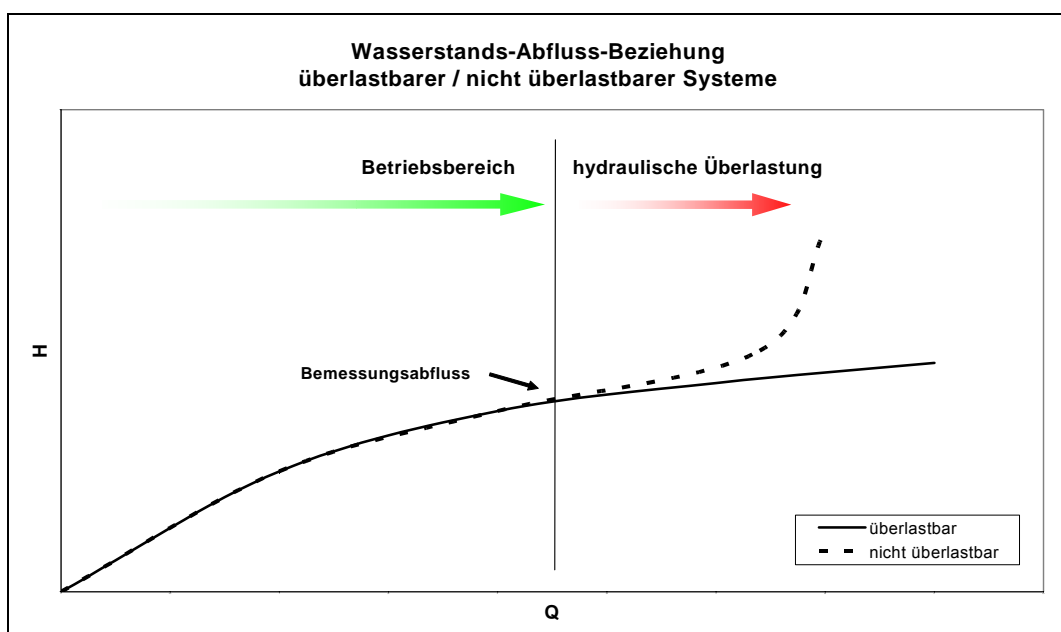
Das Regulierorgan eines Hochwasserrückhaltebeckens ist so dimensioniert, dass bei Beckenvollstau die so genannte Regelabgabe  $Q_R$  an die unterwasserseitige Gewässerstrecke abgegeben wird. Ist der Zufluss in den Retentionsraum größer als die Regelabgabe, so wird ein Teil des Abflusses zurückgehalten, der Retentionsraum füllt sich.

Da das Retentionsvolumen begrenzt ist, muss eine technische Einrichtung dafür sorgen, dass bei vollständig gefülltem Becken und anhaltenden Abflüssen größer als die Regelabgabe ein Überlaufen der Dämme verhindert wird oder kontrolliert ablaufen kann. Es muss sichergestellt werden, dass die Standsicherheit der Dämme und technischen Anlagen erhalten bleibt.

In der Ingenieurpraxis stehen eine Vielzahl von Bauweisen für eine Hochwasserentlastungsanlage zur Verfügung, die man nach ihrer räumlichen Anordnung wie folgt gruppieren kann.

- Hochwasserentlastungsanlagen im Durchlassbauwerk, z.B. Fischbauchklappe, Schütz, Überfälle.
- Hochwasserentlastungsanlage getrennt vom Durchlassbauwerk, z.B. seitliche Entlastung, Dammscharte, überströmbarer Damm.

Aus hydraulischer Sicht und mit Blick auf die Betriebssicherheit sollte für die Hochwasserentlastungsanlage ein hydraulisch überlastbares System, wie z.B. eine Dammscharte gewählt werden. Eine hydraulische Überlastung führt zu einem höheren spezifischen Abfluss (Abfluss pro Breitereinheit) und höheren Überströmhöhen, die Betriebssicherheit der Anlage ist jedoch nicht gefährdet. Bei Rohrdurchlässen und Entlastungsstollen besteht hingegen die Gefahr, dass es bei einer Überlastung zum Zuschlagen des Rohres und zu einer deutlichen Abflussabnahme kommen kann (vgl. Abbildung 7.14).



**Abbildung 7.14:** hydraulisches Verhalten überlastbarer / nicht überlastbarer Systeme

Aus ökologischen Gesichtspunkten heraus wird für die Schwingklappe eine vom Durchlassbauwerk getrennte Hochwasserentlastungsanlage vorgeschlagen. Die im Falle einer Entlastung auftretenden hohen Abflüsse werden nicht im Durchlassbereich abgeführt und der Strömungsangriff auf die Sohle und die Uferböschungen kann reduziert werden. Hierdurch kann das Ausspülen von Sohlmaterial verringert und dieser Lebensraum für Makrozoobenthos und andere Kleinstlebewesen erhalten werden.

Die Anordnung der Hochwasserentlastungsanlage außerhalb des Durchlassbauwerkes wirkt sich neben den ökologischen Vorteilen auch positiv auf die Betriebssicherheit der Schwingklappe aus. Bei großen spezifische Abflüssen treten ausgeprägte Druck- und Geschwindigkeitsschwankungen auf. Im Rahmen der hydraulischen Untersuchungen am physikalischen Modell wurde der Einfluss derartiger Strömungszustände auf die Betriebssicherheit und die Regulierwirkung der Schwingklappe untersucht und messtechnisch dokumentiert. Im gesamten Untersuchungsspektrum zeigten sich keinerlei Probleme bezüglich einer Erregung des Klappenkörpers und einer daraus resultierenden resonanten Bewegung. In Hinblick auf die Sicherheit kann dennoch festgehalten werden, dass sich eine Vermeidung großer spezifischer Abflüsse im Nahbereich des Klappenkörpers positiv auf die Betriebssicherheit auswirkt.

Der Einfluss eines ökologisch angepassten Schwingklappen-Durchlassbauwerkes auf das Landschaftsbild sollte möglichst minimal sein. Im Rahmen des von BWPLUS geförderten Forschungsvorhabens „Überströmbare Dämme – landschaftsverträgliche Ausführungsvarianten für den dezentralen Hochwasserschutz in Baden-Württemberg“ (Zuwendungs-Nr. BWC 20005 und BWT 22004)“ wurde eine begrünbare Bauweise mit einer Asphalt-Mastix als hydraulisches Sicherungselement entwickelt und in die Praxis transferiert. Auf Grund der kompletten Überströmbbarkeit des Dammes kann auf den nach DIN 19700 geforderte Freibord verzichtet werden, was sich vor allem bei kleinen Dammhöhen positiv auf die Mächtigkeit des Dammbauwerkes auswirkt. Diese Bauweise mit Asphalt-Mastix lässt sich gut mit einem Durchlassbauwerk mit einer Schwingklappe als Regulierorgan kombinieren.

## 7.6 Sonstiges

Im Rahmen des regelmäßigen Austauschs mit der landesweiten Arbeitsgruppe Durchgängigkeit von HRB (koordiniert durch die Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg - LUBW) kam die Forderung nach einer Anpassbarkeit der Spaltweite auf. Sollten sich durch veränderte klimatische Bedingungen oder betriebliche Änderungen (z.B. zusätzliches Becken,



Gewässerausbau) veränderte Anforderungen an das Durchlassbauwerk ergeben, so sollte der bauliche Aufwand für die Anpassung minimiert werden.

Bei der Schwingklappe kann dies konstruktiv über einen auf einer Spindel geführten Lagerblock realisiert werden. Die Spaltweite kann dann über die Höhenlage der Achse variiert werden. Dieser Verstellmechanismus ist im Versuchsstand der Schwingklappe integriert und hat sich im Rahmen der Modellversuche bewährt.

Eine zweite Anregung aus der Praxis stellt die Möglichkeit eines manuellen Eingreifens in die Schwingklappen-Steuerung dar. Die Betreiber von HRB wollen vor Ort während eines Hochwasserereignisses in den Aufschwimmvorgang und damit in die Abflussregelung eingreifen können. Konstruktiv könnte dies mittels eines Kettenzuges oder einer Spindel realisiert werden.

## 8 Forschungstransfer

In den vergangenen Jahrzehnten wurden auf Grund des Siedlungsdruckes auch im Bereich der kleinen Nebengewässer ehemalige Überflutungsflächen in Bauland umgewandelt, was mit einem Verlust von Retentionsraum einhergeht. Der technische Ausbau der Gewässer zu leistungsfähigen, begradigten Rinnen verstärkt diesen Effekt weiter. Die statistische Häufung von Hochwasserereignissen in den letzten Jahren und der prognostizierte Klimawandel zeigt hier weiteren Handlungsbedarf auf. Ein ökologisch und ökonomisch nachhaltiges Hochwasserschutzkonzept ist dabei anzustreben.

In Baden-Württemberg wird im Rahmen des technischen Hochwasserschutzes unter anderem ein dezentrales Hochwasserschutzkonzept verfolgt, das eine Vielzahl von Hochwasserrückhaltebecken in den Nebengewässern vorsieht. Derzeit werden in Baden-Württemberg 663 Becken für den Hochwasserschutz genutzt, weitere sind in der Planung bzw. im Bau. Allein im Einzugsgebiet Elsenz-Schwarzbach wurden seit 1997 über 35 neue Hochwasserrückhaltebecken realisiert.

Ein Hauptziel der beiden Forschungsvorhaben „Die Schwingklappe – Ökohydraulisches Durchlassbauwerk für regulierbare Hochwasserrückhalteräume – Planung, Bauweise, Betrieb“ (Zuwendungs-Nr. BWR 24020) sowie „Kriterien für Gestaltung, Betrieb sowie Unterhaltung von Stau- und Retentionsanlagen zur Gewährleistung der ökologischen Durchgängigkeit“ (Zuwendungs-Nr. BWR 24005) war daher der Transfer der Forschungsergebnisse in die Praxis.

### 8.1 Landesweite Arbeitsgruppe / Leitfaden

Während der Projektlaufzeit wurden die BWPLUS Forschungsvorhaben von der landesweiten Arbeitsgruppe „Ökologische Durchgängigkeit von Hochwasserrückhaltebecken“ unter der Federführung der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) begleitet. Bei den halbjährlichen Treffen wurde der jeweilige Projektstand erläutert und die weiteren Schwerpunkte, auch aus Sicht der Landesverwaltung, definiert. Die Ergebnisse der Forschungsvorhaben konnten durch diesen intensiven Austausch in die Leitfadenreihe Durchgängigkeit für Tiere in Fließgewässern, Teil 3 – Hochwasserrückhaltebecken und Talsperren mit einfließen [LFU2006].

## **8.2 Fachtagung Ökologische Durchgängigkeit**

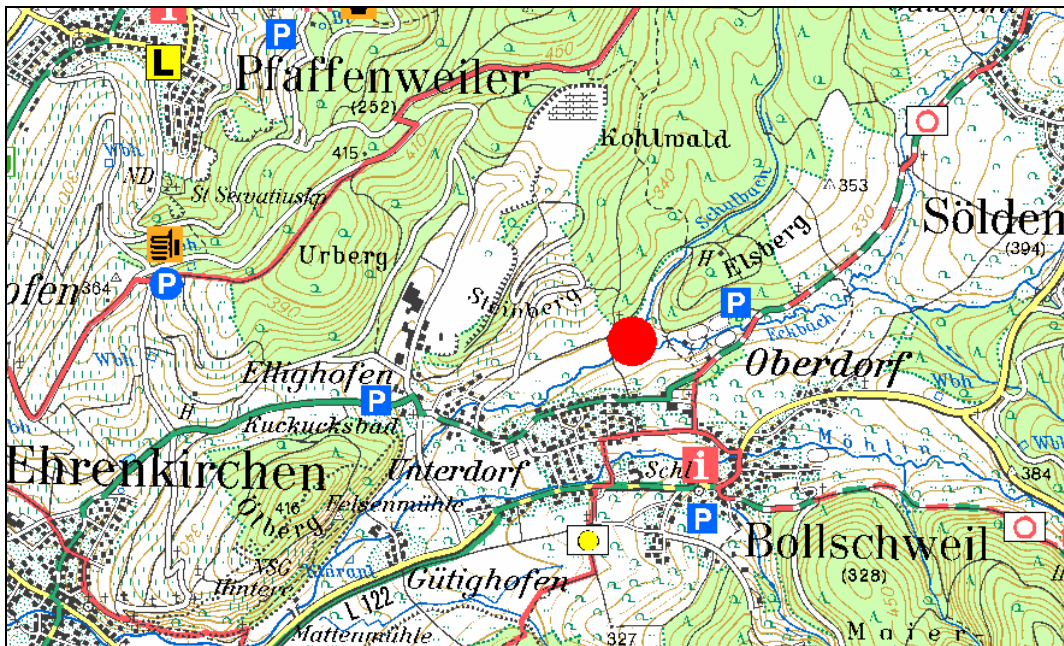
In Zusammenarbeit mit dem Forschungsvorhaben der Universität Stuttgart und der Universität Freiburg (BWPLUS Verbundprojekt, BWR 24005) wurde am 23. Feb. 2006 in Freiburg eine Tagung zum Thema Ökologische Durchgängigkeit von Hochwasserrückhaltebecken abgehalten. Mit über 100 Teilnehmern aus der Fachverwaltung, der Wissenschaft, von Ingenieurbüros und von Betreibern von HRB stellte die Tagung ein hervorragendes Forum für den Fachaustausch zwischen Wissenschaft und Praxis dar. Die Beiträge der Tagung wurden in der Schriftenreihe Culterra des Instituts für Landespflege der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg in Heft 50, Durchgängigkeit von Hochwasserrückhaltebecken veröffentlicht [IFL].

## **8.3 Pilotanlage Voranalyse**

Zur Sicherstellung des Forschungstransfers sollte in der Projektlaufzeit an der Planung zu einer Pilotanlage mitgearbeitet werden. Ziel war es, in einem frühen Projektstadium ein projektiertes Hochwasserrückhaltebecken auszuwählen und parallel zu den Planungen den Einsatz der Schwingklappe vorzubereiten. Die geometrischen, hydrologischen und hydraulischen Daten sollten direkt in das Untersuchungsprogramm mit einfließen.

### **8.3.1 HRB Bollschweil am Eckbach**

In der Gemeinde Bollschweil im Landkreis Breisgau-Hochschwarzwald ist zur Verbesserung des örtlichen Hochwasserschutzes der Bau eines HRB am Eckbach geplant. Die Kenngrößen des projektierten Beckens eigneten sich für den Einsatz einer Schwingklappe. Die Situation wurde am 15. Juni 2004 im Rahmen einer Ortsbegehung mit Mitarbeitern der zuständigen Genehmigungsbehörde (GWD Waldshut) begutachtet und die benötigten Planungsunterlagen angefordert. Die hydraulischen Untersuchungen und die ermittelten Abflüsse stammen aus einer Studie vom Ing.-Büro Dr.-Ing. Ludwig, Karlsruhe, aus dem Jahre 1999.



**Abbildung 8.1:** Lage HRB Bollschweil

Technische Daten:

|                     |                               |
|---------------------|-------------------------------|
| $A_E$ :             | 9,0 km <sup>2</sup>           |
| HQ <sub>20</sub> :  | 7,1 m <sup>3</sup> /s         |
| HQ <sub>50</sub> :  | 9,0 m <sup>3</sup> /s         |
| HQ <sub>100</sub> : | 11,0 m <sup>3</sup> /s        |
| Regelabgabe:        | ca. 8,0 m <sup>3</sup>        |
| Stauziel:           | 300,50 m+NN                   |
| Dammhöhe:           | 302,50 m+NN                   |
| Talsole:            | ca. 298,00 m+NN               |
| HW-Enlastung:       | Dammscharte, Kote 300,50 m+NN |

Im Nachgang zu dem Ortstermin zeichnete sich ab, dass eine zeitnahe Ausführungsplanung und dem Bau dieses Beckens nicht möglich sein würde. Von Seiten des Gemeinderates und der Bevölkerung lag nur eine geringe Akzeptanz für ein Hochwasserrückhaltebecken auf eigener Gemarkung vor, so dass das HRB Bollschweil als möglicher Standort für eine Pilotanlage der Schwingklappe aufgegeben werden musste. Das HRB Bollschweil ist - Stand März 2009 - bisher nicht realisiert worden

### 8.3.2 Flutmulde Weisweil West

Als ein weiterer möglicher Standort für eine Pilotanlage wurde die Flutmulde Weisweil-West am Seegraben im Landkreis Waldshut in die Untersuchungen mit einbezogen.



**Abbildung 8.2:** Lage Flutmulde Weisweil-West

Technische Daten:

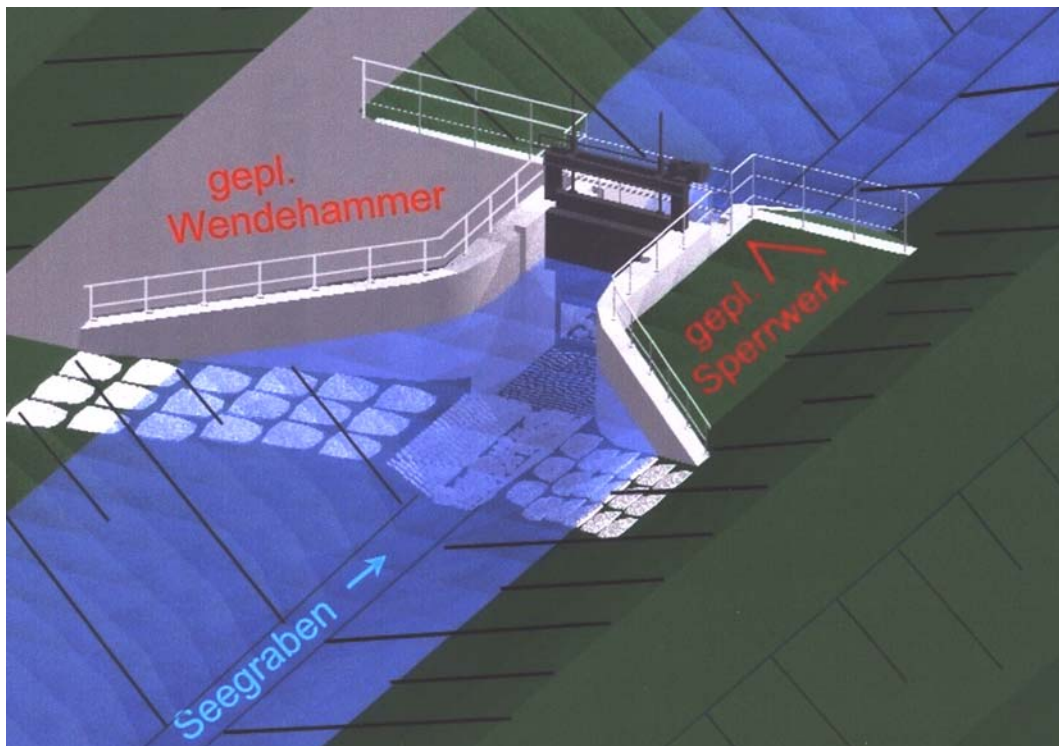
|                     |                        |
|---------------------|------------------------|
| HQ <sub>100</sub> : | 10,6 m <sup>3</sup> /s |
| HQ <sub>Max</sub> : | 12,0 m <sup>3</sup> /s |
| Regelabgabe:        | 4,5 m <sup>3</sup> /s  |
| Volumen:            | 374.000 m <sup>3</sup> |

Durch Hochwasser des Schwarzbachs von 1994 wurde der Ortsteil Grieben der Gemeinde Klettgau überflutet und es entstand hoher Sachschaden. Ausgelöst durch dieses Ereignis erfolgte eine Untersuchung des möglichen Hochwasserschutzes durch Schaffung von Rückhalteräumen am Schwarzbach (Gewässer 1. Ordnung) und seinem Zufluss, dem Seegraben. Das für den Ort Grieben wirksamste Hochwasserrückhaltebecken (HRB Grieben) wurde zwischenzeitlich mit einem Rückhaltevolumen von 130.000 m<sup>3</sup> am Schwarzbach erstellt.

Hiermit ist jedoch nur ein 40-jähriger Hochwasserschutz für Grieben erreicht worden. Für den üblichen Hochwasserschutz für 100 Jahre sind weitere Rückhalteräume zu schaffen. Der angestrebte Hochwasserschutz soll durch die Erstellung des HRB Weisweil West mit einem notwendigen Volumen von 260.000 m<sup>3</sup> verwirklicht werden [LUDWIG].

Für die Schaffung dieses Volumens steht in äußerst günstiger Lage eine Flutmulde in den Gewannen „Unten/Mitten/Oben im Damm“ im Bereich Weisweil West zur Verfügung. Der hier während der letzten Eiszeit durch ein Toteisloch entstandene, natürliche Rückhalteraum kann bis zu seinem Überlaufen ca. 374.000 m<sup>3</sup> fassen. Die flächige Ausdehnung beträgt bei Vollfüllung ca. 23 ha, bei einer Länge von ca. 1.350 m und einer Breite von ca. 170 m.

Die Planungen sahen die Errichtung eines Sperrwerkes mit einer Blende im Seegraben vor, der maximal die Regelabgabe an die Unterlieger weitergibt. Bei größeren Abflüssen wird das Wasser über einer 75 m langen Dammscharte in die Flutmulde geleitet. Die Entleerung erfolgt über ein Entleerungsdurchlass am unterstromigen Ende der Flutmulde.



**Abbildung 8.3:** derzeit geplantes Sperrbauwerk – gesteuertes Schütz

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde alternativ zu der Planung an dem Einbau einer Schwingklappe als Sperrbauwerk für das HRB Weisweil-West gearbeitet. Die örtlichen Gegebenheiten und Randbedingungen wurden als Eingangsgröße für die Modellversuche herangezogen. Bei einem Ortstermin wurde die Situation begutachtet und die vorhandenen Planungsdaten wurden übergeben.

Für die Dimensionierung der Schwingklappe ist die Wasserstands-Abfluss-Beziehung des unterstromigen Gewässers eine entscheidende Kenngröße. Für den Standort Weisweil-West lagen diese Daten nicht vor, so dass ein 1D hydronumerisches Modell des Seegrabens zur Schließung der Datenlücken aufgesetzt wurde. Die Modellierung und die Berechnungen erfolgten in der Programmumgebung HEC-RAS.

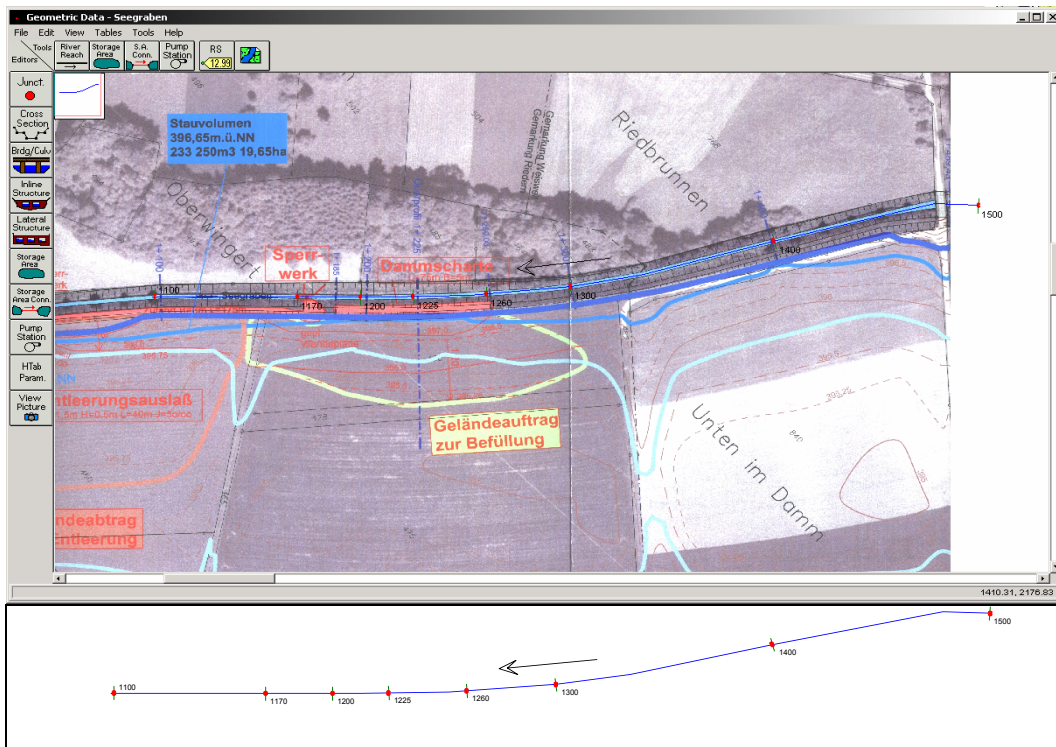


Abbildung 8.4: Modellbereich Seegraben, Station 1+100 bis 1+500

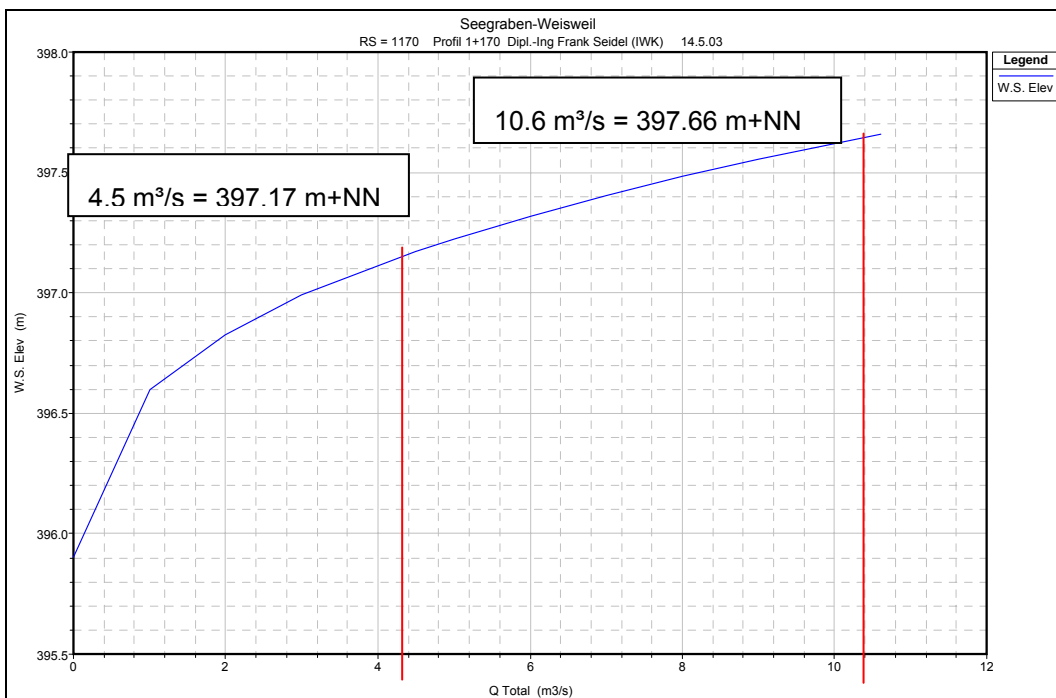


Abbildung 8.5: gerechnete Abflusskurve Station 1+170, Position Sperrbauwerk

Von den zuständigen Behörden wurde für diesen Standort nach Abschluss des Genehmigungsverfahrens im Frühjahr 2006 der Baubescheid erteilt. Der Zeitplan für die Ausführungsplanung sowie der Baubeginn standen im zeitlichen Widerspruch zum Ablauf des Forschungsvorhabens, so dass dieser Standort aufgegeben werden musste.

Das Becken wurde entsprechend den Planungen mit einem festen Verschluss ausgeführt und ist seit 2007 im Betrieb.

### 8.3.3 HRB Aglasterhausen – Rittersbach (A26)

Bei dieser Hochwasserschutzanlage handelt es sich um ein überörtliches Hochwasserrückhaltebecken im Einzugsgebiet Elsenz/Schwarzbach, das für einen 100-jährlichen Hochwasserschutz ausgelegt ist. Mit dem Speichereinhalt von 46.000 m<sup>3</sup> wird der Abfluss bei einem Starkregen auf dem Einzugsgebiet von 3,30 km<sup>2</sup> von bisher 2,80 m<sup>3</sup>/s auf 0,97 m<sup>3</sup>/s gedrosselt. Bei dem bereits gebauten Durchlassbauwerk handelt es sich um ein offenes, ungesteuertes Bauwerk. Die Hochwasserentlastung erfolgt über eine Dammscharte als lose Steinschüttung. Die luft- und wasserseitige Böschung ist mit 1:8 bzw. 1:5 ausgeführt. Die Dammkronenlänge beträgt ca. 180 m. Das Hochwasserrückhaltebecken ist seit Frühjahr 2005 fertig gestellt.



Abbildung 8.6: Lage HRB Aglasterhausen / Rittersbach



Auf Grund der hydrologischen und hydraulischen Parameter hätte sich das HRB Rittersbach sehr gut für den Einsatz einer Schwingklappe geeignet.

Das Hochwasserrückhaltebecken hat folgende Kenngrößen:

Technische Daten:

|                       |                        |
|-----------------------|------------------------|
| Volumen:              | 46000 m <sup>3</sup>   |
| Dammlänge:            | 180 m                  |
| mittlere Höhe:        | 5,0 m                  |
| Neigung wasserseitig: | 1:5                    |
| Neigung luftseitig:   | 1:5/1:8                |
| HQ ist:               | 2,80 m <sup>3</sup> /s |
| HQ Plan:              | 0,97 m <sup>3</sup> /s |

Für das HRB standen umfangreiche Daten zur Hydrologie zur Verfügung, so dass im Rahmen dieses Forschungsvorhabens virtuell eine Schwingklappe eingebaut und der Einfluss auf das Abflussgeschehen und die Beckenfüllung im Vergleich zu der verbauten Blende untersucht werden konnte. Die Ausführungen zur numerischen Simulation finden sich in Kapitel 4.7.



**Abbildung 8.7:** HRB Rittersbach [ZVHWS]

### 8.3.4 HRB Forellenbach II

Im Herbst 2006 begann die Suche nach einer neuen potentiellen Pilotanlage. Im Bereich des Zweckverbandes Hochwasserschutz Einzugsgebiet Elsenz-Schwarzbach, zu dem eine enge Kooperation aufgebaut werden konnte, stehen in den nächsten Jahren noch eine größere Anzahl von Beckenneubauten an. Das HRB A 54 „Forellenbach II“ in Reichartshausen (Rhein-Neckar-Kreis), das in der Planung als ungesteuertes Becken ausgewiesen ist, wurde als möglicher Standort für eine Pilotanlage weitergehend untersucht.

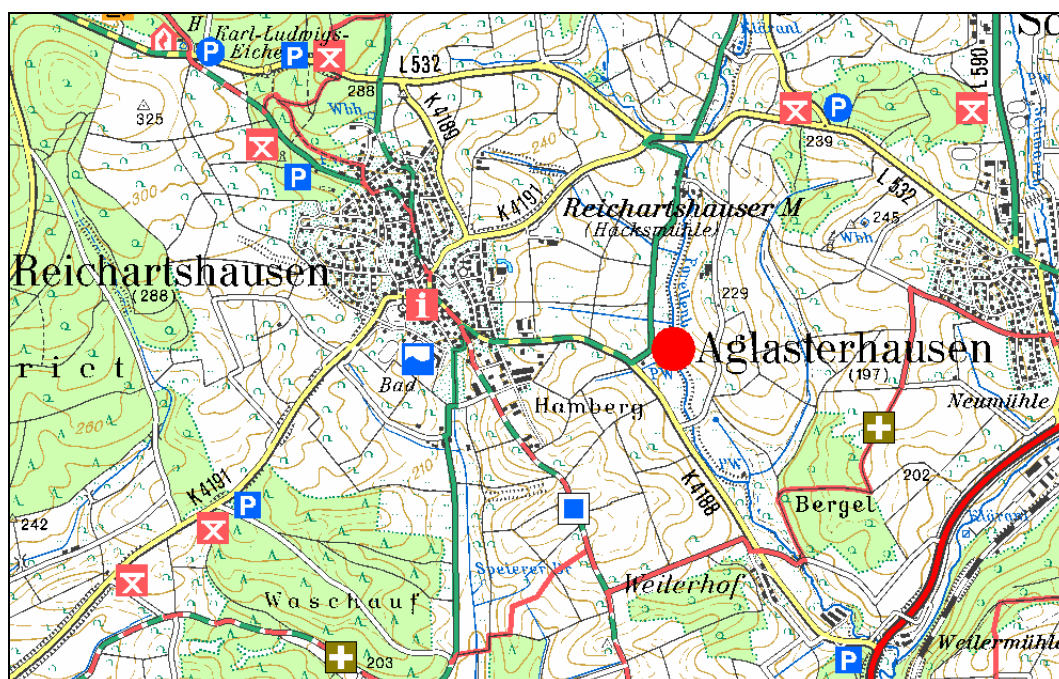


Abbildung 8.8: Lage HRB Forellenbach II

Technische Daten:

|                     |                         |
|---------------------|-------------------------|
| $A_E$ :             | 9,09 km <sup>2</sup>    |
| HQ <sub>20</sub> :  | 7,79 m <sup>3</sup> /s  |
| HQ <sub>50</sub> :  | 8,89 m <sup>3</sup> /s  |
| HQ <sub>100</sub> : | 11,66 m <sup>3</sup> /s |
| Q <sub>R</sub> :    | 4,97 m <sup>3</sup> /s  |
| Volumen:            | 30.000 m <sup>3</sup>   |
| Stauziel:           | 202,50 m+NN             |
| Dammhöhe:           | 2,5 m                   |
| HW-Entlastung:      | überströmbarer Damm     |

Im Frühjahr 2007 wurden detaillierte Daten zu den hydrologischen und hydraulischen Kennzahlen übergeben, so dass diese in die Modelluntersuchungen mit einfließen konnten.

Der Zeitplan für die Planung und Errichtung des HRB Forellenbach II hat sich während der Projektlaufzeit mehrmals verschoben. Zudem wurde das Flussgebietsmodell für das Einzugsgebiet Elsenz-Schwarzbach überarbeitet. Hieraus ergaben sich geänderte Anforderungen an das HRB Forellenbach II, so dass die hydraulischen und geometrischen Kenngrößen angepasst werden müssen. Nach Auskunft des Betreibers ist der weitere Zeitplan für die Umsetzung des Beckens derzeit offen (Stand März 2009).

#### 8.4 Pilotanlage: Fischaufstiegsanlage Obermühle / Pfinz

In Zusammenarbeit mit dem Tiefbauamt der Stadt Karlsruhe konnte das Konzept der Schwingklappe an der Pfinz in Durlach erstmals in die Praxis transferiert werden. Die Schwingklappe kommt hierbei nicht im Hochwasserschutz zum Einsatz sondern regelt den Abfluss in eine Fischaufstiegsanlage (FAA). Hierdurch kann der Einfluss von oberwasserseitigen Wasserstandsschwankungen auf den Abfluss in der Fischaufstiegsanlage minimiert und die ökologische Durchgängigkeit an diesem Standort verbessert werden.

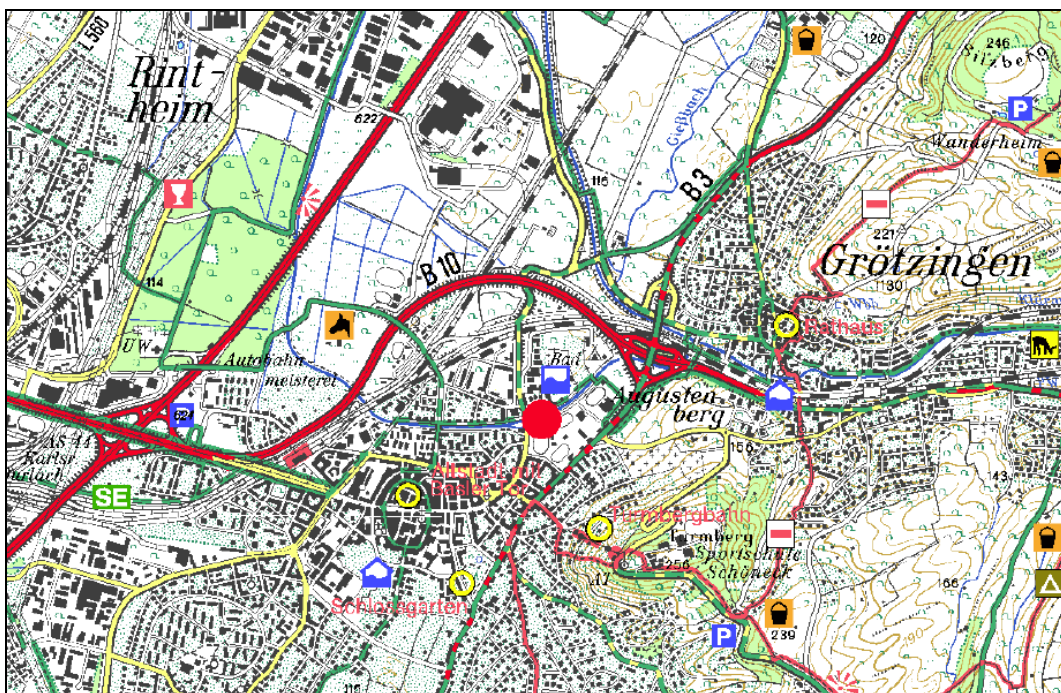


Abbildung 8.9: Lage FAA Obermühle

Die Pfinz ist auf Höhe des Turmberg-Freibades aufgestaut und wird in der Obermühle mit einem Wasserrad energetisch genutzt. Zur Gewährleistung der Längsdurchgängigkeit ist am rechten Ufer eine FAA in Raugerinnebauweise integriert. Der Abfluss in die FAA wird über ein fest eingestelltes, unterströmtes Schütz gesteuert und soll laut Wasserrecht mindestens 200 l/s betragen.



**Abbildung 8.10:** Übersicht Projektgebiet. Quelle: Google Maps 2008.

Etwa 1 km Oberstrom der FAA befindet sich ein Dachwehr, bei dem Wasser aus der Pfinz in den Pfinz-Entlastungskanal abgeschlagen wird. Das Abflussspektrum der Pfinz im Bereich der FAA ist somit eingeschränkt: Im Hochwasserfall wird dieser Abschnitt mit maximal 5,5 m<sup>3</sup>/s beaufschlagt. Gemäß der Angabe des Tiefbauamtes werden derzeit im HW-Fall bis zu 2,7 m<sup>3</sup>/s über die FAA abgeleitet.

Die Betriebserfahrungen der letzten Jahre haben gezeigt, dass die Abflusssteuerung der heutigen Fischaufstiegsanlage den ökologischen Anforderungen nicht ausreichend Rechnung trägt. Bei Niedrigwasser wird der wasserrechtlich festgelegte minimale Abfluss von 200 l/s teilweise deutlich und längerfristig unterschritten und bei Mittelwasser übersteigt der Abfluss teilweise den Bemessungsabfluss der FAA derart, dass deren ökologische Funktionalität eingeschränkt ist.

Für die Örtlichkeit wurde ein hydraulisches Konzept erarbeitet, was unabhängig vom Betrieb des Wasserrades eine einwandfreie Funktion der FAA ermöglicht. Das erarbeitete hydraulische Konzept sollte folgende Kriterien erfüllen und darüber hinaus ohne aufwändige Steuer- und Regelungstechnik auskommen:

- Gewährleistung eines minimalen Abflusses von  $Q_{\text{FAA,min}} = 200 \text{ l/s}$  bei NW;
- Regelung des Abflusses zur FAA auf ca. 250 bis 400 l/s bei Wasserständen zwischen 117,96 m+NN und 118,55 m+NN im Oberwasser (MW);
- Zur Gewährleistung der Hochwassersicherheit sollen temporär bis zu 3,0 m<sup>3</sup>/s Abfluss über die FAA bei einem Wasserstand im Oberwasser von 118,55 m+NN (HW) abgeleitet werden können.

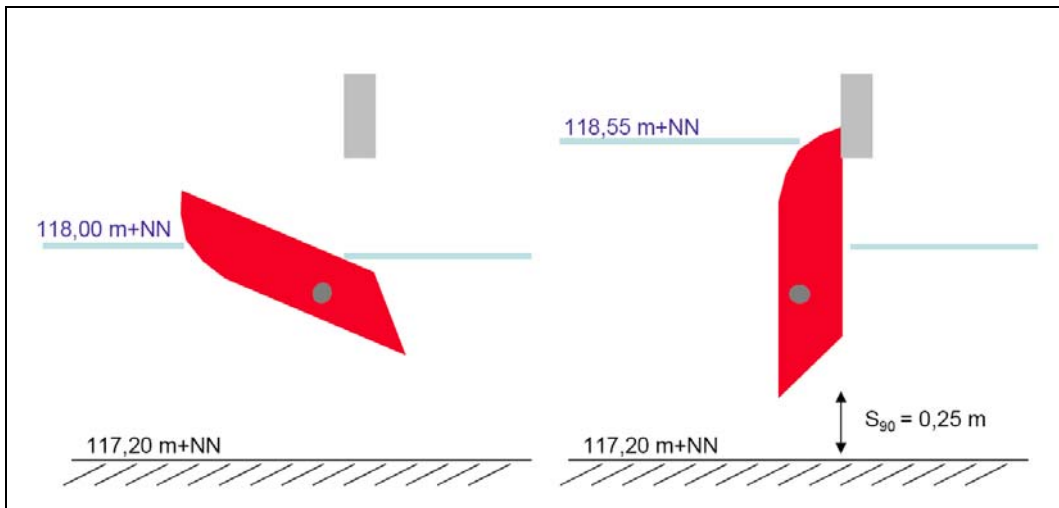
Im Rahmen der Studie wurden drei wasserbauliche Elemente dimensioniert. Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich dabei lediglich auf das Element der Schwingklappe zur Mittelwasserregelung.

#### 8.4.1 Bemessung / Planung

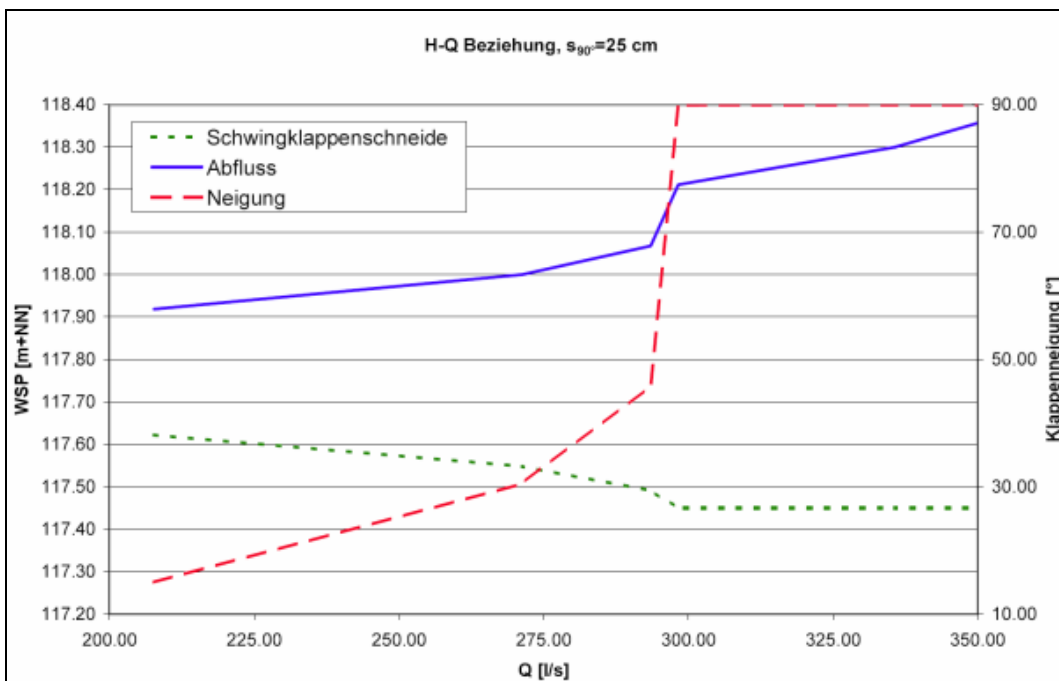
Bei der durchgeführten Dimensionierung der Schwingklappe ergaben sich folgende Klappenkennwerte zur Regulierung des Durchflusses beim Einlauf der FAA:

- Klappenkörper: 0,85 x 0,96 x 0,25 m (B x H x L)
- Gewicht: 50 kg
- Achsenlage: 117,78 m+NN (0,58 m über Sohle)
- Sohlhöhe: 117,20 m+NN
- Spaltweite bei 90°: 0,25 m

In Abbildung 8.11 ist die Einbaulage der Klappe schematisch dargestellt. Die hydraulischen Kenngrößen zur Funktion der Schwingklappe sind in Abbildung 8.12 dargestellt. Die erarbeitete Dimension des Klappenkörpers entspricht in etwa der Größe der Klappe im Modellversuch, so dass die Bemessung im Rahmen einer Versuchsreihe im Theodor-Rehbock-Wasserbaulaboratorium überprüft werden konnte. Dabei zeigte sich eine gute Übereinstimmung des berechneten Abflussverhaltens mit den Messwerten.



**Abbildung 8.11:** Einbaulage der Schwingklappe (schematisch).



**Abbildung 8.12:** Kennwerte der Schwingklappe an der Pfinz zur MW-Regelung

Systembedingt ist bei der Schwingklappe zur Erzeugung der Auftriebskräfte ein leichter Aufstau unterstrom des Klappenkörpers notwendig. Die Wasserstands-Abfluss-Beziehung im Einlaufbereich der FAA wurde anhand der zur Verfügung gestellten Daten ermittelt. Der erste Steinriegel kontrolliert dabei den Wasserstand. Die Auswertung der Daten hat ergeben, dass die heutige Wasserstands-Abfluss-Beziehung die Anforderungen der Schwingklappe weitestgehend erfüllt. Im Probetrieb könnten gegebenenfalls bautechnisch einfach realisierbare Anpassungen vorgenommen werden (z.B. zusätzliche Störsteine).

### 8.4.2 Bau

Die Planungsphase zur Abflussregelung der FAA Obermühle an der Pfinz mit einer Schwingklappe war im April 2008 abgeschlossen. Die Pilotanlage der Schwingklappe ist in ein Gesamtprojekt, bestehend aus einer Entschlammung und Renaturierung der Pfinz auf einer Länge von ca. 1,0 km sowie einer Verbesserung des Hochwasserschutzes eingebunden.

Das hydraulische Konzept der Gesamtanlage wurde vom Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) der Universität Karlsruhe erarbeitet. Die Baumaßnahme sowie die Ausschreibung der einzelnen Bauabschnitte wurde vom Tiefbauamt der Stadt Karlsruhe koordiniert. Die Begleitarbeiten am Gewässer wurden im Zeitraum zwischen September 2008 und Dezember 2008 umgesetzt.

In enger Zusammenarbeit zwischen dem IWG und dem Tiefbauamt der Stadt Karlsruhe wurde die konstruktive Umsetzung der Pilotanlage realisiert. Der Klappenkörper sowie die komplette neue Schützenanlage wird vom Tiefbauamt in der betriebseigenen Schlosserei gefertigt. Mit den Schweißarbeiten wurde im Februar 2009 begonnen. Ende April wird die neue Schütztafel mit integrierter Schwingklappe fertig gestellt sein und anschließend in den Einlaufbereich der FAA Obermühle integriert. Die Fertigstellung der Gesamtmaßnahme und die Inbetriebnahme der Schwingklappe ist für Ende Mai anvisiert. Anlage 1 gibt einen Überblick des Projektes in Form einer Fotodokumentation der Maßnahmen mit Stand März 2009.

Von Seiten des Projektträgers wurde eine weitere Verlängerung der Abgabefrist für den Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben, mit dem Ziel, die bautechnische Umsetzung der Schwingklappe sowie die ersten Betriebserfahrungen mit in den Bericht auf zu nehmen, nicht zugestimmt. Von Seiten des IWG besteht jedoch weiterhin großes Interesse an diesen Ergebnissen, da diese den praxisrelevanten Teil des Forschungsvorhabens darstellen.

Derzeit ist geplant, nach Inbetriebnahme der Schwingklappe ein Monitoring in Eigenleistung durchzuführen. Der Sachbearbeiter dieses Forschungsprojektes vom Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Herr Dipl.-Ing. Frank Seidel, strebt Ende 2009 eine Promotion zum Thema ökologische Durchgängigkeit von Hochwasserrückhaltebecken mit einem Schwerpunkt auf selbstgeregelt Durchlassbauwerke an. Die Ergebnisse des Monitoring werden hier mit einfließen und folglich auch entsprechend publiziert und den interessierten Fachpublikum zur Verfügung gestellt werden.

Im Rahmen des Monitoring soll auch eine Überprüfung und Verifizierung des Bemessungsansatzes in Hinblick auf die Umsetzbarkeit des Konzeptes der Schwingklappe für den planenden Ingenieur erfolgen.

### 8.5 Bauweisenkatalog

Von Mitarbeitern des Instituts für Landespflege der Universität Freiburg wurde im Rahmen des BWPLUS Projektes BWR 24005 eine ökologische Bewertung von verschiedenen Durchlasstypen anhand von bestehenden Anlagen durchgeführt. Dabei wurden Parameter wie die Bauwerkslänge und die Sohlausbildung hinsichtlich ihres Einflusses auf die Durchwanderbarkeit überprüft. Auch die landesweite Arbeitsgruppe Durchgängigkeit von HRB (koordiniert durch die LUBW) hat eine Vielzahl von Becken begutachtet und bewertet. Die Ergebnisse sind im Leitfaden: „Durchgängigkeit für Tiere in Fließgewässern, Teil 3 – Hochwasserrückhaltebecken und Talsperren“ eingegangen, der im Frühjahr 2007 erschienen ist. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde auch eine Vielzahl von Hochwasserrückhaltebecken mit unterschiedlichen Durchlasstypen besichtigt.

Bei der Bewertung der ökologischen Durchgängigkeit fällt immer wieder auf, das nicht der Grundtyp (offenes oder geschlossenes Bauwerk; mit oder ohne Ökoschieber; mit oder ohne Uferberme) als Hauptursache für die Behinderung der Durchgängigkeit angesehen werden kann. Oft sind Details der Anlage ungünstig ausgeführt und verschlechtern unnötigerweise die Längsdurchgängigkeit. Konstruktive, betriebliche oder finanzielle Gründe für die gewählte Ausführung können nicht erkannt werden. Beispielhaft sei hier auf Abbildung 8.13 verwiesen.



**Abbildung 8.13:** links: hochliegender Steuerschieber ohne Sohlanschluss behindert die Durchwanderbarkeit auf der Berme; rechts: Rechen oberstrom der Anlage ohne durchgängige Uferberme behindert die terrestrische Durchgängigkeit



Aufbauend auf den Bewertungen der Grundtypen von Hochwasserrückhaltebecken durch das Institut für Landespflege wurde daher im Rahmen des Forschungsprojektes ein so genannter Bauweisenkatalog erstellt. Unterschieden nach Einlaufbereich, Durchlass und Auslaufbereich werden in der Praxis angewandte Bauweisen vorgestellt und ökologisch bewertet. Die Bewertung stützt sich dabei auf die Erkenntnisse aus dem Lebensraumkatalog und der Literaturrecherche sowie auf die Ergebnisse der Modellversuche. Untersuchungen an den Bauwerken selbst können in der Projektlaufzeit nicht durchgeführt werden. Die konstruktive Funktion der Bauweise bzw. des Bauteils wird erklärt und Verbesserungsmöglichkeiten werden aufgezeigt.

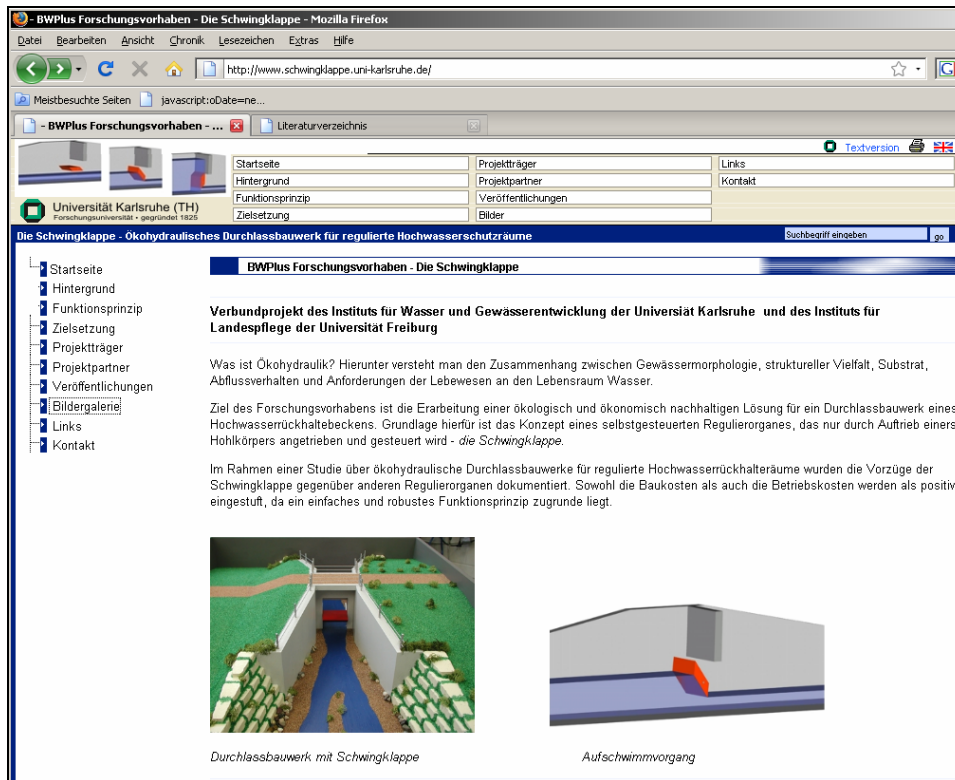
Ziel war es, dem Planer eine breite Übersicht der möglichen Bauweisen zur Verfügung zu stellen und über die Bewertung hinsichtlich der ökologischen Durchgängigkeit zu sensibilisieren. Durch das Verwenden von Beispielen aus der Praxis wurde sichergestellt, dass die gezeigten Bauweisen bautechnisch möglich und bezüglich der Kosten konkurrenzfähig sind.

Der Bauweisenkatalog steht nicht in Konkurrenz zum Lebensraumkatalog, der im Rahmen des Forschungsprojektes der Universitäten Stuttgart und Freiburg erarbeitet wurde sondern sollte vielmehr als Zusammenstellung von „best practice“ gesehen werden. Eine Bewertung der Umweltverträglichkeit eines Hochwasserrückhaltebeckens oder der ökologische Entwurf eines solchen sind alleine mit diesem Werkzeug nicht möglich. Der Bauweisenkatalog fokussiert auf einzelne Bauteile eines Durchlassbauwerkes und stellt eine Hilfe für den planenden Ingenieur für eine Optimierung des Entwurfs eines ökologisch angepassten Hochwasserrückhaltebeckens dar. Der Bauweisenkatalog ist in Anlage 2 dem Abschlussbericht beigelegt.

## 8.6 Sonstiges

Von Seiten der Projektbeteiligten wurden weitere Anstrengungen unternommen, um das Konzept der Schwingklappe und den Verlauf des Forschungsprojektes einer breiten Öffentlichkeit zu präsentieren.

Im Internet wurde eine projekteigene Homepage unter der Adresse [www.schwingklappe.uni-karlsruhe](http://www.schwingklappe.uni-karlsruhe) mit Informationen zur Schwingklappe und zum Ziel des Forschungsvorhabens eingerichtet (vgl. Abbildung 8.14). Eine Auswertung des Statistikservers hat ergeben, dass seit bestehen der Homepage im Jahre 2006 bis zum 15. Oktober 2008 738 unterschiedliche Benutzer auf die Seite zugegriffen haben.



**Abbildung 8.14:** Projekt-Homepage [www.schwingklappe.uni-karlsruhe.de](http://www.schwingklappe.uni-karlsruhe.de)

Zur Veranschaulichung des Funktionsprinzips und eines Durchlassbauwerkes mit integrierter Schwingklappe wurde in den institutseigenen Werkstätten ein Anschauungsmodell der Schwingklappe im Maßstab 1:35 angefertigt (vgl. Abbildung 8.15). Das Modell umfasst einen Teilbereich des Dammes mit dem Durchlassbauwerk in offener Bauweise.

Die Größe wurde so gewählt, dass ein Transport problemlos möglich ist. Das Schaumodell fand vor allem bei zahlreichen Besuchergruppen im Theodor-Rehbock-Wasserbaulaboratorium als auch bei der Fachtagung zur ökologischen Durchgängigkeit von Hochwasserrückhaltebecken am 23.Feb. 2006 in Freiburg großen Anklang und unterstützte den regen Gedankenaustausch.



**Abbildung 8.15:** Schaumodell der Schwingklappe

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Die ersten Ideen zur Schwingklappe kamen bereits Mitte der 90er Jahre auf. Ein selbstregulierendes Kontrollorgan sollte unabhängig vom Oberwasserstand eine konstante Regelabgabe aus dem Hochwasserrückhaltebecken ableiten. Das System sollte ohne Fremdenergie und ohne eine aufwändige Steuer- und Regelungstechnik auskommen. In einer ersten Studie konnte das Konzept der Schwingklappe bestätigt werden, so dass weitere Untersuchungen folgten. Vorteile versprach man sich vor allem hinsichtlich der ökologischen Durchgängigkeit. Auf Grund der fehlenden Antriebe und Steuerungseinrichtungen ist auch von entsprechend geringeren Bau- und Betriebskosten auszugehen.

Die Notwendigkeit zur Verbesserung der ökologischen Durchgängigkeit von Hochwasserrückhaltebecken leitet sich aus deren großen Anzahl ab: Derzeit sind in Baden-Württemberg 663 Hochwasserrückhaltebecken im Einsatz, wovon 479 als Trockenbecken im Hauptschluss konzipiert sind (Stand Okt. 2007).

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erfolgte die Wiederaufnahme der Untersuchungen zur Schwingklappe durch das Institut für Wasser und Gewässerentwicklung der Universität Karlsruhe und das Institut für Landespflege der Universität Freiburg. Ziel war es, die grundlegenden hydraulischen und kinematischen Prozesse der Abflussregelung mit der Schwingklappe detailliert zu untersuchen und den Praxistransfer in Form von einem Bemessungskonzept und einer Pilotanlage zu bewerkstelligen. Hierzu wurden großmaßstäbliche wasserbauliche Modellversuche im Maßstab 1:2, 1:6 und 1:10 durchgeführt. Neben den hydraulischen Fragestellungen bezog sich ein weiterer Schwerpunkt auf die ökologischen Untersuchungen zum Thema Durchlassbauwerke. Hierzu wurden ebenfalls wasserbauliche Modellversuche durchgeführt.

Zusammen mit dem Parallelvorhaben der Universität Stuttgart in Kooperation mit dem Institut für Landespflege der Universität Freiburg „Kriterien für Gestaltung, Betrieb sowie Unterhaltung von Stau- und Retentionsanlagen zur Gewährleistung der ökologischen Durchgängigkeit“ (Zuwendungs-Nr. BWR 24005) bildet das Forschungsvorhaben zur Schwingklappe ein Verbundprojekt. Beide Forschungsvorhaben wurden durch die landesweite Arbeitsgruppe unter der Leitung der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg fachlich begleitet.

Der Abschlussbericht gliedert sich im Wesentlichen in sechs Abschnitte. In Kapitel 3 werden einführend Grundlagen und Begrifflichkeiten rund um die Thematik Hochwasserrückhaltebecken erläutert. Das Funktionsprinzip der Schwingklappe wird erklärt und der Anwendungsbereich abgesteckt. Der Einsatzbereich der Schwingklappe wurde mit der Wiederaufnahme der Untersuchungen neu definiert. Die verbesserten Methoden bei der Flussgebietsmodellierung führen vor allem bei den großen Becken zu neuen Anforderungen bezüglich der Stauraumbewirtschaftung. Abhängig von der Prognose der HW-Welle und dem Füllstand oberliegender Hochwasserrückhaltebecken können verschiedene Betriebszenarien vorgesehen sein. Diese Aufgabe kann nur mittels motorgetriebener Antriebe und einer zentralen Leitstelle gelöst werden. Die Schwingklappe stellt aus Sicht des IWG daher eine Alternative für kleine Becken dar, bei denen häufig Blenden mit kleinen Spaltöffnungen installiert werden.

Kapitel 4 gibt einen Überblick über die durchgeführten wasserbaulichen Modellversuche. Das Modellkonzept sowie die eingesetzte Messtechnik wird beschrieben. Das hydraulische und kinematische Verhalten der Schwingklappe wird ausführlich diskutiert. Mit den wasserbaulichen Modellversuchen konnte herausgearbeitet werden, dass die Abflussregelung eine andere Charakteristik aufweist, als in den Studien zur Schwingklappe aus den 90'er Jahren dargestellt. Ursache hierfür ist der nicht ausreichend beachtete Einfluss des Unterwasserstandes.

Die Untersuchungen zum kinematischen Verhalten haben das Konzept der Schwingklappe jedoch bestätigen können. Die Auswertung der Frequenzspektren ergab keine Anzeichen von resonanten Aufschaukelungsvorgängen. Es konnte aufgezeigt werden, dass das Dämpfungsverhalten maßgeblich vom umgebenden Wasser beeinflusst wird und dass die Dämpfung über das gesamte Betriebsspektrum als starke Dämpfung charakterisiert werden kann.

In Kapitel 5 werden die Ergebnisse der ökologischen Untersuchungen am wasserbaulichen Modell dargestellt und diskutiert. Die Versuchsergebnisse unterstreichen die Bedeutung des Lückensystems des Sediments als Rückzugsraum für Wirbellose. Selbst bei hohen Fließgeschwindigkeiten und erheblichen Sedimentbewegungen können Kleintiere dort Hochwasserereignisse unbeschadet überdauern. Die Versuche haben zudem gezeigt, dass eine Befestigung von der Sohle notwendig ist, um ein komplettes Ausspülen des Substrats unterhalb und kurz hinter der Schwingklappe zu verhindern.

Die Erkenntnisse aus den hydraulischen Untersuchungen führten zu dem in Kapitel 6 dargestellten Bemessungskonzept. Vor allem die Sensitivität des hydraulischen Verhaltens der Schwingklappe in Bezug auf den Unterwasserstand ließ es nicht zu, einen allgemein gültigen Bemessungsansatz zu formulieren. Vielmehr musste dazu übergegangen werden, das Bemessungskonzept derart auf zu bauen, dass der im Modell untersuchten Klappenkörper durch eine Skalierung an die jeweilige Randbedingung angepasst wird.

Im Rahmen der Begutachtung und Bewertung von Hochwasserrückhaltebecken konnte immer wieder festgestellt werden, dass alle Bauteile der Anlage mit Fokus auf die ökologische Durchgängigkeit betrachtet werden müssen, um ein durchgehender Wanderkorridor für aquatische, amphibische und terrestrische Lebewesen sicher zu stellen. Die in der Projektlaufzeit gewonnenen Erkenntnisse wurden in Form der Konzeption einer Gesamtanlage aufbereitet, deren Abflussregelung von der Schwingklappe übernommen wird. Das in Kapitel 7 dargestellte Konzept für z.B. die Gestaltung des Einlaufbereiches oder der Geschwemmselabwehr ist als Empfehlung für ein ökologisch angepasstes Hochwasserrückhaltebecken zu verstehen und kann ohne Einschränkungen auch mit anderen Regulierorganen anstelle der Schwingklappe angewendet werden.

Ein Schwerpunkt des Forschungsvorhabens und Leitbild der BWPLUS Projektträgerschaft ist der Transfer der Erkenntnisse und Forschungsergebnisse in die Praxis. Kapitel 8 gibt einen Überblick über die durchgeführten Aktivitäten. Neben der Mitwirkung bei der Erstellung des Leitfadens „Durchgängigkeit für Tiere in Fließgewässern, Teil 3 – Hochwasserrückhaltebecken und Talsperren“ und bei der Fachtagung „Ökologische Durchgängigkeit von Hochwasserrückhaltebecken“ in Freiburg wird hier vor allem auf die Untersuchungen zu möglichen Standorten einer Pilotanlage eingegangen.

In der verlängerten Projektlaufzeit ist es gelungen, in Zusammenarbeit mit dem Tiefbauamt der Stadt Karlsruhe eine Schwingklappe zur Abflussregelung einer Fischaufstiegsanlage an der Pfinz in die Praxis zu transferieren. Die Inbetriebnahme der Anlage ist für Mai 2009 vorgesehen.

Einen zweiten wichtigen Baustein des Forschungstransfers stellt der erarbeitete Bauweisenkatalog dar. Ziel war es, dem Planer eine breite Übersicht an möglichen Bauweisen zur Verfügung zu stellen und über die Bewertung hinsichtlich der ökologischen Durchgängigkeit zu sensibilisieren. Das Hochwasserrückhaltebecken wird dabei differenziert nach funktionalen Bauteilen wie z.B. Einlaufbereich, Durchlass und Hochwasserentlastungsanlage betrachtet.

Die detaillierten Untersuchungen zum hydraulischen und kinematischen Verhalten der Schwingklappe haben gezeigt, dass die Erwartungen, die in den 90'er Jahren in das Konzept der Schwingklappe gesetzt wurden, nur zum Teil bestätigt werden konnten. Vor allem der damals nicht erkannte Einfluss des Unterwasserstandes auf sämtliche Prozesse der Abflussregelung macht die anvisierte Vorzüge der Schwingklappe zunichte. Ebenso führt die Sensitivität bezüglich des Unterwasserstandes zu großen Herausforderungen an den planenden Ingenieur bei der Bemessung der Schwingklappe, so dass eine sichere und korrekte Bemessung derzeit nur bei optimalen Randbedingungen möglich erscheint.

Vor dem Hintergrund der Datenunsicherheit gerade bei kleinen Gewässern und dem potentiellen Risiko, welches von dem Aufstau des Wassers im Stauraum ausgeht, erscheint eine flächendeckende Implementierung der Schwingklappe zur Durchflussregelung von Hochwasserrückhaltebecken nach derzeitigem Wissensstand als unwahrscheinlich.

Wo kann man die Technologie der Schwingklappe einsetzen? Die Pilotanlage zur Abflussregelung einer Fischtreppe an der Pfinz zeigt ein neues Anwendungsfeld auf. Vor allem bei Kleinwasserkraftanlagen, deren Zahl durch die Reaktivierung alter Mühlenstandorte in Baden-Württemberg ständig steigt, ist eine präzise Stauzielregelung auf Grund der technischen Ausstattung oft nicht möglich. Durch die Schwankungen im Oberwasser kommt es zu einer Änderung des Abflusses durch die Fischtreppe. Über- oder Unterschreitet dieser wesentlich den Bemessungsabfluss der Fischaufstiegsanlage, so ist deren Funktion eingeschränkt.

Die Schwingklappe kann hier einen wertvollen Beitrag zur Verbesserung der Durchwanderbarkeit von Fischaufstiegsanlagen leisten, da die Schwankungen im Oberwasserstand und die damit einhergehenden Abflussschwankungen ohne dem Einsatz von kostenintensiver Steuer- und Regelungstechnik ausgeglichen werden können. Die Problematik des Unterwasserstandes ist bei Fischaufstiegsanlagen von untergeordneter Bedeutung, da ein definierter Kontrollquerschnitt in Form von Steinriegeln oder Umlenkbecken Unterstrom vorhanden ist.

Eine weitere Einsatzmöglichkeit der Schwingklappe könnten kommunale Abwassersysteme darstellen. Im Zuge der Verbesserung des Hochwasserschutzes geht man hier immer mehr dazu über, die Volumen der großen Sammler als Retentionsvolumen zu bewirtschaften. Hierzu muss eine Drossel und eine Entlastungsanlage im Rohrquerschnitt integriert werden, die eine sichere Abflussregelung auch im Falle eines Stromausfalles bewerkstelligen kann. Neben schwimmergesteuerte Schütze kommt sicherlich auch die Schwingklappe für eine solche Aufgabe in Frage. Hierbei stellt vor allem der einfache Aufbau der Schwingklappe einen Vorteil gegenüber der mechanisch komplexen Schwimmersteuerung dar. Ein erster Gedankenaustausch mit dem Tiefbauamt der Stadt Karlsruhe hat hierzu bereits statt gefunden.

## 10 Literaturverzeichnis

- [ATV] ATV-DVWK Schriftenreihe (2001): Hochwasserrückhaltebecken, Probleme und Anforderungen aus wasserwirtschaftlicher und ökologischer Sicht.
- [AIGNER] Aigner, D. und Horlacher, H., (1997): Optimum design of self-regulating spring steel throttles for sewer overflow tanks, Proceedings XXVII IAHR Congress, San Francisco 1997, Thema A, S. 75-80
- [BAUMGART] Baumgart, J. (1999): Ökologische Durchgängigkeit von Hochwasserrückhaltebecken, Merkblätter des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen, Nr. 18.
- [BERNHART] Bernhart, H.H. (2003): Naturverträglicher Hochwasserschutz – Wasserbauliche Aspekte, Natur und Landschaft, 78. Jahrgang (2003), Heft 4, S. 138-142
- [BERN 2003] Bernhart, H.H. (2003): Landschaftsverträgliche Bauweisen für den Hochwasserschutz, Tagungsband zum Symposium – Überströmbare Dämme, Stuttgart 11.11.2003
- [BILLETER] Billeter, Peter. (1998): Strömungsinduzierte Schwingungen von Schützen mit mehreren Freiheitsgraden, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Heft 160
- [DIERLAMM] Dierlamm, J. (2000): Ökologische Durchgängigkeit von Hochwasserrückhaltebecken dargestellt am Beispiel der Wirbellosen. – Diplomarbeit am Institut für Zoologie der Universität Hohenheim.
- [DIN 19700] DIN 19700 (2004): Deutsche Norm, Stauanlagen, Teil 12 Hochwasserrückhaltebecken Die Auswirkungen des Betriebs von Hochwasserrückhaltebecken, Juli 2004
- [DIN 19226] DIN 19226, Teil 1 (1994): Deutsche Norm, Regelungstechnik und Steuerungstechnik, Allgemeine Grundbegriffe, Februar 1994
- [DVWK] DVWK (1993): Die Auswirkungen des Betriebs von Hochwasserrückhaltebecken auf Lebensräume, Tier- und Pflanzen-



- lebensgemeinschaften - Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK), DVWK-Materialien 4/93: 94 S.
- [DVWK 39] DVWK Schriften, Heft 39: Wasserbauliches Versuchswesen, zusammengestellt von Helmut Kobus, Verlag Paul Parey, 2. Auflage, 1984.
- [FRANKE] Franke, P. (1956): Theoretische Betrachtung zur Strahlkontraktion beim Ausfluß unter Schützen, Die Bautechnik, 33 Jg, S. 73-77, Heft 3, März
- [GWD] Gewässerdirektion Südlicher Oberrhein / Hochrhein, Bereich Waldshut-Tiengen, Hochwasserschutzmaßnahmen am Schwarzbach und Seegraben, Kurzerläuterungsbericht Flutmulde Weisweil-West vom 07.06.2004, unveröffentlicht.
- [HAGER] W. H. Hager, F. Raemy: Hydraulic level control by Hinged Flap Gate; Proc. Instn. Civ. Engrs. Water, Maritime and Energy 130(6): 95-103; 1998
- [HOMANN] Homann, J, Konold, W. (1997): Renaturierung von Fließgewässern: Das Beispiel der Enz in Pforzheim. – Handbuch angewandte Limnologie – 3. Erg. Lfg. 7/97.
- [IFL] Schriftenreihe des Instituts für Landespflege der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Heft 50, Durchgängigkeit von Hochwasserrückhaltebecken, Tagungsband zur gleichnamigen Tagung am 23.02.2006, Hrsg. Sandra Röck, Werner Konold, 2007, ISBN 3-933390-37-0
- [IWK 1997] IWK – Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe (1997): Machbarkeitsstudie – Schwingklappe – im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz, unveröffentlicht
- [IWK 1998] IWK – Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe (1998): – Die Schwingklappe – Ökohydraulisches Durchlassbauwerk, 2D-Modelluntersuchungen im Auftrag des Regierungspräsidiums Stuttgart, unveröffentlicht
- [IWG 2006] IWG – Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Universität Karlsruhe: Hydrologie, kursbegleitendes Skriptum, Stand 10/2006

- [IWG] IWG – Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Universität Karlsruhe: Wasserbauliches Versuchswesen, kursbegleitendes Skriptum, 1. Auflage, 2007
- [IWG-HW] Institut für Wasser und Gewässerentwicklung: Softwarepaket Hochwasseranalyse und –berechnung, Interne Dokumentation.
- [HAMM] Hamm, Patricia (2003), Ein Beitrag zum Schwingungs- und Dämpfungsverhalten von Fußgängerbrücken aus Holz, Dissertation, TU-München 2003
- [JIRKA2007] Jirka, G. H. (2007), Einführung in die Hydromechanik, 3. überarbeitete Auflage, Universitätsverlag Karlsruhe, ISBN 978-3-86644-458-3
- [JIRKA2009] Jirka, G. H., Lang, C. (2009), Einführung in die Gerinnehydraulik, Universitätsverlag Karlsruhe, ISBN 978-3-86644-363-1
- [JUNK] Junk, W.J., Bayley, P. B. & Sparks, R. E. (1989): The Flood Pulse Concept in River-Floodplain Systems - In: Dodge, D. P.: Proceedings of the International Large River Symposium, Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences 106: 110-127.
- [KAISER] Kaiser, O. & F. Schüle: Bewertung städtischer Fließgewässer. - in: Wasserwirtschaft, Heft 4, 2004.
- [KAPPUS] Kappus, B.; Böhmer, J. & Rawer-Jost, C. (1999): Zur Problematik der ökologischen Durchgängigkeit von Wasserkraftanlagen - Grundlagen und Lösungsmöglichkeiten, Beiträge zum 2. Seminar Kleinwasserkraft Praxis und aktuelle Entwicklung, Universität Stuttgart, Institut für Strömungsmechanik und hydraulische Strömungsmaschinen, Mitteilung Nr. 16: 13-25.
- [KON 1996] Konold, W. (1996): Fließgewässer in der Landschaft – Ökologie und Funktion. – Schriftenreihe des Fachbereichs Landschaftsarchitektur der FH Osnabrück, Heft 14, 1996.
- [KON 1986] Konold, W. (1986): Zur Ökologie kleiner Fließgewässer. – Jh. Ges. Naturkunde. Württemberg, 141. Jahrgang, Stuttgart 1986.

- [LFU 1992] LfU – Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (1992): Ökologie der Fließgewässer, Handbuch Wasser 2, Heft 6.
- [LFU 1998] LfU – Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (1998): Studie über ökohydraulische Durchlassbauwerke für regulierte Hochwasserrückhalteräume, Handbuch Wasser 2, Heft 43.
- [LFU 2000] LfU – Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2000): Anlagen zur Herstellung der Durchgängigkeit von Fließgewässern, Handbuch Wasser 2, Heft 63.
- [LFU 2003] LfU – Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2003): Ökologische Durchgängigkeit von Hochwasserrückhaltebecken, Bericht der LfU Karlsruhe über die Fachexkursion am 22. Mai 2003
- [LFU 2004] LfU – Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2004): Überströmbare Dämme und Dammscharten, Leitfaden, 1. Auflage
- [LFU 2005] LFU (2005): Durchgängigkeit für Tiere in Fließgewässern - Leitfaden Teil 1 - Grundlagen - Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU), Karlsruhe, ISBN 3-88251-292-x
- [LFU 2006] LFU (2006): Durchgängigkeit für Tiere in Fließgewässern - Leitfaden Teil 3 – Hochwasserrückhaltebecken und Talsperren - Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU), Karlsruhe, ISBN 3-88251-315-2
- [LITRICO] Xavier Litrico et al. (2005): Hydraulic Modeling of an Automatic Upstream Water-Level Control Gate, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, März/April 2005.
- [LRKAT] Kaiser, O. & Röck, S. (2006): Abschlussbericht zum Forschungsprojekt: Kriterien für Gestaltung, Betrieb sowie Unterhaltung von Stau- und Retentionsanlagen zur Gewährleistung der ökologischen Durchgängigkeit – Der Lebensraumkatalog; BWPLUS-Projekt (Baden-Württemberg, Programm Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung) Förderkennzeichen: BWR 24005: 213 S.
- [LUDWIG] Dr.-Ing. Ludwig, Untersuchung der Abflussregelung im Klettgau, Gutachten, 1995

- [LWA] LWA (1992): Biotopgestaltung an Talsperren, Hochwasserrückhaltebecken und Flussauen - Landesamt für Wasser und Abfall Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, LWA Merkblätter Nr. 9.
- [MATHIAK] Mathiak, Friedrich (2002), Baudynamik; Einführung und Grundlagen, Fachhochschule Neubrandenburg, 2002
- [MEIER] Meier, J. (2009): Schwingungen – Wellen - Optik, Skriptum Physik, Fachhochschule München, Fachbereich Feinwerk- und Mikrotechnik, Physikalische Technik, <http://www.fb06.fh-muenchen.de> (Stand Nov. 2008).
- [MÜLLER] Müller, Ingolf (2008), Messtechnisches Praktikum I, Institut für Mechanik, Universität Karlsruhe, Messergebnisse aus den Jahren 2006-2008, unveröffentlicht
- [NAUDASCHER] Naudscher, E. (1987): Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke, Springer Verlag
- [RAEMY] Félix Raemy (1998): Selbsttätige Klappschütze zur Wasserstandsregulierung; wasser, energie, luft, 90. Jahrgang, Heft 5/6, S.117,
- [RÖCK] Röck, S. (1999): Vergleich des Markzoobenthos-Gemeinschaft zweier Geröllbrandungsufer des Bodensees in Bezug auf die Intermediate Disturbance Hypothese
- [SCHERLE] Scherle, J. (1999): Entwicklung naturnaher Gewässerstrukturen – Grundlagen, Leitbilder, Planung -, Mitteilungen des Institutes für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe, Heft 199
- [STANFORD] Stanford, J. A. & Ward, J. V. (2001): Revisiting the serial discontinuity concept - Regulated Rivers-Research & Management 17 (4-5): 303-310.
- [TENNEKES] Tennekes, H., Lumely, J. (1990). A First Course in Turbulence. MIT Press Cambridge, London, thirteenth edition.

- [VANNOTE] Vannote, R. L.; Minshall, G. W.; Cummins, K. W.; Sedell, J. R. & Cushing, C. E. (1980): The River Continuum Concept - Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 37: 130-137.
- [WERNER] Werner, W. (1956): Ableitung einer kinematischen Beziehung zur Berechnung des Durchflusses unter Planschützen nach der Theorie freier Stromlinien. Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden, Heft 6, S. 1693-1699
- [WESTRICH] Westrich, B., R. Siebel, W. Konold, O. Kaiser, S. Röck (2006): Schlussbericht zum Forschungsprojekt: Kriterien für Gestaltung, Betrieb sowie Unterhaltung von Stau- und Retentionsanlagen zur Gewährleistung der ökologischen Durchgängigkeit; BWPLUS-Projekt BWR24005
- [WICKERT] Wickert, G., Schmauß, G. (1971): Stahlwasserbau, Theorie, konstruktive Lösungen, spezielle Probleme, Springer Verlag
- [ZVHWS] Zweckverband Hochwasserschutz Einzugsbereich Elsenz-Schwarzbach, zur Verfügung gestelltes Bildmaterial
- [ZVHWS2003] Zweckverband Hochwasserschutz Einzugsbereich Elsenz-Schwarzbach (2003), Erläuterungsbericht zum Bau des Hochwasserrückhaltebeckens Aglasterhausen / Rittersbach, FGM M26, unveröffentlicht.

## 11 Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 3.1: Begriffsdefinitionen beim Hochwasserrückhaltebecken [IWG2006].....  | 9  |
| Abbildung 3.2: Klassifizierung von Hochwasserrückhaltebecken [DIN 19700]. .....  | 10 |
| Abbildung 3.3: Systemskizze eines HRB im Hauptschluss, verändert nach<br>[LFU 2004] .....  | 12 |
| Abbildung 3.4: Systemskizze eines HRB im Nebenschluss.....   | 13 |
| Abbildung 3.5: Ungesteuerte Abgabe [IWG 2006]. .....   | 14 |
| Abbildung 3.6: Gesteuerte Abgabe [IWG 2006]. .....   | 14 |
| Abbildung 3.7: Struktur einer Steuerung.....   | 15 |
| Abbildung 3.8: Struktur einer Regelung.....  | 16 |
| Abbildung 3.9: Abflussdrosselung mit der Schwingklappe.....  | 23 |
| Abbildung 3.10: Abflussbeiwerte für Freispiegelschütze mit geneigter Stauwand und<br>freiem Abfluss [NAUDASCHER]. .....                | 24 |
|  |    |
| Abbildung 4.1: Modellversuche, Maßstab 1:10.....   | 29 |
| Abbildung 4.2: Ansicht Versuchsstand Maßstab 1:2 .....   | 30 |
| Abbildung 4.3: Schema der Mess- und Regelungstechnik .....   | 32 |
| Abbildung 4.4: links: Sonden im Klappeninneren; rechts: Kraftmeseinrichtung mit<br>Wägezelle .....                                     | 33 |
| Abbildung 4.5: Versuchsstand Maßstab 1:6. ....   | 34 |
| Abbildung 4.6: Verschiedene Anordnungen von Stauwand, Dichtung und<br>Tragkonstruktion bei unterströmten Schützen, nach [WICKERT]..... | 36 |
| Abbildung 4.7: Entwicklung der Klappengeometrie (links: Studie 1998, rechts:<br>Versuche Maßstab 1:10, 2005). .....                    | 38 |
| Abbildung 4.8: Strömungsablösungen an der Schwingklappe, Maßstab 1:10. ....  | 39 |
| Abbildung 4.9: Modellabmessungen der Schwingklappe, Maßstab 1:2.....   | 40 |
| Abbildung 4.10: Definition der Lagerungspunkte .....   | 40 |
| Abbildung 4.11: Schwimmstabilität eines frei schwimmenden Quaders (.....   | 41 |
| Abbildung 4.12: Kräfteverhältnisse an der Schwingklappe bei beginnendem<br>Aufschwimmvorgang. ....                                     | 42 |
| Abbildung 4.13: Freier Abfluss unter einem Schütz.....   | 44 |
| Abbildung 4.14: Vergleich der Berechnungsergebnisse nach Aigner mit<br>experimentellen Ergebnissen.....                                | 47 |
| Abbildung 4.15: Verhalten des Abflussbeiwertes während des Aufschwimmvorganges<br>.....  | 48 |
| Abbildung 4.16: Rückgestauter Abfluss unter einem Schütz .....   | 49 |
| Abbildung 4.17: Rückgestauter Abfluss, Schwingklappe 90°.....  | 50 |
| Abbildung 4.18: Rückgestauter Abfluss, Schwingklappe 45°.....  | 50 |
| Abbildung 4.19: Rückgestauter Abfluss, Schwingklappe 30°.....  | 51 |

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 4.20: Rückgestauter Abfluss, Schwingklappe 15° .....  | 51 |
| Abbildung 4.21: Vergleich unterschiedlicher Gewässergeometrien in Bezug auf die Wasserstands-Abfluss-Beziehung .....                                  | 54 |
| Abbildung 4.22: Mögliches Gewässerprofil zur Einhaltung der erforderlichen Wasserstands-Abfluss-Beziehung .....                                       | 54 |
| Abbildung 4.23: untersuchte Wasserstands-Abfluss-Beziehungen der unterwasserseitigen Gewässerstrecke .....  | 55 |
| Abbildung 4.24: Abflussverhalten der Schwingklappe bei den unterschiedlichen Unterwasser-Randbedingungen .....  | 56 |
| Abbildung 4.25: Entwicklung der Wasserstände im OW und UW bei Betrieb der Schwingklappe.....  | 58 |
| Abbildung 4.26: Beginnender Eingriff in das Abflussgeschehen durch die Schwingklappe, Einfluss der Neigung.....                                       | 59 |
| Abbildung 4.27: Beginnender Eingriff in das Abflussgeschehen durch die Schwingklappe, Einfluss der Fließgeschwindigkeit.....                          | 59 |
| Abbildung 4.28: Funktionsbereich der Schwingklappe .....  | 60 |
| Abbildung 4.29: schematische Darstellung der angreifenden Kräfte .....  | 61 |
| Abbildung 4.30: Betrachtung der Momente bei einer Klappenneigung von 30° .....  | 62 |
| Abbildung 4.31: Moment in Folge Auftriebskraft.....   | 63 |
| Abbildung 4.32: Durchfluss unter einer selbsttätigen Schwingklappe [LFU 1998] .....   | 64 |
| Abbildung 4.33: Vergleich Durchfluss unter der Schwingklappe: Vergleich: Studie .... LfU - skalierte Modellversuche .....                             | 65 |
| Abbildung 4.34: Druckverlauf entlang der Stauhaut. ....   | 68 |
| Abbildung 4.35: Verlauf der dynamische und hydrostatische Druckverteilung nach [RAEMY] .....  | 69 |
| Abbildung 4.36: Schwankungsbereich der Druckhöhen beim Prototypen an den fünf Druckmessstellen .....  | 70 |
| Abbildung 4.37: Prinzipskizze der strömungsinduzierten Schwingungen mit den wichtigsten Parametern und Variablen, modifiziert nach [BILLETTER]. ..... | 72 |
| Abbildung 4.38: Zonen potentieller Schwingungsanfachungsmechanismen bei der Schwingklappe.....  | 73 |
| Abbildung 4.39: Eigenfrequenz in Abhängigkeit der Klappenneigung .....  | 74 |
| Abbildung 4.40: Eigenfrequenz in Abhängigkeit der Klappenneigung, Vergleich der Ergebnisse aus den Versuchen M 1:6 und M 1:2 .....                    | 76 |
| Abbildung 4.41: Viskos gedämpfte Schwingung einer Kugel in Flüssigkeit [MEIER]...78   |    |
| Abbildung 4.42: Dämpfungsarten bei viskoser Reibung [MEIER].....  | 79 |
| Abbildung 4.43: Schwingungsverlauf Lagerpunkt 6, Modell Maßstab 1:2.....  | 80 |
| Abbildung 4.44: Schwingungsverlauf Lagerpunkt 6, Modell Maßstab 1:2 und 1:6.....  | 80 |
| Abbildung 4.45: Dämpfungsmaß D in Abhängigkeit der Klappenneigung und des Lagerpunktes .....  | 81 |

|   |     |
|---|-----|
| Abbildung 4.46: Klassifizierung des Schwingungsverhaltens [MEIER].....  | 83  |
| Abbildung 4.47: Spektralanalyse, Druckmessstelle 2, Betrachtung bei 15° und 45°,<br>Modellwerte Maßstab 1:2 .....   | 85  |
| Abbildung 4.48: Spektralanalyse, Druckmessstelle 5, Betrachtung bei 15° und 45°.<br>Modellwerte Maßstab 1:2 .....   | 86  |
| Abbildung 4.49: Spektralanalyse, Druckmessstelle 6, Betrachtung bei 30° und 45°,<br>Modellwerte Maßstab 1:2 .....   | 88  |
| Abbildung 4.50: Einfluss der Unterwasser-Kennlinie auf die Stauraumbewirtschaftung,<br>schematische Betrachtung der Blende (links) und der Schwingklappe<br>(rechts). ..... | 90  |
| Abbildung 4.51: Wirkungsweise des HRB A26 Aglasterhausen / Rittersbach<br>[ZVHWS2003] .....   | 92  |
| Abbildung 4.52: Speicherinhalt und Wasserstand, Vergleich Blende mit<br>Schwingklappe, $HQ_{100}/2h$ .....  | 93  |
| Abbildung 4.53: Speicherinhalt und Wasserstand, Vergleich Blende mit<br>Schwingklappe, $HQ_{100}/48h$ .....   | 94  |
| Abbildung 4.54: Speicherkennlinie, Vergleich Blende – Schwingklappe.....  | 95  |
| Abbildung 4.55: Verklemmtes Schütz, HRB Rot an der Rot, [Foto BERNHART] .....   | 97  |
| Abbildung 4.56: Bei Einstau unzugängliche Schieberarmatur. ....   | 97  |
| Abbildung 4.57: Gewschwemmseltrieb bei Hochwasser [ZVHWS].....  | 98  |
| Abbildung 4.58: Übersicht über die Modellgeschwemmsel und -geschiebe .....  | 99  |
| Abbildung 4.59: Sequenzen der Geschwemmseldrift. ....   | 100 |
| Abbildung 4.60: Gräser im Spalt (links), konstruktive Optimierung mittels Bürste<br>(rechts). ....  | 101 |
| Abbildung 4.61: Rückstellverhalten der Schwingklappe, Vergleich der Ausgangslagen<br>30° und 45° .....  | 102 |
| Abbildung 4.62: Abflussgeschehen unterstrom des Durchlassbauwerkes bei Hoch-<br>wasser, HRB A26 Rittersbach (links), HRB M18 Mönchzell (rechts),<br>[ZVHWS].....            | 103 |
| Abbildung 4.63: Versuchsaufbau zur Tosbeckenuntersuchung. ....  | 105 |
| Abbildung 4.64: untersuchte Störkörperanordnungen .....   | 105 |
| Abbildung 4.65: Versuchsanordnung mit geneigten Störkörpern.....  | 106 |
| Abbildung 4.66: Draufsicht Variante 3 .....   | 107 |
| <br>  |     |
| Abbildung 5.1: Versuchsrinne, z.Z. ohne Sedimentauflage .....   | 114 |
| Abbildung 5.2: ermittelte Kornverteilungskurve - Sohlkies Alp.....  | 116 |
| Abbildung 5.3: Versuchsrinne mit Schwingklappe (Maßstab 1:2).....   | 116 |
| Abbildung 5.4: Durchlass nach einem Abfluss von 225 l/s und Fließgeschwindigkeiten<br>von ca. 1 m/s .....   | 118 |
| Abbildung 5.5: Ausgespülter Bereich unter der Schwingklappe .....   | 119 |



|  |     |
|--|-----|
| Abbildung 5.6: Befestigter Sohlbereich vor und nach dem Einstau .....  | 120 |
| Abbildung 6.1: Allgemeine Beschreibung der Klappengeometrie .....  | 122 |
| Abbildung 6.2: Parameter zur Bestimmung der Spaltweite $s$ .....   | 123 |
| Abbildung 6.3: Entwicklung der Spaltweite beim Aufrichten der Schwingklappe,<br>Vergleich verschiedener Lagerungspunkte.....                               | 124 |
| Abbildung 6.4: Bemessungsdiagramm, bezogen auf die Klappenlänge $L$ .....  | 125 |
| Abbildung 6.5: Beziehung zwischen dem Unterwasserstand und dem Lagerungspunkt<br>.....   | 126 |
| <br>   |     |
| Abbildung 7.1: Anschauungsmodell einer Gesamtanlage mit Schwingklappe.....   | 128 |
| Abbildung 7.2: HRB Apfelbach. ....   | 130 |
| Abbildung 7.3: Unterschiedliche Rechenkonstruktionen in der Praxis, Stababstand<br>12 cm (links), Stababstand 30 cm (rechts). ....                         | 131 |
| Abbildung 7.4: Systemskizze des Rechenkonzeptes. ....  | 132 |
| Abbildung 7.5: Beispiele für nicht freigehaltene Retentionsräume; Holzlager (links) und<br>landwirtschaftliches Gerät bei Hochwasser (rechts) [ZVHWS]..... | 133 |
| Abbildung 7.6: Geschwemmselanfall HRB Raußmühle beim Schadensfall im März<br>2002; [ZVHWS]. ....   | 134 |
| Abbildung 7.7: Pallisadenrechen, HRB Raußmühle (links) und HRB Mönchzell<br>(rechts). ....   | 135 |
| Abbildung 7.8: Pallisaden während eines Hochwasserereignisses, HRB Insenbach<br>(links), HRB Oberschwarzenbach (rechts); [ZVHWS]. ....                     | 136 |
| Abbildung 7.9: Verklauung der Pallisaden bei Niedrigwasser (links), Ausräumen per<br>Traktor (rechts) [ZVHWS]. ....  | 136 |
| Abbildung 7.10: Räumlicher Feinrechen, HRB Raußmühle (links), HRB Mönchzell<br>(rechts). ....  | 137 |
| Abbildung 7.11: schematische Seitenansicht der Schwingklappe am Anfang des<br>Aufschwimmvorganges (links) und in der Endposition (rechts). ....            | 138 |
| Abbildung 7.12: Draufsicht auf den Geschiebekorridor .....   | 140 |
| Abbildung 7.13: Blick von Unterstrom auf die seitliche Sohlstreifen .....  | 140 |
| Abbildung 7.14: hydraulisches Verhalten überlastbarer / nicht überlastbarer Systeme<br>.....   | 142 |
| <br>   |     |
| Abbildung 8.1: Lage HRB Bollschweil.....   | 147 |
| Abbildung 8.2: Lage Flutmulde Weisweil-West.....   | 148 |
| Abbildung 8.3: derzeit geplantes Sperrbauwerk – gesteuertes Schütz.....  | 149 |
| Abbildung 8.4: Modellbereich Seegraben, Station 1+100 bis 1+500 .....  | 150 |
| Abbildung 8.5: gerechnete Abflusskurve Station 1+170, Position Sperrbauwerk ....   | 150 |
| Abbildung 8.6: Lage HRB Aglasterhausen / Rittersbach .....   | 151 |
| Abbildung 8.7: HRB Rittersbach [ZVHWS] .....   | 152 |

---

|   |     |
|---|-----|
| Abbildung 8.8: Lage HRB Forellenbach II.....  | 153 |
| Abbildung 8.9: Lage FAA Obermühle .....   | 154 |
| Abbildung 8.10: Übersicht Projektgebiet. Quelle: Google Maps 2008. ....   | 155 |
| Abbildung 8.11: Einbaulage der Schwingklappe (schematisch). ....  | 157 |
| Abbildung 8.12: Kennwerte der Schwingklappe an der Pfinz zur MW-Regelung.....   | 157 |
| Abbildung 8.13: links: hochliegender Steuerschieber ohne Sohlanschluss behindert die<br>Durchwanderbarkeit auf der Berme; rechts: Rechen oberstrom der Anlage<br>ohne durchgängige Uferberme behindert die terrestrische Durchgängigkeit<br>..... | 159 |
| Abbildung 8.14: Projekt-Homepage <a href="http://www.schwingklappe.uni-karlsruhe.de">www.schwingklappe.uni-karlsruhe.de</a> .....   | 161 |
| Abbildung 8.15: Schaumodell der Schwingklappe .....   | 161 |

## 12 Tabellenverzeichnis

|  |     |
|--|-----|
| Tabelle 4.1: Umrechnungsfaktoren nach dem Froudschen Modellgesetz .....                              | 27  |
| Tabelle 4.2: Geometrische Abhängigkeit Lagerungspunkt-Schwerpunkt.....                               | 41  |
| Tabelle 4.3: Dämpfungsmaß für einige Baustoffe [MATHIAK] .....                                       | 82  |
| Tabelle 4.4: Messergebnisse zum Dämpfungsgrad vom Brücken [HAMM].....                                | 82  |
| Tabelle 4.5: Messergebnisse zum Dämpfungsgrad vom Aussichtstürmen [MÜLLER]                           | 83  |
| Tabelle 5.1: Ergebnisse der Driftversuche mit Bachflohkrebsen und rheophilen<br>Eintagsfliegen ..... | 115 |
| Tabelle 5.2: Auswirkungen der Fließgeschwindigkeit und Abflussmenge auf die Sohle<br>.....           | 117 |

## **Anlagen**

Anlage 1: Fotodokumentation Pilotanlage

Anlage 2: Bauweisenkatalog

---

**Fotodokumentation -  
Bau der Pilotanlage an der Pfinz  
in Durlach**

---

**Anlage 1**

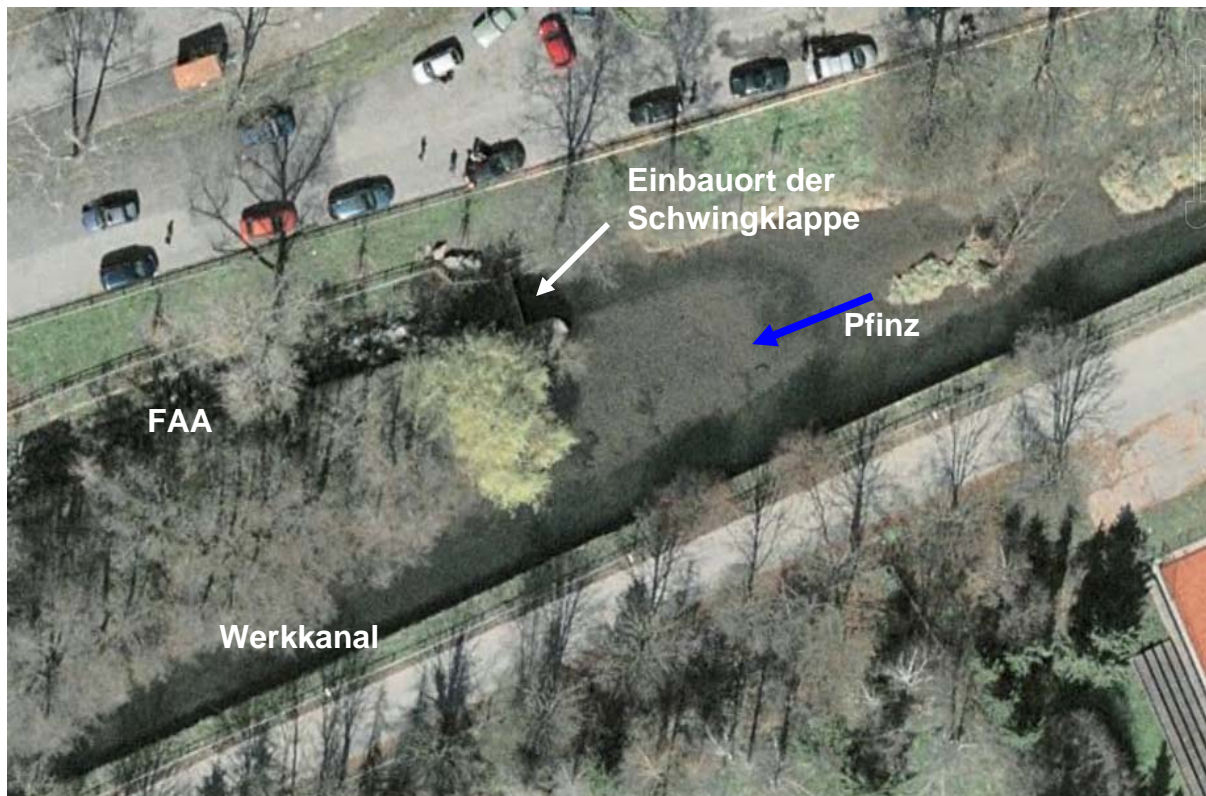
**Die Schwingklappe –  
Ökohydraulisches Durchlassbauwerk für regulierbare  
Hochwasserrückhalteräume – Planung, Bauweise, Betrieb**

im Auftrag der  
Projekträgerschaft Programm Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung  
(BWPLUS)  
Zuwendungs-Nr. BWR 24020

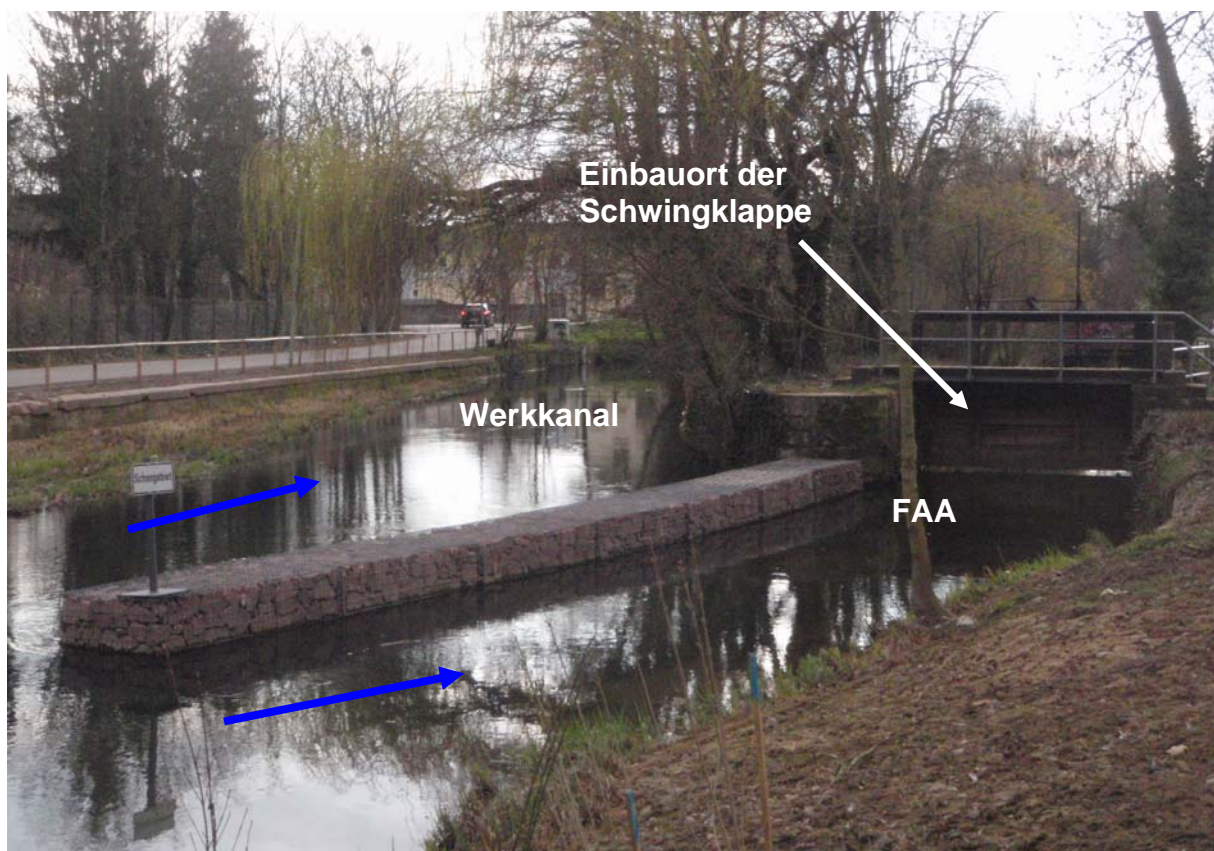
Universität Karlsruhe (TH)  
Institut für Wasser und Gewässerentwicklung

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Institut für Landespflege

Die Arbeiten des Programms „Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung“  
werden mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert



**Abbildung A1-1:** Übersicht über das Projektgebiet (Quelle: google 2009)



**Abbildung A1-2:** Übersicht über das Projektgebiet nach Beendigung der gewässerbegleitenden Baumaßnahmen. Das neue Schütz mit der Schwingklappe ist noch nicht montiert (Stand 30.03.2009)



**Abbildung A1-3:** Ansicht der Insel zwischen Werkkanal und FAA (Stand 8.10.2008)



**Abbildung A1-4:** Ansicht der Insel zwischen Werkkanal und FAA nach Einbau der Scharte zur Hochwasserabfuhr (Stand 30.3.2009)



**Abbildung A1-5:** Blick vom Inselkopf nach Oberstrom (Stand 8.10.2008)



**Abbildung A1-6:** Blick vom Inselkopf nach Oberstrom (Stand 30.3.2009)





**Abbildung A1-7:** Ansicht des alten Schützes von Unterstrom (Stand 30.3.2009)



**Abbildung A1-8:** Ansicht des alten Schützes von Oberstrom (Stand 30.3.2009). Dieses wird durch ein neues Edelstahlschütz ersetzt, in dem die Schwingklappe eingelassen ist.



**Abbildung A1-9:** Fertigung und Montage des Schützes und der Schwingklappe in den Werkstätten des Tiefbauamtes Karlsruhe. Im Hintergrund ist das seitliche Führungsblech zu erkennen, darauf liegt eine fertig zugeschnittene Rippe der Schwingklappe (Stand 30.3.2009).

---

# Bauweisenkatalog

---

## Anlage 2

### Die Schwingklappe

**Ökohydraulisches Durchlassbauwerk für regulierbare  
Hochwasserrückhalteräume – Planung, Bauweise, Betrieb**

im Auftrag der  
Projektträgerschaft Programm Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung (BWPLUS)  
Zuwendungs-Nr. BWR 24020

Universität Karlsruhe (TH)  
Institut für Wasser und Gewässerentwicklung

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Institut für Landespflege

Die Arbeiten des Programms „Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung“  
werden mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert

## Vorwort

Von Mitarbeitern des Instituts für Landespflege wurde im Rahmen des BWPLUS Projekts BWR 24005 eine ökologische Bewertung von verschiedenen Durchlasstypen anhand von bestehenden Anlagen durchgeführt. Dabei wurden Parameter wie die Bauwerkslänge und die Sohlausbildung hinsichtlich ihres Einflusses auf die Durchwanderbarkeit überprüft. Auch die landesweite Arbeitsgruppe Durchgängigkeit von HRB (koordiniert durch die LUBW) hat eine Vielzahl von Becken begutachtet und bewertet. Die Ergebnisse sind in den Leitfaden: Durchgängigkeit für Tiere in Fließgewässern, Teil 3 – Hochwasserrückhaltebecken und Talsperren eingegangen, der im Frühjahr 2007 erschienen ist.

Bei der Bewertung der ökologischen Durchgängigkeit fällt immer wieder auf, dass nicht der Grundtyp (offenes oder geschlossenes Bauwerk; mit oder ohne Ökoschieber; mit oder ohne Uferberme) als Hauptursache für die Behinderung der Durchgängigkeit angesehen werden kann. Oft sind Details der Anlage ungünstig ausgeführt und verschlechtern unnötigerweise die Längsdurchgängigkeit. Konstruktive, betriebliche oder finanzielle Gründe für die gewählte Ausführung können nicht erkannt werden.

Aufbauend auf den Bewertungen der Grundtypen von HRB durch das Institut für Landespflege wurde daher im Rahmen des Forschungsprojektes ein so genannter Bauweisenkatalog erstellt. Unterschieden nach Einlaufbereich, Durchlass und Auslaufbereich werden in der Praxis angewandte Bauweisen für offene Durchlassbauwerke vorgestellt und ökologisch bewertet. Die Bewertung stützt sich dabei auf die Erkenntnisse aus dem Lebensraumkatalog und der Literaturrecherche sowie auf die Ergebnisse der Modellversuche. Untersuchungen an den Bauwerken selbst können in der Projektlaufzeit nicht durchgeführt werden. Die konstruktive Funktion der Bauweise bzw. des Bauteils wird erklärt und Verbesserungsmöglichkeiten werden aufgezeigt.

Ziel ist es, dem Planer eine breite Übersicht der möglichen Bauweisen zur Verfügung zu stellen und über die Bewertung hinsichtlich der ökologischen Durchgängigkeit zu sensibilisieren. Durch das Verwenden von Beispielen aus der Praxis wurde sichergestellt, dass die gezeigten Bauweisen bautechnisch möglich und bezüglich der Kosten konkurrenzfähig sind. Der Bauweisenkatalog kann als „best practice“ angesehen werden und stellt eine Hilfe für den planenden Ingenieur für den Entwurf eines ökologisch angepassten HRB dar.

Für die Konstruktion der Anlagen können einige Grundsätze zur Verbesserung der Durchgängigkeit genannt werden:


- Um eine bestmögliche aquatische Durchgängigkeit zu erzielen, sollte das Gewässer vor allem in Bezug auf Wasserführung und Substratzusammensetzung möglichst unverändert das Bauwerk passieren können. Gleiches gilt für das Lückensystem der Gewässersohle, dem Interstitial, da auch hier Wanderbewegungen stattfinden. Wird das Interstitial durch entsprechende Querbauwerke unterbrochen, ist die Durchgängigkeit für eine Vielzahl von Kleinstlebewesen nicht mehr gegeben. Generell sind Querbauwerke, auch in Form von Schwellen im Gewässerverlauf als Hindernis anzusehen.
- Für die terrestrische und amphibische Durchgängigkeit sollte zumindest ein Uferstreifen das Bauwerk ungehindert passieren können. Vor allem Tiere, die auf terrestrische Durchgängigkeit in Gewässernähe angewiesen sind, werden oder können den Durchlass nicht schwimmend passieren.
- Flugfähige Tiere orientieren sich meist am Gewässerverlauf. Treffen diese Tiere auf geschlossene Durchlässe oder Verrohrungen, wirken diese aufgrund des Tunneleffekts (wenig Licht und veränderte kleinklimatische Verhältnisse) als Barriere. Auch bei offenen Bauwerken kann dieser Tunneleffekt auftreten, wenn entsprechend parallel verlaufende Flügelwände vorhanden sind. Vorteilhafter sind offen gestellte Wände, die die Tiere zum Durchlass führen und mehr Licht in den Durchlassbereich lassen. Für den Durchlass gilt: Je offener er ist, desto besser kann er durchflogen werden.

Die Bauwerksbeschreibungen sind im Folgenden so angeordnet, dass zu Beginn gute Lösungen vorgestellt werden. Bei den darauffolgenden Beschreibungen werden dann häufig Defizite bezogen auf das erste Beispiel genannt. So können Textwiederholungen vermieden werden.

Die drei Konstruktionsbereiche (1) Ein- und Auslaufbereich, (2) Durchlass und (3) Hochwasserentlastung werden getrennt behandelt und entsprechend in den Überschriften farblich unterschieden. Die vorgeschlagenen Verbesserungsmöglichkeiten beziehen sich immer auf das dargestellte Beispiel.

**1) Ein-, bzw. Auslaufbereich: Flügelwand**

Kombination aus Beton- und Blocksteinwand, mit Öffnungswinkel

|                                   |   |  |
|-----------------------------------|---|--|
| <p><b>Beschreibung</b></p>        | <p>Vor den betonierten Flügelwänden im Einlaufbereich schließen sich abgetreppte Wände aus Natursteinblöcken an. Die Fugen zwischen den Natursteinblöcken können mit Gräsern begrünt werden. Der Querschnitt verjüngt sich in Richtung des Durchlasses, so dass die Wände trichterförmig auf die Durchlassöffnung zulaufen.</p> |  <p style="text-align: right;">HRB Apfelbach, Foto: IB Frank</p> |
| <p><b>Technische Funktion</b></p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Stützfunktion gegen den Dammkörper zu beiden Seiten des Durchlassbauwerks</li> <li>• Durchsickerungsbarriere zwischen Dammkörper und Gewässer</li> </ul>   |  |

**Ökologische Aspekte**

|  |   |
|--|---|
| <p><b>Einfluss der Bauweise/ des Elements auf die ökologische Längsdurchgängigkeit</b></p> | <p>Durch die Mauern wird die Durchgängigkeit des Ufers und des Luftraums eingeschränkt. In Folge kann es zur Behinderung der Wanderbewegungen von fliegenden Insekten, Fledermäusen, Vögeln im Luftraum sowie Kleinsäugetern, Amphibien und Reptilien im terrestrischen Bereich kommen. Der hohe Öffnungswinkel der Wände kompensiert dies zum Teil, da die Tiere zur Öffnung hin geführt werden. Hier bestimmt dann die Gestaltung der Durchlassöffnung die weitere Durchgängigkeit. Der breite Öffnungswinkel hat außerdem den Vorteil, dass gute Lichtverhältnisse herrschen und ausreichend Platz für begrünte Uferbermen (siehe Beispiel 3) vorhanden ist. Gehölzstrukturen im Einlaufbereich auf den Uferbermen können vielen Tieren als Leitstrukturen, Versteck und Ansitz dienen (siehe Beispiel 4).</p> <p>Die Naturseinmauer mit ihren Fugen bietet Kleinstlebensräume für Pflanzen und Tiere. Reptilien und Kleintiere finden beispielsweise in den Zwischenräumen Rückzugs- und Versteckmöglichkeiten, bei ausreichender Tiefe auch Überwinterungsquartiere. Die Natursteinblöcke erwärmen sich auch bei Besonnung sehr stark und bilden ein eigenes Mikrohabitat. Solche künstlich geschaffenen Lebensräume sind oft nicht für den Gewässerstandort typisch, sie können jedoch wertvolle Ersatzhabitate darstellen.</p> |
| <p><b>Verbesserungsmöglichkeit</b></p>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Steinblöcke soweit möglich in das Bauwerk hineinführen und damit auf glatte Betonwände verzichten.</li> <li>• Gehölzentwicklung im Uferbereich zulassen.</li> <li>• Auf die Durchgängigkeit der Durchlassöffnung achten.</li> </ul>  |

**Landschaftsbild**

|  |  |
|--|--|
| <p><b>Wirkung der Bauweise/ des Elements auf das Landschaftsbild</b></p> | <p>Die Betonflächen der Wände sind in Abhängigkeit von ihrer Farbe von weither sichtbar. Auf Grund des technischen Charakters wirken sie als Fremdkörper in der Landschaft. Die Natursteinwände hingegen passen sich besser in das Landschaftsbild ein, insbesondere wenn sie aus gebietstypischem Material bestehen und stark bewachsen sind.</p> |
| <p><b>Verbesserungsmöglichkeit</b></p>                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Betonflächen soweit möglich minimieren oder farblich anpassen (Farbbeton) oder durch Blocksteinmauer, Verblendung mit Natursteinen ersetzen.</li> </ul>   |

## Ein-, bzw. Auslaufbereich: Flügelwand

### 1a) aus Blocksteinen, mit Öffnungswinkel

|                            |  |   |
|----------------------------|--|---|
| <b>Beschreibung</b>        | <p>Die Wände des Einlaufbereichs zu den Durchlässen werden auf gesamter Länge aus abgetrepten Natursteinen ausgebildet. Sie verlaufen mit der gleichen Neigung wie die wasserseitige Dammböschung vom Dammfuß zur Dammkrone, wo sie an das Querbauwerk mit den Durchlassöffnungen anschließen.</p> |  <p>HRB Berwangen, EZB Elsenz-Schwarzbach</p> |
| <b>Technische Funktion</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Stützfunktion gegen den Dammkörper zu beiden Seiten des Durchlassbauwerks</li> <li>• Durchsickerungsbarriere zwischen Dammkörper und Gewässer</li> </ul>  |   |

## Ökologische Aspekte


|   |   |
|---|---|
| <b>Einfluss der Bauweise/ des Elements auf die ökologische Längsdurchgängigkeit</b> | <p>Im Vergleich zu Beispiel 1 ist der Öffnungswinkel geringer und die Wände fast parallel. Damit wird der Lichteinfall reduziert und es kommt bereits zu einem leichten Tunneleffekt. Davon sind hauptsächlich flugfähige Tiere und Insekten betroffen, terrestrische Organismen werden aber ebenfalls in ihrer Wanderbewegung beeinträchtigt.</p> <p>Die positiven Eigenschaften der Natursteinmauer sind in Beispiel 1 beschrieben.</p> |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Eine Verbesserung wird durch die Vergrößerung des Öffnungswinkels erreicht.</li> <li>• Auf die Gestaltung der Durchlassöffnung bezüglich der Durchgängigkeit achten.</li> </ul>  |

## Landschaftsbild

|   |   |
|---|---|
| <b>Wirkung der Bauweise/ des Elements auf das Landschaftsbild</b> | <p>Wie in Beispiel 1 gilt auch hier: Die Natursteine fügen sich in der Regel gut in das Landschaftsbild ein und ein etwaiger Bewuchs lockert das Erscheinungsbild zusätzlich auf.</p> |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>                                   | <p>-</p>  |

## Ein-, bzw. Auslaufbereich: Flügelwand

### 1b) Betonierte, parallele Flügelwände

|                            |  |  |
|----------------------------|--|--|
| <b>Beschreibung</b>        | <p>Der Einlaufbereich des Durchlassbauwerks wird durch zueinander parallele ca. 50 cm dicke Stahlbetonwände begrenzt. Sie verlaufen mit der gleichen Neigung wie die wasserseitige Dammböschung vom Dammfuß zur Dammkrone, wo sie an das Querbauwerk mit den Durchlassöffnungen anschließen.</p> |  <p style="text-align: right;">HRB Wollenberg, EZG Elsenz-Schwarzbach</p> |
| <b>Technische Funktion</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Stützfunktion gegen den Dammkörper zu beiden Seiten des Durchlassbauwerks</li> <li>• Durchsickerungsbarriere zwischen Dammkörper und Gewässer</li> </ul>  |  |

## Ökologische Aspekte

|   |   |  |
|---|---|--|
| <b>Einfluss der Bauweise/ des Elements auf die ökologische Längsdurchgängigkeit</b> | <p>Durch die parallelen Betonwände ergibt sich starker Tunneleffekt und damit eine Behinderung der Durchgängigkeit (vgl. dazu Beispiel 1b).</p> <p>Die glatten und strukturlosen Mauern bieten keinerlei Lebensraumqualitäten.</p>  |  |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Betonwände können durch Natursteinmauern ersetzt oder mit Natursteinen verblendet werden, um die in Beispiel 1 beschriebenen Kleinstlebensräume zu schaffen.</li> <li>• Eine weitere Verbesserung wird durch die Vergrößerung des Öffnungswinkels erreicht.</li> </ul> |  |


## Landschaftsbild

|   |   |  |
|---|---|--|
| <b>Wirkung der Bauweise/ des Elements auf das Landschaftsbild</b> | <p>Siehe Beispiel 1.</p>  |  |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Siehe Beispiel 1.</li> </ul> |  |



## 2) Ein-, bzw. Auslaufbereich: **Sohle**

naturnahe Sohle mit gewässertypischen Querschnitt

|                            |   |  |
|----------------------------|---|--|
| <b>Beschreibung</b>        | <p>Die Sohle im Einlaufbereich des Durchlassbauwerks befindet sich in gewässertypischem, naturnahem Zustand. Die durchflossene Querschnittsfläche entspricht den Werten außerhalb des Durchlassbauwerkes. Die Sohle ist entsprechend geneigt.</p> |  <p>HRB Gemmingen, EZG Elsenz-Schwarzbach</p> |
| <b>Technische Funktion</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Anströmung auf das Bauwerk</li> </ul>  |  |

### Ökologische Aspekte


|   |   |  |
|---|---|--|
| <b>Einfluss der Bauweise/ des Elements auf die ökologische Längsdurchgängigkeit</b> | <p>Durch die gewässertypischen, naturnahen Sohlstrukturen und Strömungsbedingungen finden aquatische Organismen dieselben Lebens- und Wanderbedingungen wie im restlichen Gewässer. Der Gewässerabschnitt im Durchlass ist somit als Lebensraum und Wanderkorridor uneingeschränkt nutzbar. Von ihm geht keine Barrierewirkung aus.</p> |  |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Uferberme sollte an die terrestrischen Strukturen außerhalb des Durchlassbauwerks angeschlossen sein, um einen nahtlosen Übergang für terrestrisch wandernde Arten zu gewährleisten. Siehe dazu auch Beispiel 3.</li> </ul>  |  |

### Landschaftsbild

|   |   |  |
|---|---|--|
| <b>Wirkung der Bauweise/ des Elements auf das Landschaftsbild</b> | <p>Auf Grund der naturnahen, gewässertypischen Gestaltung des Gewässerbetts im Durchlass wird das technische Erscheinungsbild des Bauwerks abgemildert.</p> |  |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>                                   | <p>-</p>  |  |

## Ein-, bzw. Auslaufbereich: **Sohle**

### 2a) naturnahe Sohle mit aufgeweiteten Gewässerquerschnitt

|                            |  |   |
|----------------------------|--|---|
| <b>Beschreibung</b>        | <p>Die Sohle im Einlaufbereich des Durchlassbauwerkes besteht aus gewässertypischem Substrat. Der Gewässerquerschnitt ist im Vergleich zum Gewässer außerhalb des Durchlassbauwerkes aufgeweitet. Die Sohle besitzt keine Neigung.</p> |  <p style="text-align: center;">HRB Wollenberg, EZG Elsenz-Schwarzbach</p> |
| <b>Technische Funktion</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Anströmung des Bauwerkes</li> </ul>   |   |

## Ökologische Aspekte


|   |  |  |
|---|--|--|
| <b>Einfluss der Bauweise/ des Elements auf die ökologische Längsdurchgängigkeit</b> | <p>Durch die Aufweitung und die fehlende Neigung kommt es zu einer erheblichen Verringerung der Fließgeschwindigkeit im Bauwerksbereich. Als Folge lagern sich dort Feinsedimente ab, was zur Verschlammung der Sohle und zur Sauerstoffzehrung führen kann. Strömungsliebende und sauerstoffbedürftige Gewässerbewohner meiden diese Bereiche. Durch die Verschlammung können im Hochwasserfall auch unterstrom gelegene Abschnitte betroffen sein, wenn es dabei zum Austrag von Schlamm kommt.</p> <p>Ein weiterer Effekt der Aufweitung ist eine Verringerung der Wassertiefe. Bei zu geringer Wassertiefe sind größere Tiere, wie beispielsweise viele Fischarten nicht in der Lage diesen Abschnitt zu durchschwimmen.</p> <p>Durch die Verschlammung und durch zu geringe Wassertiefen entstehen somit Wanderbarrieren.</p> |  |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• bauliche Einengung des Wasserlaufs auf ein gewässertypisches Maß</li> <li>• Schaffung einer Uferberme (siehe Beispiel 3)</li> <li>• verstärkte Neigung der Sohle und Schaffung gewässertypischer Strömungsverhältnisse</li> </ul> <p>→ Die Sohle sollte möglichst dem gewässertypischen Zustand außerhalb des Bauwerks entsprechen.</p>   |  |

## Landschaftsbild

|   |  |  |
|---|--|--|
| <b>Wirkung der Bauweise/ des Elements auf das Landschaftsbild</b> | <p>Das langsam fließende bzw. stagnierende Wasser und der aufgeweitete Lauf entsprechen nicht dem natürlichen Erscheinungsbild des Gewässers, der technische Charakter des Bauwerks wird somit betont.</p> |  |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Sohle sollte im Einlaufbereich dem gewässertypischen, naturnahen Zustand entsprechen.</li> </ul>  |  |

### 3) Ein-, bzw. Auslaufbereich: Uferberme

#### beidseitige Uferberme

|                            |  |   |
|----------------------------|--|---|
| <b>Beschreibung</b>        | <p>Zwischen den Flügelwänden und dem Gewässer im Einlaufbereich befindet sich eine ca. 1 - 2 m breite Berme. Die Berme kann entweder aus Steinwurf oder Erdmaterial bestehen und mit Gräsern oder standorttypischer Vegetation bewachsen sein.</p> |  <p style="text-align: center;">HRB Weingarten, EZG Sulm</p> |
| <b>Technische Funktion</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Anpassung des Fließquerschnitts an den Oberlauf des Gewässers und damit Beibehaltung der Fließgeschwindigkeit und der Wassertiefe im Einlaufbereich</li> </ul>  |   |

### Ökologische Aspekte


|   |  |  |
|---|--|--|
| <b>Einfluss der Bauweise/ des Elements auf die ökologische Längsdurchgängigkeit</b> | <p>Die breiten durchgehenden Uferbermen ermöglichen terrestrischen und amphibischen Artengruppen wie Laufkäfern, Kleinsäugetern, Amphibien und Reptilien eine problemlose Passage des Bauwerks. Zudem bieten Sie geeignete Standorte für Pflanzen. Bewachsene Bermen dienen wiederum flugfähigen Insekten, aber auch Vögeln und Fledermäusen als Leitstrukturen. Siehe dazu auch Beispiel 4.</p> <p>Die Uferberme sollte an die terrestrischen Strukturen außerhalb des Durchlassbauwerks angeschlossen sein, um eine lückenlose Fortsetzung des Uferstreifens für terrestrisch wandernde Arten zu gewährleisten.</p> <p>Durch eine gut ausgebildete Uferberme wird die terrestrische Durchgängigkeit gewährleistet.</p> |  |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Der blanke Steinwurf könnte zusätzlich mit Erdreich bedeckt und mit standorttypischen Saatgut begrünt werden (Achtung Neophyten! kein verseuchtes Erdreich benutzen).</li> </ul>  |  |

### Landschaftsbild

|   |  |  |
|---|--|--|
| <b>Wirkung der Bauweise/ des Elements auf das Landschaftsbild</b> | <p>Die Bermen und der Uferbewuchs mildern das technische Erscheinungsbild des Bauwerks ab. Die Vegetation kaschiert zudem etwaige Betonwände (siehe Beispiel 4).</p> |  |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>                                   | <p>-</p>   |  |

## Ein-, bzw. Auslaufbereich: **Uferberme**

### 3a) keine Berme vorhanden

|                            |   |   |
|----------------------------|---|---|
| <b>Beschreibung</b>        | Zwischen den Flügelwänden und dem Gewässer im Einlaufbereich befindet sich keine Berme. |  <p data-bbox="1098 645 1364 705">HRB Eppingen-Rausmühle,<br/>EZG Elsenz-Schwarzbach</p> |
| <b>Technische Funktion</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>•</li> </ul>                                     |   |

## Ökologische Aspekte

|   |  |
|---|--|
| <b>Einfluss der Bauweise/ des Elements auf die ökologische Längsdurchgängigkeit</b> | Für am Ufer entlang wandernde Artengruppen wie Laufkäfer, Kleinsäuger, Amphibien und Reptilien stellen derartige Abschnitte ohne Bermen ein Hindernis dar. |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Anlage durchgängiger, ausreichend breiter Uferbermen (siehe dazu Beispiel 3)</li> </ul>                           |

## Landschaftsbild

|   |  |
|---|--|
| <b>Wirkung der Bauweise/ des Elements auf das Landschaftsbild</b> | Das Fehlen eines durchgehenden Uferstreifens unterstreicht den technischen Charakter des Bauwerks.                               |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Anlage durchgängiger, ausreichend breiter Uferbermen (siehe dazu Beispiel 3)</li> </ul> |

#### 4) Ein-, bzw. Auslaufbereich: **Vegetation**

##### Vegetation im Ein- und Auslaufbereich

|                            |  |  |
|----------------------------|--|--|
| <b>Beschreibung</b>        | <p>Zwischen den Flügelwänden wird ein gewässertypischer Vegetationsstreifen bis an die Stauwand herangeführt. Auf den Dammböschungen werden flachwurzelnden Gehölze zugelassen. Auf Grund der Verklausungsgefahr müssen diese Bereiche intensiv gepflegt und unterhalten werden.</p> |  |
| <b>Technische Funktion</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>keine</li> </ul>  | <p>HRB Stadtseebach, EZG Sulm<br/>Foto: S. Kunze / S. Röck</p>                     |

#### Ökologische Aspekte

|  |  |
|--|--|
| <b>Einfluss der Bauweise/ des Elements auf die ökologische Längsdurchgängigkeit sonstige ökologische Effekte</b> | <p>Die Vegetation im Durchlass und auf der Dammböschung dient vielen Artengruppen als Leitstruktur und bietet zusätzliche Lebensräume und Versteckmöglichkeiten. Die Längsdurchgängigkeit und Besiedelbarkeit des Bauwerks wird deutlich verbessert. Die Vegetation erhöht die strukturelle Vielfalt des Gewässerufers und sorgt für eine Beschattung des Gewässerabschnitts, wovon auch die aquatischen Bewohner profitieren.</p> |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>  | <p>-</p>   |

#### Landschaftsbild

|   |   |
|---|---|
| <b>Wirkung der Bauweise/ des Elements auf das Landschaftsbild</b> | <p>Der Bewuchs kaschiert das technische Erscheinungsbild des Bauwerks, wodurch sich dieses in der Regel besser in das Umfeld einfügt.</p> |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>                                   | <p>-</p>  |

## Ein-, bzw. Auslaufbereich: **Vegetation**

### 4a) keine Vegetation

|                            |  |   |
|----------------------------|--|---|
| <b>Beschreibung</b>        | <p>Im Ein- und Auslaufbereich werden keine Büsche oder ähnliches zugelassen. Die Dammböschungen sind nur mit einer Grasnarbe versehen.</p> |  <p>HRB Mönchzell, EZG Elsenz-Schwarzbach<br/>Foto: S. Kunze</p> |
| <b>Technische Funktion</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>keine</li> </ul>  |   |

## Ökologische Aspekte

|   |  |
|---|--|
| <b>Einfluss der Bauweise/ des Elements auf die ökologische Längsdurchgängigkeit</b> | <p>Im gehölzfreien Einlaufbereich und auf dem Damm fehlen Leitstrukturen. In Folge kann die Passierbarkeit des Bauwerks gerade für flugfähige Insekten und Fledermäuse eingeschränkt sein.</p> <p>Die gehölzfreien Bereiche erwärmen sich stärker als beschattete Bachabschnitte, was bestimmten Tiergruppen zu Gute kommen kann (z.B. Libellen), im Sommer jedoch zu einer starken Erwärmung des Wassers, verstärktem Algenwachstum und zu Sauerstoffdefiziten führen kann.</p> |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Anlage durchgängiger, ausreichend breiter Uferbermen (siehe dazu Beispiel 3)</li> </ul>   |

## Landschaftsbild

|   |  |
|---|--|
| <b>Wirkung der Bauweise/ des Elements auf das Landschaftsbild</b> | <p>Das Fehlen von Ufervegetation unterstreicht den technischen Charakter des Bauwerks.</p>                                     |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Anlage durchgängiger, ausreichend breiter Uferbermen (siehe dazu Beispiel 3)</li> </ul> |

## 5) Ein-, bzw. Auslaufbereich: **Tosbecken** mit Störkörper

|                            |   |  |
|----------------------------|---|--|
| <b>Beschreibung</b>        | <p>Im Bereich des Schiebers treten bei Einstau hohe Fließgeschwindigkeiten auf. Im Bereich des Tosbeckens eingebrachte Störkörper, z.B. große Wasserbausteine vergrößern die Energiedissipation und reduzieren die Fließgeschwindigkeiten im anschließenden Gewässerbett.</p> |  <p>HRB Hälden, EZG Neuenstädter Brettach<br/>Foto: S. Röck</p> |
| <b>Technische Funktion</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhöhung der Energiedissipation</li> <li>• Verringerung der Fließgeschwindigkeiten im Gewässerbett</li> <li>• Stützung des Wechselsprunges</li> </ul>  |  |

### Ökologische Aspekte


|   |  |
|---|--|
| <b>Einfluss der Bauweise/ des Elements auf die ökologische Längsdurchgängigkeit</b> | <p>In diesem Beispiel sind Betriebsdurchlass und Ökogerinne getrennt (siehe Durchlassbeispiel 6a), so dass die Konstruktion des Betriebsauslasses keinen wesentlichen Einfluss auf die Durchgängigkeit hat. Problematisch ist allerdings der Austrag von Sediment aus dem Tosbecken bei einem Hochwasserereignis.</p> <p>Das Tosbecken kann bedingt als Ersatzlebensraum für Stillgewässer wirken.</p> |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>   | <p>-</p>   |

### Landschaftsbild

|   |   |
|---|---|
| <b>Wirkung der Bauweise/ des Elements auf das Landschaftsbild</b> | <p>Die Steine haben in der Regel keine optische Fernwirkung, sie lockern jedoch das Erscheinungsbild des Durchlassbereichs auf.</p> |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>                                   | <p>-</p>  |

## Ein-, bzw. Auslaufbereich: Tosbecken

### 5a) mit Sohlschwelle

|                            |  |  |
|----------------------------|--|--|
| <b>Beschreibung</b>        | <p>Am Übergangsbereich des Durchlassbauwerks in das Gewässerbett ist eine überströmte, betonierte Sohlschwelle mit senkrechten Flächen angeordnet.</p>   |  <p>HRB Leingarten, EZG Leintal</p> |
| <b>Technische Funktion</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• räumliche Begrenzung des Tosbeckens</li> <li>• Erhöhung der Energiedissipation</li> <li>• Verringerung der Fließgeschwindigkeiten im anschließenden Gewässerbett</li> <li>• Stützung des Wechselsprunges</li> </ul> |  |

## Ökologische Aspekte

|   |  |
|---|--|
| <b>Einfluss der Bauweise/ des Elements auf die ökologische Längsdurchgängigkeit</b> | <p>Schwellen können für Kleinlebewesen und schwimmschwache Fische eine Barriere darstellen. Hier stellt die vorhandene Schwelle darüber hinaus eine Sedimentfalle dar - eine Verschlammung des Tosbeckens kann die Folge sein. Im Hochwasserfall wird der abgelagerte Schlamm dann ausgespült und kann sich auf unterhalb gelegene Bachabschnitte negativ auswirken.</p> |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Entfernung der Schwelle, Ersatz z.B. durch versetzt eingebrachte Natursteinblöcke oder Flussbausteine</li> </ul>  |


## Landschaftsbild

|   |              |
|---|--------------|
| <b>Wirkung der Bauweise/ des Elements auf das Landschaftsbild</b> | <p>keine</p> |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>                                   | <p>-</p>     |



## 6) Durchlass – Schieber

ein oder zwei Schieber, gesteuert

|                            |  |  |
|----------------------------|--|--|
| <b>Beschreibung</b>        | <p>Sind große Betriebsabflüsse zulässig, kann auch eine große Durchlassöffnung in der Schieberwand über beide Uferbermen und das Gewässerbett hergestellt werden. Bei gesteuerten Becken ist der Schieber außerhalb des Betriebs ganz offen.</p> |  |
| <b>Technische Funktion</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Abflussdrosselung</li> </ul>  |  |

HRB Nöttingen, EZG Pfinz und  
HRB Waibstadt, EZG Schwarzbach (Foto: S. Röck)

## Ökologische Aspekte


|   |  |
|---|--|
| <b>Einfluss der Bauweise/ des Elements auf die ökologische Längsdurchgängigkeit</b> | <p>Das Gewässer durchfließt auf seiner gesamten Breite das Durchlassbauwerk. Damit ist eine durchgehende Gewässersohle mit weitgehend gewässertypischen Substratverhältnissen im Durchlassbauwerk vorhanden und die aquatische Durchgängigkeit gegeben. Auch flugfähige Tiere können das Bauwerk problemlos passieren, da eine große Öffnung die Orientierung vereinfacht. Einzig die terrestrische Durchwanderbarkeit ist aufgrund des Fehlens eines durchgehenden Ufers nicht gewährleistet.</p> |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>   | <p>Anlage von durchgehenden Uferbermen oder sonstigen Uferstrukturen.</p>  |

## Landschaftsbild

|   |   |
|---|---|
| <b>Wirkung der Bauweise/ des Elements auf das Landschaftsbild</b> | <p>Die recht großen Schieber haben in Abhängigkeit von ihrer Farbe eine mehr oder weniger große Fernwirkung. Dies unterstreicht dementsprechend den technischen und künstlichen Charakter des Bauwerks.</p> |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gehölze als Sichtschutz</li> <li>• farblich dezente Gestaltung der Schieber bzw. künstlerische Gestaltung</li> </ul>   |

## Durchlass – Schieber

### 6a) Betriebsauslass und Gewässerkorridor

|                            |  |   |
|----------------------------|--|---|
| <b>Beschreibung</b>        | <p>Das Durchlassbauwerk wird durch eine Trennwand in einen Betriebsauslass und ein zweites Gerinne, das so genannten „Ökogerinne“, unterteilt. Mit dieser Kombination soll sichergestellt werden, dass im Falle eines hohen erforderlichen Regelabflusses möglichst keine Beeinträchtigungen des ökologischen Systems im Ökogerinne durch hohe Fließgeschwindigkeiten verursacht werden.</p> |  <p>HRB Leingarten, EZG Leintal</p> |
| <b>Technische Funktion</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Abflussdrosselung</li> </ul>  |   |

## Ökologische Aspekte


|   |  |  |
|---|--|--|
| <b>Einfluss der Bauweise/ des Elements auf die ökologische Längsdurchgängigkeit</b> | <p>Bei entsprechender Gestaltung (gewässertypische Substratzusammensetzung, durchgängiges Interstitial und Gewässerbett, durchgehende Uferbermen) geht vom Ökogerinne keine nennenswerte Barrierewirkung aus, da das Gewässer ohne Hindernis durch geleitet wird. Es ist darauf zu achten, dass im Betriebsfall das Ökogerinne nicht ausgespült wird, um die im Laufe der Zeit entstandenen Strukturen und Substrate zu erhalten. Bei fehlenden Substraten entsteht eine Wanderbarriere für aquatische Kleinlebewesen.</p> |  |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• In dem oben gezeigten Beispiel fehlen Uferbermen, wodurch die terrestrische Durchgängigkeit eingeschränkt ist. Uferbermen sollten angelegt werden (siehe Beispiel 3).</li> </ul>  |  |

## Landschaftsbild

|   |   |  |
|---|---|--|
| <b>Wirkung der Bauweise/ des Elements auf das Landschaftsbild</b> | <p>Durch die Trennwand wird der optische Eindruck des Bauwerks massiver und die Fernwirkung damit größer.</p> |  |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• filigranere Bauweise</li> <li>• Einsatz farbigen Betons</li> </ul>   |  |

## Durchlass – Schieber

### 6b) Öko- und Betriebsschieber

|                            |   |   |
|----------------------------|---|---|
| <b>Beschreibung</b>        | <p>Je ein Schieber ist im aquatischen Bereich (Ökoschieber) und im Bereich der Uferberme (Betriebsauslass) angeordnet. Der Schieber im Gewässer bleibt bei kleinen Hochwasserereignissen offen, um eine gewässertypische Fließdynamik auch im Durchlassbereich zu erreichen. Bei höheren Abflüssen wird dieser Schieber geschlossen, um ein Austragen des Sohlensubstrats zu verhindern. Mit dem Betriebsauslass (Schieber bei der Uferberme) wird im Einstaufall der Regelabfluss abgegeben.</p> |  <p>HRB Weingarten, EZG Sulm<br/>Foto: K. Schwenninger</p> |
| <b>Technische Funktion</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Abflussdrosselung</li> </ul>   |   |

## Ökologische Aspekte

|   |  |
|---|--|
| <b>Einfluss der Bauweise/ des Elements auf die ökologische Längsdurchgängigkeit</b> | <p>Wie in Beispiel 1b ist auch hier die aquatische Durchgängigkeit gegeben, sofern das Gerinne entsprechend gestaltet ist.</p> <p>Die terrestrische Durchgängigkeit ist gegeben, sofern der Betriebsauslass keine Schwellen aufweist und für Tiere gut auffindbar ist. Ein Selektionseffekt kann hier in Abhängigkeit von der Größe des Betriebsauslasses auftreten.</p> |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Im gezeigten Beispiel muss die Betonschwelle am Betriebsauslass abgeflacht oder ganz entfernt werden, um eine vollständige terrestrische Durchgängigkeit zu gewährleisten.</li> </ul>   |

## Landschaftsbild

|   |       |
|---|-------|
| <b>Wirkung der Bauweise/ des Elements auf das Landschaftsbild</b> | keine |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>                                   | -     |

**Durchlass – Schieber****6c) ein Schieber, ungesteuert**

|                            |  |   |
|----------------------------|--|---|
| <b>Beschreibung</b>        | Bei ungesteuerten Becken ist die Spaltweite auf den Regelabfluss bei vollgefülltem Becken eingestellt. |  <p style="text-align: center;">HRB Wollenberg, EZG Elsenz-Schwarzbach</p> |
| <b>Technische Funktion</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Abflussdrosselung</li> </ul>                                  |   |

**Ökologische Aspekte**


|   |  |  |
|---|--|--|
| <b>Einfluss der Bauweise/ des Elements auf die ökologische Längsdurchgängigkeit</b> | <p>Durch den eigentlichen Betriebsschieber wird nur die Durchgängigkeit im aquatischen Bereich gewährleistet. Da keine Uferbermen vorhanden sind, ist keine terrestrische Durchgängigkeit gewährleistet. Der Luftraum über dem Wasser wird zudem stark eingeschränkt, da der Schieber fast geschlossen ist. Der Spalt kann allenfalls von wenigen Tieren durchfliegen werden.</p> <p>Ein weiteres Problem ist hier der im Hochwasserfall eintretende Düseneffekt im Bereich des Schiebers. Dadurch wird das vorhandene Substrat vollständig ausgespült. Fehlendes Substrat stellt ein Wanderhindernis für viele wandernde aquatische Organismen dar.</p> |  |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Anlage von Bermen</li> <li>• Einsatz eines gesteuerten Schiebers oder einer Schwingklappe</li> </ul>  |  |

**Landschaftsbild**

|   |  |  |
|---|--|--|
| <b>Wirkung der Bauweise/ des Elements auf das Landschaftsbild</b> | <p>Der uferlose Durchlassbereich und die großen Betonflächen wirken sehr technisch und unbelebt, die geringe Durchlasshöhe des Schiebers unterstreicht den Eindruck.</p> |  |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Anlage von Bermen</li> <li>• Einsatz eines gesteuerten Schiebers oder einer Schwingklappe</li> </ul>                            |  |

**7) Durchlass – Uferberme**

keine durchgehende Uferberme

|                            |   |  |
|----------------------------|---|--|
| <b>Beschreibung</b>        | <p>Die Uferbermen werden im Ober- und Unterwasser bis an die Stauwand geführt. Im Bereich der Schieberöffnung sind die Berme unterbrochen. Zusätzlich ist ein definiertes Widerlager für den Schieber in Form einer betonierten Schwelle vorhanden.</p> |  <p>HRB Halden, EZG Neuenstädter Brettach</p> |
| <b>Technische Funktion</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sicherstellung des Abflussquerschnittes</li> <li>• definiertes Widerlager für die Schieberplatte</li> </ul>  |  |


**Ökologische Aspekte**

|   |  |
|---|--|
| <b>Einfluss der Bauweise/ des Elements auf die ökologische Längsdurchgängigkeit</b> | <p>Für am Ufer entlang wandernde terrestrische und amphibische Artengruppen (Laufkäfer, Kleinsäuger, Amphibien und Reptilien) stellt die Unterbrechung der Berme am Schieber ein Hindernis dar. Die Tiere können den Durchlass nicht überwinden, da sie meist nicht schwimmen können.</p> <p>Die Sohlschwelle im Wasser kann für schwimmschwache Fische und Kleinlebewesen ebenfalls eine Barriere darstellen. Zudem wird das Lückensystem der Gewässersohle (Interstitial) unterbrochen, welches auch als Wanderkorridor dient.</p> <p>Aus hydraulischer Sicht wirkt die Sohlschwelle als Geschiebefalle. Im Betriebsfall wird der abgelagerte Schlamm dann ausgespült und kann sich auf unterhalb gelegene Bachabschnitte negativ auswirken.</p> |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Uferberme sollte lückenlos durch den Durchlass geführt werden.</li> <li>• Querstrukturen sind im Durchlassbereich zu vermeiden.</li> </ul>  |

**Landschaftsbild**

|   |       |
|---|-------|
| <b>Wirkung der Bauweise/ des Elements auf das Landschaftsbild</b> | keine |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>                                   | -     |

**8) Durchlass – Rechen****Palisade - Grobrechen**

|                            |   |   |
|----------------------------|---|---|
| <b>Beschreibung</b>        | <p>Zum Schutz der Kontrollöffnung vor Verklausung wird oberstrom des Durchlasses eine Palisadenreihe mit einer Spaltweite von mindestes 30 cm eingerammt. Über einen Zufahrtsweg kann das Schwemmgut z. B. mit einem Traktor maschinell abgeräumt werden.</p> |  |
| <b>Technische Funktion</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Geschwemmsel wird abgehalten.</li> </ul>   |   |

HRB Mönchzell, EZG Elsenz-Schwarzbach


**Ökologische Aspekte**

|   |  |
|---|--|
| <b>Einfluss der Bauweise/ des Elements auf die ökologische Längsdurchgängigkeit</b> | <p>Der Rechen beeinflusst die Durchgängigkeit höchstens zeitweise. Kommt es am Rechen zu Verklausungen, können diese für aquatische Tiere ein Hindernis darstellen. Da zeitweise Verklausungen auch in natürlichen Gewässern vorkommen, sind die Organismen meist an diese Beeinträchtigung angepasst.</p> |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>   | <p>-</p>   |

**Landschaftsbild**

|   |   |
|---|---|
| <b>Wirkung der Bauweise/ des Elements auf das Landschaftsbild</b> | <p>Der Grobrechen ist meist schon von Ferne zu sehen, kann jedoch auch das dahinter liegende Betonbauwerk kaschieren.</p> |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kunst am Holz (z.B. bei siedlungsnahe Anlagen)</li> </ul>                        |

**Durchlass – Rechen****8a) Rechen, Stababstand 25 cm**

|                            |   |   |
|----------------------------|---|---|
| <b>Beschreibung</b>        | <p>Auf der Uferberme ist vor dem Betriebsauslass eines mit einem Ökoschieber ausgestatteten Beckens ein Rechen mit einem Stababstand von ca. 25 cm angeordnet. Der Rechen reicht bis zum Boden und ist für Revisionszwecke mit einer Luke ausgestattet.</p> |  <p>HRB Weingarten, EZG Sulm</p> |
| <b>Technische Funktion</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Geschwemmsel wird abgehalten.</li> </ul>   |   |


**Ökologische Aspekte**

|   |  |
|---|--|
| <b>Einfluss der Bauweise/ des Elements auf die ökologische Längsdurchgängigkeit</b> | <p>Sofern das Geschwemmsel nach einem Einstau entfernt wird, geht von dem Rechen keine Behinderung der terrestrischen Durchgängigkeit aus.</p> |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>   | <p>-</p>   |

**Landschaftsbild**

|   |   |
|---|---|
| <b>Wirkung der Bauweise/ des Elements auf das Landschaftsbild</b> | <p>Dieser Rechentyp betont das technische Erscheinungsbild des Durchlasses, die Fernwirkung ist jedoch geringer als beim Beispiel 8b.</p> |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gehölze vor dem Durchlass können den Rechen kaschieren.</li> </ul>                               |

**Durchlass – Rechen****8b) räumlicher Feinrechen, Stababstand 12 cm**

|                            |  |   |
|----------------------------|--|---|
| <b>Beschreibung</b>        | <p>Vor der Kontrollöffnung wird ein Rechen zum Schutz vor Geschwemmsel angebracht.</p> <p>Grundsätzlich sollte der Rechen nicht bis auf die Sohle reichen. Kleinere mitgeführte Teile sollten nicht aufgehalten werden und durch den Durchlass mit der fließenden Welle hindurch geführt werden.</p> |  |
| <b>Technische Funktion</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Geschwemmsel wird abgehalten.</li> </ul>  |   |

HRB Mönchzell, EZG Eisenz-Schwarzbach

**Ökologische Aspekte**

|   |  |
|---|--|
| <b>Einfluss der Bauweise/ des Elements auf die ökologische Längsdurchgängigkeit</b> | <p>Sofern der Feinrechen nicht bis zum Boden bzw. zur Wasseroberfläche reicht, geht von ihm keine nennenswerte Barrierewirkung aus. Für Vögel und Fledermäuse sollte der Abstand zwischen Rechenunterkante und Wasseroberfläche mindestens 1 m betragen.</p> |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>   | -  |


**Landschaftsbild**

|   |  |
|---|--|
| <b>Wirkung der Bauweise/ des Elements auf das Landschaftsbild</b> | <p>Der Feinrechen unterstreicht den technischen Charakter des Bauwerks sehr stark und ist meist auch von größerer Entfernung zu sehen.</p> |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gehölze vor dem Durchlass können das Bauwerk kaschieren.</li> </ul>                               |



## 9) HW-Entlastung – im Bauwerk integriert

### Überfall

|                            |   |   |
|----------------------------|---|---|
| <b>Beschreibung</b>        | <p>Das Durchlassbauwerk ist so dimensioniert, dass auch die Hochwasserabfuhr integriert werden konnte. Über eine feste Überfallkante wird im Hochwasserfall das Wasser über die Stauwand hinweg abgeleitet.</p> |  |
| <b>Technische Funktion</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hochwasserentlastung</li> </ul>  |   |

HRB Daudenzell, EZG Elsenz-Schwarzbach


## Ökologische Aspekte

|   |  |  |
|---|--|--|
| <b>Einfluss der Bauweise/ des Elements auf die ökologische Längsdurchgängigkeit</b> | <p>Beim Betrieb der integrierten HW-Entlastung wird durch den Überfallstrahl das Sohlmaterial in großem Umfang unterhalb des Durchlasses ausgeschwemmt. Aufgrund des fehlenden Substrats können Wanderbarrieren für aquatische Wirbellose entstehen. Da die HW-Entlastung in der Regel nur selten benötigt wird, sind die Effekte jedoch meist vernachlässigbar, sofern sich die Sohlstruktur regeneriert.</p> |  |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• HW-Entlastung über separates Bauwerk und Tosbecken</li> </ul>   |  |

## Landschaftsbild

|   |  |  |
|---|--|--|
| <b>Wirkung der Bauweise/ des Elements auf das Landschaftsbild</b> | <p>Die HW-Entlastung kann je nach Gestaltung eine große optische Fernwirkung entfalten und den technischen Charakter des Bauwerks betonen.</p>                                       |  |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• dezente Farben für den Anstrich verwenden</li> <li>• Gehölze vor dem Durchlass können das Bauwerk zumindest zum Teil kaschieren.</li> </ul> |  |

**HW-Entlastung – im Bauwerk integriert****9a) Fischbauchklappe oder ähnliches**

|                            |   |   |
|----------------------------|---|---|
| <b>Beschreibung</b>        | <p>Das Durchlassbauwerk ist so dimensioniert, dass auch die Hochwasserabfuhr integriert werden konnte. Über steuerbare Verschlüsse (z. B. Fischbauchklappen) kann der Wasserstand im Becken reguliert werden.</p> |  <p>HRB Bernau-Waibstadt,<br/>EZG Elsenz-Schwarzbach</p> |
| <b>Technische Funktion</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hochwasserentlassung</li> </ul>  |   |

**Ökologische Aspekte**

|   |  |
|---|--|
| <b>Einfluss der Bauweise/ des Elements auf die ökologische Längsdurchgängigkeit</b> | <p>Hier sind die gleichen Auswirkungen zu erwarten, wie in Beispiel 9.</p> |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>   | <p>-</p>   |

**Landschaftsbild**

|   |   |
|---|---|
| <b>Wirkung der Bauweise/ des Elements auf das Landschaftsbild</b> | <p>Siehe Beispiel 9.</p>  |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Siehe Beispiel 9.</li> </ul> |

## 10) HW-Entlastung – außerhalb des Durchlassbauwerkes

### Überströmbarer Damm mit Mastix-Schotter

|                            |   |   |
|----------------------------|---|---|
| <b>Beschreibung</b>        | <p>Bei diesem Beckentyp wurde auf einen Freibord verzichtet und die komplette luftseitige Böschung wurde bezüglich der hydraulischen Belastungen gesichert. Unter einer Opferschicht gewährleistet die Asphalt-Mastix die Standsicherheit des Damms bei Überströmung.</p> |  <p>HRB Mönchzell, EZG Elsenz-Schwarzbach</p> |
| <b>Technische Funktion</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hochwasserentlassung</li> </ul>  |   |

## Ökologische Aspekte


|   |  |  |
|---|--|--|
| <b>Einfluss der Bauweise/ des Elements auf die ökologische Längsdurchgängigkeit</b> | <p>Die aquatische Durchgängigkeit ist hier nicht betroffen. Allerdings kann das Abschwemmen der Opferschicht negative Auswirkungen auf unterhalb gelegene Bachabschnitte haben, da die Sedimentfracht erhöht wird.</p> <p>Der Bewuchs der überströmbar Dammscharte wirkt sich positiv auf die terrestrische Durchgängigkeit des Damms aus.</p> |  |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Um die terrestrische Durchgängigkeit über den Damm zu verbessern wären Leitstrukturen vorteilhaft. Allerdings lässt die Asphalt-Mastix keinen Gehölzbewuchs auf dem Damm zu.</li> </ul>   |  |

## Landschaftsbild

|   |   |  |
|---|---|--|
| <b>Wirkung der Bauweise/ des Elements auf das Landschaftsbild</b> | <p>Die grüne Böschung passt sich meist gut in das Landschaftsbild ein, allerdings ist die gerade, gesicherte Dammoberkante oft von weitem sichtbar.</p> |  |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• asymmetrische Gestaltung des Damms</li> <li>• Variation der Böschungsneigung</li> </ul>                        |  |

## HW-Entlastung – außerhalb des Durchlassbauwerkes

### 10a) Dammscharte

|                            |   |   |
|----------------------------|---|---|
| <b>Beschreibung</b>        | <p>Die Hochwasserentlastungsanlage befindet sich außerhalb des Durchlassbauwerkes und besteht aus einer im Damm eingebrachten Scharte. Die luftseitige Böschung ist im Bereich der Scharte für die hydraulische Belastung aus der Überströmung gesichert.</p> |  |
| <b>Technische Funktion</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hochwasserentlassung</li> </ul>  | <p>HRB Epfenbach, EZG Elsenz-Schwarzbach</p>  |

## Ökologische Aspekte

|   |  |
|---|--|
| <b>Einfluss der Bauweise/ des Elements auf die ökologische Längsdurchgängigkeit</b> | <p>Die aquatische Durchgängigkeit ist hier nicht betroffen.<br/>Die befestigte Steinschüttung der Scharte kann für Wärme liebende Tiere und Pflanzen geeignete (Ersatz-)Lebensräume darstellen. Gerade Reptilien besiedeln die Steinschüttungen gerne.</p> |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>   | <p>-</p>   |

## Landschaftsbild

|   |  |
|---|--|
| <b>Wirkung der Bauweise/ des Elements auf das Landschaftsbild</b> | <p>Die mit Steinschüttung gesicherte Scharte hat eine große Fernwirkung, insbesondere wenn ortsfremdes Steinmaterial verwendet wird. Sie wirkt jedoch meist weniger technisch als die in den Durchlass integrierten Anlagen.</p> |
| <b>Verbesserungsmöglichkeit</b>                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verwendung gebietstypischen Materials</li> <li>• Begrünung</li> <li>• asymmetrische Linienführung</li> </ul>  |